

UNIVERSITÄT STUTTGART
INSTITUT FÜR THERMODYNAMIK UND WÄRMETECHNIK
Professor Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen

itw

Abschlussbericht zum Vorhaben

Weiterentwicklung der
Erdbecken-Wärmespeichertechnologie

FKZ 0329607 E

Fabian Ochs

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart,

Prof. Dr. Dr.-Ing. H. Müller-Steinhagen

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel. +49 711 685 6 3536, Fax: +49 711 685 6 3503

in Zusammenarbeit mit

Pfeil und Koch Ingenieurgesellschaft (PKi)

Marienstr. 37, 70178 Stuttgart

Tel.: +49 711 674474 0, Fax: +49 711 674474 10

Ingenieurbüro Lichtenfels

Bergstr. 11, 75210 Keltern

Tel./Fax: +49 7236 7348



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

PTJ
Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Inhalt

1	Projektbeschreibung	14
1.1	Projektphasen	14
1.2	Technisch/Wirtschaftliche Ziele des Vorhabens	15
2	Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher	18
2.1	Speichertypen	19
2.2	Speichermedium: Kies-Wasser vs. Heißwasser	20
3	Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher	24
4	Konstruktion von Wärmespeichern	28
4.1	Geometrie	28
4.2	Erdbau, Tiefbau, Spezialtiefbau	30
4.3	Wandaufbau	32
4.4	Abdeckung	34
5	Materialien	38
5.1	Wärmedämmung	38
5.2	Abdichtung	45
5.2.1	Stahl, Edelstahl	46
5.2.2	Mineralische Dichtungsbahn	47
5.2.3	Bituminöse Abdichtungen, Asphaltbeton	49
5.2.4	Kunststoffdichtungsbahnen	49
5.2.5	Alterung von Kunststoffdichtungsbahnen	56
6	Innenlaborversuche	63
6.1	Permeation	63
6.1.1	Wasserdurchlässigkeit durch Bentonitmatten	63
6.1.1.1	Theoretische Grundlagen	63
6.1.1.2	Versuchsaufbau zur Permeationsmessung von Bentonitmatten	65
6.1.1.3	Messung der Permeation durch Bentonitmatten	67
6.1.1.4	Bewertung der Ergebnisse	73
6.1.2	Wasserdampfdiffusion durch Kunststoffdichtungsbahnen	76
6.1.2.1	Grundlagen	76
6.1.2.2	Fick'sche vs. Stefan'sche Diffusion	79
6.1.2.3	Messeinrichtung	80
6.1.2.4	Ergebnisse	81
6.1.2.5	Qualitative Untersuchungen	83
6.1.2.6	Vergleich mit Literaturwerten	85
6.1.2.7	Schlussfolgerungen zur Permeation	89
6.2	Reißfestigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen	89
6.2.1	Auswertung Zugversuche	90
6.2.2	Schlussfolgerung	92

6.3	Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen	93
6.3.1	Messaufbau und Versuchsdurchführung	96
6.3.2	Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen	101
6.3.3	Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoff-Platten	104
6.3.4	Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Verdichtungsgrades	106
6.3.4.1	Motivation	106
6.3.4.2	Messprogramm	109
6.3.4.3	Verdichtungseinheit	110
6.3.4.4	Modellierung der Wärmeleitfähigkeit mit dem erweiterten Schichtenmodell	111
6.3.4.5	Reproduzierbarkeit	115
6.3.4.6	Praktische Anwendung der Ergebnisse	116
6.3.4.7	Wasseraufnahme und Trocknung	118
6.3.4.8	Sorptionsisotherme	122
6.3.4.9	Schlussfolgerungen zur Verdichtung von Dämmstoffschüttungen	126
6.3.4.10	Schlussfolgerungen zur von Dämmstoffschüttungen	127
6.4	Reibungswinkel von schüttfähiger Dämmung	128
6.4.1	Reibung bei körnigem Material	128
6.4.2	Schergerade	128
6.5	Wärmespeichermaterialien	130
6.6	Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports	131
6.6.1	Stand der Technik	131
6.6.2	Eigene Arbeiten	134
6.6.3	Grenzen	134
7	Konzepte + Außenlaborversuche	136
7.1	Erdbau, modularer Speicher	141
7.2	Technikzentrale	145
7.3	Wandaufbau	147
7.3.1	Wärmedämmung	150
7.3.1.1	Geocontainer	151
7.3.1.2	Schalungsvarianten	153
7.3.1.3	Schalungstafel	153
7.3.1.4	Membranschalung	154
7.3.1.5	Evakuierung dämmstoffgefüllter Kammern	155
7.3.1.6	Boden- und Deckeldämmung	156
7.3.1.7	Sonstige Varianten	158
7.3.1.8	Zusammenfassung Wärmedämmung	159
7.3.2	Dampfsperre und Abdichtung	159
7.3.3	Dichtigkeitsprüfung	165
7.3.4	UV-Beständigkeit	166
7.3.5	Alterung und Degradation	167

7.3.6	Zusammenfassende Bewertung der eingesetzten Materialien	168
7.4	Wärmeleitfähigkeit im Betrieb	170
7.4.1	Motivation	170
7.4.2	Messmethoden	171
7.4.2.1	Messungen im Außenlabor	171
7.4.2.2	Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mittels energetischer Bilanzierung	176
7.4.2.3	Langzeiteffekte	181
7.4.2.4	Wärmedämmung ausgeführter Pilotprojekte	182
7.4.2.5	Schlussfolgerung	185
7.5	Integrierter Pufferspeicher	185
7.6	Direktes Be- und Entladesystem	187
7.7	Schichtbetladesystem	188
7.8	Speicherabdichtung mit kontrollierter Wasserdurchlässigkeit	188
7.8.1	Konzept	188
7.8.2	Versuchsdurchführung	190
7.8.2.1	Versuchsaufbau	190
7.8.2.2	Auswertung	191
7.8.3	Schlussfolgerungen	192
7.9	Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe	193
7.9.1	Motivation	193
7.9.2	Konzept	195
7.9.3	Versuchsaufbau	197
7.9.4	Simulation der Strömung durch poröse Medien	198
7.9.5	Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messdaten	201
7.9.6	Schlussfolgerungen zum Versuch Wasserwegsamkeit	205
7.10	Speicherabdeckung für Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher	205
7.10.1	Grundlagen	205
7.10.1.1	Modularer Aufbau	206
7.10.1.2	Nicht-Modularer Aufbau	207
7.10.2	Stand der Technik schwimmender Abdeckungen	208
7.10.2.1	Begehbarkeit	210
7.10.3	Aufschwimmende Abdeckung	211
7.10.3.1	Motivation	211
7.10.3.2	Versuchsaufbau und -durchführung	212
7.10.3.3	Einschränkungen und Grenzen	213
7.10.4	Schwimmende Abdeckung	217
7.10.4.1	Problemstellung	217
7.10.4.2	Konzept für eine optimierte schwimmende Abdeckung	218
7.10.5	Erdüberschüttete schwimmende Abdeckung	221
7.10.6	Abdeckung mit evakuierter Wärmedämmung	222
7.10.7	Freitragende Abdeckung	225
7.10.7.1	Grundlagen	225

7.10.7.2	Fertigung der Fertigteile	226
7.10.7.3	Vorversuche	229
7.10.7.4	Fertigung der Sandwichelemente	230
7.10.7.5	Aufbau der Abdeckung	232
7.10.7.6	Monitoring – Auswertung	241
7.10.7.7	Schlussfolgerungen	241
7.11	Innen liegender Membranausdehnungsbehälter	242
7.11.1	Konzept	242
7.11.2	Größe des Ausdehnungsvolumens	244
7.11.3	Auftriebssicherung	244
7.11.4	Versuchsaufbau	246
7.12	Fazit der Außenlaborversuche	247
8	Kosten	248
8.1	Allgemeine Einführungen zu Kosten von Langzeit-Wärmespeichern	248
8.2	Kosten von Spezialtiefbauverfahren	259
8.3	Gesamtfazit Kosten	262
9	Forschungsbedarf	264

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

A	$[m^2]$	Fläche
A	$[-]$	Koeffizient
a_1, a_2	$[-]$	Exponentialkoeffizient
B	$[-]$	Koeffizient
c_v	$[kJ\ kg^{-1}K^{-1}]$	volumetrische Wärmekapazität
C	$[-]$	Koeffizient für Strömungsgleichung in Fluent
C	$[-]$	Trägheitswiderstand
d	$[m]$	Dicke
D_v	$[m^2s^{-1}]$	Diffusionskoeffizient
F	$[N]$	Kraft
g	$[m\ s^{-2}]$	Erdbeschleunigung
h	$[m]$	Höhe
H_w	$[m]$	Wassersäule
i	$[-]$	hydraulischer Gradient
k	$[m\ s^{-1}]$	hydraulische Leitfähigkeit
k_f	$[kg\ s^{-2}]$	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
l	$[m]$	Länge
m	$[W\ m^{-1}K^{-1}°C]$	Linearkoeffizient
\dot{m}	$[kg\ s^{-1}]$	Massenstrom
P	$[Pa]$	Druck
P	$[kg\ s^{-1}m^{-1}Pa^{-1}]$	Permeationskoeffizient
p_v	$[Pa]$	(Dampf-)Partialdruck
\dot{Q}	$[W]$	Wärmestrom
q	$[W\ m^{-2}]$	Wärmestromdichte
R	$[m^{-2}K\ W^{-1}]$	Wärmewiderstand
R_v	$[kJ\ kg^{-1}K^{-1}]$	Gaskonstante
S	$[kg\ m^{-3}Pa^{-1}]$	Sorptionskoeffizient
t	$[s]$	Zeit
T	$[K]$	Temperatur
u	$[kg\ m^{-3}]$	Wassergehalt
U	$[m]$	Umfang
U	$[J]$	innere Energie
V	$[m^3]$	Volumen
\dot{V}	$[m^3s^{-1}]$	Volumenstrom
w	$[m\ s^{-1}]$	Geschwindigkeit

W	$[\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$	Permeabilität
\dot{g}_v	$[\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}]$	Wasserdampffluss = WVT
$\dot{g}_v \cdot d$	$[\text{g mm m}^{-2}\text{d}^{-1}]$	Wasserdampfflussdichte = WVTR
Z	$[\text{kg}^{-1}\text{m}^2\text{s}^1\text{Pa}^1]$	Diffusionswiderstand

Griechische Buchstaben

α	$[\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Wärmeübergangskoeffizient
α	$[-]$	Koeffizient für Strömungsgleichung in Fluent
α_ε	$[-]$	Koeffizient für Ergun-Gleichung
α	$[\text{m}^2]$	Viskositätswiderstand
β	$[\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}\text{Pa}^{-1}]$	Stoffübergangskoeffizient
β	$[\text{K}^{-1}]$	linearer Ausdehnungskoeffizient
β	$[\text{°}]$	Böschungswinkel
β_ε	$[-]$	Koeffizient für Ergun-Gleichung
δ	$[\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$	Permeabilität
ΔE_a	$[\text{kJ kmol}^{-1}]$	Aktivierungsenergie
ε	$[-]$	Porosität
ϕ	$[-]$	relative Feuchte
η	$[\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}]$	dynamische Viskosität
λ	$[\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$	Wärmeleitfähigkeit
μ	$[-]$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
ρ	$[\text{kg m}^{-3}]$	Dichte
ϑ	$[\text{°C}]$	Temperatur
σ	$[\text{N m}^{-1}]$	Spannung
ψ	$[\text{s}^{-1}]$	Permittivität

Indizes

A	Auftrieb
a	air / Luft
G	Gewicht
q	Quer
W	Wasser
s	Sättigung
v	vapour / Dampf
KW	Kieswasser
R	resultierend
0	Referenz, Anfang
WÄ	Wasseräquivalent

Abkürzungen

a(mb)	Umgebung (ambient)
av	Durchschnitt (average)
ATES	Aquifer-Wärmespeicher (aquifer thermal energy store)
B	Boden
BS	Behälter-Wärmespeicher
BTES	Erdsonden-Wärmespeicher (borehole thermal energy Store)
C	Deckel (cover)
CTES	Kavernen-Wärmespeicher
D	direkt
DS	Dampfsperre
EB (WSp)	Erdbecken-Wärmespeicher (pit heat store)
EW (WSp)	Erdreich/Sand-Wärmespeicher (soil-Water-pit heat store)
ES	Erdwärmesonde
GW	Grundwasser
GOK	Geländeoberkante
HW (WSp)	Heißwasser-Wärmespeicher (tank heat store)
I	indirekt
KW (WSp)	Kies-Wasser-Wärmespeicher (gravel-water pit heat store)
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
M	Matte
mean	Mittelwert
m	mittel
P	Platte
S	Schüttgut
UTES	erdvergrabener Wärmespeicher (underground thermal energy Store)
US	Unterspannbahn
V	Vlies
WÜ	Wärmeübertrager
WLF	Wärmeleitfähigkeit
WSMP	Wärmestrommessplatte
WD	Wärmedämmung
W	Wand
WVT	Wasserdampffluss
WVTR	Wasserdampfflussdichte

Abkürzungen Kunststoffe

CSPE	chlorsulfonated polyethylene
ECB	ethylen copolymer bituminous blend
(E)CTFE	(ethylen)chlortrifluorethylen
EPDM	ethylen propylene dien monomer
ETFE	ethylen tetrafluorethylen
FEP	polyfluorethylen-propylen
FPO	flexible polyolefine
HDPE	high density polyethylene
IIR	butyl rubber
LDPE	low density polyethylene
PA	polyamid
PC	polycarbonate
PEX	cross-linked PE
PFA	perfluor alkoxyalkan
P(I)B	poly(iso)but(yl)en
PP	polypropylene
PSU	polysulfon
PTFE	polytetrafluorethylen
PVC	polyvinyl chloride
PVDF	polyvinylidenfluoride
TPE	thermoplastic elastomer
TPO	thermoplastic olefins

Zusammenfassung

Aufbauend auf den Erfahrungen aus den Forschungs- und Pilotprojekten, welche u.a. im Rahmen des Förderprogramms „Solarthermie 2000“ gewonnen wurden, war die Aufgabenstellung im Rahmen des Projekts „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ durch neue Konzepte und optimierte Bauweisen die Kosten von Erdbecken-Wärmespeichern deutlich zu senken. Nur durch eine Reduktion der Baukosten von Behälter- bzw. Erdbecken-Wärmespeichern kann zukünftig die Anzahl solar unterstützter Nahwärmesysteme erhöht werden. Langzeit-Wärmespeicher müssen nicht nur kostengünstiger, sondern auch qualitativ besser werden. Der Steigerung der Betriebssicherheit und Energieeffizienz muss folglich eine höhere Priorität eingeräumt werden.

Je größer das Volumen des Speichers ist, desto weniger relevant sind die Wärmeverluste über die Speicherhülle. Nur für sehr große Langzeit-Wärmespeicher in der Größenordnung von 100 000 m³ lassen sich die spezifischen Kosten drastisch senken. Wärmespeicher dieser Größenordnung können dann auch in Verbindung mit Fernwärmenetzen oder mit Kraft/Wärme-Koppelungsanlagen betrieben werden. Kurz- bis mittelfristig dürfte jedoch der Bedarf – zumindest in Deutschland – eher bei Wärmespeichern mit Volumina im Bereich zwischen 500 m³ und 10 000 m³ liegen. Die Minimierung der Wärmeverluste durch die Speicherhülle mittels Optimierung des Wandaufbaus ist somit von großer Bedeutung bei der Entwicklung und Konstruktion neuer Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher.

Eine energetisch optimierte Speichergeometrie kann standortunabhängig durch den Einsatz von Verbaumaßnahmen realisiert werden. Zudem wird dadurch das Bauen im Grundwasserbereich ermöglicht, wodurch mehr geeignete Speicherstandorte zur Verfügung stehen. Der Unterschied zwischen Erdbecken- und Behälter-Wärmespeichern wird durch Verbaumaßnahmen aufgehoben.

Für beide Speichertypen ist zur Beurteilung von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen eine umfangreiche bauphysikalische und thermodynamische Betrachtung erforderlich. Um eine Degradation der Wärmedämmung über den geforderten Zeitraum von mindestens 30 Jahren auszuschließen, ist ein qualitativ hochwertiger Wandaufbau unerlässlich. Ursache für Degradation kann die Durchfeuchtung der Wärmedämmung durch Wasserdampfdiffusion vom Speicherinneren oder durch Feuchteeintrag über das umliegende Erdreich sein.

In Bezug auf Wärmekapazität sowie Be- und Entladeverhalten ist der Heißwasser-Wärmespeicher dem Kies- bzw. Sand/Erdreich-Wasser-Wärmespeicher überlegen. Kies-Wasser-Wärmespeicher haben Vorteile, wenn statische Gründe im Vordergrund stehen. Eine dem Kies-Wasser-Wärmespeicher statisch vergleichbare Abdeckung für Heißwasser-Wärmespeicher erfordert einen nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand. Freitragende Abdeckungen können in Form eines Tonnen- oder Kuppeldachs bestehend aus Sandwichelementen aus Hochleistungsbeton mit PUR-Kern gefertigt werden. Im Vergleich zu konventionellen freitragenden Abdeckungen gelingt dadurch eine Konstruktion unter reduziertem Material- und somit Primärenergieaufwand. Eine (auf-)schwimmende Abdeckung stellt die noch kostengünstigere Abdeckungsvariante dar.

Um zukünftig eine weitergehende Kostenreduktionen beim Speicherbau zu forcieren, ist es erforderlich, Industrie- und Baufirmen für Wärmespeichertechnologien zu interessieren. Damit entsteht eine wachsende Konkurrenzsituation für Anbieterfirmen von Bauaktivitäten und Materialzulieferung. Diese Firmen dienen zusätzlich als Know-how-Träger und Distributoren der Technologie.

Erkenntnisse und Ergebnisse, die im Laufe des Projektes „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ durch Innen- und Außenlaborversuche gewonnen wurden, sind unter anderem in die Pilotprojekte in München, Crailsheim sowie Eggenstein-Leopoldshafen eingeflossen. Speziell die Ergebnisse, die im Bereich Diffusion/Kunststoffdichtungsbahnen erarbeitet wurden, werden beim vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Vorhaben „Theoretische und experimentelle Untersuchungen großer kostengünstiger Solarspeicher in Mehrkomponentenbauweise“ der Uni Kassel eingebracht.

In Ermangelung geeigneter Simulationsmodelle, welche die Wärmeverluste erdvergrabener Wärmespeicher für typische Betriebssituationen (z.B. Bauteilfeuchte, Temperaturen bis 90 °C) berechnen können, wurde im Rahmen des Projekts ein neues Modell entwickelt, welches die Abhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmstoffen als Funktion der Temperatur und des Wassergehalts berücksichtigt. Dieses wird detailliert in einem Beitrag des International Journal of Heat and Mass Transfer (Elsevier) beschrieben. Das neue Berechnungsmodell wird voraussichtlich – als bevorzugte Berechnungsmethode - in die nächste Ausgabe des VDI Wärmeatlas übernommen.

Hauptaufgabe für zukünftige Untersuchungen bleibt die Verbesserung oder Neuentwicklung von geeigneten Abdichtungs- und Wärmedämmmaterialien sowie die Demonstration der Langzeitbeständigkeit der am Markt erhältlichen Materialien. Ohne eine systematische Untersuchung zum Alterungsverhalten von (polymeren) Abdichtungsmaterialien bei hohen Temperaturen können derzeit keine verlässlichen Aussagen zum Langzeitverhalten von erdvergrabenen Wärmespeichern getroffen werden.

1 Projektbeschreibung

1.1 Projektphasen

Das Projekt „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ bestand aus vier aufeinander aufbauenden Phasen.

1. Marktrecherche (Dämmung, Abdichtung, Dampfsperre, Geotextilien) und Durchführung von **Innenlaborversuchen** (Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, des Wasserdampfdiffusionswiderstands von Abdichtungsmaterialien, der Wasserdurchlässigkeit von Bentonitabdichtungen)
2. **Konzeptentwicklung** aufbauend auf den Versuchsergebnissen
3. Durchführung der Konzepte und Aufbau verschiedener Wandsysteme in **Außenlaborversuchen**
4. Optimierung aufbauend auf den Außenlaborversuchen und Bau des **Forschungsspeichers**

Die Weiterentwicklung der Wärmespeichertechnologie kann in die Weiterentwicklung und Optimierung der Konstruktion (z.B. der Speicherhülle) und in die Entwicklung bzw. Optimierung von Konzepten (z.B. indirekte Beladung für Erdreich-Wasser-Wärmespeicher) unterteilt werden. Nur wenn es gelingt ein gutes Konzept zu entwickeln, welches durch optimierte Bauverfahren kostengünstig zu realisieren ist, kann das Ziel erreicht werden, kostengünstige Langzeit-Wärmespeicher für Solarwärme zu bauen.

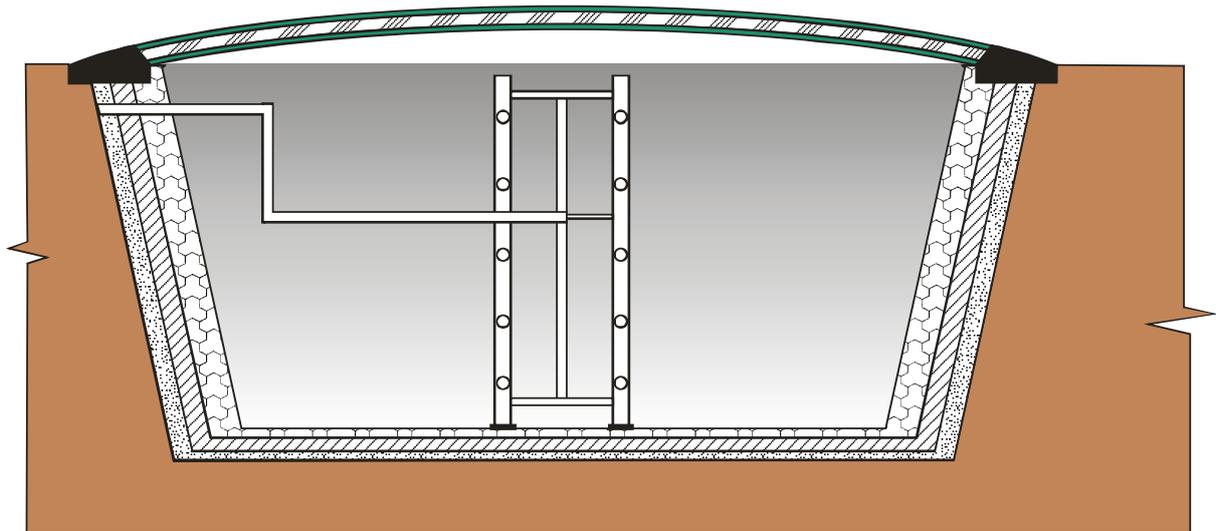


Bild: Schema eines erdvergrabenen Heißwasser-Wärmespeichers

1.2 Technisch/Wirtschaftliche Ziele des Vorhabens

Die Kenntnisse und Erfahrungen, die während des Projekts gewonnen wurden, lassen sich gleichermaßen auf die Technologie der Erdbecken-Wärmespeicher und der Behälter-Wärmespeicher übertragen. Ergebnisse, die im Bereich der Wärmedämmung erzielt wurden, sind auch für die Erdsonden-Wärmespeicher von Bedeutung. So wurden der Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm [123] und der Hybridspeicher in Attenkirchen [47], [48] im oberen Bereich mit Wärmedämmung gebaut. Der Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim¹ wird ebenfalls an der Oberseite wärmedämmend. Somit lassen sich die Ergebnisse zumindest partiell auch auf die Erdsonden-Wärmespeichertechnologie übertragen.

Für das favorisierte Konzept eines Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeichers ist zusätzlich zum Aspekt Kostenreduktionspotential, die dauerhafte Sicherheit der Konstruktion ein wesentlicher Teil der Arbeit. So muss die Konstruktion neben der Eigen-Standfestigkeit auch Schutz vor Vandalismus bieten und dies über die geforderte Betriebsdauer von 30 bis 40 Jahren.

¹ Fertigstellung voraussichtlich 2008

Zum Erreichen einer Kostenreduktion beim Speicherbau ist es wichtig Industriefirmen für die Speichertechnologie zu interessieren, um zukünftig das Know-how weiter zu verbreiten sowie eine wachsende Konkurrenzsituation hinsichtlich Bau und Materialien am Markt zu schaffen.

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen eine Vielzahl von Firmen für das Thema Langzeit-Wärmespeicher zu interessieren, für eine Kooperation zu gewinnen bzw. für die technische Umsetzung der Speicherkonzepte zu bewegen: Die Entwicklung temperatur- und alterungsbeständiger verschweißbarer Dampfsperren sind von übergeordneter Bedeutung. In Zusammenarbeit mit der Firma Aluminium Féron² (Düren) und der Firma Leister (Sarnen, Schweiz) wurde eine solche verschweißbare Verbundfolie entwickelt. Die Firma Sarnafil (Sarnen, Schweiz) arbeitete an der Entwicklung von temperaturbeständigen Hochbarriere- Kunststoffdichtungsbahnen, stellte jedoch durch Umstrukturierung nach Übernahme der Firma Sika Sarnafil die Bemühungen ein. Im Bereich Elastomere engagiert sich die Firma Contitech (Northeim). Die Firma Agru (Bad Hall, Österreich) bietet eine Sperrschichtbahn bestehend aus HDPE und Aluminium an. Die Firma Agru ist an der Weiterentwicklung des Materials in Bezug auf die speziellen Anforderungen für den Bau von Langzeit-Wärmespeichern interessiert. Dazu wird eine Kooperation mit der Firma APC Kunststofftechnik (Österreich) und der Firma Borealis (Linz, Österreich) angestrebt.

Weitere Industriepartner konnten für die Optimierung von Material und Verfahren für Erdbecken-Wärmespeicher gewonnen werden: Die Firmen Dennert Poraver (Postbauer Heng) sowie Liaver (Ilmenau) gaben 50% Rabatt auf das verbaute Dämmmaterial (Blähglasgranulat). Die Firma Naue (Espelkamp-Fiestel) spendete das Material für die Durchführung des Versuchs „kontrollierte Durchlässigkeit – Bentonitabdichtung“. Zudem unterstützte das Fertigteilwerk der Firma Weigold (Glatten) die Entwicklung von Fertigteilen aus Hochleistungsbeton für die freitragende Abdeckung für Heißwasser-Wärmespeicher. Die Firma Schwenk

² Das Projekt wurde zusätzlich von der Firma Aluminium Féron unterstützt, indem 500 m² der Verbundfolie zu einem Preis angeboten wurden, der einer Abnahmemenge von etwa 40.000 m² (wirtschaftliches Produktionsminimum) entspricht. Die Folie wurde getestet, zeigte aber Schwächen im Bereich UV-Beständigkeit.

Zement unterstützte durch die Umsetzung des Laborbetons in einen Baustellenbeton und durch günstige Bereitstellung des Betons, der PUR-Kern wurde von der Firma Bauder (Stuttgart) stark reduziert angeboten. Die Firma Jakob (Ostfildern) konnte gewonnen werden, bei der Entwicklung einer Seilnetzkonstruktion fachlichen Rat zu geben. Im Falle einer Ausführung würde das benötigte Material mit 50 % Rabatt angeboten.

Die Firma Züblin, Abteilung Spezialtiefbau (Stuttgart), mit der die Außenlaborversuche bereits erfolgreich durchgeführt wurden, ist an der Durchführung weiterer Versuche interessiert. Die Erfahrungen fließen beim Bau des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Eggenstein-Leopoldshafen ein.

Erkenntnisse und Ergebnisse, die im Laufe des Projekts durch Innen- und Außenlaborversuche gewonnen wurden, sind unter anderem in die Projekte München, Crailsheim, sowie Eggenstein-Leopoldshafen eingeflossen.

2 Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher

Saisonale Speicherung von Solarenergie oder von Abwärme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen bietet großes Potential in zukünftigen Energiesystemen fossile Brennstoffe zu substituieren. Die spezifischen Kosten und auch die spezifischen Wärmeverluste von großen Langzeit-Wärmespeichern in solar unterstützten Nahwärmesystemen, wie in Bild 1 dargestellt, sind niedriger im Vergleich zu denen von kleinen dezentralen Systemen.

Tabelle 1: Vergleich von Kennzahlen verschiedener Solarsysteme

System	Trinkwasser	Trinkwasser + Raumheizung	Nahwärme mit Kurzzeit-Wärmespeicher	Nahwärme mit saisonalem Wärmespeicher
minimale Systemgröße	-	-	> 30 - 40 Whg.	> 100 - 150 Whg.
Kollektorfläche	1.0-1.5 $\text{m}^2_{\text{FK}}/\text{Person}$	3 – 4 $\text{m}^2_{\text{FK}}/\text{Person}$	0.8 – 1.2 $\text{m}^2_{\text{FK}}/\text{Person}$	0.14 – 0.2 $\text{m}^2_{\text{FC}}/\text{m}^2$ Wohnfläche
Speichervolumen	50 – 100 $\text{l}/\text{m}^2_{\text{FK}}$	150 – 300 $\text{l}/\text{m}^2_{\text{FK}}$	50 – 100 $\text{l}/\text{m}^2_{\text{FK}}$	1.4 – 2.1 $\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{FK}}$
Solarer Deckungsanteil	10 %	15-20 %	15-20 %	40 - 60 %

Hohe solare Deckungsanteile (> 50%) können nur mit saisonaler Wärmespeicherung erreicht werden.

Es gibt eine Vielzahl von Systemkonfigurationen, welche im Rahmen dieses Berichts nicht erwähnt und erklärt werden können, welche jedoch Design und Ausführung des Langzeit-Wärmespeichers beeinflussen. Entscheidend ist z.B. ob im System eine Wärmepumpe und/oder ein zusätzlicher Pufferspeicher vorhanden sind. Auch die Ausführung des Wärmenetzes (4- oder 3-Leiternetz) sowie die konventionelle Haustechnik haben über die Rücklaufemperatur Einfluss auf den Langzeit-Wärmespeicher.

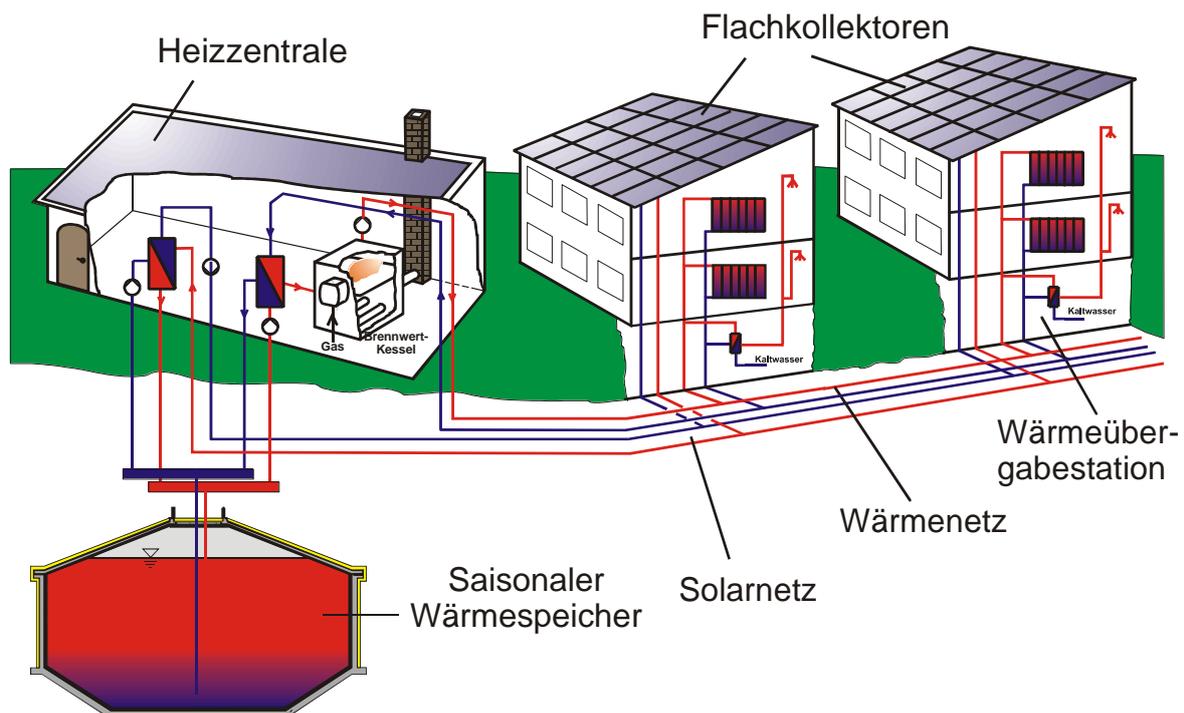


Bild 1: Schematischer Aufbau und Komponenten eines solar unterstützten Nahwärmenetzes

Langzeit-Wärmespeicher können also nicht unabhängig vom Heizsystem betrachtet werden. Jedoch kann eine Optimierung hinsichtlich Schichtung, Wärmeverluste und Kosten durch eine detaillierte systemunabhängige Betrachtung des Speichers erfolgen. Für eine abschließende Beurteilung muss jedoch wieder das System z.B. durch transiente Jahressimulationen Berücksichtigung finden. Eine detaillierte Beschreibung möglicher und realisierter Systemkonzepte finden sich in z.B. in [2], [3] und [4].

2.1 Speichertypen

In Bild 2 sind die vier Langzeit-Wärmespeichertypen dargestellt. Als fünfter Typ könnte noch der Kavernen-Wärmespeicher (CTES) genannt werden. Da in Deutschland noch keine Projekte mit Langzeit-Kavernenspeicher ausgeführt wurden, wird dieser in der Regel nicht mit aufgezählt.

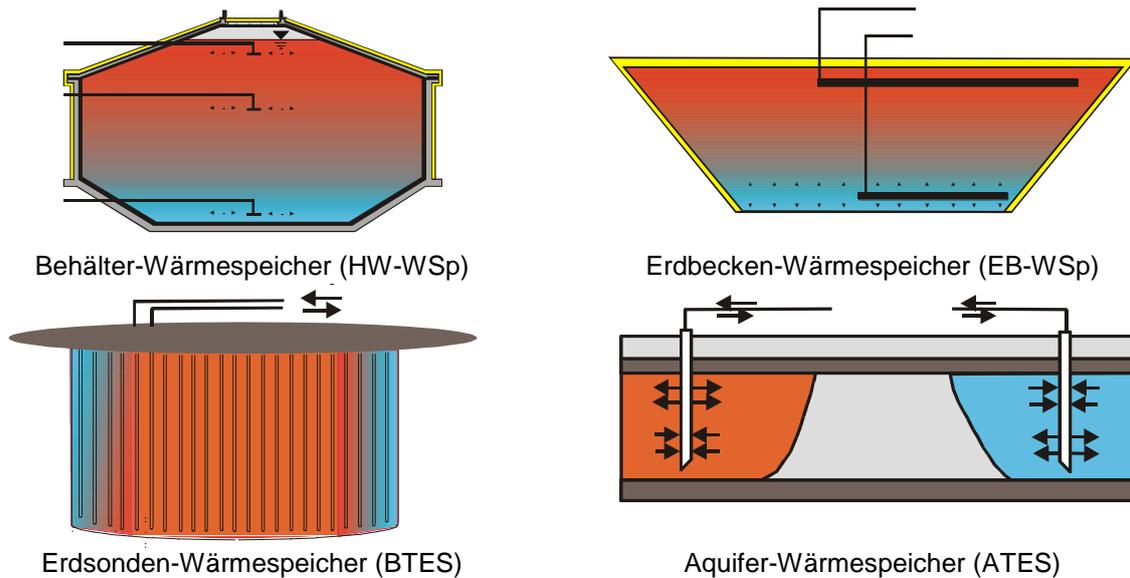


Bild 2: Typen von Langzeit- Wärmespeichern

Erdbecken-Wärmespeicher werden in eine Grube im Erdreich gebaut. Auch die Mehrzahl der bisher realisierten Behälter-Wärmespeicher (BS) wurde aus Platz- und architektonischen Gründen ganz oder partiell vergraben gebaut.

2.2 Speichermedium: Kies-Wasser vs. Heißwasser

Es werden entsprechend des Speichermediums zusätzlich die im Bild 3 dargestellten drei Typen von Erdbecken-Wärmespeichern unterschieden.

- Kies/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher (KW), bei dem Kies als statisches und wärmespeicherndes Medium eingesetzt wird,
- Erdreich/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher (EW), bei dem das ausgehobene Erdreich als statisches und wärmespeicherndes Medium eingesetzt wird und
- Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher (HW), bei dem reines Wasser als Wärmespeichermedium eingesetzt wird, das durch eine Abdeckung nach oben abgeschlossen wird.

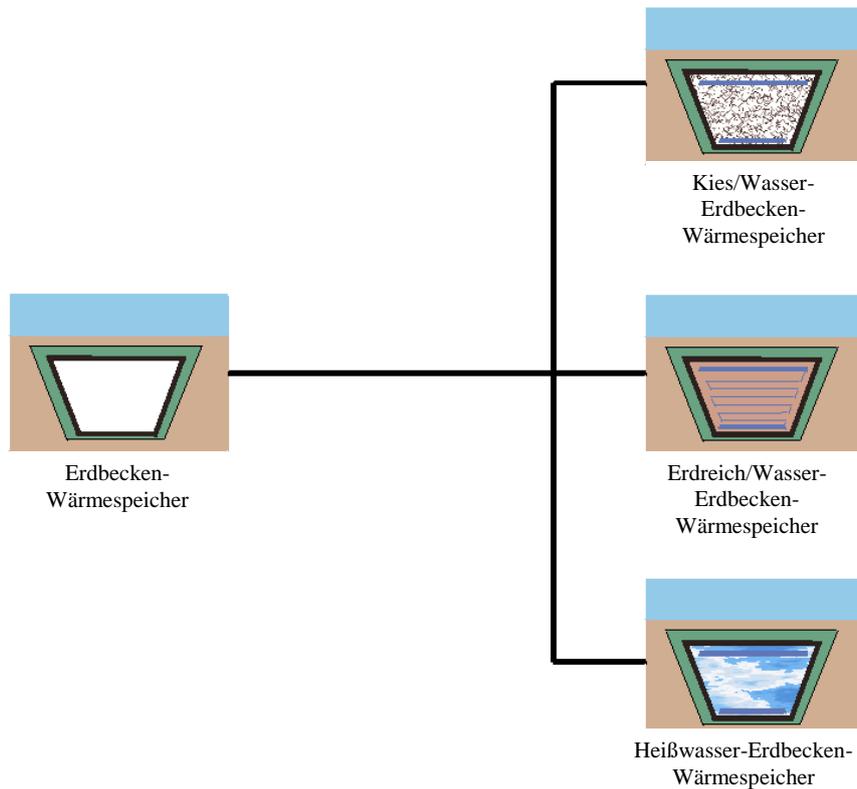


Bild 3: Einteilung der Erdbecken-Wärmespeicher nach dem Speichermedium (Quelle: PKi)

Für alle drei Speichertypen wurden im Rahmen des Vorhabens Materialien und Konzepte entwickelt und untersucht. Die größten Chancen die gestellten Ziele zu erreichen, wird dem Konzept des Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeichers eingeräumt. Ein Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher ist die konsequente Zusammenführung der beiden Langzeit-Wärmespeichertypen Behälterspeicher und Kies-Wasser-Wärmespeicher (vgl. Bild 4): Der einfachen und kostengünstigen Bauweise eines Erdbecken-Wärmespeichers werden die Vorteile der 50 % höheren Wärmekapazität sowie der guten Betriebseigenschaften durch das reine Wasservolumen zugefügt. Des Weiteren sind die bessere Zugänglichkeit sowie die einfachere Wartbarkeit vorteilhaft.

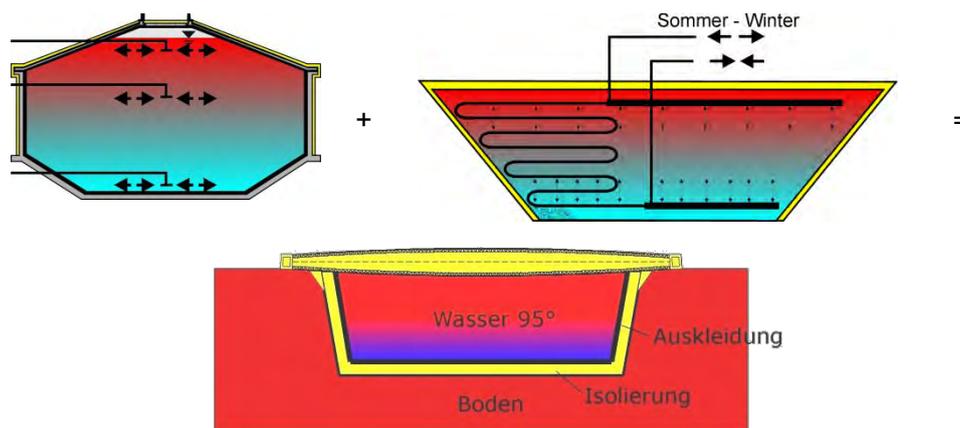


Bild 4: Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher (Quelle ITW, Lichtenfels)

In Bezug auf Wärmekapazität und Betriebsverhalten ist der Heißwasser-Wärmespeicher gegenüber den andern beiden Typen vorteilhaft. Kies- und Erdreich-Wasser- Wärmespeicher haben Vorteile, wenn statische Gründe im Vordergrund stehen, wie beim Kies-Wasser-Wärmespeicher in Chemnitz [2], auf dem eine Straße und ein Parkplatz gebaut wurden. Eine statisch vergleichbare Abdeckung von Heißwasser-Wärmespeichern erfordert nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand (vgl. Kapitel 4.4 bzw. Kapitel 7.10). Vor- und Nachteile von Kies-Wasser- und Heißwasser-Wärmespeichern sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Kies-Wasser- und Heißwasser-Wärmespeichern

Heißwasser-Wärmespeicher	Kies-Wasser -Wärmespeicher
<ul style="list-style-type: none"> + Wärmekapazität + Be- und Entladeverhalten (Dynamik) + Temperaturschichtung + Wartung/Sanierung 	<ul style="list-style-type: none"> + Statik (Verkehrslast nahezu unbegrenzt) + einfache Abdeckung
<ul style="list-style-type: none"> - technisch aufwändige Abdeckung - Sicherheit (Havarie) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmekapazität (50% von Wasser) - Beladesystem (indirekte Beladung) - Be- und Entladeverhalten (Träge, Puffervolumen) - Wartung/Sanierung nicht möglich

Der Vorteil eines Kies-Wasser-Erdbecken-Wärmespeichers, keine weiteren statischen Maßnahmen für die Abdeckung und Böschungssicherung zu benötigen, entfällt beim Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher. Für die Abdeckung bleiben drei Möglichkeiten:

1. schwimmende bzw. aufschwimmende Abdeckung
2. freitragende Abdeckung
3. abgestützte Abdeckung

Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Varianten werden in Kapitel 7.10 beschrieben. Konzepte für die schwimmende und die aufschwimmende Abdeckung sowie für eine freitragende Abdeckung wurden im Rahmen des Vorhabens entwickelt.

Dabei wurde die aufschwimmende Abdeckung erfolgreich im Außenlabor untersucht (siehe Kapitel 7.10.3). Als freitragende Abdeckung können mehrere Varianten realisiert werden. Als aussichtsreichste Variante wurde eine Seilnetzkonstruktion sowie eine Ultra-Hochleistungsbeton-Sandwichkonstruktion mit PUR-Kern eingestuft, wobei letztere ebenfalls im Außenlabormaßstab realisiert wurde (siehe Kapitel 7.10.7).

3 Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher

Hier können nur wesentliche Details zum Stand der Technik von Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern genannt werden. Detaillierte Information ist in einem ITW-Bericht [1] zu finden. In den letzten 30 Jahren wurden Forschungs- und Pilot-Wärmespeicher jeden Typs in verschiedenen Größen realisiert. Die Dimensionen ausgeführter Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher (Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher werden hier nicht weiter betrachtet) variieren zwischen 100 m³ bis über 10 000 m³. Die größten ausgeführten Projekte sind der Heißwasser-Wärmespeicher in Friedrichshafen (D) mit 12 000 m³ und der Erdbecken-Wärmespeicher in Marstal (DK) mit 10 000 m³, vgl. Tabelle 3.

Bis heute wurden alleine in Deutschland über zehn Forschungs- und Pilotprojekte mit (Langzeit-) Wärmespeicher realisiert. Durch diese konnte gezeigt werden, dass derartige Systeme technisch machbar sind. International sind ca. 30 Projekte dokumentiert, wobei sich die Mehrzahl in Europa und dort in den skandinavischen Ländern befinden, vgl. [2], bis [32].

Weitere Projekte, wie Crailsheim [52], [53], [54], Eggenstein [93] oder Hegau befinden sich in der Bau- oder Planungsphase. Wärmespeicher, die über GOK gebaut wurden, wie der 34 500 m³ Stahltank in Linz [94], [95] sind aus optischen Gründen für solar unterstützte Nahwärmesystem keine Alternative. Innerhalb von Wohnsiedlungen muss angestrebt werden, die Speicher möglichst wenig sichtbar zu bauen.

Tabelle 3: Pilot- und Forschungs-Langzeit-Wärmespeicher Behälter- und Erdbecken , Datum der Inbetriebnahme, Volumen Fläche, Verhältnis von Höhe (h) zu Durchmesser (d), Böschungswinkel und Oberfläche (A)-Volumen (V) Verhältnis

Name	Land	Literatur	Datum	V [m³]	A [m²]	h/d [-]	β [°]	A/V [1/m]
Behälter-WSp								
Studsvik ^{†)}	S	[5],[33],[6]	1978	800	550	6.0/12.6	38	0.69
Lombohov	S	[5],[6],[34]	1980	10 000	1750	12.0/32.4	90	0.18
Särö	S	[7], [8], [35]	1989	640	n/a	n/a	90	n/a
Rottweil	D	[36]	1994	600	289	5.0/13.0	90	0.48
Lisse	NL	[9],[10],[11]	1994	1 000	n/a	n/a	n/a	n/a
Hamburg	D	[2],[37],[38]	1996	4 500	1 650	10.7/25.7	90	0.37
Friedrichshafen ^{†)}	D	[2],[39],[40],[41],[42]	1996	12 000	2 796	19.4/32.4	90	0.23
Ilmenau ¹⁾	D	[43],[44],[364]	1998	300	262	8.0/7.2	90	1.14
Hannover ^{†)}	D	[2],[38],[39],[41],[45],[46]	2000	2 750	1 135	11.1/19.0	90	0.41
Attenkirchen [*])	D	[3],[47],[48],[49]	2001	500	350	8.0/8.9	90	0.7
Crailsheim ³⁾	D	[50][51],[52],[53],[54]	2006	480	362	14.5/6.3	90	0.75
München ^{3) †)}	D	[52],[54]	2006	6 000	1 800	16.1/24.6	90	0.30

Name	Land	Literatur	Datum	V [m³]	A [m²]	h/d [-]	β [°]	A/V [1/m]
Erdbecken-WSp								
Wales (HW)	UK	[55]	1977	100	260	n/a	n/a	26
Vaulruz (SW)	CH	[11],[56]	1983	3 500	4600	4.6/29.6	n/a	1.3
Lyngby (HW)	DK	[57],[58]	1983	540	n/a	4.3/10.3	n/a	n/a
Stuttgart (GW)	D	[59],[60],[61],[62],[63]	1985	1 050	835	3.7/17.5	45	0.84
Berlin (HW)	D	[64],[65],[66],[67]	1986	170	n/a	3.05/7.4	34	n/a
Meyrin (SW)	CH	[18]	1986	20 000	n/a	n/a	n/a	n/a
Växjö (HW)	S	[7]	1987	1 000	n/a	n/a	n/a	n/a
Malung (HW)	S	[7],[68]	1989	1 000	n/a	4.0/7.0	n/a	n/a
Hoerby (HW)	DK	[69],[70],[71]	1990	500	n/a	n/a	90	n/a
Herlev ¹⁾ (HW)	DK	[72]	1991	3000	1630	6/26.25	90	0.54
Lyngby (SW) ⁴⁾	DK	[72],[73]	1991	500	n/a	n/a	n/a	n/a
Sjökulla (HW)	FN	[74],[75]	1993	195	n/a	2.7/11.7	34	n/a
Ottrupgaard (HW)	DK	[28],[6],[72],[76]	1995	1 500	1400	5.0/16.0	27	0.93
Marstal (SW)	DK	[12],[28],[77],[78],[79]	1999	3 500	1850	7/22.15	34	0.53
Chemnitz (GW) ²⁾	D	[80],[81],[82],[83]	1997	8 000	3 375	7.0/39.0	90	0.42
Egenhausen (SW)	D	[17],[84]	1997	300	115	4.0/8.7	60	1.2
Augsburg (GW)	D	[85],[86],[87],[88]	1997	6 500	n/a	n/a	90	n/a
Steinfurt (GW)	D	[38],[87],[88],[89] [90]	1999	1 500	1 305	4.0/24.25	50	0.87
Lyngby (HW) ⁴⁾	DK	[29],[30]	2002	500	n/a	n/a	n/a	n/a
Marstal (HW)	DK	[12],[91],[92]	2003	10 000	5 600	6.5/40.25	27	0.56
Eggenstein (GW) ³⁾	D	[93]	2007	4500	1964	8/27.7	35	0.44

1) Tubberupvaenge

2) Betrieb in 2006 eingestellt

3) Bau/Fertigstellung in 2007

4) Ersterbauung 1991, wiedererbaut 2002

n/a nicht Verfügbar

†) Zylindrische Geometrie mit Pyramidenstumpf an Boden/Decke

Bis auf den mit Ton abgedichteten Speicher in Ottrupgaard sind alle noch in Betrieb befindlichen Langzeit-Wärmespeicher frei von größeren Leckagen. Jedoch wies die Mehrzahl der Pilot- und Forschungsspeicher Leckagen bei der Inbetriebnahme auf, welche durch Sanierung behoben werden konnten.

Bei der Mehrzahl der bisher ausgeführten Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit vergrabenen Langzeit-Wärmespeicher sind die Wärmeverluste höher als bei der Planung berechnet (vgl. Kapitel 7.4). Ein Teil der Wärmeverluste lässt sich durch veränderte Temperaturverläufe (mittlere Speichertemperatur) aufgrund geänderter Lasten oder Systemkonfigurationen gegenüber dem Planungsstand erklären. Geringere Temperaturschichtung verursacht zusätzliche Verluste. Höhere Wärmeverluste im meist ungedämmten Bodenbereich aufgrund höherer Rücklauf- und somit Speicherbodentemperaturen sind auch als Ursache zu nennen.

Stoffwerte, wie der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Abdichtung oder die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Wärmedämmung wurden auf Basis der DIN 4108 (Referenztemperatur 10 °C, [317]) bei bisherigen Auslegungen als konstant angenommen. Wie in Kapitel 6.3 gezeigt wird, erhöht sich jedoch die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung signifikant mit zunehmendem Wassergehalt der Wärmedämmung. Der Effekt ist bei hohen Temperaturen (ab 40 °C) noch ausgeprägter.

Feuchtigkeit kann durch Diffusionsvorgänge sowohl vom Speichermedium als auch von außen, vom umgebenden feuchten oder nassen Erdreich, in die Wärmedämmung eindringen. Die Qualität der Wandaufbauten ist teilweise unzureichend ausgeführt. Über die Lebensdauer des Speichers kann dieser nicht ausreichend Schutz vor Grund- oder Oberflächenwassereintrag bieten (vgl. Kapitel 7). Veränderte Randbedingungen gegenüber dem Planungsstand können in einer Unterschätzung der Wärmeverluste resultieren. Beim Heißwasser-Wärmespeicher in Hamburg [2], [37], [38] kam es vermutlich durch unvorhersehbare Schwankungen des Grundwasserstands oder Grundwasserflusses zu einer Durchfeuchtung der

Wärmedämmung, wodurch die Wärmeverluste deutlich über den Planungswerten liegen.

Tabelle 4: Wärmeverluste (Q_{mess}) realisierter Forschungs- und Pilotprojekte

	Jahr	Volumen [m]	Q_{mess} [MWh/a]	$Q_{\text{mess}}^{1)}$ [kWh/(m ² K a)]	$T_{\text{av}} - T_{\text{a}}$ [K]	Referenz
Behälter-Wärmespeicher						
Hamburg	1996	4 500	360 – 430	5.7	42	[2],[37],[38]
Friedrichshafen	1996	12 000	320 – 360	2.5	49	[2],[39],[40],[41],[42]
Hannover	2000	2 750	90 – 100	2.5	33	[2],[38],[39],[41],[45],[46]
Erdbecken-Wärmespeicher						
Stuttgart (KW) ²⁾	1985	1 050	27	0.4	8	[59],[60],[61],[62],[63]
Steinfurt (KW) ³⁾	1999	1 500	70 – 90	2.7	26	[2],[38],[87],[88],[89]
Marstal (HW) ⁴⁾	2003	10 000	338	0.6	22	[12],[91],[92]
1) Wärmeverluste bezogen auf die Hüllfläche und die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speicher (T_{av}) und Umgebung (T_{a}), 2) 462 h Simulation, mit Wärmepumpe, $T_{\text{av}} = 17$ °C, 3) incl. Anschlussleitung, 4) Daten hochgerechnet von 6 Monaten aus [12]						

Die Daten in Tabelle 4 zeigen, dass es Optimierungsbedarf bezüglich des Designs und vor allem bezüglich des Wandaufbaus von erdvergrabenen Wärmespeichern im Hinblick auf die Wärmeverluste gibt. Die Minimierung der Wärmeverluste bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten erfordert einen Wandaufbau, der zum einen gewährleistet, dass die Dämmung vor Wasser- und Wasserdampfeintrag von außen und innen geschützt ist und zum anderen ein Austrocknen im Falle einer Durchfeuchtung der Dämmung erlaubt.

4 Konstruktion von Wärmespeichern

Das Design von erdvergrabenen Wärmespeichern muss verbessert werden, wie die Erfahrungen und Messergebnisse der Pilotanlagen zeigen. Vor allem bezüglich des Wandaufbaus und der eingesetzten Materialien besteht Optimierungsbedarf. Die Minimierung der Wärmeverluste bei gleichzeitiger Reduzierung der Baukosten erfordert Optimierungsschritte sowohl beim Wärmespeicherbau als auch beim (Spezial-) Tiefbau und Erdbau.

4.1 Geometrie

Einen nicht unerheblichen Anteil an den Speicherkosten macht der Erdbau aus. Die Geometrie des Wärmespeichers und der Bauablauf bedingen die Form der Baugrube. Erdvergrabene Wärmespeicher werden entweder als Quader, Zylinder, als (umgekehrter) Pyramiden- oder Kegelstumpf oder als Mischform ausgeführt. Es muss bei der Entwicklung und Konstruktion von Wärmespeichern sowohl die Minimierung der Baukosten, als auch die Minimierung der Wärmeverluste Berücksichtigung finden. Die Verluste teilen sich auf in (exergetische) innere Verluste (Q_{int}) infolge der Temperaturschichtung im Speicher und in äußere Wärmeverluste (Q_{ext}) über die Speicheroberfläche (siehe Bild 5). Für die Exergieverluste ist neben dem Speichermedium das h/d -Verhältnis ausschlaggebend. Die äußeren Wärmeverluste können durch ein geringes A/V -Verhältnis und durch geeignete Wärmedämmmaßnahmen minimiert werden.

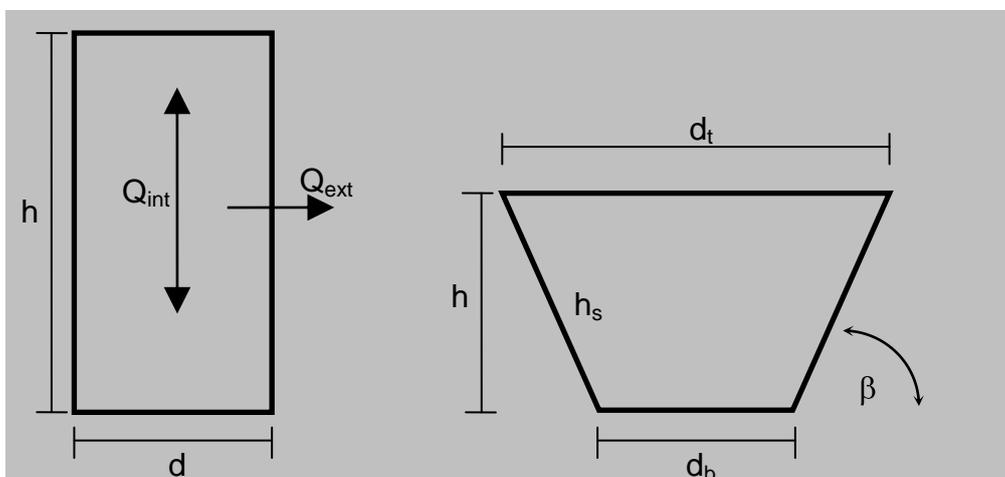


Bild 5: Geometrie eines Wärmespeichers

Je nach Betriebsweise (Puffer oder Langzeit-Wärmespeicher) überwiegen die inneren oder die äußeren Wärmeverluste. Auf Basis von Messungen und Simulationen wurden von verschiedenen Autoren h/d -Verhältnisse zwischen 1 und 10 vorgeschlagen ([96] bis [105]). Ein Wert um drei scheint am praktikabelsten [106].

Für saisonale Wärmespeicher ist aus energetischer Sicht ein h/d -Verhältnis von eins anzustreben wie Werte aus der Praxis zeigen (vgl. Tabelle 5). Jedoch wurden aus ökonomischen Gesichtspunkten auch Speicher mit energetisch ungünstigerer Geometrie ausgeführt (z.B. Wärmespeicher in Hannover).

Tabelle 5: Zyklenzahl und energetisch optimale Geometrie, Höhe-zu-Durchmesser (h/d)-Verhältnis von Wärmespeichern

	Zyklen/a	h/d
Pufferspeicher	260 bis 280	≈ 3.0
Saisonaler Wärmespeicher	1.2 bis 1.6	≈ 1.0

Obwohl die Praxis zeigt, dass h/d -Verhältnisse von 1 für saisonale Wärmespeicher angestrebt werden sollten, wurden aufgrund von geophysikalischen Einschränkungen, wie Grundwasser oder Felsschichten wurden jedoch häufig geringere h/d -Verhältnisse realisiert, wie z.B. in Hamburg ($h/d \approx 0.4$), Friedrichshafen ($h/d \approx 0.6$) oder Hannover ($h/d \approx 0.7$), vergleiche auch Tabelle 3. Insbesondere wurden die sehr großen Erdbecken-Wärmespeicher wie der 10 000 m³ Erdbecken-Wärmespeicher in Wolfsburg und auch der 30 000 m³ in Mannheim mit sehr flachen Böschungswinkeln geplant was zu geringen h/d -Verhältnissen und sehr großen Oberflächen führt, vgl. Tabelle 6.

Tabelle 6: Volumen V , Höhe h , Böschungswinkel β und Oberfläche A großer Erdbecken-Wärmespeicher

Projekt		Mannheim	Wolfsburg	Marstal
Quelle		[108],[109][110]	[111]	[91]
Volumen V	[m ³]	30 000	10 000	10 000
Böschungswinkel β	[°]	1/1.3	1/2	1/2
Höhe h	[m]	15	8	6.5
Oberfläche A	[m ²]	75 x 50	51 x 51	65 x 42
A/V ratio	[1/m]	0.3	0.5	0.6
aspect ratio *	[-]	0.70	0.23	0.16

* Verhältnis Höhe (h) zu mittlerem Durchmesser $d_m=(d_t+d_b)/2$

4.2 Erdbau, Tiefbau, Spezialtiefbau

In Abhängigkeit von Bodentyp und Bodenklasse sowie Baugrubentiefe (h) kann die Grube mit einem maximalen Böschungswinkel β natürlich geböscht werden (Eigenstandfestigkeit).

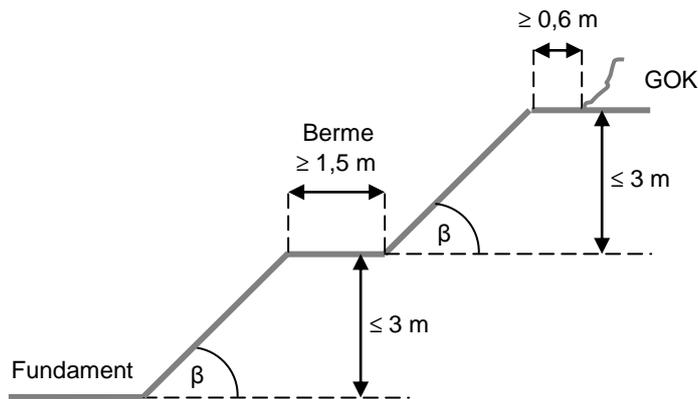


Bild 6: Baugruben mit einer Tiefe von mehr als 5 m müssen mit einer 1.5 m breiten Berme ausgeführt werden.

Bei größeren Wärmespeichern ($h > 5$ m) reduziert sich der maximal mögliche Böschungswinkel auf bis zu 30° (vgl. Bild 7). Dies führt zu ungünstigen h/d - und A/V -Verhältnissen.

Durch geeignete Verbaumaßnahmen kann der maximal mögliche Böschungswinkel vergrößert werden. Durch die meisten Verbaumaßnahmen werden senkrechte Böschungen möglich.

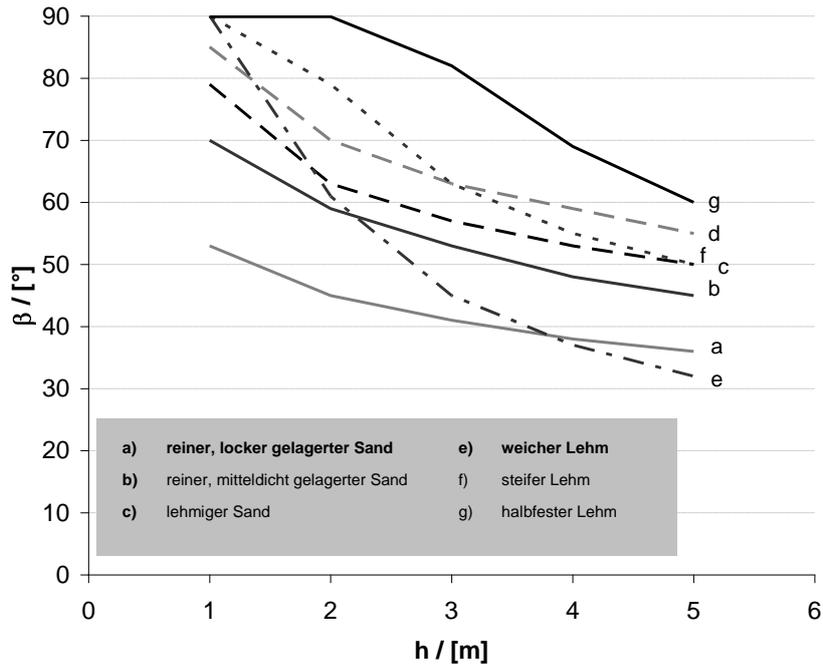


Bild 7: Eigenstandfestigkeit verschiedener Bodenarten in Abhängigkeit des Böschungswinkels β und der Baugrubentiefe (h), aus [112], vgl. z.B. [113], [114]

Bei Anwesenheit von Grundwasser bzw. Schichtenwasser (permanent oder temporär) können nur drei Verbauarten zur Anwendung kommen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Verbauarten, Eignung bei Grundwasser

oberhalb des Grundwassers (bzw. nach dessen Absenkung)	mit Grundwasser
<ul style="list-style-type: none"> • Natürliche Böschung • Trägerbohlwand • Bodenvernagelung 	<ul style="list-style-type: none"> • überschnittene Bohrpfehlwand • Schlitzwand • Spundwand

Im Falle von permanent anstehendem Grundwasser muss zusätzlich eine kostenintensive Unterwasserbetonsohle oder HDI-Sohle³ in Betracht gezogen werden (vgl. [112]). Ohne Grundwasser bietet sich eine Bodenvernagelung an, wie Sie zur Herstellung der Außenlabor-Versuchsspeicher am ITW angewandt wurde (siehe Bild 8, vgl. Kapitel 7.1).

³ Hochdruckinjektionssohle



Bild 8: Links: Stabilisierung der Böschung durch Vernagelung mit anschließender Spritzbetonschicht (Züblin Spezialtiefbau), rechts: Außenlabor mit vernagelter Böschung (ITW)

4.3 Wandaufbau

Die Speicherhülle erfüllt mehrere Aufgaben. Der Wandaufbau muss dicht gegenüber dem Wärmespeichermedium sein (wasser- und wasserdampfdicht), der Verlust der gespeicherten fühlbaren Wärme soll effektiv reduziert werden und das Eindringen von Feuchtigkeit aus dem Erdreich in die Wärmedämmung soll verhindert werden. Zusätzlich soll der Wandaufbau sicher vor Versagen durch z.B. Vandalismus oder Nagetiere sein. Durch zusätzliche Schutzvliese kann Schaden an den einzelnen funktionellen Schichten bei der Konstruktion verhindert werden. Notwendige Durchführungen durch die Abdichtung für z.B. (Schicht-) Beladeeinheit und Mess- und Regelungstechnik sind kritische Punkte und somit auf ein Minimum zu beschränken.

Schematisch ist in Bild 9 ein möglicher Wandaufbau mit außen liegender Wärmedämmung an einer vertikalen Böschung dargestellt. Im Falle von Erdbecken-Wärmespeichern befindet sich die Wärmedämmung innen, wie in Bild 10 dargestellt. Die Komplexität entsteht dadurch, dass der Wandaufbau zum einen gewährleisten muss, dass die Wärmedämmung vor Wasser- und Wasserdampfeintrag von außen und innen geschützt ist, aber zum anderen ein Austrocknen im Falle einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung erlaubt. Bereits bei Anlieferung der Dämmstoffe auf die Baustelle ist mit zumindest geringem Wassergehalt zu rechnen, wie die Erfahrung zeigt. Wie in Kapitel 7.4 beschrieben wird, kann durchfeuchtete Wärmedämmung im Falle von zum Erdreich wasserdampfdiffusionsoffenem Wandaufbau z.B. durch eine diffusionsoffene aber wasserdicht verschweißte

Unterspannbahn wieder austrocknen, wodurch die Wärmeleitfähigkeit wieder auf den ursprünglichen Wert sinken kann.

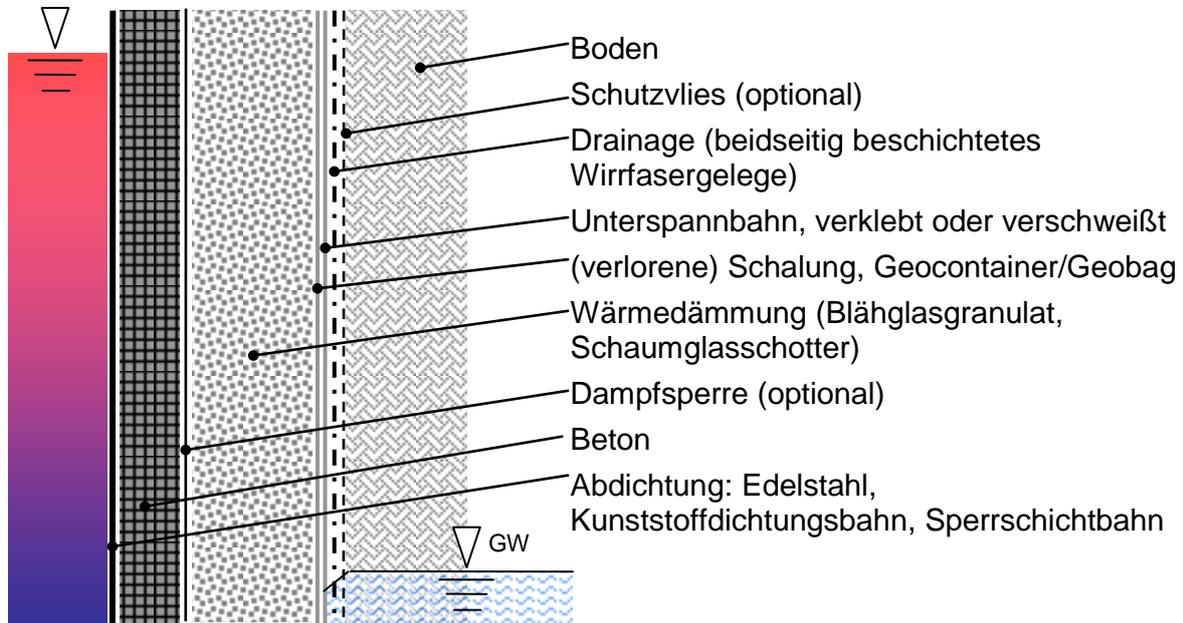


Bild 9: Wandaufbau eines Behälter- Wärmespeichers mit Wärmedämmung außen mit äußerer Abdichtung für Anwendung in Grundwasser (GW)

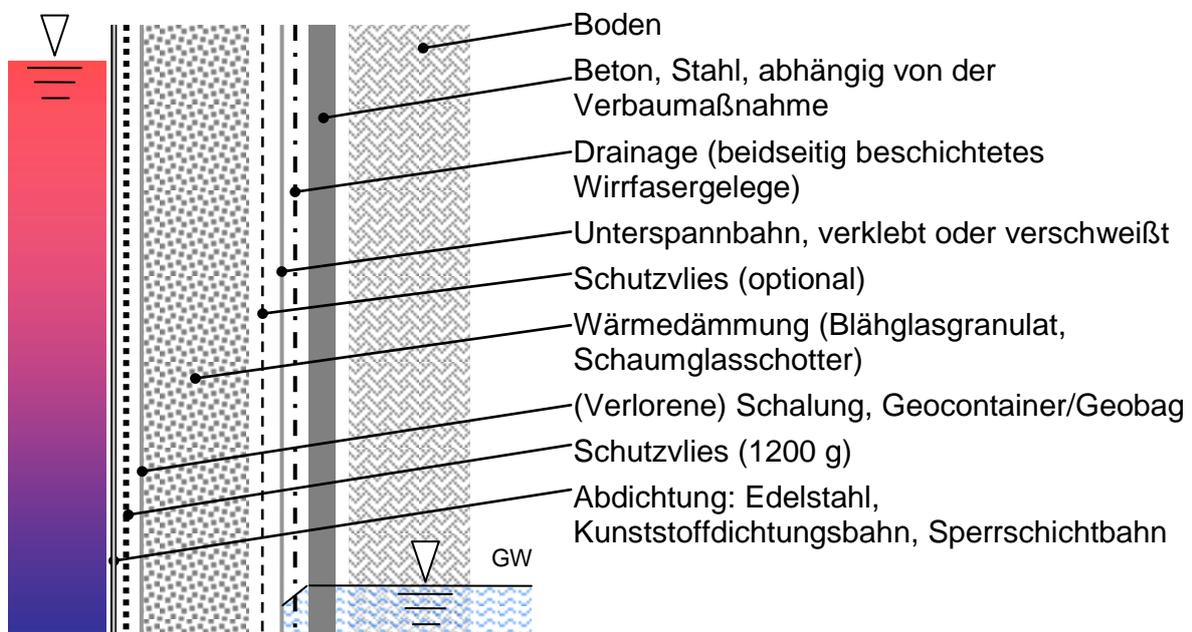


Bild 10: Wandaufbau, Wärmedämmung innen bei Erdbecken-Wärmespeichern

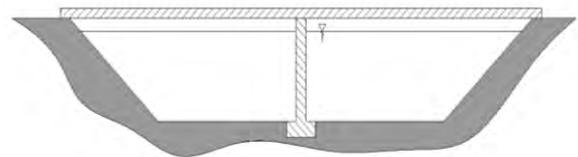
4.4 Abdeckung

In Bezug auf Wärmekapazität und Betriebsverhalten ist der Heißwasser-Wärmespeicher gegenüber den andern Typen vorteilhaft (siehe Kapitel 2.2). Ist kein Kies am Standort vorhanden, sind in der Regel Heißwasser-Wärmespeicher wirtschaftlicher als Kies-Wasser-Wärmespeicher. Kies- und Erdreich-Wasser-Wärmespeicher haben Vorteile, wenn statische Gründe im Vordergrund stehen.

Eine selbsttragende starre Abdeckung bietet gegenüber der schwimmenden Abdeckung den großen Vorteil, dass im Revisionsfall ohne zusätzliche Maßnahmen ein Zutritt zum Speicherinneren erfolgen kann. Selbsttragende Abdeckungen können entweder in Ortbetonbauweise oder durch Fertigteile ausgeführt werden. Beispiele für Ortbetonbauweise sind die Wärmespeicherprojekten in Friedrichshafen [2], Hannover [4] und Crailsheim [52], [53]. Der Pufferspeicher in Crailsheim und beim aktuellen Projekt des 5 700 m³ Wärmespeichers in München [52], [53] wurden Fertigteile verwendet. Nachteilig bei beiden Varianten ist die Notwendigkeit eines Baugerüsts bzw. eines Rüstturms bei der Konstruktion. Dies ist zum einen mit Kosten verbunden, zum anderen wird ein Fundament benötigt, welches während der Bauphase die gesamte Last der Abdeckung trägt. Erst wenn die Elemente miteinander verbunden und vorgespannt werden, trägt sich die Abdeckung selbst.

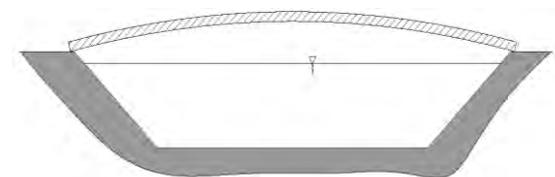
Abgestützte tragende Abdeckung:

- Durchdringung der Abdichtung am Beckenboden
- hohe Last auf Säule(n)
- Wärmebrücke an Decke und Boden



Selbsttragende Abdeckung:

- aufwändige (teure) Konstruktion
- relativ hoher Aufbau (Stich)
- begrenzte Speichergröße (Oberfläche)



Schwimmende Abdeckung:

- einfache (kostengünstige) Konstruktion
- Speichergröße nahezu beliebig (bei aufschwimmender Abdeckung)
- eingeschränkte Begehbarkeit bzw. Befahrbarkeit
- Zugänglichkeit (Wartung/Sanierung)

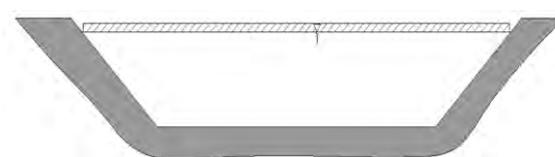


Bild 11: Arten von Abdeckungen

Technisch kompliziert ist zudem die Anbringung der Wärmedämmung. Als Varianten sind die innen liegende und die außen liegende Wärmedämmung möglich. Bei außen liegender Wärmedämmung sind aufgrund der hohen Temperaturgradienten sehr hohe Anforderungen an die Qualität des Betons zu stellen. Um die Rissbildung zu limitieren, muss die Dicke des Betonquerschnitts minimiert werden, da andernfalls sehr viel Bewehrung notwendig wäre. Stark bewehrter Beton ist entsprechend teurer. Im Falle der innen liegenden Wärmedämmung sind technisch schwierige Lösungen für die wärmebrückenfreie (hängende) Befestigung der Wärmedämmung (und der Abdichtung) zu entwickeln. Die Abdeckungen ausgeführter Behälter-Wärmespeicher sind ausnahmslos mit außen liegender Wärmedämmung realisiert worden.

Schwimmende Abdeckungen wurden theoretisch und experimentell in mehreren Pilot- und Forschungsspeichern sowie in einigen Studien untersucht. Dabei wurden sowohl Langzeit-Wärmespeicher mit modularer schwimmender Abdeckung als auch mit auf dem Wasser aufgebauter Variante ausgeführt. Bei der modularen schwimmenden Abdeckung traten Probleme jeweils im Randbereich auf. Auch die Problematik der Wärmebrücken zwischen den Elementen konnte bisher nicht zufriedenstellend gelöst werden. Beim aktuellsten Projekt mit schwimmender Abdeckung beim Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher in Marstal (DK, 2003 [12]) traten Undichtigkeiten bei einer Personenlochdurchführung auf. Zudem muss die damals ausgeführte Konstruktion in Bezug auf Regen- und Kondensatableitung optimiert werden (siehe auch Kapitel 7.10).

Am ITW wurde die schwimmende Abdeckung als Variante „aufschwimmende Abdeckung“ im Rahmen von Außenlaborversuchen untersucht. Dabei wird die Abdeckung im leeren Becken installiert und schwimmt beim Befüllen des Speichers an der Oberfläche (vgl. Kapitel 7.10.3). Diese Ausführungsvariante erfordert flexible Abdichtungsmaterialien, wodurch weitere technische Probleme entstehen, welche noch nicht zufriedenstellend gelöst sind. Zum einen ist die (Dauer-) Temperaturbeständigkeit der flexiblen Kunststoffdichtungsbahnen nicht hinreichend untersucht. Zum anderen ist die geforderte Diffusionsdichtigkeit von derzeit verfügbaren flexiblen Abdichtungsmaterialien noch nicht gegeben (vgl. Kapitel 6.1.2).

Schwimmende Abdeckungen, die auf dem Wasser installiert werden, können im Gegensatz dazu mit Verbundfolien gefertigt werden (z.B. Verbund aus HDPE oder PP und Aluminium), siehe Kapitel 5.2.

In Tabelle 8 ist eine Auswahl ausgeführter Abdeckungen von Forschungs- und Pilot-Wärmespeichern aufgelistet. Weitere alternative Bauformen und Details von schwimmenden Abdeckungen sind in [6] und in [115] zu finden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass, wenn keine besonderen statischen Ansprüche gestellt werden, die schwimmende Abdeckung vorzuziehen ist. Jedoch sind auch hier Details, wie z.B. Niveauregelung, Kondensatableitung oder Erdüberschüttung noch zu optimieren. Wenn Befahrbarkeit oder uneingeschränkter Zugang zum Speicherinneren für z.B. Wartung gefordert wird, kommt die schwimmende Abdeckung nicht in Frage.

Tabelle 8: Ausgeführte Abdeckungen von Forschungs- und Pilot- Langzeit-Wärmespeichern, Referenzen, siehe Tabelle 6 bzw. [116], [117], [118], [119], [120]

Abdeckung	Projekt	V [m ³]	Land	Jahr	Bemerkung
Freitragende Abdeckung	Växjö	1 000	S	1987	Erdbecken
	Särö	640	S	1989	Stahlbehälter in Grube (Wickelfalz)
	Malung	1 000	S	1989	Erdbecken
	Friedrichshafen	12 000	D	1996	Betonbehälter, vorgespannt
	Herlev	3 000	DK	1991	Erdbecken
	Sjökulla	195	FN	1993	Erdbecken
	Hannover	2 750	D	2000	Betonbehälter, vorgespannt
	Attenkirchen	500	D	2001	Betonbehälter, vorgespannt (als Puffer für Erdsonden-Wärmesp.)
	München	6 000	D	2006	Betonbehälter, vorgespannt
Abgestützte Abdeckung	Rottweil	600	D	1994	Betonbehälter, 1 Säule
	Hamburg	4 500	D	1996	Betonbehälter, 6 Säulen
Schwimmende Abdeckung	Wales	100	UK	1977	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Studsvik	800	S	1978	Betonbehälter, modularer Aufbau
	Lombohov	10 000	S	1980	Betonbehälter, modularer Aufbau
	Lyngby	540	DK	1983	modularer Aufbau
	Mannheim	30 000	D	1983	Studie, modularer Aufbau
	Wolfsburg	10 000	D	1984	Studie, auf Wasser Installation
	Hjortekaer	50 000	Dk	1984	Studie, k.A.
	Berlin	170	D	1986	Erdbecken, modularer Aufbau
	Ottrupgaard	1 500	DK	1995	Erdbecken, modularer Aufbau, gelagert auf 2 Querstreben, 4 Säulen
	Jülich	2 500	D	1996	Erdbecken, modular, 1:10 Model
	Lyngby	500	DK	2002	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Marstal	10 000	DK	2003	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Stuttgart	150	D	2005	Erdbecken, aufschwimmende Abdeckung, Außenlaborversuch

Ein Ziel des Projekts war die Entwicklung und Herstellung einer selbsttragenden Abdeckung mit möglichst geringem Materialaufwand, die ohne Baugerüst und Rüstturm aufgebaut werden kann und dabei gegenüber bisherigen Projekten vergleichbare oder geringere Kosten aufweist, vgl. Kapitel 7.10.

5 Materialien

Die Materialien, welche für den Bau von Erdbecken-Wärmespeichern eingesetzt werden, kommen mit der Ausnahme der Wärmedämmung hauptsächlich aus dem Deponie-, Straßen- oder Tunnelbau. Die so genannten Geokunststoffe (geosynthetics), wie Abdichtungsbahnen (Geomembranen), Geogitter, Geovlies und Geotextilien haben im Allgemeinen eine oder mehrere der folgenden Funktionen:

- Trennung,
- Filterung,
- Drainage,
- Bewehrung,
- Schutz und
- Abdichtung.

Eine umfangreiche Beschreibung der verschiedenen Geotextilien sowie deren mögliche Anwendungsgebiete ist in [121] gegeben. Beim Einsatz von Geokunststoffen muss, wie bei der Auswahl der Wärmedämmung und der Abdichtung, auf Einsatzgrenzen bezüglich (Dauer-)Temperaturbeständigkeit und Heißwasserverträglichkeit geachtet werden.

Eine detaillierte Untersuchung von Materialien für den Bau von Erdbecken-Wärmespeichern erfolgte bereits im Rahmen der sogenannten Mannheim-Studie [108]. Der Autor kam zum Ergebnis, dass keine geeigneten Materialien zu vertretbaren Kosten verfügbar sind. Weiterentwicklungen im Bereich der Dämmstoffe und vor allem bei den polymeren Werkstoffen machen jedoch eine Neubewertung notwendig.

Im Folgenden wird näher auf die wesentlichen Komponenten des Wandaufbaus, die Abdichtung und die Wärmedämmung, eingegangen. Im Vordergrund stehen dabei deren Qualität und die Eignung für den Einsatz in Langzeit-Wärmespeichern.

5.1 Wärmedämmung

Die Kenntnisse und Erfahrungen die im Laufe des Projekts bezüglich der Wärmedämmung gewonnen wurden, lassen sich gleichermaßen auf die Technologie der Erdbecken-Wärmespeicher (EB WSp) und der Behälter-Wärmespeicher (HW

WSp) übertragen. Auch der Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm [123] und der Hybridspeicher in Attenkirchen [47], [48] sind nach oben hin wärmegeklämt. Der Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim⁴ [52], [53], [54] wird ebenfalls im oberen Bereich mit Wärmedämmung gebaut. Somit lassen sich die Ergebnisse zumindest partiell auch auf die Erdsonden-Wärmespeichertechnologie übertragen. Nur Aquifer-Wärmespeicher (ATES), vgl. [124], [125] bzw. Rostock [126], Berlin [127] oder Neubrandenburg [128] und Kavernenspeicher (CTES) können aufgrund ihrer Bauart nicht wärmegeklämt werden (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Einsatz von Wärmedämmung bei den unterschiedlichen Langzeit-Wärmespeichertechnologien

	Deckel	Wand	Boden
HW-WSp	ja	ja	empfohlen
EB-WSp	ja	empfohlen	empfohlen
BTES	ja	nein	nein
ATES	nein	nein	nein
CTES	nein	nein	nein

Der Markt stellt eine Vielzahl von Dämmstoffen bereit. Der Boom wurde spätestens durch die EnEV im Jahre 2002 hervorgerufen. Die Auswahl der am Markt erhältlichen Dämmstoffe, die für den Einsatz in Erdbecken-Wärmespeichern geeignet sind, ist dennoch gering. Die Anforderungen unterscheiden sich erheblich von den Anforderungen an Dämmstoffe für das Bauwesen.

Folgende Eigenschaften müssen vom Material erfüllt werden.

- Temperaturbeständigkeit kurzfristig bis 100 °C⁵, permanent bis 95 °C
- Langzeitbeständigkeit
- Druckbeständigkeit (auch bei Feuchtebelastung und hohen Temperaturen)
- Beständigkeit sowie Unempfindlichkeit gegen Wasser und Wasserdampf (Hydrolyse)

⁴ Geplante Fertigstellung in 2007

⁵ Bei Wärmespeichern mit technischer Druckhaltung können auch höhere Temperaturen erforderlich sein, wie z.B. in Crailsheim mit 108 °C bei 3 bar.

Folgende Eigenschaften sind außerdem von Vorteil:

- gute Trocknungseigenschaften
- unempfindlich gegenüber Mikroorganismen und Nager
- gute Verarbeitbarkeit
- geringe Wärmeleitfähigkeit im trockenen sowie feuchten Zustand
- geringe spezifische Kosten
- „umweltschonend“

Die Kosten der einzelnen Materialien müssen im eingebauten Zustand verglichen werden. Dabei ist auch der gesamte Aufbau der Dämmung, Statik, Speicherabdichtung sowie Installation zu berücksichtigen. Zum Beispiel erfordert eine feuchteempfindliche Dämmung einen anderen Aufbau (z.B. Dampfsperre) als eine Dämmung, die unempfindlich gegenüber Feuchte ist. Bei einer mechanisch sehr stabilen aber vergleichsweise teureren Dämmung kann evtl. auf Schutzvliese verzichtet werden, somit kann der Gesamtaufbau mit dem teureren Dämmstoff trotz höherer spezifischer Dämmstoffkosten die wirtschaftlichste Variante sein.

Dämmstoffe werden als Platten oder als Schüttgut gefertigt. Platten werden durch Kleben oder Schrauben befestigt. Es wird im Gegensatz zu schüttfähigen Dämmstoffen kein Behälter bzw. keine Schalung benötigt, um die Wärmedämmung zu montieren. Jedoch gelingt gerade bei unebenem Untergrund, wie er bei Erdbecken-Wärmespeichern vorzufinden ist, ein zwickel- und wärmebrückenfreier Einbau nur unter erheblichem Aufwand.

Die geforderten Eigenschaften unterscheiden sich je nach Einsatzort im Erdbecken-Wärmespeicher.

An die Bodendämmung werden die höchsten Anforderungen bezüglich Druckbeständigkeit dafür die geringsten bezüglich Temperaturbeständigkeit, gestellt. Dagegen muss die Dämmung der Abdeckung nur geringe Lasten abtragen können (abhängig vom Grad der Nutzung: Begehbarkeit, Befahrbarkeit), wird aber mit der höchsten Temperatur und mit der höchsten Dampfbelastung beaufschlagt.

Die Schichtdicke der Dämmung der Seitenwände sollte nach oben hin zunehmen, da im oberen Speicherbereich die höchsten Temperaturen vorzufinden sind. Die bezüglich Kosten und Wärmeverlusten optimale Wandstärke kann nur durch detaillierte transiente Berechnungen bestimmt werden, da diese stark von den Randbedingungen abhängt.

Die Verwendung einer Dämmstoffart für alle Bereiche hat den Vorteil, dass durch den Bedarf an größeren Mengen, ein geringerer spezifischer Preis erzielt werden kann. Gegen die Verwendung eines Dämmstoffs spricht, dass überall Kompromisse eingegangen werden müssen. Es gibt keinen „perfekten“ Dämmstoff.

Tabelle 10 fasst eine Auswahl am Markt erhältlicher Dämmstoffe mit jeweils den wichtigsten Eigenschaften, wie Lieferform (S: Schüttgut, P: Platte, V: Vlies, M: Matte, O: Ortschaum), Wärmeleitfähigkeit (WLF), Kosten, hygroskopische Eigenschaften und Druckfestigkeit, sowie Dauergebrauchstemperatur (T_{max}) zusammen. Als geeignet erweisen sich unter einer großen Auswahl nur fünf Dämmstoffe, wie die Bewertung in Tabelle 10 zeigt.

Tabelle 10: Übersicht der gängigen Dämmstoffe (S: Schüttgut, P: Platte, V: Vlies, M: Matte, O: Ortschaum)

Dämmstoff	Typ	WLF _{tr,10} / [W/(m K)]	Kosten / [€/m ³] ²⁾	hygr./ druckf. ⁵⁾	T _{max} / [°C]	Wertung	Quelle
natürlich, anorganisch							
Blähton	S	0.08 – 1.2 ³⁾	140 – 190	ja/ja	750	bedingt geeignet	[130]
Perlite	S	0.045 – 0.07 ³⁾	140	ja/ bedingt	100	ungeeignet	[129]
Naturbims	S	0.06 – 0.08 ³⁾	170	ja/bedingt	n/a	ungeeignet	[130]
Vermikulite	S	0.06 – 0.07 ³⁾	90	stark/bedingt	n/a	ungeeignet	[130]
natürlich, organisch ¹⁾							
Zellulosefaser	S	0.04-0.045	50-75	ja/nein	n/a	ungeeignet	[130]
Holzwoolleichtbauplatte	P	0.09	390	ja/nein	n/a	ungeeignet	[130]
Baumwolle	S/P	0.04	180	ja/nein	n/a	ungeeignet	[130]
Hanfaser	S/V/M	0.04 – 0.08 ³⁾	120/135/390	ja/nein	n/a	ungeeignet	[130]
Schafwolle	V	0.04	85	ja/nein	n/a	ungeeignet	[130]
synthetisch, organisch							
EPS ⁴⁾	P	0.04	150-210	nein/bedingt	< 85	ungeeignet	[129]
XPS ⁴⁾	P	0.04	270	nein/bedingt	< 75	ungeeignet	[129]
PUR/PIR	P/O	0.025-0.03	180-260	nein/bedingt	<110	geeignet	[129]
Polyesterfaser	M	0.035-0.045	150	nein/nein	n/a	ungeeignet	[129]
Keramikfaser	P	0.035-0.045	150	nein/ja	n/a	ungeeignet	[129]
Ultratect	P	n/a	> 1000	ja/ja	210	ungeeignet	[387]
Elastomerdämmung	P	0.04	140	nein/nein	100	ungeeignet	[399]
synthetisch anorganisch							
Blähglasgranulat	S	0.06 - 0.09	80-140	nein/ja	700	geeignet	[129]
Schaumglasschotter	S	0.06-0.08	70-85	nein/ja	450	geeignet	[129]
Foamglas	P	0.04	350-400	nein/ja	400	geeignet	[130]
Mineralwolle (Steinwolle)	P/M	0.04	160	bedingt/bedingt	250	bedingt geeignet	[129]
Kalziumsilikat	P	0.05-0.065	800	n/a	n/a	ungeeignet	[130]
Schaumbeton	P/O	0.04 – 0.2	<100	nein/ja	1700	geeignet	[402]
Sonstige							
VIP (Vakuumdämmung)	P	0.004	>2000	nein/nein	60	bedingt geeignet	[129]

1) Auswahl

2) Schätzung, Stand 2004, ohne MwSt., ohne Lieferung

3) Je nach Rohdichte / Körnung

4) Perimeterdämmung

5) hydr.: hygrische Eignung, druckf.: ausreichende Druckfestigkeit

Folgende Dämmstoffe wurden detaillierter untersucht (siehe dazu auch Kapitel 6.3)

Schüttgut

- Expandierte Perlite (Perlite)
- Blähglasgranulat (Poraver, Liaver)
- Schaumglasschotter (Millcell, Misapor, Technopor)
- Blähton- Schüttung (Leca, Liapor)

Platten

- Schaumglas (Foamglas)
- Mineral-/Steinwolle (Rockwool)
- Polyurethan-Hartschaum (PUR/PIR) (Puren, Bauder)
- Expandierter Polystyrol-Partikelschaum (EPS) (Ursa, BASF)
- Extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff (XPS) (DOW, Steinbacher)

In Bild 12 sind einige Dämmstoffschüttungen dargestellt.



EGG 2-4 Typ I – 200 kg/m³



EGG 2-4 Typ II – 190 kg/m³



EGG 4-8 Typ II – 185 kg/m³



EGG 8-16 Typ II 150 kg/m³



EP 1 – 100 kg/m³



ECG 4-8 Typ I – 270 kg/m³



ECG 4-8 Typ I - 380 kg/m³



ECG 1-4 Typ I - 340 kg/m³



ECG 1 Typ II 300 kg/m³



FGG 0-20 Typ I – 155 kg/m³



FGG 0-30 Typ I – 160 kg/m³



FGG 0-60 Typ I – 150 kg/m³



FGG 0-90 Typ I – 150 kg/m³



FGG 10/50 Typ II – 195 kg/m³



FGG 10/50 Typ III – 185 kg/m³

Bild 12: Untersuchte Dämmstoffschüttungen mit Korngrößenverteilung und Schüttdichte; EGG: Blähglasgranulat, EP: Perlite, ECG: Blähton, FGG Schaumglasschotter

Blähgas und Schaumglas werden zu weit über 95% aus recyceltem Glas hergestellt, wodurch beide Materialien als umweltfreundliche Materialien eingestuft werden können (vgl. [132], [133]). Für die verschiedenen Speicherbereiche (Deckel, Boden, Wand) werden folgende Dämmstoffe empfohlen:

Tabelle 11: Empfohlene Dämmstoffe

Abdeckung	Blähglasgranulat, Schaumglasschotter, Blähton, PUR/PIR, Steinwolle
Seitenwand	Blähglasgranulat, Schaumglasschotter, Blähton, PUR/PIR
Boden	Schaumglasschotter, Schaumglasplatten (hohe Anforderung an Untergrund, mech. Beanspruchung kann zu Kantenbrüchen und Plattenrissen führen), Blähglasgranulat, Blähton

5.2 Abdichtung

Abdichtungsbahnen, die in Erdbecken-Wärmespeichern eingesetzt werden, müssen folgende Kriterien erfüllen:

Tabelle 12: Anforderungen an die Abdichtung

zwingend erforderlich	Bemerkung
Wasserdicht	
Temperaturbeständig	max. 95 °C, Dauer 90 °C
Hydrolysebeständig	Wasserkontakt
Langzeitstabil	mind. 20 bis 30 Jahre
Schweißbar	Heißluft oder Heizkeil, Extrusion
Verfügbar	auch in klein(er)en Mengen
erwünscht	Bemerkung
Wasserdampfdicht	< 0.001 g/m ² d bei 95 °C
Verarbeitbar	bei allen Außenbedingungen
Robust	(Weiter-) Reißfestigkeit, Reißdehnung, Durchstoßfestigkeit
Kostengünstig	Kosten für montierte und Leckage geprüfte Abdichtung
Sanierbar	Schweißbar auch nach Einsatz

Tabelle 13 zeigt, dass die Mehrzahl der ausgeführten Behälterspeicher mit Edelstahl, dagegen die Mehrheit der Erdbecken-Wärmespeicher mit Kunststoffdichtungsbahn (KDB) abgedichtet wurde.

Tabelle 13: Abdichtungen realisierter (saisonaler) Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher, Forschungs- und Pilotprojekte

	Behälter (11)	Erdbecken (20)
Edelstahl (10)	6	4
KDB/Polymer (16)	3	13
Andere, wie Ton, Bentonit, HL-/WU-Beton (5)	2	3

5.2.1 Stahl, Edelstahl

Stahl und Edelstahl (VA), als Folie oder Blech, wird im Behälterbau eingesetzt. Die Vorteile sind absolute Wasser- und Wasserdampfdiffusionsdichtigkeit sowie uneingeschränkte Heißwasserverträglichkeit. Die Temperaturbeständigkeit und Langzeitbeständigkeit ist polymeren Abdichtungsbahnen überlegen. Nachteilig sind jedoch die hohen Kosten sowie die Gefahr der Oxidation. Durch die geringe Bahnbreite bzw. Plattengröße von 1.5 m sind im Vergleich zu Polymerbahnen viele Schweißnähte auszuführen. Demgegenüber sind einige Polymerbahnen in 5 bzw. 6 m Breite erhältlich.

Um Oxidation zu vermeiden, müssen die Schweißnähte passiviert werden. Für das Fügen stehen zwei Verfahren zur Verfügung.

Rollnahtschweißverfahren

Merkmal: Dicke der Bahn: 0.5 mm, Kosten für installierten qm: 40-50 €⁶

Schutzgasschweißverfahren

Merkmal: Dicke der Bahn: ~2 mm, Kosten für installierten qm: >100 €

Die Abdichtung des Behälter-Wärmespeichers in Rottweil wurde mit dem Rollnahtschweißverfahren ausgeführt. Aufgrund der schlechten Erfahrungen bezüglich Dichtigkeit, siehe Kapitel Leckagen, wurden zumindest in Deutschland alle weiteren Wärmespeicher mit dem Schutzgasschweißverfahren ausgeführt. Die

⁶ Aufgrund der stark steigenden Edelstahlpreise können die Kosten deutlich nach oben variieren

Schweißnähte werden mit dem Farbeindringverfahren bzw. mit der Saugglocke geprüft.

5.2.2 Mineralische Dichtungsbahn

Als mineralische Abdichtung sind neben verdichtetem Ton (vgl. Erdbecken-Wärmespeicher in Ottrupgaard und Berlin) Natriumbentonit bzw. Calciumbentonit erhältlich.

Der Markt stellt eine Vielzahl an Bentonitmatten bzw. geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTB) bereit. Eine Auswahl an Produkten und Herstellern ist in Tabelle 14 dargestellt:

Tabelle 14: Auswahl am Markt erhältlicher Bentonitmatten

Hersteller	Produkt	Aufbau	Verbund
Naue	Bentofix	Geotextil/Bändchengewebe / pulverisierter bzw. granulierter natürlicher Natriumbentonit / Vliesstoff	vernadelt
Huesker	NaBento	Geotextil / pulverisierter natürlicher bzw. (natriumaktivierter) Calcium-Bentonit / Geotextil	vernäht
CETCO	Bentomat	Vliesstoff / granulierter natürlicher Natrium-Bentonit / Gewebe	vernadelt
CETCO	Claymax	Kunststoffolie / granulierter natürlicher Natrium-Bentonit	verklebt/ verklebt + vernäht
GSE	gundseal	Kunststoffolie / granulierter natürlicher Natrium-Bentonit	verklebt
Rawell	FraDimat	Geotextil / vorhydratisierter, polymymermodifizierter natürlicher Natrium- bzw, natriumaktivierter Calcium-Bentonit	verklebt
Laviosa	Geobent	Geotextil / granulierter bzw. pulverisierter natürlicher Natriumbentonit oder natriumaktivierter Calciumbenonit / Geotextil	verklebt/ verklebt + vernäht
Linteco	Linbento	Gewebe-Vlies / natürlicher Natriumbentonit oder natriumaktivierter Calciumbenonit / Vliesstoff	thermisch/ mechanisch

Hinter dem Namen Bentofix der Firma Naue verbirgt sich eine Reihe von Produkten. Für die Abdichtung eines Erdbecken-Wärmespeichers ist die BFG5000 am besten geeignet. Diese wird durch spezielle temperaturbehandelte Widerhakennadeln vernadelt. Die BFG5000 kann dadurch hohe Scherkräfte in verschiedene Richtungen aufnehmen, weshalb sich die BFG5000 besonders gut zum Einbau in steilen Böschungen eignet [398]. Zudem ist das untere Trägergeotextil der BFG5000 in sich

selbst vernäht. Das obere Geotextil ist zusätzlich zur eigentlichen Bentonitpulverschicht in der Matte noch mit weiterem Bentonitpulver angereichert.

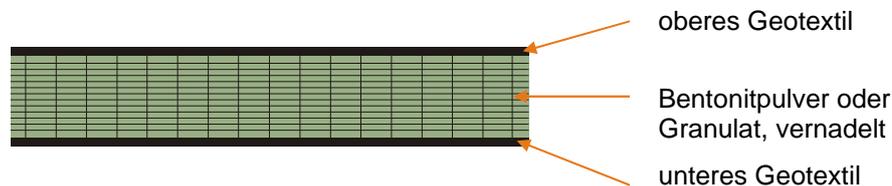


Bild 13: Aufbau der Bentonitmatte BFG5000 von Naue

Dieser Aspekt wirkt sich positiv auf die Dichtungseigenschaften aus. Die Matten können ohne Einstreuen von zusätzlichem Bentonitpulver überlappend verlegt werden. In Tabelle 15 sind die wichtigsten technischen Daten der BFG5000 zusammengefasst.

Tabelle 15: Technische Daten von BFG5000 [398]

Technische Daten	Wert	Einheit
Flächengewicht gesamt	5500	g/m ²
Flächengewicht Deckvliesstoff	300	g/m ²
Flächengewicht Bentonitlage	5000	g/m ²
Flächengewicht Trägergeotextil	200	g/m ²
Schichtdicke gesamt	7	mm
Höchstzugkraft mg	20	KN/m
Höchstzugkraft cmd	11	KN/m
Dehnung bei Bruch	10	%
Dehnung bei Bruch cmd	5	%
Verbundfestigkeit (DIN 10319)	60	N/(10 cm)
Verbundfestigkeit (ASTM D 6496)	360	N/m
Stempeldruckkraft	2500	N
kf-Wert (DIN 18130)	5E-11	m/s
Permittivität (ASTM D 5887)	5E-9	1/s
Index Flux	5E-9	m ³ /(m ² s)
Wasseraufnahme (DIN 18132, nach 24h)	600	%
Quellvolumen	25	ml/2g
Fluid Loss	18	l
Wassergehalt nach 5h bei 105 °C	15	%
Montmorillonitgehalt	90	%
Methylenblauerbrauch	300	mg/g
Rollenbreite	5	m
Rollenlänge	40	m
Überlappungsbereich	30	cm

Der Vorteil von Bentonitbahnen ist, dass diese als breite Bahnen erhältlich sind, die überlappt verlegt werden. Somit ist keine Verschweißung notwendig. Zudem sind

Bentonitbahnen umweltfreundlich. Jedoch überwiegen die Nachteile. Es ist eine Auflast z.B. durch Kies oder Sand notwendig, wodurch der Einsatz für Heißwasser-Wärmespeicher nicht möglich ist. Die Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit ist für den Einsatz als innere Abdichtebene zu hoch. Als äußere Abdichtung gegen Grundwasser ist der Einsatz jedoch denkbar, vgl. Kapitel 4.3.

5.2.3 Bituminöse Abdichtungen, Asphaltbeton

Erfahrungen mit bituminösen Abdichtungen gibt es aus dem Flachdachbau sowie den Disziplinen Talsperrenbau, Pumpspeicherkraftwerk- sowie Trinkwasserbehälterbau. Jedoch ist ein Einsatz bei hohen Temperaturen nicht möglich. Ebenso ist Asphaltbeton trotz einiger Vorteile (viskoelastisches Material, geringeres Risiko der Rissbildung bei Setzungen, Wirtschaftlichkeit) als Abdichtungsmaterial von Wärmespeichern nicht möglich, da Diffusionsdichtigkeit sowie die Langzeittemperaturbeständigkeit bei Heißwasserkontakt nicht gegeben ist.

5.2.4 Kunststoffdichtungsbahnen

Die Auswahl am Markt erhältlicher Polymere ist kaum überschaubar. Die Anzahl von polymeren Materialien, die für Abdichtungsbahnen geeignet sind, ist wesentlich geringer. Dennoch kann eine Vollständigkeit der Auflistung nicht erreicht werden. Die folgend genannten Materialien erfüllen nicht alle die geforderten Kriterien, stellen aber dennoch Alternativen dar, bzw. wurden bereits in Erdbecken-Wärmespeichern mangels besserer Alternativen eingesetzt.

Zusätzlich zur inneren Abdichtung werden auch Regenschutzfolien und Abdichtungen gegen Oberflächen- und Schichtenwasser bzw. Grundwasser benötigt. Dafür geeignete Bahnen sind diffusionsoffen und dennoch wasserdicht (sogenannte Unterspannbahnen). Diese werden auch in diesem Kapitel genannt.

Wie bereits erwähnt, gibt es keine absolut dampfdichte polymere Abdichtungsbahn. Somit muss eine Abdichtung stets aus einer Kombination aus wasserdicht verschweißter Bahn und dampfdicht überlappend verlegter, mit Aluminium oder

Edelstahl beschichteter oder kaschierter Bahn sein. Schweißbare Verbundfolien stellen die konsequente Weiterentwicklung dar.

Tabelle 16: Vergleich flexibler Kunststoffdichtungsbahnen

EIGENSCHAFTEN	HDPE	LLDPE	PVC	EPDM	EIA	CSPE-R	FPP	GCL
CHEMISCHE EXPOSITION	Sehr gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Sehr gut (wenn vernetzt)	Sehr gut	Befriedigend
KOHLENWASSERSTOFF EXPOSITION	Gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Gut (wenn vernetzt)	Gut	Schwach
BEWITTERUNG (UV EXPOSITION)	Excellent	Befriedigend	Schwach	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut (wenn vernetzt)	Sehr gut	Schwach
THERMISCHE STABILITÄT	Schwach	Schwach	Gut	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Gut - Sehr gut (wenn verstärkt)	Gut
ZUGBELASTUNG	Gut	Gut	Gut	Gut	Sehr gut	Sehr gut	Gut - Sehr gut (wenn verstärkt)	Gut
EINAXIALES DEHNUNGSVERMÖGEN	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Befriedigend
MULTIAXIALES DEHNUNGSVERMÖGEN	Schwach	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Befriedigend	Gut	Sehr gut	Befriedigend
DURCHSCHLAGFESTIGKEIT	Befriedigend	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Gut	Gut	Gut
ROBUSTHEIT BEI INSTALLATION	Befriedigend	Befriedigend	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Gut	Sehr gut	Gut
FÜGE VERFAHREN	Thermisch / Sehr gut	Thermisch / Sehr gut	Thermisch oder mit Lösungsmittel Fügbar / Gut	Klebeband / Good	Thermisch / Sehr gut	Thermisch oder mit Lösungsmittel Fügbar / Gut	Thermisch / Sehr gut	Überlappung
SANIERBARKEIT	Gut	Gut	Gut	Gut	Gut	Schwach - Klebstoffe notwendig	Sehr gut	n/a
SPANNUNGSRISSBILDUNG	Befriedigend	Gut	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf	Tritt nicht auf
ANPASSUNGSFÄHIGKEIT (INSTALLATION)	Befriedigend	Sehr gut	Gut	Gut	Gut	Gut	Sehr gut	n/a
KOSTEN PRO ROLLE	Niedrig	Niedrig / Mittel	Mittel	Mittel / Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel

n/a= not available

Da es keine Abdichtungsbahnen gibt, die speziell für den Einsatz in Wärmespeichern entwickelt wurden, muss auf Materialien, die in anderen Bereichen eingesetzt werden zurückgegriffen werden. Vor allem die hohen Ansprüche bezüglich Temperaturbeständigkeit werden in der Regel bei den eingesetzten Materialien verwandter Technologien und Sektoren nicht erfüllt.

Tabelle 17: Verwandte Technologien

Bereich	Material	Methode	Quelle
Solarteich	Ton, Bentonit, HDPE, PP, XR-5	Schweißmethoden	[131],[134],[135],[136],[137],[138],[139],[140]
Deponiebau	HDPE, PP	Schweißmethoden, Leckageprüfung	[141],[142],[143],[144]
Tunnelbau	HDPE, PP	Schweißmethoden	[145]
Rückhaltebecken, Pool, Teich	HDPE, PP, PVC, FPO, TPE, Elastomere, Bentonit	Schweißmethoden, Leckageprüfung, Abdeckung	[146],[147],[148],[149]
Dammbau	HDPE, PP	Schweißmethoden, Leckageprüfung	[150],[152]
Kanal	Ton, Bentonit, PVC, HDPE, PP	Leckageprüfung	[151]
Flachdach	Elastomere Membranen, FPO, TPE, PVC	Schweißmethoden, Leckageprüfung, Dampfsperre	[153],[154]
Auffangbecken, Chemiebehälterbau	HDPE, PP, FPO	Schweißmethoden, Leckageprüfung	[370]
Gas und Dampfspeicher	Elastomere Membranen	vorgefertigte Bahnen, Dampfsperre	[371]
Membran Dächer	Fluorpolymere (ETFE)	Abdeckung	[372]
Korrosionsschutz	Elastomere	Dampfsperre	[155]
Rohrleitung	PIB, PEX, HMPE, PE-RT	-	[156],[157]

Polyester und PC sind nicht hydrolysebeständig. Technische Kunststoffe, wie PSU oder PA scheiden aufgrund der sehr hohen Kosten aus. Höherwertige Fluorpolymere wie PTFE, PFA, THV sind noch temperaturbeständiger oder chemikalienbeständiger, sind aber entsprechend sehr teuer. Die Preise von technischen Kunststoffen liegen teilweise deutlich über den Preisen von Edelstahl.

Eigenschaften von Kunststoffen sind z.B. in [158] zu finden.

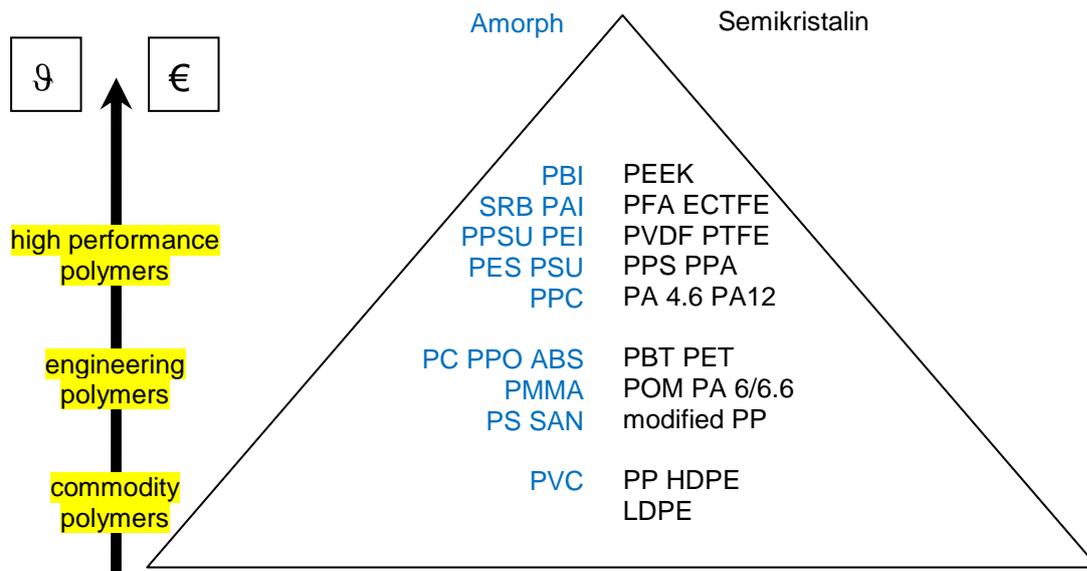


Bild 14: Polymer Performance Pyramide

Eine Auswahl mit Einschränkungen geeigneter polymerer Abdichtungsbahnen ist in Tabelle 18 gegeben.

Tabelle 18: Auswahl an Kunststoffdichtungsbahnen

Kunststoff	Hersteller	max. Temperatur	Bemerkung
Kautschuk			
Butyl (IIR)	Saarnova, Trelleborg, Contitech	bis ~ 70 °C	Plane (bis 2500 m ² vorkonfektioniert) Kombination aus EPDM und IIR denkbar, eingeschränkt schweißbar, gute Langzeitbeständigkeit, max. Dauergebrauchstemperatur ausreichend, geringer Diffusionswiderstand
EPDM	Saarnova, Trelleborg, Contitech	95 °C, aber unbestätigt	
TPE			
Santoprene	AES	> 95 °C, aber unbestätigt	flexibel, ggf. gute Langzeitbeständigkeit, max. Dauergebrauchstemperatur ausreichend, geringer Diffusionswiderstand
Trefsin	AES		
FPO			
MPG	Sarnafil	~ 80 °C	flexibel, nicht überschaubare Vielfalt an TPE/ FPO am Markt, geringe Langzeitbeständigkeit, geringe max. Dauergebrauchstemperatur geringer Diffusionswiderstand
Lucobit	BASF		
Extrupol	Schedetal		
Flurpolymer			
ETFE	Nowofol/ Dupont	> 150 °C	ggf. ohne DS möglich, kaum verschweißbar, hohe max. Dauergebrauchstemperatur, Verarbeitung auf der Baustelle schwierig, Kosten
PVDF	Symalit	150 °C	wie ETFE, aber geringere Festigkeit
Polyolefine			
PP	GSE, Basell	100 °C (140 °C)	Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. ausreichend Eigenschaften durch Compoundierung (und Vernetzung) anpassbar mittlerer Diffusionswiderstand, DS notwendig
PEHD	GSE, Agru	70 – 80 °C (90- 120 °C)	
PE-RT	n/a	n/a	Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. höher, kaum Erfahrung, ggf. beschleunigte Alterung an Schweißverbindung
PE-X	n/a	120	Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. höher, Erfahrungen im Rohrbau Verarbeitbarkeit, Verschweißbarkeit, stark eingeschränkt ggf. ohne DS möglich nachträgliche Vernetzung ggf. möglich
Sonstige			
XR-5 (PVC + Elvaloy)	Seaman	95 °C Herstellerangabe	1000 m ² Plane vorkonfektionierbar, Langzeitbeständigkeit und max. Dauergebrauchstemperatur ggf. ausreichend geringer Diffusionswiderstand: DS notwendig, Probleme in El Paso Solar Pond
Spritzkunststoff			kein geeignetes Produkt gefunden

DS: Dampfsperre, TPE: Thermoplastische Elastomere, FPO: Flexible Polyolefine

Weitere Elastomere wie SBR, CIIR, HIIR, BIIR haben ähnliche mechanische und physikalische Eigenschaften wie Butyl, sind aber dampfdiffusionsoffener. Epoxid oder Polyester Harz ist eine weitere Alternative. Polyester Harz wurde als GFK-Sandwich im Forschungsspeicher in Ilmenau eingesetzt [43].

Elastomere zeigen generell ein besseres Alterungsverhalten und lassen höhere Dauergebrauchstemperaturen zu als Polyolefine. Jedoch ist ihr Einsatz als Abdichtung erdvergrabener Langzeit-Wärmespeicher nur begrenzt möglich, da keine uneingeschränkte Schweißbarkeit gegeben ist. Ein großer Vorteil ist die sehr hohe Dehnbarkeit (Reißdehnung). Dadurch ist das Material sehr biegsam und flexibel. Dies ermöglicht die Vorfertigung großer Planen (bis zu 5000 m²), die zusammengerollt (vgl. Bild 15) auf die Baustelle geliefert werden. Flexible Bahnen werden im Speziellen für die aufschwimmende Abdeckung benötigt, vgl. Kapitel 7.10.3. Nachteilig ist die geringe Diffusionsdichtigkeit von Polymeren, vgl. Kapitel 6.1.2.



Bild 15: EPDM im Außenlabor: Links, Lieferung als vorgefertigte Plane, Mitte: ausbreiten im Außenlabor, rechts Fügerand mit dem das Verschweißen ermöglicht wird.

In Tabelle 20 ist abschließend eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Edelstahlabdichtung (VA) und Kunststoffdichtungsbahn (KDB) gegeben. Sperrschichtbahnen haben die Vor- und Nachteile der jeweiligen KDB, sind jedoch wasserdampfdicht. Der Preis einer Sperrschichtbahn liegt deutlich über der entsprechenden Kunststoffdichtungsbahn. Drei Verbundfolien wurden untersucht, vgl. Tabelle 19.

Tabelle 19: Verbundfolien

PE-PA-AI-PA	Wipak	eingeschränkte Verschweißbarkeit, Verarbeitung auf der Baustelle schwierig, Alterungsverhalten ungenügend (Delaminierung)
PP-AI-PP	Féron	Sperrschichtbahn, verschweißbar, geringe Robustheit, UV-Beständigkeit ungenügend
PEHD-AI- PEHD	Agru	Sperrschichtbahn, verschweißbar, gute Eignung,

Generell muss festgehalten werden, dass gegenwärtig keine vollständig geeigneten Abdichtungsmaterialien verfügbar sind. Derzeit müssen bezüglich Alterung und maximaler Dauergebrauchstemperatur Einschränkungen hingenommen werden.

Tabelle 20: Gegenüberstellung VA und KDB

VA	KDB	Sperrschichtbahn
<ul style="list-style-type: none"> + Temperaturbeständigkeit + Alterungsbeständigkeit + Diffusionsdichtigkeit + Robustheit 	<ul style="list-style-type: none"> + Lieferform (5 – 7m Bahn) + Schweißverfahren/ Schweißgeschwindigkeit + Leckageprüfung + Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> + Diffusionsdichtigkeit + Schweißverfahren/ Schweißgeschwindigkeit + Robustheit
<ul style="list-style-type: none"> - Korrosion (Passivierung) - Schweißverfahren - Lieferform (Platte) - Untergrundbeschaffenheit - Preis - (Primärenergieeinsatz) 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturbeständigkeit - Alterungsbeständigkeit - Diffusionsdichtigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturbeständigkeit - Alterungsbeständigkeit - Kosten - Lieferform (1.5 m Bahn)

5.2.5 Alterung von Kunststoffdichtungsbahnen

Polymere wurden bereits in vielen Forschungs- und Pilotprojekten eingesetzt (vgl. Kapitel 3). Die Erfahrungen aus den Pilotprojekten reichen jedoch nicht aus, um verlässliche Aussagen über die Lebensdauer treffen zu können. Zum einen ist durch die geringe Anzahl der Projekte die Datenbasis sehr gering und zum anderen werden unter realen Bedingungen längere Beobachtungsperioden benötigt, um belastbare Aussagen treffen zu können. Einige der älteren Pilot- und Forschungsprojekte sind nicht mehr in Betrieb (Studsvik, Lambohov, Stuttgart, Berlin, Chemnitz). Bei anderen ist das Temperaturniveau niedriger, als bei neuen Projekten gefordert (z.B. Steinfurt, Marstal (SW)).

Die Lebensdauer von polymeren Abdichtungen ist stark abhängig vom umgebenden Medium (Wasser/Luft) und von der Temperatur, vgl. Anhang. Systematische

Untersuchungen zur Ermittlung der Lebensdauer polymerer und elastomerer Abdichtungsbahnen für den Einsatz in Wärmespeichern wurden bislang nicht durchgeführt. Bisherige Untersuchungen [108] bis [168] wurden unter ungeeigneten bzw. nur bedingt geeigneten Auslagerungsbedingungen (Temperatur, Medium, Dauer) durchgeführt. Eine Übertragbarkeit bzw. Vergleichbarkeit ist somit nicht bzw. nur eingeschränkt gegeben. Zudem wurden jeweils nur einzelne Materialien untersucht. Die Ergebnisse lassen jedoch erkennen, dass für die untersuchten polymeren Materialien unter den geforderten Bedingungen (Temperatur, Medium: Wasser/Luft) eine Lebensdauer von über 20 Jahren nicht in jedem Fall gewährleistet werden kann.

Berechnungsbeispiel

Eine grobe Abschätzung zur Lebensdauer bei bekanntem Temperaturverlauf kann für PEHD, PP und PERT auf Basis von Literaturwerten mittels Berechnung mit dem Arrhenius Ansatz gegeben werden.

Die Lebensdauer wird für vier verschiedene Temperaturverläufe berechnet. Bei den in Bild 16 dargestellten Temperaturverläufen handelt es sich um gemessene (Friedrichshafen: FN, Hannover: H) bzw. simulierte (Eggenstein: EG, Marstal) Monatsmittelwerte.

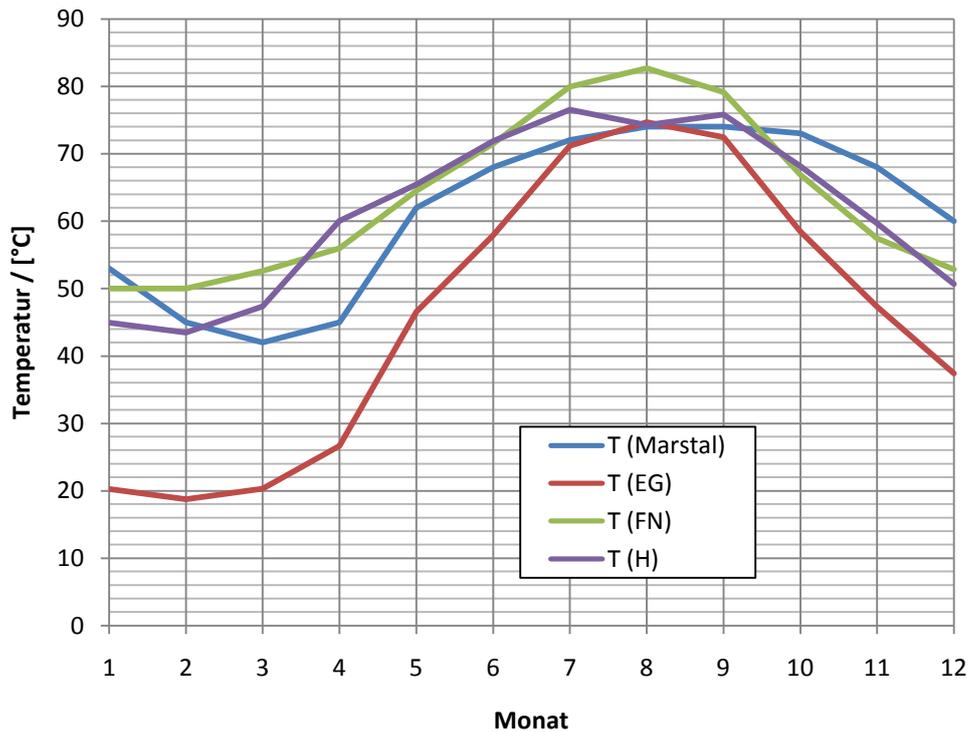


Bild 16: Gemessene bzw. simulierte Temperaturprofile, Monatsmittelwerte

Die rechnerische Lebensdauer wird für vier verschiedene Materialien bestimmt:

Tabelle 21: Lebensdauer als Funktion der Temperatur der vier Membranen, Ausgleichsgeraden entsprechend Bild 17

Membran	Quelle	Approximation	Methode
PEHD (GSE)	[163]	$\tau = 17875 e^{-0.1 \vartheta}$	Reißfestigkeit/Reißdehnung
PEHD (NAUE)		$\tau = 9599 e^{-0.09 \vartheta}$	Reißfestigkeit/Reißdehnung
PEHD (Agru)	[167]	$\tau = 7929 e^{-0.08 \vartheta}$	Zeitstandskurve
PERT (Agru)		$\tau = 2015 e^{-0.09 \vartheta}$	Zeitstandskurve

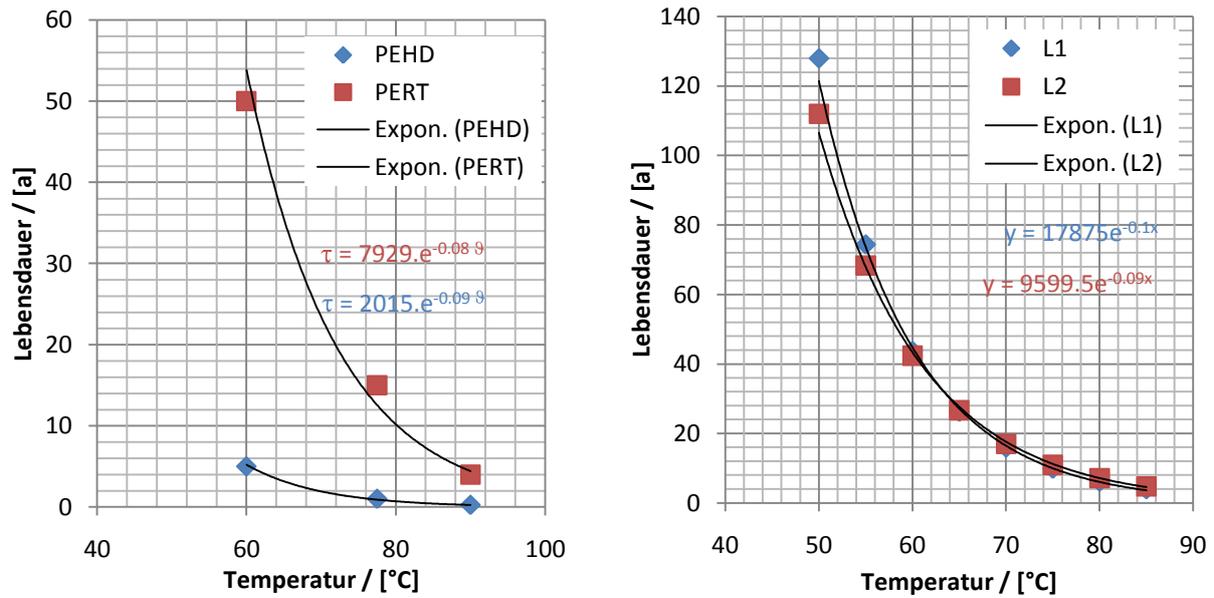


Bild 17: Lebensdauer als Funktion der Temperatur, links Agru PEHD und Agru PERT [167], rechts GSE PEHD und Naue PEHD [162]

Mit Hilfe der Ausgleichskurven von Tabelle 21 bzw. Bild 17 kann unter Berücksichtigung verschiedener Temperaturverläufe eine rechnerische Lebensdauer bestimmt werden. Dies ist beispielhaft für Agru PEHD für den Temperaturverlauf T(EG) in Tabelle 22 dargestellt.

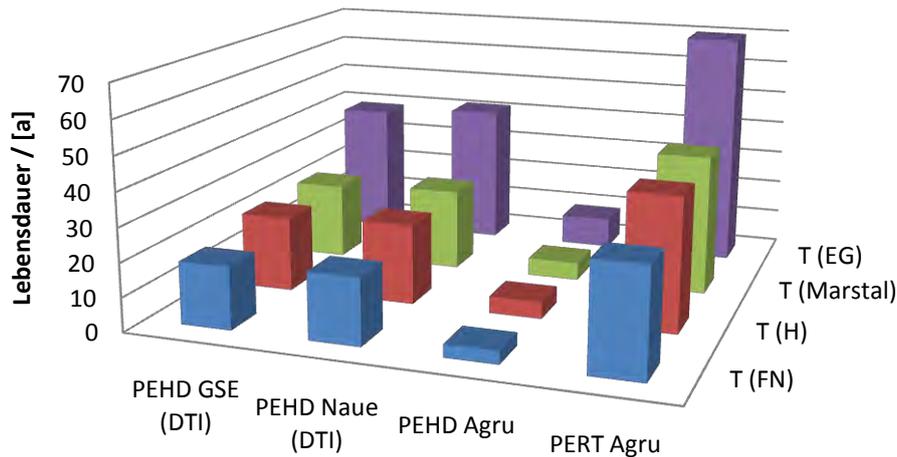
Tabelle 22: Berechnung der Lebensdauer von Agru PEHD für Temperaturverlauf T (EG) entsprechend Bild 16

	Monat	Anteil $t_n / [\%]$	Temperatur $\vartheta / [^{\circ}\text{C}]$	Lebensdauer $\tau_n / [\text{a}]$	t_n / τ_n [1/a]
1	Januar	8.33	20	17	0.00488
2	Februar	8.33	19	35	0.00237
3	März	8.33	20	46	0.00181
4	April	8.33	27	35	0.00237
5	Mai	8.33	47	8	0.01096
6	Juni	8.33	58	4	0.01881
7	Juli	8.33	71	3	0.02696
8	August	8.33	75	3	0.03228
9	September	8.33	72	3	0.03228
10	Oktober	8.33	58	3	0.02950
11	November	8.33	47	4	0.01881
12	Dezember	8.33	37	9	0.00916
Summe / [1/a]					0.19019
Lebensdauer / [a]					5.25

Die Lebensdauer kann durch Summation nach Gl. (1) berechnet werden

$$\tau = \frac{1}{\sum \frac{t_n}{\tau_n}} \quad (1)$$

Damit ergeben sich vom jeweiligen Temperaturverlauf entsprechend Bild 16 abhängig die in Bild 18 dargestellten rechnerischen Lebensdauern für die untersuchten Materialien.



	PEHD GSE (DTI)	PEHD Naue (DTI)	PEHD Agru	PERT Agru
T (FN)	18	20	4	31
T (H)	22	24	5	39
T (Marstal)	23	24	5	41
T (EG)	39	42	9	70

Bild 18: Vergleich der rechnerischen Lebensdauer (in Jahren) für die vier untersuchten Membranen für vier verschiedene Temperaturprofile

Die Daten von PEHD (GSE) und PEHD (Naue) sind in etwa vergleichbar. Abhängig vom Temperaturprofil wird eine rechnerische Lebensdauer zwischen 20 und 40 Jahren erreicht. Die Unsicherheit ist hoch. Zum einen ist die Datenbasis gering (Anzahl untersuchter Proben) und zum anderen muss bei der Anwendung des Arrhenius-Ansatzes auf Messpunkte bei nur drei Temperaturen mit großer Vorsicht beurteilt werden.

In einer Studie des Dänischen Technologieinstituts (DTI) [162], [163] wird erwähnt, dass die Lebensdauer der untersuchten PEHD Membranen höher ist, als die der untersuchten PP-Membran. Daten zu weiteren Materialien liegen nicht vor.

Die starken Abweichungen der Daten von Agru dürften hauptsächlich darin begründet sein, dass nicht, wie im Falle der Studie des DTI, die Membran (mit Stabilisatoren, Antioxidation usw.) untersucht wurden, sondern das Rohmaterial. Zudem sind die Bedingungen der Auslagerung bzw. Alterung nicht mit denen des DTI vergleichbar.

Die Dauergebrauchstemperatur von 95 °C und Alterungsbeständigkeit von mindestens 30 Jahren konnte im Rahmen des Projekts für kein Material gezeigt werden. Systematische Alterungs- bzw. Degradationsuntersuchungen konnten im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden. Für eine belastbare Aussage zur Lebensdauer von polymeren Abdichtungsmaterialien sind systematische Untersuchungen zum Alterungsverhalten notwendig.

6 Innenlaborversuche

Innenlaborversuche wurden durchgeführt, um die Materialien, die bei der Marktrecherche als zumindest bedingt geeignet identifiziert wurden, bezüglich ihrer Materialeigenschaften zu untersuchen. Im Bereich der Abdichtungen wurden die Wasserdurchlässigkeit von Bentonitmatten (Kapitel 6.1.1) und die Dampfdichtigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen (Kapitel 6.1.2) untersucht. Zudem wurden Untersuchungen bezüglich Reißfestigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen durchgeführt (Kapitel 6.2).

Bei den Wärmedämmstoffen wurde die Wärmeleitfähigkeit (Kapitel 6.3) gemessen und das Trocknungsverhalten charakterisiert (Kapitel 6.4). Der Reibungswinkel einiger schüttfähiger Dämmstoffe wurde bestimmt (Kapitel 6.4).

In Kapitel 6.5 wird kurz auf eine Untersuchung zu chemischen Prozessen bei Verwendung von Erdreich-Wasser als Speichermedium bei hohen Temperaturen eingegangen.

6.1 Permeation

6.1.1 Wasserdurchlässigkeit durch Bentonitmatten

6.1.1.1 Theoretische Grundlagen

Die (Wasser-)Durchlässigkeit von porösen Körpern wird mit der hydraulischen Leitfähigkeit beschrieben. Nach ASTM D 5887 [357] bzw. DIN 18130 [358] wird die hydraulische Leitfähigkeit nach Umformen des Darcy-Gesetzes entsprechend Gl. (2) angegeben. In der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f) ist bereits eine Temperaturabhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit enthalten.

$$k_f = \frac{\dot{V} \cdot d}{A \cdot H_w} \quad (2)$$

Der Quotient aus der durchströmten Probendicke (d) und dem hydraulischen Höhenunterschied der Wassersäule (H_w) entspricht einem konstanten Druckgradienten (dp/dx). Der durch die Probe permeierende Volumenstrom (\dot{V}) wird

auf die Fläche (A) bezogen. In DIN 18130 wird die hydraulische Leitfähigkeit als Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bezeichnet. In allen internationalen Journalen und Berichten über die Wasserdurchlässigkeit wird dieser Wert als hydraulische Leitfähigkeit bezeichnet. Deshalb soll hier von der hydraulischen Leitfähigkeit gesprochen werden. Die hydraulische Leitfähigkeit wird in der Industrie auch häufig als k_f -Wert bezeichnet.

In Bild 19 ist der Verlauf der Darcy-Geschwindigkeit als Funktion des hydraulischen Gradienten und der Temperatur dargestellt.

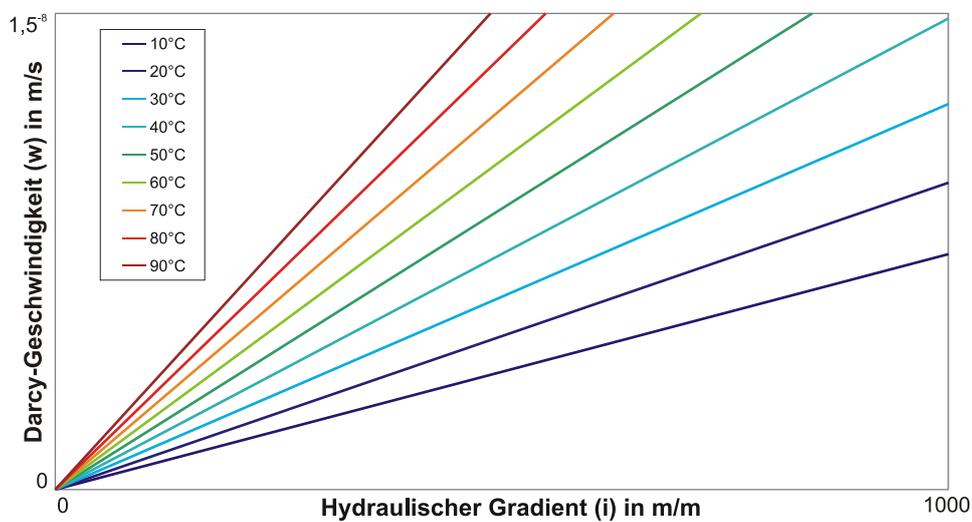


Bild 19: Darcy-Geschwindigkeit als Funktion des Hydraulischen Gradienten mit der Temperatur als Parameter

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (k) ist das Produkt aus der hydraulischen Leitfähigkeit und der Viskosität des Wassers. Die Viskosität des Wassers ist abhängig von der Temperatur.

$$k = k_f \cdot \eta \quad (3)$$

Eine Einteilung in Durchlässigkeitsbereiche für poröse Stoffe (z.B. Böden) ist in Tabelle 23 gegeben. Die BFG5000 befindet sich mit einem k_f -Wert von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s im undurchlässigen Bereich.

Tabelle 23: Einteilung in Durchlässigkeitsbereiche nach DIN EN ISO 18130 [364]

hydraulische Leitfähigkeit k_f / [m/s]	Bereich
$< 10^{-8}$	sehr schwach durchlässig
10^{-8} bis 10^{-6}	schwach durchlässig
10^{-6} bis 10^{-4}	durchlässig
10^{-4} bis 10^{-2}	stark durchlässig
$> 10^{-2}$	sehr stark durchlässig

Eine ebenso häufig verwendete Größe ist die Permittivität (Ψ). Diese ergibt sich aus dem Quotienten aus hydraulischer Leitfähigkeit und der Dicke der porösen Schicht. Da anhand der Permittivität Vergleiche zwischen unterschiedlich mächtigen Abdichtungssystemen möglich sind, wird die Permittivität häufig von den Herstellern angegeben [172], [398].

$$\Psi = \frac{k_f}{d} \quad (4)$$

Dem Flüssigwassertransport entsprechend der Darcy-Gleichung (2) kann ein Wasserdampftransport auf Grund eines Konzentrationsgefälles bzw. eines Partialdruckgefälles ($\Delta p_v/d$) überlagert sein. Der Diffusionsprozess kann mit dem Fick'schen Gesetz beschrieben werden. Auf die Problematik der Wasserdampfdiffusion (WVT) angewandt ergibt sich

$$WVT = \frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_v}{d} \quad (5)$$

Dabei ist der Wasserdampfdiffusionsstrom (WVT) abhängig von der Partialdruckdifferenz über der Probe (Δp_v), die exponentiell mit der Temperatur ansteigt. Der Diffusionskoeffizient D ist durch den Quotient aus dem Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in Luft δ_a und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ ersetzt (siehe dazu auch Kapitel 6.1.2).

6.1.1.2 Versuchsaufbau zur Permeationsmessung von Bentonitmatten

Die Messungen der Permeationswiderstände wurden mit einer eigens für diesen Zweck entwickelten Apparatur durchgeführt. Dabei konnte auf Arbeiten von [171]

zurückgegriffen werden. Der Aufbau und die Konstruktion der Apparatur werden im Folgenden kurz beschrieben.

Unter der Annahme, dass der k_f -Wert eine materialspezifische Konstante ist, hängt die Durchlässigkeit entsprechend den Gleichungen (2) und (3) von den Parametern hydraulischer Gradient

$$i = \frac{H_w}{d} \quad (6)$$

und der Viskosität des Wassers (η) und somit von der Temperatur (T) ab. Zusätzlich hat die Auflast, welche über die Kieswassersäule H_{kW} auf die Bentonitmatte wirkt, Einfluss auf die Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeit muss also bei veränderlicher Wasser bzw. Kies-Wassersäule bestimmt werden. Die Mess-Apparatur wurde entsprechend konzipiert. Die Heizung erfolgt extern über ein Thermostat in einem Temperaturbereich zwischen 10 °C und 95 °C. Die Kieswassersäule kann mit Hilfe eines Normdruckzylinders im Bereich 1 m bis 75 m simuliert werden. Die Wassersäule wird durch den Behälterdruck mittels eines Regelventils im Bereich zwischen ungefähr 1 m und 30 m eingestellt.

Für die Bestimmung der Durchlässigkeitsrate wurde ein gravimetrisches Verfahren gewählt. Die Permeations-Mess-Apparatur wurde nach Plänen von ITW und Pfeil & Koch Ingenieure Stuttgart (PKi) von der Firma Raff und Grund, Freiberg am Neckar, hergestellt und in einer Klimakammer des ITW an einem Dreibein fest montiert. Bild 20 zeigt ein Foto sowie eine schematische Darstellung der Permeations-Mess-Apparatur, in der die wichtigsten Komponenten und Bauteile zu sehen sind. Die Waagschale besteht aus einer wasserdichten Edelstahlhülle und ist im Inneren mit Schaumglas wärmegeklämt, um die Wärmeverluste zu minimieren und die Waage vor zu hohen Temperaturen zu schützen. Die Messdaten der Waage sowie die gemessenen Temperaturen, relativen Feuchten und Drücke können auf einem Messrechner in Labview® [400] abgelesen und archiviert werden.

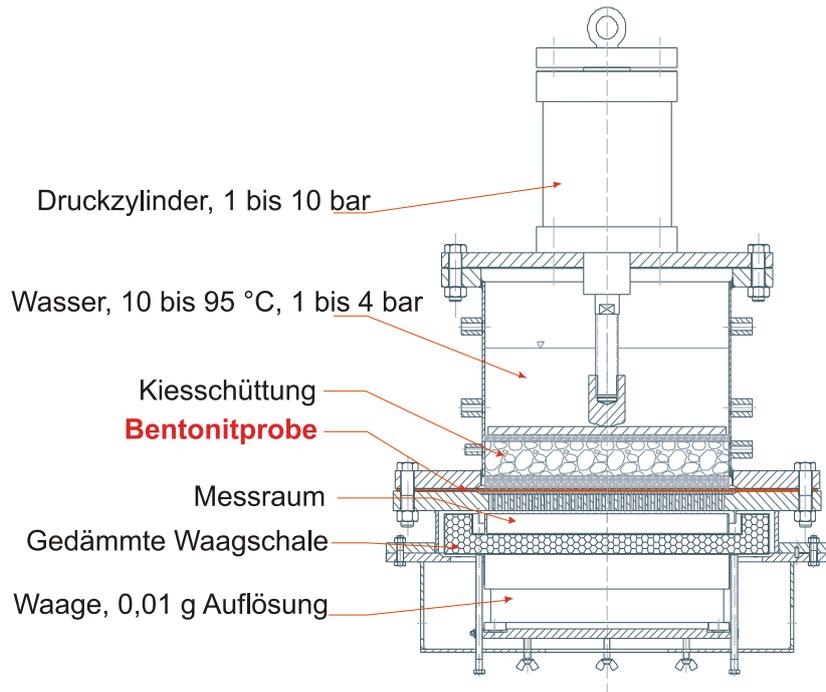


Bild 20: Foto und prinzipieller Aufbau der Permeations-Mess-Apparatur mit allen wichtigen Komponenten

6.1.1.3 Messung der Permeation durch Bentonitmatten

Es wurden Messungen an fünf Proben zwischen 10 °C und 90 °C bei jeweils unterschiedlichen Wasser- und Kieswassersäulen durchgeführt. Die Ergebnisse, die aus den Innenlaborversuchen gewonnen wurden, sind im Detail in [169] beschrieben.

Die Permeationsrate der einzelnen Messungen sind in Bild 21 über dem hydraulischen Gradienten mit der Temperatur und der Wassersäule als Parameter aufgetragen.

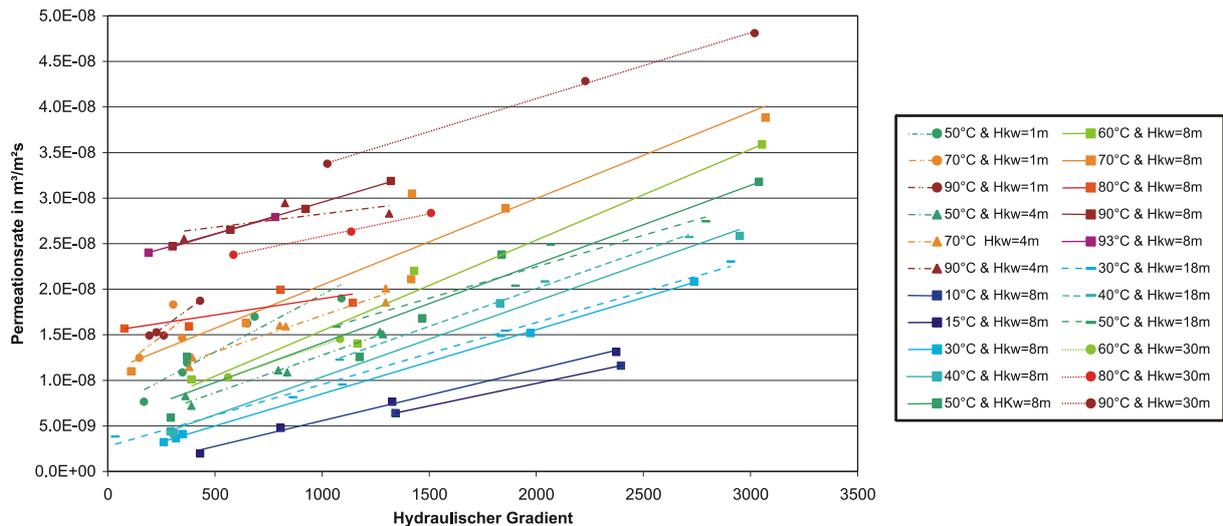


Bild 21: Gemessene Permeationsrate in einem Temperaturbereich von 10 °C bis 93 °C abhängig vom hydraulischen Gefälle ($\Delta H/d$) mit der Kieswassersäule (H_{KW}) als Parameter

Nach dem Gesetz von Darcy, vgl. Gleichung (2), müssten die Ausgleichsgeraden alle den Ursprung schneiden, da ohne Wassersäule keine Permeation stattfinden würde. Die Permeation ohne Anliegen eines hydraulischen Gefälles ist in einem überlagerten Transport durch Wasserdampfdiffusion begründet. Aufgrund des Messaufbaus stellt sich über der Probe ein Temperaturgradient und somit bei konstanter relativer Feuchte auch ein Dampfdruckgefälle ein.

Der Diffusionsanteil lässt sich graphisch aus den Messwerten ermitteln, indem man den Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der Ordinate bestimmt. Der Anteil der Diffusion für eine Auswahl an Messreihen ist in Bild 22 dargestellt.

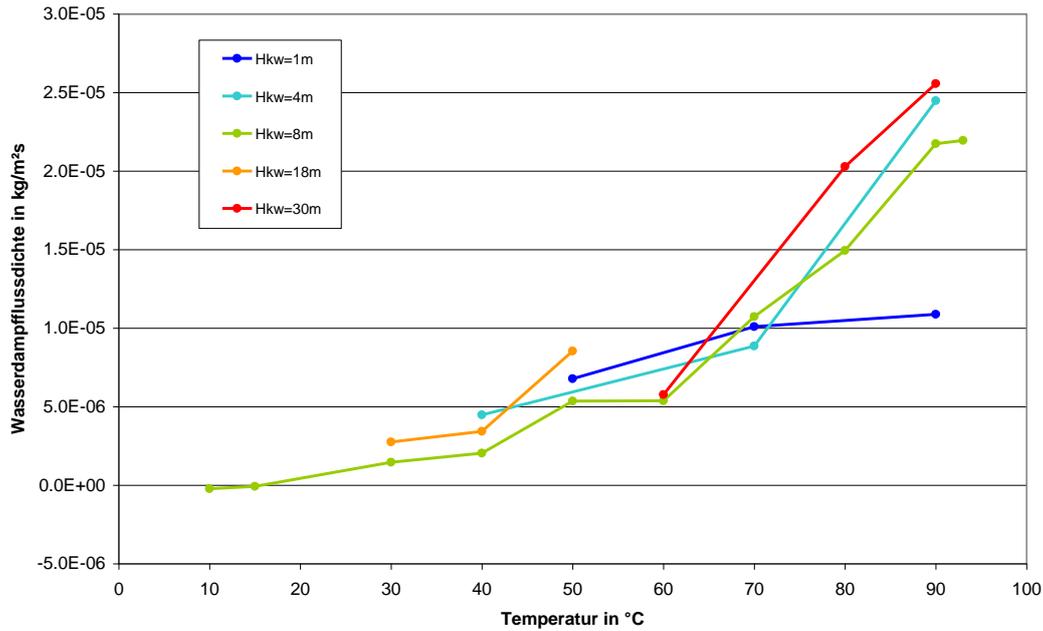


Bild 22: Verlauf der aus den Messungen graphisch ermittelten Wasserdampfflussdichten in Abhängigkeit von der Temperatur mit der Kieswassersäule als Parameter

Aus den Werten der Wasserdampfflussdichte lassen sich mit Gleichung (5) die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen bestimmen. In Bild 23 sind die nach Gleichung (5) berechneten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen über der Temperatur aufgetragen. Es fällt auf, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl mit der Temperatur linear ansteigt. Dies dürfte zum Einen darin begründet sein, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl nach Gleichung (5) mit konstanter Dicke (d) berechnet wurde. Durch Quellen mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Dicke der Probe. Folglich kann vermutet werden, dass mit einer zu gering angenommenen Dicke der Probe, die Werte der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zu hoch berechnet werden. Zum Anderen kann der Dampfgehalt der Bentonitprobe mit höherer Temperatur zunehmen. Aufgrund des zunehmenden Dampfgehalts kann der Wasserdampfdiffusionswiderstand zunehmen, vgl. [306].

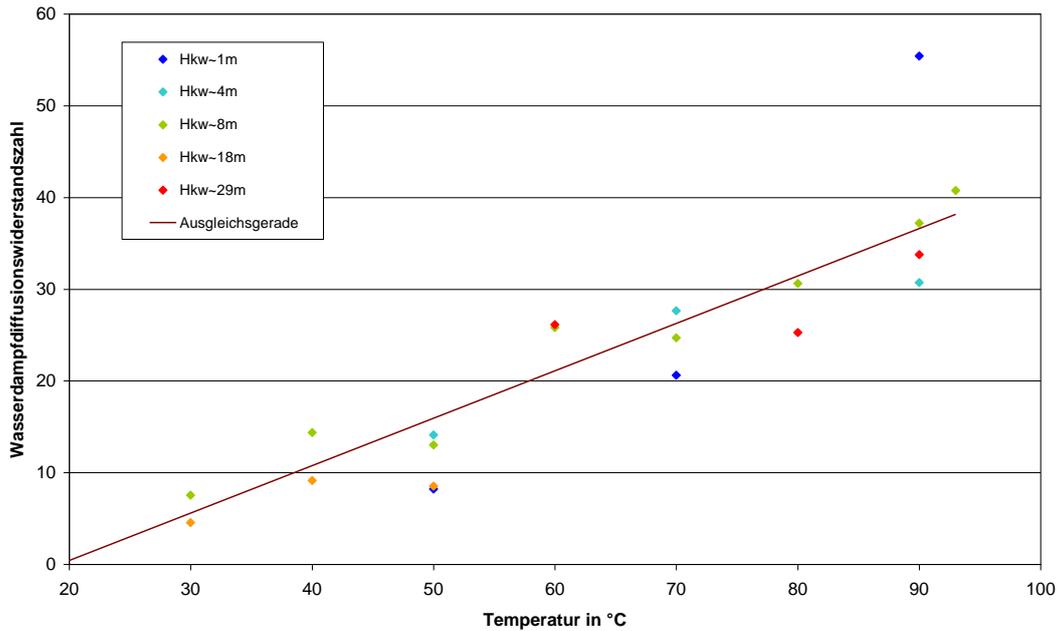


Bild 23: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Temperatur mit der Kies-Wassersäule als Parameter

Im hier vorliegenden Fall wurde die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl aus der Diffusionsstromdichte mit dem Darcy Gesetz berechnet. Wird, wie im Kapitel 6.1.2 beschrieben, Stefan'sche Diffusion zugrunde gelegt, so reduziert sich der Anstieg. Der durchschnittliche Wert der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl liegt im Bereich zwischen 10 und 20.

Wird der Betrag der Wasserdampfflussdichte von den Messwerten der Permeationsrate abgezogen, so ergibt sich der reine Darcy-Anteil.

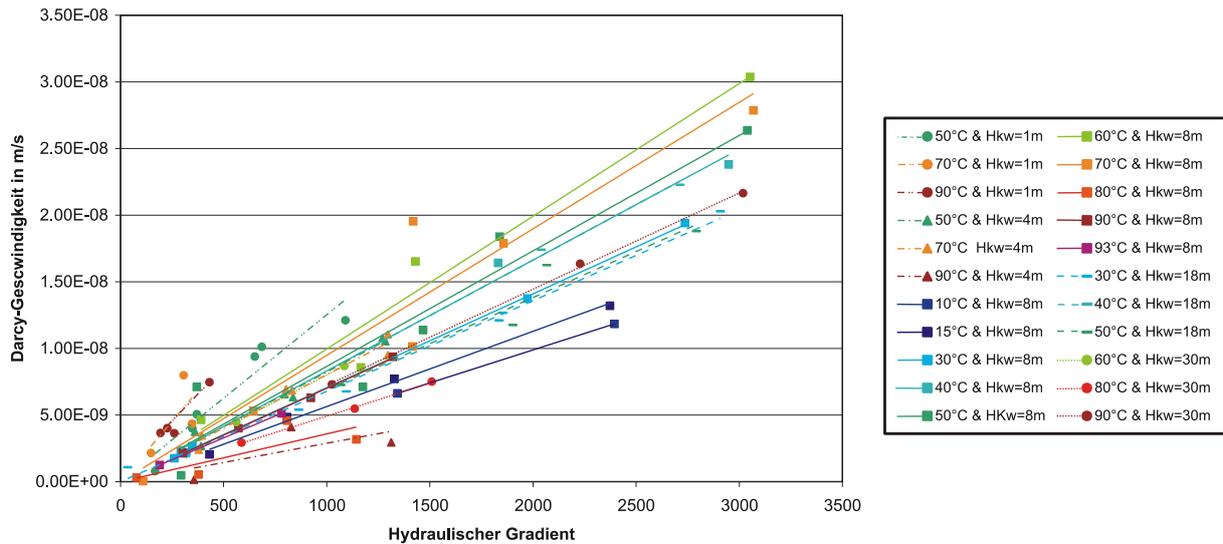


Bild 24: Darcy-Geschwindigkeit in Abhängigkeit des hydraulischen Gradienten mit der Temperatur und der Kieswassersäule als Parameter

Die dynamische Viskosität von Wasser nimmt mit steigender Temperatur ab. Somit ergäbe sich theoretisch eine Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeit bei steigenden Temperaturen entsprechend Gleichungen (2) und (3). Die hydraulische Leitfähigkeit müsste entsprechend dem Reziprokwert der dynamischen Viskosität ansteigen.

In Bild 25 ist deutlich zu erkennen, dass der Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeiten bis zu einer Wassertemperatur von 50 °C in etwa dem des Kehrwerts der dynamischen Viskosität entspricht. Im Gegensatz zum theoretisch erwarteten Verlauf entsprechend Gl. (3) setzt sich ab 50 °C ein anderer Trend durch. Von 10 °C bis 40 °C lässt sich ein linearer Anstieg erkennen. Mit steigender Temperatur wird der Anstieg schwächer und ab ungefähr 70 °C nimmt die hydraulische Leitfähigkeit im Mittel tendenziell ab. Es fällt auf, dass ab 50 °C die Schwankungsbreite der Werte deutlich zunimmt. Eine mögliche Begründung sind Messfehler, die mit steigender Temperatur zunehmen. Aufgrund von Wasserdampftransport von der Waagschale zur Umgebung wird eine geringere Massezunahme gemessen, als durch die Bentonitmatte permeiert.

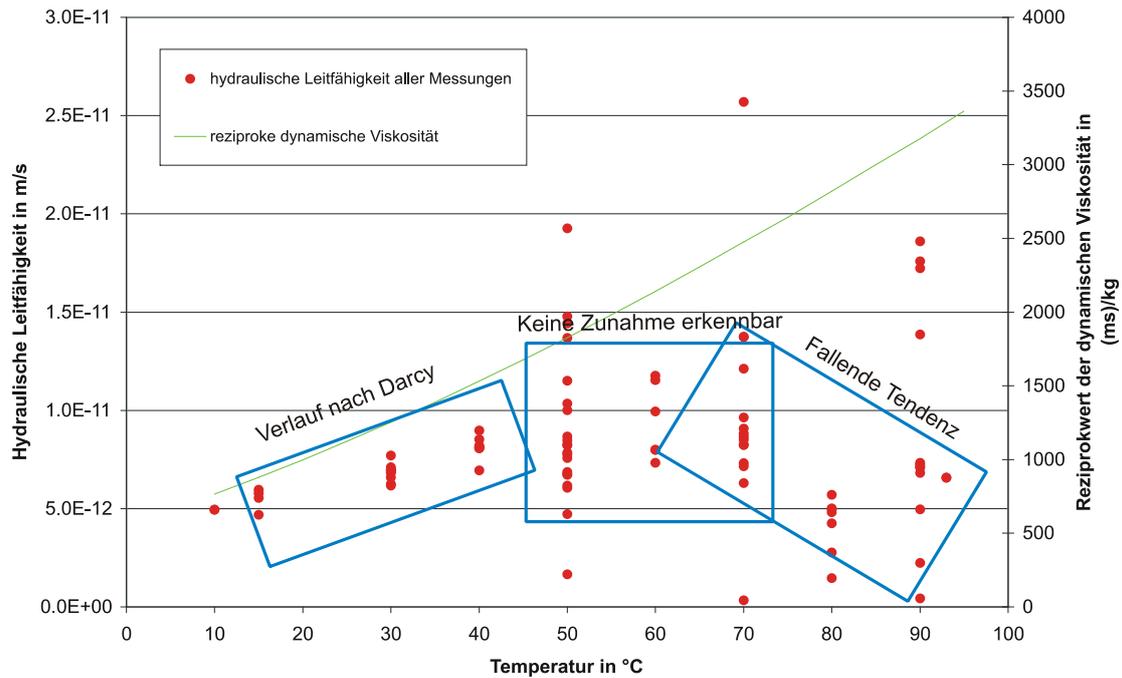


Bild 25: Aus den einzelnen Messpunkten berechnete hydraulische Leitfähigkeiten für alle simulierten Kieswassersäulen sowie der temperaturabhängige Anstieg der reziproken dynamischen Viskosität von Wasser

Die Messdaten wurden mit Messungen, die am ZSW [171] durchgeführt wurden, verglichen. Dafür wurde aus den Messwerten entsprechend Gleichung (4) die Permittivität bestimmt und diese über der Wassersäule aufgetragen. Sowohl die Werte aus den eigenen Messungen, als auch die Messwerte aus den ZSW Versuchen liegen neben wenigen Ausnahmen in einem Bereich um 10^{-10} 1/s. Dies korreliert mit den Herstellerangaben.

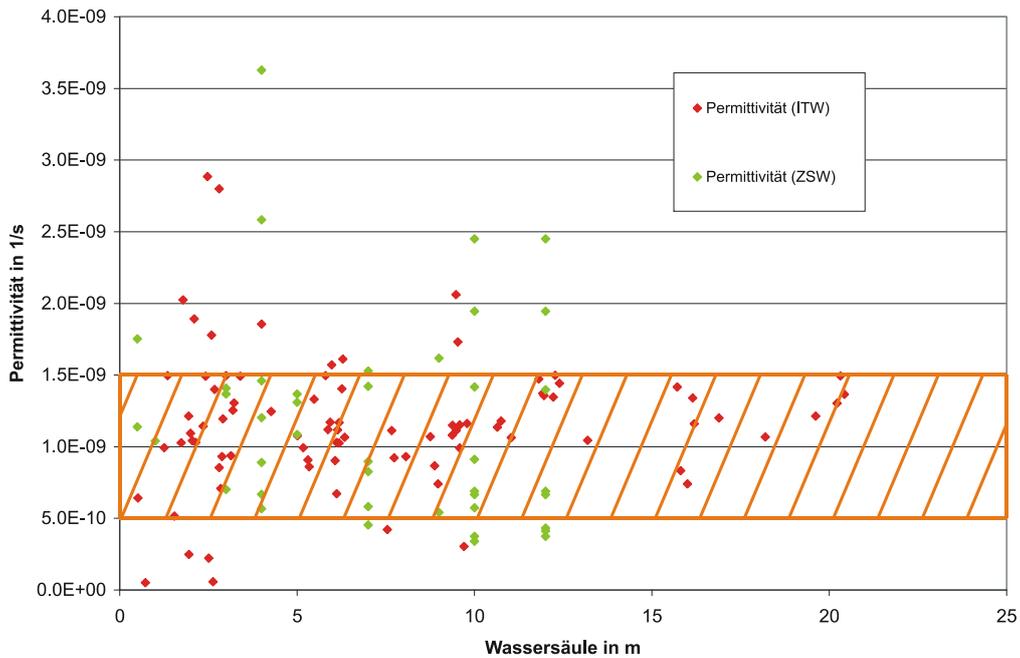


Bild 26: Permittivität von BFG5000 in einem Temperaturbereich von 10 °C bis 95 °C aufgetragen über der auf der Matte stehenden Wassersäule für Kieswassersäulen von 1 m bis 30 m, Daten von ZSW aus [171]

6.1.1.4 Bewertung der Ergebnisse

Die gemessene Durchlässigkeit für Flüssigwasser entspricht den Herstellerangaben. Die Abhängigkeit der Permeationsrate von der Wassersäule kann mit dem Gesetz von Darcy hinreichend genau beschrieben werden. Die Temperaturabhängigkeit wird dabei über die Viskosität des Wassers berücksichtigt. Bei Temperaturen über 50 °C kommt es zu einer Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit. Dieser Effekt konnte im Rahmen dieses Projekts nicht weiter untersucht werden. Ansatzpunkte sind ggf. in [306] zu finden. Eine Abhängigkeit der Permeationsrate von der Kieswassersäule (Auflast) konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Jedoch ist eine Mindestauflast notwendig, um ein Versagen der Abdichtung ausschließen zu können.

Dem Flüssigwassertransport ist ein nicht zu vernachlässigender Wasserdampftransport überlagert. Kann man diesen z.B. durch eine Dampfsperre ausschließen, ist die permeierende Menge so gering, dass eine Abdichtung eines Erdbecken-Wärmespeichers mit Bentonitmatten gewährleistet werden kann.

Als Fazit muss festgehalten werden: Bentonitmatten bieten keine vollständige Dichtigkeit. Es muss eine Drainageschicht für den Einsatz in einem Erdbecken-

Wärmespeicher vorgesehen werden. Um die Dämmung vor Durchnässung zu schützen, muss zudem eine Dampfspererschicht zwischen Drainage und Dämmung eingebaut werden.

Ein Einbau von BFG5000 ist nach Herstellerangaben bis zu einem Böschungswinkel von 45° möglich. Nach mündlicher Aussage eines Vertreters der Firma Naue kann jedoch BFG5000 bei vollständiger Wassersättigung bis zu einem Winkel von 80° eingebaut werden.

Wie sich allerdings die mit Widerhaken besetzten Polypropylen-Nadeln nach dem Einbau in einem Erdbecken-Wärmespeicher verhalten, der oft Betriebstemperaturen über 80 °C aufweist, ist bisher noch nicht ausreichend erforscht. Es wäre denkbar, dass die PP-Nadeln bei hohen Temperaturen keine ausreichende Heißwasserbeständigkeit aufweisen und erweichen. Insbesondere im Böschungsbereich könnte erheblicher mechanischer Schaden an der Matte entstehen.

Das Verhältnis von Wassersäule (h_w) zu Kieswassersäule (h_{kw}) sollte Werte unter eins annehmen. Ansonsten könnte Bentonit mangels Auflast aus den am oberen Rand des Speichers angebrachten Bentonitmatten wegen der großen Quellfähigkeit des Materials ausgeschwemmt werden. Bei Wasserrückhaltebecken mit Kiesschüttung erreicht die Wassersäule im Speicherbecken in der Regel nicht das Niveau der Kiesschüttung. So wird das Becken in der Praxis maximal bis zu einem Wasserstand, der einen halben Meter unter dem Niveau der Kiesschüttung liegt, befüllt.

Unter Vernachlässigung der Wasserdampfdiffusion kann die Durchlässigkeit durch eine BFG 5000 Bentonitmatte entsprechend Bild 27 als Funktion der Temperatur und der Speicherhöhe abgeschätzt werden.

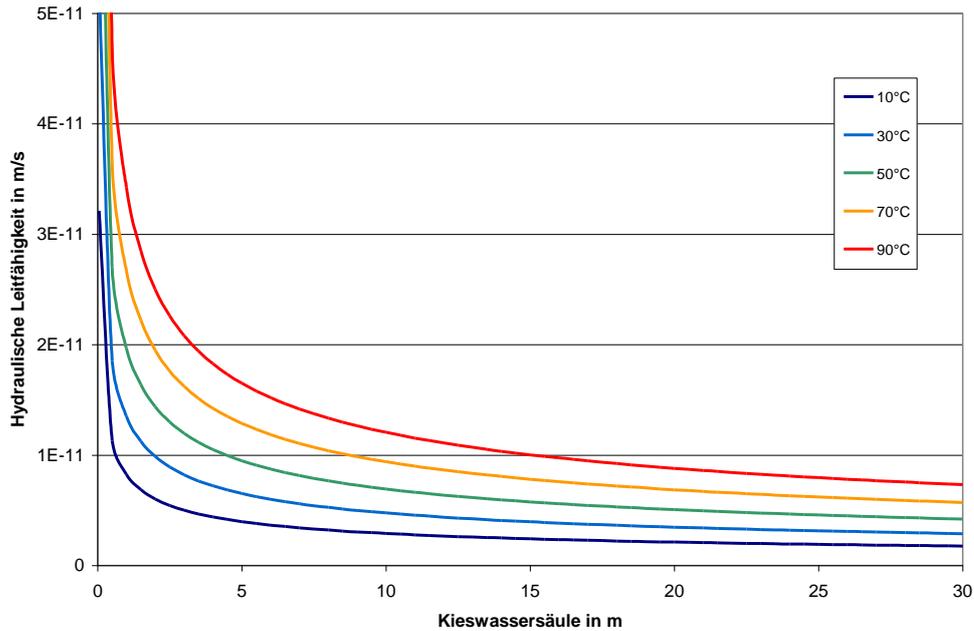


Bild 27: Verlauf der hydraulischen Leitfähigkeit über der Auflast für Temperaturen von 10 °C bis 90 °C entsprechend der Ausgleichsgeraden basierend auf den Messwerten aus Bild 24

Bei Einsatz von Bentonit als Abdichtung von Kies-Wasser-Wärmespeichern muss ein Totalversagen unter allen Umständen ausgeschlossen werden. Bei den im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen verloren 3 von 6 Proben ihre Dichtwirkung komplett. Jedoch lag das Verhältnis von Wassersäule zu Kieswassersäule (h_w/h_{kw}) jeweils deutlich über zwei also in einem Bereich der nicht empfohlen und somit nicht realistisch ist.

In [172] und [173] wurde untersucht, wie sich die Wasserdurchlässigkeit von Bentonitmatten mit zunehmender Lebensdauer und unter Zufuhr von beispielsweise kalk- oder kochsalzhaltigem Wasser ändert. Die hydraulische Leitfähigkeit nimmt stets zu. In welchem Maße die Wasserdurchlässigkeit zunimmt, hängt von der Bauart der Bentonitmatte ab. Jedoch kann bei einem langjährigen Betrieb mit Leitungswasser von keiner signifikant höheren Durchlässigkeit ausgegangen werden [173].

Trotz der oben genannten Einschränkungen und Schwierigkeiten bietet Bentonit eine kostengünstige Alternative als Abdichtungsmaterial von Kies- (oder Erdreich-) Wasser-Wärmespeichern.

Die Übertragbarkeit der Innenlaborergebnisse auf einen realen Maßstab muss in einem Außenlaborversuch gezeigt werden, siehe dazu auch Kapitel 7.8.

6.1.2 Wasserdampfdiffusion durch Kunststoffdichtungsbahnen

6.1.2.1 Grundlagen

Die Grundlagen zur Wasserdampfdiffusion sind u.a. in [174], [175] und [176] beschrieben. Im Rahmen dieses Berichts kann nur auf wesentliche Merkmale eingegangen werden. Prinzipiell muss unterschieden werden hinsichtlich Diffusion in porösen Medien und Diffusion bzw. Permeation durch Polymere, wie in Bild 28 dargestellt wird.

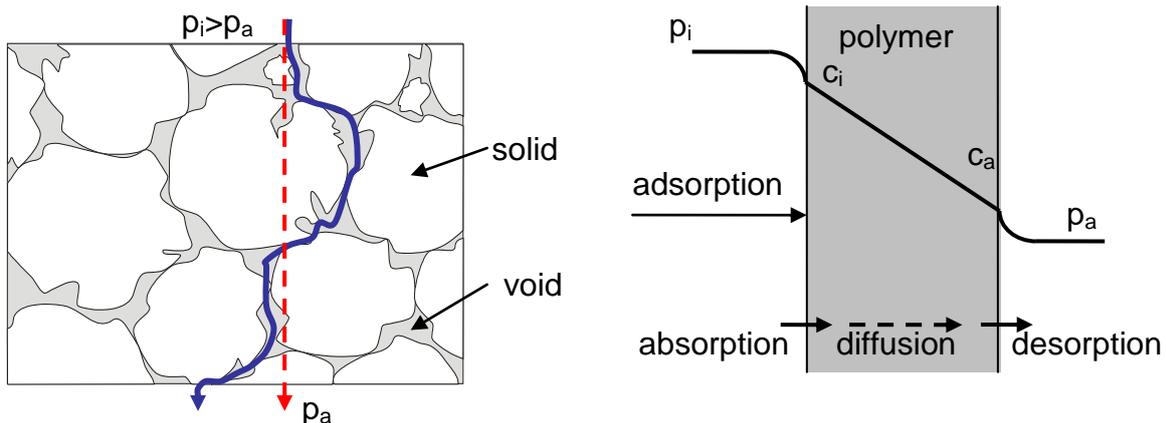


Bild 28: Diffusion durch poröse Medien (links) vs. Permeation durch Polymere (rechts)

6.1.2.1.1 Poröse Medien

Die Wasserdampftransmission (WVT) berechnet sich nach Gl. (7) aufbauend auf das Fick'sche Gesetz

$$WVT = \frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (7)$$

Die Permeationsrate von Wasserdampf in Luft ist eine Funktion des Diffusionskoeffizienten (D_v), der Temperatur und der Gaskonstante $R_v = 461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

$$\delta_a = \frac{D_v}{R_v \cdot T} \quad (8)$$

In der Literatur finden sich mehrere Ansätze zur Beschreibung des Diffusionskoeffizienten wie z.B. von Krischer [174], Schirmer [177], Vos in [178], De Vries [179] oder DIN 52615 [319]. Die Korrelation, die für diese Arbeit verwendet wird, ist dem VDI Wärmeatlas [180] entnommen.

$$D_v = \frac{2.252}{p} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (9)$$

Der Partialdruck ist das Produkt aus Sättigungsdampfdruck und relativer Feuchte

$$p_v = \phi \cdot p_s(\vartheta) \quad (10)$$

Der Sättigungsdampfdruck kann z.B. mit der empirischen Korrelation nach Magnus [181] beschrieben werden.

$$p_s = 10.5 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot \vartheta}{237.3 + \vartheta}\right) \quad (11)$$

6.1.2.1.2 Permeation durch Polymere

Analog zu Gl. (7) kann die Wasserdampftransmission durch Polymere als Modifikation des Fick'schen Gesetzes beschrieben werden:

$$WVT = -P \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (12)$$

Jedoch ist im Gegensatz zu Gl. (7) der Permeationskoeffizient (P) in Gl. (12) das Produkt aus Sorptionskoeffizient (S) und Diffusionskoeffizient (D^*)

$$P = S \cdot D^* \quad (13)$$

Die Temperaturabhängigkeit des Permeationskoeffizienten lässt sich mit Hilfe der Arrhenius-Beziehung ausdrücken.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-\Delta E_D}{R \cdot T}\right) \quad (14)$$

$$S = S_0 \cdot \exp\left(\frac{-\Delta E_S}{R \cdot T}\right) \quad (15)$$

$$P = P_0 \cdot \exp\left(\frac{-\Delta E_p}{R \cdot T}\right) \quad (16)$$

Somit ist

$$P_0 = D_0 \cdot S_0 \quad (17)$$

und

$$\Delta E_p = \Delta E_D + \Delta E_s \quad (18)$$

Trotz der unterschiedlichen physikalischen Phänomene kann die Wasserdampfdiffusion durch Polymere zumindest näherungsweise mit einem Ansatz analog zu Gl. (7) beschrieben werden, indem ein temperaturabhängiger Diffusionswiderstand eingeführt wird.

In der Bauphysik wurde die äquivalente Luftschichtdicke s_d eingeführt, um Materialien verschiedener Dicke ($\Delta x=d$) vergleichen zu können.

$$s_d = \mu \cdot d \quad (19)$$

Aus demselben Grund wird häufig die Wasserdampftransmissionsrate (WVTR) angegeben. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Wasserdampftransmission (WVT) mit der Materialstärke (d). Teilweise wird die Wasserdampftransmissionsrate (WVTR) fälschlicherweise als Permeationskoeffizient bezeichnet:

$$WVTR = WVT \cdot d \quad (20)$$

In der englischen Literatur wird die Wasserdampftransmissionsrate häufig in (g mil)/(100in² 24h) angegeben. Durch Multiplikation mit dem Faktor 3.937008E-01 erhält man die SI Einheit (g mm)/(m² d).

Ebenso ist in der Literatur häufig die Wasserdampfpermeabilität (W) angegeben. Diese erhält man durch Division von Wasserdampftransmission (WVT) und Druckgradient (Δp_v):

$$W = \frac{WVT}{\Delta p_v} \quad (21)$$

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand (Z) ist der Kehrwert der Wasserdampfpermeabilität (W)

$$Z = \frac{1}{W} \quad (22)$$

Die Permeationsrate δ kann als Verhältnis von Wasserdampftransmissionsrate (WVTR) und Partialdruckdifferenz ausgedrückt werden

$$\delta = \frac{WVTR}{\Delta p_v} \quad (23)$$

Folglich erhält man die Permeationsrate auch durch Multiplikation der Wasserdampfpermeabilität (W) mit der Materialstärke (d):

$$\delta = W \cdot d \quad (24)$$

Tabelle 24 fasst die am häufigsten verwendeten Ausdrücke zur Beschreibung der Wasserdampfdiffusion mit den gebräuchlichsten Einheiten sowie mit SI-Einheiten zusammen.

Tabelle 24: Häufig verwendete Ausdrücke zur Beschreibung des Wasserdampftransports

	water vapour transmission	water vapour permeability	water vapour transmission rate	water vapour permeability rate
	Wasserdampf-diffusion	Wasserdampfdurchlässigkeit	Wasserdampfdiffusionsrate	Wasserdampfdurchlässigkeitsrate
	WVT	W	WVTR	δ
Einheit	$[\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}]$	$[\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{atm}^{-1}]$	$[\text{g mm m}^{-2}\text{d}^{-1}]$	$[\text{g mm m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{atm}^{-1}]$
SI Einheit	$[\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}]$	$[\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$	$[\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}]$	$[\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$

6.1.2.2 Fick'sche vs. Stefan'sche Diffusion

Stefan'sche bzw. einseitige Diffusion findet statt, wenn dem Diffusionsstrom ein Konvektionsstrom überlagert ist. Dies ist der Fall für hohe Wasserdampfpartialdrücke und kann beschrieben werden als

$$WVT = \frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{p}{p - p_{v,m}} \cdot \frac{\Delta p_v}{\Delta x} \quad (25)$$

Die Betrachtung der Transportvorgänge als Fick'sche Diffusion führt v.a. für hohe Temperaturen (ab 60 °C) zu nicht vernachlässigbaren Fehlern (vgl. Bild 29). In den meisten kommerziellen Programmen zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports (wie z.B. in WUFI, [182], [373]) ist Stefan'sche Diffusion nicht implementiert (siehe auch Kapitel 6.6).

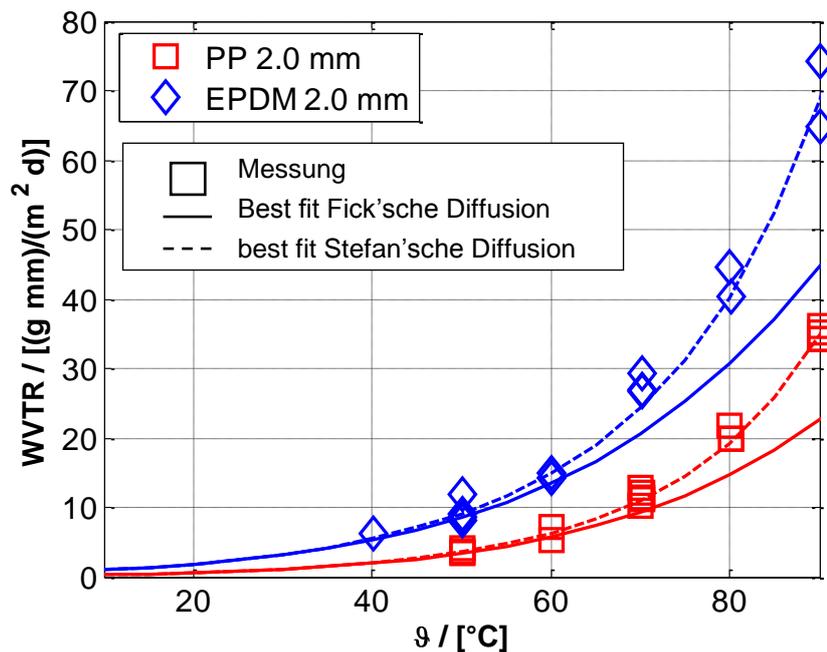


Bild 29: Gemessene Wasserdampftransmissionsrate (WVTR) als Funktion der Temperatur von PP (□) und EPDM (◇), Modellwerte berechnet nach Fick (—), Gleichung (7) bzw. nach Stefan (---), Gleichung (25)

6.1.2.3 Messeinrichtung

Polymere und elastomere Abdichtungsbahnen bieten keine hundertprozentige Wasserdampfdichtigkeit. Der Diffusionswiderstand von Kunststoffdichtungsbahnen wurde mit einer neu entwickelten Permeations-Mess-Apparatur (Modifizierung der Apparatur, welche in Kapitel 6.1.1 beschrieben ist) als Funktion der Temperatur bestimmt. Die Apparatur ist in Bild 30 dargestellt.

Die wesentlichen Modifikationen betreffen die Öldichtung sowie den Einsatz von Zeolith als Trocknungsmittel.

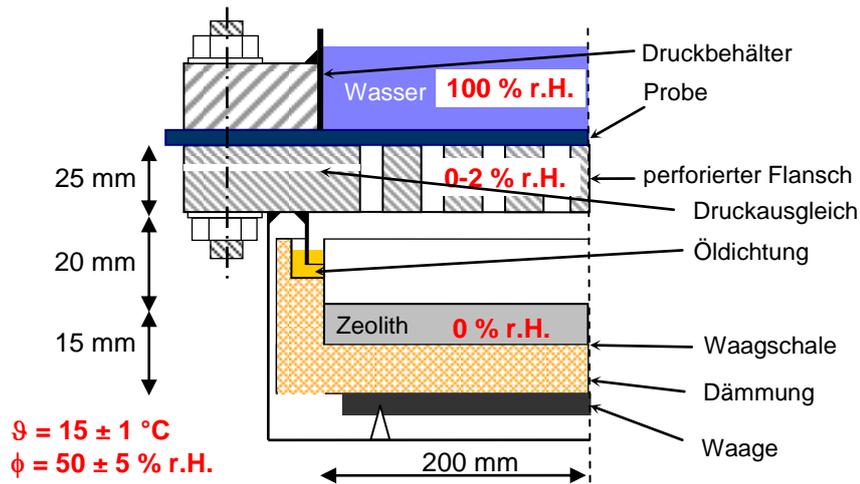


Bild 30: Schema der Permeations-Mess-Apparatur, Aufbau für Dampfdiffusionsmessungen

6.1.2.4 Ergebnisse

Neun verschiedene Materialien, die sich als Kunststoffdichtungsbahn eignen, wurden bezüglich Dampfdiffusionsdichtigkeit untersucht. Zusätzlich wurde EPDM in einer anderen Bahnstärke und mit PE-Beschichtung vermessen. In Tabelle 25 sind die untersuchten Kunststoffdichtungsbahnen zusammengefasst.

Tabelle 25: Untersuchten Kunststoffdichtungsbahnen mit Membrandicke d , Dichte ρ und Anzahl der untersuchten Proben

Nr.	Material	d [mm]	Anzahl [-]	ρ [kg/m ³]	m [kg/m ²]	Bemerkung
1	HDPE	2.0	1	916	1.9	
2	PP	2.0	3	879	1.9	
3	PVC-PE	0.9	2	1204	1.0	gewebeverstärkt
4	FPO (I)	2.0	2	938	1.9	gewebeverstärkt
5	FPO (II)	2.0	1	933	1.8	gewebeverstärkt
6	IIR	0.7	1	1241	0.9	
7	TPE (IIR)	0.5	1	977	0.5	vliesbeschichtet
8a	EPDM (I)	1.5	3	1238	1.9	
8b	EPDM (II)	2.0	2	1219	2.5	
9	TPE (EPDM)	1.5	2	1054	1.7	
10	EDPM mit PE-Schicht	1.4	1	1114	1.5	

Die Auswertung entsprechend dem Arrhenius-Ansatz entsprechend Gl. (14) zeigt eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit den Modellwerten, vgl. Bild 31

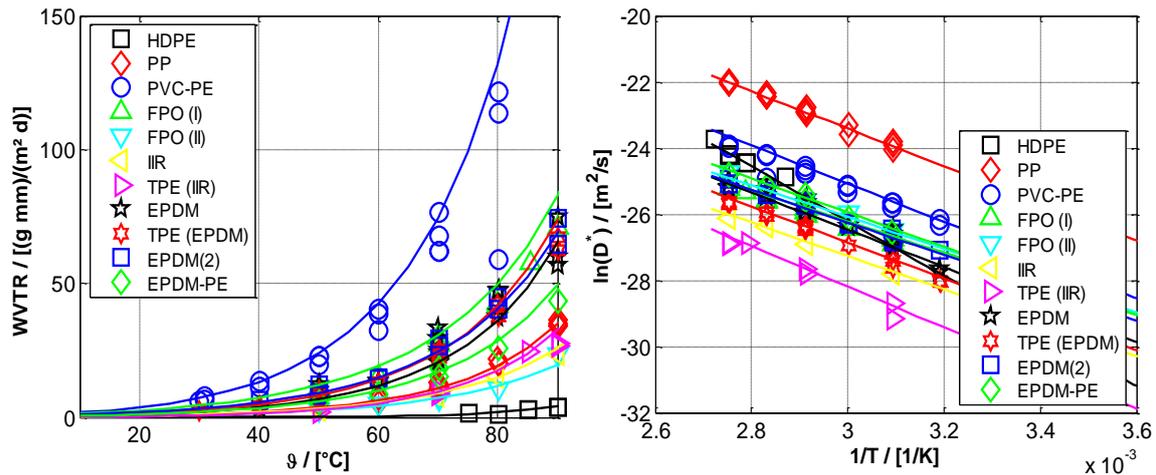


Bild 31: Wasserdampfdurchlässigkeitsrate (WVTR) sowie Arrheniusplot des Diffusionskoeffizienten D

In Tabelle 26 sind die Aktivierungsenergie ΔE_a sowie die Diffusions- (D), Sorptions- (S) und Permeations- (P) Konstanten nach Gl. (14) bis (16) und zusammengefasst.

Tabelle 26: Aktivierungsenergie ΔE_a und Diffusions- (D) und Permeations- (P) Konstanten entsprechend dem Arrhenius-Ansatz

	Diffusion		Permeation	
	ΔE_a	D_0	ΔE_a	P_0
	kJ/mol	m^2/s	kJ/mol	$\text{kg}/(\text{m s Pa})$
HDPE	4	2.53E-07	1	5.68E-16
PP	7	6.25E-06	4	1.45E-14
PVC-PE	8	5.18E-05	5	1.25E-13
FPO (I)	-1	1.02E-06	-4	2.39E-15
FPO (II)	0	3.45E-07	-3	8.02E-16
IIR	2	8.66E-07	-1	2.02E-15
TPE (IIR)	11	2.18E-05	8	5.08E-14
EPDM (I)	6	1.10E-05	4	2.59E-14
EPDM (II)	1	1.60E-06	-2	3.77E-15
TPE (EPDM)	5	6.14E-06	2	1.46E-14
EPDM mit PE Schicht	3	2.33E-06	0	5.42E-15

Mit steigender Temperatur nimmt aufgrund der hohen Dampfpartialdruckdifferenz nach Gl. (11) die Wasserdampfdurchlässigkeitsrate (WVTR) exponentiell zu (vgl. Bild 31). In Bild 32 ist die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl als Funktion der Temperatur aufgetragen.

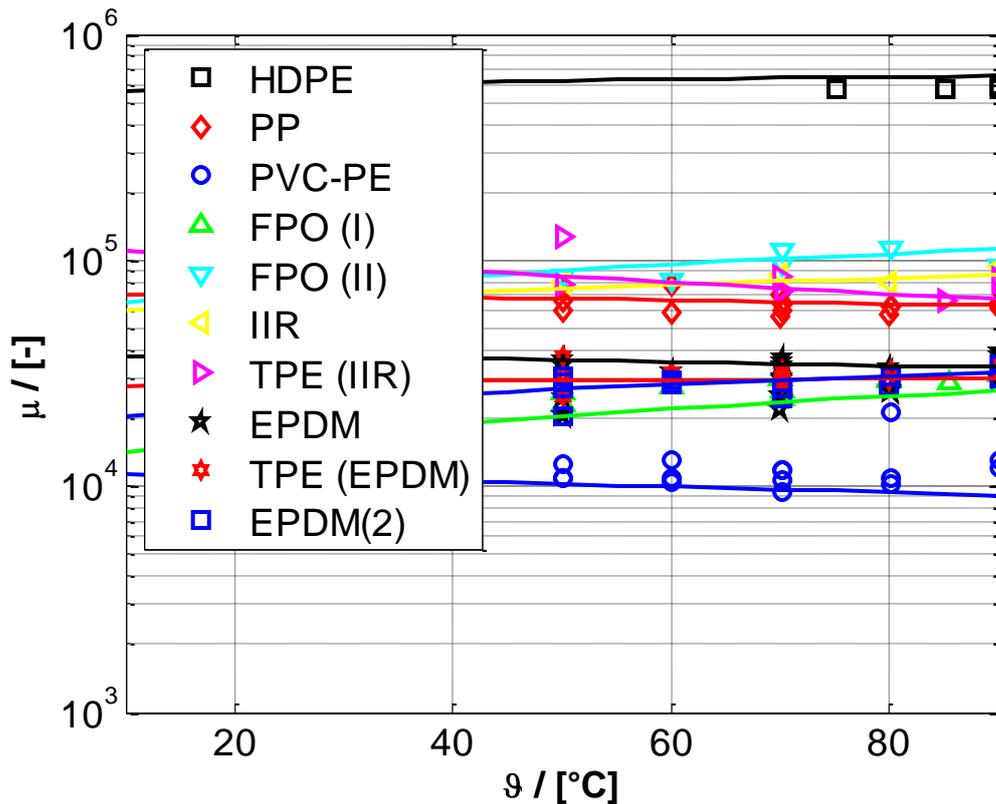


Bild 32: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) für Polymere (HDPE, PP, PVC), Elastomere (EPDM, IIR), flexible Polyolefine (FPO) und thermoplastische Elastomere (TPE)

Ohne zusätzliche Dampfsperre würden bei 90 °C durch eine EPDM-Bahn mit 1.5 mm Stärke ca. 40 g/(m² d) diffundieren (Wasser gegen trockene Dämmung). Auch im Falle einer 2 mm starken PP-Bahn wäre die Menge, die am Tag durch einen Quadratmeter diffundieren würde mit ca. 18 g noch sehr hoch. Folglich sollte zumindest bei erdvergrabenen Wärmespeichern eine Kunststoffdichtungsbahn immer in Kombination mit einer Dampfsperre bzw. als Verbundfolie (Al oder VA) eingesetzt werden.

6.1.2.5 Qualitative Untersuchungen

Die Funktionsweise überlappend verlegter Dampfsperren - wie sie üblicherweise in der Baubranche verwendet werden – wurde untersucht: Entstehen zwischen Abdichtung und Dampfsperre Hohlräume (z.B. durch Verlegefehler oder unterschiedlich starke Materialausdehnungen), so diffundiert Wasserdampf vom Becken durch die Abdichtung in den Hohlraum. Dort kondensiert der Wasserdampf. Das Kondensat, das sich zwischen Kunststoffdichtungsbahn und Dampfsperre sammelt, kann durch die Überlappung in die Dämmung fließen bzw. tropfen. Dieser

Effekt tritt vor allem in horizontalen Bereichen, also bei Abdeckung und Boden, auf. Durch die Kapillarwirkung der Wärmedämmung kann dieser Effekt verstärkt werden. Oberhalb der Dampfsperre kann das Wasser wieder verdampfen und durch die Dämmung diffundieren. Je nach Umgebungstemperatur und Beschaffenheit der Abdeckbahn wird das Wasser weiter in die Umgebung diffundieren oder an der Abdeckbahn erneut kondensieren und die Dämmung durchfeuchten.

Zur qualitativen Überprüfung der Ergebnisse wurde ähnlich dem Aufbau in einem Erdbecken-Wärmespeicher zusätzlich zur Abdichtungsbahn (in diesem Falle XR-5, 1.5 mm, $\mu = 10\ 000$) eine Lage Dampfsperre (PP-PA-Al-PA) in die Permeations-Mess-Apparatur eingebaut. Der Aufbau ist in Bild 33 gezeigt. Die Messung erfolgte ansonsten analog zu den bereits beschriebenen Permeations-Messungen.

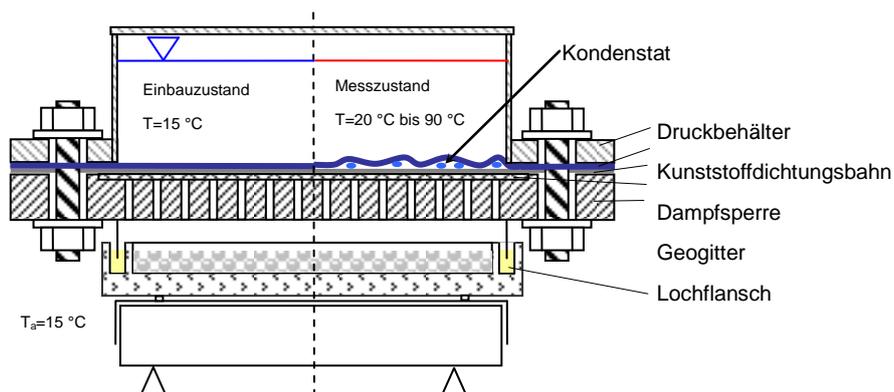


Bild 33: Schema der Permeations-Mess-Apparatur bei der Untersuchung von Kondensatbildung zwischen Abdichtungsbahn und Dampfsperre

Nach einer Messdauer von über einer Woche bei jeweils drei unterschiedlichen Temperaturen (50 °C, 70 °C und 90 °C) konnte keine Massezunahme im Trocknungsmittel festgestellt werden. Der Gesamtaufbau war somit dampfdicht. Beim Ausbau der Proben konnte jedoch eine signifikante Menge Wasser zwischen den zwei Lagen festgestellt werden.

Im Außenlabor konnte dieser Effekt im Bereich der Abdeckung ebenso festgestellt werden (siehe Kapitel 7). Somit muss von einem solchen Aufbau zumindest in den

horizontalen Bereichen (Deckel, Boden) abgeraten werden, vgl. dazu auch Kapitel 7.10.3.3.

6.1.2.6 Vergleich mit Literaturwerten

Die Verfügbarkeit von Messwerten der Wasserdampfdurchlässigkeit durch Kunststoffdichtungsbahnen ist sehr gering. Wie oben erwähnt, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten Messergebnisse von Diffusions- bzw. Permeationsmessungen anzugeben (μ , WVT, WVTR, W, Z oder δ). Werden die Randbedingungen (Temperatur und relative Feuchte) und die Materialdicke nicht exakt angegeben, ist ein Vergleich der Messdaten häufig nicht möglich. In Bild 34 ist ein Vergleich der aus den verschiedenen Literaturangaben berechneten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen angegeben.

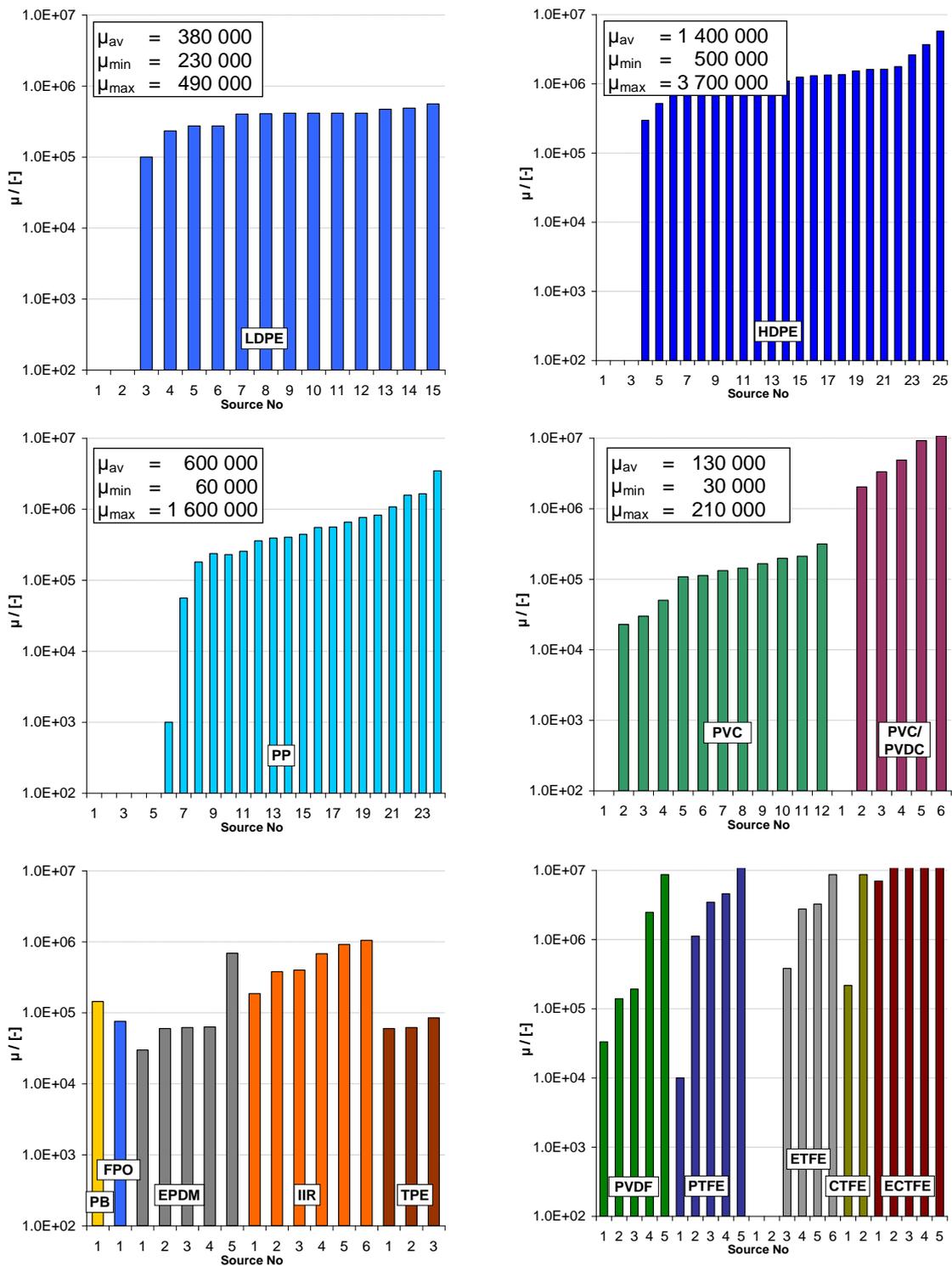


Bild 34: Vergleich der Literaturwerte, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ berechnet aus WVT, WVTR, W oder δ entsprechend den Gleichungen (7), (20), (21) oder (23) von verschiedenen Kunststoffdichtungsbahnen und Folien, Quellen: [183] bis [209]

Es ist deutlich zu erkennen, wie stark die Angaben unterschiedlicher Quellen voneinander abweichen. Abweichungen der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

von mehreren Zehnerpotenzen sind weder zufriedenstellend noch akzeptabel für die Auswahl geeigneter Abdichtungsmaterialien. Ursachen für die Abweichungen können nicht (nur) in Messfehlern begründet sein. Vielmehr dürfte die Vielfalt von am Markt erhältlichen polymeren Materialien mit unterschiedlichsten Füllstoffen (Weichmacher, Antioxidantien, Pigmenten, Stabilisatoren, Fasern) Ursache für die großen Abweichungen sein. Es muss als Schlussfolgerung festgehalten werden: PP ist nicht gleich PP und HDPE ist nicht gleich HDPE.

Über temperaturabhängige Messungen wurden in der Literatur bisher nur in sehr wenigen Einzelfällen berichtet. Der Vergleich der Literaturwerte mit den eigenen Messwerten für HDPE, PP und IIR ist in Bild 35, Bild 36 und Bild 37 zu sehen.

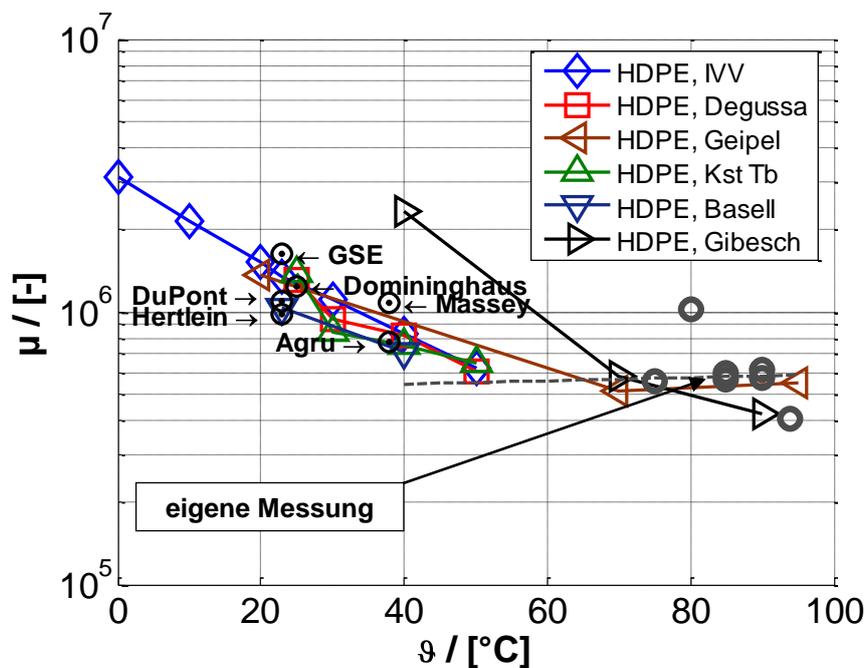


Bild 35: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von HDPE als Funktion der Temperatur ϑ , Vergleich mit Literaturwerten, Quellen: KstTb [158], IVV [209], Gibesch [194], Massey [202], Geipel [108], Domininghaus [193], Agru [385], Basell [386], Degussa [388], DuPont [390], GSE [391].

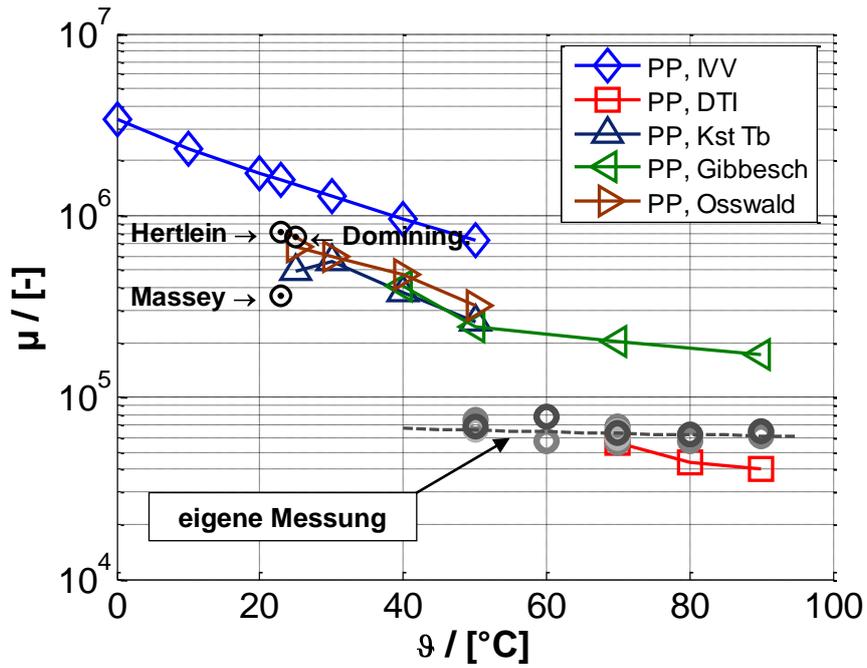


Bild 36: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von PP als Funktion der Temperatur ϑ , Vergleich mit Literaturwerten, Quellen: KstTb [158], Hertlein [198], IVV [209], Gibbesch [194], Massey [202], Osswald [205], DTI [162], Domininghaus [193].

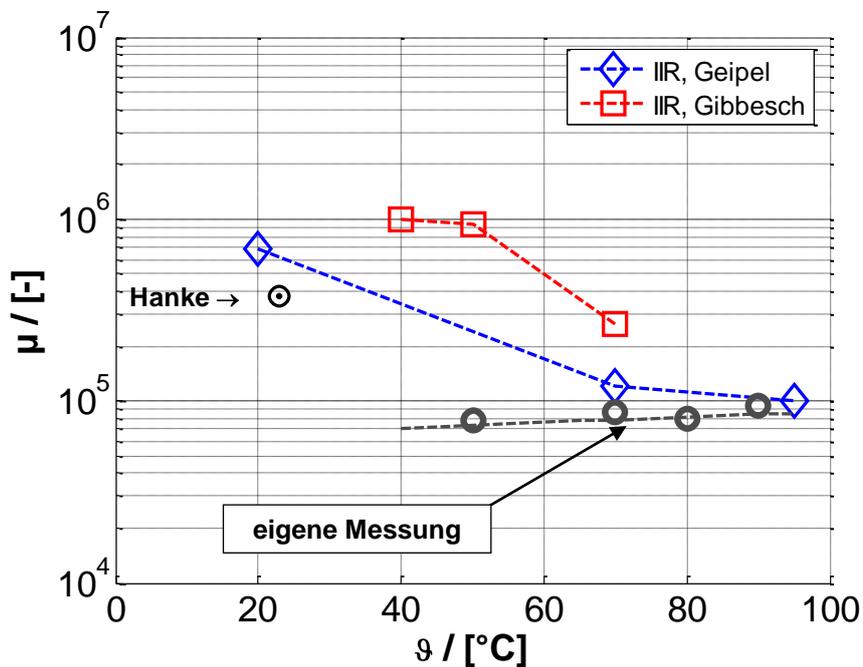


Bild 37: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von Butyl (IIR) als Funktion der Temperatur ϑ Vergleich mit Literaturwerten, Quellen: Gibbesch [194], Hanke [155], Geipel [108].

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Im Bereich hoher Temperaturen (ab 60 °C) liegen die eigenen Messwerte im Bereich der Literaturwerte.

6.1.2.7 Schlussfolgerungen zur Permeation

Für die Berechnung des durch die Abdichtung diffundierenden Wasserdampfs auf Basis der Literatur bzw. Referenzwerte, ergäbe sich ein Wert der bis um den Faktor 10 zu niedrig liegt.

Für große Langzeit-Wärmespeicher, die mit Temperaturen mit bis zu 95 °C betrieben werden, genügt keines der Materialien den gestellten Anforderungen. Ausreichende Wasserdampfdichtigkeit kann nur durch eine zusätzliche Barrierschicht (aus Al oder VA) erreicht werden.

Für kleinere und modulare Speicher, welche mit flexiblen Membranen abgedichtet werden [210], [211], [212] sind diese Ergebnisse auch von großer Bedeutung. Entweder müssen diese mit hinterlüfteter Wärmedämmung ausgeführt werden oder es wird ebenso eine Barrierschicht benötigt.

6.2 Reißfestigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen

Die Reißfestigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen und Schweißnähten ist für die Auslegung von Erdbecken-Wärmespeichern i.d.R. nicht erforderlich, da von einer spannungsfreien Verlegung ausgegangen wird.

In Einzelfällen ist dies jedoch nicht möglich. Für das Konzept erdüberschüttete schwimmende Abdeckung (vgl. Kapitel 7.10.5) sowie für das Konzept Membranausdehnungsbehälter (vgl. Kapitel 7.11) wird für die Auslegung die Reißfestigkeit als Funktion der Temperatur benötigt. Auch beim Kies-Wasser-Wärme-Speicher in Eggenstein-Leopoldshafen (vgl. [93]) wird die Schweißverbindung der KDB zwischen unterem und oberem Kegelstumpf in Schälrichtung belastet.

6.2.1 Auswertung Zugversuche

Untersucht wurde primär die HDPE Verbundfolie, welche auch im Kies-Speicher in Eggenstein-Leopoldshafen zum Einsatz kommen sollte. Die Zugversuche wurden am IKP, Universität Stuttgart mit einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Es wurden 2.5 mm HDPE Bahnen sowie 2.5 mm Sperrschichtbahnen geprüft. Die maximale (mittlere) Reißfestigkeit in Zugrichtung und in Schälrichtung als Funktion der Temperatur wird in Tabelle 27 mit den Herstellerangaben (Wert nach ISO 527-3 [360]) im Vergleich zusammengefasst.

Tabelle 27: Reißdehnungs- bzw. Reißfestigkeitsversuche, maximale (mittlere) Reißfestigkeit in Zugrichtung und in Schälrichtung als Funktion der Temperatur, Herstellerangabe (Wert nach ISO 527-3) im Vergleich

	Belastung in Zugrichtung ISO 527-2 [365]		Belastung in Schälrichtung DIN EN 12814-4 [366]		ISO 527-3 [360]
Temperatur ϑ / [°C]	23	80	23	80	
Spannung σ / [N/mm]	44.4	32.5	23.2	12.2	18.6

Ausschlaggebend für die Reißdehnung und Reißfestigkeit der Proben ist bei einer Verbundfolie die Reißfestigkeit der Aluminiumschicht bzw. bei Belastung in Schälrichtung die Verbundfestigkeit von Aluminium und HDPE-Bahn, wie auf den Fotos in Bild 38 zu erkennen ist. Bei Belastung in Schälrichtung reißt die HDPE-Bahn an der Stelle der Schweißnaht. Die Verbundfestigkeit ist verhältnismäßig gering. Es wird vermutet, dass durch die Hitzeeinwirkung beim Schweißen der Verbund geschwächt wird.

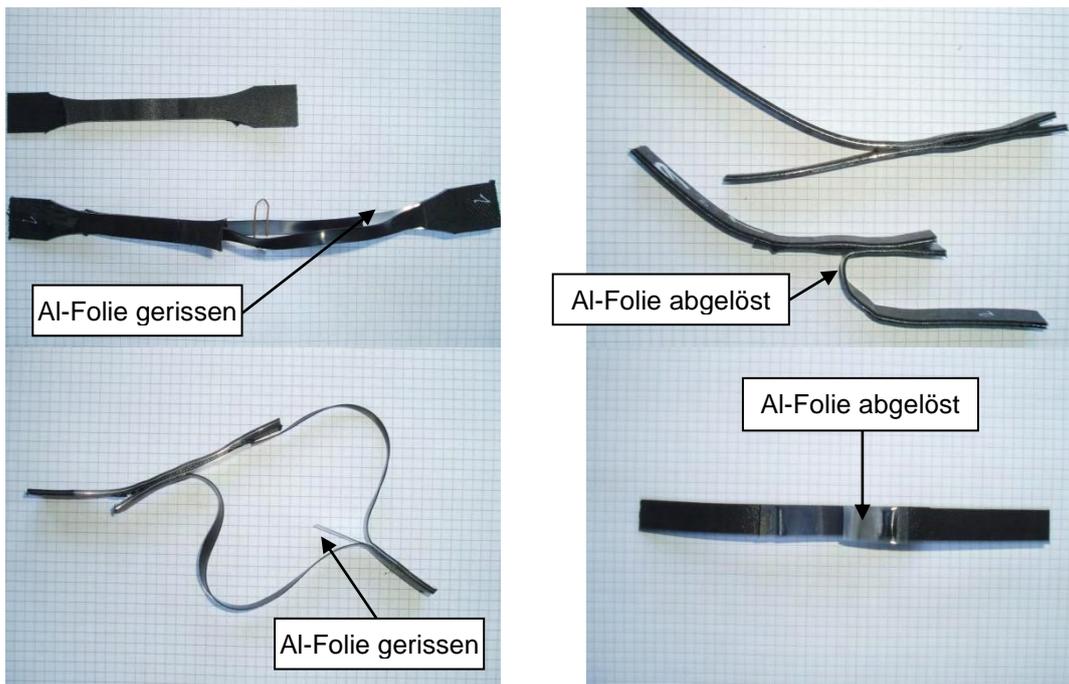


Bild 38: Proben vor und nach dem Reißdehnungsversuch in Zug- (links) und in Schälrichtung (rechts)

Die Maximalwerte der Reißdehnung und Reißfestigkeit sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Die Messungen wurden für je fünf Proben der Dichtungsbahn und der Sperrschichtbahn für Raumtemperatur (23 °C) und für 80 °C durchgeführt. Die Versuche erfolgten für Belastung in Zugrichtung und in Schälrichtung.

Tabelle 28: Maximalwerte der Reißdehnung und Reißfestigkeit in für Zugversuch nach ISO 527-2 und für Schälversuch nach DIN EN 12814-4

Probe	Versuch	Temperatur	Dehnung	Spannung
		[°C]	[mm]	[N/mm]
Dichtungsbahn	Zugversuch	23	78.0	38.0
		80	136.4	17.6
	Schälversuch	23	62.6	29.0
		80	136.4	14.0
		23	63.3	24.5
		80	136.4	13.9
Sperrschichtbahn	Zugversuch	23	113.7	44.4
		80	153.9	32.5
	Schälversuch	23	46.1	23.0
		80	136.4	12.3
		23	94.1	23.4
		80	136.4	12.2

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird in Bild 39 gezeigt.

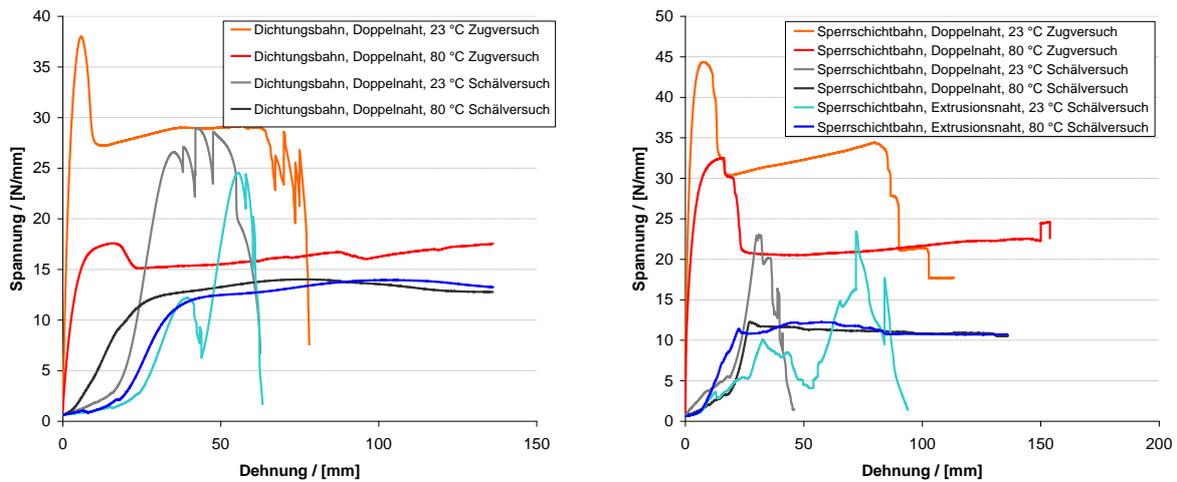


Bild 39: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Dichtungsbahn und der Sperrschichtbahn für Raumtemperatur (23 °C) und für 80 °C

Die Temperaturabhängigkeit der Maximalwerte der Spannung der Proben ist in Bild 40 dargestellt.

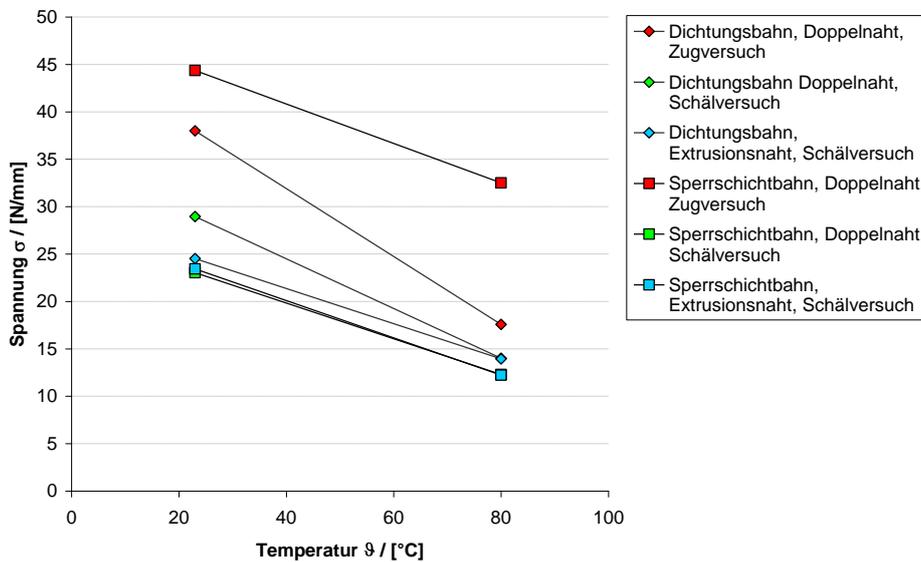


Bild 40: Temperaturabhängigkeit der Maximalwerte der Reißspannung

6.2.2 Schlussfolgerung

Die Befestigung der Abdichtung der schwimmenden Abdeckung mit der Abdichtung des Beckens kann somit nur über zusätzliche Klemmverbindung erfolgen, welche die Last, die auf die Schweißnaht wirkt, reduziert. Die Schweißnaht muss durch eine

zusätzliche Klemmverbindung dauerhaft mechanisch geschützt werden, wobei die Klemmung nicht die Dichtigkeit der Abdichtung gefährden darf.

Im Falle des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Eggenstein-Leopoldshafen wird die Last auf die Schweißnaht durch Erdüberschüttung reduziert bzw. vermieden.

Ist die Verkehrslast und Eigenlast größer als die Auftriebskraft, wie im Falle einer erdüberdeckten schwimmenden Abdeckung, schwimmt die Abdeckung nicht mehr. Die Kraft muss von der Klemm- bzw. Schweißverbindung getragen werden. Es wird abgeraten solch eine Konstruktion auszuführen.

6.3 Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen

Neben der Abdichtung ist die Wärmedämmung die wichtigste Komponente des Wandaufbaus. Die Minimierung der Wärmeverluste bei vertretbaren Kosten ist Ziel der Optimierung. Die effektive Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe unter realistischen Randbedingungen ist somit die entscheidende Größe.

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit von für die Anwendung in erdvergrabenen Langzeit-Wärmespeichern geeigneten (schüttfähigen) Dämmstoffen sind nicht verfügbar und müssen somit bestimmt werden. Der Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen ist bisher nur ungenügend untersucht worden.

Bisherige Untersuchungen beschränkten sich i.d.R auf den Baubereich. Messungen wurden entsprechend DIN 52612 bei 10 °C Probenmitteltemperatur durchgeführt. Referenzwerte nach DIN 4108 werden entsprechend bei 10 °C angegeben.

Modelle zur Berechnung des Temperatur- und Feuchteinfluss sind u.a. im VDI-Wärmeatlas [180] zusammengefasst. Weitere Arbeiten sollen hier nur exemplarisch aufgezählt werden: [213] bis [216], [219] bis [222].

Im Rahmen von Innenlaboruntersuchungen mit einer modifizierten Zwei-Platten-Apparatur wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} von Plattenmaterialien und Dämmstoffschüttungen als Funktion der Temperatur ϑ sowie von schüttfähigen Dämmstoffen in Abhängigkeit der Temperatur ϑ und des Wassergehalts u gemessen.

Detaillierte Ergebnisse und Beschreibungen zur Versuchsdurchführung sind in den Studienarbeiten von Stumpp [129], Kreis [223] und Liebchen [224] zu finden und werden hier nur kurz erläutert. Weiterhin wurden einige Dämmstoffe bezüglich ihres Sorptionsverhaltens detailliert in [225] untersucht. Eine detaillierte Beschreibung des entwickelten Wärmeleitfähigkeitsmodells sowie Messergebnisse sind in einem Beitrag des International Journal of Heat and Mass Transfer [226] zu finden. Eine schematische Darstellung der Wärmetransportvorgänge ist in Bild 41 dargestellt.

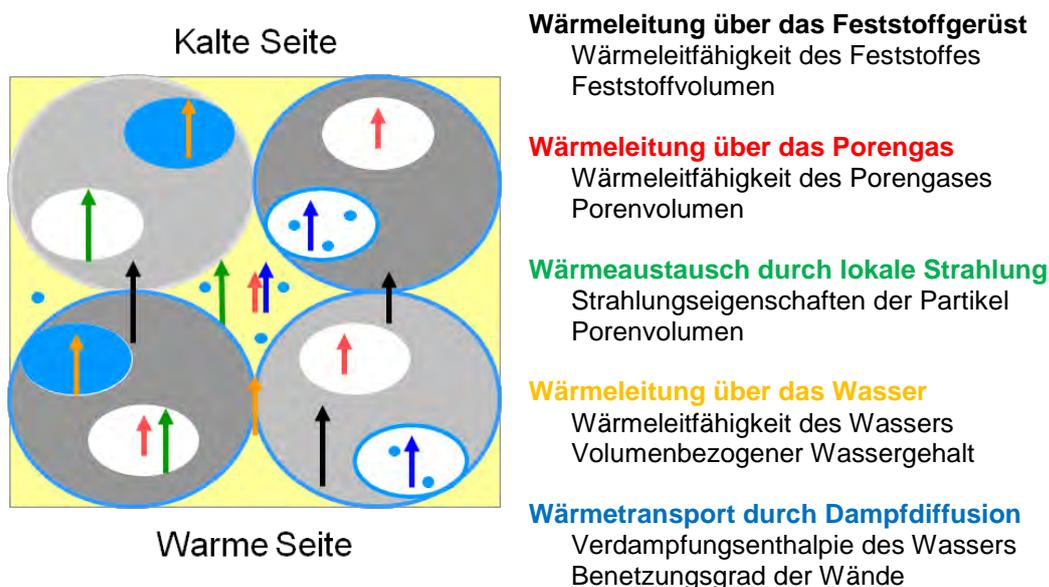


Bild 41: Wärmetransport in einem porösen Stoff: verschiedene Wärmetransportvorgänge im Feststoff und in den Poren resultieren in eine effektive Wärmeleitfähigkeit

Bei hohen Temperaturen in Anwesenheit von Feuchte wird die effektive Wärmeleitfähigkeit primär durch Porendiffusion bestimmt, vgl. Bild 42.

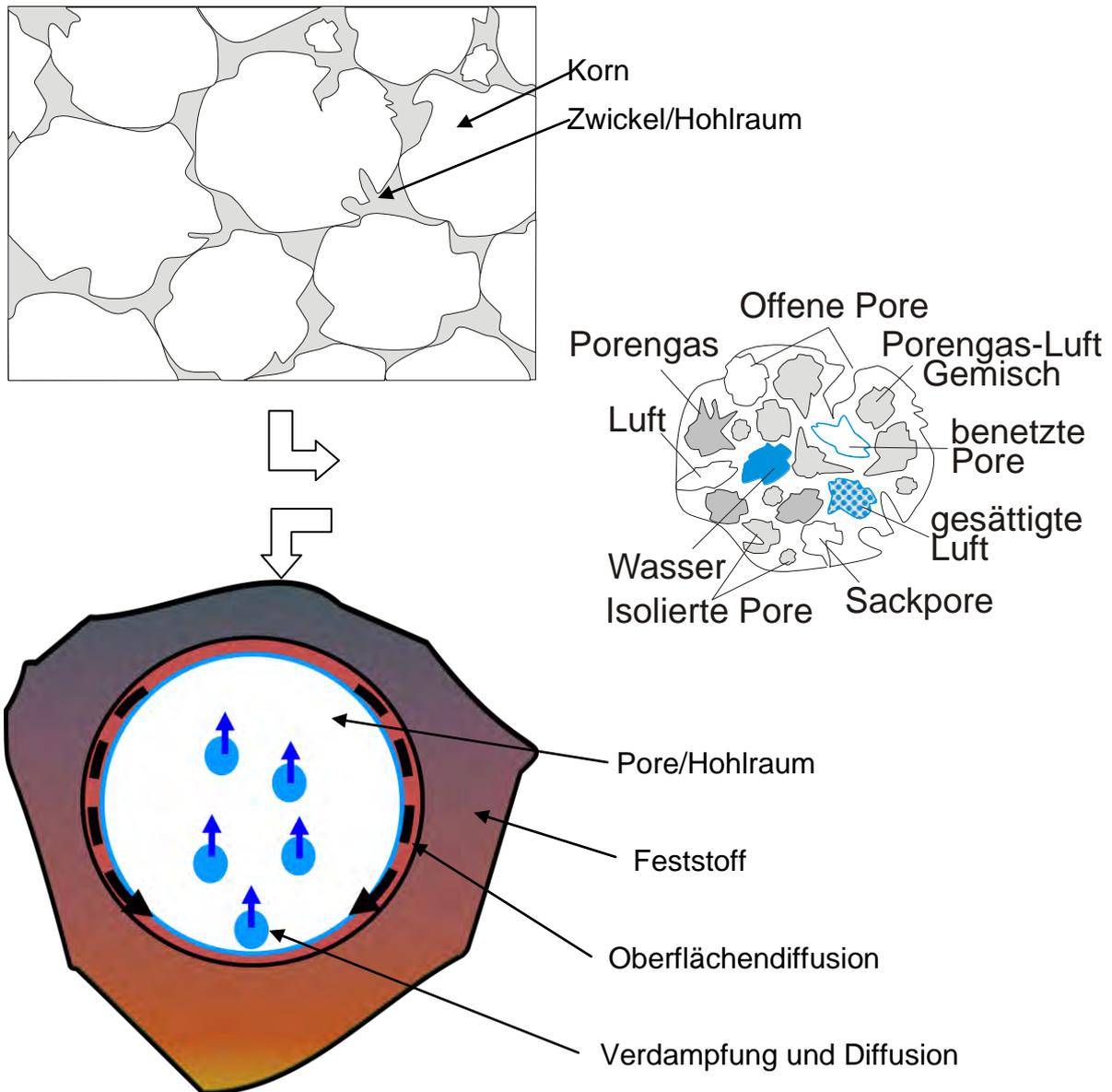


Bild 42: Porendiffusion (Heat Pipe Effekt) kann bei Anwesenheit von Feuchte in den Poren eines Kornes und in den Zwickeln zwischen den Körnern einer Schüttung stattfinden.

An den feuchten Partikeloberflächen kommt es zu Verdunstungserscheinungen. Der Wasserdampf diffundiert in kältere Bereiche und kondensiert unter Wärmeabgabe an den kühleren Flächen. Um diesen Vorgang beschreiben zu können leitete Krischer [174] folgende Gleichung ab

$$\lambda_{\text{Diff}} = \frac{\varphi \cdot D_D}{R_D \cdot T} \cdot \frac{p_0}{p_0 - p_s} \cdot \frac{dp_s}{d\vartheta} h_v \quad (26)$$

In Gl. (26) ist D_v der empirisch bestimmte Wasserdampf-Diffusionskoeffizient bei Umgebungsdruck, vgl. Gl (9). Der Sättigungsdampfdruck kann im relevanten

Temperaturbereich zwischen 0 °C und 100 °C nach Magnus [181] berechnet werden. Die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve Gleichung (11) erhält man durch Ableiten der Gleichung nach der Temperatur:

$$\frac{d(p_s)}{d\vartheta} = \frac{2.44314 \cdot 10^6}{(234.175 + \vartheta)^2} \cdot \exp\left(\frac{17.08085 \cdot \vartheta}{234.175 + \vartheta}\right) \quad (27)$$

Für das Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit werden Materialeigenschaften von schüttfähigen porösen Stoffen bzw. Dämmstoffen benötigt. Detaillierte Untersuchungen zur Wasseraufnahme, Trocknung und zur Feuchtespeicherung der Dämmstoffe wurden dafür durchgeführt. Ergebnisse dazu und Angaben zu Feuchtemessverfahren in Dämmstoffen sind in [225] zusammengefasst.

6.3.1 Messaufbau und Versuchsdurchführung

Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} von Plattenmaterialien sowie von schüttfähigen Dämmstoffen wurde in Abhängigkeit der Temperatur ϑ und des Wassergehalts (u) gemessen. Die Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} erfolgte mit einer modifizierten Zwei-Platten-Apparatur, vgl. Bild 43.



Bild 43: Zwei-Platten-Apparatur des Herstellers Taurus Instruments am ITW (links) Foto der Probenaufnahmebehälter gefüllt mit Blähglasgranulat (rechts)

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit mit der Zwei-Platten-Apparatur erfolgt nach einem stationären Messverfahren. Stationäre Messverfahren sind dann von Vorteil,

wenn der zu messende Stoff eine niedrige Wärmeleitfähigkeit erwarten lässt und somit träge auf Temperaturänderungen reagiert, wie es bei Dämmstoffen der Fall ist. Ein weiterer Grund für die Anwendung eines stationären Messverfahrens ist, dass speziell bei Schüttungen größere Probenmengen erforderlich sind. Diese sind nötig, um zum Beispiel Porositätsschwankungen oder Schwankungen bei der Korngrößenverteilung auszugleichen.

Die Zwei-Platten-Apparatur besteht aus je einer Kühlplatte oben und unten und einer dazwischen liegenden Heizplatte. Zwischen die Heiz- und Kühlplatte wird je eine Probe eingelegt, wie in Bild 44 dargestellt. Eine geregelte Randheizung und eine Randdämmung sorgen dafür, dass der Temperaturgradient an der Probenaußenkante gegen Null geht und es zu keinem Wärmetransport in horizontaler Richtung kommt.

Der Wärmestrom erfolgt durch elektrisches Beheizen. Gemessen werden Strom und Spannung an der Heizplatte sowie die Temperaturen auf den kalten und den heißen Seiten mittels Thermoelementen. Die Gesamthöhe der beiden Proben s_o und s_u wird ebenfalls von der Apparatur abgetastet. Die Temperaturdifferenz an der Probe sollte, speziell bei feuchten Proben, möglichst klein gewählt werden, um eine nennenswerte Feuchtigkeitsverlagerung in der Probe zu vermeiden. Dass es aber dennoch zu einem Feuchtigkeitsgefälle von warm nach kalt in der Probe kommt, zeigt Bild 43 (rechts). Im rechten Behälter sieht man auf der Fläche „kalt oben“ der Probe dunklere, feuchte Stellen. Im rechten Behälter sind auf der Fläche „warm unten“ keine Auffälligkeiten zu erkennen.

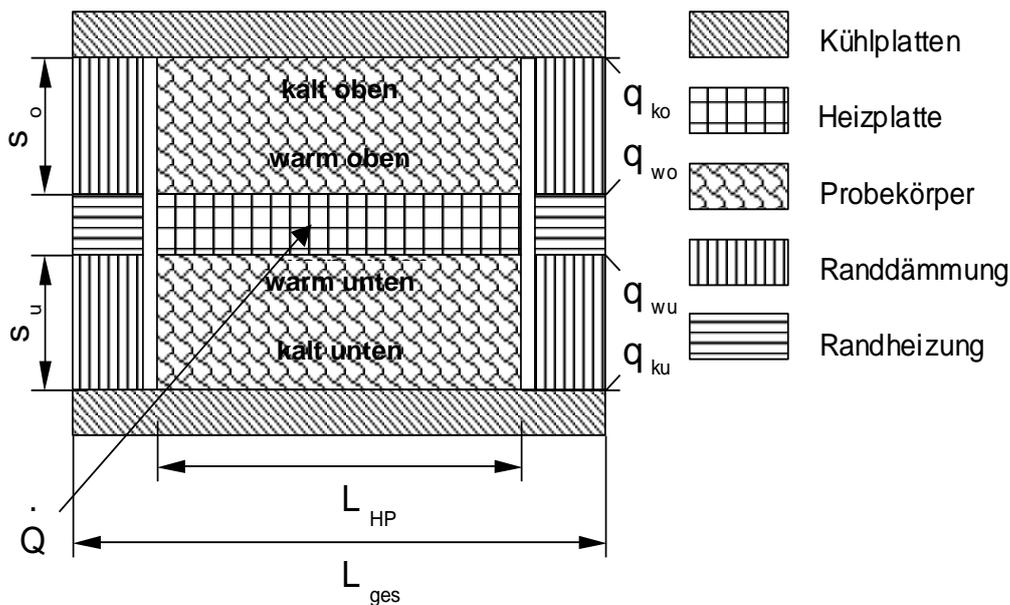


Bild 44: Anordnung des Probekörpers und Messgrößen der Zwei-Platten-Apparatur $L_{ges} = 0,9 \text{ m}$, $L_{HP} = 0,5 \text{ m}$

Zwei Probekörper sind jeweils zwischen der Heizplatte und einer Kühlplatte angeordnet. Die Fläche der Heizplatte ergibt ist entsprechend

$$A_{HP} = L_{HP}^2 \quad (28)$$

0.25 m² groß. Die Heizplatte wird elektrisch beheizt, die Kühlplatten werden mit Hilfe eines Kryostaten gekühlt. Dabei wird die Anlage so geregelt, dass sich sowohl an der oberen, als auch an der unteren Probe die gleiche konstante Temperaturdifferenz einstellt. Diese kann in der Steuerung beliebig im Bereich zwischen 2 und 20 K gewählt werden. Die mittlere Temperaturdifferenz an beiden Probekörpern kann mit Gl. (29) bestimmt werden.

$$\Delta \vartheta_m = \frac{\vartheta_{wo} - \vartheta_{ko} + \vartheta_{wu} - \vartheta_{ku}}{2} \quad (29)$$

Es werden von der Steuerungssoftware fünf mögliche Messpunkte pro Messung angeboten, bei denen die Wärmeleitfähigkeiten der Probe nacheinander bei unterschiedlichen Mitteltemperaturen gemessen werden können. Die Zeit für die Messung an einem Messpunkt ist frei wählbar und sollte so eingestellt werden, dass der Probekörper vor der Einregelung auf ein neues Temperaturniveau einen stationären Zustand erreicht hat. Die Mitteltemperatur an der Probe errechnet sich dann aus Gl. (30).

$$\mathcal{G}_M = \frac{\mathcal{G}_{wo} + \mathcal{G}_{ko} + \mathcal{G}_{wu} + \mathcal{G}_{ku}}{4} \quad (30)$$

Der durch beide Probekörper fließende Wärmestrom ergibt sich aus Gl. (31).

$$\dot{Q} = U_{HP} \cdot I_{HP} \quad (31)$$

Dabei sorgen eine geregelte Randbeheizung und eine Randdämmung dafür, dass der gesamte Wärmestrom durch den Probekörper fließt. Die Temperatur der Randbeheizung wird der Temperatur der Heizplatte angepasst. So wird der Temperaturgradient an der Probenaußenkante zu Null, und es kann nur Wärme in vertikaler Richtung durch Leitung übertragen werden. Hierbei ist es auch möglich, dass Probekörper und Randdämmung aus einem Stück bestehen.

Die Zwei-Platten-Apparatur kann auf zwei Arten betrieben werden. Entweder als synchrones oder asynchrones Messverfahren. Beim synchronen Messverfahren wird oben und unten das gleiche Material mit identischer Geometrie und Zustand eingebaut. Entsprechend wird beim asynchronen Verfahren eine unbekannte Probe gegen eine bekannte Referenzprobe vermessen.

Für die Messung feuchter Proben mit der Zwei-Platten-Apparatur wurden diffusionsdichte Messbehälter aus V2A-Stahl angeschafft. Damit war ein schneller und problemloser Ein- und Ausbau bzw. Wechsel der Proben möglich (Bild 43, rechts).

Für die Messung der verdichteten Schaumglasschotterproben kann aufgrund der größeren Partikel nicht auf dieselben Probeaufnahmebehälter zurückgegriffen werden, da diese mit 70 mm Höhe für die grobkörnigen Schüttungen zu niedrig sind. Die Höhe ist durch die Geometrie der Zwei-Platten-Apparatur begrenzt und beträgt 0.154 m pro Probenbehälter (vgl. Bild 45). Die Dauer der Messung steigt mit zunehmender Dicke und abnehmender Wärmeleitfähigkeit der Probe.



Bild 45: Probeaufnahmebehälter für Schaumglasschotterschüttungen

Um die Probeaufnahmebehälter in Bezug auf Gewicht handhabbar zu gestalten, musste die Größe auf 500 mm x 500 mm reduziert werden. Durch eine zusätzliche Randdämmung entsprechend Bild 46 können zwar die Randwärmeverluste reduziert werden, jedoch bildet der Rand der Probeaufnahmebehälter eine Wärmebrücke, welche bei der Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit korrigiert werden muss, vgl. Gl. (32).

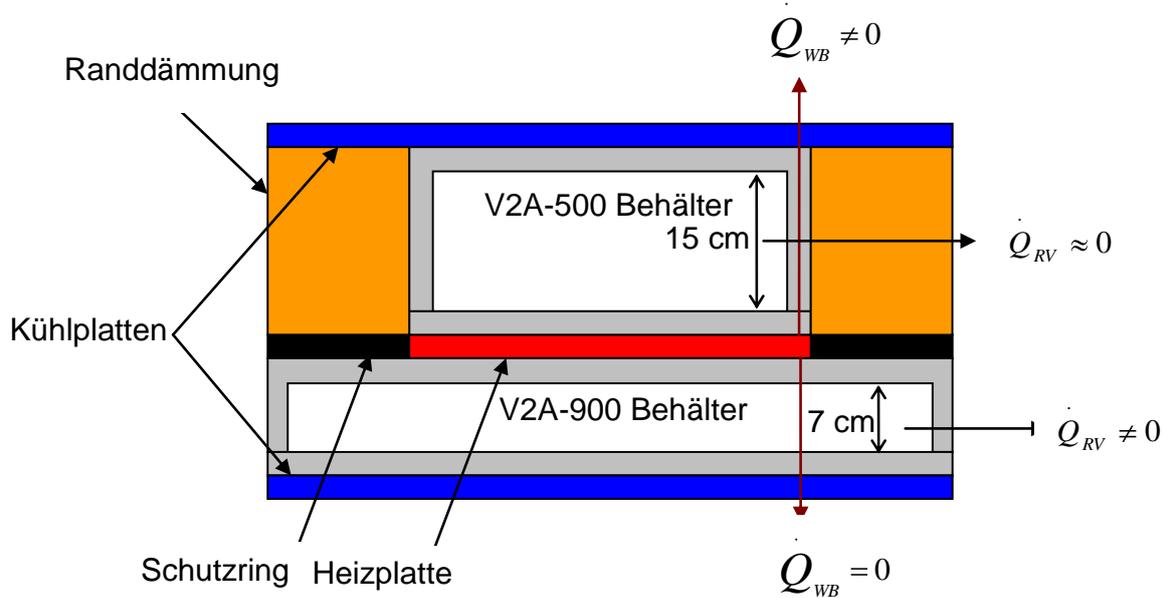


Bild 46: Schematischer Vergleich der Vor- und Nachteile der verschiedenen Probeaufnahmegefäße, Randverluste (RV) und der Wärmebrücke (WB)

$$\lambda_{WD} = \frac{s_{WD}}{A_{WD}} \cdot \frac{\dot{Q} \cdot (R_3 + R_1) - 2 \cdot \Delta\vartheta}{2 \cdot \Delta\vartheta \cdot R_1 - \dot{Q} \cdot R_1 \cdot R_3} \quad (32)$$

Mit dem Wärmedurchgangswiderstand von Behälterwand (W) und Behälterboden und Deckel (BD)

$$R_1 = \frac{s_W}{A_W \cdot \lambda_{V2A}} \quad (33)$$

und

$$R_3 = \frac{s_{BD}}{A_{BD} \cdot \lambda_{V2A}} \quad (34)$$

6.3.2 Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen

Die Wärmedämmung muss auf der Baustelle nicht nur möglichst kosteneffektiv eingebracht werden, sondern dabei auch trocken und schadensfrei bleiben. Vor allem bei großen Speichern kann das Einbringen der Wärmedämmung mehrere Wochen dauern. Der Schutz vor Witterungseinflüssen spielt dann zusätzlich eine wichtige Rolle bei der Auswahl einer geeigneten Wärmedämmung und

entsprechender Einbaumaßnahmen. Wie in Kapitel 5.1 begründet sind schüttfähige Dämmstoffe wie Blähglasgranulat oder Schaumglasschotter diesbezüglich vorteilhaft.

Bei allen untersuchten Schüttungen wurde im trockenen Zustand eine Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur festgestellt. Wie in Bild 47 dargestellt ist, nimmt die effektive Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 80 °C abhängig vom Dämmstoff um 20 % bis 40 % zu.

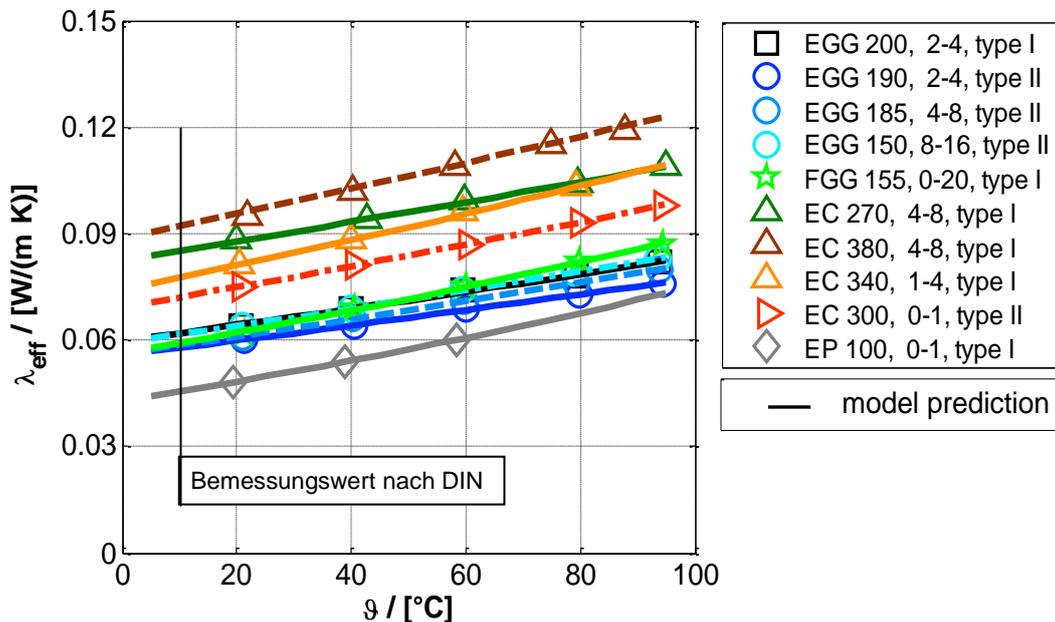


Bild 47: Effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit der Temperatur ϑ von trockenen Dämmstoffschüttungen: Blähglasgranulat (EGG), Blähton (EC), Schaumglasschotter (FGG) oder Perlite (EP)

Die effektive Wärmeleitfähigkeit von derzeit verfügbarer Wärmedämmung unter Feuchteinfluss bei hohen Temperaturen (60 °C bis 80 °C) ist um bis zu fünfmal höher, als der Bemessungswert nach DIN [317], wie in Bild 48 am Beispiel Blähglasgranulat (Schüttung) und Steinwolle (Platte) gezeigt wird. Aufgrund der hohen (offenen) Porosität der untersuchten Dämmstoffschüttungen ist die Wasseraufnahme relativ hoch. Die Werte der freien Wassersättigung (u_{fs}) liegen zwischen 300 und 550 kg/m³ für die untersuchten Schüttungen und bei rund 800 kg/m³ für die untersuchte Steinwolle.

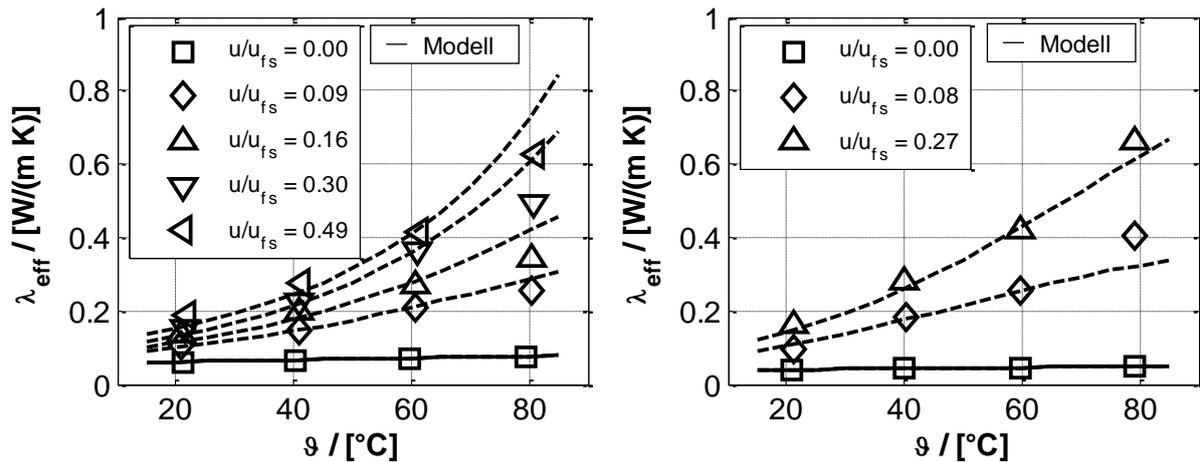


Bild 48: Effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ und vom normierten Wassergehalt (u/u_{fs}) von links Blähglasgranulat 4-8 mm (Schüttung) und rechts druckfester Steinwolle (Dämmstoffplatte)

Auf Basis der Messwerte wurde ein Modell entwickelt, das die Beschreibung der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Wassergehalts und der Temperatur ermöglicht.

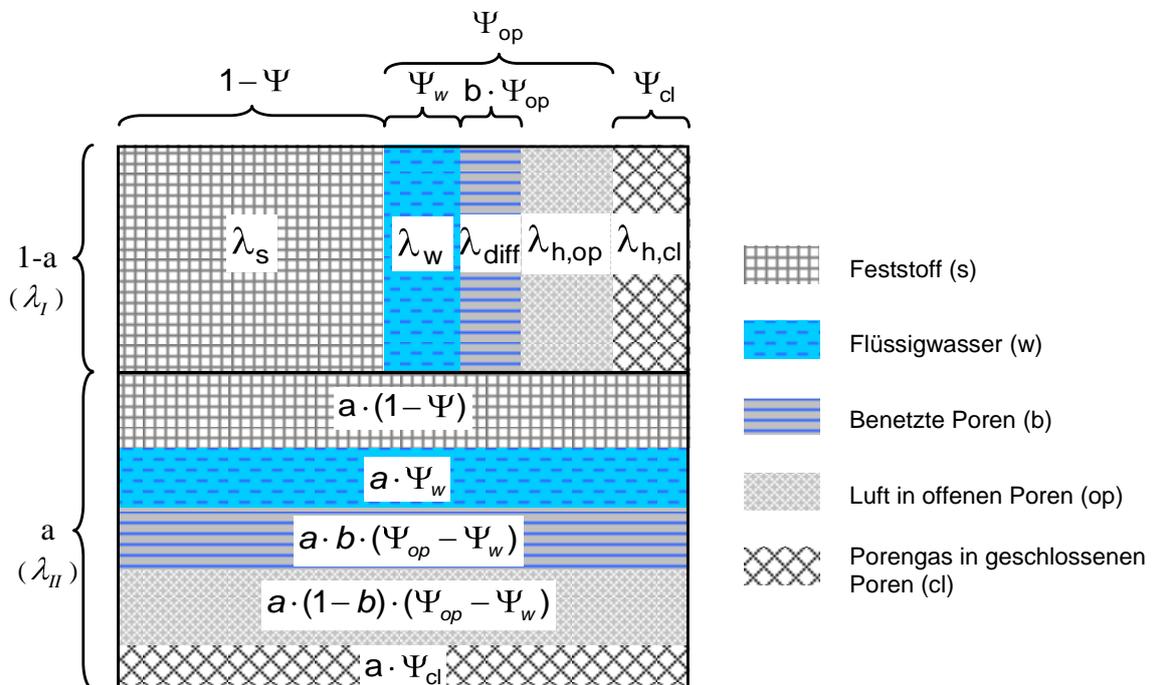


Bild 49: Erweitertes Schichtenmodell, [226]

Um auch bei Schüttungen, aus Partikeln mit zum Teil geschlossenen Poren, die effektive Wärmeleitfähigkeit, als Funktion der Stofffeuchte und Temperatur,

modellieren zu können, wurde das Modell von Krischer [174] um eine weitere Schicht, bestehen aus eingeschlossener trockenen Luft, erweitert.

Dadurch wird im Modell ein Anteil von Poren berücksichtigt, welche auch bei maximaler Wassersättigung nur mit Porengas gefüllt sind. Somit kann in diesen Poren noch Strahlung stattfinden kann. Damit liefert dieses erweiterte Schichtenmodell auch bei hohen Temperaturen ($> 60 \text{ }^\circ\text{C}$) und hohen Feuchten noch eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Für detaillierte Informationen zum erstellten Wärmeleitfähigkeitsmodell wird auf die Literatur [226] verwiesen.

Durch transiente Simulationsrechnung können aufbauend auf den im Rahmen dieses Projekts gewonnenen Messdaten die tatsächlichen Wärmeverluste von Langzeit-Wärmespeichern im Betrieb bestimmt werden (vgl. Kapitel 7.4).

6.3.3 Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoff-Platten

Die Temperaturabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Platten-Dämmstoffen wird in Bild 50 ersichtlich. Die effektive Wärmeleitfähigkeit nimmt zwischen 20 % und 30 % bei einer Temperaturerhöhung von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $80 \text{ }^\circ\text{C}$ zu, vgl. Bild 50.

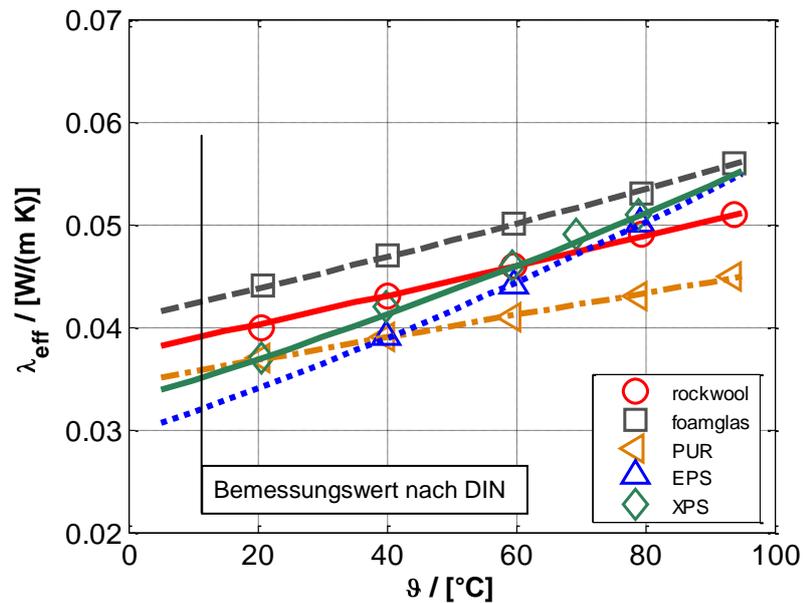
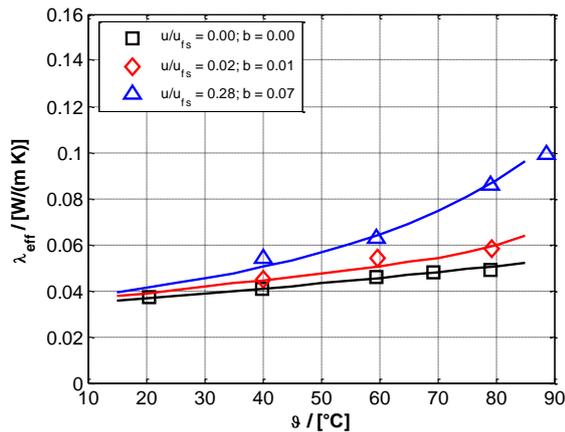


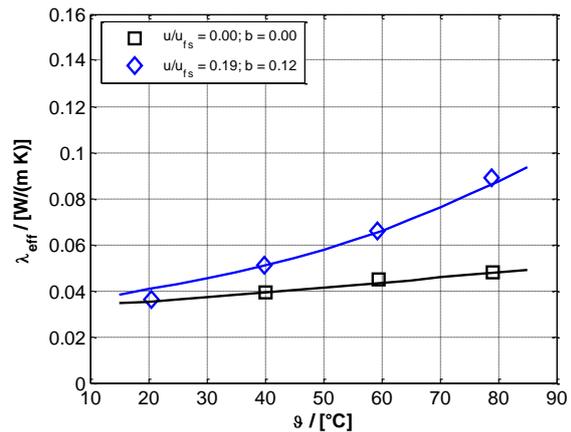
Bild 50: Effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit der Temperatur ϑ von trockenen Dämmstoffplatten (Punkte: Messwerte, Linien: Modellwerte)

Es wurden ausschließlich druckfeste Platten untersucht, welche eine relativ hohe Dichte aufweisen. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss darauf geachtet werden, dass jeweils auch Platten mit geringerer Trockenrohddichte verfügbar sind. Je geringer die Dichte, desto geringer die Wärmeleitfähigkeit.

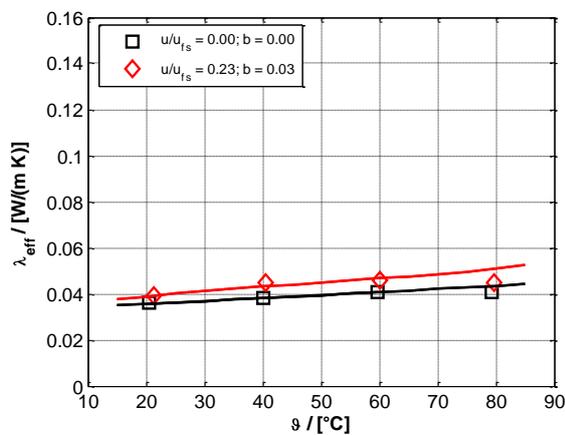
Da der Fokus der Untersuchungen bei Dämmstoffschüttungen lag, wurden jeweils nur eine trockene Probe und eine feuchte Probe vermessen. Der Effekt von Feuchte ist ähnlich gravierend wie bei den Dämmstoffschüttungen. Schon bei geringem Wassergehalt von 1 bis 2 Vol.-% verdoppelt sich die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Referenzwert.



XPS $\rho = 34 \text{ kg/m}^3$, $\Psi=0.97$, $u_{fs}=11 \text{ kg/m}^3$



EPS $\rho = 38 \text{ kg/m}^3$, $\Psi=0.96$, $u_{fs}=20 \text{ kg/m}^3$



PUR/PIR $\rho = 84 \text{ kg/m}^3$, $\Psi=0.92$, $u_{fs}=21 \text{ kg/m}^3$

Bild 51: Mess- und Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit feuchter polymerer Dämmstoffplatten (Zwei-Platten-Apparatur, Schichtenmodell)

6.3.4 Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Verdichtungsgrades

6.3.4.1 Motivation

Wegen ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit sind verdichtete Dämmstoffschüttungen besonders im Boden und Deckelbereich von erdvergrabenen Wärmespeicher vorteilhaft.

Schaumglasschotterschüttungen werden verdichtet, um die Druckfestigkeit zu erhöhen. Verdichtungsgrade von 1:1.3 bzw. 1:1.5 werden empfohlen. Eine Verdichtung von 1:2 ist möglich. Für eine gewisse Dämmschichtdicke muss entsprechend mehr Material eingerechnet werden.

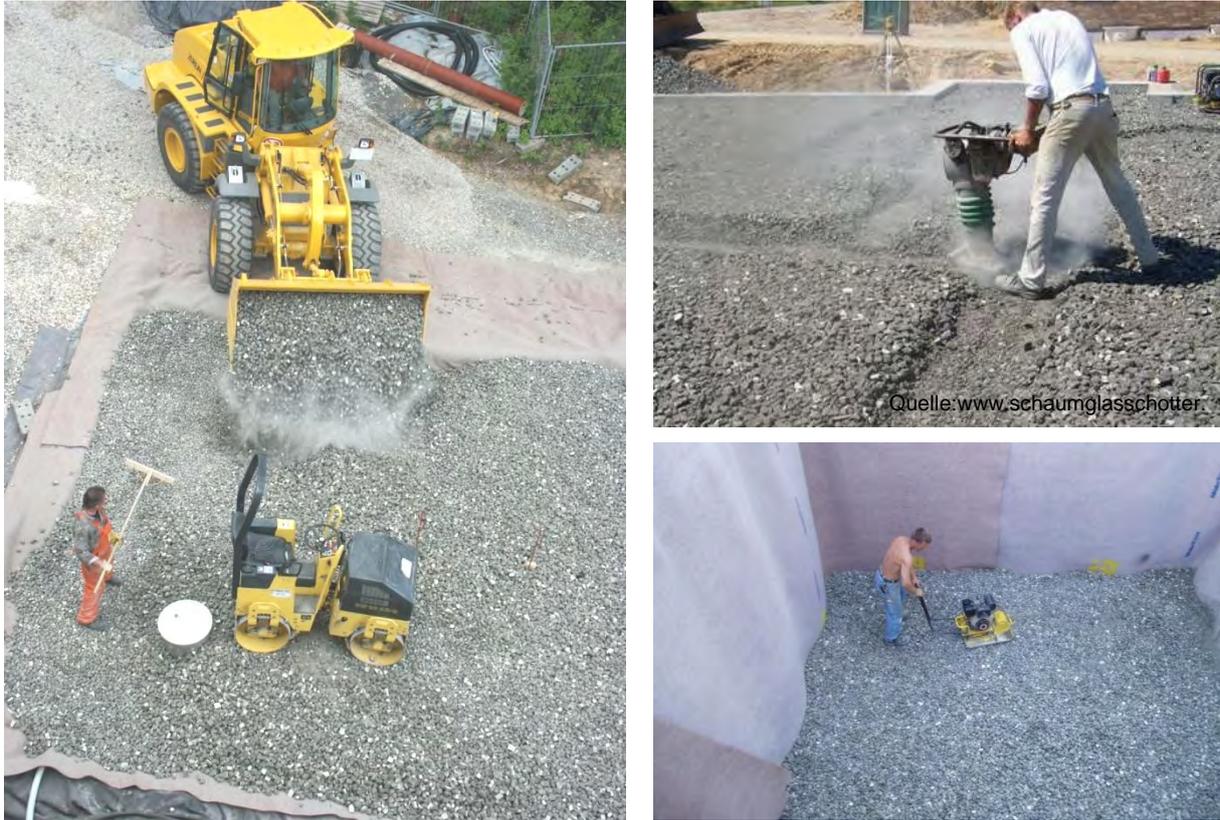


Bild 52: Verdichtung der Schaumglasschotterschicht zur Erhöhung der Druckfestigkeit

Durch die Verdichtung nimmt die Druckfestigkeit zu. Dadurch, dass die Schichtdicke abnimmt, nimmt (bei gleicher Dämmstoffmasse) der Wärmetransport zu. Der Anteil der (Makro-)Poren nimmt ab, der Feststoffanteil nimmt zu. Somit wird der Wärmetransport durch den höheren Feststoffanteil größer, der Anteil des Wärmetransports durch Luft und durch Strahlung wird geringer. Gegebenenfalls kommt es zu einer Reduzierung/Vermeidung von konvektivem Wärmetransport. Als Folge davon müsste theoretisch die Kurve der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur von verdichtetem Dämmstoff über der Kurve von nicht verdichtetem liegen, jedoch eine geringere Steigung aufweisen, wie in Bild 53 schematisch dargestellt.

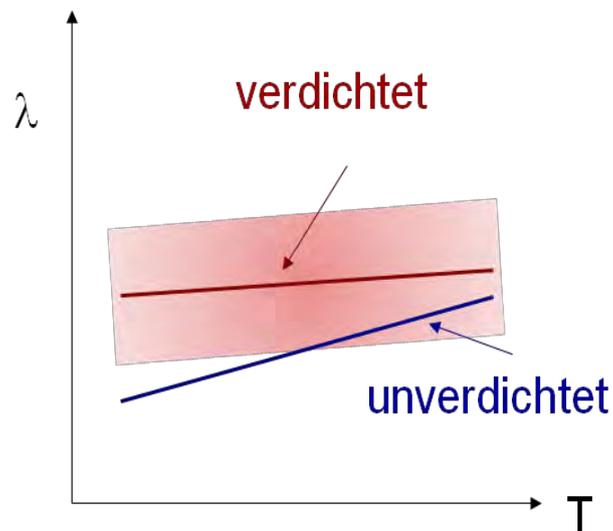


Bild 53: Theoretischer Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit von nicht verdichteten und verdichteten Schaumglasschotterschüttungen

Durch unsachgemäßes Vorgehen kann es beim Bauablauf zur Durchfeuchtung der Wärmedämmung kommen, wie sich am aktuellen Beispiel des Pilotprojekts München-Ackermannbogen gezeigt hat. Die Wärmedämmung wurde verdichtet, als diese von einer Schneeschicht bedeckt war, siehe Foto:



Bild 54: Schneebedeckte Schaumglasschotter-Wärmedämmung beim Projekt SNAB München-Ackermannbogen (links), feucht angelieferte Wärmedämmung in Eggenstein-Leopoldshafen (rechts oben), nasse SGS Wärmedämmung beim Außenlaborversuch (rechts unten)

In Eggenstein-Leopoldshafen wurde Schaumglasschotter mit einem Wassergehalt von 25 kg/m^3 geliefert, jedoch aufgrund der Erkenntnisse, die im Rahmen des Projekts „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ gewonnen wurden, nicht eingebaut. Weitere Lieferungen erwiesen sich als trockener, jedoch ist ein Wassergehalt unter 0.5 Vol\% auch zukünftig nicht auszuschließen.



Bild 55: Lieferung der SGS Schüttung im abgedeckten LKW, 25 kg/m^3 wies die Wärmedämmung auf. Feuchtigkeitseintrag durch Beladen des LKW bei Starkregen.

Auch im eingebauten Zustand sind Durchfeuchtungen der Wärmedämmung durch Grund- oder Schichtenwasser nicht gänzlich ausgeschlossen, wie sowohl die Erfahrungen mit den Pilotspeichern, als auch die Außenlaborversuche zeigen.

6.3.4.2 Messprogramm

Es wurden vier verschiedene Typen von Schaumglasschotter untersucht. Die untersuchten Proben von Misapor und Technopor sind in der untersuchten Form kommerziell erhältlich. Die beiden Proben der Schüttungen von MillCell sind älter, jedoch in ähnlicher Weise immer noch erhältlich.

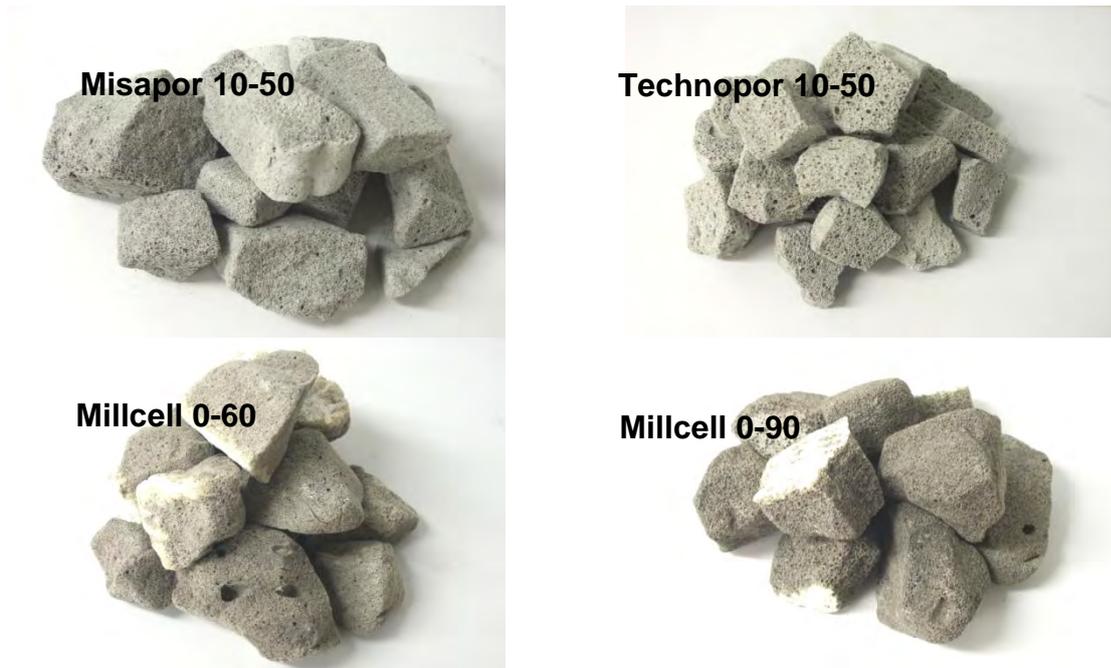


Bild 56: Untersuchte SGS-Schüttungen

Tabelle 29: Messprogramm, Einfluss der Verdichtung der Wärmedämmung

Material	Effektive Wärmeleitfähigkeit	Wasseraufnahme	Trocknung	Dichte, Porosität
MillCell 0-60	lose, verdichtet, temperatur- und feuchteabhängig		lose, verdichtet	
MillCell 0-90				
Mispapor 10/50				
Technopor 10/50				

6.3.4.3 Verdichtungseinheit

Für die Durchführung der Innenlaborversuche werden Probeaufnahmegefäße sowie eine Vorrichtung für die definierte Verdichtung der Dämmstoffschüttung (Komprimierungseinheit) benötigt. Die Verdichtungseinheit wird pneumatisch mit 6 bar (max. möglich: 10 bar) angetrieben.



Bild 57: Verdichtungseinheit (links) und verdichtete Proben in Behältern aus VA für Wasseraufnahme- und Trocknungsversuche

6.3.4.4 Modellierung der Wärmeleitfähigkeit mit dem erweiterten Schichtenmodell

Die Auswertung der Messdaten der effektiven Wärmeleitfähigkeit erfolgt nach dem erweiterten Schichtenmodell (siehe [226]). Im Gegensatz zum beschriebenen Wärmeleitfähigkeitsmodell werden die Dichte, die Porosität und die freie Wassersättigung abhängig vom Verdichtungsgrad entsprechend angepasst.

Tabelle 30: Stoffwerte der Schaumglasschotter-Schüttungen (lose und verdichtete Schüttung)

	ρ / [kg/m ³]	Ψ / [-]	Ψ_{makro} / [-]	u_{fs} / [kg/m ³]
MillCell 0-60	155	0.95	0.42	160
	205	0.92	0.09	290
MillCell 0-90	140	0.95	0.34	70
	200	0.92	0.02	120
Mispapor 10/50	215	0.91	0.40	150
	295	0.88	0.18	205
Technopor 10/50	190	0.92	0.27	100
	240	0.90	0.07	120

Die Verdichtung hat Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Jedoch ist für die trockenen Proben keine eindeutige Tendenz erkennbar, wie in Bild 58 zu sehen ist.

Messungenauigkeiten, die primär im Probeneinbau begründet sind, liegen im Bereich der Veränderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand. Einfluss haben v.a. Feststoffanteil bzw. Staubanteil, Randeffekte und unterschiedliche Probenzusammensetzung.

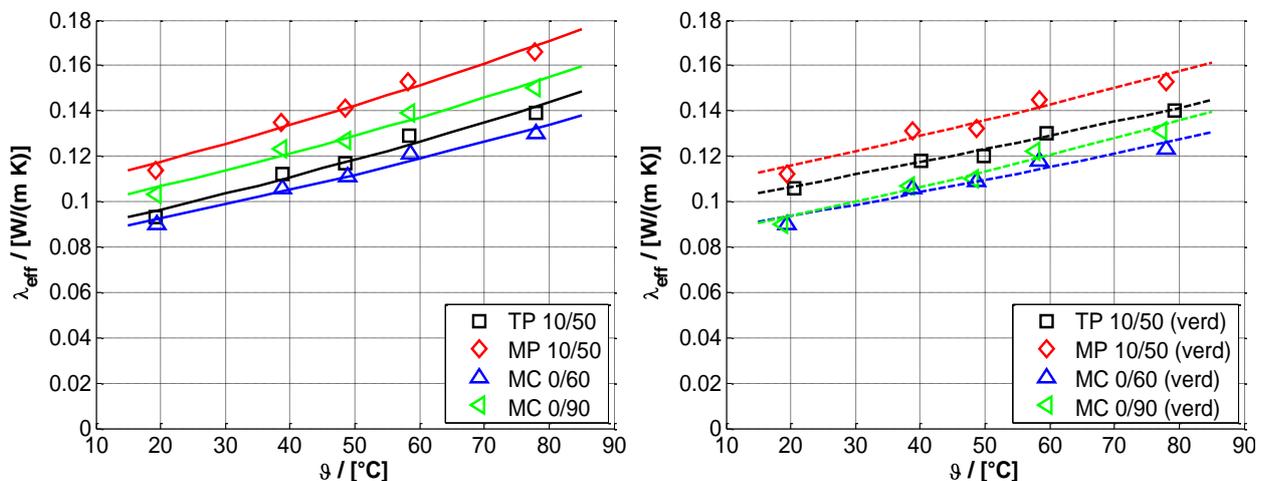


Bild 58: Vergleich des Verlaufs der effektiven Wärmeleitfähigkeit der trockenen, nicht verdichteten Proben (links) mit trockenen verdichteten Proben (rechts)

In Bild 59 bis Bild 62 sind die gemessenen und berechneten Wärmeleitfähigkeiten der verdichteten Proben dargestellt. Zudem sind die iterativ bestimmten Wertepaare $b(u)$ über dem normierten Wassergehalt dargestellt.

Dabei ist b der Anteil der Porenluft, der von feuchten Begrenzungswänden umgeben wird. In ihm findet zusätzlich zur Wärmeübertragung durch Leitung und Strahlung ein

Wärmetransport in Folge von Porendiffusion (Heat Pipe Effekt, Gl. (26)) statt. Die übrige Porenluft hat den Anteil $b-1$. Wärme wird hier nur durch Leitung und Strahlung übertragen. Der Anteil benetzter Poren (b) lässt sich aus den gemessenen Werten der Wärmeleitfähigkeit der feuchten Proben iterativ berechnen. Dazu wird ein Startwert für b zwischen 0 und 1 in die Modellgleichungen eingesetzt, welche dann berechnet werden. Mit der „Methode der kleinsten Fehlerquadrate“ lässt sich so für jeden gemessenen feuchten Zustand ein Wert für b ermitteln.

Die Modellkurve nach Gl. (41) liefert im Gegensatz zum Modell, welches im VDI-Wärmeatlas vorgeschlagen wird, zufriedenstellende Ergebnisse.

VDI Wärme Atlas ([180], Kapitel Mg 11):

$$b = 1 - \left(1 - \frac{u}{u_{fs}} \right)^9 \quad (35)$$

Eigener Vorschlag, vgl. [226]

$$b = \exp \left(m_1 \cdot \left(\frac{u_{fs}}{u} - 1 \right)^{m_2} \right) \quad (36)$$

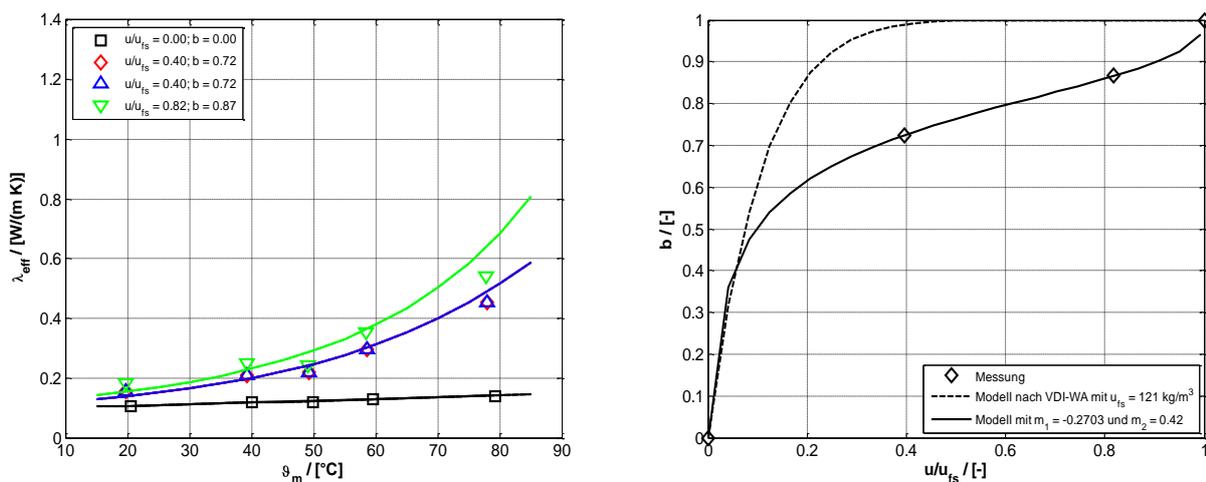


Bild 59: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Technopor 10-50 (verdichtet), als Funktion der Temperatur, trocken sowie mit Wassergehalt von 50 kg/m³ und 100 kg/m³

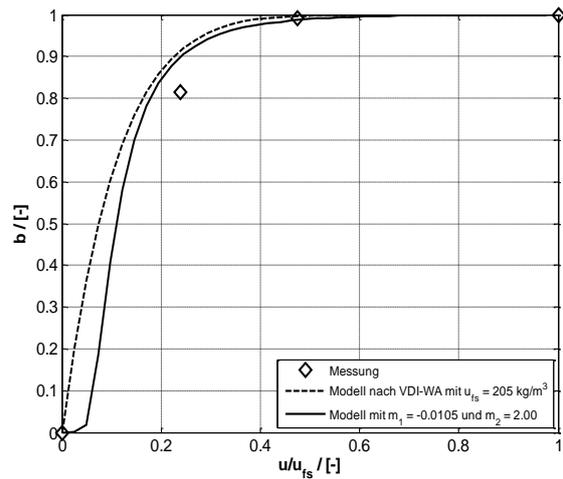
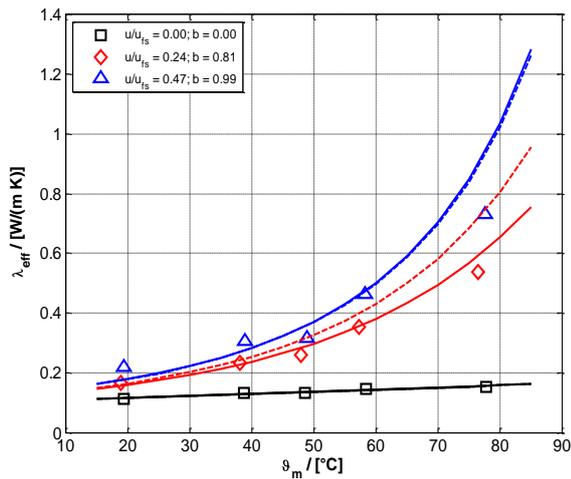


Bild 60: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Misapor 10-50 (verdichtet), als Funktion der Temperatur, trocken sowie mit Wassergehalt von 50 kg/m³ und 100 kg/m³

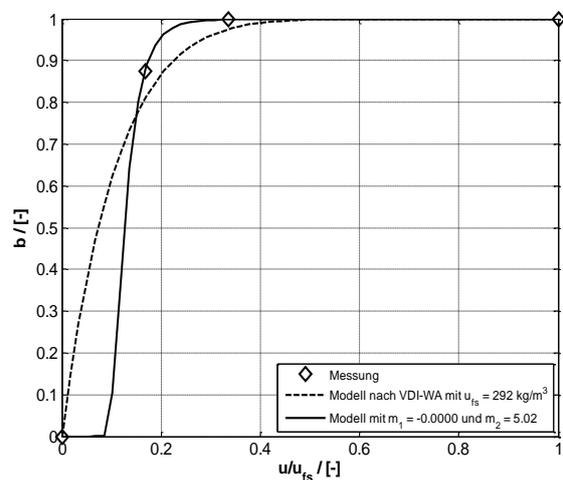
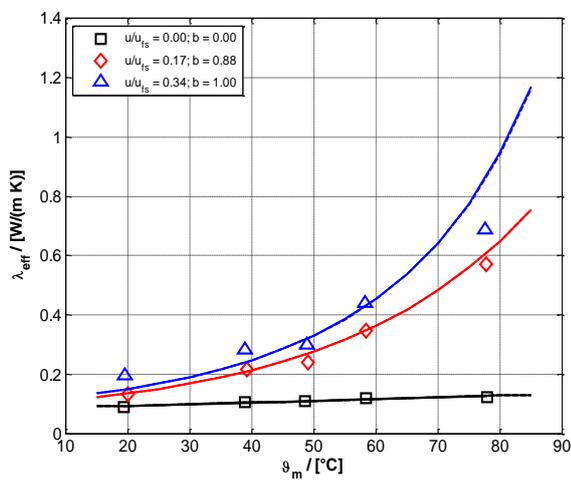


Bild 61: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Millcell 0-60, (verdichtet) als Funktion der Temperatur, trocken sowie mit Wassergehalt von 50 kg/m³ und 100 kg/m³

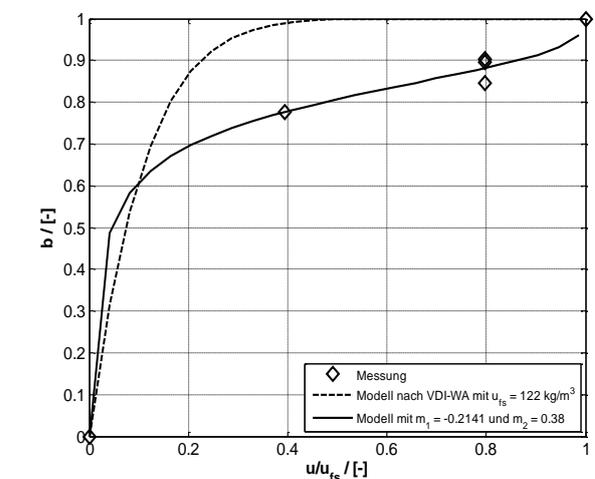
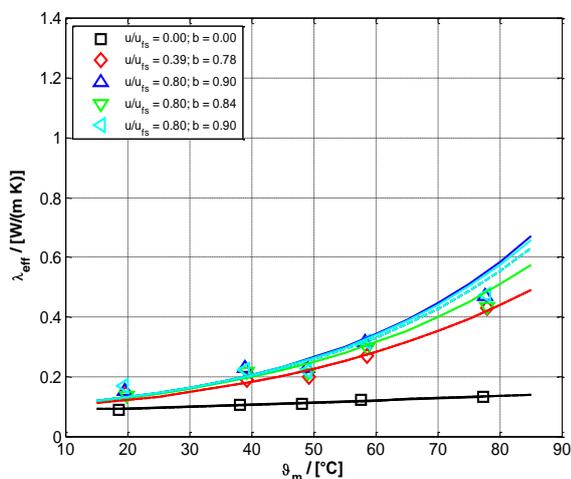


Bild 62: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Millcell 0-90, (verdichtet) als Funktion der Temperatur, trocken sowie mit Wassergehalt von 50 kg/m³ und 100 kg/m³

In Bild 63 wird der Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit der vier Schüttungen bei Wassergehalten von 50 kg/m³ und bei 100 kg/m³ verglichen.

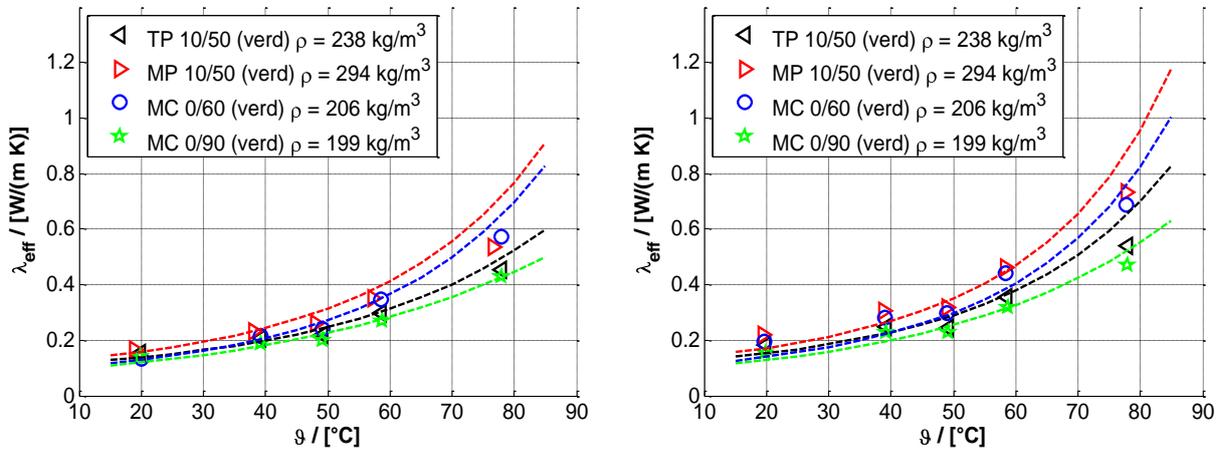


Bild 63: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der feuchten verdichteten Proben. links mit 50 kg/m³ Feuchte und rechts mit 100 kg/m³ Wassergehalt

6.3.4.5 Reproduzierbarkeit

Durch Vergleichsmessungen konnte die Qualität der Messung gezeigt werden. Im interessanten Temperaturbereich bis 60 °C (Probenmitteltemperatur) sind die Abweichungen der Messungen zueinander gering im Vergleich zum Einfluss der Feuchte, wie in den folgenden Diagrammen zu erkennen ist.

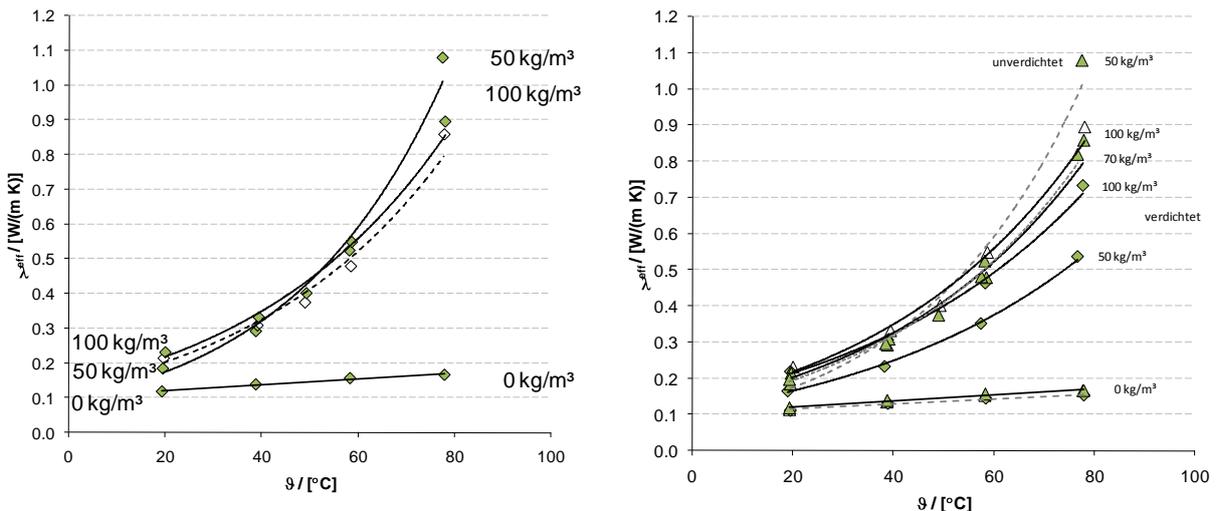


Bild 64: Messwerte trocken, mit 50 kg/m³ und mit 100 kg/m³ Wassergehalt, Verdichtung: 295 / 215 = 1.38, links: nicht verdichtet; die gestrichelte Linie zeigt die Vergleichsmessung; rechts: Vergleich der effektiven Wärmeleitfähigkeit verdichtet (durchgezogenen Linie) und nicht verdichtet (gestrichelte Linie)

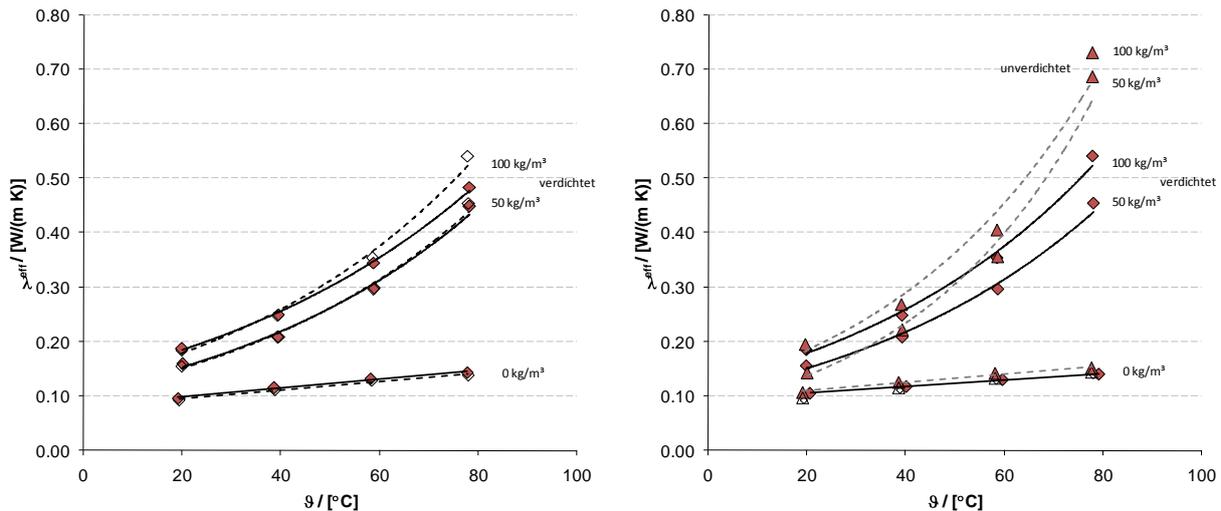


Bild 65: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der verdichteten Proben, trocken, mit 50 kg/m³ und mit 100 kg/m³ Wassergehalt, Verdichtung: 255 / 190 = 1.34, Links: Messung (durchgezogene Linie) und Vergleichsmessung (gestrichelte Linie); rechts: Vergleich verdichtet (durchgezogen) und nicht verdichtet (gestrichelt)

6.3.4.6 Praktische Anwendung der Ergebnisse

Der Wassergehalt der Wärmedämmung im Betrieb ist i.d.R. geringer als der hier untersuchte. Wassergehalte von bis zu 25 kg/m³ sind jedoch durchaus realistisch, wie die Erfahrungen beim Bau des aktuellen Kies-Wasser-Wärmespeichers in Eggenstein-Leopoldshafen zeigen. Die Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen mit geringerem Wassergehalt (0 bis 10 kg/m³) ist schwieriger. Messfehler und Abweichungen bei der Probenvorbereitung (Probeneinbau, Verdichtung, Befeuchtung) haben einen größeren Einfluss als bei Messungen mit Wassergehalten über 25 kg/m³.

Mit Hilfe des erstellten Berechnungsmodells lässt sich jedoch die effektive Wärmeleitfähigkeit für beliebige Wassergehalte und Temperaturen ermitteln. Die Überprüfung der Ergebnisse erfolgt mittels Vergleich von Daten, die durch Interpolation der Messdaten gewonnen werden.

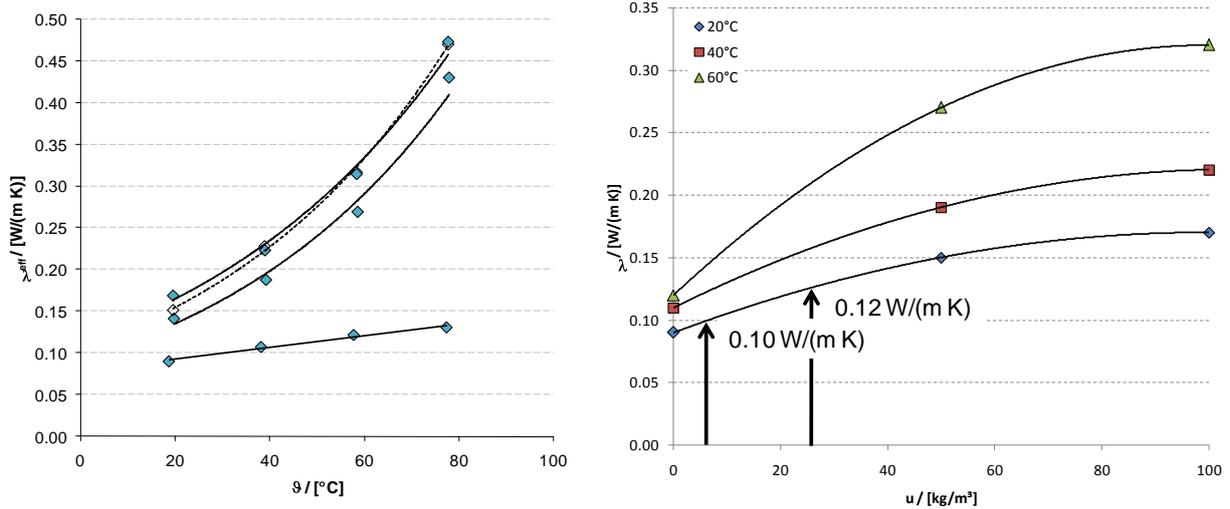


Bild 66: 0-90 mm SGS-Schüttung, Verdichtung: $200 / 145 = 1.38$

Tabelle 31: 0-90 mm SGS-Schüttung, Vergleich der aus den Messdaten interpolierten Werte mit den Modellwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei einem Wassergehalt von 5 kg/m^3 und 25 kg/m^3 für drei verschiedene Temperaturen.

		20 °C	40 °C	60 °C
Messung	0 kg/m³	0.09	0.11	0.12
	50 kg/m³	0.15	0.19	0.27
	100 kg/m³	0.17	0.22	0.32
Interpolation	5 kg/m³	0.10	0.12	0.14
	25 kg/m³	0.12	0.17	0.22
WLF-Modell	5 kg/m³	0.11	0.14	0.20
	25 kg/m³	0.12	0.17	0.25

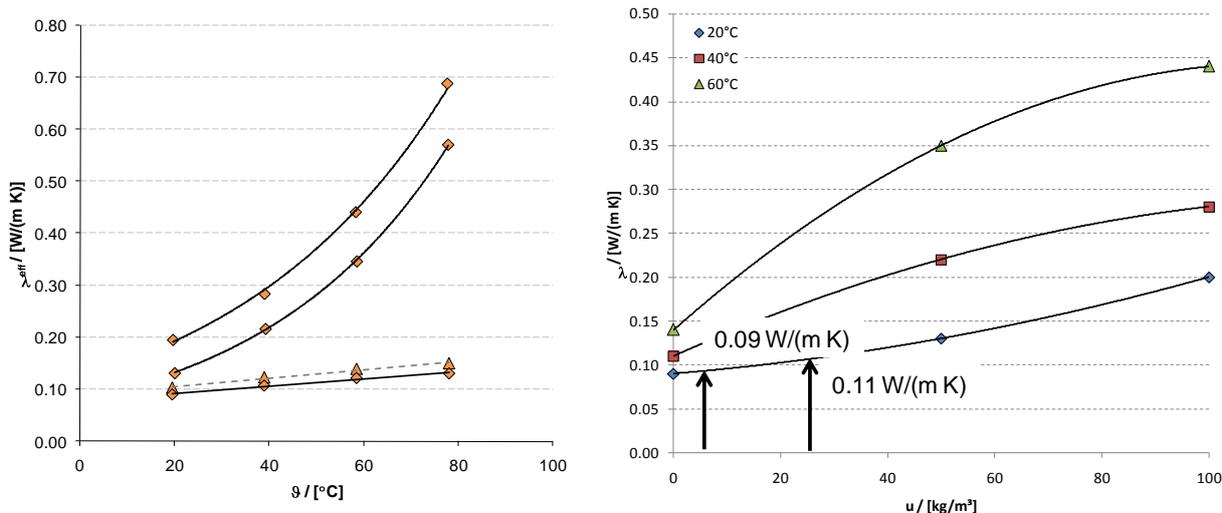


Bild 67: 0-60 mm SGS-Schüttung, Verdichtung: $205 / 155 = 1.32$

Tabelle 32: 0-60 mm SGS Schüttung, Vergleich der aus den Messdaten interpolierten Werte mit den Modellwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei einem Wassergehalt von 5 kg/m^3 und 25 kg/m^3 für drei verschiedene Temperaturen.

		20 °C	40 °C	60 °C
Messung	0 kg/m³	0.09	0.11	0.14
	50 kg/m³	0.13	0.22	0.35
	100 kg/m³	0.20	0.28	0.44
Interpolation	5 kg/m³	0.09	0.12	0.17
	25 kg/m³	0.11	0.17	0.26
WLF-Modell	5 kg/m³	0.11	0.14	0.20
	25 kg/m³	0.12	0.17	0.25

6.3.4.7 Wasseraufnahme und Trocknung

Es wurden neben der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit, auch die Wasseraufnahme und die Trocknungseigenschaften von einzelnen Körnern und Schüttungen (verdichtet und unverdichtet) untersucht. Die Versuchsdurchführung ist in [224] beschrieben.

Für die Auswertung nach dem Wärmeleitfähigkeitsmodell werden Porosität und freie Wassersättigung benötigt. Diese können aus den Messungen der Wasseraufnahme und Trocknungseigenschaften bestimmt werden, vgl. [225].

Die maximale Wasseraufnahme ist sehr unterschiedlich. Werte von rund 70 kg/m³ bis 220 kg/m³ werden gemessen.

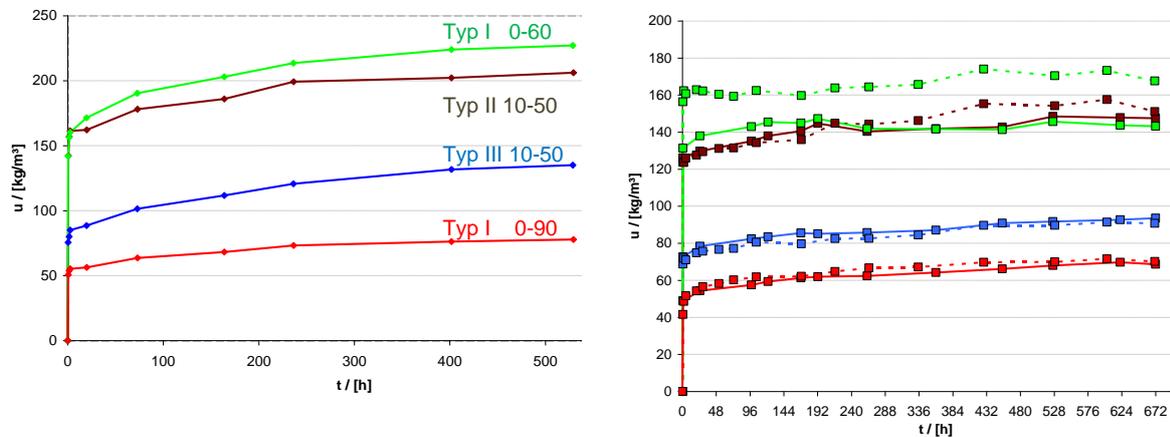


Bild 68: Wasseraufnahme einzelner Körner (links) und Wasseraufnahme der verdichteten Schüttungen (rechts)

Für alle untersuchten Körner und Schüttungen gilt, dass sich Sättigung innerhalb des Messzeitraumes von einigen hundert Stunden nicht einstellt. Dies deutet daraufhin, dass nach der schnellen Befeuchtung der äußeren Poren (starker Anstieg am Anfang der Messung) Feuchtigkeit durch Diffusion bzw. Kapillartransportvorgänge ins Innere der Körner transportiert wird (langsamer Vorgang).

Dies konnte durch Aufbrechen der Körner nach Beendigung des Versuchs bestätigt werden, vgl. Bild 69.

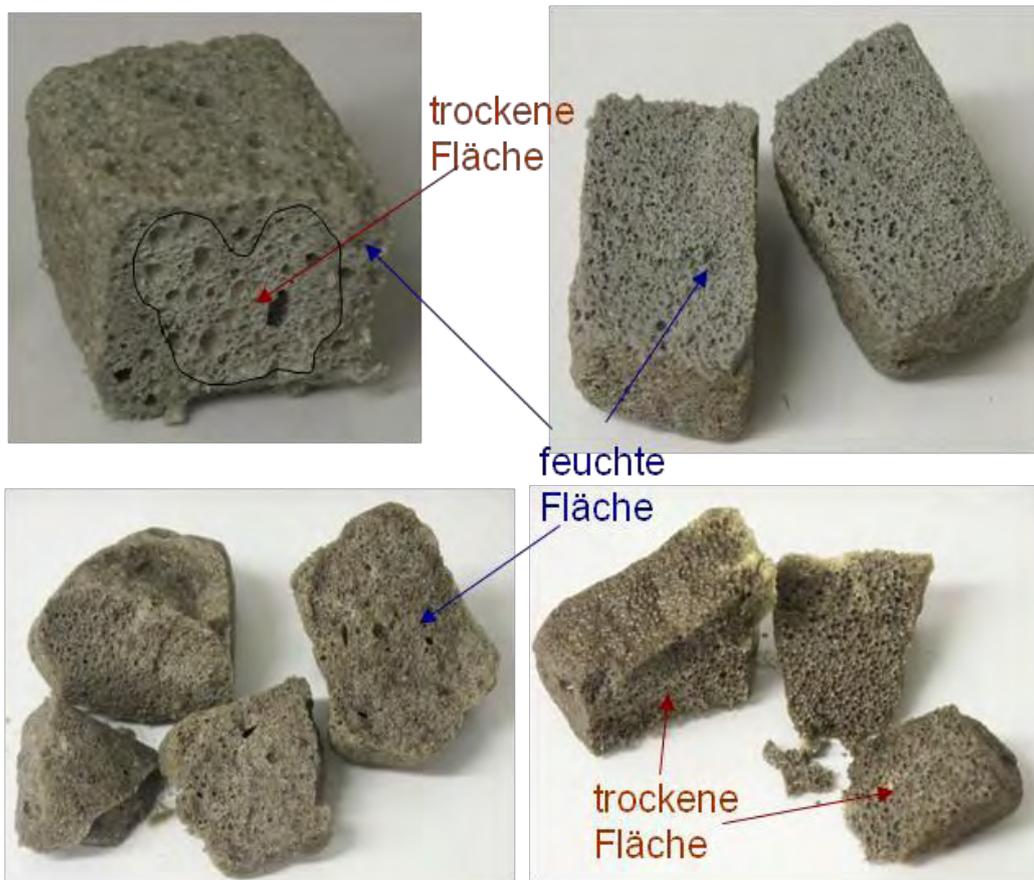


Bild 69: Feuchtigkeit dringt bei Unterwasserlagerung bis ins Innere der Körner

Es wurden sowohl unbehandelte Körner (wie geliefert) als auch behandelte Körner untersucht. Als behandelte Körner werden hier diejenigen Körner bezeichnet, welche durch Schleifen eine definierte Geometrie (Oberfläche und Volumen) erhalten haben.

Tabelle 33: Vergleich der Wasseraufnahme unbehauelter und behauelter*) Körner

	Behandelte Körner		Unbehauelte Körner	
	$\rho /$ [kg/m ³]	$u /$ [kg/m ³]	$\rho /$ [kg/m ³]	$u /$ [kg/m ³]
Probe 1	255	200	250	135
Probe 2	350	285	325	205
Probe 3	230	325	190	225
Probe 4	205	125	200	80

*) unter behandeln wird hier die Herstellung von Würfeln durch abschleifen verstanden

Trocknung und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Für die Berechnung der Wärme- und Feuchtetransportvorgänge ist die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von Bedeutung. Diese ist jedoch nur unter erheblichem Aufwand messbar. Jedoch kann die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl durch Auswertung von Trocknungskurven ermittelt werden.

Dafür wird mit dem Simulationsprogramm WUFI [182], [373] die Trocknungskurve nachgerechnet. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird solange variiert, bis Mess- und Modellwerte zufriedenstellend übereinstimmen. Ergebnisse sind in Bild 70 bzw. Bild 71 dargestellt. Wie erwartet, steigt die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl stark mit zunehmender Verdichtung.

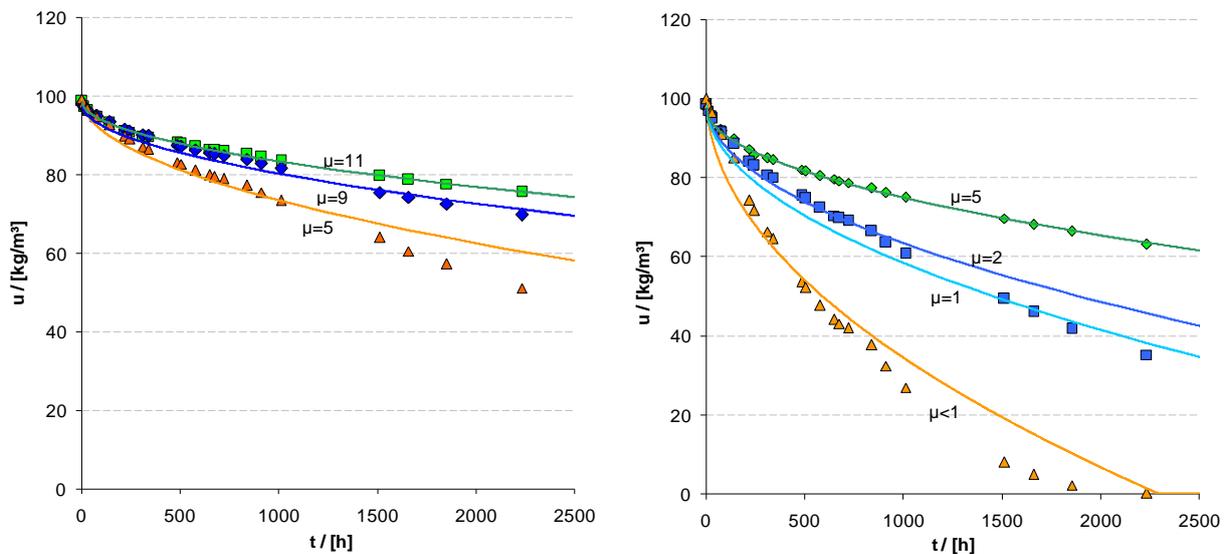


Bild 70: Mittels WUFI [182], [373] berechnete Trocknungskurven, Optimierungsproblem mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl als Parameter, links: TP 10/50 und rechts: MP 10/50

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist sehr stark von der Windgeschwindigkeit im Trocknungsraum abhängig. Bei Modellen zur Berechnung des Stofftransports werden konvektive Transportvorgänge i.d.R. nicht betrachtet. Die Trocknungsvorgänge werden rein diffusiv betrachtet, wodurch es zu Abweichungen zwischen Simulation und Messung kommen kann. Ein überlagerter Konvektionsstrom kann dazu führen,

dass gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung nur mit einer Diffusionswiderstandszahl kleiner eins ($\mu < 1$) erreicht werden kann.

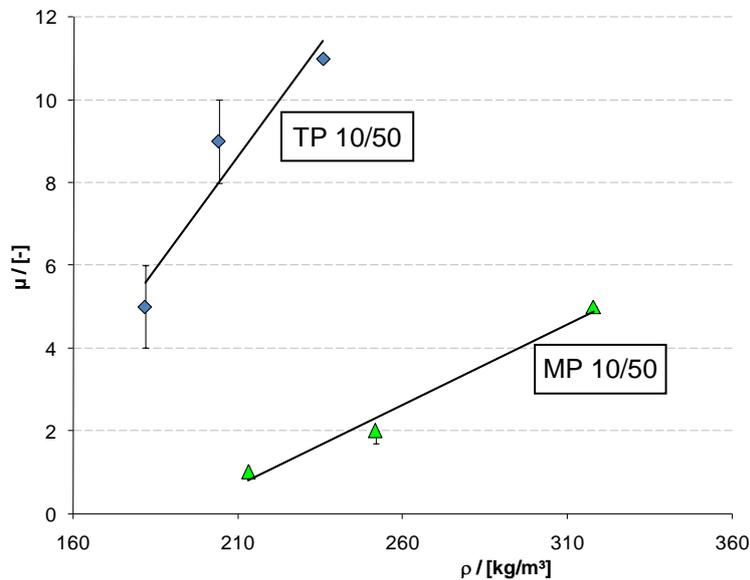


Bild 71: Mittels WUFI [182], [373] berechnete Wasserdampf-diffusionswiderstandszahlen als Funktion der Dichte

6.3.4.8 Sorptionsisotherme

Detaillierte Beschreibungen und Ergebnisse zu Wasseraufnahme von Dämmstoffschüttungen und deren Sorptionsisotherme können [225] entnommen werden.

Die Sorptionsisotherme gibt das Verhältnis zwischen dem Feuchtegehalt eines Stoffes und der relativen Feuchte der ihn umgebenden Luft an. Ein Beispiel einer solchen Sorptionsisotherme ist in Bild 73 mit den bestimmenden Bereichen der Feuchtaufnahme (Sorptionsfeuchtebereich und Kapillarwasserbereich) dargestellt. Im Bereich bis ca. 15 % r. F. ist dabei die Sorptionsisotherme durch die Feuchtaufnahme mittels monomolekularer Belegung der Feststoffoberfläche durch Diffusion bestimmt. Dieser geht über in einen linear ansteigenden Bereich multimolekularer Belegung, der bei ca. 50 % r. F. endet. Bei höheren Feuchten wird die Kapillarkondensation bestimmend, bis bei etwa 95 % r. F. der überhygroskopische Bereich beginnt. Typisch für die Sorptionsisotherme ist ihr s-förmiger Verlauf.

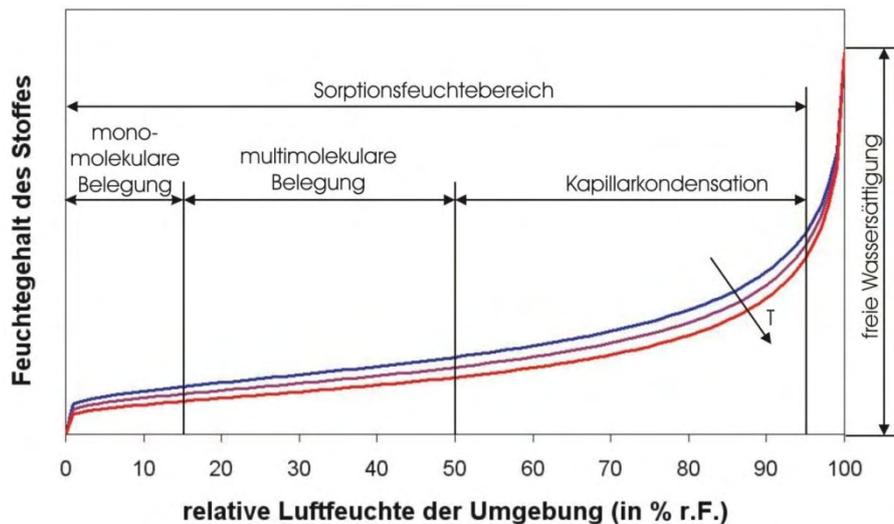


Bild 72: Sorptionsisotherme mit den bestimmenden Speichervorgängen

Die Temperaturabhängigkeit der Sorptionsisotherme ist ebenfalls im oberen Bild dargestellt. Bei höheren Temperaturen und gleich bleibender relativer Feuchte der Umgebungsluft sinkt dabei der Feuchtegehalt des Stoffes. Dies ist hauptsächlich auf die größere kinetische Energie der Wassermoleküle bei höheren Temperaturen zurückzuführen, so dass diese sich nicht mehr so einfach binden. Jedoch kann bei den meisten Stoffen der Temperatureinfluss vernachlässigt werden.

Daher gibt es im Normalfall nicht für jede Temperatur eine eigene Sorptionsisotherme, sondern das Sorptionsverhalten eines Stoffes wird im Normalfall durch eine Sorptionsisotherme, die für alle Temperaturen gilt beschrieben. Um diese Temperaturunabhängigkeit zu verdeutlichen wird die Sorptionsisotherme auch teilweise Feuchtespeicherfunktion genannt. Ebenso gibt es für die Ad- und Desorption von Wasser unterschiedliche Sorptionsisothermen. Jedoch ist diese Hysterese bei den meisten Stoffen so gering, dass auch hier eine Sorptionsisotherme zur Beschreibung ausreicht.

Wie in [225] beschrieben gibt es mehrere Ansätze die Sorptionsisotherme zu beschreiben. Der hier verwendete Ansatz ist eine zweiparametrische Funktion.

$$u(p_c, T) = \frac{u_f}{1 + \left(\frac{p_c(T)}{k_1} \right)^{k_2}} \quad (37)$$

In Bild 74 sind die gemessenen Wassergehalte zweier Blähglasgranulate und Schaumglasschotter bei 11%, 80%, 95% und 100% sowie die nach Gl. (37) berechnete Modellkurve dargestellt.

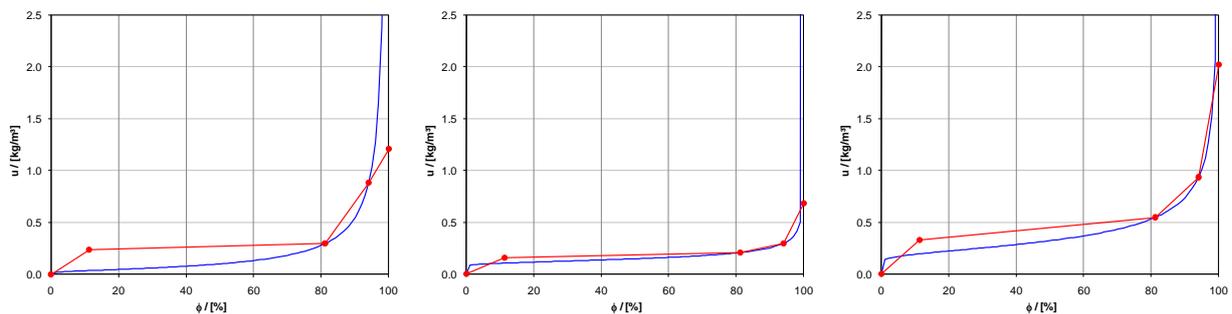


Bild 73: Sorptionsisotherme zweier Blähglasgranulate (links und mitte) und Schaumglasschotter (rechts)

Die Wasseraufnahme wird nicht nur durch die Porosität eines Stoffes, sondern auch durch die Anteile an verschiedenen Porenarten beeinflussen. Dadurch können verschiedene Stoffe mit ähnlicher Porosität sehr unterschiedliche hygroskopische Eigenschaften aufweisen.

Tabelle 34: Hygrische Eigenschaften von Beton, Blähglasgranulat und Mineralwolle, freie Sättigung (u_{fs}), maximale Sättigung (u_{max}) und Sättigung bei 80 % r.F. (u_{80})

	u_{fs}	u_{max}	u_{80}
	[kg/m ³]		
Beton (B45)	180	180	50
Blähglasgranulat	500	950	0.25
Mineralwolle	297	950	4.5

Aufgrund der großen Differenz zwischen Wassergehalt bei Sättigung und bei 80 % relative Luftfeuchte ergibt sich eine sehr starke Steigung der Sorptionsisotherme zwischen 95 % und 100 % Luftfeuchte. Dies ist im zum Einen für die Bestimmung der

Stofffeuchte von Bedeutung und zum Anderen für die numerische Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports (vgl. Kapitel 6.6). Durch die große Steigung bei hohen Luftfeuchten kommt es zu numerischen Fehlern bzw. Konvergenzproblemen.

Die ermittelten Sorptionsisothermen der drei untersuchten schüttfähigen Dämmstoffe sind sich in ihrem Verlauf sehr ähnlich und weisen einen sehr flachen Anstieg bis zu Luftfeuchten um ca. 95 % r. F. auf. Bei höheren Luftfeuchten beginnt ein sehr steiler Anstieg.

Für die Anwendung in Erdbecken-Wärmespeichern ist dies von Vorteil, da die Dämmstoffe trotz hoher Luftfeuchten der Umgebung nur sehr wenig Wasser aufnehmen. Jedoch ist durch dieses Verhalten der Stoffe eine Messung der Materialfeuchte über die Luftfeuchte nur bei sehr geringen Feuchten möglich, was für die hier vorgestellte Anwendung ungenügend ist.

Durch die Form der Sorptionsisotherme ist es kaum möglich von der Luftfeuchte auf die Stofffeuchte zu schließen. Das Taupunktspiegel-Messverfahren, welches das genaueste Luftfeuchtemessverfahren ist, erreicht Messgenauigkeiten von ca. 1 % r. F.. Für die Messung der Materialfeuchte über die Luftfeuchte bedeutet dies, dass z. B. bei Blähglasgranulat bei einer angezeigten Luftfeuchte von 99 % r. F. der Materialfeuchtegehalt zwischen rund 2 kg/m^3 und 500 kg/m^3 liegen könnte. Daher lässt sich die Materialfeuchte durch Luftfeuchtemessverfahren nur bei sehr geringen Materialfeuchten mit ausreichender Genauigkeit bestimmen.

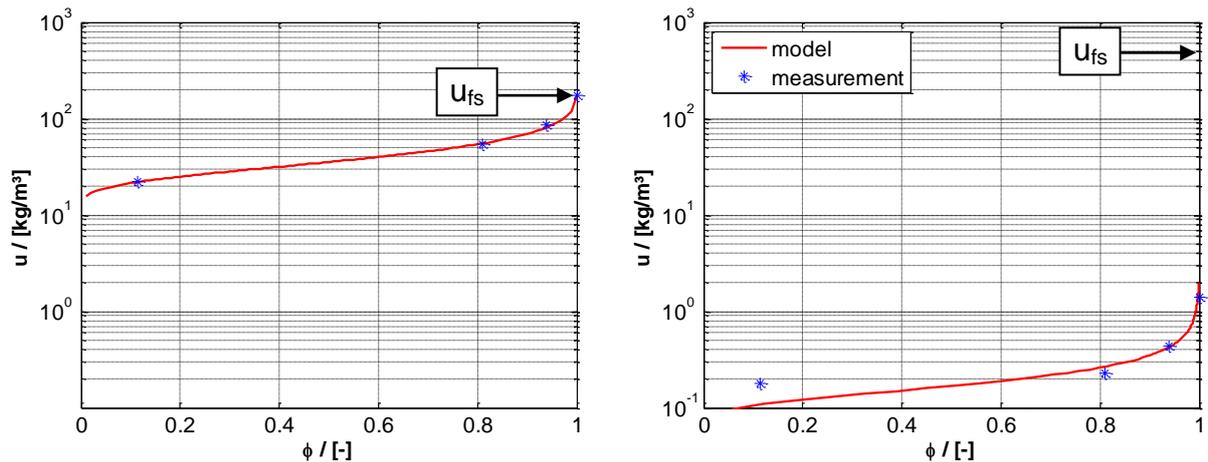


Bild 74: Sorptionsisotherme von Beton und Blähglasgranulat im Vergleich

Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab, dass alle gebräuchlichen Feuchtemessverfahren auf die in erdvergrabenenen Wärmespeichern unzugänglichen, porösen Schüttungen nicht anwendbar sind. Hierbei wurden über 25 Messverfahren betrachtet.

6.3.4.9 Schlussfolgerungen zur Verdichtung von Dämmstoffschüttungen

Es konnte nur ein geringer Einfluss der Verdichtung auf die effektive Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand festgestellt werden. Zudem waren keine eindeutigen Tendenzen des Einflusses der Verdichtung auf die effektive Wärmeleitfähigkeit zu erkennen.

Wichtig ist die Berücksichtigung der, durch die Verdichtung resultierenden Dämmschichtdicke, bei der Berechnung der Wärmeverluste.

Es gibt einen deutlichen Einfluss von Feuchtigkeit auf die effektive Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen. Durch die Verdichtung der Wärmedämmung wird dieser reduziert. Da jedoch Feuchtigkeit in der Wärmedämmung bei Wärmespeichern auf jeden Fall vermieden werden muss, ist dies kein entscheidender Vorteil. Feuchtigkeit wird aus verdichteter Schaumglasschüttung langsamer entweichen als aus unverdichteter.

Verdichtung wird entsprechend nur dann empfohlen, wenn dies aus statischen Gesichtspunkten unvermeidlich ist.

Detaillierte bzw. weiterführende Ergebnisse zum Einfluss der Verdichtung auf die hygroskopischen Eigenschaften und die effektive Wärmeleitfähigkeit können [224] entnommen werden.

6.3.4.10 Schlussfolgerungen zur von Dämmstoffschüttungen

Es sind mehrere schüttfähige Dämmstoffe am Markt erhältlich. Aufgrund der Anforderungen bezüglich Temperatur- und Druckbeständigkeit sind nur Blähglasgranulat und Schaumglasschotter zu empfehlen. Blähton kann auch in Erwägung gezogen werden, weist aber höhere Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit (allerdings bei geringeren Kosten) auf. In Tabelle 35 sind Vor- und Nachteile von Blähglasgranulat und Schaumglasschotter gegenübergestellt.

Tabelle 35: Vor- und Nachteile von Blähglasgranulat (BGG) und Schaumglasschotter (SGS) als Wärmedämmung für Langzeit-Wärmespeicher

SGS	BGG
<ul style="list-style-type: none"> + Druckbeständigkeit + Verarbeitung (Modulierbarkeit) + Begehbarkeit + Schüttwinkel + Kosten + Feuchteunempfindlich 	<ul style="list-style-type: none"> + effektive Wärmeleitfähigkeit 0.06 - 0.07 W/(m K) + geringe/keine Lieferfeuchte + Lieferung/Förderbarkeit (Einblasen, Schütten) + Feuchteunempfindlich
<ul style="list-style-type: none"> - Effektive Wärmeleitfähigkeit (WLF) 0.08 – 0.09 W/(m K) - Feuchteeinfluss auf WLF 	<ul style="list-style-type: none"> - Schüttwinkel - Begehbarkeit (Einsinken) - Feuchteeinfluss auf WLF - Staubentwicklung

6.4 Reibungswinkel von schüttfähiger Dämmung

Der Reibungswinkel verschiedener Blähglasgranulate wurde am IGS, Uni Stuttgart, mittels dreiaxialen Scherversuchen bestimmt.

6.4.1 Reibung bei körnigem Material

Ein körniges, rolliges Material wie zum Beispiel Sand, hat einen inneren Reibungswinkel, der unter anderem von der Rauigkeit der Körner abhängt. Wird das Material aufgeschüttet, so entsteht ein Schüttkegel, welcher genau den Winkel der inneren Reibung hat. Der Reibungswinkel ist abhängig von folgenden Eigenschaften: Rauigkeit (je rauer, desto größer ist der Winkel), unterschiedliche Körnung (um so mehr verschiedene Korngrößen vorhanden sind, um so größer ist der Winkel), Verdichtung (je mehr die Schüttung verdichtet wird, desto größer ist der Winkel), Feuchtigkeitsgehalt (Kohäsion bei Erdreich oder Sand). Typische Reibungswinkel sind in Tabelle 36 aufgelistet:

Tabelle 36: Typische Reibungswinkel β

Material	β
rundkörniger Sand mit einheitlicher Korngröße	27.5°
eckiger, scharfkantiger Sand	33°
sandiger Kies	35°
scharfkantiges Geröll	45°
feuchter Sand	90°

6.4.2 Schergerade

Die Kohäsion eines Bodens kann im Labor im Scherversuch mit Versuchsgeräten festgestellt werden. Die Bodenprobe wird im Triaxialgerät vertikal und horizontal bis zum Bruch belastet. Dabei ermittelt man mit Hilfe der Mohr'schen Spannungskreise die Parameter der Schergeraden des zweidimensionalen Spannungszustandes. Im Spannungsdiagramm wird die Vertikalspannung auf der horizontalen x-Achse und die Schubspannung auf der vertikalen y-Achse aufgetragen. Die Schergerade ist gekennzeichnet durch ihre Steigung (das ist der Reibungswinkel) und durch den Abstand, in dem sie die vertikale Achse schneidet. Dieser Abstand ist die Kohäsion.

Die Ergebnisse der Versuche für vier verschiedene Blähglasgranulate sind in Tabelle 37 zusammengefasst.

Tabelle 37: Mittelwert der gemessenen Reibungswinkel β der Blähglasgranulate in $^{\circ}$

BGG 2-4 Typ I	BGG 2-4 Typ II	BGG 4-8 Typ II	BGG 8-16 Typ II
45.2	39.7	44.3	40.7

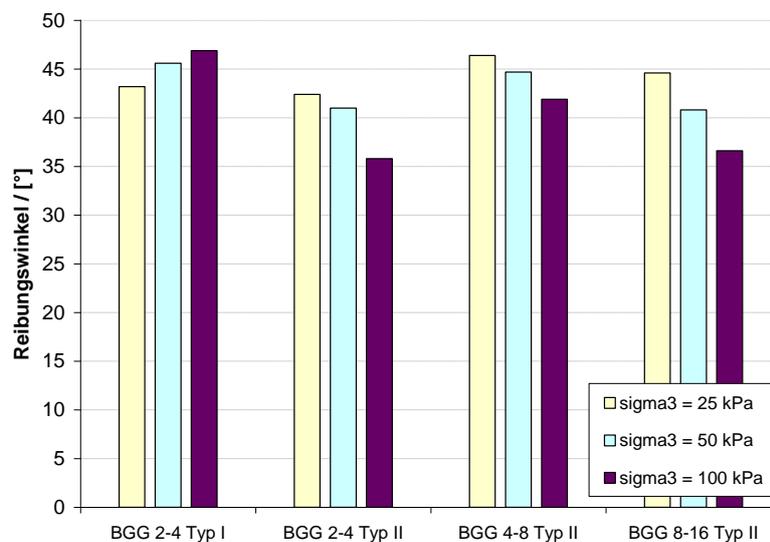


Bild 75: Reibungswinkel als Funktion der Auflastspannung (σ_3)

Die Werte liegen alle im Bereich zwischen 35 und 45°. Es fällt auf, dass nur bei Blähglasgranulat 2-4 mm Typ I der Reibungswinkel mit zunehmender Spannung zunimmt. Für die Auslegung von Schalungen zum Dämmstoffeinbau kann mit einem Mittelwert von 40° gerechnet werden.

Die Ergebnisse für die verschiedenen Blähglasgranulate sind im Detail in [227] zu finden.

6.5 Wärmespeichermaterialien

In Zusammenarbeit mit dem ISWA der Universität Stuttgart wurde untersucht, inwieweit sich Erdreich als Wärmespeichermaterial eignet. Vor allem hinsichtlich des Kalk-Kohlensäuregleichgewichts im Temperaturbereich bis 90 °C wurden Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse, die in [228] zusammengefasst sind, deuten darauf hin, dass je nach Bodentyp Erdreich-Wasser-Wärmespeicher bis zu 90 °C betrieben werden können. Weitere Untersuchungen sind notwendig.

6.6 Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports

6.6.1 Stand der Technik

Die Wissenschaft beschäftigt sich schon lange und gründlich mit dem Thema Wärme- und Feuchtetransport. Eine Auswahl an Autoren und Arbeiten zu Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports ist in Tabelle 38 und eine Auswahl von Arbeiten zu Berechnungs- und Messverfahren in Tabelle 39 gegeben.

Die von Glaser [DIN 4108] entwickelte Methode gilt immer noch als Standard, um das hygrothermische Verhalten von Bauteilen zu berechnen, obwohl ab etwa 1980 bereits computerbasierte Methoden entwickelt wurden und seit einiger Zeit kommerziell erhältliche Programme auf dem Markt sind. Erst kürzlich wurden Arbeiten zur Standardisierung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports für den Baubereich begonnen.

Tabelle 38: Grundlagen zum Wärme- und Feuchtetransport

Autor	Quelle	Jahr	Bemerkung
Fourier	-	1822	Fourier-Gleichung (diffusiver Wärmetransport)
Fick	-	1855	Fick'sches Gesetz (diffusiver Stofftransport)
Darcy	-	1856	Darcy's Gesetz
Stefan	[234]	1893	Einseitige Diffusion
Schirmer	[177]	1938	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
Glaser	[235],[236],[237]	1958	Wasserdampfdiffusion/Glaserverfahren
Krischer	[174]	1964	Trocknungstechnik, Wärmeleitfähigkeitsmodell
Luikov	[238]	1966	Kapillarer Wärme- und Feuchtetransport
Philip, de Vries	[239]	1975	Wärmetransport in Böden, Saugspannung
Gertis	[240], [241]	1976	Wasserdampfdiffusion, Bauphysik
Achtziger	[242]	1976	Modelle für effektive Wärmeleitfähigkeit
Zehendner	[215]	1979	Feuchteabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit
van Genuchten	[243], [244]	1980	hydraulische Leitfähigkeit, Matrixpotential
Kießl	[245],[246],[247], [248]	1983	Feuchtetransport, Feuchtepotential
Tsotsas	[250], [251]	1985	Trocknungstechnik, Wärmeleitfähigkeitsmodelle
Cammerer	[216]	1985	Kapillartransport
Häupl	[251], [252]	1987	Feuchtetransport
Zeitler	[218]	2000	Wärmeleitfähigkeitsmodell

Tabelle 39: Stand der Technik von Simulationsprogrammen und Messverfahren zum gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport

Autor	Quelle	Jahr	Bemerkung
Cary/Taylor	[253], [254]	1962	Wärme- und Feuchtetransport in Böden
Jury	[255]	1973	Wärme- und Feuchtetransport in Böden
Milly	[256], [257]	1980	Dissertation, Gebäude-Boden-Interaktion
Huesseini	[258]	1982	Dissertation, Berechnung Wärme- und Feuchtetransp.
Rode	Match, [259]	1990	Dissertation, Berechnung Wärme- und Feuchtetransp.
Garecht	[260]	1992	Dissertation, Messverfahren
Seerig	[261]	1992	Dissertation, Berechnung Wärme- und Feuchtetransp.
Krarti	[262]	1994	numerisch/analytisch, Gebäude-Boden-Interaktion
Künzel	WUFI, [182], [373]	1994	Dissertation, Berechnung Wärme- und Feuchtetransp.
Krus	[263]	1995	Dissertation, Messverfahren f. Transportkoeffizienten
Pel	[264]	1995	Dissertation, Messverfahren f. Transportkoeffizienten
Lee	[265]	1996	Dissertation, Feuchtespeicherung
Grunewald	DIM/Delphin, [266], [374]	1997	Dissertation, irreversible Thermodynamik
Descamps	[267]	1997	Dissertation, Messverfahren
Burch	MOIST, [268], [375]	1997	Weiterentwicklung der Arbeit von Rode
Xu	[269]	1998	Dissertation, Eisbildung
Brocken	[270]	1998	Dissertation, Messverfahren
Bednar	[271], [272]	2000	Dissertation, Gebäude-Boden-Modell
Roels	[273], [274], [275]	2000	Dissertation, ungesättigter Dampftransport
Deru	GHAMT, [276], [277]	2000	Dissertation, Gebäude-Boden-Interaktion
Ozaki	[278], [279]	2002	Wasser Potential basierend auf Thermodynamik
Mendes	[280],[281],[282]	2002	Mathematisches Modell, Wärme- und Feuchtetransp.
Janssen	[283]	2002	Dissertation, Gebäude-Boden-Modell

Normungsarbeit für den Einsatz von Simulationssoftware zur Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen ist für den Baubereich in der Durchführung [330], um das seit langem als Standard bekannte Glaserverfahren [329] abzulösen. Vergleiche dazu auch [229] bis [233] und [329] bis [331].

Die in Tabelle 39 aufgelisteten Arbeiten stammen mehrheitlich aus dem Bereich der Bauphysik (z.B. Rode, Grunewald, Künzel oder Janssen). Einige Arbeiten sind in der Bodenphysik (Simulation der Gebäude-Boden-Interaktion wie Krarti oder Deru) oder der Verfahrenstechnik/Trocknungstechnik (z.B. Seerig) angesiedelt.

In den Arbeiten von Bednar [271], [272] bzw. von Grunewald [266] ist der Stand der Technik der Arbeiten, die aus dem Bereich der Bauphysik stammen, detailliert beschreiben. Zu Arbeiten, die sich mit dem gekoppelten Wärme- und Feuchttransport

in Böden beschäftigt, hat Deru [277], [276] den Stand der Technik zusammengefasst. Weitere wichtige Arbeiten sind u.a.: [286] bis [295].

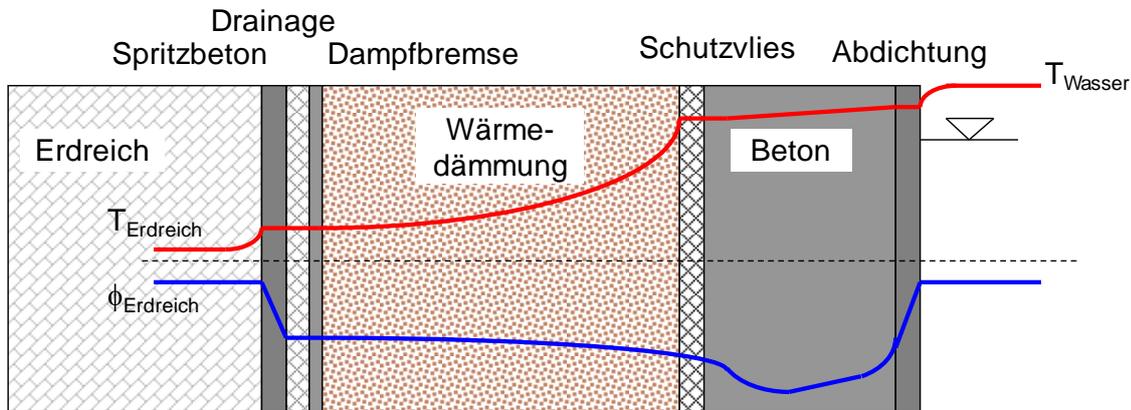


Bild 76: Typischer Wandaufbau eines erdvergrabenen Wärmespeichers, Profil von Temperatur und relativer Feuchte

Die numerischen Lösungsverfahren basieren aufgrund von Konvergenzproblematiken meist auf einem impliziten Verfahren. Folgende in Tabelle zusammengefasste Ansätze werden dabei verfolgt:

Tabelle 40: Unabhängige Variablen der vier verschiedenen Ansätze zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports

T, ϕ	Temperatur und relative Feuchte	Bauphysik	Künzel [182]
T, p_{suc}	Temperatur und Saugspannung	Bauphysik	Bednar [271], Janssen [283]
T, μ_α	Temperatur und chemisches Potential	Bauphysik	Grunewald [266]
T, Φ	Temperatur und Matrixpotential	Bodenphysik	van Genuchten [243], Deru [277]

Das Modell von Künzel [182] ist in der kommerziell erhältlichen Software WUFI implementiert. Folgende gekoppelten Differentialgleichungen müssen unter Beachtung der Randbedingungen (Feuchte, Temperatur) gelöst werden.

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) \quad (38)$$

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) \quad (39)$$

WUFI muss eher als ingenieurmäßiges Berechnungstool, denn als wissenschaftliches Simulationsmodell eingestuft werden. Als großer Vorteil erweist sich die umfangreiche Datenbank, in der sich alle notwendigen Stoffdaten und Transportkoeffizienten befinden, allerdings für Materialien, welche für den normalen Baubereich üblich sind. Wärmedämmstoffe, wie Blähglasgranulat und Schaumglasschotter sind nicht vertreten.

Das Modell von Grunewald [266] ist kommerziell unter dem Namen Delphin erhältlich. Die Bedienung ist wesentlich komplexer, als die von WUFI. Zudem ist die Bestimmung der notwendigen Stoffdaten und Transportkoeffizienten komplexer.

Berechnungen zur gekoppelten Wärme- und Stofftransport am Beispiel der Hochleistungsbetonwand des Wärmespeichers in Hannover wurden von [41] mit WUFI durchgeführt. Messwerte eigener Messungen des Wasserdampf-diffusionswiderstandes und der kapillaren Transporteigenschaften wurden zur Validierungen herangezogen. In [41] wurde die Schlussfolgerung aufgestellt, dass sich vorhandene Tolls nur mit Einschränkungen eignen. Konstante Kenngrößen wie z. B. der Diffusionskoeffizient können zu Fehlern führen. Die geringe Größe der Kennwerte kann zu Schwierigkeiten zu unrealistischen Ergebnissen oder zum Abbruch der Berechnung führen.

6.6.2 Eigene Arbeiten

Im Rahmen einer Diplomarbeit [296] wurde die Thematik tiefer untersucht. Aufbauend auf den Arbeiten von Bednar [271] wurde ein 1d Modell in Matlab® implementiert. Im Rahmen des Projekts konnte jedoch kein funktionsfähiges Programm fertiggestellt werden. Weiterführende Arbeiten sind notwendig.

6.6.3 Grenzen

Alle Ansätze aus dem Bau- oder Bodenkundebereich sind auf den „normalen“ Temperaturbereich limitiert. Für höhere Temperaturen (60 °C bis 95 °C) sollten sowohl die Transportgleichungen bzw. Transportkoeffizienten angepasst, als auch die Stoffwerte feuchte- und temperaturabhängig modelliert werden. Keines der

erhältlichen Programme ist geeignet die Wärme- und Feuchtetransportvorgänge im Wandaufbau von erdvergrabenen Wärmespeichern zu berechnen.

Aufgrund der sehr großen Gradienten ($du/d\Phi$), vgl. Sorptionsisotherme der Dämmstoffe, Kapitel 6.3.4.7, treten häufig Konvergenzprobleme auf.

Zukünftige Arbeiten sollten sich auf die Erarbeitung eines anwenderfreundlichen Programms (evtl. in Anlehnung an WUFI, [373]) fokussieren. Die Implementierung in Wärmespeicher-Modelle (SBM, DST, XST, ICEPIT) in TRNSYS [366] ist langfristig anzustreben.

7 Konzepte + Außenlaborversuche

Durch die im Innenlabor gewonnenen Ergebnisse konnten Konzepte für Erdbecken-Wärmespeicher (Kies-Wasser-, Erdreich-Wasser- und Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher) erarbeitet sowie geeignete Wand- und Abdeckungsaufbauten entwickelt werden. Die Projektphasen 2 (Konzeptentwicklung) und 3 (Außenlaborversuche) wurden parallel bearbeitet (Beginn Anfang 2004, Baubeginn Juli 2004), um die Erkenntnisse der Versuchsdurchführung in die Entwicklung der neuen Konzepte einfließen lassen zu können. Im Laufe des Projekts wurde der Fokus auf die Entwicklung von Konzepten für Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher gelegt. Die Konzepte und die Außenlaborversuche für Kies-Wasser bzw. Erdreich-Wasser- Erdbecken-Wärmespeicher, „Integrierter Pufferspeicher“ und „Direktes Be- und Entladesystem“ wurden verworfen⁷. Anstelle dieser Konzepte wurden Konzepte für eine schwimmende Abdeckung entwickelt.

Über die Phase der Außenlaborversuche von ca. 3 Jahren änderte sich das Erscheinungsbild immer wieder.

⁷ Die Konzepte wurden in Absprache mit den Projektbeteiligten und dem Arbeitskreis Langzeit-Wärmespeicher verworfen bzw. modifiziert, siehe Aufstockungsanträge 1 + 2.



Bild 77: Momentanaufnahmen der Baustelle Außenlaborversuche während der Projektlaufzeit

Tabelle 41: Zusammenfassung der beantragten und durchgeführten Arbeitspunkte

Bezeichnung/Beschreibung		Bearbeitet	Wertung	Kapitel
1	Material- und Verfahrensuntersuchungen im Innenlabor			
	1.1. Abdichtungen/Dampfsperren/Geokunststoffe	ja	Erfolgreich	5.2, 6.1
	1.2. Wärmespeichermaterialien	ja	Erfolgreich	6.5
	1.3. Wärmedämmung	ja	Erfolgreich	5.1, 6.3
2	Technische Konzeptentwicklung			
	2.1. Wandsysteme	ja	Erfolgreich ⁰⁾	4.3, 7.3
	2.2. Speicherabdichtung mit kontrollierter Wasserdurchlässigkeit	ja	Erfolgreich ¹⁾	7.8
	2.3. Integrierter Pufferspeicher	nein	Verworfen ²⁾	7.5
	2.4. Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe	ja	Erfolgreich	7.9
	2.5. Direktes Be- und Entladesystem	nein	Verworfen ²⁾	7.6
	2.6. Speicherabdeckung für Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher	ja	Erfolgreich	7.10
3	Untersuchungen im Außenlabor			
	3.1. Planung und Bau des Außenlabors	ja	Erfolgreich	7.1, 7.2
	3.2. Erweiterbarer Speicher	ja	Erfolgreich ³⁾	7.1
	3.3. Einbau neuer Wandsysteme	ja	Erfolgreich ⁰⁾	7.3
	3.4. Test des Wandsystems mit kontrollierter Wasserdurchlässigkeit	ja	gescheitert	7.8
	3.5. Test der Wasserwegsamkeit	ja	Erfolgreich ⁵⁾	7.9
	3.6. Test des direkten Be- und Entladesystems	nein	Verworfen ²⁾	-
4	Bau und Betrieb des Forschungsspeichers		Weiterführung der Versuche	

0) 3 Aufbauten wurden beantragt, es wurden 2 komplette Wandaufbauten sowie mehrere Teilkonzepte entwickelt und getestet.

1) Ursprüngliche Idee der doppelten Bentonitabdichtung musste modifiziert werden: ein Konzept mit Bentonit und Dampfsperre wurde entwickelt.

2) Konzepte für Kies-Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher wurden durch Konzepte für Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher ersetzt (schwimmende Abdeckung).

3) Trennwand wurde verworfen, Konzept mit vernageltem Damm wurde entwickelt und ausgeführt.

4) Versuch ist durch Fehler bei der Ausführung gescheitert.

5) Das Konzept Erdreich-Wärmespeicher mit direktem Beladesystem (Wasserwegsamkeit) wurde mit durch Vliese abgetrennte Kiesschichten entwickelt und realisiert. Vergleich der Messung mit CFD-Simulationen.

Anstelle des Baus des Forschungsspeichers wurden in Absprache mit dem Fördermittelgeber weitere Konzepte entwickelt und Außenlaborversuche durchgeführt.

Durch zwei Aufstockungen (Verlängerung bis 2006 bzw. 2007) wurden die Arbeitspunkte um die nachfolgend genannten erweitert:

1. Membranschalung für schüttfähige Wärmedämmung
 - a. überhängend für außen liegende Wärmedämmung (Behälter)
 - b. für innen liegende Wärmedämmung (Erdbecken)
2. Abdichtung mit Verbundfolie
3. Abdeckung für Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher
 - a. Seilnetzkonstruktion
 - b. freitragende Abdeckung
 - c. begehbare schwimmende Abdeckung
4. Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit Schichtbeladesystem
5. Innen liegender Membranausdehnungsbehälter

Sowohl das Konzept einer Seilnetzkonstruktion als auch das Konzept einer schwimmenden Abdeckung, die begebar ist, mussten nach detaillierter Entwicklung verworfen werden. Die Seilnetzkonstruktion (vgl. Bild 78) stellte sich für diese Situation als unwirtschaftlich heraus. Für die begehbare schwimmende Abdeckung konnte ein Konzept entwickelt werden, die Ausführung war aufgrund von Problemen mit einer Böschung in Labor 2 nicht mehr möglich. Die Standfestigkeit der natürlichen Nordböschung war nicht mehr gegeben. Durch Setzungen im Randbereich der Böschung war die Sicherheit in der Baugrube nicht mehr gewährleistet. Eine Sanierung der Böschung war im Rahmen des verfügbaren Budgets nicht zu gewährleisten.

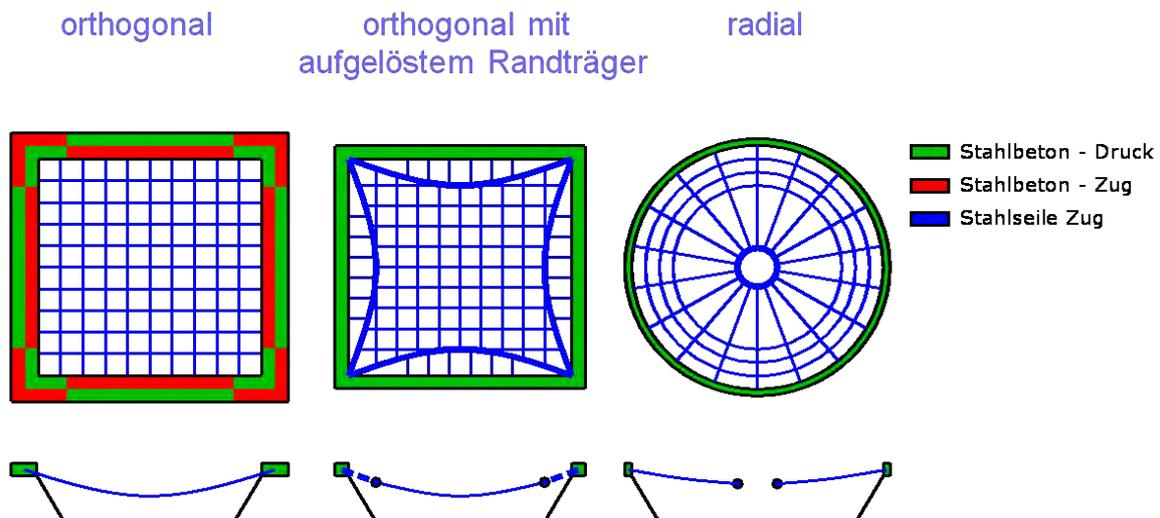


Bild 78: Schematische Darstellung von Seilnetzkonstruktionen

Sowohl für das Konzept der begehbaren schwimmenden Abdeckung als auch für den innen liegenden Membranausdehnungsbehälter muss die Reißfestigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen und Schweißnähten von Kunststoffdichtungsbahnen gewährleistet sein. Dafür wurden in Zusammenarbeit mit dem IKT, Uni Stuttgart, die Reißdehnung und die Reißfestigkeit von HDPE-Kunststoffdichtungsbahnen und HDPE-Sperrschichtbahnen gemessen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.2 beschrieben.

Für die schwimmende Abdeckung konnte kein Konzept entwickelt werden, welches uneingeschränkte Begehrbarkeit bei akzeptablen Kosten zulässt. Somit ist der Einsatz von schwimmenden Abdeckungen begrenzt auf Standorte bei denen die Speicher Oberfläche abgesperrt werden kann.

Die Außenlaborversuche Membranschalung und freitragende Abdeckung werden mit den anderen Außenlaborversuchen im Rahmen des Kapitels 7 beschrieben.

Die Herstellung der Gruben in Form von umgekehrten Pyramidenstümpfen mit einem Volumen von je 200 m³ wurde von der Firma Julius Bach ausgeführt. Beide Gruben wurden mit Böschungswinkeln von je einmal 60° und dreimal 80° hergestellt. Bis auf die natürlich geböschten Nordwände (60 °) wurden die Böschungen vernagelt und mit Spritzbeton versehen.

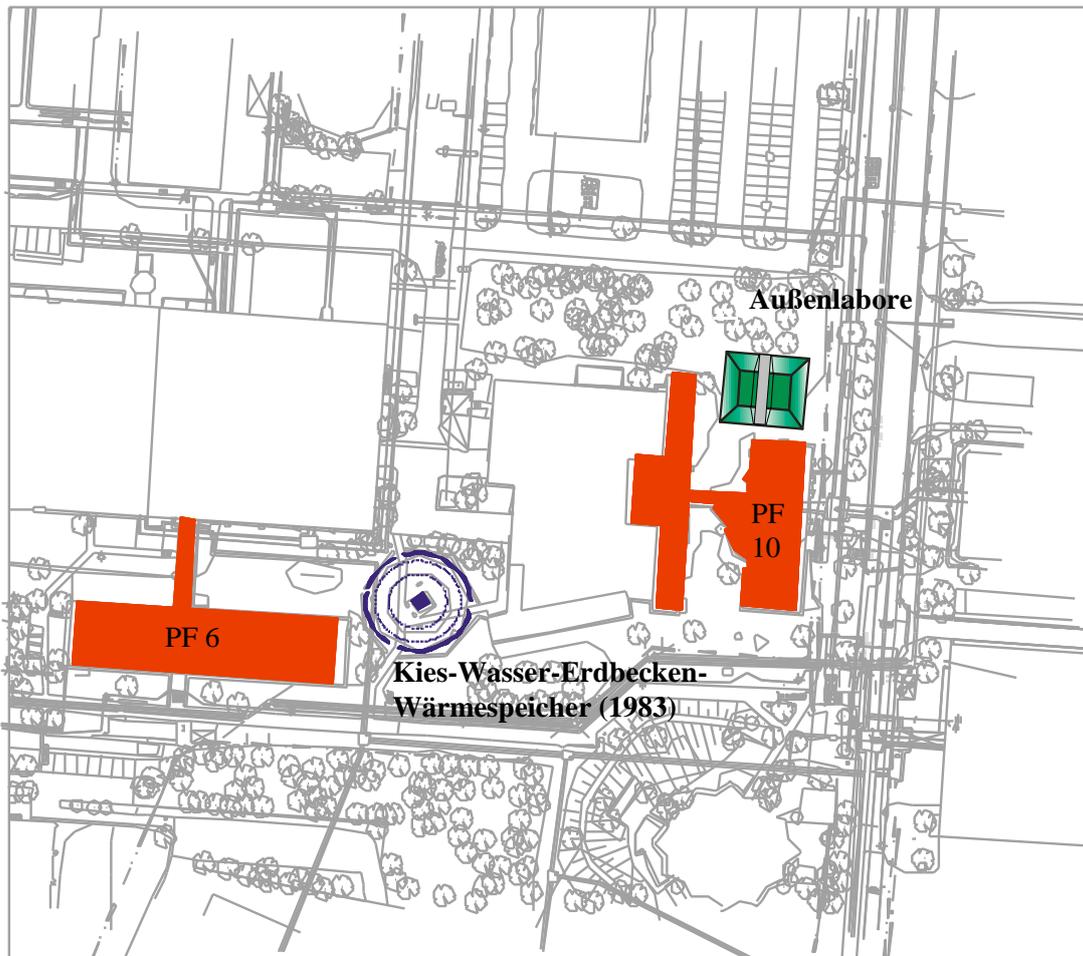


Bild 80: Lageplan, ITW Gebäude Pfaffenwaldring 6 und 10, Außenlabore sowie Kies-Wasser-Wärmespeicher von 1983

Den Aufbau des Versuchsgeländes mit den zwei Außenlaboren, der Baustellenzufahrt sowie der Arbeitsfläche zeigen Bild 80 und Bild 81.

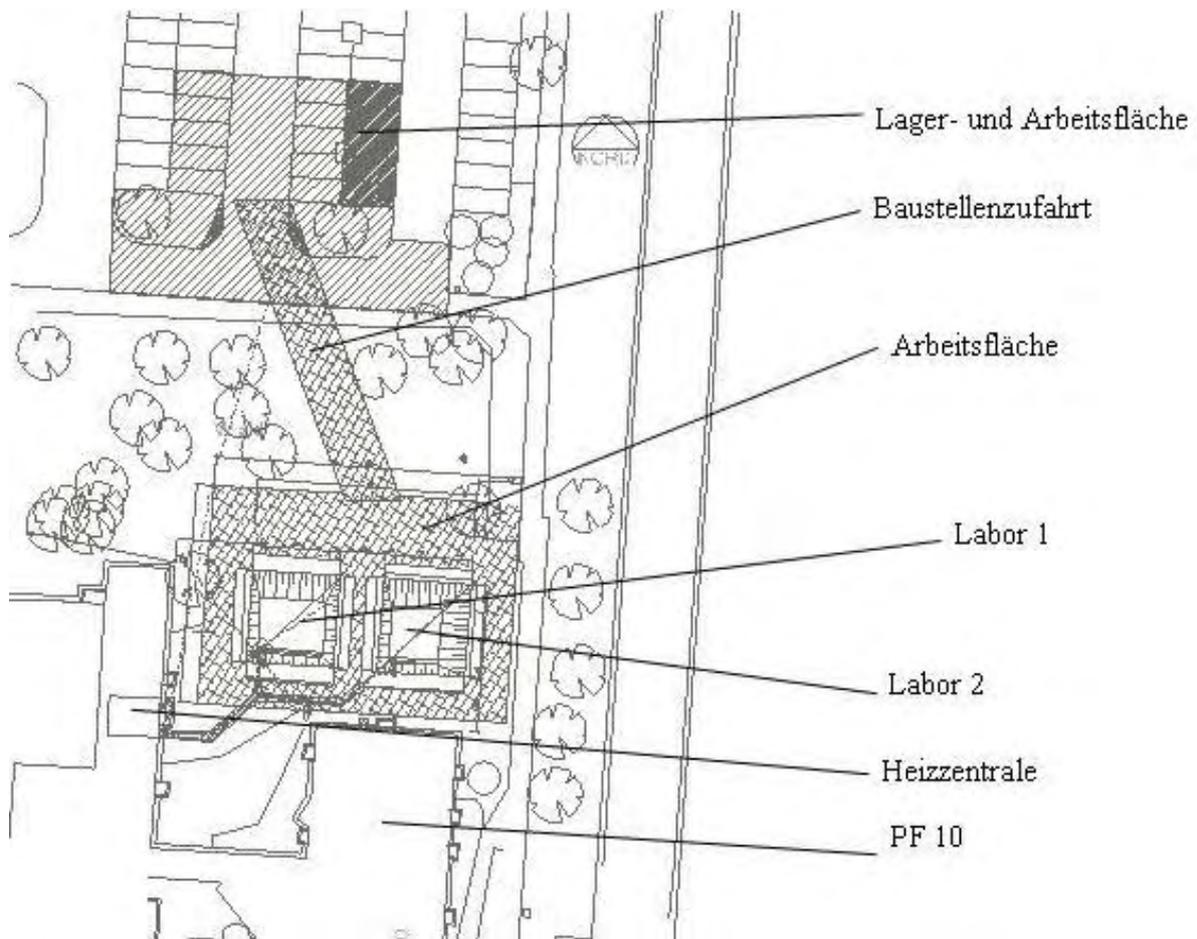


Bild 81: Lage der Außenlabore, sowie Arbeits- und Lagerfläche und Lage der Heizzentrale

Der Aushub erfolgte über drei Phasen.

Die Trennung der beiden Außenlaborbasisbecken erfolgte durch einen Damm, der durch eine Vernagelung gesichert wird (siehe Bild 82). Durch die Vernagelung konnte gezeigt werden, dass Erdbecken-Wärmespeicher mit günstigem A/V-Verhältnis und somit geringeren spezifischen Wärmeverlusten ausgeführt werden können. Zudem kann, durch die Möglichkeit in Gegenden mit hohem Grundwasserstand zu bauen, die Auswahl möglicher Standorte für Erdbecken-Wärmespeicher erweitert werden.



Bild 82: Herstellung der Gruben als Basis für die Außenlaborversuche, oben:(kleines) Bohrgerät; Mitte links: Bewehrung und rechts anbringen des Spritzbetons; unten: fertiggestellte Gruben

Die folgenden weiteren geeigneten Verbaumaßnahmen für den Bau in verschiedenen Böden mit und ohne Grundwasser wurden theoretisch untersucht:

- Trägerbohlwand
- Spundwand
- (überschnittene) Bohrfahlwand
- Schlitzwand

Neben den statischen Berechnungen zu den einzelnen Verfahren wurden in Zusammenarbeit mit dem ITW, Universität Stuttgart, dem Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) und der Firma Züblin die Kosten der verschiedenen Verbaumaßnahmen berechnet und bewertet (siehe [112]).

7.2 Technikzentrale

Gewerk 2 beinhaltet den Bau der Heizzentrale, die Anbindung an das Fernwärme- und Fernkältenetz der Universität, die Installation eines Gaskessels sowie das Anbinden der Außenlabore an die Heizzentrale.

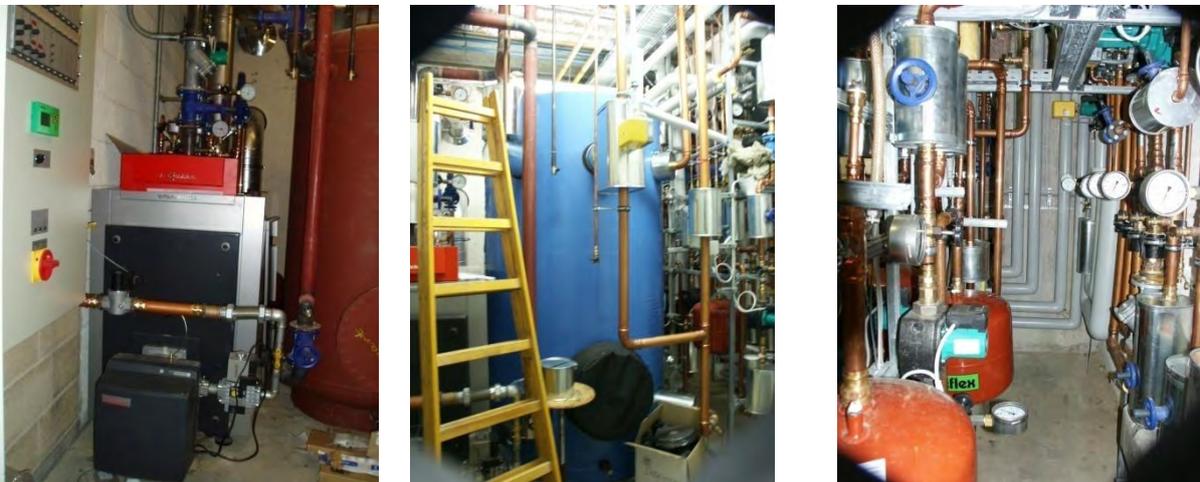


Bild 83: Technikraum mit 170 KW Gaskessel und 2 m³ Pufferspeicher zur Versorgung der Außenlabore mit 95 °C heißem Wasser

Die erste Inbetriebnahme der Heizzentrale fand im Januar 2005 statt, die Fertigstellung erfolgte im Mai 2005, im Juli 2005 war die Abnahme. Die Arbeiten wurden von der Firma Moritz ausgeführt. Beide Außenlabore können unabhängig voneinander beladen (beheizt) und entladen (abgekühlt) werden. Bild 84 zeigt einen Screenshot der Regelungs-Benutzeroberfläche.

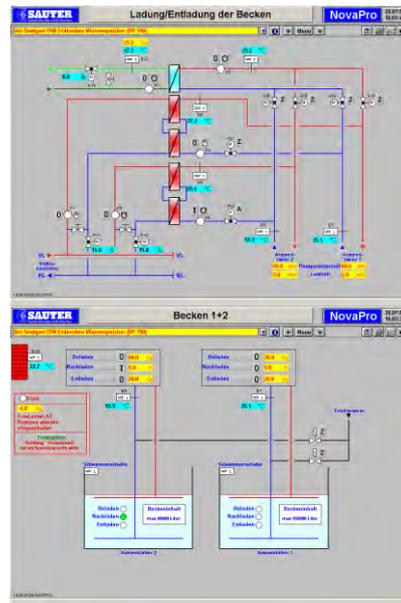
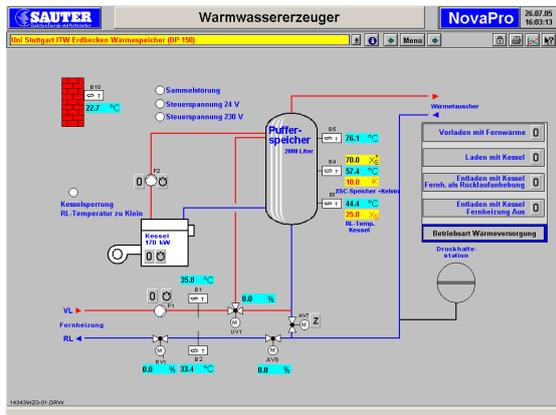


Bild 84: Screenshot der Benutzeroberfläche der Regelungssoftware

Die Regelung sowie die Messdatenerfassung erfolgt über einen PC. Die Heizzentrale und die Außenlabore wurden zusätzlich mit umfangreicher Messtechnik und mit einem Monitoring-System versehen. Neben Vor- und Rücklauf- und Pufferspeicher-Temperaturen sowie den Durchflussmengen werden die Füllstände der beiden Außenlabore sowie Speichermedium-, Dämmstoff-, und Erdreichtemperaturen kontinuierlich aufgenommen. Insgesamt werden Daten von etwa 130 Sensoren aufgezeichnet.

Tabelle 42: Technische Daten der Heizzentrale, Mess- und Regelungstechnik

Heizzentrale	
Fernkälte	185 KW bei 12 °C
Fernwärme	210 KW bei 60 °C
Gaskessel	170 KW bei 105 °C
Pufferspeicher	2 m ³
Messdatenerfassung	
Regelungstechnik	Fa. Sauter
Messsystem	Fa. Ahlborn
Kontinuierliche Erfassung von	108 Temperatursensoren 3 Durchflussmessern 12 Wärmestrom-Messplatten 4 Feuchtesensoren 2 Füllstandsensoren

7.3 Wandaufbau

Um die Vielzahl von Teilversuchen zur Konstruktion des Wandaufbaus parallel bearbeiten zu können wurden, zwei Basislabore ausgebaut. Zusätzlich zu den konstruktiven Versuchen wurden verschiedenen Konzepte wie Wasserwegsamkeit und kontrollierte Durchlässigkeit getestet. Der Aufbau der Basislabore ist nachfolgend beschrieben.

Basislabor 1

- Abdichtung mit TPE (Alwitra) in Bahnen
- vorkonfektionierte (zu Bahnen verschweißte) Dampfsperre (Wipak Covexx)
- Dämmung mit Blähglasgranulat (Liaver 2-4 mm) in Holzschalung und Geocontainer (Huesker Incomat)
- Zusatzversuch: Dämmung in Jute (IGG) Geocontainer
- Bodendämmung mit Blähglasgranulat (Liaver 2 - 4 mm)
- Messtechnische Erfassung von Wärmeverlusten, Speicher- und Dämmstofftemperaturen

Basislabor 2

- Abdichtung mit EPDM als vorkonfektionierte Plane
- Dämmung mit Blähglasgranulat (Poraver 4-8mm) in Jute-Membranschalung
- in vorgefertigter Holzschalung und in Geocontainer (Huesker Incomat)
- konventionelle Dampfsperre (Alujet)
- Schaumglasschotter (verdichtet) als Bodendämmung (Millcell)
- Messtechnische Erfassung der Wärmeverluste, Speicher-, Erdreich- und Dämmstofftemperaturen

Der Wandaufbau wird bei Erdbecken-Wärmespeichern ohne weitere statische Maßnahmen direkt auf die Böschungen aufgebracht. Um Eindringen von Oberflächenwasser in die Dämmung zu verhindern wurde die Böschung mit einer Drainagematte abgedeckt. Darauf folgt der eigentliche Wandaufbau. Tabelle 43 zeigt exemplarisch zwei verschiedene Wandaufbauten, bestehend aus Schutzvlies, Dämmung, Dampfsperre und Abdichtungsbahn. Die einzelnen Lagen werden in einem Einbindegraben fixiert.

Tabelle 43: Gegenüberstellung zweier Wandaufbauten

	Wandaufbau 1	Wandaufbau 2
Schema		
Böschung	80° - Vernagelung mit Spritzbeton	60° - Natürliche Böschung
Dämmung	60 cm Schüttung in verlorener Schalung, Blähglasgranulat 4-8 mm	36 cm Schüttung in Geocontainern (2-lagig) Blähglasgranulat 2-4 mm
Wärmeleitfähigkeit gemessen bei 20 °C	0.06 W/(m K)	0.065 W/(m K)
Dampfsperre	Vorkonfektionierte Aluminium Verbundfolie (PP-PA-Al-PA)	Gewebeverstärkte PE-Al Folie, überlappend verlegt
Abdichtung	TPE- Bahnen, heißluftverschweißt	EPDM, 2 Planen heißluftverschweißt

Schüttfähige Dämmung kann im Böschungsbereich nur eingebracht werden, wenn diese entweder in Behälter (Säcke, Geocontainer) oder in eine (verlorene) Schalung gefüllt wird. Für die Auslegung der Schalung ist die Kenntnis des Reibungswinkels des Schüttguts erforderlich. Der Reibungswinkel von Blähglasgranulat wurde in Zusammenarbeit mit dem IGS, Uni Stuttgart, bestimmt, siehe Kapitel 6.4.

Im Rahmen der Konzeptentwicklung wurden verschiedene Varianten für Wandaufbauten erarbeitet und in den Außenlaborversuchen umgesetzt.

Insgesamt wurden 26 Teilversuche durchgeführt, bei denen die Wand- und Bodendämmung unterschiedlich ausgeführt wurden (z.B. Blähglasgranulat in Holzschalung, Geocontainern, Jutesäcken und als lose Schüttung), unterschiedliche Abdichtungen für das Becken und die Abdeckung installiert wurden (z.B. EPDM, TPE, HDPE, HDPE-AL-HDPE, PP-Al-PP) sowie verschiedene Geotextilien (z.B. vlieskaschiertes Geogitter und Wirrfasergelege als Beckendrainage) eingesetzt wurden. Die Versuche zu den Wandaufbauten können in Teilversuche untergliedert werden, die in Tabelle 44 aufgeführt sind.

Tabelle 44: Teilversuche (TV) Wandaufbau

Nr.	Ort	Material	Bewertung
Dämmung			
TV01	Wand	Blähglasgranulat in Holzschalung	positiv
TV02	Wand	Blähglasgranulat in Geocontainern	mit Einschränkungen
TV03	Wand	Blähglasgranulat in Jutesäcken	negativ
TV04	Wand	Blähglasgranulat in vorgefertigter Holzschalung	positiv
TV05	Wand	Blähglasgranulat in Membranschalung	positiv
TV06	Boden	Blähglasgranulat als lose Schüttung	mit Einschränkungen
TV07	Abdeckung	Blähglasgranulat als lose Schüttung	mit Einschränkungen
TV08	Boden	Schaumglasschotter verdichtet	positiv
TV09	Abdeckung	Schaumglasschotter verdichtet	positiv
TV10	Wand	Blähglasgranulat in überhängender Membranschalung vertikal und horizontal	positiv
TV11	Wand	Blähglasgranulat in Membranschalung (vertikal) für EB-WSp	positiv
Abdichtung			
TV12	Becken	TPE-Abdichtung in Bahnen verschweißt	mit Einschränkungen
TV13	Abdeckung	TPE-Abdichtung als vorgefertigte Plane	mit Einschränkungen
TV14	Becken	EPDM-Abdichtung, vorkonfektionierte Planen, verschweißt im Becken	mit Einschränkungen
TV15	Becken	Abdichtung mit Bentonit – Kontrollierte Durchlässigkeit	negativ
TV16	Becken	HDPE-Abdichtung	mit Einschränkungen
Dampfsperre/Dampfbremse			
TV17	Becken	Überlappend verlegte Dampfsperre (mit KDB-Abdichtung)	positiv
TV18	Abdeckung	Überlappend verlegte Dampfsperre (mit KDB-Abdichtung)	negativ
TV19	Becken/ Abdeckung	verschweißbare Dampfsperre, vorkonfektioniert zu Planen	mit Einschränkungen
TV20	Becken/ Abdeckung	verschweißbare Dampfsperre als einzige Abdichtungslage	negativ
TV21	Becken/ Abdeckung	verschweißbare Sperrschichtbahn als einzige Abdichtungslage	positiv
TV22	Abdeckung	Unterspannbahn, verklebt, zur Kondensatableitung	positiv
TV23	Becken	Unterspannbahn, verklebt, Kondensatableitung, Schutz vor temporärem Grundwasser	mit Einschränkungen
TV24	Becken/ Abdeckung	verschweißbare Unterspannbahn, wasserdicht vor temporärem Grundwasser	positiv
Drainage			
TV25	Becken	beidseitig vlieskaschiertes Geogitter	positiv
TV26	Becken	beidseitig vlieskaschiertes Wirrfasergelege	positiv

7.3.1 Wärmedämmung

Das Einbringen der Wärmedämmung durch Einblasen aus dem Silo-LKW hat sich als sehr effektiv herausgestellt. Wenn möglich, sollte der Abstand zwischen LKW und Schalung möglichst gering sein, um die Fördermenge zu maximieren und die Staubentwicklung durch Reibung bei der Beförderung zu minimieren. Das Liefern des Schüttguts im offenen (abgedeckten) LKW und Abkippen direkt in die Schalung sollte, wenn möglich, jedoch bevorzugt werden.

Die Staubentwicklung beim Einblasen oder Schütten stellt eine Einschränkung dar. Die Staubentwicklung beim Einblasen ist Bild 85 exemplarisch gezeigt. In bewohnten Siedlungen besteht die Möglichkeit, die Staubentwicklung durch leichtes Befeuchten zu minimieren. Allerdings muss zuvor berechnet werden, ob bei gegebenem Wandaufbau später dann ein Austrocknen der Wärmedämmung möglich ist. Dies ist vom Wandaufbau und von den Randbedingungen abhängig (siehe auch Kapitel 4.3 und 6.6). Gegebenenfalls kann über spätere aktive Durchlüftung oder Evakuierung die Wärmedämmung getrocknet werden (vgl. auch Kapitel 7.3.1.5). Dies konnte jedoch im Rahmen des Projekts nicht detaillierter bearbeitet werden.



Bild 85: Staubentwicklung beim Einblasen

7.3.1.1 Geocontainer

Unter Geocontainern versteht man Säcke, Schläuche oder textile Container. Das Verfüllen von schüttfähiger Wärmedämmung wurde bereits in Hannover umgesetzt. Auch beim Erdbecken-Wärmespeicher in Steinfurt wurde die Wärmedämmung in Schläuche gefüllt. Nachteilig ist dabei die wellige Oberflächenstruktur. Dies hat sich auch beim aktuellen Projekt in München-Ackermannbogen gezeigt (vgl. Bild 86). Auch ohne weitere Setzungen droht aufgrund der Zwickel zwischen den Schläuchen eine Beschädigung der darüber liegenden Schichten.



Hannover
(Quelle: IGS)



Steinfurt-Borghorst
(Quelle: PKi)



München-Ackermannbogen
(Quelle: Lichtenfels)

Bild 86: Schüttfähige Wärmedämmung in Säcke und Schläuchen

Vorversuche beim Bau des Wärmespeichers in Hannover deuteten darauf hin, dass Geocontainer eine vielversprechende Optimierung für die Einbringung der Wanddämmung darstellen, wie in Bild 87 gezeigt.



Bild 87: Vorversuche beim Bau des Wärmespeichers in Hannover, schüttfähige Wärmedämmung in Geocontainern (PKi)

Im Außenlabor am ITW wurde das Einbringen der Wärmedämmung in Geocontainer getestet. Die Firma Huesker bietet sogenannte Incomat® -Matten, bestehend aus zwei miteinander verbundenen, hochfesten Gewebelagen aus Polyamid und/oder Polyethylen an. Die Matten bilden einen Schalungskörper, der durch Abstandhalter in seiner Dicke bis 60 cm variiert werden kann.



Bild 88: Verfüllen von schütffähiger Wärmedämmung in Geocontainer und in Schläuche

Zum Zeitpunkt der Außenlaborversuche waren Geocontainer mit einer Dicke größer als 30 cm nicht verfügbar. Um die gewünschte Dämmstärke zu erreichen, muss mit mehreren Lagen gearbeitet werden, wodurch sich die Kosten erhöhen. Beim Bau des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Eggenstein wurde ein weiterer Versuch unternommen, schütffähige Wärmedämmung in Geocontainer einzubringen. Dafür wurde ein 50 cm starker Geocontainer auf einer 35°-Böschung verfüllt. Da der Reibungswinkel des Blähglasgranulats mit rund 45° steiler ist als der Winkel der Böschung (siehe Kapitel 6.4), rollt bzw. rutscht das Schüttgut nicht (gegen das Gewicht der Geocontainermembran) bis zum Boden. Dadurch wird das Befüllen im Vergleich zur Befüllung von Schalungen bzw. Kammern (s.u.) deutlich verlangsamt. Da zudem keine einheitliche Oberfläche erzielt werden konnte, wurde der Versuch abgebrochen, vgl. Bild 89.



Bild 89: Verfüllen von schütffähiger Wärmedämmung in Geocontainer auf 35° Böschung des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Eggenstein-Leopoldshafen

7.3.1.2 Schalungsvarianten

Es wurden im Rahmen der Außenlaborversuche sowohl in der Grube, gefertigte Schalungsvarianten als auch vorgefertigte Schalungen untersucht.

7.3.1.3 Schalungstafel

Durch das Verfüllen von schütffähiger Wärmedämmung zwischen Schalung und Erdreich gelingt eine kosten- und zeiteffektive Installation der Wärmedämmung. Der Vorteil gegenüber Geocontainern ist, dass die Anpassung der Dämmschichtstärke ohne weiteres möglich ist. So kann die Dämmung im oberen Bereich stärker ausgeführt werden als unten (z.B. oben 70 cm unten 30 cm). Dies ist insbesondere bei gut schichtenden Speichern vorteilhaft.



Bild 90: Durch das Verfüllen von schüttfähiger Wärmedämmung zwischen Schalung und Erdreich gelingt eine effektive Installation der Wärmedämmung.

7.3.1.4 Membranschalung

Eine Optimierung des Einbringens der Wärmedämmung in Bezug auf Materialeinsatz und Kosten stellt die Membranschalung dar. Diese wurde in drei Varianten untersucht, siehe Bild 91. Als Membran kann je nach Einsatzort (außen- bzw. innenliegende Wärmedämmung) ein diffusionsoffenes Material (Jute, Unterspannbahn) oder ein diffusionssperrendes Material (Kunststoffolie) zum Einsatz kommen.



Jute



Unterspannbahn



Baufolie

Bild 91: Membranschalungen

Durch die Membranschalung wird bei außen liegender Wärmedämmung, wie im Falle des Behälter-Wärmespeichers in München (SNAB, [52], [53], [54]), ein sehr effektiver Einbau ermöglicht. Vorversuche wurden im Rahmen der Außenlaborversuche durchgeführt. Die Anwendung in München zeigt Bild 92. Die Technik kam auch bei den Pufferspeichern (100 m³ und 480 m³) in Crailsheim zum Einsatz, [51], [52], [53], [54].



Bild 92: Membranschalung, Vorversuch im Außenlabor und Anwendung im Pilotprojekt in München-Ackermannbogen

7.3.1.5 Evakuierung dämmstoffgefüllter Kammern

Beim Kies-Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher in Eggenstein-Leopoldshafen wurde, aufbauend auf die Technik in Steinfurt-Borghorst⁹ und Überlegungen zur Evakuierung von Dämmstoffen zur Reduzierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit (vgl. Kapitel 7.10.6), Dämmung in Kammern eingebracht, welche zur Leckagedetektion evakuiert wurden. Vorversuche dazu erfolgten im Außenlabor, vgl. Bild 93.

⁹ Doppellagige PP Abdichtung, getrennt durch Geogitter.



Bild 93: Evakuierung dämmstoffgefüllter Kammern, Vorversuch im Außenlabor

7.3.1.6 Boden- und Deckeldämmung

Für die Bodendämmung und für die Dämmung der Abdeckung bzw. allgemein für Dämmung im horizontalen Bereich und im leicht geböschten Bereich (β kleiner 20° bis 30°) eignet sich Schaumglasschotter. Zwar ist die Wärmeleitfähigkeit mit 0.08 bis 0.09 W/(m K) etwas höher als die von Blähglasgranulat (0.06 bis 0.07 W/(m K) bei 20°C), jedoch ist die Verarbeitbarkeit einfacher. Vorteilhaft ist vor allem, dass sich Schaumglasschotter wie normaler Schotter verarbeiten lässt, wie in Bild 94 und Bild 95 gezeigt. Die Modellierbarkeit ist vor allem bei flachen Böschungen von Vorteil.



Bild 94: Einbringen und Verdichten der Bodendämmung

Schaumglasschotter wird verdichtet, wodurch eine stabile Schicht entsteht. Die weiteren Arbeitsschritte (Verlegen von Schutzvliesen sowie das Verlegen und Verschweißen der Abdichtung) können somit problemloser ausgeführt werden.

Gleichermaßen eignet sich Schaumglasschotter als Deckeldämmung für Kies-Wasser-Wärmespeicher oder für anderweitig statisch stabile Abdeckungen¹⁰, d.h. wenn die Schüttung verdichtet werden kann. Im Vergleich zu Blähglasgranulat kann die eingebaute Wärmedämmung ohne Einsinken betreten werden.

¹⁰ Schwimmende Abdeckungen können mit Schaumglasschotter ausgeführt werden, jedoch ist dann eine Verdichtung nicht möglich.



Bild 95: Einbringen und Verdichten der Dämmung der Abdeckung von Labor 2, Abdeckung des Versuchs Wasserwegsamkeit

Als nachteilig erweist sich die Witterungsabhängigkeit beim Einbau von Schaumglasschotter. Im Falle von Niederschlag muss der Einbau eingestellt werden. Regenschutz bei bereits eingebauter Wärmedämmung ist vorzusehen. Zum Einfluss von Feuchtigkeit auf die effektive Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmung vgl. Kapitel 6.3. Der Einfluss der Verdichtung auf die effektive Wärmeleitfähigkeit wird in Kapitel 6.3.4 gezeigt.

7.3.1.7 Sonstige Varianten

Georaster sind eine interessante Alternative, um rieselfähige Wärmedämmung, wie z.B. Blähglasgranulat auf flachen Böschungen einzubauen. Im Rahmen des Projekts wurde allerdings keine wirtschaftlich und technisch zufriedenstellende Lösung gefunden.



Bild 96: Georaster

7.3.1.8 Zusammenfassung Wärmedämmung

In Tabelle 45 ist eine Empfehlung für die verschiedenen Einbaubereiche zusammengefasst.

Tabelle 45: Wärmedämmung - Zusammenfassende Empfehlung für die Bereiche Abdeckung, Seitenwand und Boden, fettgedruckte Dämmstoffe sind jeweils besser geeignet

<u>Abdeckung (horizontal)</u>
Blähglasgranulat, Schaumglasschotter , Blähton, PUR/PIR , Steinwolle
<u>Seitenwand (senkrecht, steil gebösch)</u>
Blähglasgranulat , Blähton, PUR/PIR
<u>Seitenwand (flach gebösch)</u>
Blähglasgranulat, Schaumglasschotter , Blähton, PUR/PIR
<u>Boden (horizontal)</u>
Schaumglasschotter , Blähglasgranulat, Schaumglasplatten

7.3.2 Dampfsperre und Abdichtung

In Kapitel 5.2 wurde auf mögliche Abdichtungsmaterialien hingewiesen. Bei der Auswahl einer geeigneten Abdichtung muss in Hinblick auf Alterung und maximale Dauergebrauchstemperatur ein Kompromiss eingegangen werden. Je temperaturbeständiger ein Kunststoff ist, desto schwieriger ist auch seine Verarbeitung. Dies gilt sowohl für die Herstellung der Abdichtungsbahn mittels Extrusion als auch für das Verarbeiten auf der Baustelle (Verschweißen). Im Folgenden werden in Bildern einige Teilversuche zur Abdichtung gezeigt:



Bild 97: Verlegen einer vorkonfektionierten Plane, verschweißt aus 1.5 m breiten Dampfsperrbahnen, an den Kanten erfolgt eine überlappende Verlegung



Bild 98: Konventionelle Verlegung einer (gewebeverstärkten) Dampfsperre: Überlappung und Fixierung mittels Klebeband



Bild 99: Verschweißen einer TPE-Abdichtung mit dem Heizkeil-Schweißautomaten (links). An den Ecken und an T-Stößen werden die Bahnen per Hand mit Heißluft verschweißt.



Bild 100: Abdichtung des Beckens mit einer vorgefertigten Plane aus EPDM; Das Verschweißen der Planen mittels Schweißautomaten ist aufgrund der hohen Flexibilität des Materials schwierig: Der Schweißautomat „kommt leicht aus der Spur“. Für das Verschweißen von EPDM wird eine spezielle Beschichtung, ein sogenannter Fügerand benötigt.



Bild 101: Abdichtung eines Beckens mit HDPE. Aufgrund der Erfahrungen beim Deponiebau erfolgt die Abdichtung problemlos; rechts: Doppelnaht

Die Abdichtung des Beckens mit PP-AI-PP-Verbundfolie konnte nicht fertiggestellt werden da die Verbundfolie nicht UV-beständig ist (vgl. Kapitel 5.2.5). Dennoch zeigt der Versuch, dass das Verschweißen von Verbundfolien möglich ist.

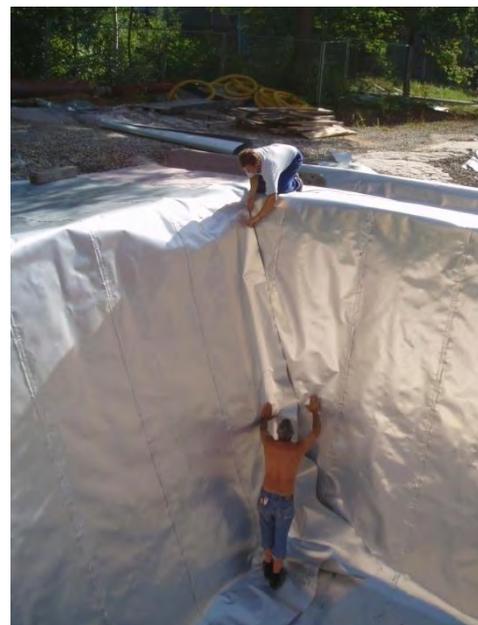


Bild 102: Vorfertigung von Planen durch Heizkeilnaht an PP-AI-PP-Verbundfolie, Einbringen der Planen; Im Eckbereich werden die Planen angepasst und im Becken miteinander verschweißt.



Bild 103: Trotz der geringen Foliendicke von unter 1 mm gelingen Doppelnähte. Auch Extrusionsnähte im Eckbereich lassen sich ausführen.



Bild 104: Die Sperrschichtbahn ist im Vergleich zur HDPE-Bahn weniger flexibel. Aufgrund der Bahnbreite von nur 1.5 m sind im Vergleich zu HDPE etwa viermal so viele Schweißnähte auszuführen.

Schweißverfahren



Bild 105: Heißluft- (links) und Extrusionsschweißen (rechts)



Bild 106: Doppelnähte mit dem Schweißautomaten (hier kombiniert Heißluft und Keil)



Bild 107: Verschweißen der Sperrschichtbahn zwischen den Abdeckungselementen mittels Schweißautomat und Führungswagen (vgl. Kapitel 7.10.7)

7.3.3 Dichtigkeitsprüfung



Bild 108: Druckluftprüfung ist sehr effektiv, da die Schweißnaht über die gesamte Länge geprüft werden kann



Bild 109: Dichtigkeitsprüfung mittels Saugglocke (links), für das Funkenprüfverfahren wird beim Schweißen ein Prüfdraht in die Extrusionsschweißnaht eingebracht

7.3.4 UV-Beständigkeit

Die UV-Beständigkeit der Abdichtungsahnen spielt eine untergeordnete Rolle, da UV-Exposition nur während der Dauer der Bauphase von wenigen Wochen/Monaten vorliegt. Über diesen Zeitraum muss jedoch UV-Beständigkeit gegeben sein.

Die Bewitterung wurde durchgeführt, nachdem eine Verbundfolie, welche für die Schweiß-Vorversuche im Außenlabor eingesetzt wurde, nach weniger als drei Wochen starke Verfärbung aufzeigte. Die PP-Folie löste sich flächig auf der UV-exponierten Seite von der Al-Bahn ab (siehe Bild 110).



Bild 110: Abgelöste PP-Folie nach 3 Wochen Außenbewitterung

Die Außenbewitterung mit der teilabgedeckten Bahn bestätigt die Annahme, dass es aufgrund von UV-Strahlung zur Degradation kommt. Es zeigt sich, dass die Verbundfolie erfolgreich vor UV-Strahlung geschützt werden kann, indem die Abdichtbahn mit Sand, Schutzvlies oder PE-Baufolie abgedeckt wird. Somit kann die Verbundfolie im Außenlaborversuch eingesetzt werden, muss jedoch für den realen Einsatz bezüglich UV-Stabilität optimiert werden.

7.3.5 Alterung und Degradation

Die Alterung von Kunststoffen konnte im Rahmen dieses Projekts nicht systematisch untersucht werden. In Kapitel 5.2.5 wird kurz darauf eingegangen. Durch Rückbau der Wandaufbauten der Außenlabor-Wärmespeicher konnten die eingesetzten Materialien nach Exposition begutachtet werden. Schon nach verhältnismäßig kurzer Betriebszeit von weniger als einem Jahr musste Degradation festgestellt werden, wie in Bild 111 zu sehen ist:



Bild 111: Degradation einer Dampfsperre nach weniger als ein Jahr Betrieb (Bilder rechts). Die einzelnen Schichten lösen sich voneinander ab. Die Aluminiumschicht ist nicht mehr vor Korrosion geschützt.

7.3.6 Zusammenfassende Bewertung der eingesetzten Materialien

In Tabelle 46 werden die im Außenlabor eingesetzten Materialien und Verfahren zusammenfassend bewertet.

Tabelle 46: Zusammenfassende Wertung der eingesetzten Materialien und Verfahren

	Material	Verfahren	Kosten	Bewertung	Bemerkung
Dämmung					
Bodendämmung mit Schaumglasschotter (verdichtet), mit Geobags	geeignet	geeignet	gering	gut	Labormaßstab: Einbringung über LKW + Verdichtung eingeschränkt
Bodendämmung mit Blähglasgranulat (lose Schüttung) aus Silo	geeignet	geeignet	gering	bedingt geeignet	Begehbarkeit gering, Stabilisierung mit 1200g/m ² Vlies nicht ausreichend
Blähglasgranulat in Geocontainer	geeignet	bedingt geeignet	gering	ungeeignet	2-lagig, da zu diesem Zeitpunkt nur in 30 cm Dicke erhältlich; Dämmstärke im oberen Bereich gering;
Blähglasgranulat in Jute Geocontainer	geeignet	geeignet	gering	ungeeignet	Oberfläche zu wellig
Blähglasgranulat in Holzschalung	geeignet	geeignet	hoch	bedingt geeignet	Aufbau der Schalung sehr arbeitsintensiv
Blähglasgranulat in vorgefertigter Holzschalung	geeignet	geeignet	gering	gut	Labormaßstab: Einbringung eingeschränkt, hoher Anteil an Formteilen
Blähglasgranulat in Membranschalung	geeignet	geeignet	gering	gut/geeignet	Befestigung optimierbar, Realisierung beim Projekt Crailsheim
Blähglasgranulat in überhängender Membranschalung	geeignet	geeignet	gering	gut/geeignet	Realisierung beim Projekt München-Ackermannbogen und
Abdeckung: Blähglasgranulat lose geschüttet	geeignet	geeignet	gering	gut	Begehbarkeit eingeschränkt
Abdeckung: Schaumglasschotter (verdichtet), offener LKW	geeignet	geeignet	gering	gut	schneller Einbau, witterungsabhängig
Kunststoffdichtbahn (KDB)					
EPDM, vorkonfektionierte Plane	geeignet	bedingt geeignet	gering	bedingt geeignet	Doppelnaht nur teilweise möglich, Schweißnähte nur teilweise prüfbar, Langzeitbeständigkeit
TPE, Bahnen	geeignet	geeignet	gering	bedingt geeignet	Langzeitbeständigkeit, Diffusionsdichtigkeit
HDPE	geeignet	geeignet	gering	gut	Langzeitbeständigkeit, Diffusionsdichtigkeit
Dampfsperre/Bremse					
PP-PA-AI-PP vorkonfektioniert	bedingt geeignet	geeignet	gering	bedingt geeignet	Verfügbarkeit, Stabilität: Materialdicke bzw. Gewebeverstärkung, Langzeitbeständigkeit
LDPE-AL-LDPE gewebeverstärkt überlappend verlegt	bedingt geeignet	bedingt geeignet	gering	bedingt geeignet	Verlegung: durch Klebeband zu befestigen, ungeeignet im horizontalen Bereich (Abdeckung, Boden)
Sperrschichtabdichtungsbahn					
PP-AI-PP	bedingt geeignet	geeignet	gering	bedingt geeignet	Robustheit, keine UV-Stabilität
PEHD-AI-PEHD	geeignet	geeignet	mittel	geeignet	Langzeitbeständigkeit

7.4 Wärmeleitfähigkeit im Betrieb

7.4.1 Motivation

In einer ersten Projektphase wurden geeignete Materialien für Wärmedämmung, Abdichtung und Dampfsperre untersucht. Im Innenlabor erfolgten Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von geeigneten Dämmstoffen und des Diffusionswiderstandes von Kunststoffdichtungsbahnen.

Im Außenlabor wurden die Materialien hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Praxistauglichkeit getestet. Durch die Beheizung und Kühlung der Außenlabor-Wärmespeicher über die Technikzentrale (siehe Kapitel 7.2) kann der reelle Betrieb simuliert werden. Es besteht die Möglichkeit Be- und Entladezyklen sowie Speicherzyklen zu fahren.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Innenlaboruntersuchungen auf den reellen Betrieb wird durch Auswertung von Messdaten der Außenlaborversuche gezeigt.

Die exakte Bestimmung der Wärmeverluste bei den Pilot- und Forschungsspeichern ist schwierig. Bei der Bilanzierung können die realen Wärmeverluste von den bilanzierten aufgrund von Messfehlern der Wärmemengenzähler erheblich abweichen. Die Wärmeverluste können exakter durch die Bestimmung der Abkühlkurve gemessen werden. Dies ist bei den bisherigen Pilotspeichern kaum möglich gewesen, da diese in Nahwärmesystemen integriert sind und nicht entkoppelt vom Heizsystem betrieben werden können.

Im Außenlabor wurden verschiedene Wandaufbauten im (simulierten) Betrieb kontinuierlich vermessen. Dabei stand die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit zur Ermittlung der Wärmeverluste von Boden- und Wanddämmung sowie der Abdeckung im Betrieb im Vordergrund. Aus den Messergebnissen lassen sich Empfehlungen für optimierte Wandaufbauten erdvergrabener Wärmespeicher ableiten.

7.4.2 Messmethoden

Die Außenlabore und die dazugehörige Heizzentrale sind mit umfangreicher Messtechnik versehen. Durch die Erfassung der Speicher-, Dämmstoff- und Erdreichtemperaturen sowie der Wärmeströme durch die Wärmedämmung, können die Wärmeverluste im Betrieb bestimmt und daraus die Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffschicht bestimmt werden. Es werden drei Methoden angewendet.

- i. Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mittels der Fouriergleichung durch Messung der Wärmeströme und Temperaturen
- ii. Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit durch die Berechnung der Wärmeverluste mittels Bilanzierung einer Speicherschicht (Abkühlkurve)
- iii. Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit durch die Berechnung der Wärmeverluste mittels Bilanzierung des gesamten Speichers (bei konstanter Speichertemperatur)

Die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mittels der Fouriergleichung ist die genaueste der oben genannten Methoden. Ein Nachteil ist, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit nur punktuell bestimmt werden kann. Für die Berechnung der Wärmeverluste des gesamten Speichers eignet sich diese Methode nur bedingt. Jedoch lassen sich Aussagen über die Wärmedämmung treffen und damit Rückschlüsse über die Qualität des Wandaufbaus.

7.4.2.1 Messungen im Außenlabor

Bild 112 zeigt schematisch den Aufbau der Verbundwand mit eingebauten Sensoren sowie ein Foto vom Aufbau.

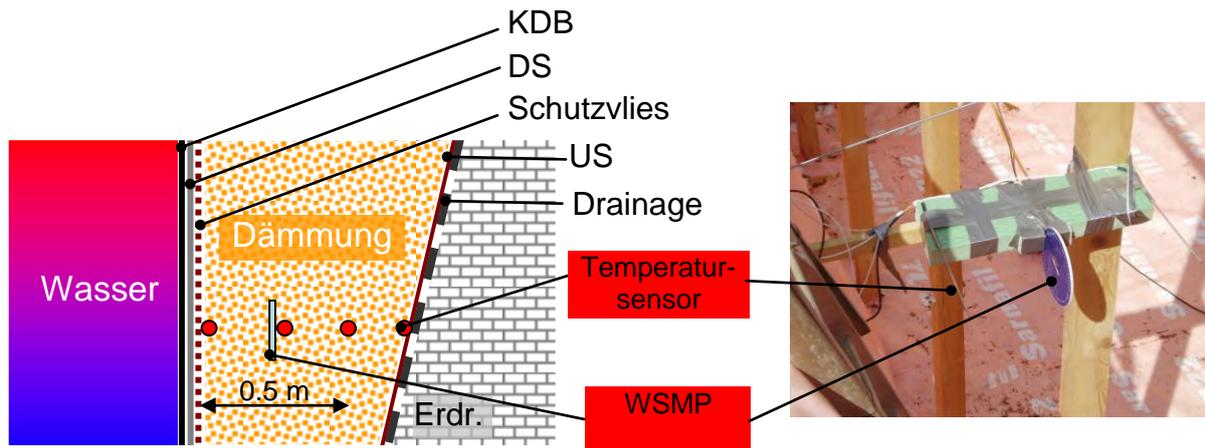


Bild 112: Schematischer Aufbau der Verbundwand bestehend aus Kunststoffdichtungsbahn (KDB), Dampfsperre (DS), Dämmung, Schutzvlies), Unterspannbahn (US) Einbau der Messtechnik mit Temperatursensoren und Wärmestrommessplatte (WSMP) zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Betrieb

Die effektive Wärmeleitfähigkeit lässt sich nach Fourier entsprechend Gleichung (40) bestimmen.

$$\lambda(\vartheta_m, u) = \frac{q \cdot \Delta x}{\Delta \vartheta} \quad (40)$$

Da es sich in Gleichung (40) um die Berechnung stationärer Wärmeleitung handelt, können bei dieser Auswertung dynamische Effekte nicht wiedergegeben werden. Die Auswertung erfolgt vielmehr quasi-stationär. Zeiträume mit starken Änderungen (z.B. große Temperaturschwankungen) werden für die Auswertung herausgefiltert.

Am Beispiel eines Zeitintervalls von sechs Monaten mit unterschiedlichen Heiz- und Kühlzyklen soll der Einfluss der Durchfeuchtung der Dämmung auf die Wärmeverluste gezeigt werden (vgl. Bild 113).

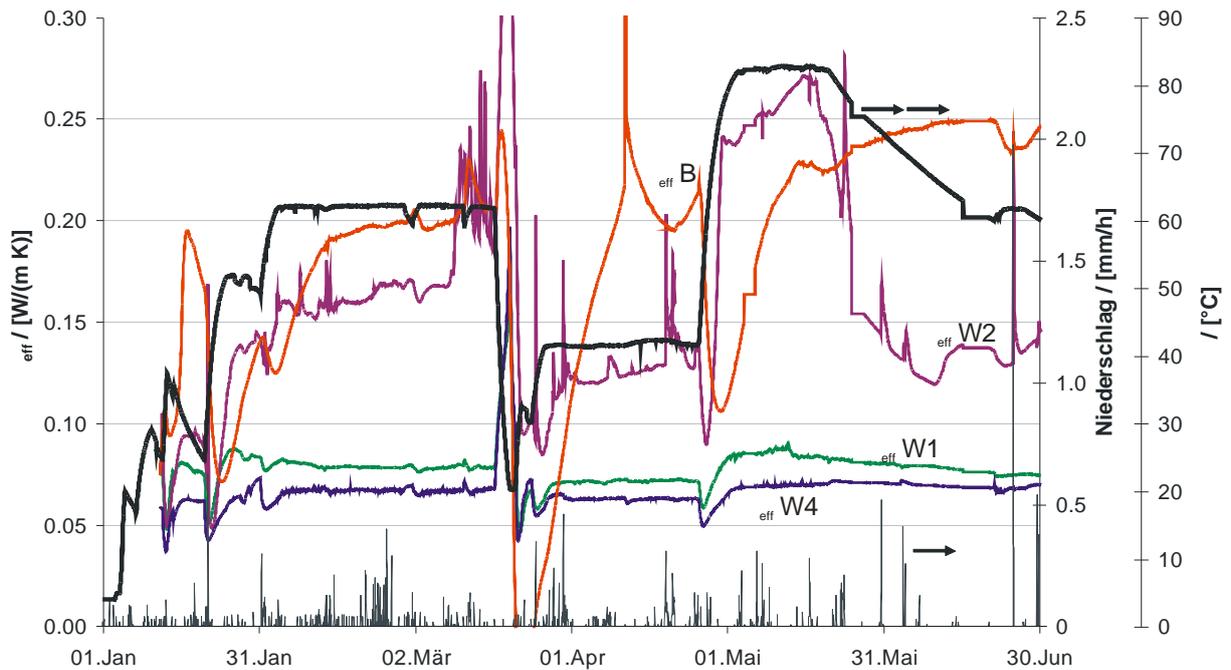


Bild 113: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Bodendämmung (B) und Wanddämmung (W1, W2 und W4) im Betrieb von Außenlabor 1, Einfluss der Durchfeuchtung bei Regen

Die effektive Wärmeleitfähigkeit nimmt im Außenlabor, wie erwartet, mit steigender (Speichermittel-)Temperatur zu. Deutlich zu erkennen ist, dass bei Regenspitzen die effektive Wärmeleitfähigkeit von Boden (B) und Nord-Wand (W2) zunimmt, wohingegen die mit einer Spritzbetonschicht versehene Süd- (W4) und Westböschung (W1) unbeeinflusst bleiben. Der Effekt tritt deutlicher bei hohen Speichertemperaturen auf. Im Böschungsbereich (W2) kann die Dämmung wieder schnell austrocknen – die effektive Wärmeleitfähigkeit sinkt wieder deutlich ab. Die Bodendämmung bleibt aber aufgrund unzureichender Drainage über den gesamten Zeitraum feucht (vgl. Bild 114, rechts).



Bild 114: Durchfeuchtung der Nordwand (W2) sowie des Bodens (B) nach dem Rückbau

Ein ähnliches Verhalten der Wärmedämmung konnte im Außenlabor 2 festgestellt werden, vgl. Bild 115. Die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung der Südwand (W4) verringert sich leicht mit fallender Speichertemperatur. Dies korrespondiert mit den Beobachtungen der Innenlaborversuche. Einflüsse von Regen können nicht beobachtet werden. Jedoch kann der Einfluss von eindringender Feuchtigkeit bei Regen im Falle der Nordwand (W2) und des Bodens (B) beobachtet werden. Jedem Peak in der Niederschlagskurve folgt ein Peak der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Im Unterschied zu Labor 1 ist hier der Effekt für die Bodendämmung ausgeprägter. Wieder ist zu vermuten, dass der Grund in der Spritzbetonschicht liegt. Weder die Nordwand (60° Neigungswinkel) noch der Boden haben ausreichenden Schutz vor Wassereintrag. Die Spritzbetonschicht der Südwand verhindert das Eindringen von Wasser. Die Wärmeverluste durch die Bodendämmung mit einer effektiven Wärmeleitfähigkeit von etwa $0.2 \text{ W}/(\text{m K})$ sind zwei- bis dreifach über den Planungswerten (basierend auf dem Bemessungswert nach DIN). Die Wärmedämmung der Nordwand verhält sich aufgrund der höheren mittleren Dämmstofftemperatur noch schlechter.

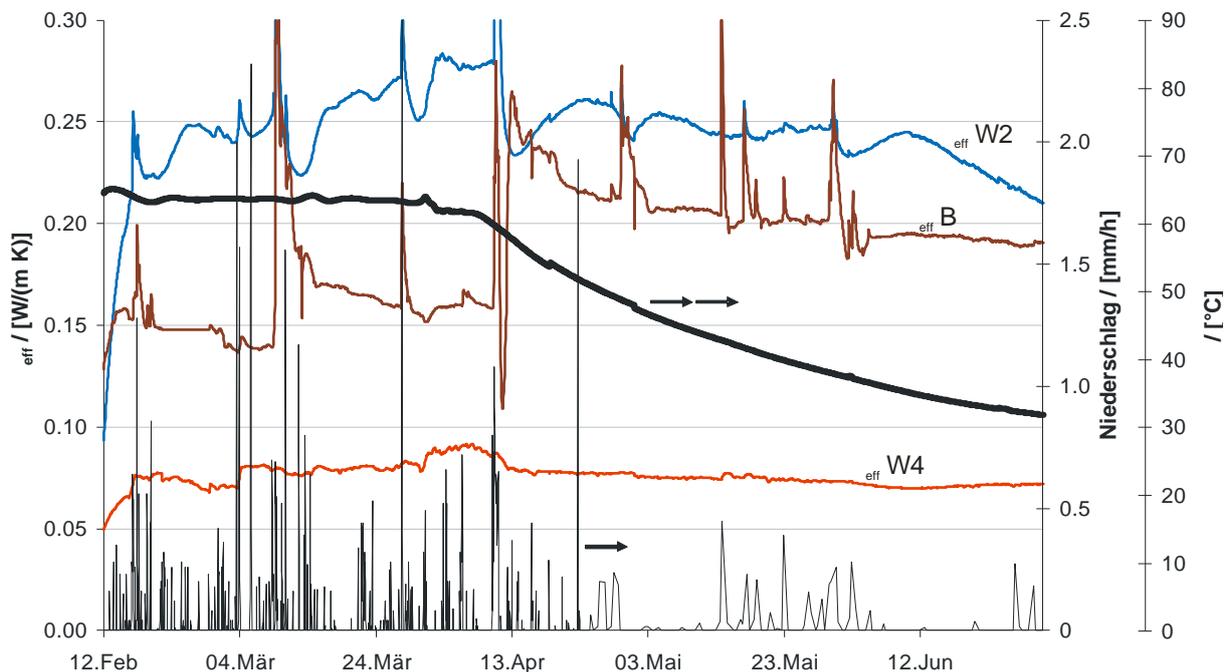


Bild 115: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Bodendämmung (B) und Wanddämmung (W2, W4) im Betrieb von Außenlabor 2, Einfluss der Durchfeuchtung bei Regen, Bodendämmung und Dämmung der Nordwand sind nicht durch Spritzbeton geschützt.

Da die effektive Wärmeleitfähigkeit stark von der (Mittel-) Temperatur der Wärmedämmung abhängt, ist es hilfreich, für eine vergleichende Bewertung die

Daten zu korrelieren. Die Dämmstoff- (Mittel-) Temperatur von Boden-, Wand- und Deckeldämmung können je nach Schichtung des Speichers und nach Randbedingung stark voneinander abweichen.

Wie in [226] im Detail beschrieben wird, kann die effektive Wärmeleitfähigkeit für trockene Dämmstoffe gut mit einem linearen Ansatz angenähert werden:

$$\lambda_{\text{eff,op,mod}} = \lambda_o + m \cdot \vartheta \quad (41)$$

Für feuchte Dämmstoffe kann die effektive Wärmeleitfähigkeit mit einem exponentiellen Ansatz als Funktion der Temperatur angenähert werden.

$$\lambda_{\text{eff,op,mod}} = \exp(a_1 + a_2 \cdot \vartheta) \quad (42)$$

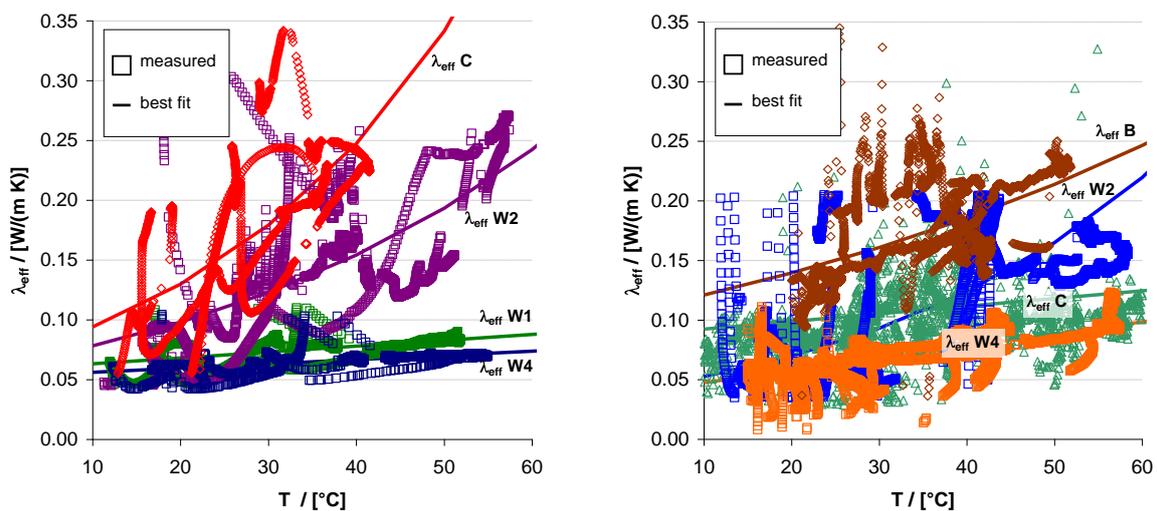


Bild 116: Korrelation der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Dämmstoffmitteltemperatur, links gemessene Daten (Punkte) und Ausgleichskurven für Labor 1 entsprechend Bild 113 (Messdaten von 7 Monaten) und rechts für Labor 2 entsprechend Bild 115 (Messdaten von 18 Monaten)

Die Werte in Bild 116 zeigen erhebliche Schwankungen aufgrund von transienten Effekten und variablem Wassergehalt der Dämmstoffe über die lange Messperiode. Trends sind dennoch gut zu erkennen. Die Koeffizienten der Ausgleichskurven sind in Tabelle 47 zusammengefasst.

Tabelle 47: „Best Fit“ Koeffizienten

Ort		Wärmedämmung	d / [mm]	Methode	Best Fit Koeffizienten	
					a_1 / m	a_2 / λ_0
Labor 1						
L1	C	EGG Typ II	2-4	Sensoren ausgefallen		
L1	W1	EGG Typ I	2-4	lin	0.0005	0.058
L1	W2	EGG Typ I	2-4	exp	0.0226	-2.77
L1	W3	EGG Typ I	2-4	keine Sensoren vorhanden		
L1	W4	EGG Typ I	2-4	lin	0.0004	0.053
L1	B	EGG Typ I	2-4	exp	0.0322	-2.69
Labor 2						
L2	C	FGG	0-90	lin	0.0006	0.086
L2	W1	EGG Typ II	4-8	keine Sensoren vorhanden		
L2	W2	EGG Typ II	4-8	exp	0.0286	-3.23
L2	W3	EGG Typ II	4-8	keine Sensoren vorhanden		
L2	W4	EGG Typ II	4-8	lin	0.0010	0.037
L2	B	FGG	0-90	exp	0.0142	-2.25
Labor 1 b						
L1	C1	PUR	-	lin	0.0005	0.035
L1	C2	PUR	-	lin	0.0005	0.029
L1	W1	Mix aus FGG, BGG	2-90	Sensoren beim Bau beschädigt		
L1	W2			lin	0.001	0.105
L1	W3			keine Sensoren vorhanden		
L1	W4			lin	0.001	0.105
L1	B	FGG	10/50	lin	0.0023	0.117

lin: linear best fit; exp: exponential best fit; C: cover; W: wall; B: bottom; EGG: expanded glass granules; ECG: expanded clay granules, FGG: foam glass gravel

7.4.2.2 Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mittels energetischer Bilanzierung

Die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mittels Wärmestrom-Messplatten und Temperatursensoren unterliegt Messungenauigkeiten und Messfehlern. Um die Daten zu validieren bietet sich an, die effektive Wärmeleitfähigkeit über einen alternativen Weg zu bestimmen. Wie bereits angedeutet kann eine für den gesamten Speicher gültige mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden, indem der Speicher bilanziert wird. Dividiert man die Wärmeverluste durch die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Erdreich sowie durch die mittlere Dämmstoffdicke, so erhält man die mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit.

Für eine Periode mit konstanter Speichertemperatur gilt für die Änderung der inneren Energie:

$$\frac{dU}{dt} = 0 \quad (43)$$

Die Wärmeverluste des Speichers lassen sich dann über die Bilanzierung der ein- und austretenden Enthalpieströme berechnen:

$$\dot{H}_{in} - \dot{H}_{out} - \dot{Q}_{loss,tot} = 0 \quad (44)$$

mit

$$\dot{Q}_{loss,tot} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{in} - \vartheta_{out}) \quad (45)$$

Für die mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit resultiert

$$\lambda_{eff,av,tot} = \frac{\dot{Q}_{loss,tot} \cdot d_{av}}{A_{tot} \cdot (\vartheta_{s,av} - \vartheta_{a,av})} \quad (46)$$

Bei dieser Methode sind die Wärmeverluste der Rohrleitungen (von Heizzentrale bis Speicher) enthalten.

Alternativ kann die über den Umfang des Speichers angenommene mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden, indem eine Schicht einer definierten Schichtdicke bilanziert wird (vgl. Bild 117).

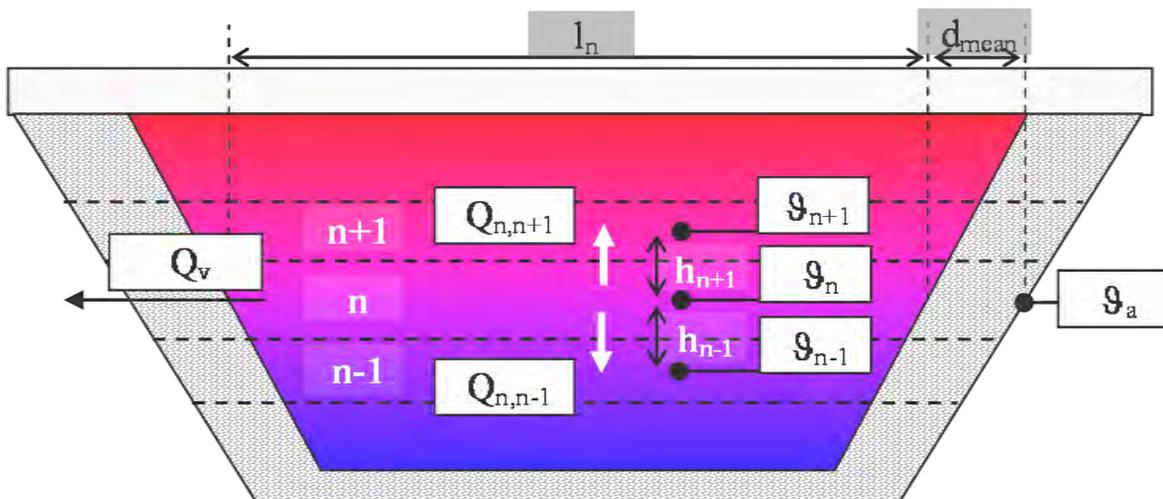


Bild 117: Schema zu Bestimmung der mittleren effektiven Wärmeleitfähigkeit über Bilanzierung

Unter der Voraussetzung, dass der Wärmespeicher weder beladen noch entladen wird, gilt

$$\dot{H}_{in} = \dot{H}_{out} = 0 \quad (47)$$

Die Änderung der inneren Energie (U) einer Schicht mit der Zeit entspricht der Summe der Wärmeströme in die jeweils benachbarte Schicht und den Wärmeverlusten über die Außenwände dieser Schicht.

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{n,n+1} + \dot{Q}_{n,n-1} + \dot{Q}_{loss,layer} \quad (48)$$

Für inkompressible Medien kann die Änderung der inneren Energie wie folgt berechnet werden:

$$\frac{dU}{dt} = c_v \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} = c_v \cdot h_n \cdot A_{av} \cdot \rho_w \cdot \frac{dT}{dt} \quad (49)$$

Die Wärmeströme in die obere bzw. untere Schicht werden unter Vernachlässigung konvektiven Wärmetransports entsprechend den Gleichungen (50) und (51) berechnet

$$\dot{Q}_{n,n+1} = A_{n,n+1} \frac{\lambda_w}{h_{n+1}} \cdot (\vartheta_n - \vartheta_{n+1}) \quad (50)$$

$$\dot{Q}_{n-1} = A_{n,n-1} \frac{\lambda_w}{h_{n-1}} \cdot (\vartheta_n - \vartheta_{n-1}) \quad (51)$$

Die mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit der Schicht kann dann entsprechend Gleichung (52) abgeschätzt werden.

$$\lambda_{eff,av,layer} = \frac{\dot{Q}_{loss,layer} \cdot d_{av}}{\sum (h_n \cdot l_i) \cdot (\vartheta_n - \vartheta_{a,av})} \quad (52)$$

In Bild 118 und Bild 119 sind jeweils die nach den oben genannten Methoden berechneten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für Labor 1 und Labor 2 dargestellt.

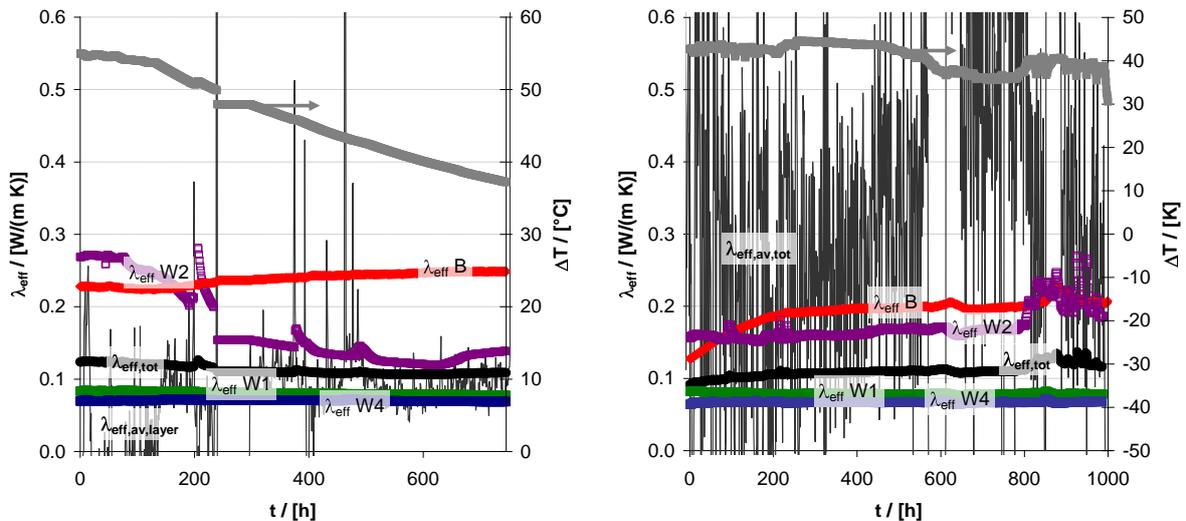


Bild 118: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Labor 1, links berechnet über Bilanzierung einer Schicht (Abkühlkurve im Mai 2005) und rechts über die Bilanzierung des gesamten Speichers (konstante Speichertemperatur, Februar 2005), Vergleich mit Messwerten (Wärmestrommessplatte, Temperatursensoren)

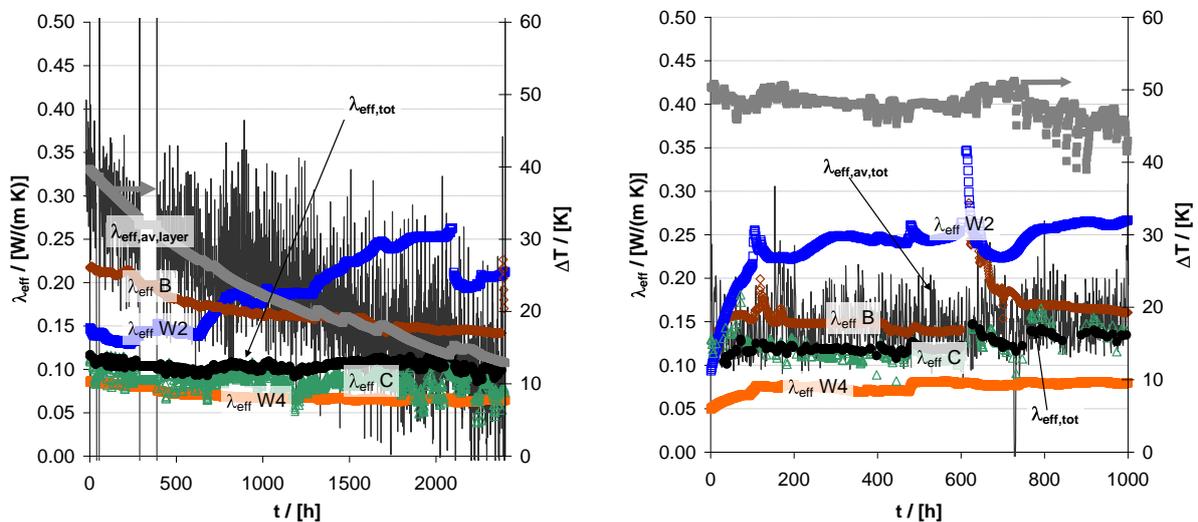


Bild 119: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Labor 2, links berechnet über Bilanzierung einer Schicht (Abkühlkurve im Februar 2006) und rechts über die Bilanzierung des gesamten Speichers (konstante Speichertemperatur, Oktober 2005 bis Januar 2006), Vergleich mit Messwerten (Wärmestrommessplatte, Temperatursensoren)

Die mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{eff, tot}}$ des Wärmespeichers kann entsprechend Gleichung (53) als Summation paralleler Widerstände mit den Werten

der effektiven Wärmeleitfähigkeit (λ_i), welche über die Messung der Wärmeströme mit den Wärmestrommessplatten bestimmt werden, abgeschätzt werden.

$$\lambda_{\text{eff,tot}} = \frac{d_m}{A_{\text{tot}}} \cdot \frac{1}{\sum \left(\frac{d_i}{A_i} \cdot \lambda_i \right)^{-1}} \quad (53)$$

In Gl. (53) ist A_{tot} die gesamte Fläche

$$A_{\text{tot}} = \sum A_i \quad (54)$$

und d_m die mittlere Dämmschichtdicke

$$d_m = \sum \left(\frac{A_i}{A_{\text{tot}}} \cdot d_i \right) \quad (55)$$

Die Übereinstimmung der Kurven ist gut im Falle von Labor 1, wenn die Wärmeleitfähigkeit durch Bilanzierung einer Schicht bestimmt wird. Da die Wärmedämmung der Abdeckung von Labor 1 durch eintretendes Speicherwasser aufgrund von Ausführungsfehler nass geworden ist (vgl. Kapitel 7.3), liefert die Bilanzierung des gesamten Speichers keine guten Ergebnisse. Für Labor 2 liefert die Bilanzierung des gesamten Speichers bessere Ergebnisse. Auch die Übereinstimmung der mittels Bilanzierung einer Schicht bestimmten effektiven Wärmeleitfähigkeit ist relativ gut.

Der Vergleich der drei Methoden zeigt, dass die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mittels Wärmestrommessplatten und Temperatursensoren gut geeignet ist, um Aussagen über den Zustand der Wärmedämmung und somit über die Qualität des Wandaufbaus zu treffen.

Durch den Vergleich der Messdaten im Außenlabor mit den im Innenlabor bestimmten Messwerten bzw. den Modellwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit, können Rückschlüsse auf den Wassergehalt der Wärmedämmung gezogen werden. In Tabelle 48 werden die Außenlabormesswerte (Werte der Ausgleichskurven) und die Modellwerte vergleichend gegenübergestellt. Die Modellwerte wurden mit dem jeweiligen Wassergehalt der Dämmung, der nach dem Rückbau der Außenlabors bestimmt wurde, berechnet.

Tabelle 48: Vergleich der Modellwerte mit Außenlabor-Messwerten (Werte der Ausgleichskurve aus Bild 6) bei unterschiedlichen Dämmstoffmitteltemperaturen (20, 35, 50 °C)

Ort	Dämmstoff	d / mm	λ_R ¹⁾ / W/(m K)	Wassergehalt (Messung) / kg/m ³	Außenlabormessung, Modell (basierend auf Innenlabormessung) ²⁾ in Klammern / W/(m K)		
					20 °C	35 °C	50 °C
			10 °C				
L1 C	EGG Typ II	2-4	0.080	n/a	Sensor ausgefallen		
L1 W1	EGG Typ I	2-4	0.070	0	0.07 (0.06)	0.08 (0.07)	0.08 (0.07)
L1 W2	EGG Typ I	2-4	0.070	145	0.10 (0.13)	0.14 (0.19)	0.19 (0.26)
L1 W3	EGG Typ I	2-4	0.070	n/a	keine Sensoren vorhanden		
L1 W4	EGG Typ I	2-4	0.070	0	0.06 (0.06)	0.06 (0.07)	0.07 (0.07)
L1 B	EGG Typ I	2-4	0.070	383	0.13 (0.19)	0.21 (0.26)	0.34 (0.36)
L2 C	FGG	0-90	0.080	n/a	0.09	0.10	0.10
L2 W1	EGG Typ II	4-8	0.080	n/a	keine Sensoren vorhanden		
L2 W2	EGG Typ II	4-8	0.080	n/a	0.07	0.11	0.15
L2 W3	EGG Typ II	4-8	0.080	n/a	keine Sensoren vorhanden		
L2 W4	EGG Typ II	4-8	0.080	n/a	0.06	0.07	0.09
L2 B	FGG	0-90	0.080	n/a	0.12	0.16	0.22

¹⁾ nach DIN 4108, ²⁾ Modellwerte sind mit den nach dem Rückbau gemessenen Wassergehalten berechnet

7.4.2.3 Langzeiteffekte

Bild 120 zeigt den Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Boden- und der Wanddämmung von Außenlabor 2 über den Zeitraum von 18 Monaten. Der Aufbau des Basislabors blieb über den Zeitraum unverändert. Es erfolgten Umbaumaßnahmen, so dass die 18 Monate Betriebsdauer in drei Phasen eingeteilt werden können.

Phase I: Testphase, Aufbau der Speicherwand und des Bodens entsprechend Kapitel 7.3: Basislabor 2 und Bentonitabdichtung entsprechend Kapitel 7.8, Speichermedium Kies-Wasser, keine Deckeldämmung

Phase II: Rückbauphase, Entfernung der Kiesschüttung und der Bentonitabdichtung, Bau des Erdreich-Wasser-Wärmespeichers (siehe Kapitel 7.9)

Phase III: Speicherhülle entsprechend Basislabor Kapitel 7.3, Speichermedium Erdreich/Sand-Wasser, Deckeldämmung: Schaumglasschotter 10-90 mm

Beim Rückbau des Labors 2 brach die Nordwand teilweise ein. Die Membranschalung wurde um bis zu 0.5 m nach innen gedrückt. Dadurch war die Position der Messfühler in der Nordwand nicht mehr exakt definierbar.

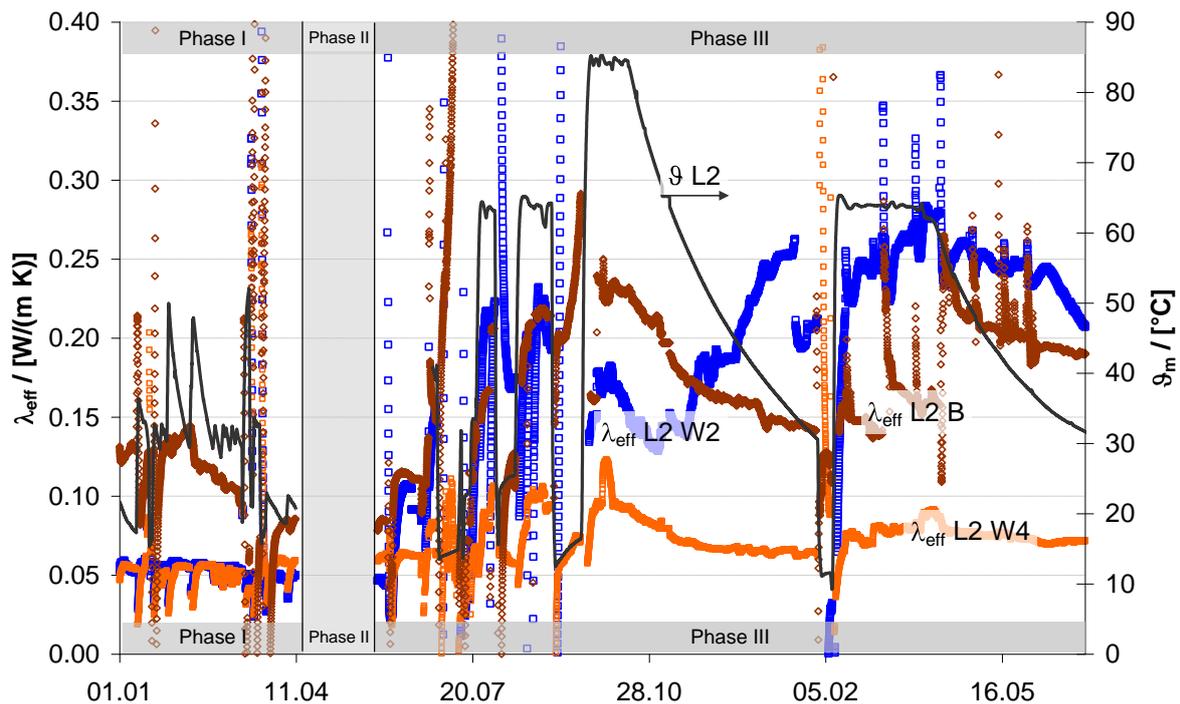


Bild 120: Mittlere Speichertemperatur und Entwicklung der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} der Wärmedämmung des Bodens (B), der Nord- (W2) und der Südwand (W4) von Labor 2 mit der Zeit

Aus dem Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit kann abgeleitet werden, dass die Wärmedämmung der Nordwand und des Bodens durch eindringendes Wasser bei Regen beeinflusst werden. Bei der Südwand dagegen ist dieser Effekt nicht festzustellen. Obwohl die Wärmedämmung nicht durch Regen oder Grundwasser beeinflusst wird, nimmt die effektive Wärmeleitfähigkeit in dem Zeitraum von 18 Monaten von 0.06 W/(m K) auf 0.08 W/(m K) zu. Ob sich Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hat, kann nicht eindeutig festgestellt werden. Der Verlauf deutet darauf hin, dass trotz des Einsatzes einer überlappend verlegten Dampfsperre, Feuchtigkeit in die Wärmedämmung eindrang.

7.4.2.4 Wärmedämmung ausgeführter Pilotprojekte

Beispiel: Kies-Wasser-Wärmespeicher in Steinfurt

In [3] sind Messdaten der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Steinfurt gegeben.

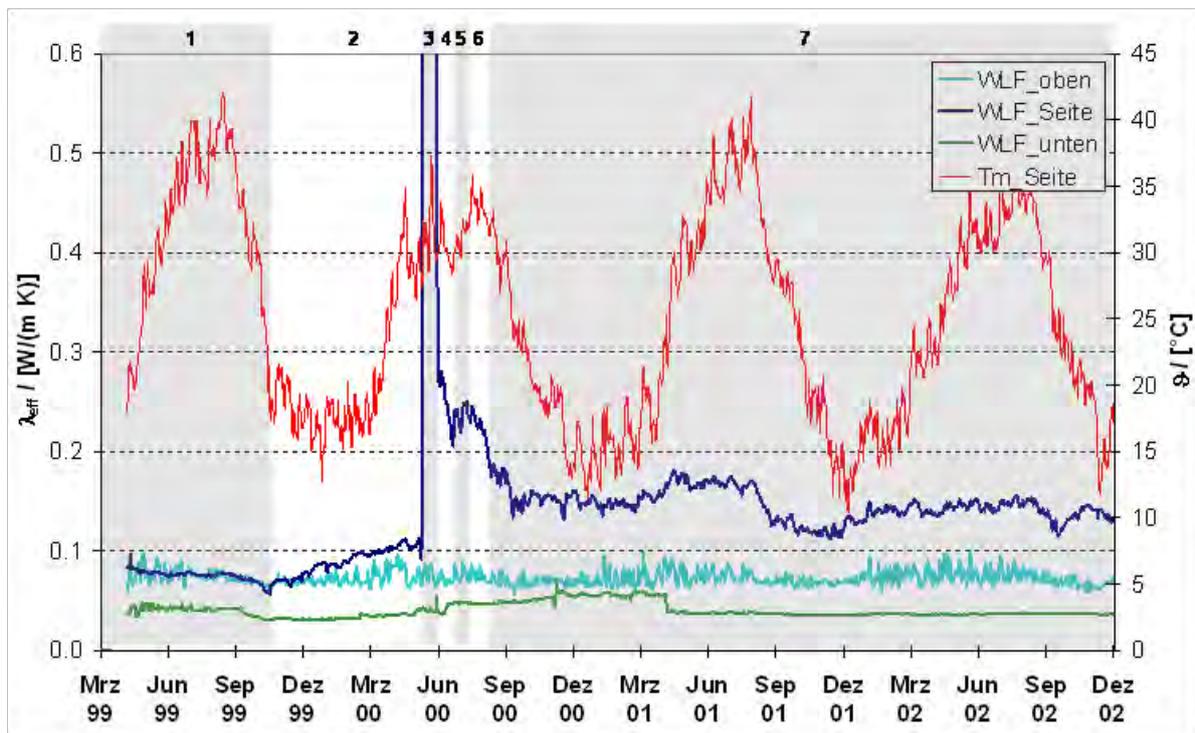


Bild 121: Messdaten der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Steinfurt-Borghorst (Daten IGS Braunschweig)

Die Messdaten werden entsprechend Bild 121 in Bereiche verschiedener Wassergehalte aufgeteilt. Trägt man die effektive Wärmeleitfähigkeit der Wanddämmung (WLF_Seite) dieser Bereiche getrennt als Funktion der Dämmstoffmitteltemperatur auf, erkennt man, dass sowohl mit zunehmender Feuchtigkeit als auch mit zunehmender Temperatur die effektive Wärmeleitfähigkeit zunimmt. Zusätzlich sind in Bild 122 Kurven der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit konstantem Wassergehalt aufgetragen. Die Kurven basieren auf Modellwerten die durch Messungen von Blähglasgranulat 2-4 mm gewonnen wurden (siehe Kapitel Wärmeleitfähigkeit).

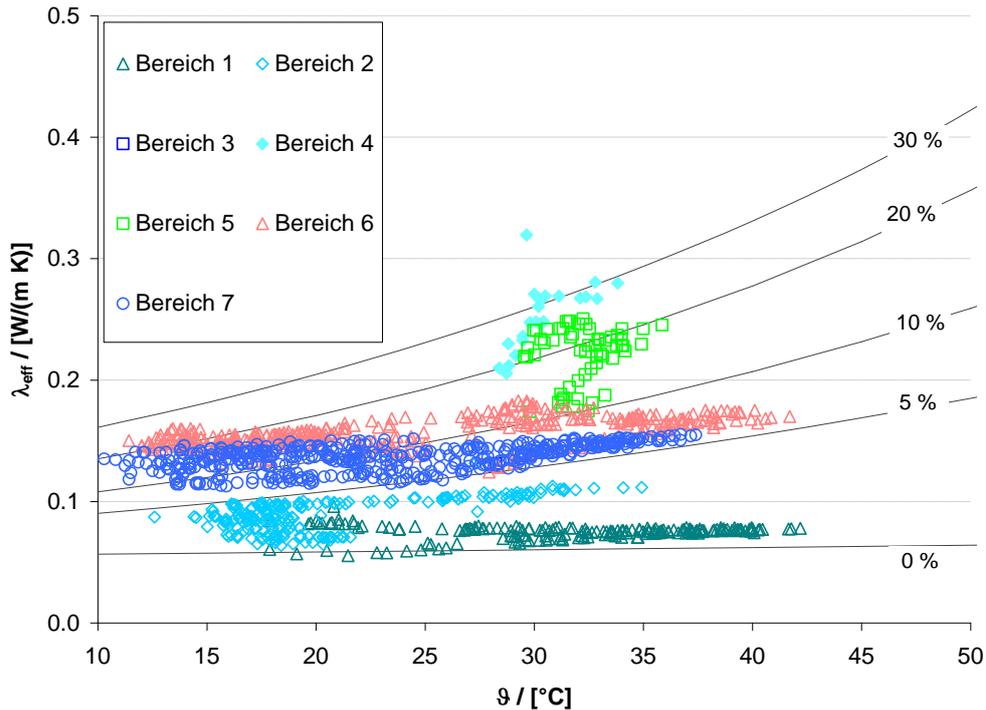


Bild 122: Vergleich der Messdaten der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit den Modellwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Blähglasgranulat

Die Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Bereich 3 liegen mit Werten über 0.5 W/(m K) außerhalb des Darstellungsbereichs. Den Bereichen 1-7 können entsprechend Bild 122 Wassergehalte zugeordnet werden:

Tabelle 49: Wassergehalt entsprechend Modellwerten aus Bild 122

Bereich	Wassergehalt [Vol.-%]	λ_{av} [W/(m K)]
1	0-2	0.07
2	2-5	0.10
3	>50	>0.60
4	20-30	0.25
5	10-25	0.23
6	10-20	0.17
7	5-15	0.14

Die Berechnungen lassen auf eine dauerhafte Verschlechterung der Dämmeigenschaften schließen, die durch verbleibende Feuchte sowie Eintrag von Schlammstoffen zu erklären ist.

7.4.2.5 Schlussfolgerung

Der Vergleich der berechneten Werte für die Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht im Außenlabor mit den im Innenlabor experimentell bestimmten Werten lässt Aussagen über den Wassergehalt des Dämmstoffs und somit über die Funktionalität der Abdichtung zu.

Der Vergleich der mittels Wärmestrommessplatten und Dämmstofftemperaturen ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung im Außenlabor mit den mit Hilfe des erweiterten Schichtenmodells berechneten Werte zeigt, dass

- auch geringe Feuchtigkeit (<10 Vol%) zu einer signifikanten Zunahme der Wärmeleitfähigkeit führt (hier: Faktor 4),
- die gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit gut mit den berechneten Werten übereinstimmen, somit auch das „Erweiterte Schichtenmodell“ zur Berechnung der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Dämmstoffen geeignet ist (vgl. Kapitel 6.3) und
- die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung von erdvergrabenen Wärmespeichern mittels Wärmestrommessplatten geeignet ist, um Aussagen über den Zustand der Dämmung zu treffen.

7.5 Integrierter Pufferspeicher

Wärmeversorgungssysteme mit Langzeit-Wärmespeicher können eine aufwändige hydraulische Verschaltung mit einem Pufferspeicher als zentraler Komponente aufweisen. Dieser Pufferspeicher ist notwendig, um die verschiedenen Wärmeerzeuger wie Solarkollektoren, Gas-Spitzenkessel und Wärmepumpe hydraulisch entkoppelt in das Gesamtsystem einzubinden und die Wärmeerzeuger vom Bedarfsprofil zu entkoppeln. Zusätzlich bietet das Puffervolumen Möglichkeiten für eine optimierte Regelstrategie zur Be- und Entladung des Langzeit-Wärmespeichers.

Die Integration eines aus Stahl hergestellten oder betonierten Pufferspeichers, wie im Pilotprojekt in Attenkirchen [47], [48] entwickelt, wäre für einen kostengünstigen Kies-Wasser-Wärmespeicher zu teuer. Es wurde untersucht, ob kostengünstige Kunststoffelemente, wie sie z.B. zum Bau eines Regenrückhaltesystems am Markt

angeboten werden, so in einen Kies-Wasser-Wärmespeicher eingebaut werden können, dass das durch sie aufgehaltene Wasservolumen als Puffervolumen dienen kann. Dies ist bei einem Hybridspeicher wie in Attenkirchen [47], [48] nicht möglich, da dort, im Gegensatz zum Kies-Wasser-Wärmespeicher, kein direkter Wasseraustausch zwischen dem Puffer- und dem eigentlichen Speichervolumen erfolgen kann. Somit sind die beiden Techniken zur Integration eines Pufferspeichers nicht vergleichbar.

Durch die Integration eines Pufferspeichers im Kies- oder Erdreich-Wasser-Wärmespeicher ergeben sich folgende Vorteile:

- Die Wärmeverluste des Pufferspeichers werden vollständig im Langzeit-Wärmespeicher genutzt.
- Es ist kein zusätzlicher Platz-/Raumbedarf in der Heizzentrale oder im Außenbereich für den Pufferspeicher erforderlich
- Die spezifische Pufferspeicherkosten können gegenüber wärmegeprägten Stahlspeichern stark reduziert werden
- Eine einfache hydraulische Verschaltung im Speicher wird möglich.

Bild 123 zeigt eine mögliche Lösung der Integration eines Pufferspeichers im Speichermedium (Kies/Erdreich) durch Füllkörper.

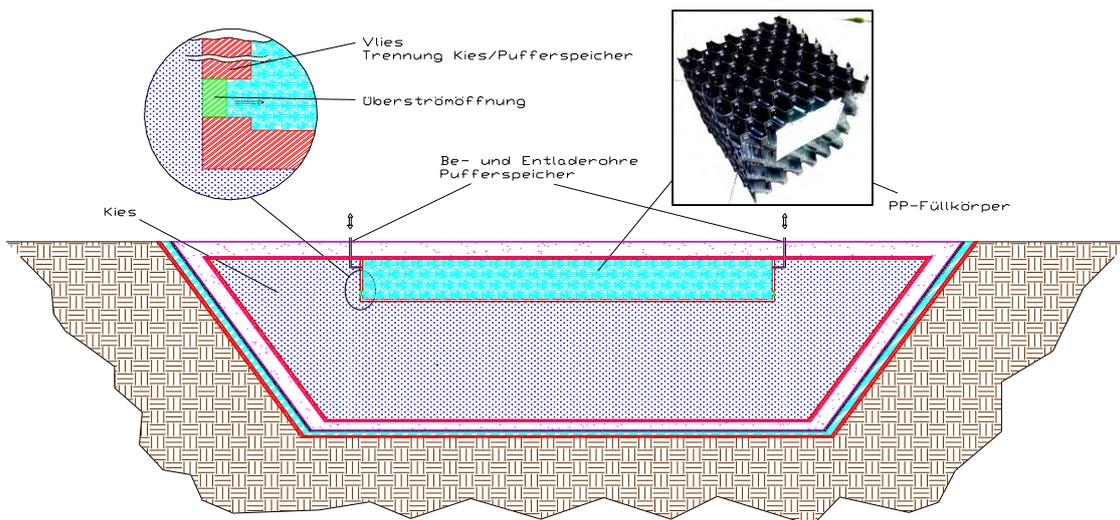


Bild 123: Schema zur Integration eines Pufferspeichers im Speichermedium, Quelle: PKi [170]

Es konnte keine kostengünstige Lösung gefunden werden. Das Konzept wurde nicht weiter verfolgt.

7.6 Direktes Be- und Entladesystem

Der direkte Wasser- und damit Wärmeaustausch ist im Vergleich zu Rohrschlangensystemen die kostengünstigste Lösung für große Erdbecken-Wärmespeicher.

Da die Pumpen bei direkten Austauschsystemen unter dem Wasserspiegel liegen müssen, sind bisher Pumpenschächte im Außenbereich der Speicher notwendig. Mit dem Lösungsansatz, den Pumpenschacht in den Speicher zu integrieren und überflutete Pumpen einzusetzen, lassen sich Kosten und Fläche einsparen (Bild 124).

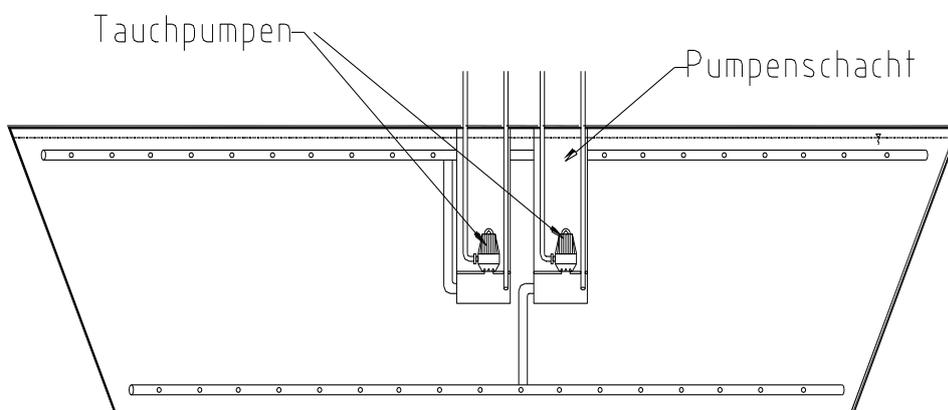


Bild 124: Direktes Beladesystem für Kies-Wasser-Wärmespeicher, Quelle: PKi [170]

Zur Integration der Pumpen in den im Speicher liegenden Pumpenschacht ist es vorteilhaft die Pumpen nicht fest unter Wasser zu installieren. Die Pumpen sollten, ähnlich wie die Beladetasse im Speicher in Hannover-Kronsberg, mittels flexibler Kunststoffschläuche angeschlossen werden, so dass sie bei Wartungsarbeiten aus dem zentralen Schacht geborgen werden können.

In [300] sind im Rahmen einer Diplomarbeit theoretische Untersuchungen zu direkten Beladesystemen für Kies-Wasser-Wärmespeicher zu finden. Das Konzept wurde nicht weiter verfolgt.

7.7 Schichtbeladesystem

Anstelle des Versuchs zum direkten Beladesystem wurde eine Schichtbeladeeinheit der Fa. Ratiotherm, wie sie auch in München und Crailsheim eingesetzt wird, eingebaut, vgl. Bild 125. Detaillierte Untersuchungen konnten bis Projektende nicht mehr durchgeführt werden. Erste Ergebnisse weisen daraufhin, dass sich bei Entladung eine Schichtung einstellt, jedoch der Speicher bei Beladung komplett durchmischt wird. Ein Grund dafür ist vermutlich, dass die Schichtbeladeeinheit zu niedrig ist.



Bild 125: Schichtbeladeeinheit aus PP der Fa. Ratiotherm mit Membranausdehnungsbehälter, vgl. Kapitel 7.11

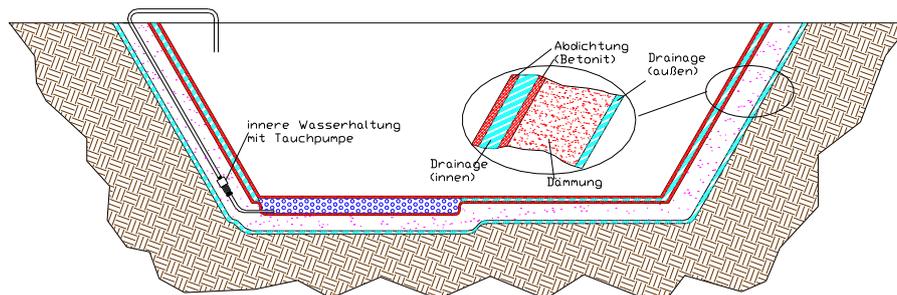
7.8 Speicherabdichtung mit kontrollierter Wasserdurchlässigkeit

7.8.1 Konzept

Die im Folgenden diskutierte Speicherabdichtung mit Bentonit kann nur im Kies- bzw. Erdreich-Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher, nicht aber im Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher zum Einsatz kommen.

Bisher werden Erdbecken-Wärmespeicher mit polymeren Abdichtfolien, wie HDPE oder PP ausgerüstet, die eine hundertprozentige Dichtheit gewährleisten müssen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass für eine hohe Betriebssicherheit ein doppelagiges System mit Prüfbarkeit (siehe z.B. System Steinfurt) notwendig ist.

Als alternativer Weg wird die Abdichtung über Bentonitmatten gesehen. Das Abdichtungssystem wird so aufgebaut, dass eine kontrollierte Undichtigkeit zugelassen wird und damit auf eine hundertprozentige Dichtheit verzichtet werden kann. Dies wird dadurch gewährleistet, dass Speicherwasser, welches durch die primäre Bentonitabdichtung vom Speicherinneren her permeiert, in einer Drainageebene aus Geogittern abgeleitet wird. Das Wasser wird in einer Filterkiesschicht gesammelt und durch eine interne Wasserhaltung in den Speicher zurückgepumpt (siehe Schema Bild 126).



**Bild 126: Speicherabdichtung mit kontrollierter Wasserdurchlässigkeit,
Quelle: PKi [170]**

Die zweite Dichtebene kann jedoch nicht, wie im ursprünglichen Konzept beschrieben (siehe dazu Projektantrag, [170]), mit Bentonitmatten aufgebaut werden, da der Widerstand gegen Dampfdiffusion nicht ausreichend ist, und somit ein Durchfeuchten der Dämmung nicht verhindert werden könnte. Weiterführenden Erklärungen sind im Folgenden in Kapitel 7.8.2 zu finden. Ergebnisse der Innenlaborversuche und theoretische Grundlagen zur Wasserdurchlässigkeit durch Bentonitmatten sind in Kapitel 6.1.1 zusammengefasst.

Im Gegensatz zum im Antrag vorgeschlagenen Konzept, könnte die äußere Dichtebene aus überlappend verlegten oder verschweißbaren Dampfsperrbahnen

bestehen. Diese müssen in Filterkiesschicht des Bodens einbinden, um ein Durchfeuchten der Bodendämmung zu verhindern. Die Bodendämmung muss derart ausgeführt werden, dass durch die innere Bentonitabdichtung durchtretendes Wasser ebenso in die Filterkiesschicht eingeleitet werden kann.

7.8.2 Versuchsdurchführung

7.8.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuch 3 „Kontrollierte Durchlässigkeit“ mittels Bentonitabdichtung wurde in Labor 2 Ende November 2004 aufgebaut. Nach dem Aufbringen der Drainageschicht auf die bereits auf Dichtigkeit geprüfte EPDM-Abdichtung und dem Einbringung des Drainageschachtes, wurden die Bentonitbahnen überlappend verlegt und mit einem weiteren Schutzvlies abgedeckt. In Bild 127 sind zwei Arbeitsschritte dargestellt.



Bild 127: Verlegung in breiten Bahnen, Kanten werden mehrfach überlappend ausgeführt

Vor der Füllung mit Wasser wurde der Speicher mit gewaschenem Kies gefüllt. Die Füllstandhöhe des Wassers liegt 50 cm niedriger als die Kiesfüllhöhe, damit genügend Auflast (Quellgedruck) gewährleistet ist. Des Weiteren wird durch den Schutzvlies und die Kieslast ein Auswaschen des Bentonits verhindert.

Die Füllung mit Wasser erfolgte im Dezember. Der Füllstand des Speicherinhalts wurde kontinuierlich gemessen. Der Füllstand im Drainagerohr wurde manuell gemessen.

7.8.2.2 Auswertung

Der Drainageschacht füllte sich sofort mit Wasser. Es gab somit keinen Zweifel, dass die Bentonitabdichtung undicht war. Auch nach mehreren Pumpversuchen (1 x Januar, 2 x März) ergaben sich keine Änderungen.

Es musste davon ausgegangen werden, dass die Bentonitmatten entweder beschädigt und/oder nicht sachgemäß eingebaut wurden. Weder durch Pumpversuche noch durch Auswertung von Temperaturmessdaten konnte die Undichtigkeit eindeutig lokalisiert werden.

Nur durch vollständigen Rückbau des Außenlaborversuchs konnte festgestellt werden, ob es sich um Versagen des Materials oder um unsachgemäßen Einbau handelt. Zum Rückbau des Bentonitversuchs wurde auch ein Spezialist der Fa. Naue, die das Abdichtungsmaterial (Bentonitmatte BFG5000) kostenlos geliefert hatte, konsultiert.

Durch die Witterungsverhältnisse konnte der Rückbau erst im April durchgeführt werden. Der Rückbau ergab eindeutig, dass die Undichtigkeit durch nicht sachgerechte Verlegung hervorgerufen wurde. Am Material selbst konnten keine Unregelmäßigkeiten festgestellt werden. Folgend sind Bilder von Stellen mit möglichen Undichtigkeiten dargestellt:



Bild 128: Mögliche Undichtigkeitsstellen – links oben: Verlegung von Gewebe auf Gewebe; rechts oben: Faltenbildung durch Absackung; rechts unten: Falte im Eckbereich des Bodens

Die Undichtigkeit wurde eindeutig durch unsachgemäßen Einbau der Bentonitmatten hervorgerufen.

7.8.3 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ergab der Rückbau des Bentonitversuchs, dass das Konzept „Abdichtung mit kontrollierter Durchlässigkeit“ nicht aufgegeben werden sollte, sondern eine Wiederholung des Versuchs anzustreben ist.

Bentonitmatten bieten keine vollkommene Dichtheit. Sie können lediglich zur Primärabdichtung eingesetzt werden. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird für den Einbau von BFG5000 in einem Erdbecken-Wärmespeicher empfohlen, die Bentonitmatten mit einem Schutzvlies zu überdecken. Es sollte auch darauf geachtet werden, dass eine ausreichend schwere Auflast auf den Matten ruht um ein Ausschwemmen zu verhindern. Hierbei sollte ein Verhältnis von Wassersäule zu Kieswassersäule unter eins angestrebt werden, da so die in den

Böschungsbereichen eingebauten Bentonitmatten ebenfalls belastet werden können. Unterhalb der Bentonitmatte sollte eine Drainageschicht so ausgelegt werden, dass eventuell auftretende plötzliche Wasserdurchtritte in einem zufriedenstellenden Maß abgeführt werden können. Es ist sinnvoll eine leistungsstärkere Drainagepumpe einzubauen. Ein doppelagiger Einbau von BFG5000 könnte das Risiko derartiger Wasserdurchtritte erheblich minimieren. Die Dämmschicht sollte in jedem Fall mit einer Dampfspererschicht oder Kunststoffdichtungsbahn vor Befeuchtung geschützt werden.

Neben dem gedachten Einsatz als innere Abdichtung kann Bentonit auch als äußere Abdichtung in grundwasserhaltigen Böden zum Einsatz kommen (Weiße Wanne). Die Dampfdiffusion spielt dort, da sich die Bentonitabdichtung außerhalb der Dämmung befinden würde, keine Rolle.

7.9 Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe

7.9.1 Motivation

Bei großen Erdbecken-Wärmespeichern (ab 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 Wärmespeichermedium 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 129).



Bild 129: Rohrschlängensystem im Kies-Wasser Speicher Steinfurt-Borghorst (1999), [3]

Da die Länge und damit die Kosten der Kunststoffrohre linear mit der Speichergröße steigen, wird das Einsparpotential der Speicherfüllung durch das aufwändige Rohrschlängensystem wieder kompensiert. In Tabelle 50 sind bereits realisierte Kies-Wasser- bzw. Sand-Wasser-Wärmespeicher aufgelistet.

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 50 angegebenen Längen der Kunststoffrohrschlangen-Wärmeübertrager (WÜ-Länge) bzw. die Werte für das Verhältnis von Wärmeübertragerfläche zu Volumen (V) des Speichers ($A_{WÜ}/V$).

Tabelle 50: Auswahl realisierter Kies-Wasser- bzw. Sand-Wasser-Wärmespeicher und zum Vergleich Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm

Ort	Land	Datum	Volumen	Medium	Beladung	WÜ-Länge	Quelle
			in m ³			in m	
Stuttgart	D	1983	1 000	KW	D + I	4 853	[59]
Vaulruz	CH	1983	3 500	EW	I	1 200	[56]
Chemnitz	D	1996	8 000	KW	D	-	[80]
Marstal	DK	1996	3 500	SW	I	5 000	[28]
Augsburg	D	1997	6 000	KW	I	20 000	[85]
Steinfurt	D	1999	1 500	KW	I	7 000	[88]
Neckarsulm	D	1997	63 360	ES	I	15 840	[122]

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

7.9.2 Konzept

Das Konzept Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe oder Kies wurde entwickelt, um die Kosten von Erdreich-Erdbecken-Wärmespeicher weiter zu reduzieren. Bei großen Erdbecken-Wärmespeichern ($10.000 \text{ m}^3_{\text{WÄ}}$) mit günstigem A/V-Verhältnis liegt ein wesentliches Kostenreduktionspotential beim Speichermedium selbst. Ist am Speicherstandort kein Kies vorhanden und lässt sich der Erdaushub wiederverfüllen, so liegt es nahe, diesen als günstiges Wärmespeichermedium zu nutzen (alternativ ist auch die Verfüllung von Bauschutt denkbar). Man spart einerseits die Deponiekosten für den Aushub und andererseits die Kosten für den Kies. Nachteilig bei dieser Technologie ist der bisher notwendige Einsatz eines indirekten Be- und Entladesystems über im Erdreich verlegte Kunststoffrohre. Da die Länge und damit die Kosten der Kunststoffrohre linear mit der Speichergröße steigen, wird das Einsparpotential der Speicherfüllung durch das aufwendige Rohrschlängensystem wieder kompensiert.

Der Weg zu einem kostengünstigen Erdreich/Wasser-Wärmespeicher führt also nur über ein einfaches und kostengünstiges Be- und Entladesystem. Einen Ansatz für ein solches System zeigt beispielhaft Bild 130. Durch horizontale und vertikale Wasserwege, die mit Kiesschichten oder mit Drainagegittern geschaffen werden, soll eine Durchströmung des gesamten Speichermediums gewährleistet werden. Die Wasserwege müssen vom umgebenden Erdreich durch Vliesstoffe¹¹ getrennt werden, damit ein Ausschwemmen von Partikeln aus dem Erdreich und ein Zusetzen der Wasserwege dauerhaft verhindert wird.

¹¹ Am Markt ist eine Vielzahl von Vliesstoffen (Geokunststoffe bzw. Geotextilien) verfügbar, vgl. [121].

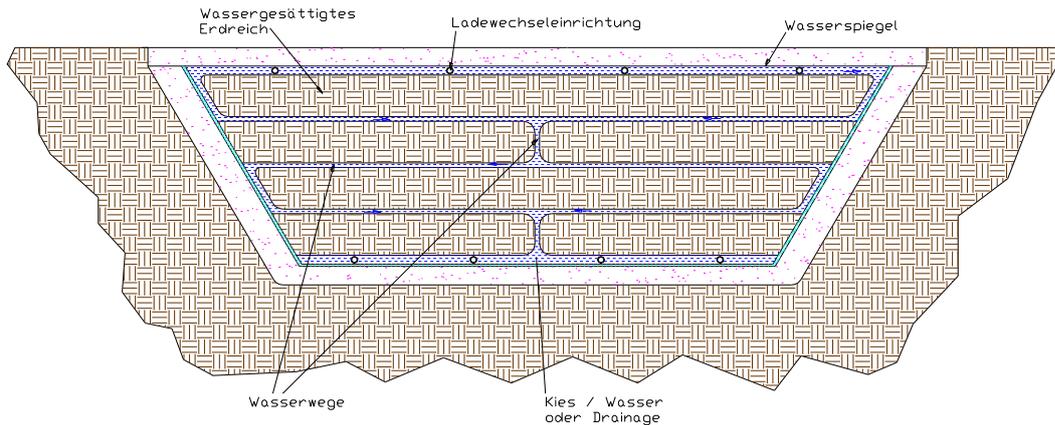


Bild 130: Erdreich/Wasser-Wärmespeicher mit einer Wärmeübertragung durch Wasserwegsamkeit, Quelle: PKi [170]

Die Entwicklung möglicher Systeme, bestehend aus Geogitter (Drainage) und Geotextilien (Vliesstoffe) sowie deren Tauglichkeitsbewertung für die Erzeugung einer Wasserwegsamkeit in Zusammenarbeit mit den Herstellern der Materialien, wurden in der Diplomarbeit „Entwicklung einer Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe oder Kies für einen Erdreich/Wasser-Wärmespeicher“ [301] untersucht.

Zwei Konzepte stellten sich als durchführbar heraus:

1. Kies und Vliesstoff
2. Drainsystem (Geogitter) und Vliesstoff

Beide Konzepte haben jeweils Vor- und Nachteile, jedoch konnten keine Ausschlusskriterien festgestellt werden. Da vor allem bei hohen Temperaturen (über 60 °C) die Druckbeständigkeit der Drainsysteme nicht gewährleistet ist, wurde System 1 für die weiteren Betrachtungen ausgewählt.

Theoretische Untersuchungen der Wasserwegsamkeit (Durchflussmengen, Widerstände) in Kiesschichten und in Geogittern durch strömungstechnische Simulationen für das Konzept 1 (Wasserwegsamkeit mittels Kiesschichten), wurden durchgeführt. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen wurde ein System unter Beachtung praxiserer Montagemöglichkeiten realisiert. Die detaillierte Beschreibung des Außenlaborversuchs ist in Kapitel 7.9.3 beschrieben.

Messergebnisse und Vergleiche der Daten mit CFD-Simulationsergebnissen sind in den Kapiteln 7.9.4 und 7.9.5 zu finden.

7.9.3 Versuchsaufbau

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 131).

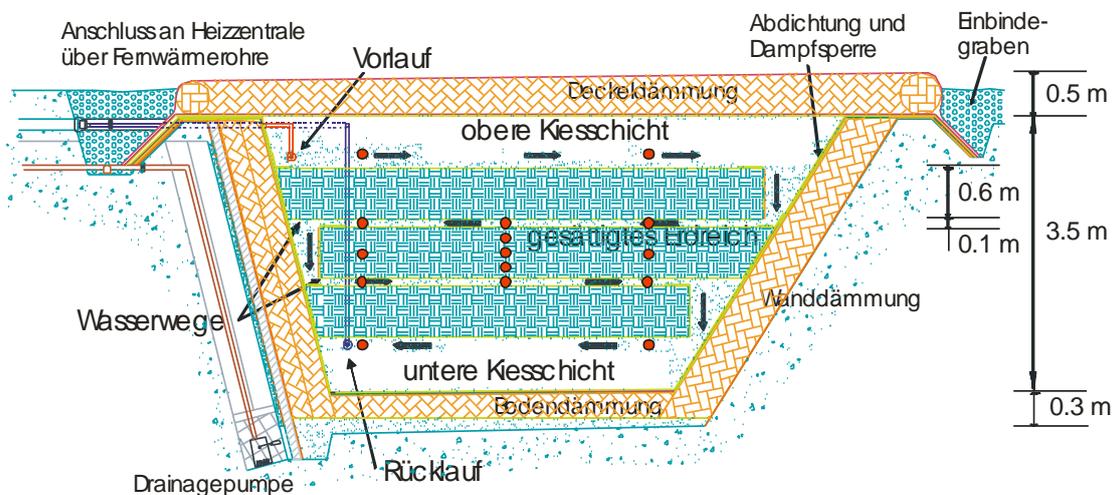


Bild 131: Schema des Erdreich-Wasser Erdbecken-Wärmespeichers mit Kiesschichten als Wasserwege (die Pfeile zeigen die Strömungsrichtung beim Beladen, die Punkte markieren die Lage der Temperatursensoren)

Der Erdreich-Wasser-Forschungs-Wärmespeicher wurde mit einem Volumen von rund 100 m^3 in einer komplett wärmeisolierten Grube mit einem Bruttovolumen von 200 m^3 gebaut (siehe Bild 132). Anstelle des Aushubs wurde Feinsand benutzt. Um ein Ausschwemmen von Erdreichpartikeln zu verhindern, wurden die Erdreichschichten in geotextile Vliesstoffe eingepackt. Der Wärmetransport soll in die wassergesättigten Erdreichpakete ausschließlich über Wärmeleitung erfolgen. Das Verhältnis von Wärmeübertragungsfläche zu Speichervolumen beträgt $A_{W\ddot{u}}/V = 2.8 \text{ m}^{-1}$.



Bild 132: Bau des Forschungsspeichers, links Einbringen der Sandschicht und rechts Einpacken der fertigen Schicht in Vliesstoffe, um das Ausschwemmen des Sandes zu verhindern; vertikale Kiesschicht am rechten Rand des Speichers

Alternativen zur hier gezeigten Bauweise für ein direktes Be- und Entladesystem durch die Herstellung einer so genannten Wasserwegsamkeit sind in [301] zu finden.

Die Überprüfung des Konzepts erfolgte sowohl durch Messung, als auch durch CFD-Simulationen.

7.9.4 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 im Außenlabor-Wärmespeicher, als auch Vergleichsrechnungen mit dem kommerziellen CFD-Programm Fluent [367] 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:

$$-grad(p) = \frac{\eta}{K} \cdot w \quad (56)$$

mit

$$w = \frac{\dot{V}}{A \cdot \varepsilon} = \frac{\dot{m}}{A \cdot \varepsilon \cdot \rho} \quad (57)$$

K ist die Permeabilität, die in Abhängigkeit der Porosität ε und des Partikeldurchmessers d mit folgender Gleichung abgeschätzt werden kann:

$$K = \frac{d^2 \cdot \varepsilon^2}{A \cdot (1 - \varepsilon)^2} \quad (58)$$

Für A in Gleichung (57) kann nach verschiedenen Autoren, [80], [302] und [303] 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 [302] über eine quadratische Beziehung abschätzen:

$$-grad(p) = \left(\frac{A \cdot \alpha_\varepsilon \cdot \eta}{d^2} \right) \cdot w + \left(\frac{B \cdot \beta_\varepsilon \cdot \rho}{d} \right) \cdot w^2 \quad (59)$$

mit

$$\alpha_\varepsilon = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (60)$$

und

$$\beta_\varepsilon = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (61)$$

A und B sind empirische Werte. Für die Modellierung der Strömungen in porösen Medien steht in Fluent [367] folgendes analoges Modell zur Verfügung:

$$-grad(p) = \left(\frac{\eta}{\alpha} \right) \cdot w + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \right) \cdot w^2 \quad (62)$$

Die für die Berechnung verwendeten Stoffdaten und die notwendigen Koeffizienten sind in Tabelle 51 gegeben.

Tabelle 51: Stoffwerte der Materialien und Transportkoeffizienten ([59], [80], [303])

			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	-	-	-	-
Viskositäts-widerstand	α	m ²	5.03E-07	-	-	-	-
Trägheitswiderstand	C	1/m	1719.4	-	-	-	-

Die berücksichtigte Geometrie für die 2D-Berechnungen ist in Bild 133 schematisch dargestellt:

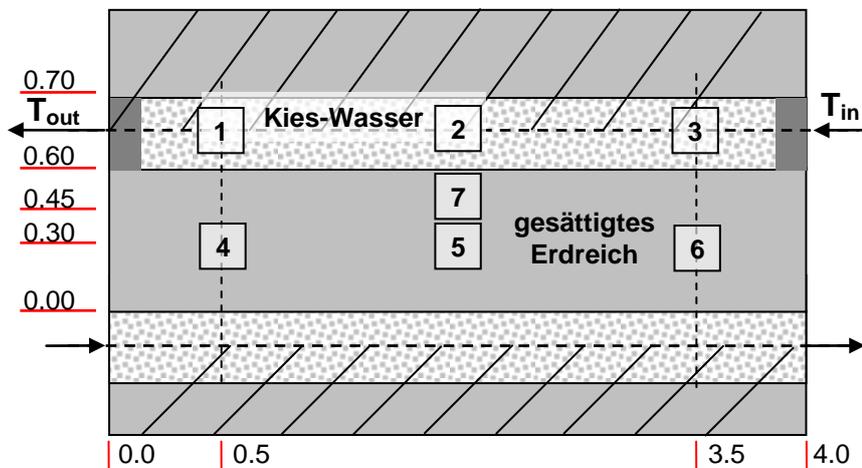


Bild 133: Geometrie des Modells (in m) für die Berechnungen. Die ersten 10 cm der Kiesschicht (Inlet, Outlet) werden aus numerischen Gründen als reines Fluid betrachtet. Das schraffierte Gebiet wird aus Gründen der zeitlichen Optimierung der Rechnung nicht berücksichtigt (Symmetrie). 1-7: Lage der Temperatursensoren. $A_{wü}/V = 2.8$.

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 134 zeigt den Einfluss auf den Verlauf der Kies- und der Sandtemperaturen:

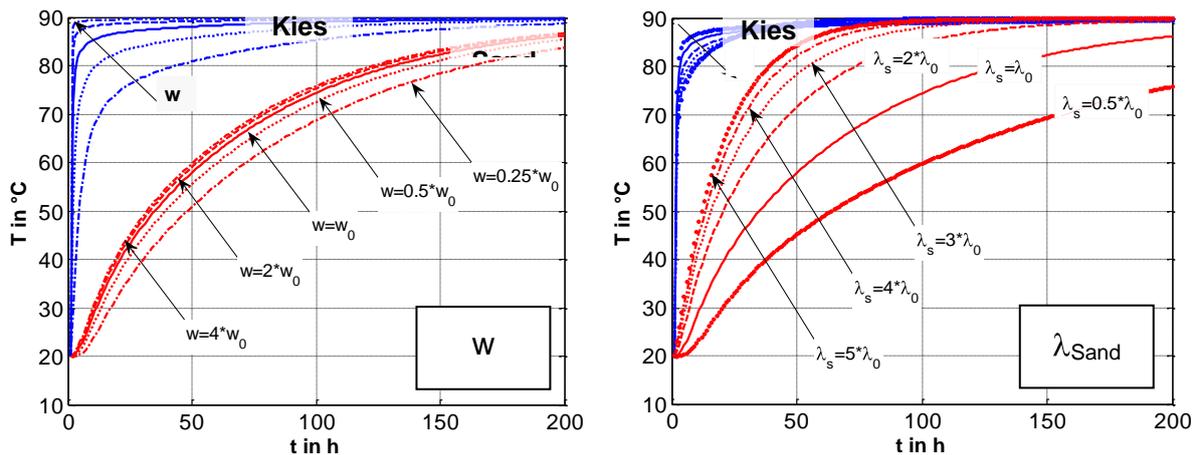


Bild 134: Zeitlicher Verlauf der mittleren Kies- und Sandtemperaturen; Variation der Parameter Strömungsgeschwindigkeit ($w_0 = 2.97 \text{ m/h}$) linkes Diagramm und Wärmeleitfähigkeit des Sandpakets $\lambda_{\text{Sand},0} = 2.4 \text{ W/(m K)}$ rechtes Diagramm

Die Strömungsgeschwindigkeit (w) hat nur geringen Einfluss auf den Temperaturverlauf in der Kies- und in der Sandschicht. 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 134, links). Jedoch ändert sich der Temperaturverlauf in der Sandschicht deutlich durch Variation der Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Sandpakets (Bild 134, rechts).

7.9.5 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 und Gaskessel) gekoppelt sind. Die Be- und Entladung wurde sowohl mit verschiedenen Solltemperaturen (40 °C , 60 °C , 80 °C), als auch mit verschiedenen Volumenströmen durchgeführt.

In Bild 135 sind die Temperaturprofile vor der Beladung (30 °C) bis nach der Beladung mit 60 °C dargestellt. Es handelt sich um mit Matlab® visualisierte Messdaten.

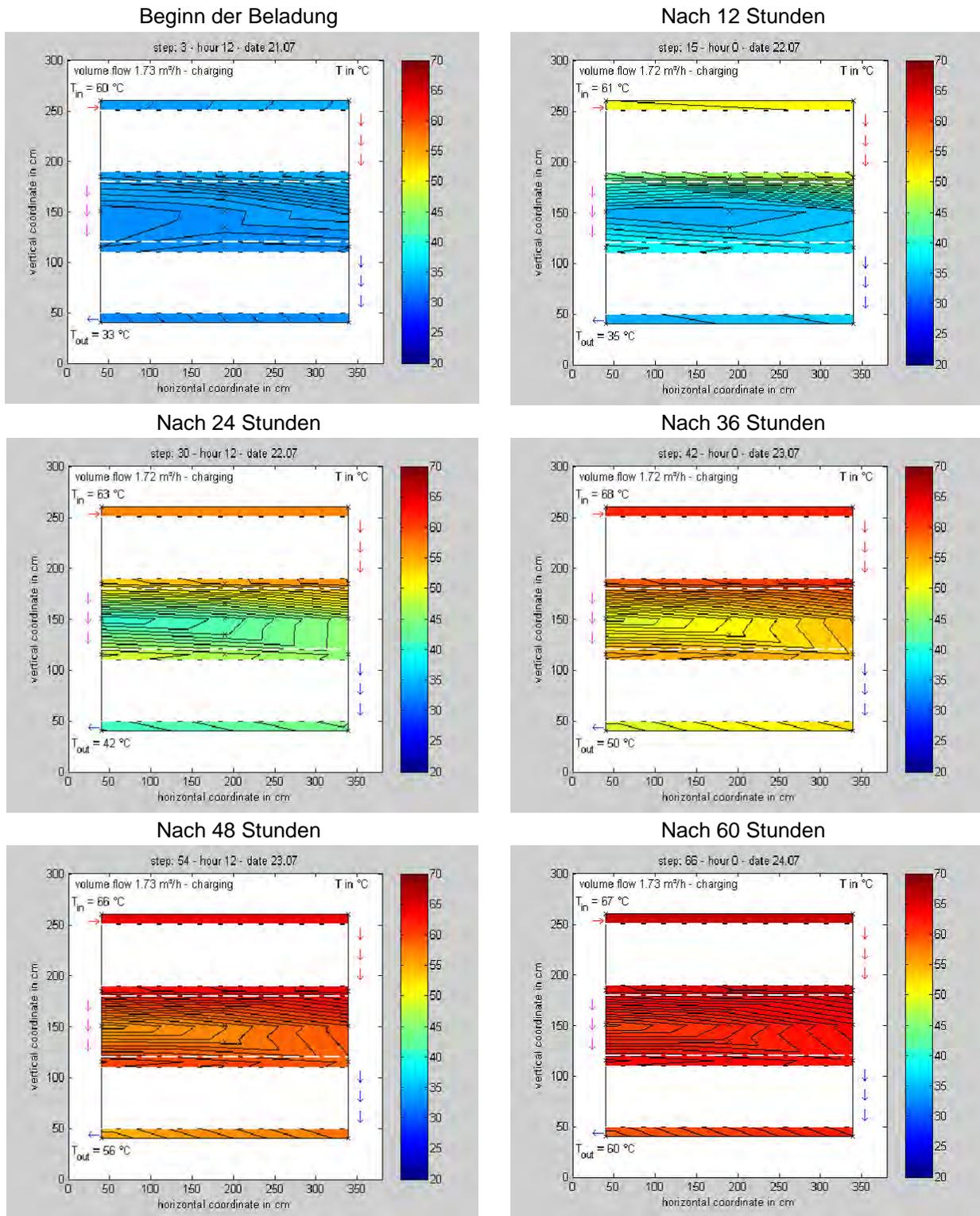


Bild 135: Verlauf der Beladung des Erdreich/Wasser-Erdbecken-Wärmespeichers, nach 60 Stunden ist der Speicher fast durchgeladen, (Profile: mit Matlab® visualisierte Messdaten).

Im Profil sind die oben und unten liegenden Kiesschichten weiß eingefärbt, da dort keine Sensoren eingebaut wurden¹². Die mittlere Sandschicht ist mit fünf Temperaturfühlern versehen. In den Kiesschichten über und unter der Sandschicht sind jeweils drei Temperaturfühler platziert.

Es zeigt sich, dass sich erwartungsgemäß, die Sandschicht langsamer als die Kiesschicht erwärmt. Der Wärmestrom kann aber in die wassergesättigte Sandschicht eingebracht werden.

In Bild 136 werden Mess- und Simulationswerte für eine Beladung mit $T_{\text{soll}} = 80 \text{ °C}$ bei einem Volumenstrom von $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$ gegenübergestellt. Messwerte der darüber liegenden Kiesschicht (vgl. Bild 131 und Bild 133) werden für die Wassereintrittstemperatur eingelesen.

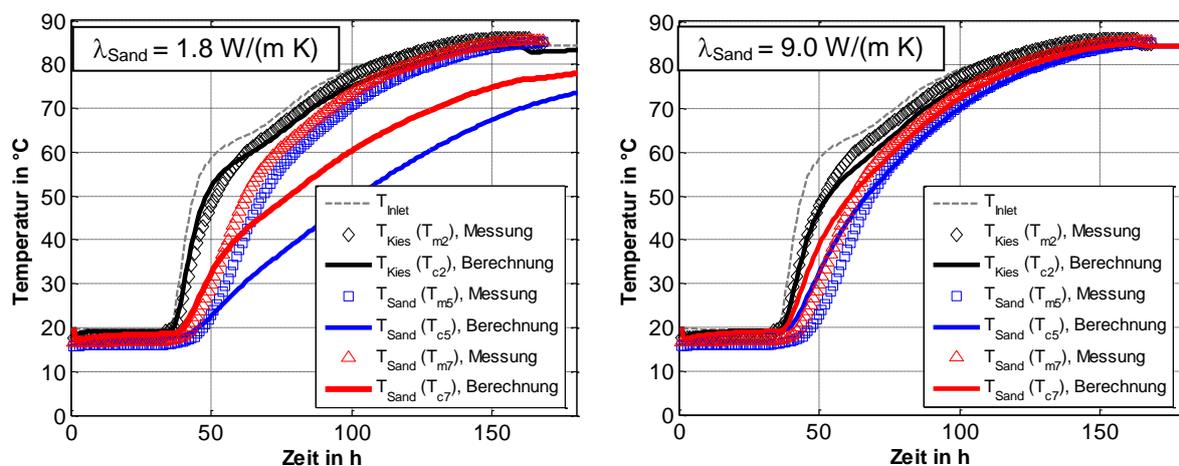


Bild 136: Vergleich der Mess- und Simulationsdaten für verschiedene Werte der Wärmeleitfähigkeit des Sandpakets (λ_{Sand})

In Bild 136 ist zu erkennen, dass sich die gesättigte Sandschicht langsamer als die durchströmte Kiesschicht erwärmt, die Wärme kann aber in die wassergesättigte Sandschicht eingebracht werden. Der Vergleich der Messung mit der Rechnung in Bild 136 zeigt aber, dass im Außenlabor die Wärme in das Sandpaket nicht nur über Wärmeleitung, sondern auch über Konvektionsströme eingebracht wird. Denn nur für

¹² Temperaturen in diesen Bereichen werden somit nur durch Interpolation berechnet.

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 wie im Versuch 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, [304]) 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 137 dargestellt.

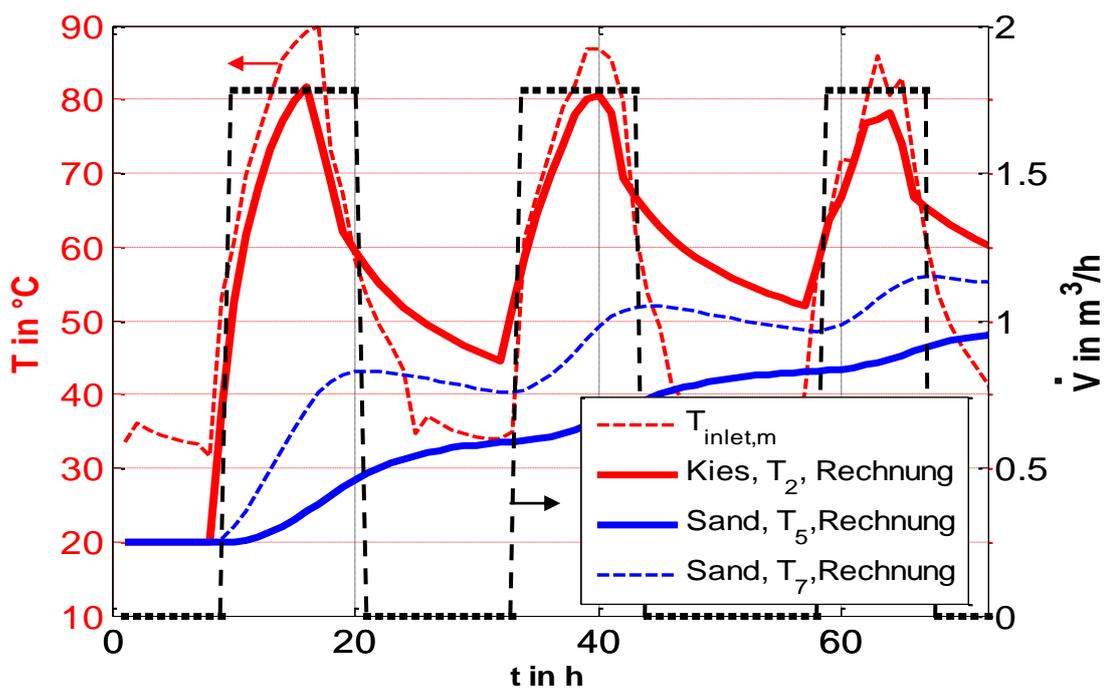


Bild 137: Simulationsergebnisse für Beladung mit zyklischer Beladetemperatur (Messdaten einer Solaranlage in Stuttgart Vaihingen [304]), $d_{\text{Sand}} = 0.6 \text{ m}$, $\lambda_{\text{Sand}} = 2.4 \text{ W}/(\text{m K})$, $c_p = 1800 \text{ J}/(\text{kg K})$, Lage der Temperaturmessstellen entsprechend Bild 133

Die Kiestemperatur in Bild 137 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 Rücklaufemperatur 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.

7.9.6 Schlussfolgerungen zum Versuch Wasserwegsamkeit

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.

7.10 Speicherabdeckung für Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher

7.10.1 Grundlagen

Es gibt prinzipiell zwei unterschiedliche Möglichkeiten, schwimmende Abdeckungen zu gestalten:

- einen modularen Aufbau und
- einen nicht-modularen Aufbau

7.10.1.1 Modularer Aufbau

Eine modular aufgebaute schwimmende Abdeckung setzt sich aus mehreren Einzelementen zusammen, die miteinander verbunden sind. Jedes Element besteht aus einer Schicht Wärmedämmung, die wasser- und dampfdicht verpackt ist. Diese Umhüllung kann aus Edelstahl oder aus einer Kunststoffdichtungsbahn sein. Die Verbindung der einzelnen Elemente untereinander kann durch Verspannen, Verkleben oder Verschweißen erfolgen.

Während der Montage einer modular aufgebauten schwimmenden Abdichtung, werden die einzelnen vorgefertigten Elemente nach und nach miteinander verbunden. Die Abdeckung wird also Stück für Stück in horizontaler Richtung zusammengesetzt.

Die Vorteile der modularen Bauweise liegen in der Möglichkeit, Elemente vorzufertigen und diese bei Bedarf auch einzeln auswechseln zu können, ohne dass die gesamte Abdeckung abgebaut werden muss. Zudem ist die Montage einer solchen Pontoon-ähnlichen Konstruktion relativ einfach, da bereits installierte Elemente betreten werden und von dort aus nachfolgende Module angebracht werden können.

Die Schwierigkeit bei modular aufgebauten Abdeckungen liegt vor allem darin, die Fügstellen der einzelnen Elemente wärmebrückenfrei und dampfdicht zu gestalten. Dasselbe gilt für die Randanbindung der Abdeckung. Da jede Umhüllung komplett um die Wärmedämmung herumgezogen ist, stellt sie eine Wärmebrücke in vertikaler Richtung dar. Besonders schwierig ist es, Eckverbindungen dampfdicht zu gestalten, da dort bis zu vier Elemente aufeinander treffen. Ein Nachteil sind auch die vielen Verbindungsnahte, die bei der Abdichtung der einzelnen Elemente gezogen werden müssen. Bestehen die Module aus Edelstahlkästen, können sie aufgrund ihres Gewichtes nur mit einem Kran montiert werden.

7.10.1.2 Nicht-Modularer Aufbau

Im Gegensatz zur modularen erfolgt die Montage bei der nicht-modularen Bauweise in vertikaler Richtung. Einer komplett über den Speicher gezogene Abdichtung folgt im einfachsten Fall die Dämmschicht und eine zweite Abdichtung. Die Installation erfolgt also schichtenweise. Die verwendeten Materialien zur Abdichtung können Edelstahl oder Kunststoff sein.

Bei dem nicht-modularen Aufbau sind keine Verbindungsfugen zwischen einzelnen Elementen vorhanden. Auch Wärmebrücken in vertikaler Richtung sind konstruktionsbedingt im Gegensatz zur modularen Abdeckungen keine Notwendigkeit. Die Gewährleistung der Dampfdichtigkeit und der Wärmedämmung ist deshalb einfacher als bei modular aufgebauten Konstruktionen.

Nicht-modular aufgebaute Abdeckungen können nicht vorgefertigt werden. Alle Arbeiten müssen auf der Baustelle durchgeführt werden und sind dadurch stark wetterabhängig. Nachteilig wirkt sich auch die schlechte Reparierbarkeit der Abdeckung aus. Versagt die untere Abdichtungsschicht, kann diese nur mit hohem Aufwand repariert werden, indem die komplette Abdeckung abgebaut wird oder aber eine Reparatur aus dem Speicherinneren heraus erfolgt.

7.10.2 Stand der Technik schwimmender Abdeckungen

In den letzten 30 Jahren wurden 13 Projekte mit Heißwasser-Wärmespeicher mit schwimmender Abdeckung bearbeitet. Jedoch wurde nur bei acht Projekten die schwimmende Abdeckung auch realisiert, siehe Tabelle 52.

Tabelle 52: Geplante und realisierte schwimmende Abdeckungen (Details in [6], [115])

Projekt	Land	Quelle	Jahr	Dimensionen	Bemerkung
Wales	UK	[55]	1977	n/a	gebaut (Butyl, Polystyren)
Studsvik	S	[5],[6],[33]	1978	Ø 16 m	modular (2 mm Butyl, 20 cm PUR), gebaut
Lombohov	S	[5],[6],[34]	1980	Ø 32.4 m	modular (2 mm Butyl, 20 cm PUR), gebaut
Lyngby	DK	[57],[58]	1983	16 m x 16 m	modular (1 mm Butyl, 50 cm PS, 2.5 mm PE), gebaut
Mannheim	D	[108],[109],[110]	1983	50 m x 75 m	modular (PUR), nicht gebaut
Wolfsburg	D	[111]	1984	51 m x 51 m	Foamglas, nicht gebaut
Hjortekaer	Dk	[19]	1984	Ø 40.8 m	k.A., nicht gebaut
Berlin	D	[64],[65],[66],[67]	1986	12.75 m x 12.75 m	VSI Elemente (evakuierte Dämm-Elemente), gebaut
Ottrupgaard	DK	[6],[28],[72],[76]	1995	25 m x 25 m	modular (0.5 mm Edelstahl, 23 cm PUR, mit Kunststoff beschichteter Stahl), gebaut
Jülich	D	[116],[117]	1996	26 m x 26 m	modular, Steinwolle, 1:10 Modell gebaut
Lyngby	DK	[29],[30]	2001	6 m x 16 m	V2A, Mineralwolle, gebaut
Marstal	DK	[12],[91],[92]	2003	65 m x 42 m	HDPE, Mineralwolle, EPS, gebaut
Stuttgart	D	[115],vgl. Kapitel 7.10.3	2005	8 m x 8 m	Aufschwimmende Abdeckung, TPE, Blähglasgranulat, gebaut

Nicht-modular aufgebaute Abdeckungen sind einfacher zu gestalten als modular aufgebaute. Es ergeben sich weniger Verbindungsstellen, weniger Wärmebrücken und die Gewährleistung der Dichtheit ist einfacher. In allen Projekten, die eine modulare Bauweise vorsahen, gestaltete sich die Verbindung der einzelnen Elemente (vgl. Bild 138) als schwierig.

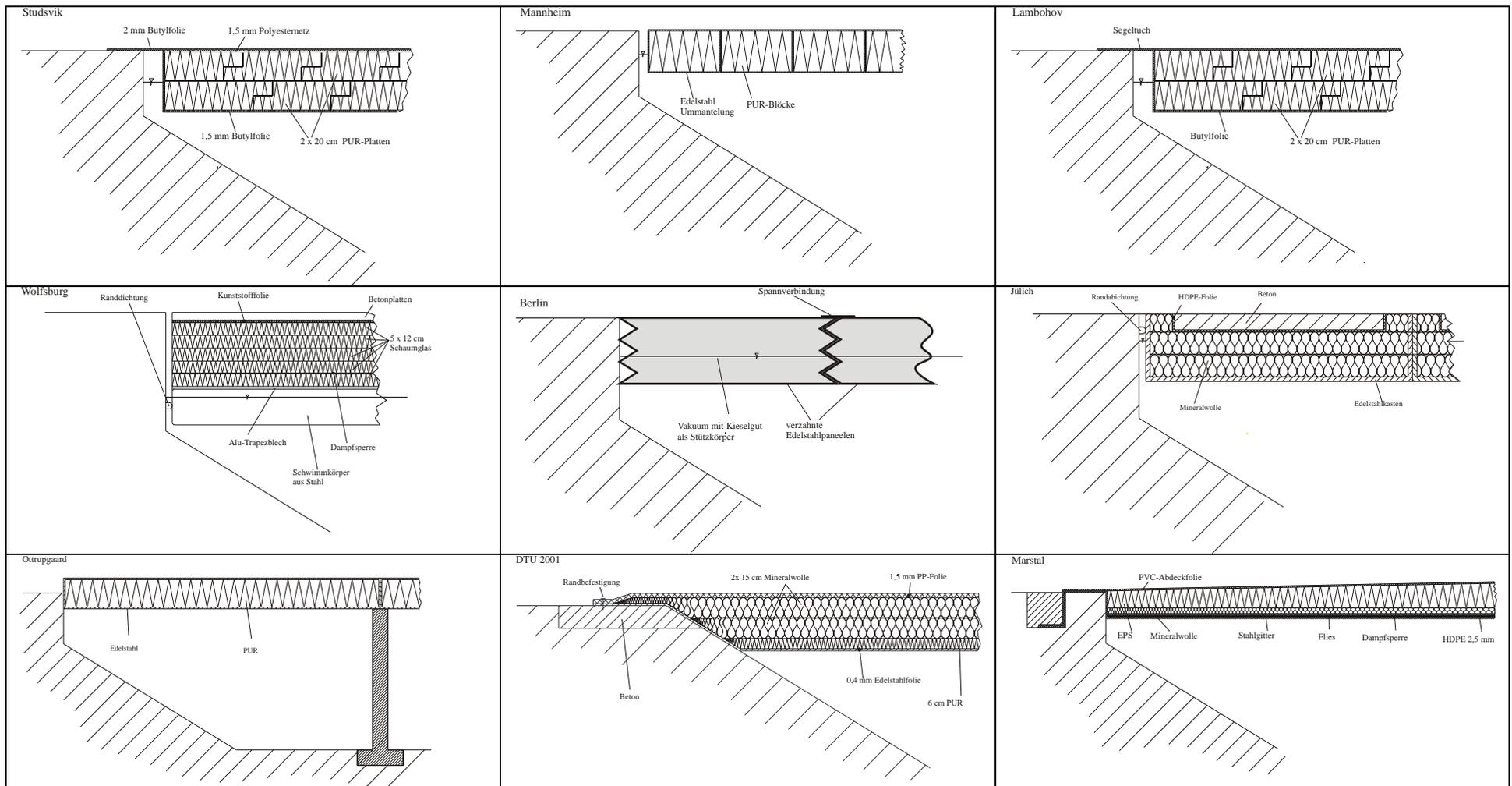


Bild 138: Schematische Darstellung von Design-Varianten von schwimmenden Abdeckungen

Der Materialaufwand bei modular aufgebauten Abdeckungen ist höher. Das Abdichten jedes einzelnen Elements erfordert mehr Material als die Abdichtung der Abdeckung als Gesamtes. Zudem ist gegebenenfalls eine zusätzlich Folie zum Schutz vor von außen eindringenden Wassers erforderlich.

Der nicht-modulare Aufbau ist demnach dem modularen Aufbau vorzuziehen. Es sollte aber versucht werden, die Vorteile des modularen Aufbaus, wie etwa gute Wartung und Möglichkeit zur Reparatur, in einen nicht-modularen Aufbau zu integrieren.

Sowohl eine aufschwimmende Abdeckung als auch eine auf dem Wasser – also nach dem Befüllen – installierte Abdeckung, hat Vor- und Nachteile. Eine eindeutige Aussage, welches Konzept besser ist, ist nicht möglich. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei einem plötzlichen Wasserverlust verhindert werden muss, dass die Abdeckung durch Zusammenbrechen komplett zerstört wird (vgl. Lombohov). Ein derartiger Schadensfall kann mit einer aufschwimmenden Abdeckung verhindert werden.

Auch die Volumenänderung durch Wärmeausdehnung des Wassers kann mit einer aufschwimmenden Abdeckung besser ausgeglichen werden. Im Falle einer schwimmenden Abdeckung werden dazu aktive Maßnahmen erforderlich, vgl. Kapitel 7.11.

7.10.2.1 Begehbarkeit

Uneingeschränkte Befahrbar- bzw. Begehbarkeit kann mit (auf-)schwimmenden Abdeckungen nicht erzielt werden. Jedoch ist aus optischen Gründen eine begrünte, also erdüberschüttete Abdeckung ein Ziel. Zumindest Zugang für Wartungs- und Reinigungszwecke muss eine schwimmende Abdeckung ermöglichen.

Größere Rasenmäher haben eine Flächenlast von 5 KN/m^2 und eine Feuerwehrezufahrt (SLW16) kann mit etwa 10 KN/m^2 abgeschätzt werden. Der

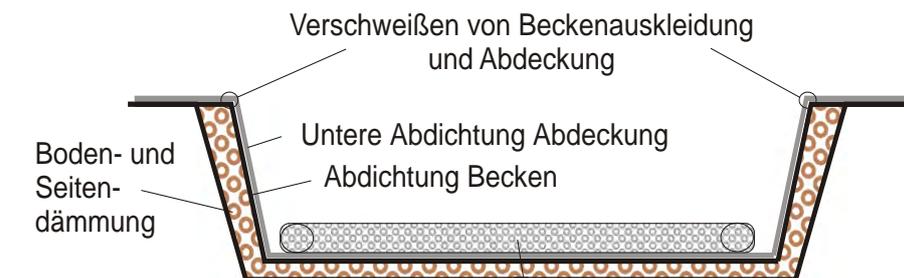
Auftrieb der Abdeckung muss mit Erdüberschüttung (50 cm entsprechen 10KN/m²), Schneelast (etwa 0.75KN/m², 100 kg/m³ für Neuschnee und bis 500 kg/m³ für nassen Schnee) und Verkehrslast garantieren, dass das Speicherwasser nicht gegen die Schweißnaht zwischen Abdichtbahn des Beckens und Abdichtung der Abdeckung drückt.

7.10.3 Aufschwimmende Abdeckung

7.10.3.1 Motivation

Als mögliche Lösung für die wirtschaftliche Abdeckung von großen Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeichern (ab ca. 5000 m³) wurde die aufschwimmende Abdeckung, wie in Bild 139 schematisch dargestellt, untersucht.

in leerem Becken installiert



aufgeschwommen

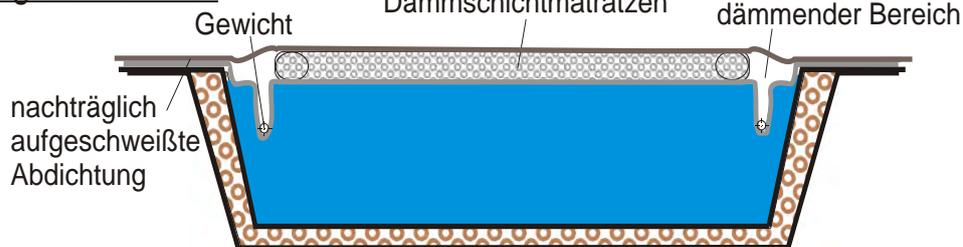


Bild 139: Schema der aufschwimmenden Abdeckung

Das Konzept, das ursprünglich als (ungedämmte) Abdeckung für große Wasserreservoirs entwickelt wurde (vgl. z.B. [146], [147], [148]), ist im Detail in [115] beschrieben. Der Aufbau einer aufschwimmenden Abdeckung, in der Form wie sie Außenlabor realisiert wurde, wird im Folgenden kurz erklärt.

7.10.3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Abdeckung wird im leeren Becken aufgebaut. Dabei wird zuerst, identisch zur ersten Abdichtung, eine zweite Lage Abdichtungsbahn im Becken eingebracht und verschweißt. Darauf wird die Dämmung, hier als lose Schüttung, eingebracht und wie in einem Paket mit einer weiteren Lage Abdichtungsbahn am Boden eingeschweißt.

Die Dämmung dient beim Befüllen des Wärmespeichers als Schwimmkörper. Der Randbereich wird nach dem Aufschwimmen der Abdeckung gedämmt und mit einer weiteren Abdichtfolie abgedeckt. Bild 140 zeigt die Bauphasen der aufschwimmenden Abdeckung am Beispiel des Außenlabor 1.



Bild 140: Aufschwimmende Abdeckung, links oben: Herstellung der Dämmschichtmatratze; rechts oben: hermetisches Einschweißen der Dämmschichtmatratze; unten links: aufgeschwommene Abdeckung, Randdämmung fehlt noch; unten rechts: fertig gestellte aufschwimmende Abdeckung

Diese Vorgehensweise hat gegenüber einer nachträglich aufgebrachtene schwimmenden Abdeckung den Vorteil, dass die Installation nicht auf dem Wasser erfolgen muss. Zudem kann die aufschwimmende Abdeckung besser Niveauänderungen durch Volumenausdehnung infolge von Temperaturschwankungen aufnehmen als eine auf dem Wasser installierte schwimmende Abdeckung.

Die aufschwimmende Abdeckung ist begehbar. Das Be- und Entladesystem muss entweder vorher eingebracht werden (an der Seitenwand befestigt oder mit der Abdeckung aufschwimmend). Nachträgliches Einbringen über eine Durchführung ist denkbar, wird aber nicht empfohlen. Für den Außenlabor-Wärmespeicher wurde die einfachste und kostengünstigste, wenn auch nicht energetisch optimale Lösung eines an der Seitenwand befestigten perforierten PP-Rohrs gewählt, wie in Bild 141 zu erkennen.



Bild 141: Montage des Beladesystems (vor der Installation der Abdeckung)

7.10.3.3 Einschränkungen und Grenzen

Die Haupteinschränkung besteht darin, dass für das Konzept „aufschwimmende Abdeckung“ flexible Abdichtungsbahnen, wie EPDM, IIR, LDPE, FPO oder TPE benötigt werden. Weder die Dampfdiffusionsdichtigkeit noch die (Dauer-) Temperaturbeständigkeit von derzeit verfügbaren flexiblen Abdichtungsmaterialien

genügt den gestellten Anforderungen. Auf die Problematik der Wasserdampfdiffusion wird im Folgenden eingegangen.

In Bild 142 ist das Einbringen der vorgefertigten Dampfsperre zu sehen. Das Vorkonfektionieren hat sowohl für die Installation, als auch für die bauphysikalischen Eigenschaften des Wandaufbaus Vorteile (siehe Kapitel 4.3). Jedoch gibt es kaum kommerziell erhältliche schweißbare Dampfsperren.



Bild 142: Einbringen der vorkonfektionierten Dampfsperrplane (links) und Verkleben der konventionellen Dampfsperre (rechts)

Wie im Kapitel 6.1.2 beschrieben, können am Markt erhältliche (flexible) Kunststoffdichtungsbahnen nur in Verbindung mit Dampfsperren eingesetzt werden. Wird die Dampfsperre, wie bisher üblich, überlappend verlegt (komplett oder partiell verklebt), kann das Kondensat, das sich zwischen Kunststoffdichtungsbahn und Dampfsperre bildet, durch die Überlappung in die Dämmung fließen. Die Verklebung der Dampfsperrbahnen mit einem Klebestreifen hält nicht dauerhaft. Im Bereich der Seitenwände kann das Kondensat entlang der Dampfsperre herunter fließen. In horizontalen Bereichen (Abdeckung und Boden) kann dies ein Problem darstellen. Dort wird sich das Kondensat solange sammeln, bis es durch die Überlappung fließen kann. Durch die Kapillarwirkung der Wärmedämmung wird dieser Effekt verstärkt.



Bild 143: Durchfeuchtete Dämmung (und Schutzvlies) der Abdeckung von Labor 1 (links), Detailansicht sowie Verklumpung der nassen Dämmung (rechts)

Oberhalb der Dampfsperre wird das Wasser wieder verdampfen und durch die Dämmung diffundieren. Je nach Umgebungstemperatur und Beschaffenheit der Abdeckbahn wird das Wasser weiter in die Umgebung diffundieren oder an der Abdeckbahn erneut kondensieren und somit die Dämmung durchfeuchten (siehe Bild 143). Bild 144 zeigt schematisch einen gefährdeten Aufbau einer Abdeckung sowie die darin ablaufenden Vorgänge.

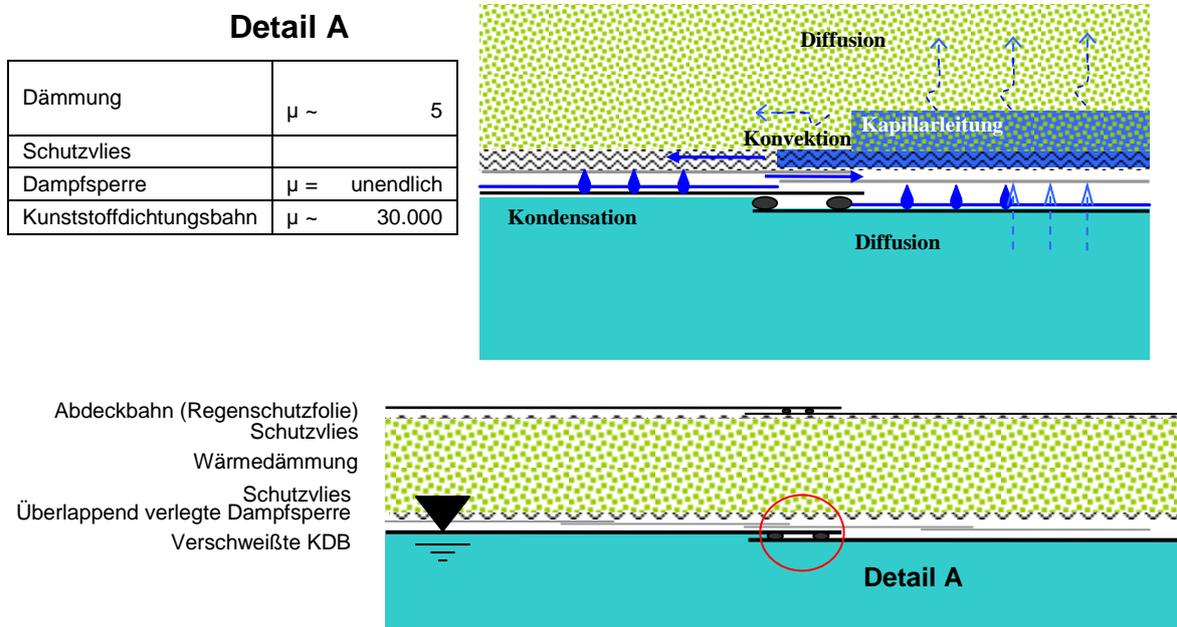


Bild 144: Schema des Aufbaus einer Abdeckung mit überlappend verlegter Dampfsperre

Die beschriebene Problematik der Kondensatbildung in der Abdeckung kann nur durch einen Aufbau mit verschweißter (flexibler) Dampfsperre vermieden werden.

Sofern keine flexible diffusionsdichte Kunststoffdichtungsbahn am Markt erhältlich ist, muss aus oben genannten Gründen vom Konzept aufschwimmende Abdeckung abgesehen werden.

Als weitere Einschränkung ist die Begehbarkeit zu sehen. Wird eine schwimmende Abdeckung ungleich belastet so droht die Gefahr, dass diese unter Wasser taucht.

Bei schwimmenden Abdeckungen muss eine Entlüftungsmöglichkeit vorgesehen werden. Wie sich im Versuch gezeigt hat, besteht die Gefahr einer Luftblasenbildung, vgl. Bild 145. Auch bei der schwimmenden Abdeckung in Marstal traten Probleme durch eine große Luftblase auf (vgl. [92]).



Bild 145: Entlüftung bei aufschwimmender Abdeckung

7.10.4 Schwimmende Abdeckung

7.10.4.1 Problemstellung

Aufbauend auf den Ergebnissen des Versuchs aufschwimmende Abdeckung sowie auf Erfahrungen, welche in Marstal gewonnen wurden, wurde ein Konzept für eine optimierte schwimmende Abdeckung entwickelt. Die Lösung dreier Probleme stand dabei im Vordergrund:

- Begehbarkeit
- Entlüftung
- Kondensat- bzw. Regenwasserableitung

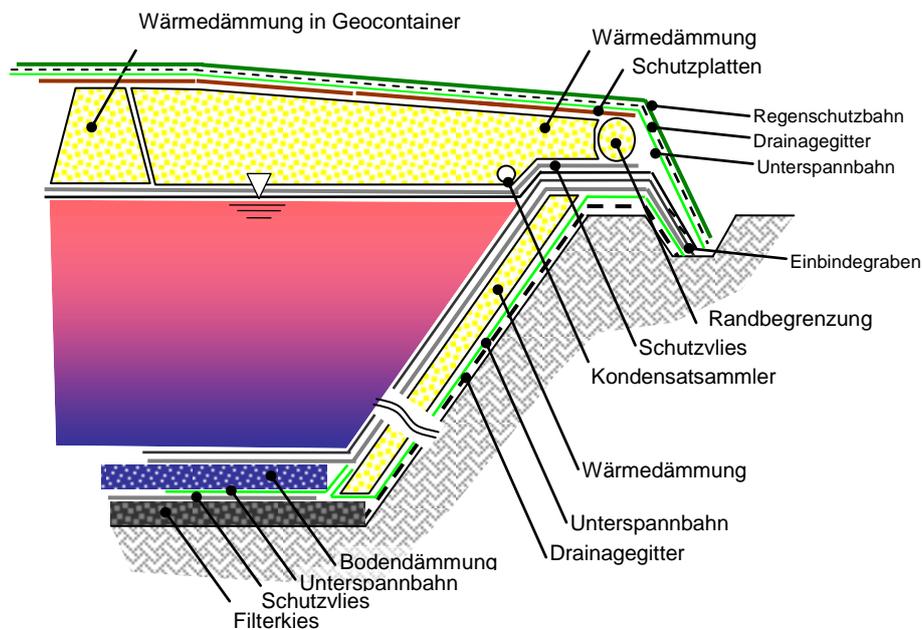


Bild 146: Querschnitt der schwimmenden Abdeckung, Beispiel (i) Platten zur Erzeugung eines Gefälles

Folgende Problemstellungen müssen zudem berücksichtigt werden:

1) Eine begeh- bzw. befahrbare schwimmende Abdeckung erfordert eine druckfeste Wärmedämmung mit einem Gefälle (von der Mitte nach außen) von mindestens 2% bis 3%. Das Aufbringen der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) auf die Wasserfläche (gefülltes Becken) resultiert in einer ebenen Fläche. Ein Gefälle nach außen kann nicht erzeugt werden.

2) Um ein Ansammeln von Oberflächenwasser auf der oberen Abdichtbahn zu vermeiden, muss auch die Regenschutzbahn mit einem Gefälle von mindestens 2% bis 3% ausgeführt werden (vgl. Bild 147). Bei schüttfähigen Dämmstoffen, wie Blähglasgranulat, Blähton oder Blähperlite ist ein Gefälle ohne Hilfsmaßnahmen kaum herzustellen. Begehbarkeit während der Installation der Wärmedämmung ist nur sehr eingeschränkt möglich (einsinken). Begehbarkeit und Gefälle können erzeugt werden über

- i. Platten (Wärmedämmplatten oder Holz-, Heraklit-, oder Pressspanplatten)
- ii. Geotextilien (Geovlies oder Geogitter) oder
- iii. Geocontainer.

3) Schutz vor Vandalismus und Unwetter (Sturm) wird am besten über eine Erdüberschüttung erreicht. Der Auftrieb der Abdeckung muss dabei größer oder gleich der Auflast (Erdüberschüttung und Verkehrslast) sein. Die Verkehrslast variiert je nach Nutzungsart (nur Begehbarkeit bzw. öffentlicher Platz oder Feuerwehrezufahrt) und kann zwischen 2.5 kN/m² für Einzelpersonen und 5 bis 7.5 kN/m² für einen öffentlichen Platz liegen (vgl. [358]).

4) Um ein langsames Durchfeuchten der Wärmedämmung zu verhindern, muss eine Kondensatableitung vorgesehen werden. Für die Kondensatableitung wird eine wasserdampfdiffusionsoffene aber wasserdichte Bahn in Kombination mit einem Drainagegitter mit einem Gefälle (2-3%) auf die Dämmebene installiert. Im Falle von wasserabweisenden Platten kann auf die Unterspannbahn verzichtet werden.

5) Die schwimmende Abdeckung ist nicht variabel in Bezug auf Niveauänderungen. Daher muss ein Überlauf oder eine Füllstandregelung vorgesehen werden, um Änderungen des Wasserniveaus infolge von Temperaturänderungen ausschließen zu können.

7.10.4.2 Konzept für eine optimierte schwimmende Abdeckung

Folgendes Konzept wurde erarbeitet: Als Verkehrslast wurden 20 kN/m² inklusive Eigengewicht der Abdeckung definiert (5 kN/m² ist der Richtwert für Grünflächen, 50 cm Erdüberschüttung entsprechen 10 kN/m², der restlichen 5 kN/m² ergeben sich aus Eigengewicht der Abdeckung und Sicherheit). 20 kN/m² entsprechen einer Wassersäule von 2 m bzw. einem Druck unter der unteren Abdichtebene der Abdeckung von 0.2 bar. Die Verbindung der unteren Abdichtebene der Abdeckung

und der Abdichtung des Beckens muss somit dauerhaft 0.2 bar bei Temperaturen bis 95 °C standhalten (siehe Kapitel 6.2).

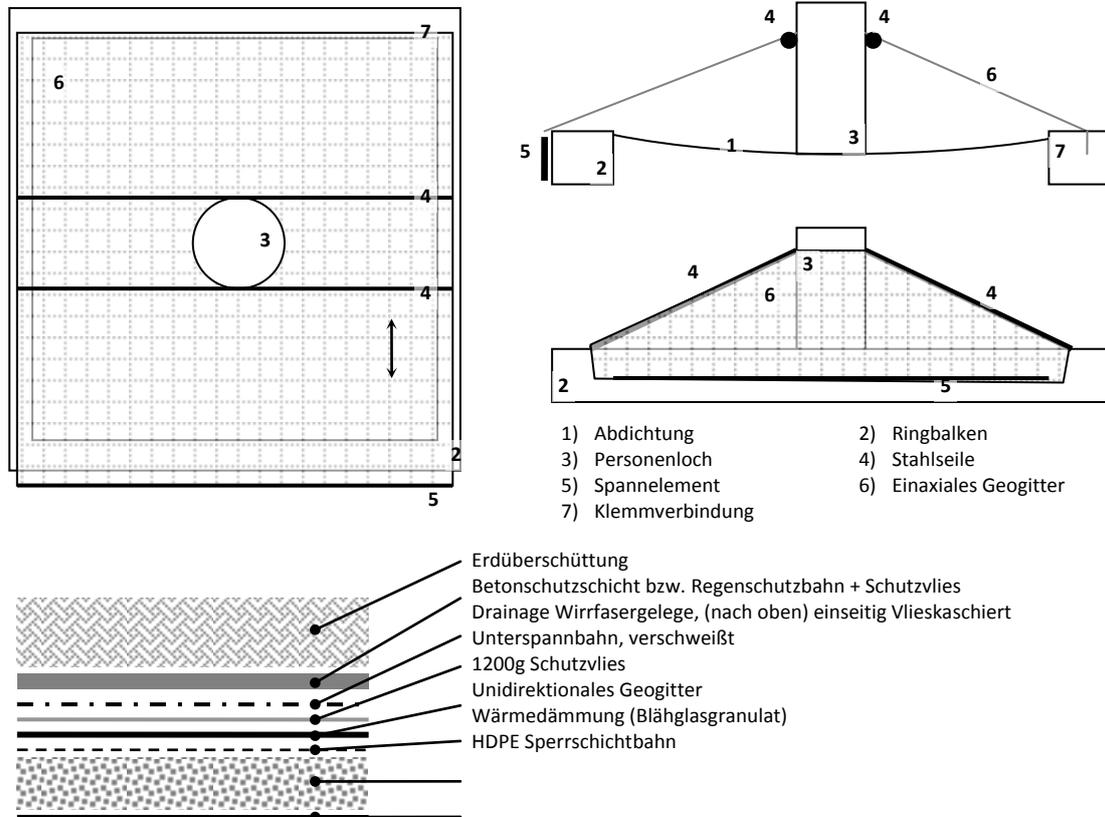


Bild 147: Schema zum Aufbau der schwimmenden Abdeckung

Die untere Abdichtebene der Abdeckung und somit der Wasserspiegel sollte auf Höhe des Ortbetonbalkens sein, um die Abdichtung möglichst biegefrei einbauen zu können. Beim Verschweißen muss der Wasserspiegel etwas niedriger sein als im Endzustand (ca. 5 cm), um ein Nasswerden der Schweißstelle zu verhindern.

Über zwei Stahlseile, welche von einer Seite des Ringbalkens zur anderen über das Personenloch gespannt werden, wird das benötigte Gefälle garantiert. Auf den Seiten quer zur Zugrichtung muss ausreichend Überlappung mit dem Ringbalken garantiert werden.

Die Befestigung des Geogitters erfolgt über Klemmverbindungen. Auf einer Seite wird das Geogitter mit in den Beton (Ringbalken) eingegossen. Auf der

gegenüberliegenden Seite wird nach Vorspannung das Geogitter über eine flächige Klemmverbindung von außen am Ringbalken befestigt.

Die Verbindung des Geogitters mit dem HDPE-Rohr (Personenloch) erfolgt über eine Flanschverbindung (Klemmverbindung). Das HDPE-Rohr muss mit der Sperrschichtbahn verschweißt werden können und biegesteif sein.

Aufgrund des Überdrucks von 0.2 bar auf der unteren Abdichtebene muss das Personenloch als Schleuse ausgeführt werden. Die Messtechnikdurchführung (Temperatursensoren, Füllstandmessgerät), wird im Personenloch untergebracht.

Nur mit einem ein-axialen Geogitter kann die Durchbiegung über die Spannweite des Gitters in tolerierbaren Grenzen gehalten werden. Der E-Modul ein-axialer Geogitter ist etwa um den Faktor 4 bis 5 höher als der von biaxialen Gittern. Bei 5 m Spannweite (entspricht dem Außenlabormaßstab) und bei einer Belastung von einer Person (ca. 100 kg) in der Mitte des Gitters ergibt sich ein Durchhängen von ca. 20 cm.

Durch geeignete Ventile, die rasterförmig über die Abdeckung verteilt werden, muss dafür gesorgt werden, dass Luftblasen, die unter der unteren Abdichtebene entstehen, entfernt werden können. Eine Entlüftung soll an zwei bis vier zugänglichen Stellen erfolgen. Die Entlüftungsleitungen sollen zu einem zentralen Punkt (z.B. Heizzentrale) geführt werden.

Um ein langsames Durchfeuchten der Wärmedämmung zu verhindern, muss eine Kondensatableitung vorgesehen werden. Für die Kondensatableitung wird eine wasserdampfdiffusionsoffene aber wasserdichte Bahn in Kombination mit einem Drainagegitter mit einem Gefälle (2-3%) auf die Dämmebene installiert.

Sicherheit gegen Vandalismus kann entweder durch eine Betonschutzschicht oder durch geeignete Schutzvliese gewährleistet werden. Im Falle von Schutzvliesen wird eine zusätzliche Regenschutzbahn (unterhalb der Schutzschicht) benötigt.

Die schwimmende Abdeckung ist nicht variabel in Bezug auf Niveauänderungen. Daher muss ein Überlauf bzw. eine Füllstandregelung vorgesehen werden, um Änderungen des Wasserniveaus infolge von Temperaturänderungen und Laständerungen ausschließen zu können. Die Füllstandmessung kann über eine kommunizierende Röhre mittels geführter Mikrowelle oder geführtem Radar erfolgen. Das (temperaturkompensierte) Signal wird auf die Regelung aufgeschaltet, wodurch eine automatische Nachspeisung realisiert werden kann. Das System sollte ggf. auf Grund der Sicherheitsrelevanz redundant ausgeführt werden.

7.10.5 Erdüberschüttete schwimmende Abdeckung

Bild 148 zeigt schematisch einen Aufbau einer erdüberdeckten schwimmenden Abdeckung.

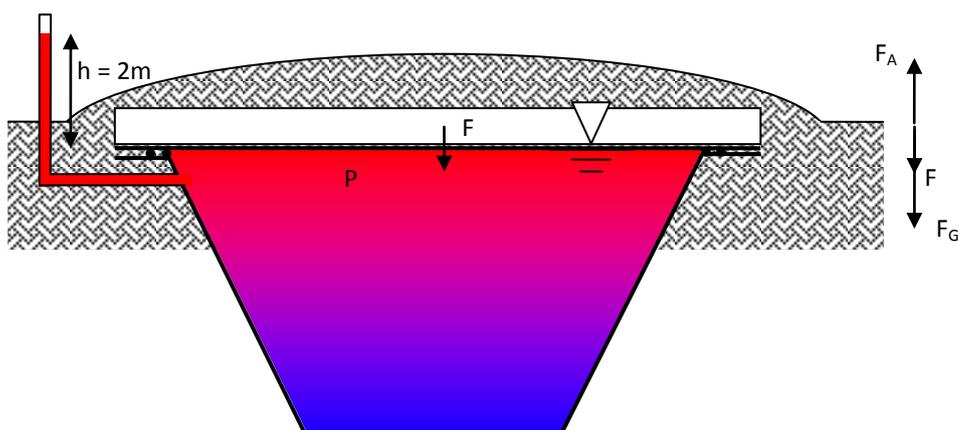


Bild 148: Auf die Schweißnaht zwischen Abdeckung und Becken wirkt die Kraft (F) aufgrund des Eigengewichts der Abdeckung incl. Erdüberschüttung sowie der Verkehrslast.

Aufgrund der resultierenden Kraft (F_R) aus Gewichtskraft (Eigengewicht und Verkehrslast) (F_G) abzüglich Auftriebskraft (F_A) der schwimmenden Abdeckung herrscht auf Wasserniveau (Unterkante Abdeckung) ein Überdruck (P) von bis zu 0.2 bar bzw. 2 m Wassersäule.

$$F_R = F_A - F_G \quad (63)$$

$$F = P \cdot A \quad (64)$$

Unter Annahme eines zylindrischen Behälters ergibt sich die Fläche (A) zu

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \quad (65)$$

Der Umfang (U) berechnet sich nach

$$U = \pi \cdot d \quad (66)$$

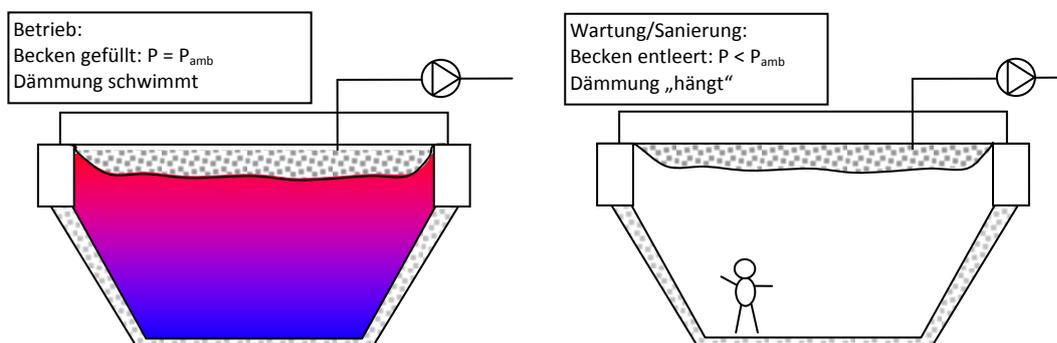
Die Last (σ) auf die Schweißnaht hängt somit vom Durchmesser des Behälters ab.

$$\sigma = \frac{P \cdot A}{U} = \frac{P \cdot d}{4} \quad (67)$$

Für einen Behälter mit einem Durchmesser von 10 m resultiert bei einem Druck von 0.2 bar eine Längen bezogenen Last von 50 N/mm.

7.10.6 Abdeckung mit evakuierter Wärmedämmung

Evakuierung¹³ der Wärmedämmung der Abdeckung bietet zwei Vorteile. Zum einen nimmt die Wärmeleitfähigkeit bei Reduzierung des Drucks ab¹⁴. Zum anderen kann die mechanische Festigkeit durch Evakuierung erhöht werden. So kann dadurch z.B. die Wärmedämmung von unten an einer Abdeckung gehalten werden (vgl. Kapitel 7.10.7). Dies könnte für die Konstruktion und für Wartungszwecke von Nutzen sein, wenn die Abdeckung derart aufgebaut ist, das die Wärmedämmung im regulären Betrieb auf dem Speichermedium schwimmt (vgl. Schema in Bild 149)



¹³ Unter Evakuierung wird hier ein Unterdruck von 0.5 bar verstanden.

¹⁴ Der Smoluchowski-Effekt wird unter anderem bei sogenannten VIP genutzt, siehe [297], [298]. Für eine signifikante Reduzierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird jedoch abhängig von der Porengröße ein Druck von 10^{-3} bis 10^{-4} bar benötigt.

Bild 149: Evakuierte Wärmedämmung bei Abdeckung mit innenliegender Wärmedämmung

Folgende Punkte sollten vorab untersucht werden:

- Demonstration der mechanischen Eigenschaften
- Bestimmung der Druckzunahme mit der Zeit (Diffusion, Nachgasung)
- Messung der WLF des Aufbaus
- Bestimmung der Pumpleistung des Primärenergieaufwandes

Folgender Versuchsaufbau wurde erarbeitet:

Die Vakuumabdeckung besteht aus mehreren Kammern aus mit schüttfähigem Dämmstoff (z.B. Blähglasgranulat) gefüllten verschweißten Membranen (z.B. 1.5 – 2 m breite Kammern).

Über ein Silo (Anschluss über z.B. Bajonette- Kupplung) wird das Blähglasgranulat in die Kammer der Vakuumabdeckung gepumpt. Die Flansche (nach DIN 28 403) für den Anschluss der Vakuumtechnik dienen beim Befüllen zum Entlüften.

Nach dem Befüllen werden die Kammern evakuiert bis zu einem Druck kleiner 10 mbar. Zwischen den Kammern und der Vakuumpumpe müssen Filter geschaltet werden, um die Pumpe vor Staub zu schützen.

Das Diagramm zeigt den Aufbau eines Versuchs zur Evakuierung von Blähglasgranulat. Ein zentraler Behälter besteht aus mehreren Kammern, die durch verschweißte Membranen (1,5 bis 2 mm dick) getrennt sind und mit Blähglasgranulat gefüllt sind. Der Behälter ist über zwei Flansche (DIN 28 403) an der Unterseite angeschlossen. Ein z.B. Storz-A Kupplung ist an der Oberseite montiert. Ein Silo mit Blähglasgranulat ist über eine Leitung mit einer Vakuumpumpe verbunden, die über einen Filter geschaltet ist. Die Vakuumpumpe ist über eine Leitung mit einem Filter und einem Flansch (DIN 28 403) an der Unterseite des Behälters angeschlossen. Die Vakuumpumpe ist über eine Leitung mit einem Filter und einem Flansch (DIN 28 403) an der Unterseite des Behälters angeschlossen.

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart

223

Bild 150: Schematischer Aufbau des Versuchs Vakuumabdeckung

Der Aufbau und die Verbindung der Kammern kann wie in Bild 151 dargestellt ausgeführt werden.

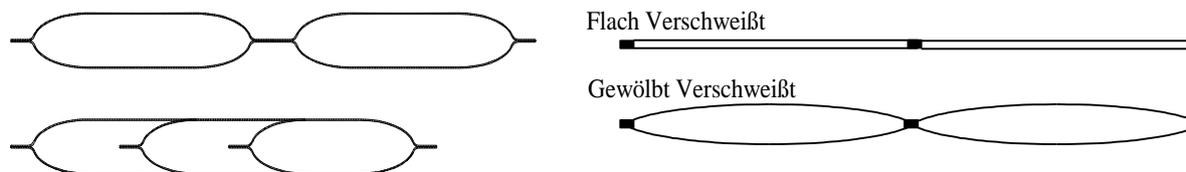


Bild 151: Schematischer Aufbau der Kammern, Verbindung mehrerer Kammern

Die flachgeschweißten Kammern (Bild 151 rechts oben) sind am einfachsten herzustellen, jedoch muss sich das Material beim Befüllen ausdehnen. Durch die Dehnung wird die Alterung beschleunigt. Kammern können nur durch Aufschweißen einer Bahn mit Extrusionsnähten hergestellt werden. Dies ist im Vergleich zur Herstellung von Automaten-schweißnähten aufwändig und teuer.

Die Evakuierung der Wärmedämmung kann zudem zur Leckagedetektion genutzt werden, wie dies beim Kies-Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher in Eggenstein-Leopoldshafen eingesetzt worden ist, vgl. Kapitel 7.3.1.5.

Als technisch aufwändig erweist sich die Füllstandmessung bei einer schwimmenden Abdeckung im Speziellen, wenn aus Sicherheitsgründen auf der Abdeckung keine Aufbauten möglich sind. Mögliche Varianten den Füllstand zu messen sind

- von einem festen Punkt im Wasser von unten auf die Abdeckung
- über eine kommunizierende Röhre
- optisch (berührungslos) von einem festen Punkt außerhalb des Speichers

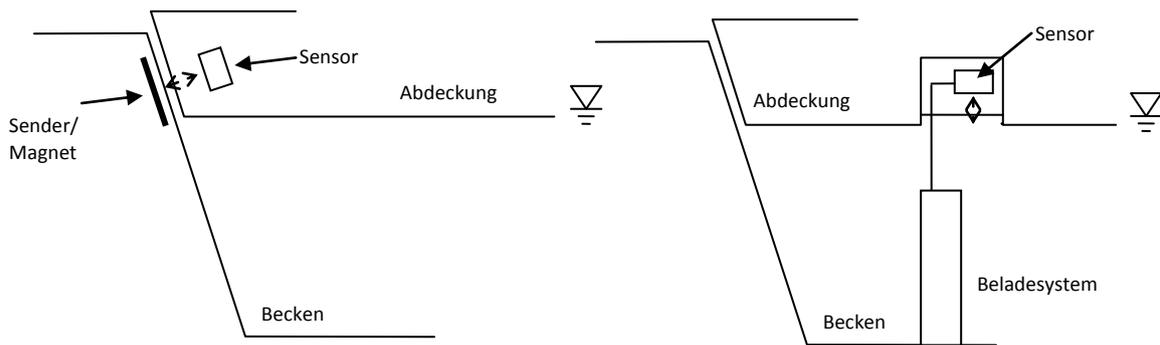


Bild 152: Konzepte für Füllstandmessung bzw. Niveauregelung

7.10.7 Freitragende Abdeckung

7.10.7.1 Grundlagen

In Bezug auf Wärmekapazität sowie Be- und Entladeverhalten ist der Heißwasser-Wärmespeicher dem Kies- bzw. Sand/Erdreich-Wasser-Wärmespeicher überlegen. Des Weiteren sind die bessere Zugänglichkeit sowie die einfachere Wartbarkeit vorteilhaft. Eine dem Kies-Wasser-Wärmespeicher statisch vergleichbare Abdeckung für Heißwasser-Wärmespeicher erfordert jedoch einen nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand.

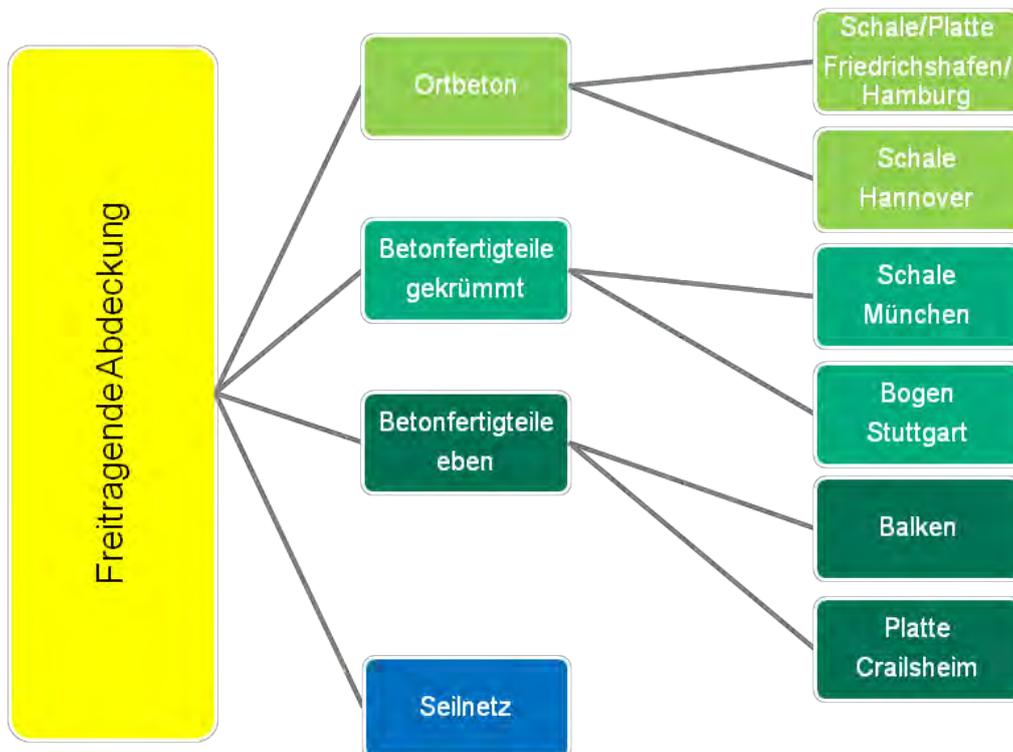


Bild 153: Übersicht über Arten von freitragenden Abdeckungen

Wenn der einfachen und kostengünstigen Bauweise eines Erdbecken-Wärmespeichers die Vorteile der 50 % höheren Wärmekapazität sowie der guten Betriebseigenschaften durch das reine Wasservolumen hinzugefügt werden können, kann ein effektiver und kostengünstiger Langzeit-Wärmespeicher realisiert werden.

Ziel der Entwicklung war eine Konstruktion, die im Vergleich zu konventionellen freitragenden Abdeckungen unter reduziertem Material- und somit Primärenergieaufwand gelingt. Zudem sollte ein Verfahren erarbeitet werden, welches erlaubt, die Montage der Abdeckung und die Schweißarbeiten ohne Rüstturm und Baugerüst auszuführen vgl. Bild 154.

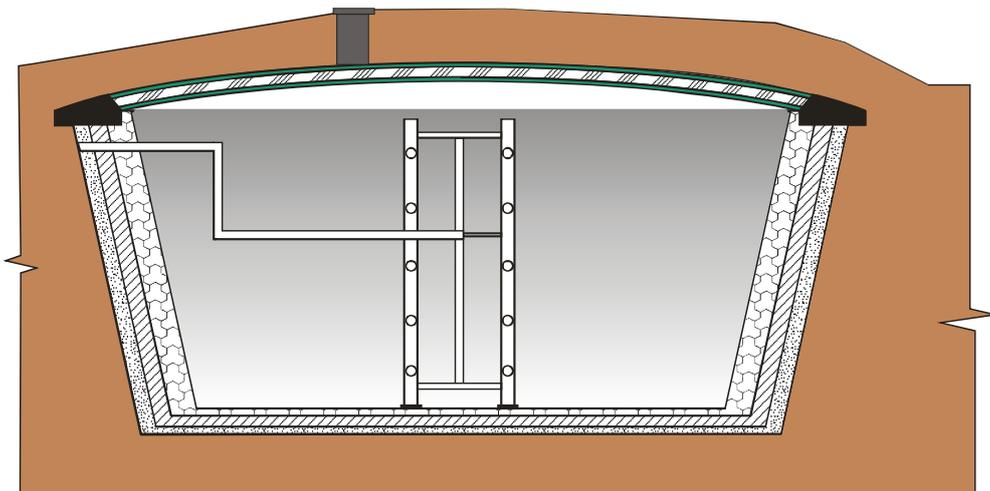


Bild 154: Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit freitragender Abdeckung

Im Rahmen der Außenlaborversuche wurde eine Abdeckung als Tonnendach vorgeschlagen. Die Erkenntnisse lassen sich jedoch auch auf ein Kuppeldach übertragen.

7.10.7.2 Fertigung der Fertigteile

Diese Abdeckung wurde aus Fertigteilen als Sandwich aus Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton (HL-Beton) und PUR hergestellt, wodurch aufgrund der vielfach höheren Festigkeit sehr dünne Bauteile mit nur wenigen Zentimeter Dicke hergestellt werden können (vgl. [41] und [299]).

Hochleistungsbeton für den Einsatz in Behälter-Wärmespeichern wurde in [41] detailliert untersucht. Ein Behälter aus Hochleistungsbeton wurde erstmalig im Jahr 2000 in Hannover umgesetzt [4]. Somit konnte auf Erfahrungen aus diesen Projekten zurückgegriffen werden. Die Produktion der Fertigteile ist schematisch in Bild 155 dargestellt.

1	Produktion Teil 1		4	Fertigung Teil 2	
2	Drehen um 180°		5	Biegen auf Modell	
3	Biegen auf Modell		6	Verklebung beider Teile	

Bild 155: Schematische Darstellung der Produktion eines Fertigteils bestehend aus Hochleistungsbeton (HL-Beton) und PUR-Kern

Der Bauablauf der Tonnendachkonstruktion wird schematisch in Bild 156 gezeigt. Ein wesentlicher Bestandteil des Konzepts ist, dass der Aufbau der Abdeckung inklusive Abdichtungsarbeiten ohne Baugerüst und Rüstturm erfolgen kann.

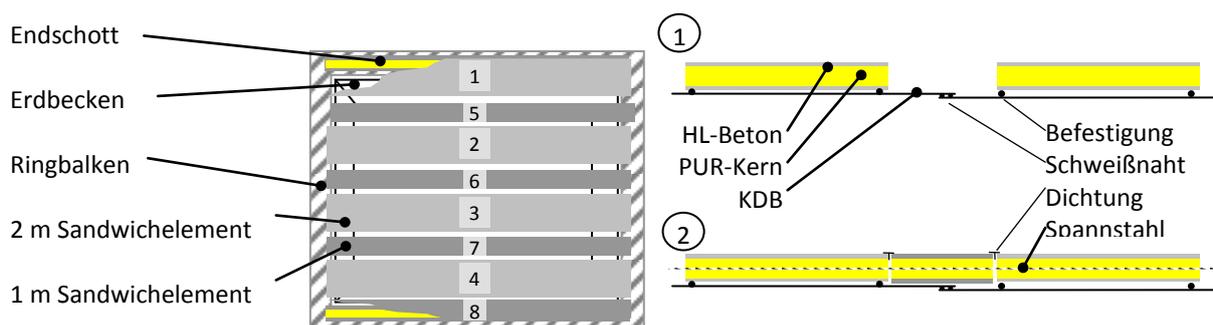


Bild 156: Schematischer Bauablauf der Abdeckung bestehend aus 2 Endschotts sowie je vier 2 m breiten und 1 m breiten Elementen, Elemente aus Hochleistungsbeton (HL-Beton) mit Kunststoffdichtungsbahn (KDB)

Die Kunststoffdichtungsbahn, die von unten an den Elementen befestigt ist, wird zwischen den 2 m breiten Elementen von oben verschweißt. Anschließend werden die 1 m breiten Elemente dazwischen gesetzt. Zuletzt werden die Elemente über

Spannstahlelemente verbunden. Die Fugen werden dabei mit Ortschaum ausgeschäumt und mit EPDM abgedichtet. Die Schweißarbeiten erfolgen von oben. Die Abdichtung des Beckens wird mit der Abdichtung der Abdeckung am Beckenrand verbunden, vgl. Bild 157.

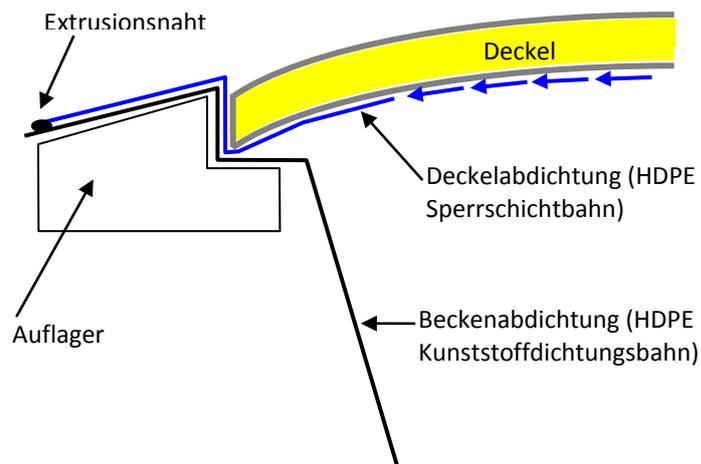


Bild 157: Schweißnahtführung am Auflager, prüfbare Doppelnaht entlang der Sperrschichtbahn, Extrusionsnaht zwischen Abdichtung des Beckens und Sperrschichtbahn

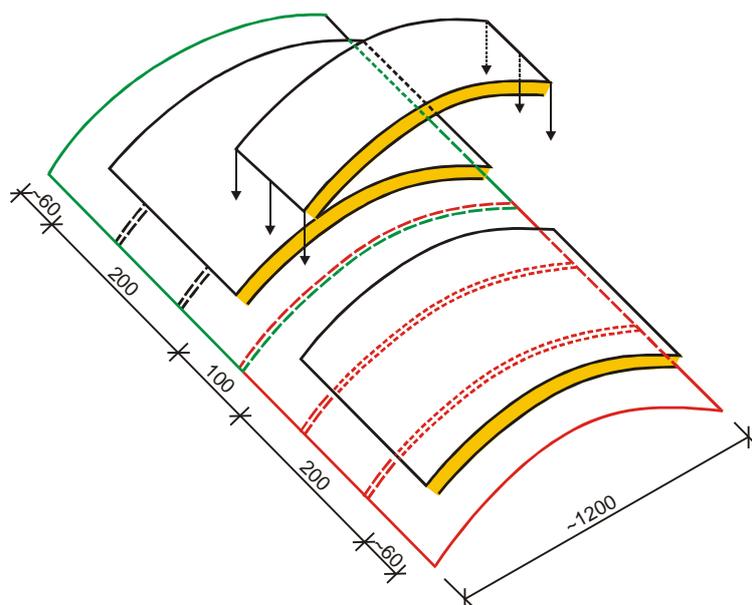


Bild 158: Montager Reihenfolge der Abdeckung des Forschungsspeichers am ITW

7.10.7.3 Vorversuche

Als Vorversuch wurde ein 20 cm breites Sandwichelement in einem Betonfertigteilwerk gefertigt, siehe Bild 159.



Bild 159: Prototyp des Sandwich-Fertigteils, gefertigt aus zwei Teilen mit je 2 cm HL-Beton und 16 cm PUR-Dämmung

7.10.7.4 Fertigung der Sandwichelemente

Die Abdeckung des Außenlabor-Erdbecken-Wärmespeichers besteht aus je vier 1 m und 2 m breiten Sandwichelementen, welche analog zum Prototyp hergestellt wurden.



Bild 160: Die Sandwichelemente werden aus Hochleistungsfaserfeinkornbeton gefertigt. Der Beton wird auf die PUR/PIR Wärmedämmung aufgebracht.

Im Unterschied zum Prototyp wird jedes Sandwichelement aus zwei Einzelteilen mit unterschiedlichen PUR-Dicken hergestellt. Die PUR-Schicht des unteren Elements ist bei Biegung auf Zug beansprucht, wodurch es zu Rissen kommen kann. Die Spannungen in der PUR-Schicht des unteren Teils werden durch Verringerung der PUR-Schichtdicke reduziert. Die Biegung des oberen Teils ist unkritischer. Da die PUR-Schicht auf Druck beansprucht wird, kann diese dicker ausgeführt werden. Für

den Außenlaboraufbau wurde für das obere auf Zug beanspruchte Teil eine PUR-Schicht mit einer Dicke von 6 cm gewählt und für das untere Teil eine Schicht von 26 cm.



Bild 161: Das Verkleben der Elementhälften mit PUR-Kleber muss innerhalb von 20 bis 30 min abhängig von Umgebungstemperatur und Feuchte geschehen.

7.10.7.5 Aufbau der Abdeckung

Die Fertigteile wurden mit Autokranen mittels Vakuumhebezeug auf dem Speicher abgesetzt (vgl. Bild 162, links) und dort durch das Verschweißen einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) wasser- und wasserdampfdicht verbunden. In Bild 162 ist der Außenlabor Erdbecken-Wärmespeicher mit dem ersten Sandwichelement gezeigt.



Bild 162: Autokran beim Heben eines Sandwichelements mittels Vakuumhebezeug, Montage des ersten Fertigteils auf dem Außenlabor-Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher am ITW

Die Abdeckung des Außenlabor-Wärmespeichers besteht aus 10 Elementen, je vier Stück 1 m und 2 m breite Teile sowie zwei Endschotts.



Bild 163: Vorbereitung der Abdichtbahn, die vor dem Versetzen von unten an den Elementen befestigt wird. Die Befestigung der Abdichtbahn erfolgt seitlich über Stahlanker, die durch angeschweißte L-Stücke in die PUR-Schicht knapp über dem Beton geschlagen wurden.



Bild 164: Die 2 m breiten Elemente werden mit einem Abstand von 1 m auf das Auflager gesetzt. Die Sperrschichtbahn wird nach außen gezogen, um später das Verschweißen mit der Abdichtung des Beckens von außen zu ermöglichen.



Bild 165: Das Verschweißen der Abdichtung erfolgt ohne Gerüst zwischen den Elementen von oben. Dafür wurde ein Wagen entwickelt, in dem der Schweißautomat eingehängt wird. Der Schweißautomat zieht sich und den Wagen von einer Speicherseite zur anderen. Der Schweißer muss nur leichte Richtungskorrekturen vornehmen.



Bild 166: Im Randbereich am Auflager werden die Bahnen mit Extrusionsnähten verschweißt.



Bild 167: Erdbecken-Wärmespeicher mit drei Elementen und verschweißter Sperrschichtbahn



Bild 168: Versetzen der 1 m breiten Elemente zwischen die 2 m breiten Elemente



Bild 169: Das Verschweißen der Abdichtung und das Anbringen der PUR/PIR-Wärmedämmung im Bereich der Endschotts erfolgt neben dem Becken.



Bild 170: Versetzen der 1 m breiten Elemente und der Endschotts, die Fugen werden mit PUR Ortschaum ausgeschäumt



Bild 171: Versetzen der 1 m breiten Elemente und der Endschotts, die Fugen werden mit PUR Ortschaum ausgeschäumt

Die Endschotts werden mit Gewindestangen gegenseitig fixiert:



Bild 172: Mit Gewindestählen gegeneinander fixierte Endschotts

Eine Regenschutzbahn verhindert das Eindringen von Regen- und Oberflächenwasser.



Bild 173: Freitragende Abdeckung mit Regenschutzbahn

Das Tonnendach kann erdüberschüttet und begrünt werden. Dafür wird auf die Regenschutzbahn ein Schutzvlies gelegt. Hier wurde eine extensive Dachbegrünung gewählt. Das Betreten der Decke oder das Befahren mit leichten Fahrzeugen (Rasenmäher) ist möglich.



Bild 174: Freitragende Abdeckung mit extensiver Dachbegrünung

7.10.7.6 Monitoring – Auswertung

Von Interesse ist das Verhalten der Abdeckung bei maximaler thermischer Beladung (90 °C bis 95 °C) unter gleichzeitiger mechanischer Schnee- oder Eislast. Im Extremfall kann es bei hoher thermischer und mechanischer Belastung zu Rissbildung kommen. Bei Rissbildung kann nicht ausgeschlossen werden, dass Feuchtigkeit in den Sandwichkern, also die Dämmschicht eindringt. Es ist zu untersuchen, inwieweit eine Verringerung der Stabilität der PU-Dämmschicht im Falle einer Durchfeuchtung die Gesamtkonstruktion gefährdet. Durch den Einsatz von Wärmestrommessplatten und Temperatursensoren kann untersucht werden, ob im Falle einer Durchfeuchtung die PU-Dämmschicht wieder austrocknen kann¹⁵. Gegebenenfalls sollten im späteren Verlauf Proben des PU-Kerns als auch des Hochleistungsbetons entnommen werden.

7.10.7.7 Schlussfolgerungen

Heißwasser-Wärmespeicher bieten im Vergleich zu Kies-Wasser-Wärmespeichern überwiegend Vorteile. Heißwasser-Wärmespeicher können mit frei- bzw. selbsttragenden, mit abgestützten oder mit schwimmenden Abdeckungen gebaut werden. Selbsttragende Abdeckungen sind vorteilhaft bezüglich Begehbarkeit der Abdeckung und Zugänglichkeit und somit Wartbarkeit des Speichers. Die Konstruktion ist jedoch aufwändig und teuer. Wenn Befahrbarkeit bzw. uneingeschränkte Begehbarkeit zwingend erforderlich ist, gibt es zum Einsatz einer selbsttragenden Abdeckung keine Alternativen. Da Langzeit-Wärmespeicher in der Regel in oder in der Nähe von Wohnsiedlungen gebaut werden, wird Begehbarkeit und Befahrbarkeit ein wichtiges Kriterium sein.

Durch das Sandwichkonzept ist eine wirtschaftliche Konstruktion einer freitragenden Abdeckung ohne Rüstturm möglich. Im Vergleich zu konventioneller Technik (z.B. Friedrichshafen, Hannover, München-Ackermannbogen) kann der Materialeinsatz

¹⁵ Ein Element der Abdeckung ist an zwei Stellen mit Temperatursensoren und Wärmestrommessplatten versehen (vgl. Kapitel 7.4).

stark verringert werden, wodurch auch der Primärenergieeinsatz bei der Herstellung der Fertigteile reduziert werden kann. Für den Prototyp wird mit Kosten von rund 400 €/m² gerechnet.

Die technische Machbarkeit einer freitragenden Abdeckung wurde im Außenlaborversuch am ITW gezeigt. Eine freitragende Sandwich-Abdeckung als Tonnendach wurde über einem Erdbecken mit einer Oberfläche von rund 100 m² gebaut. Die Dauerstandfestigkeit sowie das thermische Verhalten im Betrieb mit Temperaturen bis 95 °C bei gleichzeitig niedrigen Außentemperaturen muss noch nachgewiesen werden, wozu ein Monitoring des Forschungsspeichers zukünftig weitergeführt werden muss.

Die Ergebnisse sind auf eine Abdeckung in Form eines Kuppeldachs übertragbar. Langzeit-Wärmespeicher mit freitragender Abdeckung mit einem Durchmesser von 25 m sind ohne Weiteres denkbar.

7.11 Innen liegender Membranausdehnungsbehälter

7.11.1 Konzept

Die Niveau- bzw. Druckhaltung in Wärmespeichern wurde bisher über Membranausdehnungsgefäße im Falle kleiner Speichervolumen (kleiner ~100 m³) bzw. über Drainage und Nachspeisung im Falle großer Wärmespeicher gewährleistet. Der Hauptnachteil der Niveauhaltung durch Nachspeisung bzw. Drainage ist, dass Speichermedium mit erhöhter Temperatur drainiert wird, aber Frischwasser mit niedriger Temperatur nachgespeist werden muss. Dadurch entstehen neben Kosten für Drainage und Frischwasser auch Energieverluste.

Anstelle dessen wird vorgeschlagen, die Niveauregelung über ein innen liegendes Membran-Ausdehnungsvolumen zu realisieren. Das Ausgleichsvolumen kann durch einen innen liegenden Schlauch aus elastomerem Membranmaterial realisiert werden (vgl. Bild 175). Alternativ können große luftgefüllte Kissen (Geocontainer) in das Becken eingebracht werden, vgl. Bild 176.

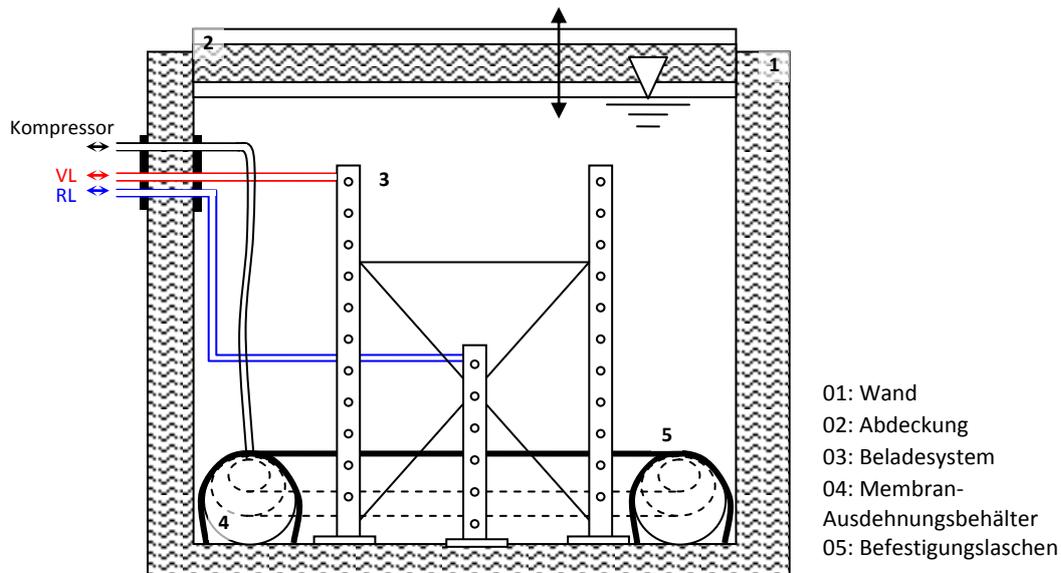


Bild 175: Langzeitwärmespeicher (mit schwimmender Abdeckung) und innen liegendem Membran-Ausdehnungsvolumen

Das Volumen des Schlauchs/Kissens wird entsprechend des Füllstands geregelt. Der Membransausdehnungsbehälter wird dazu über einen Panzerschlauch an einen Kompressor angeschlossen, welcher sich z.B. in der Heizzentrale befindet. Die Regelung des Kompressors erfolgt über Niveaumessung z.B. über einen Druck- oder Füllstandsensoren.



Bild 176: Beispiel für große Geocontainer [401]

7.11.2 Größe des Ausdehnungsvolumens

Eine Änderung des Füllstands kann durch Volumenänderung aufgrund von Temperaturänderung hervorgerufen werden. Speziell im Falle einer schwimmenden Abdeckung, bei der durch veränderliche (Verkehrs-)Lasten der Druck (in Schälrichtung) auf die Schweißverbindung zwischen Abdichtbahn und Beckenabdichtung konstruktiv nicht auszuschließen ist, muss das Niveau der Wasseroberfläche konstant gehalten werden. Die Volumenänderung durch Temperaturänderung für zwei Speichervolumina ist in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 53: Volumenänderung durch Temperaturänderung, Stoffdaten aus [305]

	Beispiel-Wärmespeicher		Außenlabor-Forschungsspeicher	
	10	90	10	90
ϑ / [°C]				
ρ / [kg/m ³]	999.97	965.31	999.97	965.31
d / [m]	15.65	15.65	6.5	6.5
h / [m]	15.65	15.65	3.5	3.5
A / [m ²]	192.36	192.36	42.25	42.25
V / [m ³]	3010.46	3118.55	147.875	153.81
ΔV / [m ³]	0	108.09	0	5.935
h/d / [-]	1	1	0.53	0.54
A/V / [-]	0.256	0.256	1.19	1.19
Δh / [m]	0.0	0.56	0.0	0.14

Ein Schlauch mit einem Durchmesser von $d = 1.8$ m, der um den Umfang des Beckens liegt ($D_1 = 14$ m, vgl. Bild 175) hat ein Volumen von knapp 112 m³ und würde somit für ein Speichervolumen von 3000 m³ ausreichen.

7.11.3 Auftriebssicherung

Mit zunehmender Temperatur sinkt vor allem unter mechanischer Belastung die Lebensdauer polymerer und elastomerer Materialien. Der Temperaturbereich liegt oben im Speicher, abhängig von der Rücklaufemperatur, bei 30 °C bis 90 °C. Im Speicherboden werden in der Regel Temperaturen von 60 °C nicht überschritten. Somit ist eine Anbringung des Ausdehnungsbehälters am Speicherboden vorzuziehen.

Die Befestigung des Membranausdehnungsbehälters im Becken wird über eine mit der Beckenabdichtung (HDPE-Sperrschichtbahn) fest verschweißten HDPE-Bahn gewährleistet (vgl. Bild 177).

Aufgrund der Auftriebskraft befindet sich der Membranausdehnungsbehälter unabhängig vom Befüllungszustand unterhalb der HDPE-Bahn und nicht am Boden des Speichers (vgl. gestrichelte Linie in Bild 175). Die Schweißverbindung zwischen den Befestigungslaschen (HDPE-Bahn) und Beckenabdichtung erfährt aufgrund der Auftriebskraft (F_A) eine Belastung in Schälrichtung (F_S).

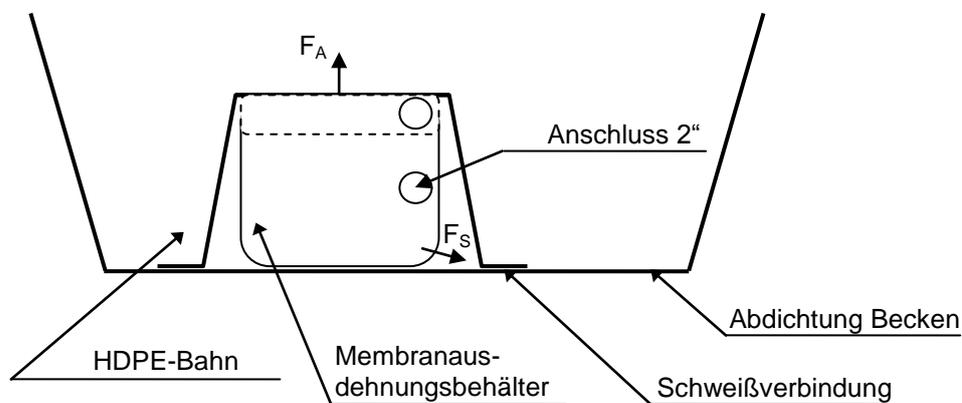


Bild 177: Einbau und Befestigung des Membranausdehnungsbehälters

Um die Auftriebskraft des Membranausdehnungsbehälters zu kompensieren, die Schweißnaht im Falle eines Behälters mit einer Querschnittsfläche von 1 m^2 eine Spannung von $4,768 \text{ N/mm}$ aufnehmen, wenn die Befestigungslaschen bzw. die HDPE-Bahn über die komplette Länge des Membranausdehnungsbehälters verschweißt wird (Annahmen: $\rho_w(80 \text{ °C}) = 972 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

$$\sigma = \frac{\rho_w \cdot V \cdot g}{2 \cdot l} \quad (68)$$

$$V = A_q \cdot l \quad (69)$$

$$\sigma = 0.5 \cdot \rho_w \cdot A_q \cdot g \quad (70)$$

7.11.4 Versuchsaufbau

Der Behälter wird aus gewebeverstärktem Butyl (PA-Gewebe, Membranstärke min. 1.5 mm) mit einem Volumen von 4 m³ entsprechend Bild 178 wasser- und wasserdampfdicht gefertigt. Die Ausführung erfolgt mit einem 2“-Anschluss stirnseitig, welcher wasser- und wasserdampfdicht angebracht wird (vgl. Bild 178). Die Fertigung als Quader mit vulkanisierten Nähten ist ohne die Fertigung neuer Werkzeuge nicht möglich. Die Fertigung eines Kissens, entsprechend Bild 178, rechts, ist dagegen bis zu Größen von mehreren Quadratmetern ohne weiteres möglich. Das Volumen wird dabei durch einen minimalen Überdruck erzeugt. Der 2“- (Außengewinde) Anschluss wird als Flansch aus Aluminiumguss ausgeführt.

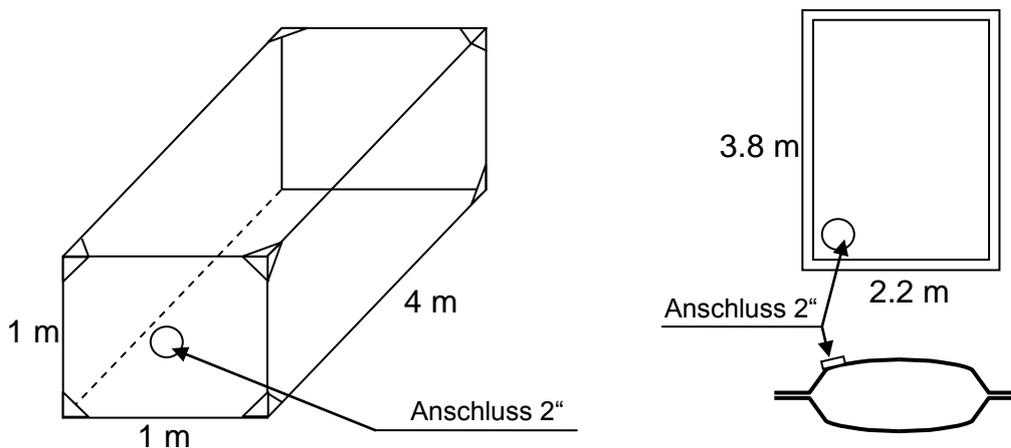


Bild 178: Abmaße des Membranausdehnungsbehälters für Außenlaborversuch, links gewünschter Behälter, rechts Kissen als einfacher Variante



Bild 179: Membranausdehnungsbehälter für Außenlaborversuch, links: leer, mitte: luftgefüllt und rechts: Befestigung durch Verschweißen einer Kunststoffdichtungsbahn

Erfahrungen im Betrieb liegen nicht vor. Insbesondere die Wasserdampfdiffusion durch die Membran sowie die Alterungsbeständigkeit müssen noch untersucht werden.

7.12 Fazit der Außenlaborversuche

Im Rahmen der Außenlaborversuche wurden in einem Zeitraum von drei Jahren rund 30 Teilversuche alleine zum Wandaufbau durchgeführt.

Unter der Annahme, dass pro Pilotprojekt maximal drei Teilversuche umsetzbar wären und etwa 1 Pilotprojekt pro Jahr (im Durchschnitt) realisiert wird, hätten man den gleichen Erkenntnisgewinn erst in 10 Jahren, und dies bei wesentlich höheren Kosten?

8 Kosten

8.1 Allgemeine Einführungen zu Kosten von Langzeit-Wärmespeichern

Eines der wesentlichen Ziele des Gesamtprojektes war die Kosten für Erdbecken-Wärmespeicher zu reduzieren. Ausgehend von den bereits realisierten Wärmespeichern in Chemnitz und Steinfurt-Borghorst (siehe Tabelle 54) wurde im Projektantrag folgendes Ziel definiert:

Ein Erdbecken-Wärmespeicher mit einem Speichervolumen von 10 000 m³_{WÄ} muss mittelfristig für 140 DM/m³_{WÄ} bzw. 70 €/m³_{WÄ} gebaut werden können. Bei diesen Kosten handelt es sich um Netto-Baukosten, d.h. ohne ges. MwSt. allerdings inkl. Planungskosten. Bei den Planungskosten kann entsprechend den Festlegungen des Arbeitskreises Langzeit-Wärmespeicherung pauschal von ca. 10-12% der Speicherbaukosten ausgegangen werden.

Tabelle 54: Kosten realisierter Kies-Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher

Ort	Baujahr	Speicherbaukosten aus dem jeweiligen Baujahr [€/m ³ _{WÄ}]	Bemerkung
Chemnitz	1997	ca. 120 ^{#)}	5 300m ³ _{WÄ} ; direktes Beladesystem
Steinfurt-Borghorst	1999	ca. 160 ^{#)}	1 000m ³ _{WÄ} ; indirektes Beladesystem
Eggenstein	2007	ca. 144	3 000m ³ _{WÄ} ; direktes Beladesystem mit WP

^{#)} 1 EUR = 2 DM

Basis für diese Zieldefinition war der Ansatz, dass kostenlose Wärme, z.B. nicht direkt nutzbare Abwärme aus Industrieprozessen oder aus der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), für mehrere Monate gespeichert und dann in der Heizperiode zur Raumheizung ausgespeichert und genutzt wird, Wärmegestehungskosten liefert, die gleich oder geringer als die Energiebezugskosten von Erdgas sind. Als wirtschaftlich wurden zum Zeitpunkt der Antragstellung Wärmegestehungskosten von 200 DM/MWh bzw. umgerechnet 100 €/MWh definiert.

Für diese einfache statische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die Inhalt des Förderantrages aus dem Jahr 2002 war, wurden die folgenden Annahmen und Randbedingungen festgelegt:

Die Speicherbaukosten werden kapitalisiert über die Annuitätenmethode mit einer Lebensdauer von 50 Jahren und einem Zinssatz von 6%, d.h. der Annuitätenfaktor beträgt 0.063.

Der Wärmespeicher wird auf eine max. Speichertemperatur von 90 °C beladen und bis auf eine minimale Speichertemperatur von 40 °C entladen. Die spezifische Wärmespeicherkapazität je Zyklus beträgt somit 58 kWh/m³_{WÄ}. Der Wärmespeicher wird mit einer Zyklenzahl von 1 betrieben, d.h. der Wärmespeicher wird jährlich einmal be- und entladen (vgl. Kapitel 4.1). Der Speichernutzungsgrad liegt bei 80%.

Auf Basis der bei Antragstellung getroffenen Annahmen sind folgende Fragen zu beantworten:

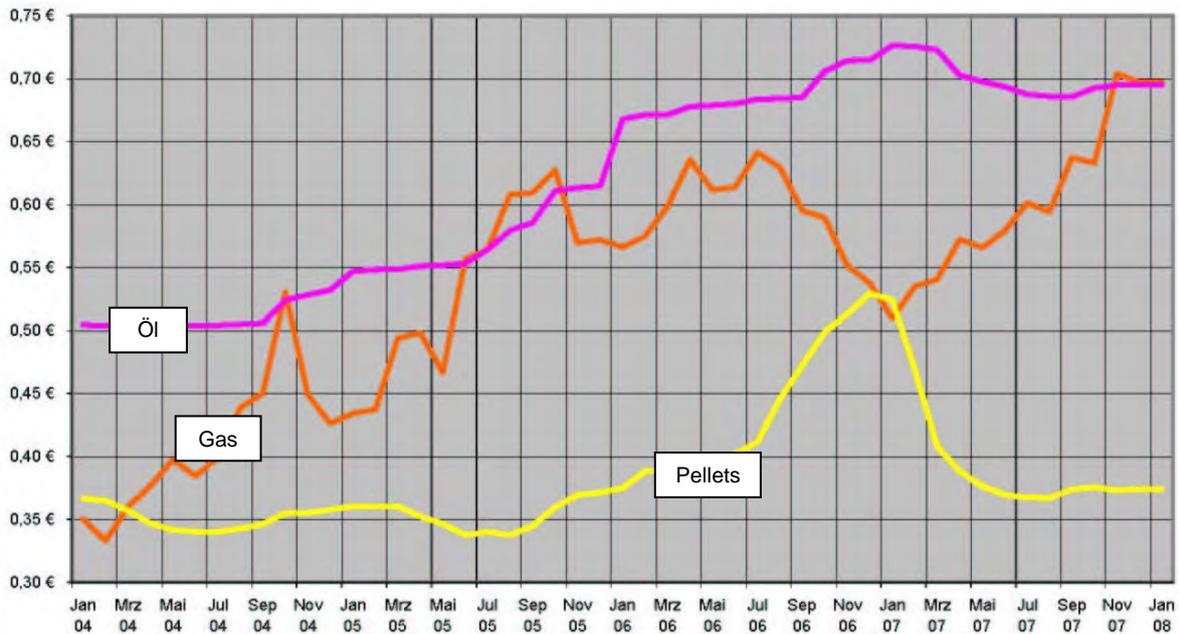
1. Haben die verwendeten Annahmen und Randbedingungen in dieser Form noch Gültigkeit oder müssen sie angepasst werden? Welche Auswirkungen haben geänderte Parameter?
2. Welche Kosten wurden bei den aktuell ausgeführten Wärmespeichern in den Projekten Schulzentrum Eggenstein und München-Ackermannbogen erreicht?
3. Welche Kosten würden theoretisch erreicht, wenn die Speicherprojekte Eggenstein und München auf eine Speichergröße von 10 000m³_{WÄ} „hochskaliert“ würden?
4. Wurden die angestrebten Zielkosten in Höhe von 70 €/m³_{WÄ} erreicht?
5. Welchen Anteil an den Gesamtspeicherbaukosten haben die Hauptkomponenten Abdichtung und Wärmedämmung?
6. Welche Besonderheiten, Kostensteigerungen, Kostenreduktionspotentiale usw. sind für die o.g. Komponenten zu nennen?

Die Fragen werden im Folgenden beantwortet.

zu 1. Annahmen, Randbedingungen und Parameter:

Die Daten zur Berechnung nach der Annuitätenmethode sowie die Annahmen zur Zyklenzahl und zum Speichernutzungsgrad können unverändert verwendet werden. Eine Änderung dieser Faktoren würde sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit in gleicher Höhe auswirken.

Die Preise für die konventionellen Energieträger Gas und Öl, die durch die gespeicherte Wärme ersetzt werden, sind seit 2004 gemäß Bild 180 um 100% (Öl) bzw. 40% (Gas) gestiegen. Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Energiepreissteigerung über die letzten 4 Jahre von ca. 19% für Öl bzw. 9% für Gas.



Preis für 1 ltr. Heizöl bei Abnahme von mindestens 3000 ltr. incl. MwSt.
 Preis für für 1 ltr Öläquivalent incl. Grundpreislage und incl. MwSt in kWh
 Preis für für 1 ltr Öläquivalent incl. MwSt in kWh bei Mindestabnahme 6 t im Umkreis von 100-200 km,
 incl. aller Nebenkosten (Einblaspauschale, Wiegen etc.)

Heizöl + Heizgas: Deutsches Energiemagazin "Brennstoffspiegel"
[Holzpellets: Deutscher Energie-Pellet-Verband e.V.](http://www.heizpellets.de)

Bild 180: Heizkostenvergleich für Öl, Gas und Holzpellets der Jahre Januar 2004 bis Januar 2008

Die spezifischen Speicherbaukosten, die zu wirtschaftlichen Wärmekosten führen (im Folgenden Speicherbaugrenzkosten genannt), sind Abhängigkeit von den Energiepreissteigerungen. Die verschiedenen Speicherbau-Grenzkosten zeigt Bild 5. Es ist zu erkennen, bei einer Energiepreissteigerung von 3% ein Wärmespeicher mit spez. Kosten von 70 €/m³_{WÄ} ab dem 7. Betriebsjahr wirtschaftliche Wärmegestehungskosten ermöglicht, bei 5% Energiepreissteigerung bereits nach 4 Jahren und bei 8% nach 3 Jahren.

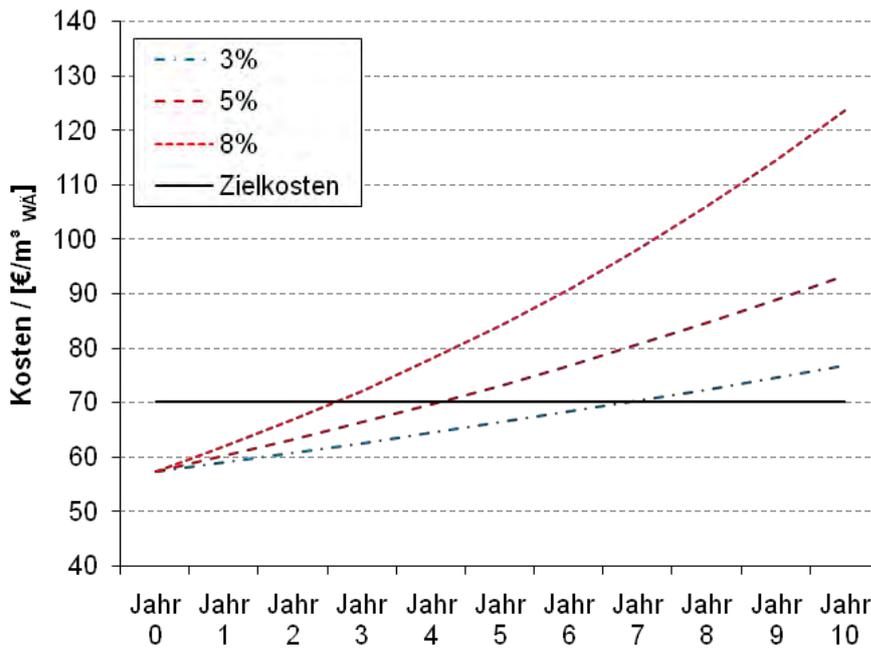


Bild 181: Grenzkosten für Wärmespeicherbau für verschiedene Energiepreissteigerungs-Szenarien

Die max. Speichertemperatur ist abhängig von der Temperaturbeständigkeit der verwendeten Materialien, insbesondere von der Kunststoffdichtungsbahn (KDB). Als Beispiel aus der Praxis sei an dieser Stelle die im Projekt Eggenstein eingesetzte Sperrschichtbahn (KDB aus HDPE mit integrierter Dampfsperre aus Aluminium) erwähnt, die mit dem eingesetzten HDPE-Material aufgrund der Langzeit-Temperaturbeständigkeit nur einen Speicherbetrieb bis max. 80 °C zulässt. Dies führt im genannten Projekt zu einer um ca. 12% reduzierten Wärmespeicherkapazität, welche sich direkt negativ auf die Wirtschaftlichkeit in gleicher Höhe auswirkt.

Alternativ zu o.g. Speicherkonzept würde der Wärmespeicher mittels einer Wärmepumpe (WP) auf eine minimale Speichertemperatur von 10 °C entladen. Dadurch erhöht sich die spezifische Wärmespeicherkapazität je Zyklus von 58 auf 93 kWh/m³_{wÄ} (ca. 60%). Allerdings sind in diesem Fall zusätzlich Baukosten für die WP von ca. 10-20 €/m³_{wÄ} (ca. 20%) sowie zus. Betriebskosten der WP in Abhängigkeit der verschiedenen Temperaturniveaus (COP) zu berücksichtigen. In der Summe führt dieses Gesamtkonzept überschlägig zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit um ca. 20-30%.

zu 2. Kosten ausgeführter Wärmespeicher:

In Tabelle 55 sind die Speicherbaukosten der beiden aktuell ausgeführten Wärmespeicher in Eggenstein und München dargestellt. Die kostenrelevanten Besonderheiten der beiden Speicherkonzepte sind nachfolgend aufgelistet:

a) Kies-Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher im Schulzentrum Eggenstein

- Volumen brutto 4 500m³ bzw. 3 000m³_{WÄ}
- umgedrehter Kegelstumpf im Erdreich (2/3 bzw. 7.5m unter GOK) und zus. Kegelstumpf oberirdisch (1/3 bzw. 3.5m über GOK)
- Gesamtspeicherhöhe ca. 10m
- Speichermedium: Kies/Sand/Wasser
- Abdichtung: HDPE-Sperrschichtbahn
- Wärmedämmung: Schaumglasschotter, Blähglasgranulat
- zus. Außenabdichtung gegen Grundwasser

b) Heißwasser-Wärmespeicher München Ackermannbogen

- Beton-Behälter
- Volumen brutto 5.700m³ bzw. 5.700m³_{WÄ}
- Gesamtspeicherhöhe ca. 15m, davon ca. 3m im Erdreich und ca. 12m im angeschütteten Lärmschutzwall
- Speichermedium Wasser
- Edelstahlauskleidung
- Wärmedämmung: Schaumglasschotter, Blähglasgranulat

Tabelle 55: Speicherbaukosten der beiden aktuell ausgeführten Wärmespeicher in Eggenstein und München

Kosten in €/m ³ _{WÄ}	Eggenstein (Kies-Wasser)	München (Heißwasser)
Erdbau/Tragstruktur	26	85
Dämmung	43	25
Abdichtung	52	31
Beladesystem	6	12
Sonstiges	17	1
Summe	144	154

zu 3. „hochskalierte“ Kosten:

Um eine Vergleichbarkeit untereinander sowie mit den Projektzielkosten zu erhalten, werden die Kosten der Wärmespeicher in Eggenstein und München entsprechend auf ein Speichervolumen von 10 000 m³_{WÄ} „hochskaliert“. Hierbei wird die Geometrie der Wärmespeicher derart angepasst, dass die wesentlichen geometrischen Verhältnisse (Höhe zu Durchmesser, Anteil im Erdreich zu Anteil oberhalb Erdreich

usw.) konstant bleiben. Bei den spezifischen Kosten werden die aktuellen Einheitspreise der durchgeführten Ausschreibungen verwendet. Eine Kostenreduktion aufgrund Massenmehrung wurde nicht angesetzt, da diese derzeit nicht belegbar ist. Etwaige geologische oder hydrologische Einschränkungen in Bezug auf die Speicherhöhe durch z.B. Grundwasser werden vernachlässigt.

Die „hochskalierten“ Speicherbaukosten sind in Tabelle 56 für Eggenstein und in Tabelle 57 für München dargestellt. Für beide Speicherkonzepte ergeben sich Gesamtkosten von knapp über 100 €/m³_{WÄ}. Allerdings ist die Verteilung innerhalb der Hauptkomponenten sehr unterschiedlich. Beim Erdbecken-Wärmespeicher verteilen sich die Hauptkosten (70%) in etwa zu gleichen Teilen auf die Komponenten Abdichtung und Dämmung. Beim Heißwasser-Wärmespeicher liegen ca. 60% der Gesamtkosten beim Erdbau bzw. in der Tragstruktur.

Tabelle 56: Auf 10 000 m³_{WÄ} „hochskalierten“ Speicherbaukosten Eggenstein

Kosten in €/m ³ _{WÄ}	3 000 m ³ _{WÄ}	10 000 m ³ _{WÄ}
Erdbau/Tragstruktur	26	19
Dämmung	43	38
Abdichtung	52	35
Beladesystem	6	3
Sonstiges	17	8
Summe	144	103

Tabelle 57: Auf 10 000 m³_{WÄ} „hochskalierten“ Speicherbaukosten München

Kosten in €/m ³ _{WÄ}	5 700 m ³ _{WÄ}	10 000 m ³ _{WÄ}
Erdbau/Tragstruktur	85	63
Dämmung	25	16
Abdichtung	31	21
Beladesystem	12	7
Sonstiges	1	1
Summe	154	107

zu 4. Kostenreduktionspotentiale:

In den jeweiligen kostenrelevanten Komponenten werden die Kostenreduktionspotentiale für zukünftige Weiterentwicklungen zu suchen sein. Tabelle 58 zeigt das mögliche Kostenreduktionspotential des Erdbecken-

Wärmespeichers mit schwimmender Abdeckung. Bei diesem Konzept werden die Vorteile des einfachen und kostengünstigen Erdbeckens mit dem Speichermedium Wasser kombiniert. Im Ergebnis erhält man einen Wärmespeicher, der die gesetzten Zielkosten von 70 €/m³_{WÄ} im Wesentlichen erreicht (Abweichung < 10%). Allerdings muß erwähnt werden, dass bei dieser Deckelkonstruktion keine Befahrbarkeit und nur eine eingeschränkte Begehbarkeit akzeptiert werden muß, so daß dieses Speicherkonzept nicht an beliebigen Standorten eingesetzt werden kann.

Tabelle 58: Kostenreduktionspotentiale

Kosten in €/m ³ _{WÄ}	Eggenstein 10 000 m ³ _{WÄ}	Erdbecken-Wärmespeicher mit Schwimmende Abdeckung 10 000 m ³ _{WÄ}
Erdbau/Tragstruktur	19	12
Dämmung	38	30
Abdichtung	35	22
Beladesystem	3	4
Sonstiges	8	8
Summe	103	76

zu 5. Hauptkomponenten Abdichtung und Wärmedämmung:

Beim Erdbecken-Wärmespeicher haben die beiden Hauptkomponenten Dämmung (a) und Abdichtung (b) jeweils ca. 30-35% Anteil an den gesamten Speicherbaukosten. Aus diesem Grund werden diese beiden Komponenten und deren Einfluß auf die Gesamtspeicherkosten im Folgenden näher erläutert.

a) Wärmedämmung

Seit der Planung und Entwicklung des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Steinfurt-Borghorst hat sich gezeigt, dass Wärmedämmung vorteilhaft in Form von Schüttgütern wie z.B. Schaumglasschotter oder Blähglasgranulat verwendet wird.

Blähglasgranulat wurde erstmals 1999 beim Kies-Wasser-Wärmespeicher in Steinfurt-Borghorst eingesetzt und anschließend bei den Speichern Hannover-Kronsberg, München-Ackermannbogen, und Eggenstein sowie bei beiden Pufferspeichern in Crailsheim verwendet.

Tabelle 59 zeigt die Entwicklung des reinen Materialpreises sowie die Gesamtkosten für eine Wärmedämmung im Böschungsbereich. Es gilt hinzuweisen, dass der Wandaufbau sowie die Hilfskonstruktionen zum Einbau bei jedem Speicher unterschiedlich und entsprechend zu bewerten sind. Im Bereich von Speicherboden und Speicherdeckel (mit Böschungswinkeln bis ca. 30°) hat sich gezeigt, dass ein verdichtbares Dämmmaterial, wie z.B. Schaumglasschotter Vorteile gegenüber dem nicht verdichtbaren Blähglasgranulat hat (vgl. Kapitel 5.1).

Tabelle 59: Kosten der Wärmedämmung

Projekt	Materialpreis frei Baustelle [€/m ³]	Materialpreis inkl. Einbau [€/m ³]
Blähglasgranulat; Steinfurt-Borghorst; 1999	95	103
Blähglasgranulat, Eggenstein, 2007	90	104
Schaumglasschotter, Eggenstein, 2007	55	85-90
Blähglasgranulat, München, 2006	keine Angabe	150-160 ⁽²⁾
Schaumglasschotter, München, 2006	keine Angabe	90-95
Blähglasgranulat, Crailsheim, 2006	keine Angabe	120 ⁽³⁾
Schaumglasschotter, Crailsheim, 2006	keine Angabe	110 ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ inkl. Kosten für Schalung (Kammern Außen-/Innenabdichtung) von ca. 20 €/m³

⁽²⁾ inkl. Kosten für Schalung (Membran, Säcke usw.) von ca. 50-70 €/m³

⁽³⁾ ohne Schalung, da Kosten noch nicht bekannt

⁽⁴⁾ geringe Mengen, in BigPacks

Die Erfahrungen mit den beiden verschiedenen Wärmedämmstoffen aus dem Bau des Erdbecken-Wärmespeichers in Eggenstein sind:

- Produktion und Transport von Blähglasgranulat gewährleisten einen „trockenen“ Dämmstoff frei Baustelle
- Ziel muß es sein, den Einbau von Blähglasgranulat aus dem Silowagen in kurzer Zeit (Standzeiten Silo-LKW) und möglichst witterungsunabhängig (Feuchteinfluss durch Regen/Schnee usw.) durchzuführen; hier gibt es zukünftig noch Entwicklungsbedarf, um einen trockenen Einbau der Dämmung mit vertretbaren Kosten zu kombinieren
- Lagerung und Transport von Schaumglasschotter haben einen entscheidenden Einfluß auf den Feuchtegehalt des frei Baustelle gelieferten Dämmmaterials; das Risiko für feucht angeliefertes Dämmmaterial kann minimiert werden, wenn die geforderte Qualität in der Ausschreibung definiert und im Produktions- und Lieferprozeß intensiv kommuniziert wird

- Der Anteil der Wärmedämmung an den Gesamtspeicherkosten liegt beim Erdbecken-Wärmespeicher im Bereich von 30-40%, so dass eine angenommene Kostenreduktion beim Material (Material plus Lieferung frei Baustelle) in Höhe von 10% die Gesamtspeicherkosten um 3-4% reduzieren würde.

Beim Heißwasser-Wärmespeicher beträgt der Anteil der Wärmedämmung an den Gesamtspeicherkosten 10-20%, so dass eine angenommene Kostenreduktion beim Material (Material plus Lieferung frei Baustelle) in Höhe von 10% die Gesamtspeicherkosten um 1-2% reduzieren würde.

Fazit Wärmedämmung:

Der Materialpreis inkl. Transport auf die Baustelle stagniert bzw. hat sich nur vernachlässigbar reduziert. Wird berücksichtigt, dass die Dämmstärke und der Aufwand zum trockenen Einbau im Vergleich zu früheren Projekten zunehmen, so ist zu erklären, dass absolut die Gesamtkosten für die Wärmedämmung eines Wärmespeichers ansteigen.

Eine Kostenreduktion ist nach aktuellem Kenntnisstand u.U. über den Markt und über große Abnahmemengen, d.h. sehr große Wärmespeicher ($\sim 100\,000\text{ m}^3/\text{WÄ}$) möglich.

b) Abdichtung

Die Abdichtung des Erdbecken-Wärmespeichers mittels Kunststoffdichtungsbahn (KDB) wurde in den Projekten Chemnitz, Augsburg, Steinfurt-Borghorst und Eggenstein angewendet, wobei prinzipiell zwei unterschiedliche Kunststoffe eingesetzt wurden. In Chemnitz, Augsburg und Eggenstein wurde HDPE verwendet, in Steinfurt-Borghorst fPP.

Aktuell am Markt verfügbare Materialien erfüllen noch nicht alle geforderten Eigenschaften, wie Temperaturbeständigkeit, Lebensdauer und Dampfdiffusionswiderstand, so dass hier noch Entwicklungsbedarf durch Industrie

und/oder Forschung besteht. Tabelle 60 zeigt die spez. Kosten für die Abdichtung in den verschiedenen Projekten:

Tabelle 60: spezifische Kosten der Abdichtung

Projekt	Materialpreis inkl. Einbau [€/m ²]	Bemerkung
PEHD-1-lagig, Chemnitz; 1995	ca. 22	ohne Dampfsperre
PP-2-lagig; Steinfurt-Borghorst; 1999	ca. 40	Dampfsperre separat mit ca. 4 €/m ²
PEHD-1-lagig, Eggenstein, 2007	ca. 10	Außenabdichtung gegen Grundwasser
PEHD-Sperrschichtbahn-1-lagig, Eggenstein, 2007	ca. 50	Innenabdichtung inkl. Dampfsperre; 2-Lagigkeit in Verbindung mit Außenabdichtung
Edelstahl	ca. 120	1.25 mm WIG verschweißt

Zu beachten ist hierbei, dass in Chemnitz die Abdichtung einlagig, in Steinfurt-Borghorst und Eggenstein 2-lagig ausgeführt wurde, was sich auf die spezifischen Kosten je m² Speicheroberfläche auswirkt. Der reine Materialpreis der KDB hat sich von 1995 bis 2007 nicht wesentlich verändert (1 bis 2 €/kg Rohmaterial).

Eine zweilagige Ausführung der Speicherabdichtung für Kies-Wasser-Wärmespeicher ist aus verschiedenen Gründen zu empfehlen:

- zus. Sicherheit gegen Leckagen (Redundanz)
- Zwischenraum der doppelten Abdichtung kann zur Qualitätssicherung während der Bauphase evakuiert werden, so dass eine permanente Dichtheitsprüfung durchgeführt werden kann
- bei zweilagigem Aufbau kann die äußere KDB als Abdichtung gegen Wasser (Schichten-, Oberflächen-, Grundwasser) von Außen verwendet werden
- in den Zwischenraum zwischen innerer und äußerer KDB kann die Wärmedämmung dauerhaft vor Wasser/Feuchtigkeit geschützt werden
- Der Anteil der Abdichtung an den Gesamtspeicherkosten liegt beim Erdbecken-Wärmespeicher im Bereich von 25-35%, so dass eine angenommene Kostenreduktion beim Material (Material plus Lieferung frei Baustelle) in Höhe von 10% die Gesamtspeicherkosten um 2.5-3.5% reduzieren würde.

Beim Heißwasser-Wärmespeicher beträgt der Anteil der Abdichtung an den Gesamtkosten des Wärmespeichers ca. 20%, so dass eine angenommene Kostenreduktion beim Material (Material plus Lieferung frei Baustelle) in Höhe von 10% die Gesamtspeicherkosten um 2% reduzieren würde.

Fazit: Doppelte Abdichtung, Vakuumkontrolle, Erhöhung der Temperaturbeständigkeit und Sperrschicht zur Vermeidung von Wasserdampfdiffusion steigern die Funktion und/oder die Lebensdauer der Wärmespeicher, erhöhen jedoch die Kosten der Abdichtung. Insgesamt sind seit der Planung des Kies-Wasser-Wärmespeichers in Chemnitz im Jahr 1995 die Anforderungen an die Abdichtungsmaterialien wesentlich gestiegen. Dies führt tendenziell zu höheren Speicherbaukosten und widerspricht so dem gesteckten Ziel der Kostenreduktion.

zu 6. Kostenreduktionspotential der Hauptkomponenten:

Im Folgenden wird auf Basis der abgerechneten Kosten des Wärmespeichers in Eggenstein aufgezeigt, welche Potentiale zu weiteren Senkungen bei den Wärmespeicherbaukosten führen können bzw. welche Besonderheiten/Qualitäten zu Mehrkosten führen können

- Eine Anhebung der Temperaturbeständigkeit der KDB um 5 K, d.h. von z.B. 85 °C auf 90 °C erhöht die Wärmespeicherkapazität im direkten Entladebetrieb (90 °C auf 40 °C) um ca. 10%. Im direkt/indirekten Entladebetrieb mit WP erhöht sich die Wärmespeicherkapazität um ca. 6%.
- Die im Projekt Eggenstein notwendige Außenabdichtung gegen Grundwasser hat zu spezifischen Mehrkosten in Höhe von 10 €/m² Speicherbeckenfläche geführt. Auf das Speichervolumen bezogen bedeutet dies Mehrkosten von ca. 4 €/m³_{WÄ}
- Eine doppelte Abdichtung einschließlich Vakuumkontrolle, wie sie im Speicher Steinfurt-Borghorst und in Eggenstein ausgeführt wurde, dient der Qualitätssicherung während der Bauphase, führt aber gleichzeitig zu Mehrkosten von ca. 4-5 €/m³_{WÄ}

- Die Einbringung der Wärmedämmung muß zwingend trocken erfolgen, da eine feucht eingebaute Dämmung nur noch einen Bruchteil ihrer Wärmedämmeigenschaft besitzt (vgl. Kapitel 6.3). Um zusätzlich unabhängig vom Wetter zu werden, sind Techniken/Verfahren zu entwickeln, die es erlauben, Blähglasgranulat in kurzer Zeit (40-60 m³/h) trocken im Speicher einzubauen.

Aus den Erfahrungen dieses Forschungsprojektes und aus dem Bau des Wärmespeichers Eggenstein sind Speicherbaukosten von 70-100 €/m³_{WÄ} für ein Speichervolumen von 10 000m³_{WÄ} zukünftig realistisch. Die Wirtschaftlichkeit der Langzeit-Wärmespeicher wird sich kurzfristig über die steigenden Energiepreise einstellen, so dass der weitere Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt beim Wärmespeicherbau nicht bei den Kosten, sondern bei den Materialien und Bautechniken liegen sollte.

8.2 Kosten von Spezialtiefbauverfahren

Die Kosten eines erdvergrabenen Langzeit-Wärmespeichers hängen neben der Bauart (Behälter bzw. Erdbecken, einlagige bzw. zweilagige Abdichtung, teilweise bzw. komplett wärme gedämmt) stark von der SpeichergroÙe und vom Standort ab. Am Beispiel eines Heißwasser- Wärmespeichers mit einem Volumen von 5000 m³ in einem Gebiet mit Bodenklasse 3 bis 4, nichtbindiger Boden mit hohem Grundwasserstand werden die Kosten als Funktion des h/d-Verhältnisses berechnet. Aufgrund der Bodenverhältnisse kann nur mit flachem Böschungswinkel von 30° bis 40° geböschet werden. Durch das anstehende Grundwasser bietet sich eine Lösung mit Verbau an, wodurch sich zudem energetisch günstigere vertikale Böschungen realisieren lassen. Für das Beispiel wird eine überschnittene Bohrpfehlwand gewählt. Das Wasservolumen soll (i) mit einer freitragenden Sandwichkonstruktion und alternativ (ii) mit einem schwimmenden Deckel abgedeckt werden (vgl. Annahmen, Tabelle 61).

Tabelle 61: Annahmen für die Kostenrechnung

Position	Kosten	Bemerkung
Bohrpfahlwand	330 €/m ²	überschnittene Bohrpfähle, Ø 90 cm
Unterwasserbetonsohle	200 €/m ²	1 m Schichtdicke
Erdaushub	20 €/m ³	Unterwasseraushub inkl. Entsorgung
Wärmedämmung (WD)	150 €/m ³	inkl. Einbau, Schalung, Drainage und Unterspannbahn, 0.5 m Wand-WD, 0.3 m Boden-WD, $\lambda_{\text{eff}} = 0.08 \text{ W}/(\text{m K})$
Abdichtung	50 €/m ²	einlagig, geprüfte Schweißnähte inkl. Schutzvlies
Abdeckung inkl. Wärmedämmung (WD)	(i)	400 €/m ² Freitragende Abdeckung, HL-Beton-PUR-Sandwich, 0.36 m WD, $U = 0.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
	(ii)	200 €/m ² Schwimmende Abdeckung, begehbar, 1.0 m WD mit $U = 0.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Beladesystem	20 000 €	Schichtbeladeeinheit (PP)
Druckhaltung	30 000 €	nur für schwimmende Abdeckung

Unter den genannten Annahmen ergeben sich für das kostenoptimale h/d-Verhältnis von 0.4 für Variante (i) bzw. 0.7 für Variante (ii) Gesamtkosten in Höhe von ca. 140 bzw. 155 €/m³. In Bild 182 sind die Kosten als Funktion des h/d-Verhältnisses dargestellt.

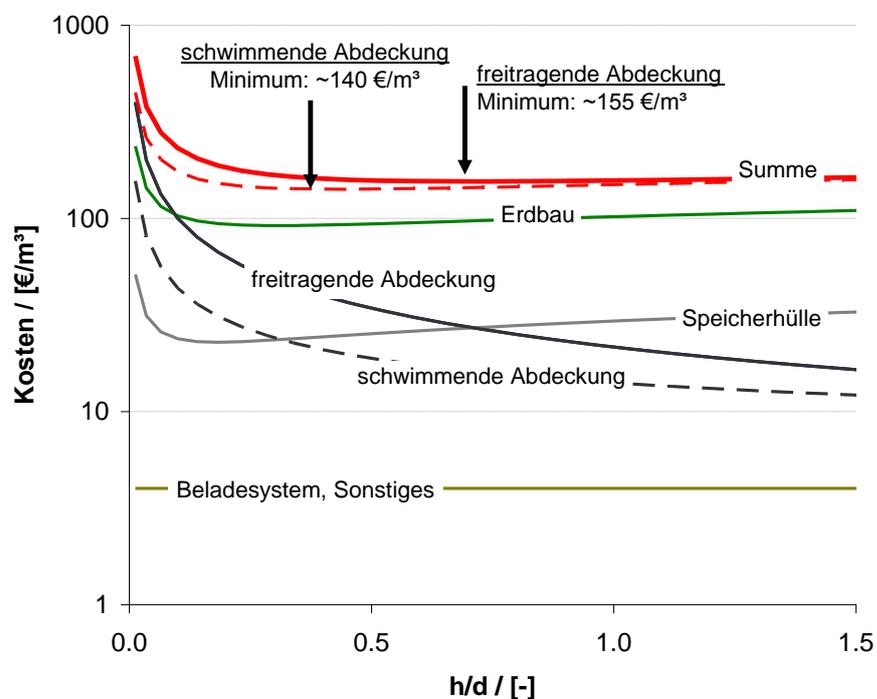


Bild 182: Kosten als Funktion des h/d-Verhältnisses eines 5000 m³ Heißwasser-Wärmespeichers mit freitragender (durchgezogenen Linie) bzw. mit schwimmender Abdeckung (gestrichelte Linie)

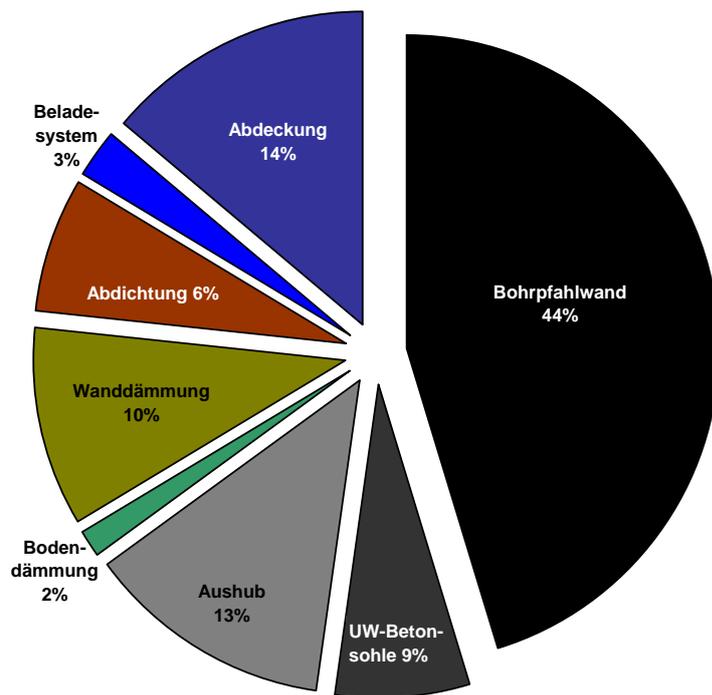


Bild 183: Aufteilung der Kosten für das energetisch optimale h/d-Verhältnis von eins mit freitragender Abdeckung

Für das energetisch optimale h/d-Verhältnis von 1 summieren sich die Kosten auf ca. 155 €/m³ für beide Varianten unter den oben genannten Annahmen bzw. Vereinfachungen. Die exakten Summen können nur durch Ausschreibung ermittelt werden.

Festzuhalten gilt, dass die Kosten von erdvergrabenen Wärmespeichern bei nichtbindigen Böden mit Grundwasser wesentlich durch den (Spezial-)Tiefbau und Erdbau (> 60%) und nicht durch den eigentlichen Speicherbau bestimmt werden (vgl. Bild 183). Für einen Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit einem Volumen von 10 000 m³ (Standort mit bindigem Boden ohne Grundwasser) mit einer schwimmenden Abdeckung können Kosten in Höhe von 70 bis 80 €/m³ erreicht werden. Dabei wird von einer Reduzierung der Kosten des Erdbaus auf unter 15 €/m³ ausgegangen. Weiterhin wird angenommen, dass die Kosten der Speicherhülle von ca. 100 €/m² Speicherfläche für einen 5000 m³ Speicher auf 80 €/m² reduziert werden können.

8.3 Gesamtfazit Kosten

Die gesteckten Ziele gemäß Förderantrag konnten im Wesentlichen erreicht werden. Eine noch größere Kostenreduktion bei den Speicherbaukosten wird aber durch die gestiegenen Ansprüche in den Bereichen der Qualitätssicherung (doppelte Abdichtung, Vakuumprüfung), bei der Funktion (Dampfdiffusionsdichtheit, Temperaturbeständigkeit) und bei der Qualität der Materialien (Feuchtegehalt der Wärmedämmung) wieder kompensiert.

Qualitativ hochwertige und somit teure Materialien, die zukünftig verstärkt im Speicherbau verwendet werden, müssen mehrere Funktionen übernehmen (Synergieeffekt) um so die Gesamtspeicherbaukosten gering zu halten. Beispielsweise dient die zweite Abdichtung als Außenabdichtung gegen Grundwasser, schafft einen Zwischenbereich, der die Wärmedämmung aufnehmen kann und stellt den Bereich zur Vakuumkontrolle bereit.

Zusätzlich müssen die Materialhersteller angeregt werden, die Produkte (Dämmung/Abdichtfolie) leistungsfähiger und/oder kostengünstiger zu machen. Monopolstellungen einzelner Hersteller wäre kontraproduktiv, allerdings verursacht die Entwicklung leistungsfähiger Materialien wie z.B. die Langzeit-Temperaturbeständigkeit der Abdichtbahn einen Aufwand, den der Hersteller über den Verkaufspreis honoriert bekommen möchte.

Eine spürbare Kostenreduktion beim Erdbecken-Wärmespeicher ist mit Wechsel zum Speichermedium Wasser möglich und mit o.g. Beispiel der Schwimmenden Abdeckung dargestellt (vgl. Kapitel 7.10).

Eine weitere Möglichkeit der Kostenreduktion ist die hinlänglich bekannte Verbesserung des A/V-Verhältnisses, (vgl. Bild 184). Die kostenintensiven Komponenten beim Erdbecken-Wärmespeicher sind die Abdichtung und die Wärmedämmung. Diese Kosten hängen linear mit der Oberfläche zusammen. Einen wesentlichen Einfluß auf die mögliche Optimierung des A/V-Verhältnisses haben allerdings die geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen am Speicherstandort. Verfahren des Spezieltiefbaus müssen weiter untersucht und an

9 Forschungsbedarf

- Entwicklung neuer Materialien
 - feuchte- und temperaturunempfindliche Wärmedämmung
 - temperatur- und alterungsbeständige Polymere (Abdichtungen bzw. Verbundfolien)
 - Wärmedämmung und Abdichtung durch „Spritz-Coating“
- Demonstration der Langzeitbeständigkeit durch Feldtests und Laboruntersuchungen (Entwicklung beschleunigter Alterungsverfahren)
- Optimierung des Bauablaufs, wie witterungsunabhängige Verfahren und Bauweisen, Bauen ohne Gerüst
- Entwicklung bzw. Optimierung von Berechnungsprogrammen für Wärme- und Feuchtetransport unter Berücksichtigung von Regen, Grund- und Schichtenwasser
- Messung der Stoffkennwerte neuer Materialien insbesondere Wärmeleitfähigkeit, hygrothermische Stoffwerte, Diffusionswiderstand
- Demonstration eines Langzeit-Wärmespeichers basierend auf den Empfehlungen des Projekts „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeicher-Technologie“
 - 5.000 – 10.000 m³ Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher
 - Zylinder bestehend aus überschnittenen Bohrpfählen
 - Kuppeldach aus Sandwichelementen, Durchmesser 25 m
 - Schichtbeladeeinheit

Programm des Abschlussworkshops

16.10.2007 ITW, Uni Stuttgart

Zeit		Programm	Vortragende
09:00	09:30	Begrüßung + Einleitung + Vorstellung	Heidemann, Mangold, Ochs
09:30	10:30	Grundlagen + Innenlaborversuche (Wärmedämmung, Abdichtung, Berechnung Wärme- und Feuchtetransp.)	Ochs
10:30	11:00	Kaffee, Besichtigung Außenlabor	
11:00	12:00	Innenlaborversuche (cont.) Außenlaborversuche	Ochs
12:00	12:30	Freitragende Abdeckung	Lichtenfels
12:30	13:30	Mittagessen	
13:30	14:00	Speicher in Eggenstein + Kosten Wärmespeicher	Pfeil, Koch
14:00	14:30	Diskussion Kosten + weiterer Forschungsbedarf	
14:30	15:00	Spezialtiefbauverfahren	Rostert
15:00	15:30	Kaffee, Besichtigung ITW	
15:30	16:00	KDB für Langzeit-Wärmespeicher	Schnetzinger, Bohmayr
16:00	16:30	Modulare Wärmespeicher	Wilhelms
16:30	17:00	Diskussion Lebensdauerabschätzung	

Publikationen

Journal

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, Elsevier, 2007.

Tagung

Ochs F., Stumpp, H., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, OTTI, 14. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2004.

Ochs F., Koch H., Lichtenfels A., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Außenlaborversuche zur Entwicklung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für Solarwärme, OTTI, 15. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2005.

Ochs F., Koch H., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Erdreich/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit direktem Beladesystem , OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effektive Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von erdvergrabenen Hochtemperatur-Langzeit-Wärmespeichern, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.

Ochs F., Koch H., Heidemann, W., Müller-Steinhagen H., Soil-Water Pit Heat Store with direct Charging System, Proc. Ecostock 2006, Richard Stockton College of New Jersey, Pomona, USA, 2006.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effective Thermal Conductivity of the Insulation of High Temperature Underground Thermal Stores during Operation, Ecostock 2006, Richard Stockton College of New Jersey, USA, 2006.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effective Thermal Conductivity of the Insulation of Buried Heat Stores during Operation, EuroSun 2006, Glasgow, UK, 2006.

Ochs F., Koch H., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Soil-Water Pit Heat Store with direct Charging System – Technology and Economy, EuroSun 2006, Glasgow, UK, 2006.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, 2. + 3. November, Freiburg, 2006.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit freitragender Abdeckung für solare Nahwärmesysteme, OTTI, 17. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2007.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Seasonal Hot Water Heat Store with Self-supporting Shell Cover, ISES SWC2007 Conference, Peking, China, 2007.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Langzeit-Wärmespeicher für solar unterstützte Nahwärmesysteme, IRES II, Bonn, 2007.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Saisonale Wärmespeicherung - Eine Herausforderung für Polymere, 2. Leobener Symposium POLYMERIC SOLAR MATERIALS, Leoben, Österreich, 2008.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Seasonal Thermal Energy Storage - A Challenging Application for Geosynthetics, EuroGeo4, 4th European geosynthetic Conference, Edinborough, UK, 2008 (abstract accepted).

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Geosynthetic Clay Liner for Seasonal Thermal Energy Stores, EuroGeo4, 4th European geosynthetic Conference, Edinborough, UK, 2008 (abstract accepted).

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von unterirdischen Langzeit-Wärmespeichern am Beispiel des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm, OTTI, Oberflächennahe Geothermie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2008 (angenommen).

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Berechnung der Wärmeverluste erdvergrabener Wärmespeicher, OTTI, 18. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2008 (angenommen).

Ochs F., Koch H., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar assisted district heating system with seasonal thermal energy storage in Eggenstein-Leopoldshafen, EUROSUN2008, Lisabon, Portugal, 2008. (eingereicht)

Sonstige

Ochs F., Sachstandsbericht zum Projekt „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“, Stuttgart, 2005.

Ochs F., State of the Art of Seasonal Thermal Energy Storage, Report, ITW Uni Stuttgart, Stuttgart, 2007.

Vorträge/ Posterpresentation

Ochs F., Further Development of the Pit Heat Storage Technology - First Results, Futurestock 2003, Warschau, Poland, 2003. (Posterpresentation)

Ochs F., Further Development of the Pit Heat Stores, Sunstore 2 Workshop, ITW, Uni Stuttgart, 2003. (Vortrag)

Ochs F., Status of the Project Further Development of Pit Heat Stores, Sunstore 2, Abschlussworkshop, Marstal, DK, 2004. (Vortrag)

Ochs F., Sachstandsbericht zum Projekt „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“, Stuttgart, 2005.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials, NATO Advanced Study Institute on Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption (TESSEC), Izmir, Cesme, 2005.

Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Field Test of Pit Heat Stores – Construction and First Results, NATO Advanced Study Institute on Thermal Energy

Storage for Sustainable Energy Consumption (TESSEC), Izmir, Cesme, Turkey, 2005.

Ochs F., Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, Arbeitskreis Langzeit-Wärmespeicher Feb. 2006, ZAE Bayern, München, 2006. (Vortrag)

Ochs F., Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, Seminar am Institut für Thermische Energietechnik Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel, Kassel, 2006. (Vortrag)

Ochs F., Seasonal Heat Stores – Tank and Pit Heat Store Technology, Industry Workshop, IEA task definition workshop - meeting with company partners, Leoben, 2006. (Vortrag)

Ochs F., Müller-Steinhagen H., Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit hochporöser schüttfähiger Dämmstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Wassergehalt ,VDI GVC Fauchausschusssitzung, Frankfurt, 2006. (Posterpräsentation)

Ochs F., Polymers in Seasonal Heat Stores, IEA task 39 Meeting Aveiro, Portugal, 2007. (Vortrag)

Firmenvorträge

Aluminium Féron GmbH, Düren (D) 2005

Züblin Fertigteilwerk, Gladbeck (D) 2005

Leister Process Technologies, Sarnen (CH) 2006

Sika Sarnafil AG, Sarnen (CH) 2006

AGRU Kunststofftechnik GmbH, Bad Hall (A) 2007

Borealis, Task Meeting Bad Blumau, 2007.

Borealis, K-Messe, Düsseldorf, 2007.

Studien- und Diplomarbeiten

Stumpp H., Thermische Charakterisierung von Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.

Brellochs J., Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Bentonitmatten, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.

Bader M., Entwicklung einer schwimmenden Abdeckung zur Abdichtung und Wärmedämmung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für die saisonale Wärmespeicherung, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.

Dippon M., Beurteilung und Erprobung von Messverfahren für die Bestimmung des Wassergehalts von Dämmstoffen für Erdbecken-Wärmespeicher, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.

Kreis O., Untersuchung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.

Tziggilis C., Beurteilung der Verfahren des Spezialtiefbaus zur Kostenreduktion von Langzeit-Wärmespeichern, Diplomarbeit am Institut für Geotechnik (IGS) der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) und der Firma Züblin Spezialtiefbau GmbH Stuttgart, Stuttgart, 2005.

Janetti M., Entwicklung eines mathematischen Modells für den Wärme- und Feuchtetransport bei hohen Temperaturen, Diplomarbeit an der Maschinenbauakultät der Politecnico di Milano in Zusammenarbeit mit dem Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) , Stuttgart 2005.

Liebchen R., Einfluss des Verdichtungsgrades auf die feuchte- und temperaturabhängige effektive Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.

Literatur

- [1] Ochs F., State of the Art of Seasonal Thermal Energy Storage, Report, ITW Uni Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [2] Benner M., Mahler B., Mangold D., Schmidt T., Schulz M., Seiwald H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 0329606 S, September 1994 bis Oktober 1998, ISBN: 3-9805274, Stuttgart, 1999.
- [3] Benner M., Bodmann M., Mangold D., Nußbicker J., Raab S., Schmidt T., Seiwald H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben, November 1998 bis Januar 2003, ISBN: 3-9805274-2-5, Stuttgart, 2004.
- [4] Bodmann M., Mangold D., Nußbicker J., Raab S., Schenke A., Schmidt T., Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben (Februar 2003 bis Mai 2005), Stuttgart, 2006.
- [5] Gustafson G., Heat Storage in Caverns, Tanks and Pits, An Overview of Swedish Experiences, Proc. of the third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p.525 – 531, Toronto, Canada, 1985.
- [6] Heller A., Floating lid constructions for large pit water heat storage, Megastock 1997, volume 1, p. 503–508, 1997.
- [7] Dalenbäck J. O., Solar Heating with Seasonal Storage – Some Aspects of the Design and Evaluation of Systems with Water Storage, Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1993.
- [8] Raab S., Simulation, Wirtschaftlichkeit und Auslegung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Heißwasser-Wärmespeicher, Diss., Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Cuvillier Verlag, ISBN 3-86727-049-X, 2006.
- [9] Dahlenbäck J. O., Notes Neckarsulm Workshop 1998, European Large Scale Solar Heating Network, Thermie B – Contract No DIS/1164/97, Göteborg, Sweden, 1998.
- [10] Bokhoven T. P., Van Dam J., Kratz P., Recent experience with large solar thermal systems in The Netherlands, Solar Energy, Volume 71, Number 5, November 2001, p. 347-352(6), Elsevier Science, 2001.
- [11] IEA Task XIV, Advanced Active Solar Systems, Working Group “Large Solar Energy Systems”, Final IEA report, No. T.14.LS.1, Delft, 1996.
- [12] Sørensen P. A., Final Technical Report, Solar Thermal and Long Term Heat Storage for District Heating Systems, Sunstore 2, Marstal, DK, 2005.
- [13] Hahne E., Benner M., Mangold D., Schmidt T., Schulz M. E, Solare Nahwärme - Ein Leitfaden für die Praxis, Fachinformationszentrum Karlsruhe (BINE), TÜV-Verlag, Köln, 1998.
- [14] Lottner V., Status of seasonal thermal energy storage in Germany, Proc. Terrastock 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, ISBN: 3-9805274-1-7, Vol.1 p 53-60, 2000.

- [15] Mangold D., Benner M., Schmidt T., Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme, Bine Informationsdienst, Profiinfo, 1/01, 2001.
- [16] Mangold D., Schmidt T., Lottner V., Seasonal Thermal Energy Storage in Germany, Proc. FUTURESTOCK 2003, 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2003.
- [17] Pfeil M., Hahne E., Lottner V., Schulz M., Solare Nahwärme und Saisonale Wärmespeicherung – Stand der Technik, Forschungsverband Sonnenenergie „Themen 97/98“, Köln, 1998.
- [18] Hadorn J.-C., Guide to Seasonal Heat Storage, SIA Documentation D 028 in the series Planning Energy and Buildings, Switherland 1988.
- [19] Boysen A., IEA Task VII, Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage, preliminary design for ten countries, SHC programme IEA, ISBN: 91-540-4371-9,1984.
- [20] Bankston C. A., IEA Task VII, Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage, evaluation of concepts, SHC programme IEA, report #T.t.2.B.,1986.
- [21] Boysen A., IEA Task VII, Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage, Status Report, Stockholm, ISBN: 91-540-5201-7,1990.
- [22] Lehtmets M., Parameter Study of Solar Heating System With Seasonal Ground Storage in Moraine, Report 51, Swedish Geotechnical Institute, Lonköping, 1995.
- [23] Fisch M. N., Guigas M., Dalenbäck J. O., Large-Scale Solar District Heating Status and Future in Europe, Proc. EuroSun'96, p. 157-170, Freiburg, 1996.
- [24] Fisch M. N., M. Guigas, J.O. Dalenbäck, A Review of Large-Scale Solar Heating Systems in Europe, Solar Energy Vol. 63, No. 6, p. 355-366, 1998.
- [25] Mahler B., Ganzheitliche Optimierung von solaren Nahwärmesystemen mit Langzeit-Wärmespeicher, Diss., Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2004.
- [26] Hadorn J.-C., Status of the Seasonal Storage in Switzerland, 7th International Conference on thermal Energy Storage, Megastock 1997, Sapporo, Japan, p. 967- 972, 1997.
- [27] Hadorn J.-C., A review of seasonal storage in Switzerland, Programme de recherche et programme P+D. Stockage de chaleur. Rapport annuel 1997, 115-120 avec annexe), 1997.
- [28] Heller A., Development of Seasonal Storage in Denmark: Status of Storage Programme 1997-2000, Proc. Terrastock 2000, p. 47-52., Stuttgart, 2000.
- [29] Heller A., Wesenberg C., Hansen A., Udvikling af flydende lagkonstruktioner til damvarmelagre, Loesning i tyndpladestål, Rapport, BYG DTU R-033, ISBN: 87-7877-093-9, Lyngby, DK, 2002.
- [30] Duer K., Udvikling af flydende lagkonstruktioner til damvarmelagre, Loesning i tyndpladestål, Slutrapport, DTU ISSN 1396-4011, Institut for Bygninger og Energi (IBE), Lyngby, DK 2000.
- [31] Boysen A., Central solar heating plants with seasonal storage, Stockholm: Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1985.

- [32] Boysen A., Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage – An International Feasibility Study, Proc. of the Third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p.364 – 374, Toronto, Canada, 1985.
- [33] Roseen R., Perers B., A solar heating plant in Studsvik, Design and first year operational performance, Swedish Council for Building Research, D21:1980, 1980.
- [34] Norbäck K., Hallenberg J., A Swedish group solar heating plant with seasonal storage, technical-economic description of the Lambohov project, Swedish Council for Building Research, 790746-8:1980, Sweden, 1980.
- [35] Dalenbäck J. O., A new solar heating plant with seasonal storage – the Särö project, Proc. Thermastock, 5th International Conference on Thermal Energy Storage, Scheveningen, The Netherlands, 1991.
- [36] Hirt N., Benner M., Pilotvorhaben Erdbecken-Heißwasserwärmespeicher in Rottweil, Forschungsbereich zum BMBF Vorhaben 0329383A, Stadtwerke Rottweil, 1997.
- [37] Schulz M., Fisch M. N., Ebel M., Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage in Hamburg-Bramfeld, Status and Experience from the Construction Phase, Proc. EuroSun96, p. 357-362, Freiburg, 1996.
- [38] Bodmann M., Fisch M. N., Betriebserfahrungen der solar unterstützten Nahwärmeversorgung in Hannover, Steinfurt und Hamburg, Proc. OTTI, 13. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2003.
- [39] Reineck K. H., Lichtenfels A., Entwurf und Bemessung von Heißwasser-Wärmespeichern aus Konstruktionsbeton, Bautechnische Studie für das BMFT-Vorhaben „Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher“, Stuttgart, 1997.
- [40] Lichtenfels A., Reineck K. H., The design and construction of the concrete hot water tank in Friedrichshafen for the seasonal storage of solar energy. p. 257 - 262 in Proc. Vol. 1, 8th Int. Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK 2000, August 20 - Sept. 1, Stuttgart, Germany, 2000.
- [41] Jooß M., Dichtigkeit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton, Diss., Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2001.
- [42] Raab S., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar assisted district heating system with seasonal hot water heat store in Friedrichshafen (Germany), Proc. of EuroSun 2004 – The 5th ISES Europe Solar Conference, 20-23 June 2004, Freiburg, 2004.
- [43] Bühl J., Langzeitwärmespeicherung mit einem neuartigen Speicherkonzept, FVS Workshopband: Wärmespeicherung 28. –29.05.2001, Köln, 2001.
- [44] Nilius A., Bühl J., Durchführung eines Messprogramms an dem 300 m³ GFK-Pilotspeicher und Untersuchungen zur Optimierung des Wärmespeicherkonzeptes, Forschungsbericht – Abschlussbericht – Verbundprojekt Solarthermie - 2000, Teilprojekt 3: Solare Nahwärme – Begleitforschung: Förderkennzeichen: 0329606Q/0, Ilmenau, 2003.
- [45] Lichtenfels A., Reineck K. H., High performance concrete hot-water tanks for the seasonal storage of solar energy. p. 263 - 266 in Proc. Vol. 1, 8th Int.

- Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK 2000, August 20 - Sept. 1, Stuttgart, Germany, 2000.
- [46] Schlosser M., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung Hanover Kronsberg, OTTI, 16. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [47] Reuß M., Solare Nahwärmeversorgung Attenkirchen, 7. Internationales Symposium für Sonnenenergienutzung SOLAR 2004, p. 111 – 120, Gleisdorf, Österreich, 2004.
- [48] Reuß M., Solar District Heating with Seasonal Heat Storage in Attenkirchen, Proc. ISES Solar World Congress 2003, Göteborg, Schweden, ISBN: 91-631-4740-8 (CD), 2003.
- [49] Reuß M., Müller J. P., Erdwärmesonden zur thermischen Energiespeicherung im Untergrund, Tiefbau 8/2001, p. 538-535, Erich Schmidt Verlag, München, 2001.
- [50] Raab S., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar assisted district heating system in Crailsheim (Germany), Proc. of Solar World Congress, Orlando, 06.-12.08.2005, Orlando, USA, 2005.
- [51] Bauer D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung in Crailsheim, Proc. Gleisdorf Solar, Gleisdorf, 2006.
- [52] Mangold D., Die neuen Pilotprojekte mit Langzeit-Wärmespeicher, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [53] Mangold D., Saisonale Wärmespeicher: Neue Pilotanlagen im Programm Solarthermie2000plus und Forschungsperspektiven, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, 2006.
- [54] Schmidt T., Mangold D., New Steps in seasonal thermal storage in Germany, Ecostock 2006, Richard Stockton College of New Jersey, USA, 2006.
- [55] Todd R. W., A Solar Heating System with Interseasonal Storage, National Centre for Alternative Technology, Wales, UK, 1978.
- [56] Hadorn J.-C., The Vaulruz Project – Experimental Results, Proc. of the third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p. 456-460, Toronto, Canada, 1985.
- [57] Hansen K. K., Hansen P. N., Ussing V., Seasonal Heat Storage in Underground Warm Water Stores, Construction and Testing of a 500 m³ Store, Technical University of Denmark, Report No 134, Lyngby, DK, 1983.
- [58] Hansen K. K., Hansen P. N., Ussing V., Stratified operation of a 500 m³ test pit, Proc. of the Enerstock Conference, Toronto, Canada, 1985.
- [59] Giebe R., Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie, Diss., Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Stuttgart, 1989.
- [60] Hahne E., Fisch M. N., Giebe R., Hornberger M., Kübler R., Daniels H., Beiträge zum Fachkolloquium Aquifer-Wärmespeicher Pilotprojekt, ITW, Uni Stuttgart, Stuttgart, 1987.
- [61] Vogt J., Auswertung der gemessenen Verluste des Aquifer-Wärmespeichers,

- diploma thesis, ITW, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1987.
- [62] Hahne E., The ITW Solar Heating System: An Oldtimer Fully In Action, Solar Energy Vol. 69, No. 6, p. 469–493, Elsevier, 2000.
- [63] Hahne E., Fisch M. N., Giebe R., Hornberger M., Zukunftsorientierte Wärmeversorgungssysteme für Institute der Energietechnik der Universität Stuttgart, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 03E8187A, Forschungsinstitut für Wärmetechnik e.V., Stuttgart, 1989.
- [64] Voigt B., Mierke T., Modellversuch und Detailuntersuchungen für einen drucklosen Langzeitwärmespeicher, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht 03E-4502-A, Berlin, 1988.
- [65] Voigt B., Mierke T., Long-term heat storage in Berlin (West), Final project results and economical aspects, Proc. Jiggastock 1988, V1. p. 185-188, Versailles, France, 1988.
- [66] Voigt B., Ruhnau R., Schilf L., Long Term Heat Accumulator in Berlin (West Germany). Storage Construction, First Results and Further Development, Proc. of the third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling, Enerstock Conference, p.623 – 629, Toronto, Canada, 1985.
- [67] Seefeld D., Timm H., Großspeicherabdeckung durch vsi-Elemente, Technical Report BMFT-FB-T 86-007, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Berlin, 1986.
- [68] Zinko H., Hahn T., The high temperatures (95 °C) water pit storage of Malung, Proc. Calorstock '94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Finland, 1994.
- [69] Wesenberg C. Skitseprojekt, Sol til sommerstop i eksisterende halmvarmeværk - Forsøgsanlæg, Sketch, Solar for existing straw heating plants - Pilot plant, Nellesmann Consultants, Denmark, 1990.
- [70] Wesenberg C., Undersøgelse og udbedring af varmeakkumuleringstank udført i beton (Hørby-tanken), 1990-1993, Investigation and Reconstruction of Thermal Storage Tank in Concrete (Hoerby Storage), Nellesmann Consultants, Aalborg, Denmark, 1993.
- [71] Pedersen V. P., Målinger og evaluering af varmeakkumuleringstank i Hørby, Measurements and evaluation of thermal storage tank in Hoerby, Nr. 92-10, Cenergia Energy Consultants, Thermal Insulation, Laboratory, Technical Highschool of Denmark and Folkecentret for VE, Ballerup, Denmark, 1992.
- [72] Heller A., Pit Water Storage Ottrupgaard - A follow-up, Proc. Terrastock 2000, p. 267-274, Stuttgart, 2000.
- [73] Ussing V., Forsøgborehulslager og ombygning af damvarmelager til gruslager, Bore Hole Storage and Reconstruction of Pit Water Storage to Gravel Storage, nr. 219, Thermal Insulation Laboratory, Technical Highschool of Denmark, Building 118, DTU, 2800 Lyngby, 1991.
- [74] Ritola J. H., Sjökölla High Temperature Pit Store With Membrane Lining, Finland, 1994.
- [75] Ritola J. H., Sjökölla high temperative pit store with membrane liner, VTT Communities and Infrastructure, Rock and Environmental Engineering, Final

report. 3 Finland, 1995, (in Finnish).

- [76] Duer K., Svendsen S., Construction of a Seasonal Heat Storage based on a Pit with Clay Membrane, Proc. ISES Solar World Congress, Budapest, Hungary, 1993.
- [77] Maureschat G., Heller A., Modelforsøg: Varmetransport og effektafgivelse i grus. Experiments with heat transfer in gravel materials. Special Topics, SR-9716, Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, 1999.
- [78] Holm L., Experiences and results from Marstal district heating plant, Proc. International Congress Energy and the Environment 2000, 17th Scientific Conference on Energy and Environment, Opatija, Croatia, Vol.1 p. 157-164, 2000.
- [79] Holm L., The Solar Energy Plant at Marstal, News from DBDH, DK, 2000.
- [80] Urbaneck T., Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern, Diss. (2003), TU Chemnitz, Shaker Verlag, ISBN: 3-8322-2762, Aachen, 2004.
- [81] Urbaneck T., Schirmer U., Central solar heating plant with gravel water storage in Chemnitz (Germany), Proc. Terrastock 2000, p. 275-278, Stuttgart, 2000.
- [82] Pfeil M., Hornberger M., Hahne E., Seasonal Storage of Solar Energy in the Solaris Technology Park in Chemnitz, Proc. EuroSun06, p. 315-319, Freiburg, 2006.
- [83] Urbaneck T., Platzer B., Schirmer U., Advanced monitoring of gravel water storage, Proc. Futurestock 2003, 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2003.
- [84] Koch H., Hahne E., Seasonal Storage of Solar Energy for an Apartment/Office Building, Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, Sapporo, Japan, 1997.
- [85] Hausladen G., Pertler H., Landesamt für Umweltschutz (LFU) Augsburg/ Germany – Solare Langzeitwärmespeicherung mittels Großkollektoranlage mit Kies-Wasser-Speicher, Proc. DGS, 11. Internationales Sonnenforum, p. 568-574, Köln, 1998.
- [86] Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, Energiekonzept des Landesamts für Umweltschutz, LfU-1/1-E92/2002, Ausstellung Erneuerbare Energien, Augsburg, Germany, 2003.
- [87] Reuß M., Saisonale Wärmespeicherung im Untergrund - eine Lösung für die effiziente Wärmenutzung auch bei Biogas?, Proc., Biogasmärkte der Zukunft, C.A.R.M.E.N. e.V., p. 40 - 50, Straubing, Germany, 2003.
- [88] Pfeil M., Koch H., Benner M., The third generation of long-term gravel-water storage - Steinfurt-Borghorst, Proc. Terrastock 2000, p. 275-278, Stuttgart, Germany, 2000.
- [89] Pfeil M., Koch H., Saisonaler Kies/Wasser-Wärmespeicher der 3. Generation für die Solarsiedlung Steinfurt Borghorst, Proc. OTTI, 10. Symposium „Thermische Solarenergie“, p. 59-63, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 1999.

- [90] Pfeil M., Kies/Wasser-Wärmespeicher: Langzeitwärmespeicherung ökologisch und kostengünstig, Proc. Otti-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Garching, Germany, 2004.
- [91] Sørensen P. A., PlanEnergi, SUNSTORE 2, Monitoring results from the project and construction of 10000 m³ pit heat storage, Sunstore 2 Workshop, September 2004, Marstal, Aero, DK, 2004.
- [92] Sørensen P. A., PlanEnergi, Application for PSO R&D 2007 programme, Demonstration of heat pump and long term heat storage as a regulation unit in the electricity system, submitted to Energinet.dk, 2006.
- [93] Pfeil & Koch Ingenieurgesellschaft (PKi), Solare Nahwärme für das Schulzentrum Eggenstein-Leopoldshafen, Vorhabensbeschreibung zur Fördermittelbeantragung beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart, 2005.
- [94] Gimmelsberger J., Efficient Energy Supply (Electricity and District Heat) for the City of Linz, Linz Strom AG, 9. Symposium Energyinnovation, Producing more with less: Efficiency in Power Generation, Energy Efficiency In IPPC Installations, European Conference, Vienna, 2004.
- [95] Hedbäck A. J. W., Short Term Heat Storage System References, Sweden, 2005.
- [96] Lavan Z., Thompson J., Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks, Solar Energy, 1977, 19(5), p. 519-524, Elsevier 1977.
- [97] Sharp M. K., Loehrke R. I., Stratified versus well-mixed sensible heat storage in a solar space heating system. ASME 78-HT-49, p. 1-7, 1978.
- [98] Abdoly, Rapp, Theoretical and experimental studies of stratified thermocline storage of hot water, Energy Conversion and Management 22, p. 275-285, 1982.
- [99] Cole R. L., Bellinger F. O., Thermally stratified tanks, ASHRAE Transactions 88, Part 2(1), p. 1005-1017, 1982.
- [100] Ismail K. A. R., Carrocci L. R., Performance and economical analysis of stratified storage tanks, Proc. Jigastock, 4th international conference on energy storage for building heating and cooling, Versailles, Vol. 2, p. 753-756, Versailles, France, 1988.
- [101] Cotter M. A., Charles M. E., Transient cooling of petroleum by natural convection in cylindrical storage tanks 2: Effect of heat transfer coefficient, aspect ratio, and temperature-dependent viscosity. International Journal of Heat and Mass Transfer 36, p. 2175-2182, Elsevier, 1993.
- [102] Al-Najem N. M., Al-Marafie A., Ezuddin K. Y., Analytical and experimental investigation of thermal stratification in storage tanks, International Journal of Energy Research 17, 77-88, 1993.
- [103] Hahne E., Chen Y., Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hotwater stores, Solar Energy 64, 9-18, Elsevier, 1998.
- [104] Matrawy K. K., Farkas I., Buzás J., Optimum selection of the aspect ratio of solar storage tank. Proc. EuroSun'96, p. 251-255, Freiburg, 1996.
- [105] Nelson J. E. B., Balakrishnan A. R., Murthy S. S., Experiments on stratified chilled water tanks. International Journal of Refrigeration 22, p. 216-234,

1999.

- [106] Cabezza L., Castell A., Medrano M., Project Report: Dimensionless parameters used to characterize water tank stratification, A Report of IEA SHC - Task 32, Advanced storage concepts for solar and low energy buildings, 2006.
- [107] Panthalookaran V., CFD-Assisted Characterization and Design of Hot Water Seasonal Heat Stores, Thesis, Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW), University of Stuttgart, Stuttgart, 2006.
- [108] Geipel W., Planung, Bau und Erprobung eines wärmegeprägten Erdbecken-Versuchswärmespeichers mit 30000m³ Inhalt zur Aufnahme von Warmwasser mit mindestens 90 °C, Forschungsbericht BMFT-T 83-020, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Stadtwerke Mannheim AG (SMA), Mannheim, 1983.
- [109] Geipel W., Bau des ersten Erdbeckenwärmespeichers in Mannheim, Brennstoff-Wärme-Kraft 31, p. 56-61, Germany, 1979.
- [110] Geipel W., Warum der Erdbecken-Warmwasserspeicher in Mannheim nicht gebaut wurde, Fernwärme international 11, p.52–59, Germany, 1982.
- [111] Stickrodt J., Breuer W., Langzeitwärmespeicher Prototyp Wolfsburg, Stufe 1 – Planungsphase, Technical Report BMFT-FB-T 84-100, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1984.
- [112] Tziggilis C., Beurteilung der Verfahren des Spezialtiefbaus zur Kostenreduktion von Langzeit-Wärmespeichern, Diplomarbeit am IGS und ITW mit Fa. Züblin Spezialtiefbau GmbH Stuttgart, Stuttgart, 2005.
- [113] Schnell W., Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben, 2. Auflage, Teubner Verlag, 1995.
- [114] Eichler K. (editor), Spezialtiefbau, Erkundung und Ausführung – Technik und Umwelt – Methoden und Auswirkungen – Baustoffe und Verfahren, second Edition, expert verlag, Band 566, ISBN: 3-8169-2040-3, Renningen, 2002.
- [115] Bader M., Entwicklung einer schwimmenden Abdeckung zur Abdichtung und Wärmedämmung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für die saisonale Wärmespeicherung, diploma thesis, ITW Uni Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [116] Liegl V., Konstruktive Optimierung der schwimmenden Abdeckung eines Erdbeckenwärmespeichers, Diplomarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich, 1996.
- [117] Braxein A., Späte F., Friedel J., Solarthermie 2000, Teilprogramm 3: Solare Nahwärme Solar-Campus Jülich, Machbarkeitsstudie des saisonalen Wärmespeichers, In Statusbericht 98 Solarunterstützte Nahwärmeversorgung, Saisonale Wärmespeicherung, p.178–188, Jülich, Germany, 1998.
- [118] Braxein A., Braheim C., Final Report, Vorhaben 0329606 H, Solarthermie-2000, Teilprogramm 3: Solare Nahwärme. Solar Campus Jülich, Machbarkeitsuntersuchung des saisonalen Wärmespeichers, Aachen, 1996.
- [119] Meliß M., Säte F., The Solar Heating System with Seasonal Storage at the Solar Campus Jülich, Solar Energy Vol. 69, No. 6, p. 525-533, Elsevier, 2000.

- [120] Grydehoj H., Ulbjerg F., District heating – a precondition for efficient use of solar heating, News from DBDH, DK, 2005.
- [121] Rügger R., Hufenus R., Bauen mit Geokunststoffen, Ein Handbuch für den Geokunststoffanwender, Schweizerischer Verband für Geokunststoffe, ISBN: 3-9522774-01, Switzerland, 2003.
- [122] Nußbicker J., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar Assisted District Heating System With Duct Thermal Energy Store In Neckarsulm-Amorbach (Germany), Proc. ISES Solar World Congress 2003, Göteborg (Schweden), ISBN: 91-631-4740-8 (CD), 2003.
- [123] Nußbicker J., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Solar assisted district heating system with seasonal duct heat store in Neckarsulm-Amorbach (Germany), Proc. EuroSun2004, 14. Internationales Sonnenforum, Freiburg i. Br., Volume 1, p. 509-517, ISBN: 3-9809656-0-0 (Vol. 1-3), 2004.
- [124] Harasim A., Weissenbach B., Entwicklung eines Aquifer-Wärmespeichers Phase I, Band I, Gesamtdarstellung der Ergebnisse, BMTF Vorhaben T 82-032, Ottobrun, 1982.
- [125] Sanner B. (Editor), High Temperature Underground Thermal Energy Storage – State of the art and Prospects. A review within ECES Annex 12 of the International Energy Agency IEA. Giessener Geologische Schriften Nr. 67, Lenz-Verlag, Giessen, ISSN 0340-0654, 1999.
- [126] Schmidt T., Kabus F., Müller-Steinhagen H., The Central Solar Heating Plant with Aquifer Thermal Energy Store in Rostock, Germany, Proc. Terrastock 2000, p. 275-278, Stuttgart, Germany, 2000.
- [127] Köhler S., Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Aquiferspeicher, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, Germany, 2006.
- [128] Kabus F., Saisonale Speicherung von Überschusswärme aus einem Heizkraftwerk in einen Aquifer in Neubrandenburg, Proc. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen, Freiburg, Germany, 2006.
- [129] Stumpp H., Thermische Charakterisierung von Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [130] Vogeley J., Voormann F., Straub A., Dämmstoffe, Produktdatenblätter, Semesterarbeit, www.ift.uni-karlsruhe.de/BuP/download/SemesterarbeitDaemmstoffe.pdf, 2003.
- [131] Neal W. E. J., Thermal Energy Storage, Phys. Technol., Vol. 12, 1981, Great Britain, 1981.
- [132] Ducke E., Kaps Ch., Neue Entwicklungen bei der Herstellung von Blähgranulaten aus Altglas, Beitrag Recycling `99, Bauhaus-Universität Weimar, 1999.
- [133] Hurley J., A UK Market Survey for Foam Glass, Research and Development Final Report, GLA 0015, The Waste and Resources Action Programme, 2003.

- [134] Lu H., Swift A. H. P., Reconstruction and Operation of the El Paso Solar Pond with a Geosynthetic Clay Liner System, 1996 Solar Engineering-Proc. of ASME International Solar Energy Conference, J. Davidson and J. Chavez, eds., San Antonio, TX, 1996.
- [135] Swift A. H. P., Golding P., El Paso Solar Pond Test Project-Phase II, Final Report, Research and Laboratory Services Division, U.S. Department of Interior, 1992.
- [136] Lu H., Swift A. H. P., Hein H. D., Walton J.C., Advancements in Salinity Gradient Solar Pond Technology Based on Sixteen Years of Operational Experience, Journal of Solar Energy Engng. Journal of Solar Energy Engineering, V. 126, Issue 2, p. 759-767, 2004.
- [137] Cao J., Study on integrated heating technique of the Solar Pond, Proc. EuroSun 2004, p.151-160, Freiburg, Germany, 2004.
- [138] Weinberger H, The Physics of Solar Ponds, Solar Energy, 8(2), p. 45–56, Elsevier, 1964.
- [139] Jubran B. A., Al-Abdali H., Al-Hiddabi S., Al-Hinai H., Zurigat Y., Numerical modelling of convective layers in solar ponds, Solar Energy 77 (2004), p. 339–345, 2004.
- [140] Jaefarzadeh M. R., Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect, Solar Energy 77 (2004), p. 281–290, Elsevier, 2004.
- [141] Koerner R. M., Designing With Geosynthetics, Fourth Edition. Prentice-Hall, International, ISBN: 0-13-726175-6, Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [142] Stief K. (editor), Deponietechnik 1996, ISBN: 3 503 03294 4, Berlin, 1996.
- [143] Gallagher E. M. G., Needham A. D., Smith D. M., Experience with Geosynthetics Design and Construction of landfill Steepwall Lining Systems, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p. 227-234, Munich, 2003.
- [144] Rollin A. L., Jacquelin T., Forget B., Saunier P., A guide to Detect Leaks on Installed Geomembranes, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p.235-240, Munich, 2003.
- [145] Brummermann K., Schlütter A., New German Recommendations for Geomembrane Sealing Systems in Tunnel Construction, Proc. Third European Geosynthetics Conference Eurogeo3, p. 211-214, Munich, 2003.
- [146] Young G., Membrane liners and floating covers for existing open water storage basins: WHY? and HOW?, In 63rd Annual Water Industry Engineers and Operators Conference. Gutteridge Haskins & Davey Pty Ltd., 2000.
- [147] Talley D., Magin C., (editors) , Flexible-Membrane Covers and Linings for Potable-Water Reservoirs, American Water Works Association, Denver, 3. edition, Denver, USA, 2000.
- [148] Roos K. F., Moser M. A., Martin A. G., Agstar charter farm program: Experience with five floating lagoon covers, In Fourth Biomass Conference of the Americas. US Environmental Protection Agency, 1999.
- [149] Peggs I. D., Nosko V., Razdorov P., Gavin P., Leak Monitoring for a Double Liner Separated by a Novel Conductive Geotextile, Proc. Third European

- Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p.515-519, Munich, 2003.
- [150] Hsuan Y. G., Körner R. M., Lifetime Prediction of Polymeric Geomembranes used in new Dam Construction and Dam Rehabilitation, Proceedings Assoc. of State Dam Safety, Officials Conference, Lake Harmony, ,Pennsylvania, USA, 1998.
- [151] Schäfer P., Strobl Th., Hydrodynamic Loads on Geomembranes in Open Water Canals, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p. 383-386, Munich, 2003.
- [152] Koerner R. M., Hsuan Y. G., Koerner G. R., Geomembrane Lifetime Prediction: Unexposed and Exposed Conditions, GRI White Paper #6, Geosynthetic Institute, Folsom, USA, 2005.
- [153] Fricklas R., Griffin C. W., Manual of Low-Slope Roof Systems, McGraw-Hill Professional, ISBN: 0-07-145828-X, 2006.
- [154] March F., Roy D., Flat Roofing: A Guide to Good Practice, RIBA Publications, ISBN: 0950791911, 1995.
- [155] Hanke A., Entwicklung von Gummierungsmaterial als Korrosionsschutz, Diss., Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2000.
- [156] Johansen W., PE-X Borehole heat Exchangers for High Temperature UTES Applications, Ecstock 2006, Richard Stockton College of New Jersey, USA, 2006.
- [157] Kramer E., Koppelman J., Dobrowsky J., Oxidation stability of crosslinked polyethylene, Isothermal DTA method, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Volume 35, Number 2, ISSN 1388-6150, p. 443-457, 1998.
- [158] Saechtling H., Oberbach K., Kunststoffaschenbuch, 28. Auflage, Hanser Verlag, ISBN: 3-446-21605-7, München, 2001.
- [159] Reddy D. V., Sitomer, G. R., Life Prediction of HDPE Geomembranes in Solid Waste Landfills, Annual Report, Center for Marine Structures and Geotechnique, Departement of Ocean Engineering, Florida Atlantic University, Glades, USA, 1997.
- [160] Needham A. D., Gallagher E. M. G., Smith J. W. N., Prediction of the Long Term Generation of Defects in HDPE Liners, Proc, EuroGeo3, Volume II, p.507 ff., Munich, 2003.
- [161] Bartholomeo P., Astruc A., Massieu E., Lavaud S., Benneton J. P., Thermo-oxidative ageing of polypropylene geosynthetics monitored by thermal analysis and mechanical tensile tests, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p.415-420, Munich, 2003.
- [162] Pedersen S., Nielsen U., Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre, (Estimation of lifetime for polymer liners for seasonal, thermal storage), Teknologisk Institut, Gregersvej, 2630 Taastrup, Denmark, 1999.
- [163] Pedersen S., Fastlæggelse af levetider for 2 HDPE plastlinere til sæsonvarmelagre, UVE-project, "Aktiveter vedrorende udvikling af plastlinere til sæsonvarmelagre", ENS. J. nr 51181/01-0065, Teknologisk Institut, Lyngby, DK, 2004.
- [164] Lopes M. d. G. A., Barroso M., Mechanical performance of HDPE

- geomembrane seams after sunlight exposure, Proc. Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo3, p. 425 – 428, Munich, 2003.
- [165] Grosskurth K. P., Langzeituntersuchung an Heißwassergelagerten Kunststoff- und Elastomerdichtungsbahnen, BMFT Vorhaben 03E-8325 – A, Langzeituntersuchungen für den Langzeitwärmespeicher Prototyp Wolfsburg, Braunschweig, 1984.
- [166] Großkurth K. P., Langzeitmaterialuntersuchungen für den Langzeit-Wärmespeicher Prototyp Wolfsburg, BMFT-Forschungsbericht zum Vorhaben 03E-8325-A, Braunschweig, 1984.
- [167] Bohmayr W., Fa. Agru, Forschungsprojekt Eggenstein Solarer Wärmespeicher, Lebensdauerabschätzung CKW Sperrschichtbahnen, 2007.
- [168] Brown R. P., Butler T., Hawley S. W., Ageing of Rubber, Accelerated Heat Aging Test Results, Rapra Technology Limited, 2001.
- [169] Brellochs J., Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Bentonitmatten, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [170] ITW, Universität Stuttgart, PKi, Pfeil und Koch Ingenieure, Antrag auf Förderung aus Solarthermie-2000, Teilprogramm 3 „Solar unterstützte Nahwärme“, Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, Stuttgart, 2002.
- [171] West D., ZSW, Report, Improvement of the gravel-water-store (WP 3), Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung, Stuttgart, 2000.
- [172] Eggloffstein T., Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien, Band 3, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, ISBN 3-9806840-1-6, 2000.
- [173] Rowe R., Geotextiles and Geomembranes, 18. Bericht, International Geosynthetics Society, ISSN 0266-1144, 2000.
- [174] Krischer O., Kast W., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer-Verlag, ISBN: 3-540-08280-8, Heidelberg, 1992.
- [175] Wiese G., Wasserdampfdiffusion, Ein Beitrag zur praktischen Bauphysik, Teubner Studienskripte, ISBN 3-519-10066-5, Stuttgart, 1985.
- [176] Lutz P., Jenisch R., Klopfer H., Lehrbuch der Bauphysik, 5. überarbeitete Auflage, Teubner-Verlag, ISBN 3-519-45014-3, Wiesbaden, 2002.
- [177] Schirmer R., Die Diffusionswiderstandszahl von Wasserdampf-Luftgemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit, VDI Beiheft Verfahrenstechnik 6,170, 1938.
- [178] Andersson A.-C., Verification of calculation methods for moisture transport in porous building materials, Swedish Council for Building Research, D6:1985, Stockholm, 1985.
- [179] De Vries D. A., Heat transfer in Soils, Physics of Plant Environment, Van Wijk W.R. Ed. Amsterdam, North Holand Publishing, 1966.
- [180] VDI-Wärmeatlas, 9. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 3-540-41201-8, 2002.

- [181] Sonntag D., Heinze D., Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und Eis. (1. Aufl.), VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1982.
- [182] Künzel H. M., Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss., Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen, 1994.
- [183] Fischer H. M., Lehrbuch der Bauphysik, Teubner Verlag, ISBN 3-519-35014-9, Stuttgart, 1997.
- [184] Kaczmarek D., Barrierefolien für Vakuum-Isolationspanele im Bauwesen, Proc. VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis", Weimar, 2005.
- [185] Köhl M., Heck M., Noller K., Degradation of the efficiency of vacuum insulation panels by gas permeation through barrier films, 10 DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 2005.
- [186] Adam G., Jung J., Eine neue Methode zur Bestimmung der Diffusions- und Permeationskoeffizienten von Elastomeren", Kautschuk Gummi Kunststoffe 43, p. 1067-1070, 1990.
- [187] Aluminium-Taschenbuch. Bd.2. Umformen von Aluminium, Verlag: Aluminium, Aluminium-Zentrale, ISBN 3870172428, Düsseldorf, 1999.
- [188] Berg C., Grundlagen der Wägetechnik – Begriffe, Messverfahren, Fehlereinflüsse, 2. Auflage, Sartorius AG, 1996.
- [189] Brandrup J., Immergut E. H., Polymer Handbook, Third Edition, A Wiley Interscience Publication, ISBN 0-471-81244-7, New York, 1989.
- [190] Cassidy P. E., Aminabhavi T. M., Water permeation through elastomers and plastics, Rubber chemistry and technology 56, p. 594-618, 1983.
- [191] Comyn J., Introduction to polymer permeability and the mathematics of diffusion, Polymer Permeability, Elsevier applied science publishers, 1985.
- [192] Crank J., The mathematics of diffusion, Oxford, Clarendon, 1975.
- [193] Domininghaus H., Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDJ Verlag, ISBN 3-540-62659-X, 1998.
- [194] Gibbesch B., Schedlitzki D., Water Vapour Permeability of Organic Materials for Coatings, Rubber Linings and Equipment Components, PCE, Technology Publishing Company, 1996.
- [195] Gibson P. W., Effect of Temperature on Water Vapour Transport Through Polymer Membrane Laminates, Journal of Polymer Testing 19 (6), p. 673-691, 2000.
- [196] Halek G. W., Relationship between polymer structure and performance in food packaging applications, Food and Packaging interactions, ISBN 0-8412-1465-4, Hotchkiss, J.H. chapter 16, p 195-202, 1988.
- [197] Haxo H. E., Miedema J. A., Nelson N. A., Permeability of polymeric membrane lining materials for waste management facilities, Education Symposium, Migration of Gases, Liquids and Solids in Elastomers, 126th Meeting, Rubber Division, American Chemical Society, Denver, Colorado,

1984.

- [198] Hertlein J., Eigenschaftsprofile von Packstoffen und Verpackungen aus Kunststoff, *Bauwelt* 135, Nr. 4, p. 140 -150, 1995.
- [199] Hoffmann M., Krömer H., Kuhn R., *Polymer Analytik: makromolekulare Strukturen physical. Methoden, Anwendungskriterien I und II*, Georg Thieme Verlag, ISBN 3-13-519801-4, 1977.
- [200] Hopfenberg H. B. (editor), *Permeability of Plastic films and Coatings to Gases, Vapors, and Liquids, Polymer Science and Technology, Volume 6*, ISBN 0-306-36406-9, Plenum Press, New York, 1974.
- [201] Jamieson E. H. H., Windle A. H., Structure and oxygen barrier properties of metallized polymer film, *Journal of Material Science*, 18, Nr. 1, p. 64-80, 1983.
- [202] Massey L.K., *Permeability Properties of Plastics and Elastomers – A Guide to Packaging and Barrier Materials, Second Edition, Volume 2. Plastic Design Library*, 2003.
- [203] Mercea P., Muresan L., Mecea V., Permeation of gases through metallized polymer membranes, *Journal of Membrane Science* 24, p. 297-307, 1985.
- [204] Murray L., McCarry P., Effect of Test Conditions and PET Surface Treatment on Moisture Barrier of Multilayer Metallized Film Structures, *Journal of Plastic Film & Sheeting*, Vol. 19, 2003.
- [205] Osswald T. A., Menges G., *Material science of polymers for engineers, 2. ed.*, ISBN 1-56990-348-4, Hanser, Munich, 2003.
- [206] Rogers C. E., Permeation of gases and vapours in polymers. Comyn, J. *Polymer Permeability*, London Elsevier, p. 11-73, 1985.
- [207] Roos K. F., Moser M. A., Martin A. G., Agstar charter farm program: Experience with five floating lagoon covers, In *Fourth Biomass Conference of the Americas*, US Environmental Protection Agency, 1999.
- [208] Salame M., Temple E. J., High nitrile copolymers for food and beverage packaging, *Chemistry of food packaging*, Americ. Chem. Soc., Coult, R. F., ISBN 08412-0205-2, p. 61-76, 1974.
- [209] Teichmann W., report, measurements by Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung, (IVV), www.ivv.fraunhofer.de.
- [210] Visscher K., Medium-Term Solar Heat Storage in a Water Filled Bag Tank, 9th Conference on Solar Energy in High Latitudes, Northsun 2001, Leiden, The Netherlands, 2001.
- [211] Wilhelms C., Vajen K., Jordan U., Theoretische und experimentelle Untersuchungen großer kostengünstiger Speicher in Mehrkomponentenbauweise, Poster zum PTJ-Statusseminar, Freiburg, 2006, Posterbeitrag.
- [212] Wilhelms C., Theoretische und experimentelle Untersuchung neuartiger Konzepte zur Warmwasserspeicherung für thermische Solaranlagen, Diplomarbeit, Kassel, 2005.
- [213] Zehner P., Experimentelle und theoretische Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit durchströmter Kugelschüttungen bei mäßigen und hohen

- Temperaturen, VDI-Forschungsheft 558, Karlsruhe, 1973.
- [214] Schlünder E.-U., Tsotsas E., Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten, ISBN 3-13-713001-8, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1988.
- [215] Zehendner H., Wärmedämmstoffe für hohe Temperaturen- Anforderungen für Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit, wksb, Heft 25, 33. Jahrgang 1988, Ludwigshafen, 1988.
- [216] Cammerer W. F., Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie, 5. Auflage, ISBN 3-540-57426-3, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [217] Großmann K., Neue Wege für das Ermitteln der effektiven Schüttgut-Wärmeleitfähigkeit und für die indirekte Gutfeuchtebestimmung, Fortschr. Ber. VDI Reihe 3 Nr. 314, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [218] Zeitler M. G., Allgemeingültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten, Diss., Universität Essen, 2000.
- [219] Benner M., Blähglasgranulat Liaver, Bestimmung von Richtwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit, ITW Universität Stuttgart, 1999.
- [220] Benner M., Interne Messdaten, Daten ITW, Uni Stuttgart, 2001.
- [221] Salmon D. R., Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials, Meas. Sci. Technol. 12 R89-R98, 2001.
- [222] Salmon D. R., Williams R. G., Ronald P. T., Thermal Conductivity and Moisture Measurements on Masonry Materials, Insulation Materials: Testing and Applications: 4th Volume, ASTM STP 1426, A. O. Desjarlais and R. R. Zarr, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2002.
- [223] Kreis O., Untersuchung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.
- [224] Liebchen R., Einfluss des Verdichtungsgrades auf die feuchte –und temperaturabhängige effektive Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Dämmstoffen, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [225] Dippon M., Beurteilung und Erprobung von Messverfahren für die Bestimmung des Wassergehalts von Dämmstoffen für Erdbecken-Wärmespeicher, Studienarbeit am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.
- [226] 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, Elsevier, 2007.
- [227] Zweschper B., Ergebnisse der dreiaxialen Scherversuche an den Blähglasgranulaten, Bericht, IGS, Uni Stuttgart, 2005.
- [228] Knoche G., Koch M., Untersuchungen an unterschiedlichen Erdreichtypen für Erdbecken-Wärmespeicher, Interner Bericht, ISWA, Uni Stuttgart, Stuttgart,

2004.

- [229] Hens H., IEA Annex 24 Final Report Volume 1: Modelling, Acco Leuven, Belgium, 1996.
- [230] Hagentoft C.-E., Kalagasidis A. S., Adl-Zarrabi B., Roels S., Carmeliet C., Hens H., Grunewald J., Funk M., Becker R., Shamir D., Adan O., Brocken H., Kumaran K., Djebbar R., Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components: benchmarks for one-dimensional cases, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 27, p. 327-352, 2004.
- [231] Bomber M., Carmeliet J., Grunewald J., Holm A., Karagiozis A., Künzle H., Roels S., Position Paper on Material Characterisation and HAM Model Benchmark, 2002.
- [232] Cornick S., Results of the HAMSTAD Benchmarking Exercises Using hygIRC 1-D version 1.1, Research Report, Institute for Research in Construction, May 12, 2006, 93 pp. IRC-RR-222, 2006.
- [233] Sathyanarayanan R., Derome D., Rivard H., The Need for an Integrated Computer-based Tool to Support Building Envelope Design, eSim 2002, The Canadian conference on building energy simulation, September 11th - 13th, 2002.
- [234] Stefan J., Über das Gleichgewicht und die Bewegung, insbesondere die Diffusion von Gasgemengen, Sitzungsbericht der mathematischen naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien, 63, 2.Abt., 1871.
- [235] Glaser H., Temperatur- und Dampfdruckverlauf im einer homogenen Wand bei Feuchtigkeitsausscheidung, *Kältetechnik* 10, H.6, S.174-179, 1958.
- [236] Glaser H., Wasserdampfdiffusion durch hygroskopische Baustoffe im Hinblick auf die DIN 4108, *Gesundheitsingenieur* 107, H.2, S85-97, 1986.
- [237] Glaser H., Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, *Kältetechnik*, 11. Jahrgang, p. 345-349, 1959.
- [238] Luikov A. V., Heat and mass Transfer in capillary-porous bodies, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [239] Philip J. R., de Vries D. A., Moisture movement in porous media under temperature gradients, *Eos Trans, AGU*, 38(2), p. 222-232, 1957.
- [240] Gertis K., Werner H., Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen – Kritische Ansätze zu hygrischen Interpretation des Porengefüges, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 258, 1976.
- [241] Gertis K., Kießl K., Feuchtetransport in Baustoffen, eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene, *Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen der Universität Gesamthochschule-Essen*, Heft 13, Essen, 1980.
- [242] Achtziger J., Messung der Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen mit beliebigem Feuchtigkeitsgehalt, *Kunststoffe im Bau*, H. 23, p.19-22, 1971.
- [243] van Genuchten M.Th., A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44, p. 892-898, 1980.

- [244] van Genuchten M.Th., A comparison of numerical solutions of the one-dimensional unsaturated-saturated flow and mass transport equations, *Advances in Water Resources* 5, p. 47-55, 1982.
- [245] Kießl K., Gertis K., Feuchtetransport in Baustoffen. Eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene, *Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen* 13, Universität Essen Gesamthochschule, 1980.
- [246] Kießl K., Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Rechnerische Erfassung und Bauphysikalische Anwendung, Dissertation, Essen, 1983.
- [247] Kießl K., Krus M., Messung von Wassergehalten und Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen mittels kernmagnetischer Resonanz, *IBP-Mitteilung* 14, Nr. 148, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1987.
- [248] Kießl K., Krus M., Kapillartransportkoeffizienten von Baustoffen aus NMR-Messungen, *IBP-Mitteilungen* 16, Nr. 175, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, 1989.
- [249] Tsotsas E., Martin, H., Thermal conductivity of packed beds, *Chem. Eng. Process*, 22, p. 19-37, 1987.
- [250] Tsotsas E., Eine einfache empirische Gleichung zur Vorausberechnung der Porosität polydisperser Kugelschüttungen, *Chem.-Ing.-Tech.* 63, p. 495/496, 1991.
- [251] Häupl P., Stopp H., Feuchtetransport in Baustoffen und Bauwerksteilen, Dissertation, TU Dresden, Dresden, 1987.
- [252] Häupl P., Fechner H., Hygric Material Properties of porous building materials, TU Dresden, 2003.
- [253] Cary J. W., Taylor S. A., The Interaction of the Simultaneous Diffusions of Heat and Water Vapor, *Soil Science Society Am. Proc.*, Vol. 26, p. 413–416, 1962.
- [254] Cary J. W., Taylor S. A., Thermally Driven Liquid and Vapor Phase Transfer of Water and Energy in Soil, *Soil Science Society Am. Proc.*, Vol. 26, p. 417–420, 1962.
- [255] Jury W.A., Simultaneous Transport of Heat and Moisture Through a Medium Sand. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI, USA, 1973.
- [256] Milly P. C. D., The coupled transport of water and heat in a vertical soil column under atmospheric excitation, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1980.
- [257] Milly P. C. D., Moisture and Heat transfer in hysteretic inhomogenous porous media: a matrix head-based formulation and a numerical model, *Water Resources Research*, 18(3), p. 489-498, 1982.
- [258] Hussein F., Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion: eine neue Rechenmethode in Anlehnung an DIN 4108, Dissertation, Uni Dortmund, Dortmund, 1982.
- [259] Rode P. C., Combined Heat and moisture transfer in building constructions,

- Dissertation, Technical University of Denmark (DTU), 1990.
- [260] Garecht H., Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf das Mauerwerk, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1992.
- [261] Seerig A., Untersuchungen zum Energie- und Stofftransport in feuchten porösen Stoffen, Diss., Forschungsberichte VDI, Reihe 3 Nr. 304, Düsseldorf, 1993.
- [262] Krarti M., Claridge D. E., Kreider J. F., A Foundation Heat Transfer Algorithm for Detailed Building Energy Programs, ASHRAE Transactions, Vol. 100(2), p. 843–850, 1994.
- [263] Krus M., Feuchtetransport und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken, Diss., Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Uni Stuttgart, Stuttgart, 1995.
- [264] Pel L., Moisture transport in porous building materials, Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 1995.
- [265] Lee M. S., Versuche und kritische Anmerkungen zu einigen Grundlagen der Feuchtespeicherung und des Feuchtetransports in Baustoffen, Dortmund 1996.
- [266] Grunewald J., Diffusiver und Konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, Diss., Technische Universität Dresden, Dresden, 1997.
- [267] Descamps F., Continuum and discrete modelling of isothermal water and air transfer, Dissertation, KU Leuven, Leuven, Belgium, 1997.
- [268] Burch D. M., Chi J., MOIST – A PC program for predicting heat and moisture transfer in building envelopes, Release 3.0, NIST Special Publications 917, 1997.
- [269] Xu Y., Numerische Simulation der Eisbildung in kapillarporösen Baustoffen unter Berücksichtigung der gekoppelten Wärme- und Feuchteprozesse, Dissertation, TU Dresden, Dresden, 1998.
- [270] Brocken J. B. P., Moisture transport in brick masonry: the grey area between bricks, Dissertation, TU Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands, 1998.
- [271] Bednar T., Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden, Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren, Diss., TU Wien, Wien, Austria, 2000.
- [272] Bednar T., Approximation of liquid moisture transport coefficient of porous building materials by suctandand drying experiments. Demand on determination of drying curve, Proc. 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, Norway, 2002.
- [273] Carmeliet J., Roels S., Non-isothermal moisture flow in porous materials, Proc., 10. Bauklimatisches Symposium, Dresden,p. 221-230, Dresden, 1999.
- [274] Roels S., Carmeliet J., Hens H., A Mesh Adaptive Technique for the Simulation of Unsaturated Moisture Transfer in Open Porous Materials, Finite Elements: Techniques and Developments (Leuven), B.H.V. Topping (ed.), Civil-Comp Press, p. 103-110, Edingburgh, UK, 2000.

- [275] Roels S., Carmeliet J. and H. Hens, Modelling Unsaturated Moisture Transport in Heterogeneous Limestone, *Transport in Porous Media*, 52, p. 351-369, 2003.
- [276] Deru M., A model for ground coupled heat and moisture transfer from buildings, NREL/TP-550-33954, USA, 2003.
- [277] Deru M., Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer From Buildings, Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, 2001.
- [278] Ozaki A., A new potential model on combines heat and water transfer basd on thermodynamic energy, eSim 2002.
- [279] Ozaki A., Systematic Analysis Model on Combined Heat and Water Transfer Using Water Potential Based on Thermodynamics, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27, p. 95-122, 2003.
- [280] Mendes N., Philippi P. C., Lamberts R., A New Mathematical Method to Solve the Highly-Coupled Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54/3, p. 509-518, 2002.
- [281] Mendes N., Winkelmann F. C., Philippi P. C., Lamberts R., Moisture Effects on Conduction Loads, *Energy & Buildings* v. 35, n.7, p. 631-644, 2003.
- [282] Mendes N., Philippi P. C., A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 37-51, 2005.
- [283] Janssen H., The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, Dissertation, KU Leuven, Leuven, Belgium, 2002.
- [284] Janssen H., Blocken B., Carmeliet J., Simulation of moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation: conservative modelling and numerical optimisation, Proc. 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Reykjavík, Iceland, 2005.
- [285] Janssen H., Blocken B., Carmeliet J., Conservative Modelling of the Moisture and Heat Transfer in Building Components under Atmospheric Excitation, *International Journal of Heat and Moisture Transfer*, vol: 50, issue: 5-6, p. 1128-1140, Elsevier, 2007.
- [286] Whitaker S., Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Advances in Heat Transfer* 13, p. 119-203, 1977.
- [287] Stuis M., Kratz W., Greubel D., Rechenmodelle und Simulationsversuche zur Beurteilung des feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen Teil 1 & 2, wksb, Heft 23/24, 32. Jahrgang 1987, Ludwigshafen, 1987.
- [288] Celia M. A., Boulatas E. T., Rarba R. L., A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation, *Water Resources Research* 26 (1990), p. 1483-1496, 1990.
- [289] Hokoi S., Kumaran M. K., Experimental and analytical investigations of simultaneous heat and moisture transport through glass fiber insulation, *J. Thermal Insul. And Bldg. Envs.* Vol. 16, p. 263-292, 1993.
- [290] Vos M., Ashton G., Van Bogert J., Ensminger R., Heat and Moisture Diffusion in Magnetic Tape Packs, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 30, No.2 1994.

- [291] Szekeres A., Engelbrecht J., Coupling of Generalized Heat and Moisture Transfer, *Periodica Politecnica*, Ser. Mech. Eng. Vol. 44 No. 1, p. 161 – 170, 2000.
- [292] Trechsel H. R., The current perspective rules to prevent moisture problems in building envelopes & analytical methods and models and their limitations, *Mositure Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*, ASTM Manual Philadelphia, USA, 2001.
- [293] Holm A., Krus M., Künzel H. M., Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmbareren Kennwerten, *IBP-Mitteilungen* 406, 29 (2002), Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, 2002.
- [294] Qiu X., Haghghat F., Kumaran K., Modeling Moisture Accumulation in Multi-Layered Building Materials, *Canadian conference on building energy simulation*, Montreal, Canada, 2003.
- [295] Worch A., The behaviour of vapour transfer on building material surfaces: the vapour transfer resistance, *Journal of the Envelope and Building Science* 28, p. 187-199, 2004.
- [296] Janetti M. B., Entwicklung eines mathematischen Modells für den Wärme- und Feuchtetransport bei hohen Temperaturen, diploma thesis, ITW, University of Stuttgart and Politecnico di Milano, Stuttgart, 2006.
- [297] HiPTI – High Performance Thermal Insulation IEA/ECBCS Annex 39 Report, Study on VIP-components and Panels for Service Life Predictions of VIP in Building Applications (Subtask A), 1995.
- [298] von Smoluchowski M., Bericht über den II. Internationalen Kältekongress, Band 2, Wien, 1910.
- [299] Lichtenfels A., Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete for Shells, *International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, Kassel, 2004.
- [300] West D., Entwicklung eines direkten Be- und Entladesystems für einen Kies/Wasser-Wärmespeicher, Diplomarbeit, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 1999.
- [301] Kiedaisch J., Entwicklung einer Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe oder Kies für einen Erdreich/Wasser-Wärmespeicher, Diplomarbeit, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2002.
- [302] Ergun. S., Fluid Flow through Packed Columns., *Chem. Eng. Prog.*, 48(2):89-94, 1952.
- [303] Chang W., Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 2001.
- [304] Schenke A., Drück H., Müller-Steinhagen H., Optimierung großer Solarer Kombianlagen in Theorie und Praxis, OTTI, 16. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.
- [305] Baehr H. D., Stephan K., Wärme- und Stoffübertragung, 2. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 3-540-60374-3, Berlin, 1996.
- [306] Jamialahmadi, M. Müller-Steinhagen, H., Izadpanah, M.R., Pressure drop, gas hold-up and heat transfer during single and two-phase flow through

- porous, International Journal of Heat and Fluid Flow 26, 2005, p. 156 – 172, 2005.
- [307] Kling G., Versuche über den Wärmeaustausch in Rohren mit kugeligen und zylindrischen Füllungen, Chemie-Ing.-Techn., 31 (1959), pp. 705-710, 1959.
- [308] Ackermann D., Wärme- und Stoffübertragung bei der Kondensation eines turbulent strömenden Dampfes in Anwesenheit von Inertgas, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 1972.
- [309] ASHREA Handbook of Fundamentals. American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 1997.
- [310] Beavers G. S., Sparrow, E. M.; Rodenz, D. E., Influence of bed size on the flow characteristics and porosity of randomly packed beds of sphere Trans. ASME., J. Applied Mechanics (1973), pp. 655-660, 1973.
- [311] McGeary R., Mechanical packing of spherical particles, J. of the American Ceramic Society, 44 (1961), pp. 513-522, 1961.
- [312] Faust T., Beck M., Pore Structure of Different LWAs, Summary 1999, Universität Leipzig, 1999.
- [313] Bouguerra A., Laurent J. P., Goual M. S., Queneudec M., The measurement of the thermal conductivity of solid aggregates using the transient plane source technique, J. Phys. D. Appl. Phys. 30 (1997), p. 2900-2904, UK, 1997.
- [314] Walz K. (editor), Merkblatt I für Leichtbeton und Stahlbeton mit geschlossenem Gefüge, Betonprüfung zur Überwachung der Leichtzuschlagherstellung, Betontechnische Berichte des Forschungsinstituts der Zementindustrie, 1974.
- [315] Quast U., Wärme- und Stoffübertragung in Gegenstrom-Kühltürmen unter Berücksichtigung von Nebel- und Sprühtropfenbildung, TH Darmstadt, Diss., Darmstadt, 1977.
- [316] Reid R. C., Prausnitz J. M., Poling B. E., The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill Book Company Inc., Third Edition, , New York, USA 1977.

Normen

- [317] DIN 4108 Teil 4, Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 4: Hygrothermal design values, 2004.
- [318] DIN 52612, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, 1979.
- [319] DIN 52615, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, Testing of thermal insulation, determination of water vapour permeability of building and insulation materials, 1987.
- [320] DIN 52620, Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts von Baustoffen, 1991.
- [321] DIN 66133, Determination of the pore volume distribution and the specific surface area of solids by mercury intrusion, 1993.
- [322] DIN 66135, Micropore Analysis by Gas Adsorption, Part 4. Determination of pore size distribution according to the Horvath-Kawazoe and Saito-Foley method, 2001.
- [323] DIN EN 12087, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen, Thermal insulating products for building applications - Determination of long term water absorption by immersion, 1997.
- [324] DIN EN 13755, Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck, Determination of water absorption and saturation coefficient, 2002.
- [325] DIN EN 13859-1, Abdichtungsbahnen - Definitionen und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen - Teil 1: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen, 2005.
- [326] DIN EN 571-1, Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen; Non-destructive testing - Penetrant testing - Part 1: General principles, 1997.
- [327] EN 12664, Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät, Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand, 2001.
- [328] EN 12939, Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät, Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand, 2000.
- [329] EN 13788, Hygrothermal Performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation Methods.
- [330] CEN/TC89 WG10, Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation (prenormative text), 2003.
- [331] DIN EN 15026, Juli 2007. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007
- [332] DIN EN ISO 12570, Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur, März 2000.

- [333] DIN EN ISO 12571, Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften, April 2000.
- [334] DIN 51056, Bestimmung der freien Wassersättigung, 1959.
- [335] ASTM C 177, Guarded Hot Plate Method, 1993.
- [336] ASTM D 4279, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Shipping Containers-Constant and Cycle Methods, 1995.
- [337] ASTM D3079, Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Flexible Heat-Sealed Packages for Dry Products, 2003.
- [338] ASTM D814, Standard Test Method for Rubber Property- Vapor Transmission of Volatile Liquids, 2005.
- [339] ASTM E398, Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate of Sheet Materials Using Dynamic Relative Humidity Measurement, 2003.
- [340] ASTM E96, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, 2005.
- [341] ASTM F1249, Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor, 1995.
- [342] ASTM F372, Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate of Flexible Barrier Materials Using an Infrared Detection Technique, 2003.
- [343] DIN 53122, Testing of plastics and elastomer films, paper, board and other sheet materials - Determination of water vapour transmission, 2001.
- [344] DIN EN ISO 7783-1, Paints and varnishes - Determination of water-vapour transmission rate, Part 1: Dish method for free films, 1996.
- [345] DIN EN ISO 7783-2, Paints and varnishes - Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete - Part 2: Determination and classification of water-vapour transmission rate (permeability), 1999.
- [346] EN 12086, Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties, 1997.
- [347] EN ISO 12572, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties, 2001.
- [348] ISO 15106, Plastics - Film and sheeting - Determination of water vapour transmission rate, 2003.
- [349] ISO 1663, Rigid cellular plastics - Determination of water vapour transmission properties, 1999.
- [350] ISO 2528, Sheet materials - Determination of water vapour transmission rate - Gravimetric (dish) method, 1995.
- [351] ISO 9932, Paper and board – Determination of water vapour transmission rate of sheet materials - Dynamic sweep and static gas methods, 1990.
- [352] JIS K 7225, Rigid cellular plastics - Determination of water vapour transmission properties, 2005.
- [353] JIS K-7129, Testing methods for water vapour transmission rate of plastic film and sheeting (instrument method), 1992.

- [354] JIS Z 0208, Testing methods for determination of the water vapour transmission rate of moisture-proof packaging materials (dish method), 1976.
- [355] TAPPI T523, Dynamic measurement of water vapor transfer through sheet materials.
- [356] TAPPI T557, Water vapour transmission rate through plastic film and sheeting using a modulated infrared sensor.
- [357] ASTM D 5887, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, ASTM International (USA), 2002.
- [358] DIN 18130 – 1, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Deutschen Institut für Normung e.V., 1998.
- [359] DIN 1055 – 3, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten, Action on structures – Part 3: Self-weight and imposed load in building, 2006.
- [360] DIN EN ISO 527-3, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln, 2003.
- [361] DIN EN ISO 527-2, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, <http://www.iso.org/iso/en/CatalogueDetailPage.CatalogueDetail?CSNUMBER=4593&scopelist=Plastics> - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, 1996.
- [362] DIN 12814 - Prüfung von Schweissverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen, Schälversuch, 1999.

Internet

- [363] Züblin Spezialtiefbau GmbH, <http://www.Züblin.de>, 2006.
- [364] Product Information Haase, <http://www.haase.de>, <http://www.ichbin2.de>, 2006.
- [365] European Large Scale Solar Heating Network <http://www.enerma.cit.chalmers.se/cshp/>, 2006.
- [366] TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin, Madison and Transsolar, Stuttgart, Germany, 2000.
- [367] Fluent, Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD) Software & Services, <http://www.fluent.com>, 2006.
- [368] Ansys CFX, <http://www.waterloo.ansys.com/>, 2006.
- [369] Adina-T, <http://www.adina.com>, 2006.
- [370] Sarnafil, <http://www.sarnafil.com>, 2006.
- [371] Contitech, <http://www.contitech.com>, 2006.
- [372] Dyneon, Freestyle Membrane architecture, <http://www.dyneon.com>, 2006..
- [373] WUFI Software, <http://www.wufi.de>, Homepage des IBP Holzkirchen

- <http://www.hoki.ibp.fhg.de>, Simulationsprogramm WUFI, 2006.
- [374] Delphin Software, <http://gwtonline.de/produkt-shop/DELPHIN/>, 2006.
- [375] Moist, National Institute of Standards and Technology and the Virginia Polytechnic Institute and State University, www.nist.gov, 2006..
- [376] Liapor, <http://www.liapor.de>, Homepage der Liapor GmbH, Hallerndorf-Pautzfeld, 2006.
- [377] Liaver, <http://www.liaver.de>, Homepage der Liapor GmbH, Ilmenau, 2006
- [378] Poraver, <http://www.poraver.de>, Homepage der Dennert Poraver GmbH, Schlüsselfeld, 2006.
- [379] Puren, <http://www.puren.com>, 2006.
- [380] Millcell, <http://www.schaumglasschotter.de> , Homepage der Millcell-Vogtland GmbH, Oelsnitz, 2006.
- [381] Taurus Instruments, <http://www.taurus-instruments.de>, Homepage der Taurus Instruments GmbH, Weimar, 2006.
- [382] Perlite, <http://www.perlite.de>, Homepage der Knauf Perlite GmbH, 2006.
- [383] Rockwool, <http://rockwool.de> , Homepage der Deutsche Rockwool GmbH, 2006.
- [384] Technical Information, Gas Permeability of Fluoropolymers, Atofina Chemicals, 2000.
- [385] Producer information, Agru, <http://www.agru.at>
- [386] Producer information, Basell Polyolefins, Polyethylen, Products and Properties, <http://www.basell.com>
- [387] Producer information, BASF, <https://worldaccount.basf.com/>
- [388] Producer information, Degussa, <http://www.degussa.de>
- [389] Producer information, Dow Chemicals, <http://www.dow.com/saran>
- [390] Producer information, Du Pont Dow Elastomers, <http://www.dupont.com>, 2003.
- [391] Producer information, GSE Lining Technology, Inc., <http://www.gseworld.com>, 2003.
- [392] Producer information, Hoechst, <http://www.hoechst.de>, Nowoflon, ET, <http://www.nowofol.de>
- [393] Producer information, Sarnafil International AG, <http://www.sarna.com> , 2003.
- [394] Producer information, technical data sheet, Alwitra, <http://www.alwitra.de>
- [395] Producer information, technical data sheet, Saarnova, <http://www.saarnova.de>
- [396] Producer information, Trelleborg, www.trelleborg.com, Contitec, www.contitec.de , Goodyear, <http://www.goodyear.de>
- [397] Product Information Haase GFK-Technik GmbH, <http://www.haase.de>, <http://www.ichbin2.de>
- [398] Product Information, Naue, <http://www.naue.com>

- [399] Product Information, Armacell, <http://www.armacell.com>
- [400] Product Information, <http://www.labview.com>
- [401] Product Information, <http://www.nicolon.com>
- [402] www.waermedaemstoffe.com