

Modelling Large-Scale Thermal Energy Stores

submitted to

**the Faculty of Energy Technology, Process Engineering
and Biological Engineering,
University of Stuttgart,
as partial fulfilment of the requirements for
the degree of Doctor of Engineering**

by

**Fabian Ochs
from Stuttgart, Germany**

First Examiner: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen

Second Examiner: Prof. Jan-Olof Dalenbäck (PhD)

Defence of Dissertation: 28.10.2009

Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW)

2009

Kurzfassung

Bis heute wurden in Deutschland über zehn Forschungs- und Pilotprojekte mit Langzeit-Wärmespeicher für solar unterstützte Nahwärmesysteme realisiert. International sind ca. 30 Projekte dokumentiert, die überwiegend in Europa und dort in den skandinavischen Ländern betrieben werden. Mittels dieser Projekte konnte demonstriert werden, dass derartige Systeme technisch machbar sind und funktionieren. Jedoch hat die Mehrzahl der bisher unterirdisch ausgeführten Langzeit-Wärmespeicher höhere Wärmeverluste als bei der Planung prognostiziert wurde. Die Gründe dafür sind:

- höhere mittlere Speichertemperaturen aufgrund geänderter Bebauung und damit Lasten oder Systemkonfigurationen,
- geringere Temperaturschichtung gegenüber dem Planungsstand,
- höhere Rücklauftemperaturen im Nahwärmenetz und damit höhere Speicherbodentemperaturen mit den daraus resultierenden höheren Wärmeverlusten im nur gering oder nicht gedämmten Bodenbereich,
- durch Feuchtigkeit und hohe Temperatur nimmt die effektive Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Wärmedämmung signifikant gegenüber dem bei der Planung als konstant angenommen Wert auf Basis der DIN 4108 zu,
- unzureichende Qualität der bei der Planung verwendeten Wärmespeichermodelle.

Während die drei erst genannten Gründe für die höheren Wärmeverluste systembedingt und somit vorab nicht oder nur schwer kalkulierbar sind, ist die Zunahme der Wärmeverluste durch Feuchtigkeit und hohe Temperaturen theoretisch modellierbar. Mit derzeit verfügbaren Modellen ist dies jedoch noch nicht möglich. Um die zur Auslegung und Nachrechnung von Nahwärmesystemen erforderlichen (Mehr-)Jahressimulationen in akzeptablen Rechenzeiten durchführen zu können, müssen teilweise starke Vereinfachungen in Kauf genommen werden. Bisher wird für die Planung und Auslegung von solar unterstützten Nahwärmesystemen mit Langzeit-Wärmespeicher fast ausschließlich die Simulationsumgebung TRNSYS verwendet.

Für die Abbildung des thermo-hydraulischen Verhaltens lassen sich prinzipiell Fein- und Grobstrukturmodelle einsetzen. Feinstrukturmodelle oder CFD-Modelle ermöglichen eine geometrisch exakte, fein aufgelöste 2D oder 3D Abbildung der Speicherstruktur sowie eine Berücksichtigung aller in Realität

vorkommenden Wärmetransportvorgänge. Feinstrukturmodelle erfordern die Lösung partieller Differentialgleichungssysteme für die interessierenden physikalischen Größen wie Temperatur, Wassergehalt, Druck und Geschwindigkeit. Aufgrund des sehr großen Rechenaufwands können mit CFD-Simulationen derzeit keine Jahressimulationen von Langzeit-Wärmespeichern durchgeführt werden. Nachteilig ist zudem, dass jede Geometrieänderung eine aufwändige Rechengittergenerierung nach sich zieht.

Grobstrukturmodelle verwenden zur Berechnung, abhängig von der vorliegenden Aufgabenstellung, vereinfachende Annahmen bei Geometrie, Stoffwerten und Randbedingungen, wodurch sich der Rechenaufwand stark reduzieren lässt. Es wird in dieser Arbeit untersucht, ob die Qualität der vorhandenen Wärmespeicher-Modelle ausreichend ist, um erdvergrabene saisonale Wärmespeicher realitätsnah abbilden zu können. Dabei wird gezeigt, mit welchen Vereinfachungen akzeptable Ergebnisse erzielt werden können und welche Annahmen und Vereinfachungen nicht tolerierbare Fehler bei der Berechnung der Wärmeverluste eines erdvergrabenen Wärmespeichers zur Folge haben. Darauf aufbauend werden Verbesserungsvorschläge erarbeitet.

Detaillierte Berechnungen mit dem Ziel einer Optimierung der Speicher-geometrie bzw. der Verteilung der Wärmedämmung können mit derzeit verfügbaren Modellen nicht durchgeführt werden. Ebenso ist eine realitätsnahe Berücksichtigung des Einflusses von Grundwasser auf die Wärmeverluste nicht möglich. Aufgrund der Komplexität von solar unterstützten Nahwärmesystemen kann zur Dimensionierung der Systemparameter mangels besserer Modelle jedoch nicht auf die vorhandenen TRNSYS-Speichermodelle für praxisrelevante Berechnungen verzichtet werden. Für beide Speichertypen, Behälter-Wärmespeicher und Erdbecken-Wärmespeicher, 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 20 bis 40 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.

Verbesserungen sind insbesondere bei den verwendeten Materialien wie Wärmedämmung und Wärmespeicherabdichtung erforderlich. Für große

Wärmespeicher erweisen sich speziell schüttfähige und druckbeständige Dämmstoffe als geeignet. Das Einbringen von rieselfähiger Wärmedämmung durch Schütten oder Einblasen ist im Vergleich zum Anbringen von Plattenmaterial speziell bei großen Speichervolumina und somit großen Böschungslängen wesentlich effektiver und kostengünstiger. Durch den schnellen Installationsprozess kann das Risiko einer Durchfeuchtung durch Niederschlag minimiert werden.

Für die für saisonale Wärmespeicher relevanten schüttfähigen Dämmstoffe und Abdichtungsbahnen liegen kaum Messwerte der für die Auslegung und Modellierung notwendigen Stoffwerte vor. Die Modellierung der Materialeigenschaften, wie der Sorptionsisotherme und der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe, ist für die Berechnung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgänge in der Wärmespeicherhülle erforderlich. Die effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Stofffeuchte und Temperatur ist in der Literatur bisher kaum berücksichtigt worden.

Die Wasseraufnahme der verwendeten Materialien, wie z.B. Beton, Wärmedämmung und Erdreich, wird nicht nur durch die Porosität des Stoffes, sondern auch durch die Anteile an verschiedenen Porenarten beeinflusst. Dadurch können verschiedene Stoffe mit ähnlicher Porosität sehr unterschiedliche hygroskopische Eigenschaften aufweisen. Somit ist die Kenntnis des Wassergehalts als Funktion der Luftfeuchte (Feuchtespeicherfunktion) unerlässlich. Diese wurde messtechnisch bestimmt und mit Modellwerten verglichen. Die Modellwerte stellen wichtig Eingangsparmter für die Simulation des Wärme- und Feuchtetransports dar

In dieser Arbeit wurde ein analytisches Modell für die effektive Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Wassergehalts und der Temperatur aufgestellt. Die Validierung des Modells erfolgte auf der Basis von Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit schüttfähiger Dämmstoffe, die mit einer Zwei-Platten-Apparatur in einem Temperaturbereich von 20 °C bis 80 °C ermittelt wurden. Der Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit hängt primär von den Porenanteilen und der Porenstruktur des Materials ab. Die Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden in Anlehnung an ein von Krischer entwickeltes Wärmeleitfähigkeitsmodell berechnet. Dieses Modell wurde um eine Schicht erweitert, um den Anteil der geschlossenen und somit von der Feuchte unbeeinflussten Poren berücksichtigen zu können. Zudem wurde die

Methode verbessert, nach welcher der Anteil benetzter Poren, in denen Porendiffusion stattfindet, berücksichtigt wird. Mess- und Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur und des Wassergehalts stimmen im relevanten Temperaturbereich von 20 °C bis 80 °C gut überein. Zu erkennen ist ein exponentieller Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei höheren Wassergehalten bedingt durch Porendiffusion. Die Werte übersteigen bei Temperaturen über 60 °C und Stofffeuchten von ca. 200 kg/m³ den Bemessungswert nach DIN 4108 um das Vierfache, bei 80 °C um das Zehnfache.

Unter Zuhilfenahme des entwickelten analytischen Modells ist es möglich, durch Messung der Wärmeströme durch die Speicherwand mit Wärmestrom-Messplatten die Dämmstofffeuchte zu ermitteln. Damit werden Erkenntnisse gewonnen, die zur Optimierung der Bauweisen von Wärmespeichern beitragen können. Anhand eindimensionaler transienter Berechnung des Temperaturprofils der Wärmespeicherwand und des umgebenden Erdreichs können die Wärmeverluste abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und der Wärmedämmung bestimmt werden. Am Beispiel der Wärmespeicher in Friedrichshafen und Hannover wurde mittels Parameteridentifikation die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht und des umliegenden Erdreichs ermittelt. Dafür wurde die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Wärmestromdichten (Wärmestrom-Messplatte) unter Berücksichtigung der Erdreichtemperaturen minimiert. Sowohl für den Wärmespeicher in Friedrichshafen als auch für den in Hannover lassen sich die Messdaten mit einer zeitlich (=jährlich) variierenden Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung besser wiedergeben. Die relativ gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Wärmestromdichten kann als Indiz dafür gelten, dass die Messwerte der Wärmestrom-Messplatten plausibel sind.

Wärmespeicher werden entweder mit Stahl bzw. Edelstahl (VA) oder mit Kunststoffdichtungsbahnen abgedichtet. Edelstahl bietet Vorteile bezüglich Temperatur- und Langzeitbeständigkeit. Zudem ist Edelstahl hinsichtlich der Wasser- und Wasserdampfdiffusionsdichtigkeit polymeren Abdichtungsbahnen überlegen. Nachteilig sind jedoch die hohen Kosten, die schwierigere Verarbeitung sowie die Gefahr der Oxidation. Deshalb wurden in der Mehrzahl der Forschungs- und Pilotprojekte polymere Abdichtungen eingesetzt. Insbesondere Erdbecken-Wärmespeicher wurden mehrheitlich damit abgedichtet.

Da polymere und elastomere Abdichtungsbahnen keine hundertprozentige Wasserdampfdichtigkeit bieten, ist die Kenntnis des Wasserdampfdiffusionswiderstandes notwendig. Die Diffusionsdichtigkeit muss zumindest so hoch sein, dass über die Lebensdauer des Wärmespeichers von mindestens 20 bis 40 Jahren nur so viel Wasser in die Wärmedämmung eindringt, dass die Wärmedämmeigenschaften nicht wesentlich reduziert werden. Für die als Abdichtung in Langzeit-Wärmespeichern in Frage kommenden Kunststoffdichtungsbahnen sind Messdaten nicht in ausreichendem Maße verfügbar. Über temperaturabhängige Messungen wurde in der Literatur bisher nur in sehr wenigen Einzelfällen berichtet. Deshalb wurde der Wasserdampfdiffusionswiderstand mit einer im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Permeations-Messapparatur als Funktion der Temperatur bestimmt. Die Messergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit den entsprechenden Modellwerten. Die Temperaturabhängigkeit des Permeationswiderstandes kann gut mit einem Arrhenius-Ansatz wiedergegeben werden.

Werden Langzeit-Wärmespeicher mit Temperaturen bis zu 95 °C betrieben, genügt keine der untersuchten Kunststoffdichtungsbahnen den gestellten Anforderungen. Ausreichende Wasserdampfdichtigkeit kann nur durch eine zusätzliche Barrierschicht (aus Aluminium oder Edelstahl) erreicht werden. Vor allem flexible Membranen, wie EPDM, IIR, FPO oder TPE, bieten bei in Langzeit-Wärmespeichern vorherrschenden Umgebungsbedingungen kaum Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion.

Mit dem entwickelten Modell für die effektive Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen lassen sich die Wärmeverluste von erdvergrabenen Wärmespeichern realitätsnäher bestimmen. Das analytische Wärmeleitfähigkeitsmodell stellt jedoch eine Vereinfachung der tatsächlichen Vorgänge in der Speicherwand dar. Die Berechnung der tatsächlichen gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgänge im Wandaufbau eines erdvergrabenen Wärmespeichers ist mit dem analytischen Modell nicht möglich. In der Realität ist die Feuchte im Dämmstoff nicht homogen verteilt, sondern es stellt sich entsprechend der Temperatur und Partialdruckgradienten ein Feuchteprofil im Wandaufbau ein.

Seit den 1960er Jahren wurde eine Vielzahl von Simulationsprogrammen zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports entwickelt. Kommerzielle Programme sind seit einiger Zeit auf dem Markt erhältlich.

Abstract

More than 30 research and pilot seasonal thermal energy stores (TES) have been realized internationally within the last 30 years. Experience with operation of these central solar heating plants with seasonal thermal energy storage (CSHPSTES) shows that TES are technically feasible and work well. However, seasonal storage of solar thermal energy or of waste heat from heat and power cogeneration plants can only contribute significantly to substitute fossil fuels in future energy systems, if performance with respect to thermal losses and lifetime can be enhanced while construction costs can be further reduced. The aim of this work is to improve TES technology with regard to design and construction. To achieve this, models are necessary that enable the realistic representation of all relevant thermodynamic processes related to TES.

The large variety of TES makes it difficult to compare performance in relation to construction costs. Performance of TES depends on location (geological situation: rock, soil, sand, with or without ground water), construction type (tank or pit), size (from some 100 m³ to more than 10 000 m³), geometry and position (cuboid, cylinder, cone or pyramid trunk, buried or partially buried), storage medium (water, gravel/sand/soil-water, direct or indirect charging) and used material (e.g. stainless steel or polymer membrane liner).

Furthermore, TES are integrated in a heating and cooling system. Obviously, there is a great variety of system configurations and control strategies. Important aspects are e.g. number of charging cycles, maximum charging temperature, net return temperature and operation with or without heat pump and with or without additional buffer store.

All these constructional and operational characteristics as well as the boundary conditions influence the energetic and exergetic efficiency of (seasonal) TES. Hence, for realistic comparison, system simulations are required which include all relevant parameters.

This work provides an overview of state-of-the-art seasonal thermal energy storage with the focus on tank and pit TES construction. Aspects of TES modelling are discussed. Based on modelled and measured data the effects of construction type, system configuration and boundary conditions on thermal losses of large-scale TES are identified. It is found that available coarse-

structure TES models simplify the real processes such that a detailed analysis with the objective to enhance TES design is not possible.

Optimization of TES design and construction requires detailed insight in the processes related to heat and moisture transfer in the envelope of TES. The materials applied for insulation and lining are characterised and evaluated. By means of measurements and modelling of relevant material properties, i.e. sorption isotherm, thermal conductivity and permeation resistance, the processes in the envelope can be better explained, which is essential for improving TES design.

An analytical model for the thermal conductivity, developed in this work, yields good results. However, it represents a simplification of the real processes in the envelope of a TES. Hence, a model was established that accounts for coupled heat and moisture transport at elevated temperatures. Exemplarily, calculations were performed to demonstrate essential features of the model.

Outdoor laboratory experiments confirmed the transferability and relevance of the findings with regard to the influence of elevated temperature and moisture content on thermal losses. Good agreement between monitoring data and modelled thermal losses is achieved.

TABLE OF CONTENTS

I	PREFACE	i
II	ABSTRACT	v
III	KURZFASSUNG	vii
IV	NOMENCLATURE	xxiii
1	INTRODUCTION	1
2	MOTIVATION AND OBJECTIVES	3
2.1	Aim and Methodology	3
2.2	Outline of the Work	8
3	STATE OF THE ART OF SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE	11
3.1	Definitions	11
3.2	Types of Seasonal Thermal Energy Stores	14
3.2.1	Construction	14
3.2.2	Storage Medium	16
3.3	Experiences with Research and Pilot Projects	19
3.3.1	Construction Techniques of Pilot and Research Thermal Energy Stores	24
3.3.1.1	Geometry of Buried Thermal Energy Stores	25
3.3.1.2	Pit Construction and Soil Works	28
3.3.1.3	Geotechnical Works – Ground Water Protection	29
3.3.1.4	Envelope of Thermal Energy Stores	31
3.3.1.5	Covering Hot Water Thermal Energy Stores	40
3.3.2	Experiences with Operation of Pilot and Research Thermal Energy Stores	42
3.3.2.1	Leakage	42

3.3.2.2	Thermal Losses	45
4	MODELLING OF THERMAL ENERGY STORES	48
4.1	General Aspects	48
4.2	Thermal Energy Store Models in TRNSYS	50
4.2.1	XST-Model	50
4.2.2	ICEPIT-Model	54
4.2.3	Comparison of Thermal Energy Store Models	56
4.3	Boundary Conditions	58
4.3.1	General Aspects	58
4.3.2	Ambient Temperature	60
4.3.3	Soil Temperature	60
4.3.4	Storage Temperature	63
4.4	Geometry Considerations	64
4.5	Validation of Thermal Energy Store Models	70
4.5.1	General Aspects of Validation of Thermal Energy Store Models	70
4.5.2	Earlier Work - Literature Review	74
4.5.3	Comparison of Modelled and Measured Data	76
4.6	Limitations of Available Thermal Energy Store Models	78
5	MODELLING AND MEASUREMENT OF MATERIAL PROPERTIES	81
5.1	Hygic Material Properties of Porous Media	81
5.1.1	Material Characterisation	81
5.1.2	Porosity and Free Saturation	83
5.1.2.1	Definition of Pore Types	83
5.1.2.2	Free Saturation Water Content	86

5.1.2.3	Absorption Measurements	86
5.1.2.4	SEM-Analysis	89
5.1.3	Moisture Storage	90
5.1.3.1	Basics	90
5.1.3.2	Moisture Storage Models	91
5.1.3.3	Sorption Isotherm Measurement	95
5.2	Effective Thermal Conductivity of Porous Media	96
5.2.1	Modelling Concepts	96
5.2.2	Development of the Thermal Conductivity Model	99
5.2.2.1	Thermal Conductivity of Moistened Porous Materials	99
5.2.2.2	Influence of Moisture as a Function of Temperature	103
5.2.2.3	Thermal Conductivity Due to Pore Diffusion	104
5.2.2.4	Approximation of the Fraction of Moistened Pores	109
5.2.2.5	Temperature Dependence of the Closed Pore Fraction	111
5.2.3	Measurements and Model Validation	112
5.2.3.1	Experimental Set-up	112
5.2.3.2	Evaluation of Measured Data	115
5.2.3.3	Measurement Results of Sheet Materials	119
5.2.3.4	Results of Measurement with Bulk Insulation Materials	121
5.2.4	Application of Thermal Conductivity Model	123
5.2.4.1	Partial Differential Equation for Conductive Heat Transfer	123
5.2.4.2	Parameter Identification and Boundary Condition	123
5.2.4.3	Comparison of Modelled and Measured Data	126
5.3	Permeation Resistance of Polymer Membrane Liners	132
5.3.1	Polymer Membrane Liners	132
5.3.1.1	Liner Overview	132
5.3.1.2	Polymer Membrane Liner Selection	132

5.3.2	Modelling Permeation through Polymer Membranes	133
5.3.2.1	Fickian Diffusion	133
5.3.2.2	Water Vapour Transmission	134
5.3.2.3	Stefan Diffusion	137
5.3.2.4	Non-isothermal Diffusion	138
5.3.2.5	Moisture and Temperature Dependence	138
5.3.2.6	Multilayer Diffusion	140
5.3.2.7	Defects	141
5.3.3	Review of the Measurement Results of Standard Methods	142
5.3.4	Permeation Measurement Device	147
5.3.4.1	Functional Description	147
5.3.4.2	Measurement Errors	149
5.3.5	Measurement Results and Discussion	151
6	OUTDOOR LABORATORY EXPERIMENTS	157
6.1	Background and Motivation	157
6.2	Construction of the Outdoor Laboratories	158
6.2.1	Outdoor Laboratory Pits	158
6.2.2	Heating Central and Data Acquisition	161
6.3	Effective Thermal Conductivity of Insulation During Operation	162
7	MODELLING OF COUPLED HEAT AND MOISTURE TRANSFER	171
7.1	Motivation	171
7.2	Approaches to Coupled Heat and Moisture Transfer Modelling	171
7.2.1	General Aspects	171
7.2.2	Literature Review on Heat and Moisture Transport	173
7.2.3	Definition of the Driving Forces	175

7.3 Model Development	179
7.3.1 Modelling Assumptions	180
7.3.2 Definition of the Suction Pressure	180
7.3.3 Moisture Transport	181
7.3.3.1 Derivation of the Water Vapour Transmission	181
7.3.3.2 Derivation of the Liquid Water Transport	185
7.3.4 Moisture Storage	186
7.3.5 Heat Transport	187
7.3.6 Heat Storage	189
7.3.7 Energy and Mass Balance	191
7.3.7.1 Energy Balance	192
7.3.7.2 Moisture Balance	193
7.3.8 System of Equations	193
7.3.9 Boundary Conditions	193
7.4 Implementation in Simulation Code	196
7.4.1 Transfer Equations	196
7.4.2 Spatial Discretization	197
7.4.3 Temporal Discretization	198
7.4.4 Energy and Mass Conservation	200
7.4.5 Discretization of the Boundary Conditions	202
7.5 Computational Algorithm	206
7.6 Testing and Examples	206
7.6.1 Problem Description	206
7.6.2 Boundary Conditions - Soil Discretization	211
7.6.3 Conservative vs. Non-Conservative Model	213
7.6.4 Comparison of Modelled Data with Predictions of Other Models	217
7.6.4.1 Transient Heat Conduction with Analytical Model for the Thermal Conductivity	217

7.6.4.2	Comparison with Delphin and WUFI	219
7.6.5	Parameter Variation	224
7.6.5.1	Boundary Conditions, Coatings	224
7.6.5.2	Thermal Conductivity	227
7.6.5.3	Liquid Water Transport	229
7.6.6	Limitations and Drawbacks of the Model	233
8	CONCLUSIONS	235
	LITERATURE	I
	Appendix	A1
A 1	"Stock" Conferences	
A 2	Pictures of Construction of Selected Pilot and Research Stores	
A 3	Pilot and Research Thermal Energy Stores	
A 4	Slope Stability	
A 5	Special Geotechnical Works: Soil Nailing	
A 6	Construction of Buried (seasonal) Thermal Energy Stores, Related Sectors	
A 7	Floating Covers	
A 8	Shell Covers	
A 9	Polymer Membrane Liner	
A 10	Geometry of TES in Friedrichshafen and Hanover and Position of Temperature and Heat Flux Sensors	
A 11	Comparison of TES Models, XST, ICEPIT and MST	
A 12	Measured Annual Heat Flux Densities at Different Locations in the TES of Hanover and Friedrichshafen	
A 13	Results of Simulation with XST-Model: Contour Plots	
A 14	Results of Simulation with XST-Model: Temperature History Plot, TES in Friedrichshafen	
A 15	Investigated Bulk Insulation Materials	
A 16	Free saturation Water Content – Absorption Experiments	
A 17	Water Absorption, Temperature Dependence	
A 18	Measured Water Content of Bulk Insulation	
A 19	Measured Sorption Water Content	
A 20	Guarded Heating Plate Measurement Device	
A 21	Thermal Conductivity - Measurement Results Bulk Materials	
A 22	Measured Effective Thermal Conductivity of Sheets	
A 23	Measured Effective Thermal Conductivity of Bulk Insulation	

A 24 Influence of Compaction of Foam Glass Gravel

A 25 Measured Effective Thermal Conductivity of Compacted Foam Glass Gravel

A 26 Water Vapour Transmission - Standard Test Methods, Non-Standard Test Methods

A 27 Water Vapour Resistance Numbers, Water Vapour Transmission, Water Vapour Transmission Rate, Permeability, Permeability Rate

A 28 Additives in Common Liners

A 29 Permeation Literature Data

A 30 Permeation Measurement Device

A 31 Summary of Permeation Measurement Results

A 32 Outdoor Laboratory Experiments – Construction of the Research TES

A 33 Outdoor Laboratory Experiments – Heating Central

A 34 Outdoor Laboratory Experiments – Measured Effective Thermal Conductivity

A 35 Fundamental Works Related to Coupled Heat and Moisture Transport

A 36 Definition of the Suction Pressure

A 37 Boundary Conditions – Heat and Moisture Transfer

A 38 Spatial Discretization

A 39 Temporal Discretization