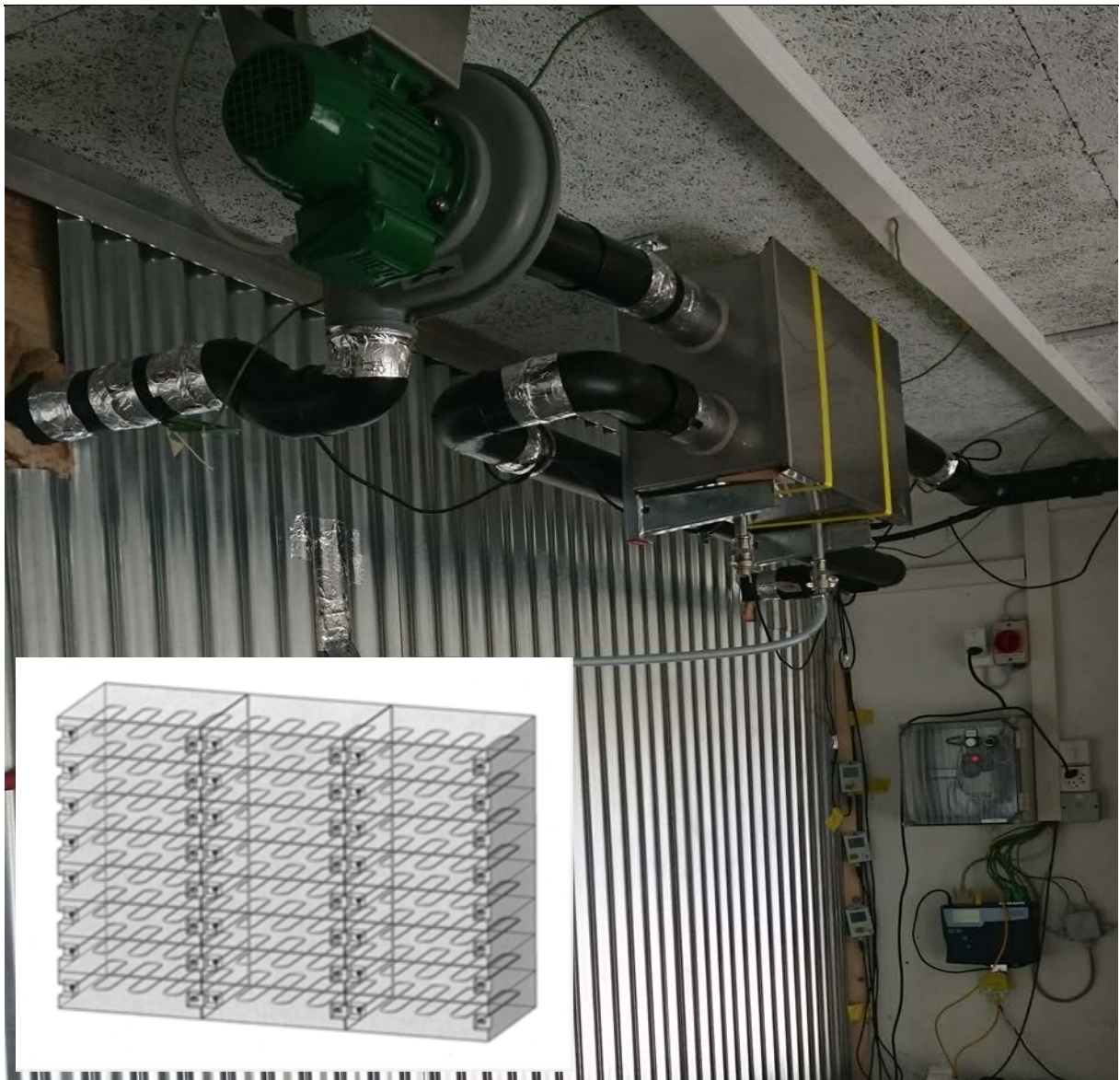




Schlussbericht vom 10 Dezember 2016

Pilotprojekt Ettringitbasierter Wärmespeicher





Datum: 10 Dezember 2016

Ort: Dübendorf

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Empa, Abt. Beton/Bauchemie
Überlandstrasse 129, CH-8600/Dübendorf
www.empa.ch

ZHAW School of Engineering
Technikumstrasse 9, CH-8400/Winterthur
www.ZHAW.ch

Autoren:

Josef Kaufmann, Empa/Abt. Beton/Bauchemie, Josef.Kaufmann@empa.ch
Frank Winnefeld, Empa/Abt. Beton/Bauchemie, Frank.Winnefeld@empa.ch
Thomas Spielmann, ZHAW, Thomas.Spielmann@zhaw.ch
Markus Zumoberhaus, Markus.Zumoberhaus@bluewin.ch

BFE-Programmleitung:	Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung:	Jean-Christophe Hadorn, jchadorn@baseconsultants.com
BFE-Vertragsnummer:	SI/500899-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Dank



Blick auf den Vierwaldstättersee in Seelisberg (UR), Ort der Pilotanlage.

Für die Mitarbeit und wertvollen Hinweise bei der Produktion der Betonelemente und dem Bau vor Ort danken die Autoren dem Laborteam der Empa, Abteilung Beton/Bauchemie, Jakob Burkhard, Boris Ingold, Marcel Käppeli, Daniel Käppeli und Walter Trindler herzlichst. Thomas Zähringer (ZHAW) sei für seine Mithilfe bei der Installation der Messtechnik gedankt.

Ein spezieller Dank gebührt Hans Markutt (Markutt Heizungen) der viele wertvolle Vorschläge zur Anbindung der Ettringitspeicherpilotanlage an bestehende Systeme beigesteuert hat und diese auch mit grosser Flexibilität präzise umgesetzt hat. Marco Aschwanden danken wir für die elektrischen Installationen.

Der Firma Italcementi danken wir für Materiallieferungen, der Firma Isover zusätzlich für den Sponsorbeitrag und dem Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung des Projekts und die professionelle Abwicklung.



Inhaltsverzeichnis

Projektziele.....	5
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse.....	5
Nationale Zusammenarbeit	92
Internationale Zusammenarbeit	92
Bewertung 2016 und Ausblick	92
Referenzen	94
Anhang	96

Projektziele

Das vorliegende Pilotprojekt wurde mit dem Ziel der praxisnahen Erprobung eines neuartigen latenten Wärmespeichermaterials, basierend auf Calciumsulfoaluminat (CSA)-Beton mit sehr hohem Ettringitanteil, durch den Bau eines saisonalen Wärmespeichers in realistischer Grössenordnung (6 m³ Speichergrosse) durchgeführt.

Ziel ist die Sammlung von Erfahrungen und Erarbeitung der Grundlagen hinsichtlich der praktischen Realisierung und die Beobachtung des jahreszeitlichen wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens und der Funktionalität anhand eines praxistauglichen Pilotobjekts.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1. Einleitung und Grundlagen

Die Speicherung von Wärmeenergie wird immer wichtiger, da zwischen Wärmeerzeugung und Bedarf oft grosse zeitliche Lücken bestehen. Insbesondere wäre die Speicherung von beispielsweise in Solarthermieranlagen im Sommer anfallenden Überschüssen über grosse Zeiträume bis in den Winter hinein, also eine saisonale Speicherung, wünschenswert und zur Energiespeicherung notwendig.

Zur Speicherung von Wärmeenergie können sensible Wärmespeicher oder Latentwärmespeicher verwendet werden. Während sich bei einer sensiblen Wärmespeicherung die Phase des Materials nicht ändert und diese auf einer reinen Konservierung der infolge einer möglichst hohen Wärmekapazität und hoher Temperatur im Speichermaterial enthaltenen Wärme durch thermische Dämmung basiert, findet bei einem Latentwärmespeicher ein Phasenübergang des verwendeten Materials statt. Infolge seiner Masse und Wärmekapazität kann Beton als sensibles Speichermaterial zur kurz- bis mittelfristigen Speicherung von Wärme eingesetzt werden. Dabei ergeben sich zwangsläufig thermische Isolationsverluste.

Zur langfristigen oder saisonalen Speicherung muss ein Speichermaterial die Wärme latent und verlustfrei speichern. Ein neuer Ansatz ermöglicht es, Wärme latent in einem Spezialbeton zu speichern.

Diese neuartige latente Wärmespeicherung basierend auf dem Mineral Ettringit [1, 2] soll in einem Pilotprojekt praxisnah erprobt werden. Das Mineral Ettringit dehydriert bei erhöhten Temperaturen (ab ca. 50 °C) unter Wasserabgabe endotherm zu Meta-Ettringit. Die Reaktionsgleichung der (nutzbaren) Dehydrierung lautet:



Die vollständig reversible Reaktion weist einen Energieumsatz von 600 kJ/kg-Ettringit auf [3,4], welche zur saisonalen Speicherung von Wärme genutzt werden kann. Der Grad der Dehydrierung ist dabei abhängig von Temperatur und Wasserdampfpartialdruck [5].

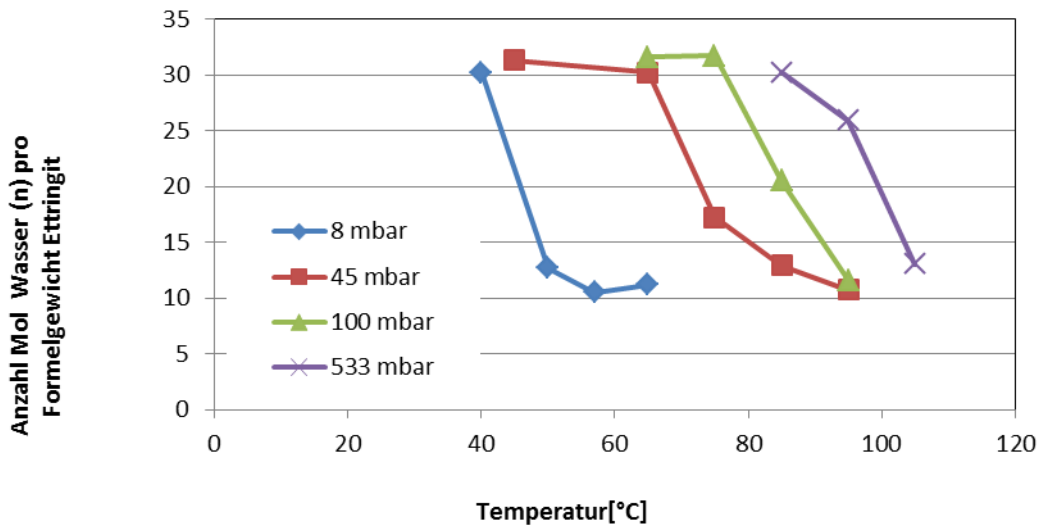


Abb. 1 Kristallwassergehalt von Ettringit in Funktion der Temperatur und des Wasserdampfpartialdrucks (mbar) nach [5].

Ettringit ist ein seltenes natürlich vorkommendes Mineral, kommt aber auch in normalem (herkömmlichen) Beton als Produkt der Zementerhärtung vor. Während die natürlichen Vorkommen schwer zugänglich sind, ist die Menge an Ettringit in herkömmlichem Beton zu gering für eine Nutzung für die Wärmespeicherung. Ettringit (Abb. 2) kann auch als reine Phase synthetisch hergestellt werden, jedoch ist reiner (loser) Ettringit ungeeignet, da die Kristalle keine dichte Packung erlauben und somit eine zu geringe Energiedichte resultieren würde. Zudem sind die Kosten für synthetischen Ettringit derzeit zu hoch für eine grosstechnische Anwendung.

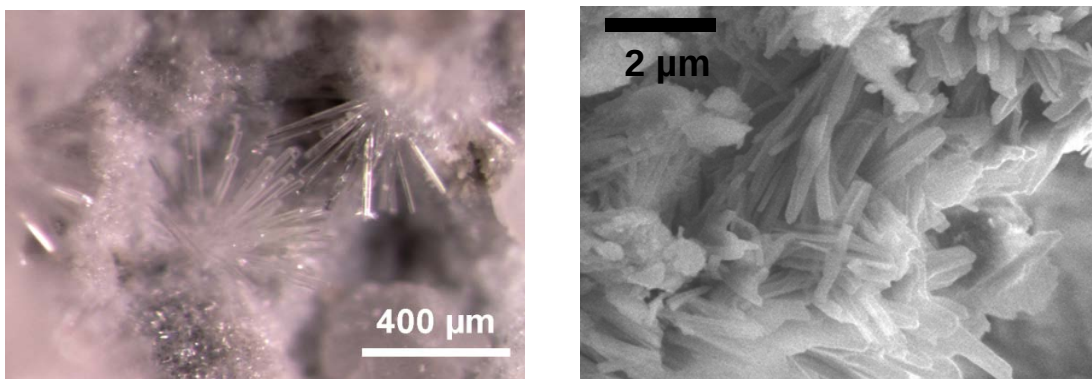


Abb. 2 Natürliche Ettringit-Kristalle (links) und Ettringit in Beton (rechts).

Unter Verwendung eines Spezialzements auf Basis Calciumsulfoaluminat (CSA) und unter Beimischung von Gips und Wasser ist es nun aber möglich, einen dichten (festen) Beton herzustellen, in

welchem der Ettringit-Anteil im Vergleich zu herkömmlichem Beton entscheidend gesteigert werden kann (Abbildung 3) [1, 2]). Der verwendete Spezialzement hat gegenüber einem Portlandzement zudem einen um ca. 25% geringeren CO₂-Ausstoss.

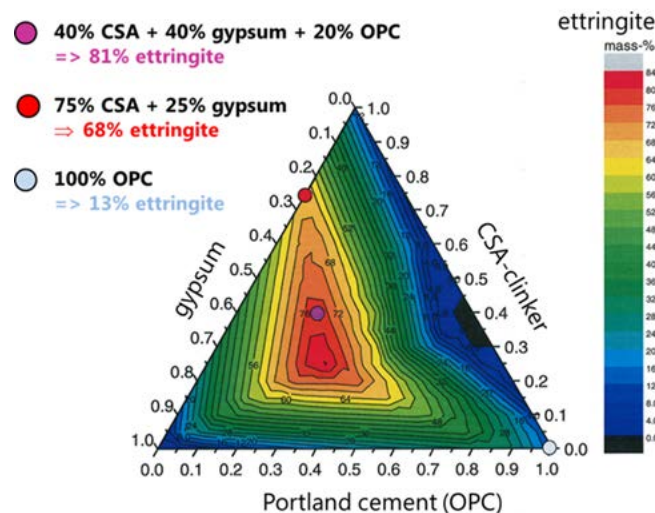


Abb. 3 Ettringitgehalt in g per 100 g unhydratisiertem Bindemittel (Simulation mittels thermodynamischer Modellierung) im erhärteten Stoffgemisch nach der Hydratisierung unter Verwendung eines ternären Bindemittelsystems aus Gips, CSA-Zement und Portlandzement (OPC).

Eine andere Darstellung der Daten von Zhou&Glasser [5] (Abb. 4) zeigt, dass die Entwässerung des Ettringits möglicherweise sogar bevorzugt von der relativen Feuchte abhängig ist und bei etwas unter 20% relativer Feuchte einsetzt. Eine gewisse Temperaturabhängigkeit wäre demnach zwar vorhanden, aber nicht mehr a priori dominant. Um möglichst tiefe Luftfeuchten (sogar bei gleichzeitig hohen absoluten Wassergehalten) zu erreichen ist jedoch eine Temperaturerhöhung technisch der einfachste und energetisch der einzig sinnvolle Weg. Zudem läuft der bei der Trocknung eines Materials involvierte Diffusionsprozess (Wasserdampftransport) bei hohen Temperaturen wesentlich rascher ab. Insbesondere wären demnach Trocknungstemperaturen über 100°C besonders effizient. Interessant ist die mögliche Dominanz der Luftfeuchte deshalb, weil sie einfach messbar ist und somit in praktischen Anwendungen als Steuerungsgrösse und allenfalls als Kriterium für den Trocknungsgrad verwendet werden könnte. Besonders vielversprechend ist daher die Ankoppelung an Solarkollektoranlagen, wo Rücklauftemperaturen im Sommer problemlos 100°C erreichen können. Da Wärme in dieser Jahreszeit als Überschuss anfällt und nicht genutzt werden kann, ist insbesondere die saisonale Speicherung von Wärme dort ein zentrales Anliegen.

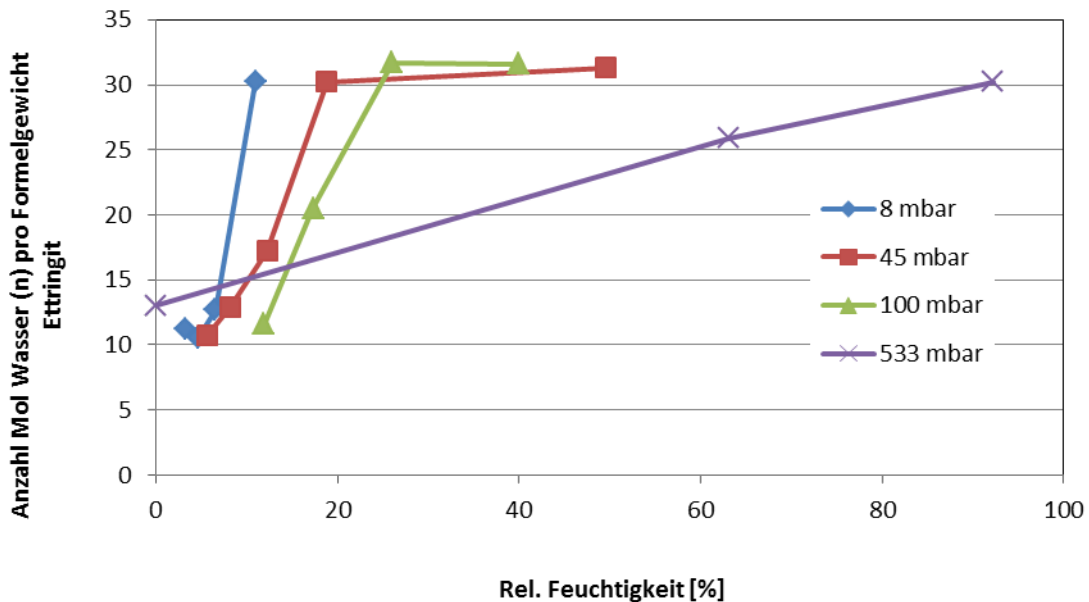


Abb. 4 Kristallwassergehalt von Ettringit in Funktion der relativen Luftfeuchte gemessen bei verschiedenen Wasserdampfpartialdrücken (nach [5]).

Wird der in diesem Spezialbeton enthaltene Ettringit (im Sommer) erwärmt, beginnt der Ettringit ab einer bestimmten Luftfeuchte/Temperatur endotherm Kristallwasser abzdampfen, und der Ettringit wandelt sich in Meta-Ettringit um. Diese Reaktion ist reversibel. Wird also später (im Winter) dem zuvor dehydrierten Mineral wieder Wasser zugeführt, bildet sich exotherm wieder Ettringit. Die zur Dehydratisierung benötigte Kristallisationswärme kann daher wiedergewonnen werden. Damit lässt sich Wärme fast verlustfrei über grosse Zeiträume permanent (saisonal) speichern. Im Gegensatz zu anderen Phasenumwandlungsmaterialien ist dabei die Temperatur, bei der die Wärmerückgewinnung geschieht, nicht fixiert, sondern in einem weiten Bereich frei wählbar (theoretisch 0 bis 100 °C). Wichtig ist nur, dass ausreichend Wasser oder Wasserdampf zur Verfügung gestellt wird. Insbesondere die Wärmerückgewinnung bei Raumtemperatur für Heizzwecke wäre äusserst interessant, da durch die Zugabemenge an Wasser die Energiefreisetzung gesteuert werden kann.

Das vorliegende Projekt verfolgt die Absicht, einen funktionstüchtigen Ettringit-basierten Speicher im relevanten Massstab (6 m³) zu bauen. Im Vordergrund steht die Demonstration der Machbarkeit eines derartigen Speichers, die Erprobung und Bemessung von Wärmetauscher- und Feuchteausaustauscherelementen, sowie die praktische Erprobung von Baumaterial und -methoden. Der Speicher selbst wird in die Garage eines bestehenden Hauses in Seelisberg (UR) unter engen Platzverhältnissen eingebaut. Das Haus ist bereits mit einer Sonnenkollektoranlage (20 m²), einem Wasserwärmespeichertank (9.3 m³) sowie einem Regenwassersammler (4 m³) ausgestattet. Im letzten Projektjahr wurde dort zudem eine Photovoltaikanlage installiert, so dass der im Sommer für den Ladebetrieb benötigte Strom für Pumpen, Ventilator und Messtechnik vor Ort produziert wurde.

2. Speichermaterial

2.1 Untersuchungen Materialzusammensetzung und Speicherdichte

Um in einem CSA-Beton möglichst viel Wärme speichern zu können, muss der Beton möglichst viel Ettringit enthalten. Im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten wurde daher auch eine Vorstudie zur Zusammensetzung, Verbesserung der Betonrezeptur und der kalorimetrischen Eigenschaften (Speicherdichte) durchgeführt.

Als Voraussetzung für den geplanten Speicherbau wurden zunächst Materialproben im Labor hergestellt und deren Materialeigenschaften untersucht. Es wurden dabei verschiedene Bindemittelvarianten studiert. Im Vordergrund stand dabei, geeignete Mischkombinationen zur Steigerung der Speicherdichte bei gleichzeitig stabilem Aushärtungsverhalten zu erreichen. Leider erwiesen sich aber nicht alle Varianten als mechanisch stabil, insbesondere trat bei ternären Systemen (Dreiphasengemische CSA-Zement – Portlandzement - Gips) im Zuge der Erhärtung eine unerwünschte, zu Rissen führende Expansion auf. Infolge gewisser Schwankungen in der Zusammensetzung bisher untersuchter CSA-Zemente („Cal“ aus China) musste auf andere Hersteller ausgewichen werden. Immerhin scheint es nun möglich, die Rohstoffe auch aus der europäischen Nachbarschaft („Ita“ aus Italien) zu beziehen.

Die Speicherdichten wurden anhand von Kalorimetriemessungen ermittelt. Dazu wurde eine Zementpaste aus einem kommerziell erhältlichen CSA-Zement mit Gips und Wasser gemischt. Aus den erhärteten Proben wurden dann kleinere Stücke entnommen und bei 110°C im Umluftofen getrocknet (Ladevorgang) und im Exsikkator abgekühlt. Die Rehydratation (Entladung) erfolgte in einer 20 ml Admix-Ampulle in einem isothermen Wärmeflusskalorimeter [6] (TAM Air) durch Zugabe von 2 ml demineralisiertem Wasser. Dabei wurde der resultierende Wärmefluss gemessen, und die freigewordene Wärmemenge durch Aufaddieren (Integration) bestimmt. Die Dichte der Proben wurde aus der Messung des Volumens, einerseits durch Ausmessung, andererseits zur Kontrolle auch durch Wägung über und unter Wasser, und aus der Bestimmung des Trockengewichts bestimmt. In Tabelle 1 sind die Resultate mit zwei verschiedenen Zementen und verschiedenen Gipsgehalten aufgelistet.

Tabelle 1 Speicherdichten im Kalorimeter (1. Zyklus) nach Trocknung bei 110°C.

	Speicherdichte [kWh/m ³]	Stabw	
Cal-1	59	3	-6% Gips
Cal-2	61	4	-3% Gips
Cal-3	69	8	max. Gips für Ettringitbildung
Cal-T	58	2	ternäres System mit max. Gips
Ita-1	64	4	-6% Gips
Ita-2	66	2	-3% Gips
Ita-3	66	3	max. Gips für Ettringitbildung
Ita-T	58	3	ternäres System mit max. Gips



Die ermittelte Latent-Speicherdichte erreicht knapp 70 kWh/m^3 . Zwar ist das noch deutlich tiefer als die angestrebten Werte, jedoch sind höhere Speicherdichten realistisch, da diese Werte im ersten Entfeuchtungs-Befeuchtungszyklus ermittelt wurden. In früheren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass durch Nachhydratation und entsprechend dichterem Gefüge die Latentspeicherdichten mit dem Alter noch um 10-20% ansteigen können. Es besteht auch betontechnologisch durch Optimierung der Zemente und Mischzusammensetzungen zudem weiteres Potenzial, welches aber umfangreichere Entwicklungsarbeiten voraussetzt. Basierend auf der Tatsache, dass reiner Ettringit eine Speicherdichte von ca. 210 kWh/m^3 [3] aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass für praxisnahe Mischungen Speicherdichten von ca. $80\text{-}100 \text{ kWh/m}^3$ erreicht werden können.

Auch ist es denkbar, reinen Ettringit mit einzumischen um die Speicherdichten weiter zu erhöhen. Reiner Ettringit könnte als Suspension kostengünstig künstlich hergestellt und bei der Betonherstellung mit dem Anmachwasser beigemischt werden. Da der Wasser/Zement-Wert des CSA-Betons recht hoch ist (ca. 0.7) könnten bedeutende zusätzliche Ettringitmengen problemlos schon vor der eigentlichen Hydratation eingemischt werden. Der bei der Hydratation neu gebildete Ettringit würde den als Suspension beigegebenen in ein dichtes Gefüge einbauen.

2.2 Untersuchungen zum Adsorptions-/Desorptionsverhalten

Da das Speicherprinzip auf einer Entfeuchtung (Ladung) bzw. Befeuchtung (Wärmefreisetzung) beruht, wurden insbesondere Feuchtetransportkennwerte anhand von Musterproben („Cal-2“) ermittelt und hier (informativ) wiedergegeben. Es zeigte sich, dass das vorgesehene Speichermaterial (CSA-Beton) weitestgehend offenporig ist, was den Dampf- und Wassertransport erleichtert. Um das Sorptionsverhalten des Speichermaterials einschätzen zu können, wurden einfache Lagerungs- und Trocknungsversuche durchgeführt, welche hier wiedergegeben werden sollen. Rasch wird erkennbar dass die Dehydrierung von Ettringit-Beton, genauer gesagt Pasten (sie enthalten keine Gesteinskörnung), einerseits das Abführen grosser Wassermengen erfordert und andererseits die Ent- und Befeuchtungsprozesse (Abb. 5&6) eher etwas träge und langsam erfolgen. Zudem wird anhand der Desorptionsisotherme (Abb. 7) auch erkennbar, dass ein Grossteil des Wassers (bei vollständiger Sättigung) als Kapillarwasser vorliegt, welches aber grösstenteils schon bei hohen relativen Feuchten abgedampft werden kann.

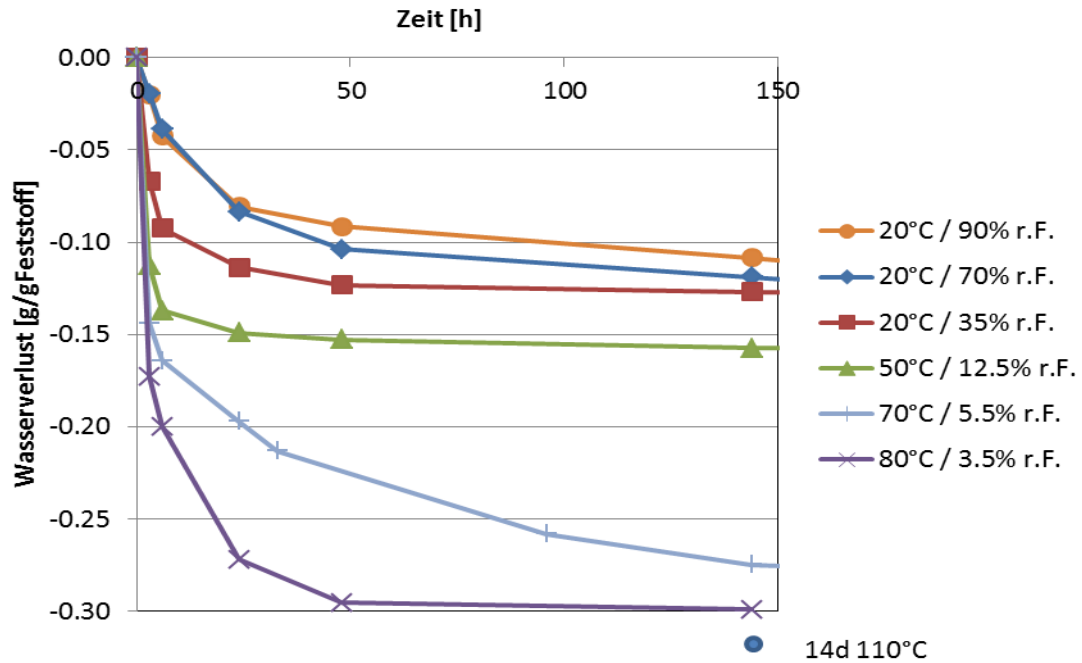


Abb. 5 Wasserverlust wassergesättigter Proben (20°C) bei Umlagerung in Klimata mit unterschiedlichen relativen Feuchten (Probe „Cal-2“, 100x20x10mm³).

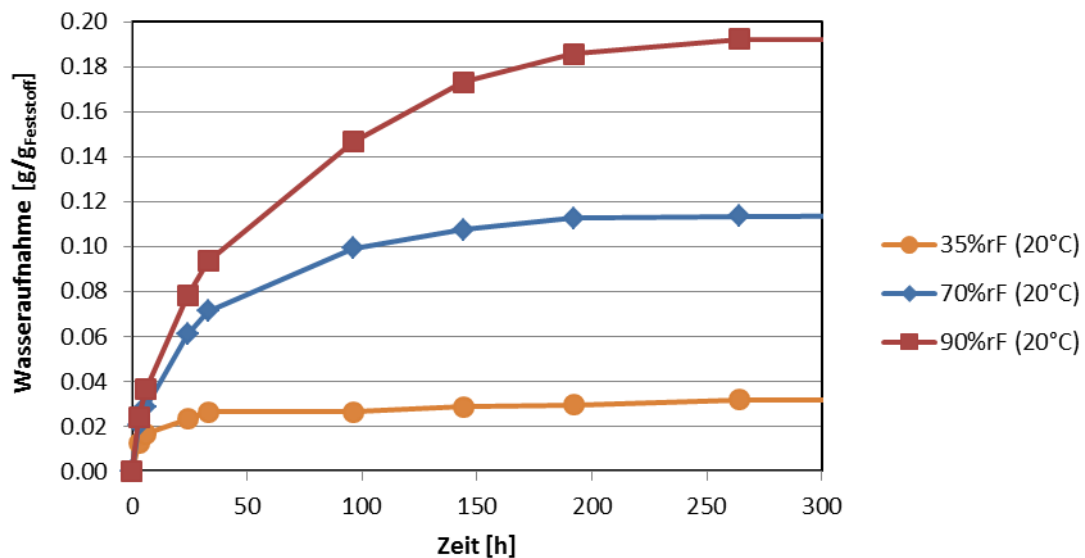


Abb. 6 Wasseraufnahme vollständig getrockneter Proben (110°C) bei Umlagerung in Klimata mit unterschiedlichen relativen Feuchten (Probe „Cal-2“, 100x20x10mm³).

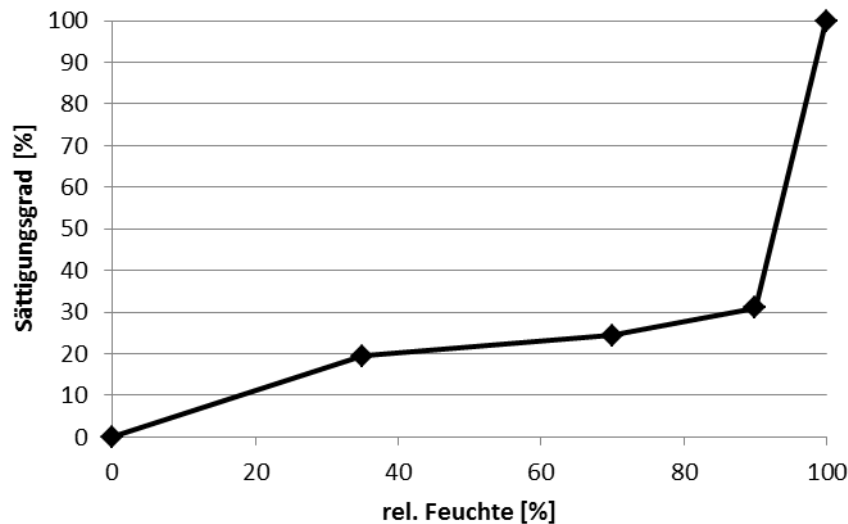


Abb. 7 Desorptionsisothermen bei 20°C (Probe „Cal-2“ 100x20x10mm³, „0“ entspricht Trocknung bei 50°C).

2.3 Weitere Materialeigenschaften

In Abbildung 8 sind zudem die mittels Quecksilberdruckporosimetrie an bei 50°C resp. 110°C getrockneten CSA-Betonproben ("Cal-2") gemessenen Porengrössenverteilungen geplottet. Es kann festgestellt werden, dass es sich bei CSA-Beton um ein sehr feinporiges Material handelt, wobei die Porengrösse durch die Trocknung resp. Dehydrierung des Ettringit ansteigt. Nicht ganz auszuschliessen ist eine Mikrorissbildung (5-10µm). Vor allem führt die Trocknung zu einem deutlich höheren Anteil an Kapillarporen im Bereich von 100 Nanometern Radius, was die Offenporigkeit verstärkt und Transport von Feuchtigkeit deutlich beschleunigen dürfte. In Tabelle 2 sind einige Werte wiedergegeben, welche den Feststoff Ettringitbeton zusätzlich charakterisieren.

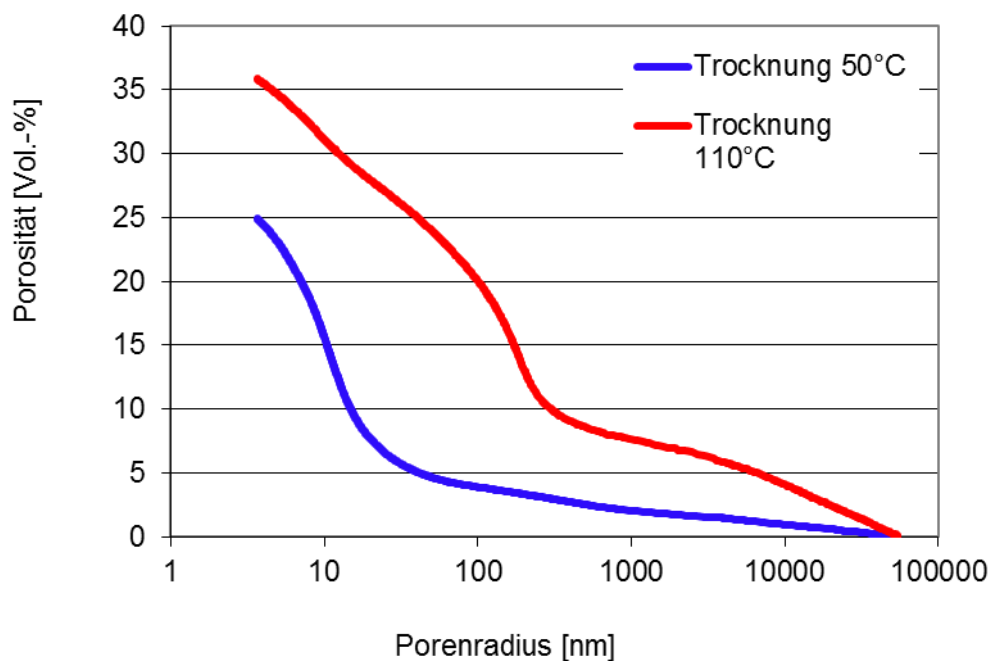


Abb. 8 Porengrössenverteilung von getrocknetem CSA-Beton (50°C resp. 110°C). Richtwerte „Cal-2“.

Tabelle 2 Ermittelte Materialkennwerte (Richtwerte „Cal-2“).

Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wasserlagerung 20 °C :	0.61
	Nach Trocknung 50 °C :	0.44
	Nach Trocknung 110 °C :	0.13
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ -Wert ^{*)}	13 +/-3	
Wasseraufnahmekoeffizient w -Wert ^{*)} [kg/(m ² h ^{0.5})]	2.7 +/- 1.0	
Kapillarporosität (Hg-Druckporosität) [Vol.-%]	24.9	
Gesamtporosität (Hg-Druckporosität) [Vol.-%]	35.9	

^{*)} bei 20°C

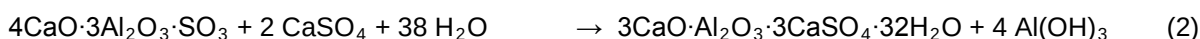


2.4 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit

Stand der Forschung

Die Basis bei der Produktion des ettringithaltigen Speichermaterials bildet Calciumsulfoaluminatzement (CSA), welcher wegen seiner geringen CO₂-Emissionen bei der Produktion auch in der Zement- und Betonindustrie eine interessante Alternative zu herkömmlichen Portlandzementen darstellt.

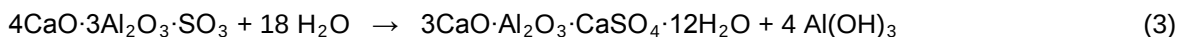
Es gibt eine grosse Bandbreite an verschiedenen CSA-Klinkern, welche alle Ye'elimite (4CaO·3Al₂O₃·SO₃) als Hauptbestandteil (30-70%) enthalten. Im Falle einer binären Mischung von CSA Zement und Calciumsulfat reagiert Ye'elimite bei Wasserzugabe gemäss Gleichung (2) zu Ettringit:



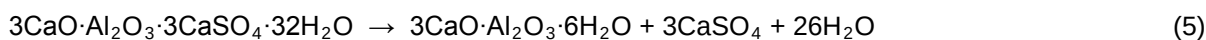
Während der Ladung des Speichers wird das erhärtete Speichermaterial Ettringitbeton in noch feuchtem Zustand erwärmt um es zu trocknen resp. den darin enthaltenen Ettringit zu entwässern. Je nach Schärfe der Trocknung und vor allem in Anbetracht des grossen Volumens des Speichers können selbst bei hohen Temperaturen von 80-100°C hohe Luftfeuchten von weit über 90% rel. Feuchte auftreten. Es ist daher notwendig, das Materialverhalten in diesem Temperatur- und Feuchtebereich zu kennen, um sein Langzeitverhalten abschätzen zu können. Insbesondere ist abzuklären, ob mit zunehmender Trocknung ausschliesslich die erwünschte Umwandlung von Ettringit in Meta-Ettringit erfolgt oder sich allenfalls andere eventuell sogar latent expansive Phasen bilden können.

Über den Temperatureinfluss auf CSA-Zemente respektive ihr Hauptreaktionsprodukt Ettringit ist generell aber wenig bekannt. Bei tiefen Verhältnissen Calciumsulfat/Ye'elimite (Molverhältnis M = 0.6 oder 1) wurde eine partielle Destabilisierung von Ettringit zu Monosulfat schon bei Temperaturen von 70 oder 85 °C [7, 8] beobachtet. Bei höheren Molverhältnissen Calciumsulfat/Ye'elimite (M = 1.4 and 3.9) bilden sich aber die gleichen Hydrate wie bei 20°C aus [8].

Andererseits ist bekannt, dass unter gewissen Bedingungen Ye'elimite bei der Hydratation prinzipiell auch andere Phasen als Ettringit, nämlich Monosulfat und Aluminiumhydroxid gemäss Gleichung (3) bilden kann.



Auch wurde ein thermischer Zerfall, allerdings bei Temperaturen weit über 100°C, von Ettringit zu Monosulfat und Calciumsulphathemihydrat (Bassanit) gemäss Gleichung (4) [9, 10] resp. zu Katoit (Hydrogranat) (Gleichung 5) [11] beobachtet.



Daher ist es besonders wichtig, die chemische Stabilität zu garantieren und eine allfällige expansive Bildung von sekundärem Ettringit durch Rückreaktion von Monosulfat oder Katoit ausschliessen zu können (Rückreaktion nach Gleichung 3&4).

Andererseits kann nicht nur die Temperatur, sondern auch die relative Feuchte die Stabilität von Ettringit relativ zu Monosulfat beeinflussen wie thermodynamische Simulationen gezeigt haben [12, 13]. Es wurde dort festgestellt, dass bei tiefer relative Feuchte Monosulfat und Calciumsulfat stabiler sind als der wasserreiche Ettringit wie auch in Gleichung (4) ersichtlich ist. Diese Destabilisierung von Ettringit tritt aber bei der Trocknung von Ettringit nicht auf, da die Abwesenheit von ausreichend Wasser eine Auflösung des Ettringits verhindert und so keine Ausfällung von Monosulfat stattfinden kann. Stattdessen wird Meta-Ettringit gebildet [14].

Aufgrund des bisherigen Standes der Forschung erscheint die Stabilität des Ettringits zumindest bei rascher Trocknung als gegeben, hingegen muss die Stabilität in feuchtheisser Umgebung insbesondere mit den hier für die Energiespeicherung verwendeten Materialien genauer untersucht werden.

Es zeigte sich bei ersten Trocknungs-/Bewässerungsversuchen vor allem an grossen Proben ein instabiles, sogar drastisch quellendes Verhalten, welches das gesamte Projekt kurzzeitig in Frage stellte (Abb.9). Die Eruiierung der Ursache dieses Verhaltens und einer daraus abgeleiteten Verhinderungsstrategie resp. der Definition stabiler Gebrauchsbedingungen war daher zentral für den weiteren Projektverlauf.



Abb. 9 Dauerhafte Platte links ($40 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$) und nicht beständige Platte ($600 \times 600 \times 100 \text{ mm}^3$) nach Trocknung bei 110°C und anschliessender Dauerlagerung unter Wasser (verschiedene CSA-Zemente).

Es wurde daher ein ausführliches Versuchsprogramm durchgeführt, bei welchem die chemische Phasenzusammensetzung von erhärteten Pasten, welche mit verschiedenen CSA-Zementen hergestellt und vor und nach verschiedenen Temperatur- und Feuchtwechsels analysiert wurden. Die wichtigsten Resultate dieser Untersuchungen sind hier auszugsweise wiedergegeben. Eine detaillierte Wiedergabe findet sich in [15].



Untersuchte Materialien und angewendete Methoden

Zwei verschiedene CSA-Zemente wurden untersucht. Die mineralogische Zusammensetzung der Zemente (quantitative Röntgendiffraktion (QXRD)) ist in Tabelle 2 wiedergegeben. Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse finden sich in [15]. Der Ye'elimit-Gehalt betrug 62.8 Gew.-% bei CSA 1 und 67.1 Gew.-% bei CSA 2. Die grössten Unterschiede zwischen den beiden Zementen betreffen den Belit-Gehalt, welcher bei CSA 2 18 Gew.-% beträgt, während CSA 1 kein Belit stattdessen Perovskit (5 Gew.-%) und einen hohen Gehalt an Gehlenit (18.3 Gew.-%) aufweist.

Tabelle 3 Mineralogische Analyse (QXRD).

Phasen	Formel	CSA 1	CSA 2
		(Gew.-%)	(Gew.-%)
Ye'elimit	$C_4A_3\bar{S}$	62.8	67.1
Perovskit	CT	5.7	0.8
Belit	C_2S		18.0
Periklas	M		2.9
Spinel	MA	1.8	
Gehlenit	$C_2A\bar{S}$	18.3	2.3
Anhydrit	$C\bar{S}$		1.5
Mayenite	$C_{12}A_7$		1.7
Calciumaluminat	CA	8.1	
Calciumdialuminat	CA_2	3.1	
Fluorellestadit	$C_{10}S_3\bar{S}_3f_2$		5.7

C=CaO, S= SiO₂, $\bar{S}$ =SO₃, A=Al₂O₃; M=MgO; T=TiO₂; f=Fluorid

Die CSA Zemente wurden mit technischem Gips ($C\bar{S}H_2$ 96.7% $C\bar{S}$: 3.3%) vermengt und mit Wasser vermischt um erhärtete Zementsteinproben (Prismen 40x40x160 mm³) herzustellen. Das Wasser zu Binderverhältnis (w/b) wurde mit 0.60 angesetzt, während der Gipsanteil entsprechend dem Ye'elimitgehalt angesetzt wurde. Bei CSA 1 betrug das molare Verhältnis Calciumsulfat/Ye'elimit M=2.0 und bei CSA 2 entsprechend M=1.7. Die Mischung (Tabelle 4) wurde so gewählt, dass Ettringit als Haupthydratationsprodukt auftritt und ein hoher Hydratationsgrad ermöglicht wurde. Derartige Mi-

sungen sind sonst bei Standard-Anwendungen von CSA-Zementen (z.B. Fliesenkleber, schnellabbindende Mörtel etc.) nicht üblich.

Tabelle 4 Mischungszusammensetzung.

	M 1	M 2
	CSA 1	CSA 2
	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Zement	740	770
Gips	260	230
Wasser	600	600
Zement/Gips (kg/kg)	2.85	3.35
Ye'elimit/Calciumsulfat (mol/mol)	2.0	1.7
w/b	0.60	0.60

Von den hergestellten Prismen wurden kleinere Würfel mit einer Kantenlänge von ca. 15 mm ausgeschnitten und ab dem ersten Tag bis zu einem Alter von 28 Tagen unter Wasser gelagert. Danach wurden diese bei unterschiedlichen Temperaturen und Feuchten weitergelagert.

In einem ersten Schritt wurden sie bei Temperaturen von 50°C, 70°C, 90°C oder 100°C einer dampfgesättigten Umgebung ausgesetzt, andere Serien wurden hingegen in einem Umluftofen bei 70°C resp. 110°C rasch getrocknet. Einige der dampfbehandelten Proben wurden danach bei 90°C resp. 110°C in einem Umluftofen getrocknet. Diese unterschiedliche Temperatur und Feuchte sollte mögliche Bedingungen beim Ladevorgang nachstellen. Einige der Proben wurden sodann einem weiteren Nachbehandlungsschritt, nämlich einer erneuten Sättigung unter Wasser bei 20°C unterworfen, um die Bedingungen beim Entladen zu simulieren.

Nach den unterschiedlichen Lagerungen (Tabelle 5) wurden die Proben in Aceton eingelegt und danach 5 Minuten bei 40°C getrocknet um eventuell vorhandenes freies Wasser zu entfernen. Danach wurden die ganzen Würfel mit einem Mörser zu Pulver vermahlen. Es wurde jeweils eine Röntgendiffraktions- und Thermogravimetrieanalyse durchgeführt und die Resultate dieser Phasenanalyse mit theoretischen Berechnungen unter Verwendung der geochemischen Software GEMS verglichen (hier nicht wiedergegeben). Weitere experimentelle Details und die Resultate der Modellierung sind in [15] detailliert publiziert und hier auszugsweise wiedergegeben.



Tabelle 5 Untersuchungsprogramm mit den unterschiedlichen Temperatur- und Feuchtebehandlungen nach einer 28-tägigen Vorlagerung der Proben bei 20°C unter Wasser.

Mischungen	Behandlung Schritt 1 (7 Tage)	Behandlung Schritt 2 (7 Tage)	Behandlung Schritt 3 (1 Tage)
M1/M2	20°C	-	-
M1	50°C Dampf	-	-
M1/M2	70°C Dampf	-	-
M1/M2	90°C Dampf	-	-
M1/M2	100°C Dampf	-	-
M1/M2	70°C Dampf	110°C Trocknung	-
M1	100°C Dampf	110°C Trocknung	-
M1	70°C Trocknung	-	-
M1/M2	110°C Trocknung	-	-
M1/M2	90°C Dampf	90°C Trocknung	-
M1	90°C Dampf	90°C Trocknung	20°C Wasser
M1/M2	70°C Dampf	110°C Trocknung	20°C Wasser
M1	100°C Dampf	110°C Trocknung	20°C Wasser

Resultate

Visuelle Beobachtungen

Nach den verschiedenen Lagerbedingungen wurden die Zementsteinproben zuerst visuell begutachtet und auf allfällige Rissbildung und andere Schädigung untersucht (Abb.10). Generell wurde ohne die Überschreitung einer Temperatur von 90°C keine Schadensbildung, selbst bei dampfsatt gelagerten Proben, beobachtet. Bei gewissen Proben ergaben sich aber Risse, wenn die anschliessende Trocknung bei erhöhter Temperatur erfolgte und insbesondere auch wenn die Proben danach bei 20°C unter Wasser gelagert wurden. Derartige Wiedersättigungszyklen würden typischen Lade-/Entladezyklen in einer Energiespeichereinheit entsprechen.



M1 (CSA 1)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{70^{\circ}\text{C Dampf}}$ ■



M1 (CSA 1)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{90^{\circ}\text{C Dampf}}$ ■



M1 (CSA 1)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{100^{\circ}\text{C Dampf}}$ ■



M1 (CSA 1)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{100^{\circ}\text{C Dampf}}$
 $\xrightarrow{110^{\circ}\text{C Tro}}$ ■



M1 (CSA 1)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{70^{\circ}\text{C Dampf}}$
 $\xrightarrow{110^{\circ}\text{C Tro}} \xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}}$ ■



M1 (CSA 1)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{100^{\circ}\text{C Dampf}}$
 $\xrightarrow{110^{\circ}\text{C Tro}} \xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}}$ ■



M1 (CSA 1)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{90^{\circ}\text{C Dampf}}$
 $\xrightarrow{90^{\circ}\text{C Tro}} \xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}}$ ■



M2 (CSA 2)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{90^{\circ}\text{C Dampf}}$ ■



M2 (CSA 2)
 $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C WL}} \xrightarrow{100^{\circ}\text{C Dampf}}$ ■

Abb. 10 Visuelle Beobachtung der CSA 1 und CSA 2 - Proben nach verschiedenen Lagerungen (WL=Wasserlagerung, Tro=Trocknung im Umluftofen, Dampf=Lagerung unter dampfsatten Bedingungen – jeweils bei der angegebenen Umgebungstemperatur; Beprobung ■).

Drastische Schäden ergaben sich aber, wenn vor der Wiedersättigung die Temperaturen bei einer Dampfbehandlung auf 100°C erhöht wurde. Im Falle des CSA 2 war dabei nicht einmal eine Wiedersättigung nötig, die alleinige Dampfbehandlung bei 100°C reichte sogar aus um die Proben komplett zu zerstören.

Chemische Phasenanalyse

Der Einfluss der Dampftemperatur auf Zementpasten hergestellt mit CSA 1 lässt sich anhand der Röntgendiffraktion gut veranschaulichen. Bei moderaten Dampftemperaturen von 20 – 50°C ist Ettringit die Hauptphase. Etwas unreaktierter Ye'elimit und Gips sind noch vorhanden. Bei einer Temperaturerhöhung beginnt schon ab Temperaturen von ca. 70°C der Ettringit in einer gesättigten Wasserdampfumgebung in Monosulfat zu zerfallen (Abbildung 11). Bei noch höheren Temperaturen (100°C) verringert sich der Ettringitanteil weiter. Monosulfat verschwindet aber, dafür wird Katoit (Hydrogranat) beobachtet.

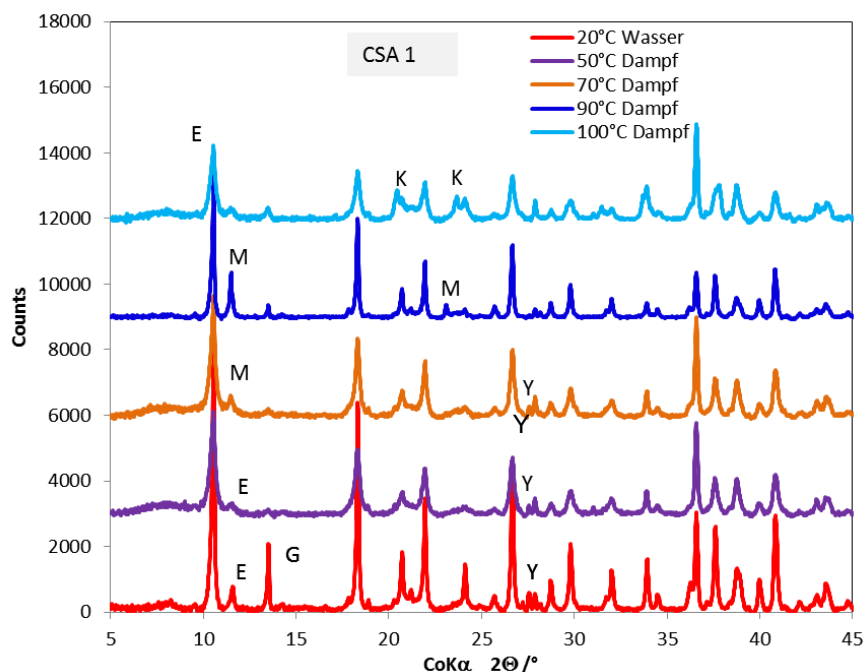


Abb. 11 Effekt der Dampfbehandlungstemperatur (1 Woche)) auf die mittels XRD bestimmte Phasenzusammensetzung des Zementsteins von Mischung M1 (CSA 1).
(E=Ettringit, G=Gips, Y=Ye'elimit, M=Monosulfat, K=Katoit).

Im Gegensatz dazu bleibt bei Mischung 2 (mit CSA 2) in einem grösseren Temperaturbereich von 20-90°C Ettringit die dominante Phase, und Monosulfatbildung wird nicht beobachtet (Abbildung 12).

Dies ändert sich drastisch bei noch höheren Lagerungstemperaturen in gesättigter Dampfumgebung: Ettringit verschwindet vollständig auf Kosten von Katoit, Bassanit und Anhydrit.

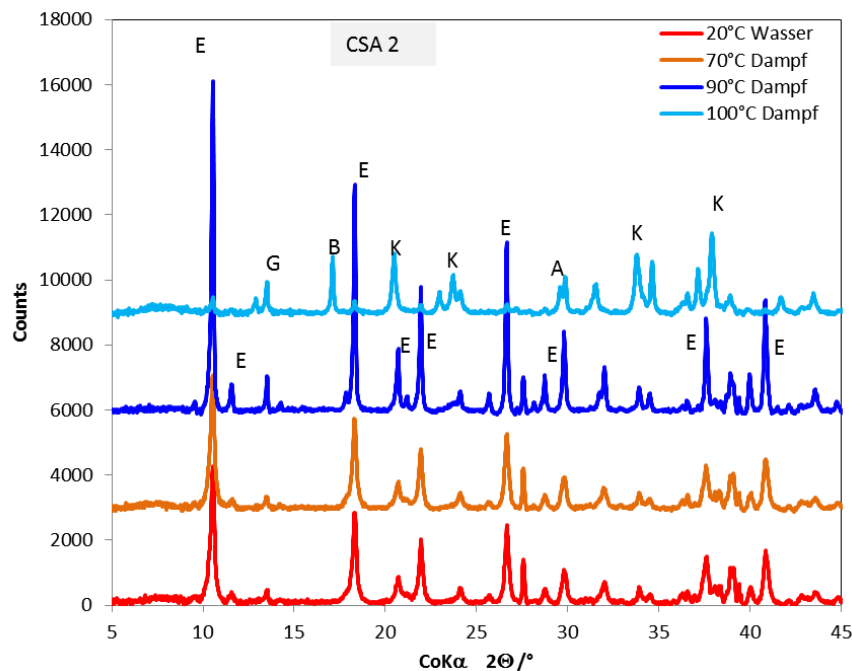


Abb. 12 Effekt der Dampfbehandlungstemperatur (1 Woche) auf die mittels XRD bestimmte Phasenzusammensetzung des Zementsteins von Mischung M1 (CSA 1). (E=Ettringit, G=Gips, A=anhydrit, K=Katoit, B=Bassanit).

Für die Anwendung als Wärmespeichermaterial würde ein vollständiger Lade-/Entladezyklus voraussichtlich Feuchte- und Temperaturbedingungen beinhalten, welche einer Lagerung unter dampfgesättigten Bedingungen bei leicht erhöhter Temperatur gefolgt von einer Ofentrocknung bei noch höherer Temperatur entsprechen. Für beide untersuchten Zementtypen ist das Resultat einer derartigen Abfolge der Lagerung in Abbildung 13 wiedergegeben. Dabei entspricht die Dampflagerung bei 90°C (vollständig dampfgesättigte Luft) einem Lagerzustand mit bei diesen Temperaturen eher unrealistisch hohen Wasserdampfpartialdrücken. Der anschliessende Trocknungsschritt führt zu einem kompletten Verschwinden von Ettringit. Allerdings wird bei CSA 1 statt dem angestrebten Meta-Ettringit etwas Monosulfat gebildet, wogegen bei CSA 2 etwas Katoit entsteht. Der zusätzliche Belit-Anteil in CSA 2 verhindert eine Monosulfatumwandlung und Ettringit dehydriert hauptsächlich zu Meta-Ettringit (röntgenamorph, daher nicht sichtbar).

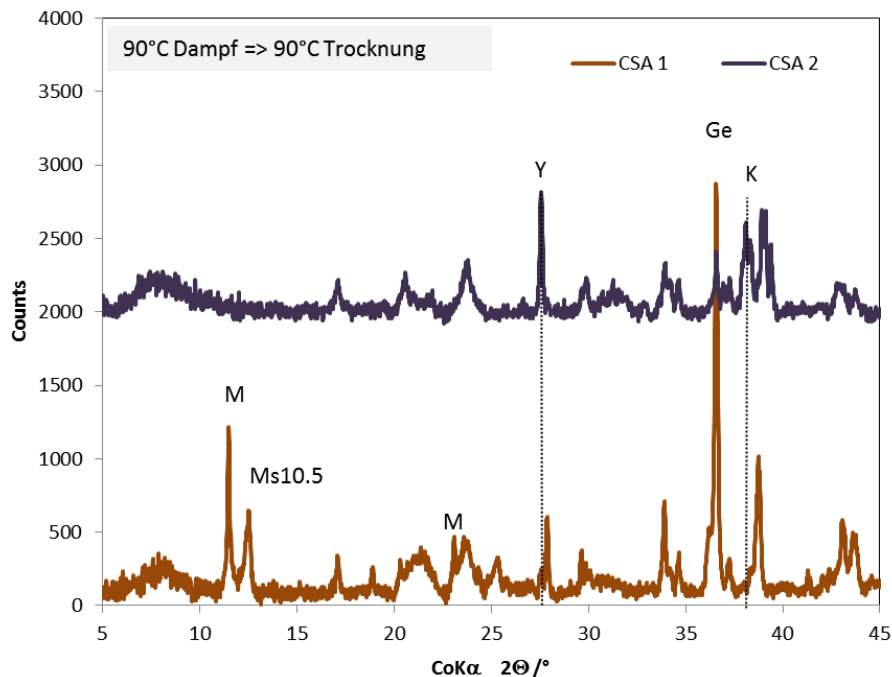


Abb. 13 Vergleich der Zementpasten hergestellt mit den Zementen CSA 1 und CSA 2 nach einer dampfsatten Lagerung bei 90°C gefolgt von einer Ofentrocknung ebenfalls bei 90°C (XRD-Daten). (M=Monosulfat, Ge=Gehlenit, Ms10.5=Monosulfat mit 10.5 H₂O, K=Katoit).

Bei CSA 1 zeigt sich die starke Abhängigkeit von der „Trocknungsgeschwindigkeit“ deutlich. Werden die Proben direkt bei 110°C im Ofen getrocknet, entsteht kein Monosulfat (sondern wie gewünscht Meta-Ettringit). Werden die Proben zwischenzeitlich bei 70°C in dampfsatter Umgebung gelagert entsteht etwas Monosulfat, die Hauptphase dürfte aber immer noch Meta-Ettringit bilden. Erfolgt die Zwischenlagerung bei 90°C, entstehen viel Monosulfat und Katoit (Abbildung 14).

Bei einer nachfolgenden Wiedersättigung durch Lagerung unter Wasser entsteht unabhängig von der Lagervorgeschichte wieder Ettringit als Hauptphase. Dies ist eigentlich die gewünschte reversible Reaktion. Allerdings ist die erneute Bildung von Ettringit bei einem vorangegangenen Zerfall von Ettringit zu Monosulfat oder Katoit statt zu Meta-Ettringit sehr kritisch. Es bildet sich dann sogenannter sekundärer Ettringit, welcher zu starker Rissbildung und Expansion führen kann [16].

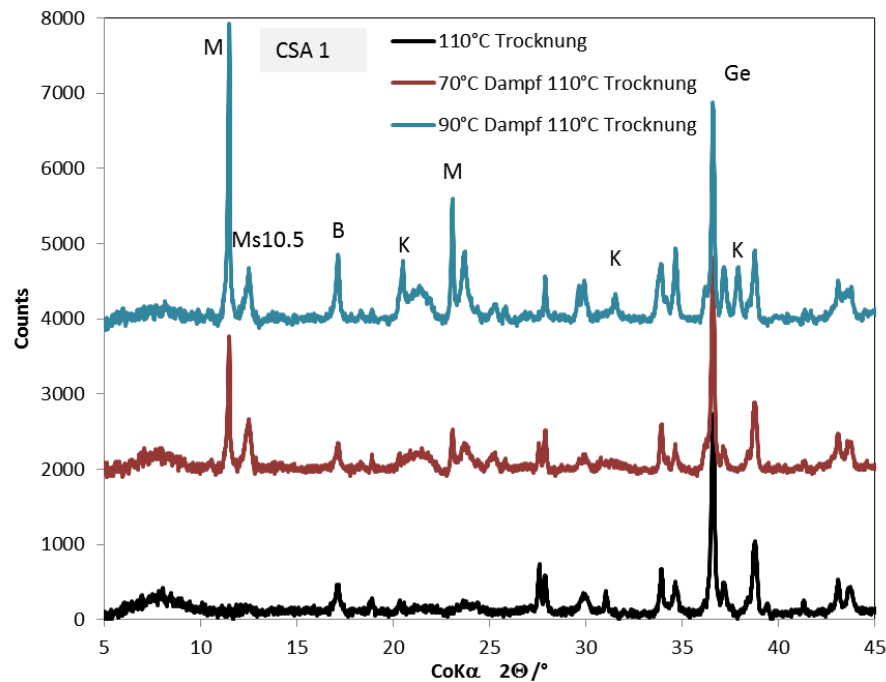


Abb. 14 Zementpaste M1 (CSA 1) nach rascher Ofentrocknung bei 110°C im Vergleich mit einer Dampflagerung bei 70/90°C gefolgt von einer Ofentrocknung bei 110°C (XRD-Daten). (M=Monosulfat, B=Bassanit, Ms10.5=Monosulfat mit 10.5 H₂O, K=Katoit, Ge= Gehlenit).

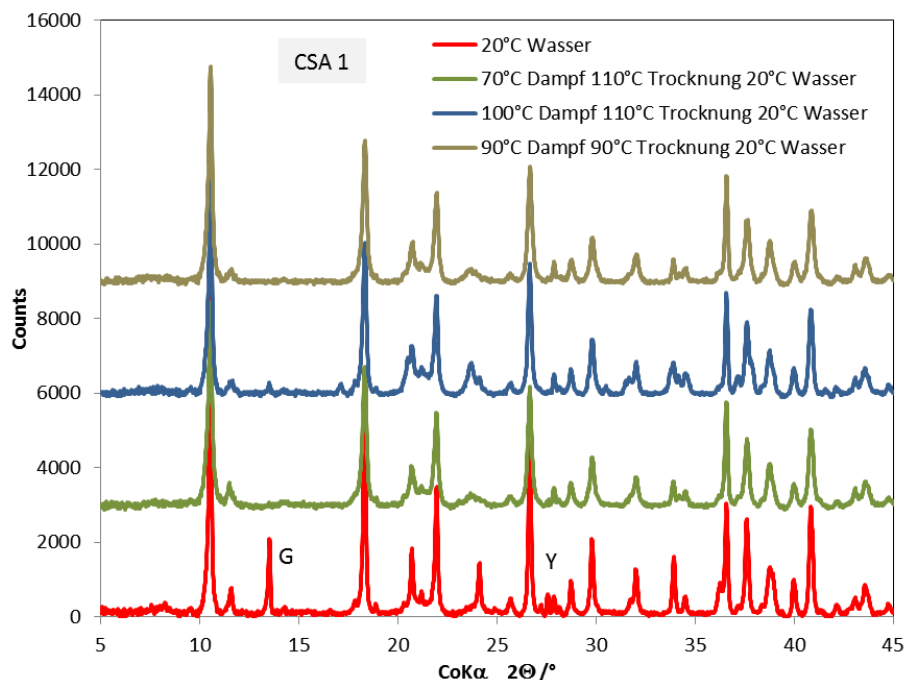


Abb. 15 Zementpaste M1 (CSA 1) nach einer Wiedersättigung durch Lagerung unter Wasser bei 20°C (XRD-Daten). (G=Gips, Y=Ye'elimit)

Neben der Röntgendiffraktion wurde jeweils auch eine Thermogravimetrieanalyse der verschiedenen Proben als Ergänzung der Phasenanalyse durchgeführt. Es ergab sich dabei aber keine derart klare Phasencharakterisierung wie bei der XRD, da Phasen oft über einen weiten Temperaturbereich ihre Masse verlieren und die verschiedenen Phasen zum Teil stark überlappen.

Beispielhaft sei hier daher nur das Resultat unterschiedlicher Lagerungsregimes mit Zement CSA 2 aufgelistet. Deutlich sichtbar wird eine bei einer Dampfbehandlung von 100°C auftretende Phasenumwandlung, jedoch ist es bei dieser Methode schwierig zu identifizieren, welche Phasen genau gebildet werden. Eine Dampfbehandlung bei 90°C scheint mehr Ettringit auszubilden, was mit einer Erhöhung des Hydratationsgrades durch die verbesserte Nachbehandlung erklärt werden kann. Deutlich erkennbar wird auch die Reversibilität einer Trocknung bei 110°C gefolgt von einer anschliessenden Wasserlagerung. Der Ettringitanteil nach Wiedersättigung wird gegenüber der Probe nach reiner Wasserlagerung sogar noch etwas erhöht, was wiederum anhand einer gewissen Nachhydratation erklärt werden kann.

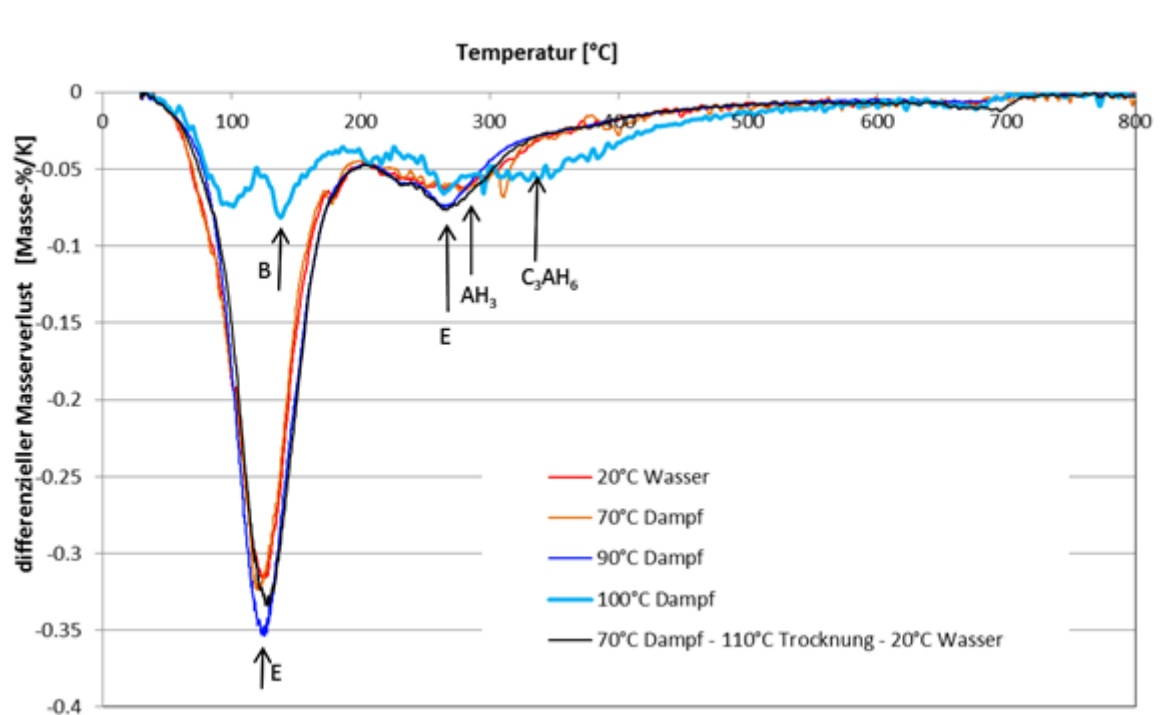


Abb. 16 Thermogravimetriedaten (TGA) der Mischung M2 (CSA 2) nach unterschiedlichen Lagerungen. (E= Ettringit, B= Bassanit)

Folgerungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit/Langzeitstabilität

In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass bei einer raschen Trocknung Ettringit generell in Meta-Ettringit umgewandelt wird und dass diese Umwandlung bei Wasserzugabe reversibel ist. Hingegen

kann bei hohen Temperaturen und dampfsatten Bedingungen und entsprechender Zementauswahl bei der Herstellung des CSA-„Betons“ Ettringit auch schon bei Temperaturen unter 100 °C in unerwünschte Phasen wie Monosulfat zerfallen. Bei dampfsatten Bedingungen und 100°C kommt es zu Katoitbildung und teilweise komplettem Ettringitzerfall. Bei Katoit- oder Monosulfatbildung wird bei Wasserzugabe bei tiefen Temperaturen erneut Ettringit als sekundärer und damit schädlicher Ettringit gebildet, was zu drastischen Expansionen führen kann.

Die Bildung dieser schädlichen Phasen lässt sich durch folgende Massnahmen verhindern:

1. Temperaturlimitierung auf Temperaturen bis maximal 90°C
2. Graduelle Vortrocknung: Erreichung eines hohen Trocknungsgrades bei Temperaturen unter 90°C. Danach sind höhere Trocknungstemperaturen auch über 100°C unkritisch.
3. Geeignete Zementauswahl und Zusammensetzung der Mischung
4. Vermeidung einer vollständigen Wiedersättigung durch Dauerlagerung unter Wasser.

Massnahmen 1 und 2 sind für sich allein gesehen schon ausreichend wirksam. Massnahmen 3 und 4 sind hingegen als Zusatzmassnahmen zu verstehen. Die Realisierung einer raschen Trocknung bei hohen Temperaturen ist angesichts grosser Speichervolumina praktisch nicht realisierbar, denn auch im Innern des Materials müssten rasch entsprechend tiefe relative Feuchten realisiert werden. Insbesondere bei grossen Elementen ist aber selbst bei tiefen Umgebungsfeuchten mit hohen Kernfeuchten im Innern zu rechnen. Dies kann nun auch als die Ursache der in Abbildung 9 wiedergegebenen drastischen Zerstörung festgehalten werden. Technisch wesentlich effizienter und einfach zu bewerkstelligen ist eine Limitierung der Trocknungstemperaturen (Massnahme 1 und 4) und allenfalls der Kontrolle der Wasserzugabe bei Wiedersättigung resp. Implementierung einer „Drainage“ zur Verhinderung eines Dauerwasserkontakts (Massnahme 4). In Versuchen an Würfeln (Kantenlänge 150 mm) hat sich beispielsweise gezeigt, dass trotz Monosulfatbildung bei der Trocknung (nach Dampflagerung 90°C, CSA 1) bei der Wiederbefeuchtung mit kurzzeitiger Wasserlagerung und anschliessender Dauerlagerung bei 90%RF/20°C keine schädlichen Deformationen auftreten.

Im Prototyp Seelisberg wurden vorsichtshalber alle vier Massnahmen realisiert. Insbesondere die Limitierung auf Trocknungstemperaturen unter 90°C stellt aber eine Einschränkung hinsichtlich der Effizienz der Ladung dar, da die involvierten Diffusionsprozesse von Wasserdampf deutlich verlangsamt ablaufen und andererseits der Ettringit sein Kristallwasser bei diesen Temperaturen nur bei sehr geringen Wasserdampfpartialdrücken abgibt im Vergleich zu einer Trocknung bei über 100°C. Zu empfehlen wäre daher eine Vortrocknung bei 60°C zur Entfernung von allfällig vorhandenem Kapillarwasser und einer Endtrocknung bei > 100°C. In der Vortrocknungsperiode muss darauf geachtet werden, dass auch die Kernfeuchte ausreichend gesenkt wird. Bei fehlendem Kapillarwasser sind die Voraussetzungen zur unerwünschten Ettringitumwandlung nicht gegeben, da die Abwesenheit von ausreichend Wasser eine Auflösung des Ettringits verhindert und die Ausfällung von Monosulfat entfällt. Daher ergäbe sich auch eine weitere Option.

Mit der Massnahme 4 (Limitierung des Sättigungsgrades des Speichermaterials (auf max. 90%RF) würden die Kapillarporen stets leer (trocken) bleiben um die chemische Auflösung von Ettringit generell zu verhindern. Dies wäre aber nur realisierbar, wenn die Entladung mittels Dampf erfolgen würde,



was einer Sorptionsvariante entspräche und generell als die stabilste Variante angesehen werden kann.

2.5 Speichermaterial für die Pilotanlage Seelisberg

Für den Prototypenbau in Seelisberg musste nun eine Materialauswahl getroffen werden. Dabei wurden verschiedene Aspekte wie Speicherdichte, Stabilität, chemische Dauerhaftigkeit und Verfügbarkeit der Zemente berücksichtigt. Hinsichtlich Speicherdichte wurde auf die Anwendung ternärer Mischungen (CSA-Zement, Portlandzement und Gips) aus Stabilitätsgründen (Herstellung) verzichtet. Die Verfügbarkeit verschiedener CSA-Zemente ist zwar gegeben, jedoch wurde hinsichtlich Qualitätskontrolle und Transportwege auf ein europäisches Produkt (Italcementi) zurückgegriffen, welches auch hinsichtlich chemischer Dauerhaftigkeit besser geeignet erschien. Der Mischung wurden zusätzlich Glasfasern (Schnittlänge 6 mm) zur Verstärkung des Mikrogefüges und zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit (geringere Entmischung) sowie makrosynthetische Kunststofffasern (BruggContec) zur allfälligen Überbrückung von Rissen beigemischt. Die verwendete Mischzusammensetzung ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6 Mischungszusammensetzung des verwendeten Speichermaterials.

	Mischung M (kg/m ³)
Zement	774
Gips	231
Wasser	603
Glasfasern	12.06
Makrosynth. Fasern	4.55
w/b	0.60

Wie man erkennt, handelt es sich eigentlich um eine Zementpaste ohne Gesteinskörnung. Sie entspricht annähernd der Mischung „Ita-2“ aus Tabelle 1. Da Kies oder Sand keinerlei Latentspeicherpotenzial aufweisen, sondern allenfalls nur sensibel (kapazitativ) Wärme speichern können, würde durch ihre Verwendung die Speicherdichte reduziert. Es müssen weitgehend pulverförmige Ausgangsstoffe mit Wasser gemischt werden, weshalb auch der Mischprozess angepasst wurde um Verklumpung zu verhindern. Es wurde zunächst Wasser in den Betonmischer dosiert und dann CSA-Zement, Gips und schliesslich die Fasern zugegeben. Die makrosynthetischen Fasern wurden in Bündeln umwickelt mit einer wasserlöslichen Folie beigegeben. Die Glasfaserdosierung erscheint im Nachhinein zwar eher etwas hoch, hatte durch den entsprechenden Scherkrafteintrag einen positiven Einfluss auf die Mischeigenschaften.

Der erhärtete Beton hatte eine Druckfestigkeit von 30.8 MPa nach 28 d, was in der gleichen Grössenordnung wie für einen herkömmlichen Beton liegt. Der Bruch bei der Druckprüfung erfolgte dabei äusserst duktil mit sehr wenigen Abplatzungen wie Abbildung 17 zeigt.



Abb. 17 Betonwürfel (Kantenlänge 150 mm) nach der Druckfestigkeitsprüfung.

In Tabelle 7 sind die mit dieser Mischung erreichten, im Wärmeflusskalorimeter ermittelten Speicherwärmemengen und die anhand von Trocknungsversuchen (Umluftofen) ermittelten Wassergehalte gezeigt.

Tabelle 7 Speicherdichten bei Wiedersättigung mit Wasser resp. Dampf.

Temperatur Konditionierung ^{*)}	rel. Feuchte Konditionierung ^{*)}	Wassergehalt bez. Trockengewicht 100°C	Speicherdichte ^{**)}	theoret. Sorptions- speicherdichte ^{***)}
[°C]	[%]	[kg/m ³]	[kWh/m ³]	[kWh/m ³]
20	100	418	0	325
50	12.5	217	6	193
60	8	55	22	75
70	5.5	48	45	47
80	3.5	31	49	32
100	0	0	62	0

^{*)} Konditionierung im Umluftofen ausgehend von einer Umgebungsfeuchte von 60%RF bei 20°C

^{**)} Wärmemenge die bei Austrocknung bis zur angegebenen Temperatur (Konditionierung) und nachfolgender Wiedersättigung mit flüssigem Wasser wieder freigesetzt wird.

^{***)} Wärmemenge (inklusive Kondensationswärme) die nach einer vollständigen Trocknung bei 100°C und einer nachfolgenden Teilwiedersättigung mit einer dem Wassergehalt bez. Trockengewicht (100°C) entsprechenden Menge an Wasserdampf, wieder frei wird.



Höhere Speicherdichten können sicherlich erreicht werden. Dies bedingt jedoch eine Materialtechnologische Optimierung, welche den Umfang des vorliegenden Projekts gesprengt hätte. Mögliche Ansätze hierzu sind ternäre Mischungen. Dabei könnten selbst bei der Produktion wenig stabile Mischungen interessant werden, indem deren Bruchstücke als eine Art Gesteinskörnung verwendet würden. Auch reiner Ettringit, welcher leicht in Suspension hergestellt werden kann, könnte als eine Art Sandfraktion verwendet werden, das slurry-Wasser würde dementsprechend als Anmachwasser dienen. Aber selbst binäre Mischungen, so wie sie im Rahmen dieses Projekts verwendet wurden, könnten weiter optimiert werden indem beispielsweise mit geringeren Wasser/Zementwerten gearbeitet würde, welche zu dichteren Zementsteinen mit geringerer Kapillarporosität führen dürften.

3. Planung und Berechnungen

3.1 Grundsätzliche Überlegungen

Ein Wärmespeicher besteht generell aus folgenden Elementen a) Speichermaterial b) Elemente zur Wärmeübertragung c) Wärmedämmung. Im Falle des Speichermaterials Ettringit-Beton basiert das Speicherprinzip auf einem Feuchteaustausch, was zusätzliche Elemente für d) Transport der Feuchtigkeit (in der Luft) e) Entfeuchtung f) Befeuchtung und g) Feuchteabdichtung beinhaltet.

Das Speichermaterial Ettringitbeton ist ein Feststoff, welcher seine Form während des Speicherprozesses weitgehend beibehält und keine physikalische Phasenumwandlung erfährt. Der frische Beton kann in jede fast beliebige Form gegossen werden und erhärtet danach. Das Schwindmass ist mit -1.4 mm/m bei einer Trocknung bei 50°C resp. -2 mm/m bei einer Trocknung bei 110°C im Umluftofen relativ (angesichts der Dehydrierung der Hauptphase) gering. Eine Rissbildung bei der Trocknung grösserer Elemente kann allerdings nicht ausgeschlossen werden. Solche Risse sollten durch die Makro-Fasern überbrückt werden, so dass eine ausreichende residuelle Festigkeit vorhanden bleibt.

Prinzipiell wäre es möglich, einen Grossspeicher aus Ettringitbeton direkt vor Ort zu betonieren. Der verwendete Beton wurde bisher aber noch nie in einem Betonwerk oder Transportbetonmischer in grosser Menge (m^3) hergestellt und hätte daher in Kleinmengenmischern vor Ort hergestellt werden müssen. Dies hätte einen hohen Arbeitsaufwand und eine Dauerbelegung durch Betonmischer vor Ort bedeutet. Beim Abbinden des Spezialbetons wird eine erhebliche Hydratationswärmemenge (max. 115 kWh/m^3) frei, welche nur teilweise durch Erwärmung aufgenommen werden kann. Daher hätten zudem maximal ca. 55 kWh/m^3 an Wärme abgeführt werden müssen, um eine thermische Überbelastung beim Bau zu vermeiden. Allenfalls wäre eine Etappierung der Betonierarbeiten vorzusehen. Zu beachten ist, dass der Bau eines monolithischen Blocks der Notwendigkeit eines effizienten Feuchteaustauschs nicht entgegenkommt. Der Schritt Betonherstellung im Betonwerk (oder im Transportbetonmischer) und Einbau vor Ort, inklusive entsprechendem Schalungsbau, wurde daher zunächst verworfen, könnte aber eine der möglichen Bauvarianten der Zukunft bleiben.

Auch die Option der Verwendung von Ettringitbetongranulat ist nicht ideal. Einerseits sinkt dabei die Speicherdichte durch die bei einer Schüttung entstehenden Hohlräume deutlich, andererseits ist bei einem Speichertyp „Wasserzugabe“ die Entladung durch Bewässerung nicht ohne Füllung der Hohlräume zu bewerkstelligen. Anders bei einem Sorptionstyp, wo die Feuchtezugabe via zirkulierender Luft erfolgt, jedoch ist die Luftzirkulation durch ein Granulat im Vergleich zu klar definierten Transportwegen in massiven mit entsprechenden Aussparungen versehenen vorstrukturierten Elemente deutlich reduziert. Granulat müsste zudem in einem strukturstabilen Behälter (Container) geschüttet werden können und durch Abrieb oder Alterung könnten sich mit der Zeit Feinstaubansammlungen an unerwünschten Stellen bilden.

Das Material Ettringit-Beton eignet sich aber besonders gut für eine modulare Bauweise: Das Speichermaterial kann in einzelne kleinere und leichtere Blöcke unterteilt werden, welche dann einfach aufeinander gestapelt werden können. Die Tragkraft des Betons ist dafür weit mehr als ausreichend.

Die Verwendung vorstrukturierter Module hat hinsichtlich Speicherdichte und Kanalisierung von Transportwegen deutliche Vorteile. Des Weiteren sind eine Vorfabrikation in einem Fertigteilwerk und eine einfache Bauweise durch Aufstapelung, bei kleineren Modulen evtl. sogar analog einem Back-



steinmauerbau unter Verwendung eines ettringithaltigen Mörtels, möglich. Auch hinsichtlich eines allfälligen Um- oder Rückbaus hat eine modulare Bauweise deutliche Vorteile. Der geplante Speicher von 6 m^3 Inhalt soll schliesslich die Dimensionen von ca. Länge 3 m, Breite 1 m mit Höhe 2 m annehmen. Ein gedrungener Körper wäre sinnvoller, aufgrund der Platzierung des Speichers in einer Raumecke (Garagennutzung) aber nicht realisierbar. Der Prototyp in Seelisberg wurde in einer Garage errichtet, wo die Zugänglichkeit gut war. Dies ermöglichte die Verwendung grösserer Modulblöcke, welche mit Stapler platziert werden konnten. Der Speicherkern wurde schliesslich aus 24 in drei Reihen zu 8 Lagen aufgeschichteten Betonblöcken mit den Dimensionen $1 \times 1 \times 0.25 \text{ m}^3$ (ca. $1/4 \text{ m}^3$ Volumen) errichtet.

Als wesentliches Element eines Wärmespeichers sind die Komponenten zum Austausch der zu speichernden Wärme mit dem Speichermedium, zur Erwärmung des Speichermaterials und zur Auskopplung der Wärme bei der Wärmerückgewinnung zu errichten. Im vorliegenden Fall ergeben sich prinzipiell zwei Möglichkeiten der Wärmeübertragung: Einerseits kann die Wärme via die zirkulierende Luft übertragen werden, andererseits bietet sich dank der guten Wärmeleitfähigkeitseigenschaften des Speichermaterials die Wärmeübertragung durch im Beton eingebettete Rohrsysteme mit Fluidzirkulation an. Für die erstere Variante spräche eine durch den Verzicht auf ein Röhrensystem einfachere Bauweise, doch ergeben sich auch entscheidende Nachteile. Der zirkulierenden Luft müsste die Wärme (Ladephase) zuerst zugeführt resp. bei der Entladung entnommen werden. Dabei ist bei der Ladung des Speichers neben der reinen Erwärmung des Speichermaterials zusätzlich auch die Verdampfungswärme des Wassers (Trocknung) einzuspeisen. Durch eine äussere Zufuhr von Wärme wäre auch die Diffusion des Wasserdampfes aus dem Betoninnern deutlich verlangsamt. Insbesondere bei einem noch feuchten Speicherbeton würde infolge der oberflächlichen Verdunstung das Betoninnere sogar gekühlt (Verdampfungswärme). Es müsste folglich eine deutlich grössere Verdunstungsoberfläche als bei einer Variante mit Rohrsystemen zur Verfügung gestellt werden. All dies erfordert angesichts der geringen Wärmekapazität der Luft und geringen Temperaturdifferenzen (über das gesamte Speichervolumen von 6 m^3) sehr grosse Luftstromvolumen um einen ausreichenden Wärmeeintrag zu gewährleisten. Die zu wärmende Luft müsste gleichzeitig unter möglichst geringem Wärmeverlust entfeuchtet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Restluftfeuchten möglichst klein zu wählen sind. Die mit der Entfeuchtung zusammenhängenden Probleme wären bei Temperaturen über 100°C deutlich gemindert, dafür ergäben sich dann bei diesen Trocknungstemperaturen Probleme hinsichtlich chemischer Dauerhaftigkeit (siehe Kapitel 2.4). Eine erste Stufe des Trocknungsprozesses müsste zwingend bei tieferen Temperaturen erfolgen.

Im Prototyp Seelisberg wurde entsprechend eine Variante gewählt, bei der die Wärmetauschung über ein im Speichermaterial verlegtes Röhrensystem erfolgt. Dies erlaubt grundsätzlich einen direkten Zugriff auf die Wärmequelle Kollektor ohne die Installation zusätzlicher Wärmetauscher. Da der Speicher modular in Betonelemente unterteilt aufgebaut werden soll, müssen die in den einzelnen Elementen verlegten Rohrsysteme ebenfalls modulfähig geplant werden. Die einzelnen Betonmodule ($1 \times 1 \times 0.25 \text{ m}^3$) werden daher mit mittig eingegossenen Kupferrohren bestückt. Der Zusammenschluss der Rohrsysteme der einzelnen Module erfolgt beim Bau vor Ort durch entsprechende Schraubfittings.

Trotz der latenten Speicherung muss eine Wärmedämmung vorgesehen werden. Grund dafür sind, anders als bei einer sensiblen Wärmespeicherung, in erster die benötigten hohen Temperaturen bei der Speicherladung. Die Wärmedämmung verringert Wärmeverluste bei der Ladung an die Umgebung und verhindert deren starke Aufheizung. Nichtsdestotrotz kann bei ausreichender Wärmedämmung auch das sensible Potential des Ettringitbetons erschlossen werden: Die hohen Ladetemperaturen können in der Übergangszeit (Herbst) konserviert und genutzt werden.

Die Entfeuchtung des Speichermaterials erfordert einen aktiven Luftaustausch. Idealerweise wird die zirkulierende Luft gleichmässig über die Betonoberflächen geleitet, kann mit Feuchtigkeit gesättigt werden und diese abführen. Die Luft sollte dazu zunächst möglichst trocken sein. Sie muss also bei Zirkulation beispielsweise in einem Kondensator entfeuchtet werden oder aber durch Luftaustausch mit der Umgebung ersetzt werden. Die reine Zirkulation mit Entfeuchtung der Luft hat dabei den Vorteil, dass keine für den Beton möglicherweise schädlichen Stoffe wie beispielsweise CO_2 (Carbonatisierung) ausgetauscht werden, andererseits das Kondensat gesammelt und so der Ladezustand des Speichers direkt ermittelt werden kann. Ein Austausch der Luft bedingt eine Rückgewinnung der Wärme und kann beispielsweise in einem Gegenstromtauscher erfolgen. Heisse Fortluft wird durch kalte Frischluft mit einem entsprechend tieferen Wassergehalt, welche im Tauscher erwärmt wird, ersetzt. Beide Möglichkeiten der Luftentfeuchtung wurden im Verlaufe des Projekts erprobt.

Ein auf dem Speichermaterial Ettringitbeton basierender Speicher kann prinzipiell in zwei Arten unterteilt werden (A) Wassertyp resp. (B) Sorptionstyp. Der wesentliche Unterschied der beiden Typen besteht in der Art der Wasserzugabe bei der Entladung des Speichers. Im Fall des Wassertyps (A) wird der trockene (Meta-)Ettringitbeton zur Freisetzung der Wärme mit flüssigem Wasser benetzt. Dies kann prinzipiell bei jeder beliebigen Temperatur (unter 100°C) erfolgen, da Meta-Ettringit selbst bei hohen Temperaturen bei ausreichendem Wasserangebot ausreichend Kristallwasser einlagern kann und es so zur Neubildung von Ettringit kommt (siehe auch Kapitel 2.4 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit). Da das Wasser kapillar und somit relativ schnell auch ins Betoninnere transportiert werden kann, sind wenig besondere Massnahmen betreffend der Zugänglichkeit der Feuchte zu treffen, allerdings dürfen auch hier die kapillaren Transportwege nicht zu lang sein, um eine ausreichend rasche Wärmefreisetzung zu ermöglichen. Wichtig ist eine durchgehende gleichmässige Bewässerung des gesamten Speichers. Dies könnte beispielsweise durch Flutung eines wasserdichten Behälters, in welchem sich das Speichermaterial befindet, erfolgen.

Im Fall (B) Sorptionstyp wird dem (Meta-)Ettringit bei der Wärmerückgewinnung Wasser in Form von Wasserdampf zugeführt. Bei tiefen Temperaturen genügen schon relativ geringe Wasserpartialdrücke um Meta-Ettringit wieder zu „hydratisieren“. Neben der Latentspeicherung infolge des Kristallwasserentzugs des Materials lässt sich auch in diesem Typ die Verdampfungsenthalpie des Wasserdampfs durch Kondensation nutzbar machen. Prinzipiell lassen sich so deutlich höhere Speicherdichten realisieren (siehe Tabelle 7). Das Speichermaterial Ettringitbeton weist aber einen hohen Anteil an Kapillarwasser auf. Es müssen entsprechend grosse Wassermengen verdampft werden (gilt auch bei Typ (A)) und dann bei der Entladung aber wieder in Form von Wasserdampf zur Verfügung stehen.

Die Bereitstellung ausreichender Wasserdampfmengen stellt aber ein kaum lösbares Problem dar (siehe auch Kapitel Diskussion). Da das Porensystem des Betons sehr feinporig ist, kann dieser Dampf durch Kelvinkondensation selbst bei „moderaten“ Luftfeuchten dem System zugeführt werden, jedoch ist der Temperaturhub nur im Falle des rückgeführten Kristallwassers (geringe Luftfeuchten,



Vorkonditionierung $> 60^{\circ}\text{C}$) hoch. Der Transport von Feuchtigkeit ins Betoninnere erfolgt jedoch deutlich langsamer als bei Typ (A). Dadurch werden spezielle Massnahmen zur Erhöhung der Speicher-materialoberfläche absolut notwendig. Beispielsweise sind durchgehende Löcher oder strukturierte Oberflächen vorteilhaft. Da Betonelemente leicht fast jede Form annehmen können stellt Beton unter diesem Aspekt ein ausgezeichnetes Ausgangsmaterial dar. Der apparative Aufwand einer Sorptions-Variante ist jedoch grösser, und die ganze Lüftungstechnik (Wasserdampfquelle) müsste mit einbezogen werden, was einen zu grossen Eingriff bedeutet hätte. Da das Einfamilienhaus in Seelisberg zudem nicht durchgängig genutzt wird, steht kaum Wasserdampf aus der normalen Nutzung zur Verfügung. Bei den tiefen Wintertemperaturen ist der Wassergehalt der Umgebungsluft viel zu niedrig um als Dampfquelle nutzbar gemacht zu werden.

Aus diesen Gründen wurde für das Pilotprojekt in Seelisberg eine Variante mit Wasserzugabe geplant. Wichtig ist dabei die Einsicht, dass wesentliche Elemente, die beispielsweise die Ladephase und den Bau betreffen und für beide Speichtypen relevant sind, getestet werden.

Aufgrund der auf Entwässerung/Bewässerung basierten Wärmespeicherung muss das Speichermaterial gegen die Umgebung hinsichtlich Feuchteaufnahme abgedichtet werden. Soll das Speichermaterial sogar mit Wasser geflutet werden können, sind die Ansprüche hinsichtlich dieser Abdichtung noch weit höher und es wäre ein strukturstabiler Container erforderlich, in welchem das Speichermaterial platziert wird. Für das Projekt Seelisberg konnte aber eine auf geeigneter Ausbildung der Speicher-module basierende Lösung gefunden werden, welche prinzipiell nur die Verwendung einer luftdichten Hülle erfordert.

3.2 Einfache Laborprototypen

Im Labor wurden zunächst zwei kleinere Prototypen realisiert, die hier kurz beschrieben sind. Prototyp A) (Abb. 18 links) bestand aus sechs nebeneinander angeordneten, rundherum thermisch gedämmten, Platten ($40 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$), welche zur besseren Zugänglichkeit der Feuchtigkeit an ihrer Oberfläche jeweils rillenförmige Vertiefungen aufwiesen. Die einzelnen Platten wurden vorgängig im Ofen bei 110°C getrocknet. Die Entladung erfolgte mit flüssigem Wasser. Beim Entladeversuch stieg die Temperatur innert weniger Minuten auf über 80°C an. Prototyp B) (Abb. 18 rechts) bestand aus einem zwei Meter langen Speicher mit 10 Zentimeter Seitenlänge, welcher zur Erhöhung der Oberfläche längsseitige Rillen und Einschnitte aufwies. Die Luft konnte frontseitig mittels eines Ventilators eingeblasen werden und den Speicher durchströmen. Das Speichermaterial wurde vorgängig ebenfalls im Ofen bei 110°C getrocknet und dann in einem Klimaraum ($20^{\circ}\text{C}/90\%\text{r.F.}$), seitlich rundum thermisch gedämmt, aufgestellt. Schliesslich wurde aus dem Klimaraum stammende Luft mit ca. 2 m/s durch den Speicher geblasen. Die Temperatur der nach dem Speicherdurchgang ausströmenden Luft erhöhte sich in kurzer Zeit um maximal 14°C .

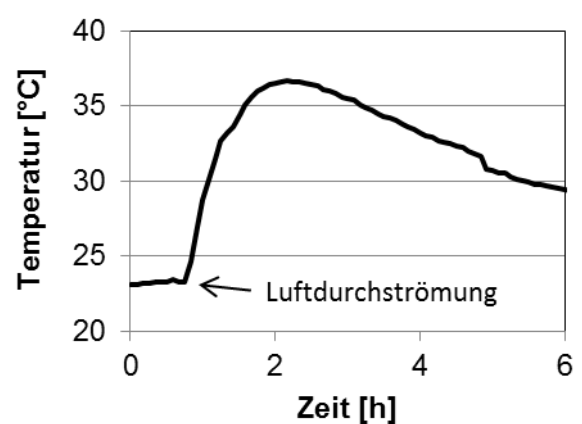
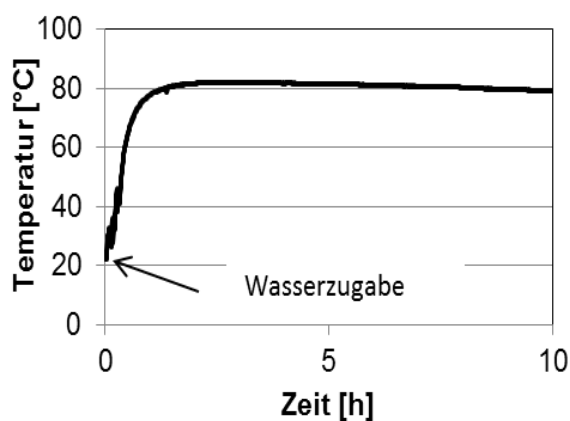
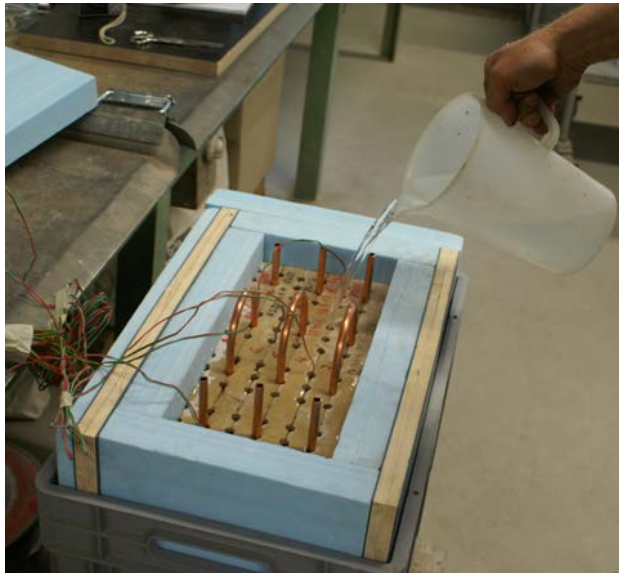


Abb. 18 Einfache Laborprototypen A) Entladung mit flüssigen Wasser (links) und B) Sorptionsspeicher (rechts) und Entladung mittels Luftdurchströmung (Ventilator) im Klimaraum 20°C/90%r.F.

3.3 Aufbau Pilotanlage Seelisberg

Prinzipieller Aufbau

Der Speicher wurde im Elementbau hergestellt, das heisst der Speicherbeton wurde nicht vor Ort als Ganzes gegossen, sondern aus vorfabrizierten kleineren Fertigteilen (ca. $\frac{1}{4} \text{ m}^3$ Volumen) zusammengestellt. Dies ist vor allem in Hinblick auf eine allfällige spätere Umsetzung interessant. Nach ausgiebiger Diskussion verschiedener Möglichkeiten gelangte folgende Variante zur Ausführung:

Der realisierte Prototyp eines Ettringitbetonspeichers besteht vereinfacht aus folgenden Elementen: A) Betonelemente mit Heizschlaufen B) Innenhülle C) Wärmedämmung D) Luftzirkulationskreislauf E) Solarkreislauf F) Entfeuchtung G) Wasserdusche, siehe Abbildung 19.



In die Betonmodule ist eine Heizschleife, in welcher das Heizfluid zirkuliert (Solarkreislauf), eingebaut. Die einzelnen Heizschleifen der Module werden später in Serie miteinander verbunden. Die Innenhülle wurde im unteren Teil wasserdicht und stabil gebaut (Prototyp), da zunächst zwecks Entladung (Wiedersättigung des Speichermaterials) sogar eine komplette Flutung des Speichers mit Wasser via eine Dusche (G) möglich sein sollte. Der Speicherdeckel wurde jedoch nur luftdicht gebaut. Als zusätzliche Anforderung wurde der Speicher generell temperaturbeständig ($>110\text{ }^{\circ}\text{C}$) gebaut. Die Entwässerung von Ettringit beginnt zwar schon bei $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, in Anbetracht der grossen Volumina und relativ langen Diffusionswegen sollte ein Ettringitbetonspeicher bei möglichst hohen Temperaturen, möglichst über 100°C geladen werden, dies vor allem um die Ladedauer im Sommer zu reduzieren. Für hohe Temperaturen sprechen auch Literaturquellen [5], welche nahelegen, dass Ettringit bei Temperaturen knapp über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sein Kristallwasser schon bei hohen Wasserpartialdrücken von 533 mbar fast vollständig abgibt. Auch eigene thermodynamische Modellierungen (GEMS) und (temperaturabhängige) Speicherdichtenmessungen zeigen, dass Ettringit bei $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ instabil wird und sein Kristallwasser abgibt. Die entsprechend ebenfalls hitzebeständige Wärmedämmung dient der kurzfristigen Dämmung, damit sich das Gebäude, in welchem der Speicher gebaut wird (Garage) nicht zu stark erwärmt. Andererseits sollen Wärmeverluste im Entladungsfall minimiert werden.

Aufgrund der Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Ettringit in feuchtheisser Umgebung (Kapitel 2.4) wurde entschieden, die maximale Trocknungstemperatur zu beschränken. Dies konnte technisch am Einfachsten gelöst werden, indem der Solarkreis (Heizkreis) nicht direkt mit der Kollektor verbunden wurde, sondern als Wärmequelle ein bestehender grosser Wasserwärmespeicher (9 m^3), welcher durch die Kollektoranlage gespeist wird, genutzt wurde. Die maximale Wasserspeichertemperatur ist auf 90°C limitiert. Das zirkulierende Heizfluid ist somit Wasser, welches dem Wassertank entnommen, durch die Heizschleifen des Ettringitspeichers geleitet und dem Wasserspeicher dann wieder zugeführt wird. Durch diese Variante konnte zwar nicht das gesamte Potenzial der Kollektoranlage hinsichtlich hoher Trocknungstemperaturen genutzt werden, hatte aber den Vorteil, dass die Regelung der Kollektoranlage vollständig von der Steuerung des nachträglich installierten Ettringitspeicherprototypen entkoppelt werden konnte.

Im Rahmen der Pilotanlage soll der Speicher im Winter relativ rasch entladen und die Wärme via Solarkreis (Heizkreis) in den Warmwasserspeicher übertragen werden. Diese passive Entladung kann daher nur bei hohen Entladetemperaturen im Ettringitspeicher erfolgen und ist daher nicht ideal. Besser wäre es, das ganze Hausheizsystem mit einzubeziehen um bei tieferen Entladetemperaturen (typische Heizvorlauftemperaturen) entladen zu können.

Im Luftkreislauf wird Luft als Transportmedium zum Abtransport von Feuchtigkeit beim Ladevorgang (Sommer) durch den Speicher geblasen. Die eingeblasene, trockene Luft wird beim Durchgang durch den Speicher mit Wasserdampf gesättigt. Idealerweise wäre der Luftstrom geschlossen, dies auch um eine Carbonatisierung des Ettringitbetons (CO_2 -Aufnahme) zu verhindern und keinerlei Stoffe nach aussen zu transportieren. Aber auch ein Luftaustausch ist möglich, da keinerlei gesundheitsgefährdende Stoffe vorhanden sind und andererseits eine Carbonatisierung, da der Beton je nach Situation zu nass (Entladung) oder zu trocken (geladener Zustand) für die Carbonatisierung ist, selbst bei Frischluftzufuhr gebremst verlaufen,. Zudem wirkt in der Ladephase, wenn allenfalls feuchtheisse

bessere Carbonatisierungsbedingungen vorhanden wären, ein Wasserdampftransport aus dem Betoninnern an die Oberfläche einem Eindringen von CO_2 entgegen. Schliesslich muss die feuchtheisse Luft wieder regeneriert (entfeuchtet) werden. Da der Ladezustand des Speichers über den Wassergehalt ermittelt werden kann, wurde zunächst eine Variante mit Kondensation der Feuchtigkeit in einem Kondensator realisiert.

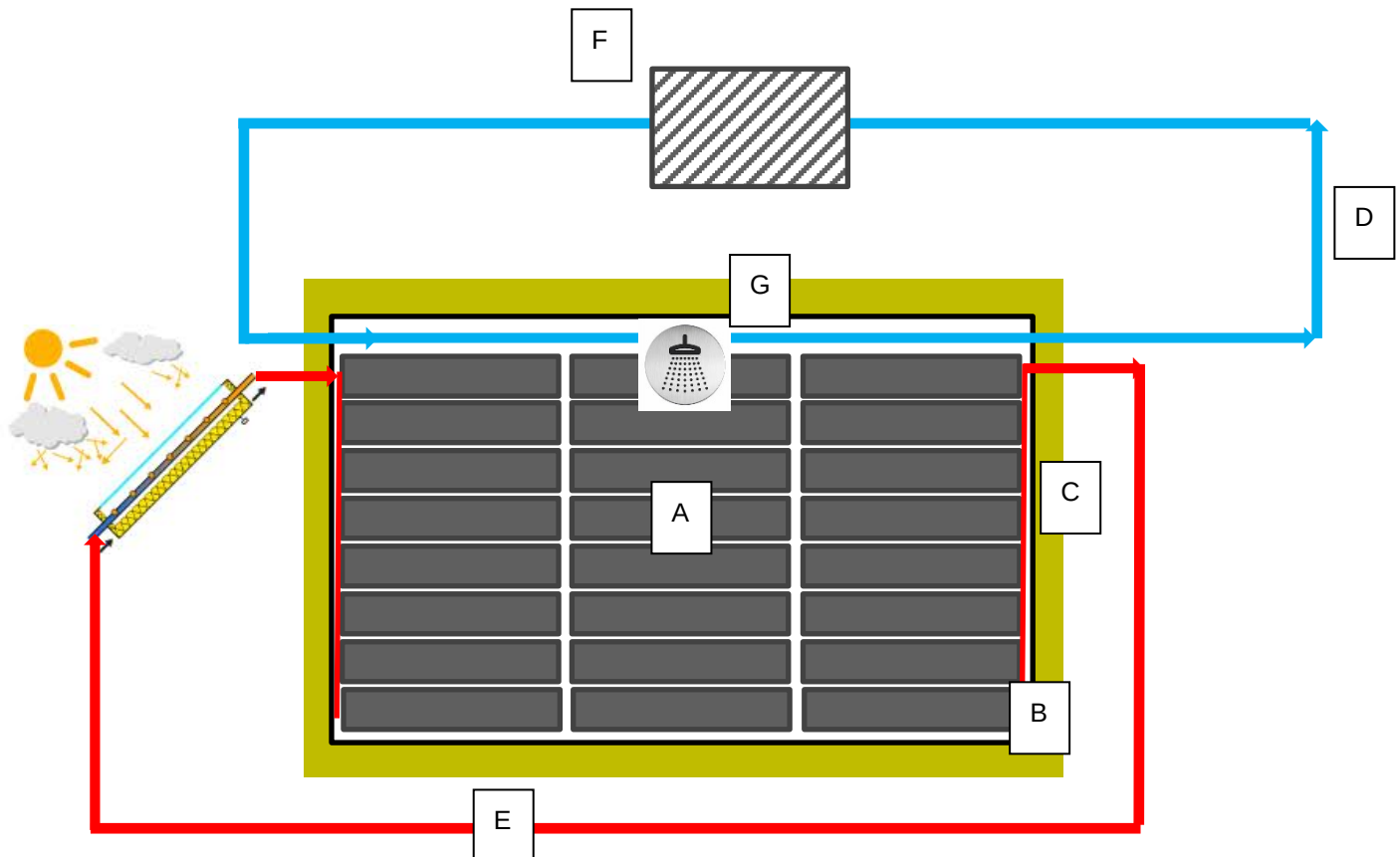


Abb. 19 Prinzipschema Ettringitspeicherprototyp: A Betonelemente B wasserdichte Innenhülle C Wärmedämmung D Luftkreis E Heizkreis (Solarkreis) F Entfeuchtung (Kondensation oder Luftaustausch) G Bewässerung

Das Kondensat kann dadurch gesammelt bzw. gemessen und auf den Ladezustand des Speichers rückgeschlossen werden. Aufgrund der Ergebnisse in der ersten Ladeperiode wurde im zweiten Projektjahr der Speicher aber umgebaut und die Entfeuchtung der Luft erfolgte durch einen Luftaustausch. Die abgeführte Wassermenge wurde nun anhand von Messdaten zu Luftfeuchten und Temperaturen, sowie Luftstromvolumen errechnet.

Prinzipiell besteht ein grosser Bedarf zur Rückgewinnung der bei der Entwässerung des Speichermaterials aufgewendeten Verdunstungswärme. Wird diese nicht durch Kondensation des abgeführten Wasserdampfes wieder einem Verbraucher (z.B. Brauchwasseraufbereitung, Sauna, Schwimmbadheizung etc.) oder dem Speicher selbst (Nutzung zur Vorwärmung Vorlauf oder Wärmetauschung Luft) zugeführt, geht sie verloren. Entsprechend grösser muss dann der Kollektor (oder PV-Anlage mit Einsatz Wärmepumpe, siehe Kapitel Ausblick) ausgelegt werden. Andererseits kann argumentiert

werden, dass im Sommer (insbesondere bei grossen Kollektoranlagen) schon ausreichend Überschüsse vorhanden sind, die sonst nicht genutzt werden könnten. Die Nutzung der solaren Überschüsse löst insbesondere auch allfällige Überhitzungsprobleme von Kollektoranlagen im Sommer. In einer derartigen Diskussion ist entsprechend die kostenbeeinflusste Relation Speichergrösse zu Solaranlage entscheidend. Zur Rückgewinnung der Verdampfungswärme müssen Kondensationsbedingungen geschaffen werden. Dies ist bei hohen Temperaturen und Wasserdampfgehalten in einer ersten Ladephase beispielsweise in einem Luft/Luft-Kreuzwärmetauscher oder Gegenstromtauscher relativ einfach zu realisieren. Bei zunehmend tieferen Luftfeuchten wird es aber schwieriger, geeignete Bedingungen für eine Kondensation zu schaffen, andererseits wird bei zunehmend trockenerem Speicher das Verhältnis Verdampfungsenergie zu latenter Ladeenergie (Kristallwasser) vorteilhafter (Tabelle 7).

Betonmodule mit integriertem Wärmetauscher

Aus praktischen Gründen, da in der Abt. Beton/Bauchemie ein 300 l Betonmischer, die notwendige Flexibilität und das entsprechende Know-how im Umgang mit neuen Materialien vorhanden sind, wurden 24 vorgefabrizierte Betonmodule an der Empa hergestellt.

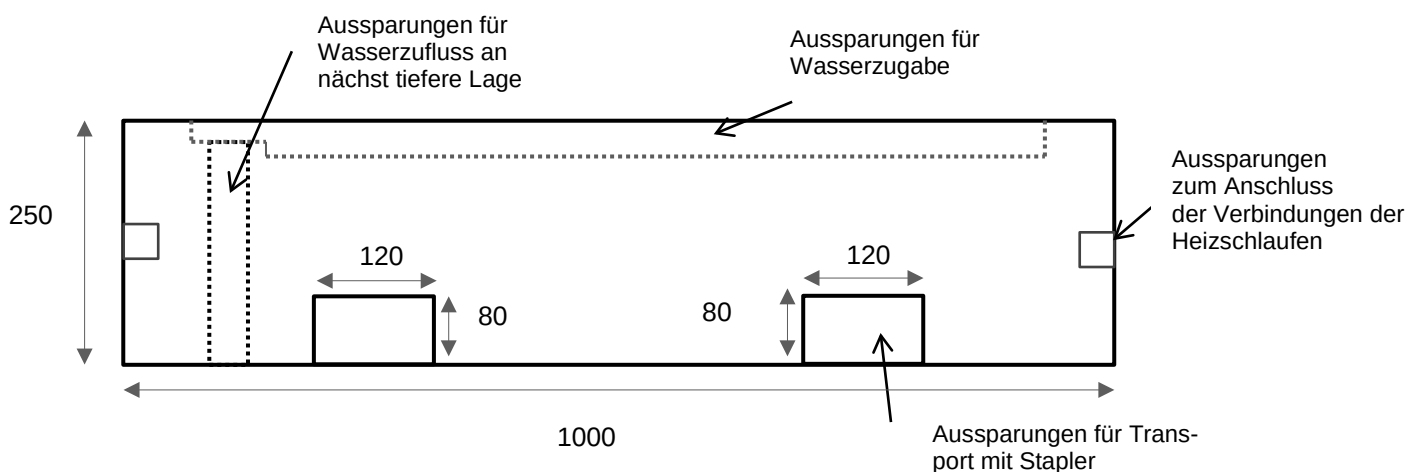


Abb. 20 Vorgefabriziertes Betonelement (Ansicht von vorne) mit diversen Aussparungen (1 m (Breite=Länge) x 0.25 m (Höhe)).

Um Transport und Stapelung zu vereinfachen wurden sie unter Ausnutzung der Mischkapazität in der Dimension 1 (Länge) x 1 (Breite) x 0.25 (Höhe) m³ geplant. Dies ergibt beim realisierten Speicher (6 m³) einen Aufbau dieser Elemente in 3 Reihen à je 8 Lagen. Bei der Dimensionierung der Heizschlaufen (Wärmetauscher Speicher) müssen im Wesentlichen zwei Aspekte berücksichtigt werden: a) Wärmeübertragungsrate b) Druckabfall.

Betreffend a) sollte die Tauscherfläche eher überdimensioniert werden, um den Wärmeaustausch von/zum Betonspeicher möglichst effizient zu gestalten. Prinzipiell ist eine Überdimensionierung nicht schädlich, bestenfalls muss eine Temperaturbegrenzung bei der Solarfluidzirkulation mit eingeplant werden, um eine Überhitzung des Speichers mit erhöhten Dampfdrücken zu verhindern. Da die Ladewärme dem Wasserspeichertank mit maximal 90°C entnommen wird, waren derartige Massnahmen

nicht nötig. Hinsichtlich b) sollte der Druckabfall sich in „vernünftigem Rahmen von max. 200-300 mbar bewegen. Bei der Dimensionierung sind weiter die Randbedingungen des Heizkreiskreislaufs zu beachten. Dies betrifft insbesondere die Zirkulationsgeschwindigkeit des Tauscherfluids. Da ursprünglich geplant war, den Kollektorkreislauf direkt an den Heizkreis anzukoppeln, wurde bei der Bemessung von einer typischen Solarfluidgeschwindigkeit von 0.4 – 0.7 m/s in einem Solarkreisrohr mit Aussendurchmesser 18 mm ausgegangen. Der Grund für diese Geschwindigkeiten liegt in der Verhinderung von Luftansammlungen im Solarrohrsystem. Zu beachten ist, dass sich die Geschwindigkeit in den Heizschlaufen je nach Art der Verbindung der Module ändert. Die Module können seriell (in Serie, also alle nacheinander gekoppelt) oder parallel (beispielsweise nur jeweils die Module der gleichen Lage werden miteinander verbunden) angeschlossen werden. Im Prototyp Seelisberg wurde zunächst von einer parallelen Verknüpfung, jeweils nur die drei Elemente einer Lage in Serie geschaltet (Lagen parallel), zwecks gleichmässiger Ladetemperaturen ausgegangen und sind in untenstehenden Berechnungen (beeinflusst nur Berechnung Druckabfall) so berücksichtigt. Letztlich wurde im Prototyp Seelisberg aber eine serielle Verknüpfung realisiert. Neben der einfacheren Bauweise konnte damit überprüft werden, ob sich allenfalls der Rücklauf des Heizkreises zur Wärmetauschung mit dem Vorlauf für die Kollektoranlage oder in einer Anfangsphase der Ladeperiode allenfalls gar als Kühlmedium für einem Kondensator eignen könnte. Die später effektiv gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen Vorlauf und Rücklauf der Ettringitspeicher waren aber selbst bei serieller Ankoppelung der Module gering.

Bei einer Verteilung auf acht (Lagenanzahl) gleich dimensionierte Rohre verringert sich die Geschwindigkeit entsprechend um einen Faktor 8. Da die Heizschlaufen in den Modulen horizontal liegen, dürfte eine Luftansammlung aber selbst bei diesen reduzierten Geschwindigkeiten nicht zu Problemen führen. Die Berechnung der benötigten Tauscherfläche ist nicht exakt möglich, da es sich nicht um stationäre Zustände handelt (feuchteabhängige Materialeigenschaften, dynamische Temperaturverhältnisse sowohl Speicher- als auch Kollektorseitig, zeitlich/örtlich variable Dampfströme/Diffusionsraten). Einerseits wird Wärme von den Heizschlaufen auf und durch das Speichermaterial übertragen, welches sich kapazitativ (die Wärmekapazität ist ebenfalls feuchteabhängig) erwärmt, andererseits wird Wasser verdampft und transportiert. Die involvierten Wärmeübertragungsprozesse variieren zeitlich. Ist bei der Ladung des Speichers der Beton grösstenteils noch nass, erfolgt die Wärmeübertragung weitestgehend via Wärmeleitung. Die Wärmeleitfähigkeit (Tabelle 2) ist dann in der Grössenordnung derjenigen von Wasser. Beginnt das Wasser nun aber zu verdampfen (und erfolgt ein konvektiver/diffusiver Dampfstrom), so wird Verdampfungswärme transportiert. Gleichzeitig sinkt dann die Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials, da dieses trocknet.

Bei der Ladung des Speichers (Sommer) muss pro m^3 Speicher bei vollkommen wassergesättigtem Speicher eine Ladungsenergie von ca. 400 kWh aufgebracht werden (Tabelle 7), inkl. sensible Wärme mit einer Wärmekapazität 0.4 bis 0.55 kWh/ m^3K , der Grossteil als Verdampfungswärme. Soll im Lade-fall der Speicher innert 30 Tagen (mittlere Sonnenscheindauer 10 h) geladen werden, so ergibt sich eine Wärmeübertragungsrate von 1.33 kW pro m^3 Speicher.



$$\dot{Q} = k * A * \Delta \vartheta_m$$

$$\dot{Q} = \text{Wärmestrom (W)}$$

$$k = \text{Wärmedurchgangs-Koeffizient (W/(m}^2\text{*K))}$$

$$A = \text{Austauschfläche (m}^2\text{)}$$

$$\Delta \vartheta_{m,\log} = \text{mittlere logarithmische Temperaturdifferenz (}^{\circ}\text{C)}$$

Für k soll zunächst der Wert von stehendem Wasser ($300 \text{ W/m}^2\text{K}$) angesetzt werden. Bei einer Heizkreiseintrittstemperatur von $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, einer Austrittstemperatur von $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, einer Speicheranfangstemperatur von $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Speicherendtemperatur von $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ergibt sich ein $\Delta \vartheta_m$ von $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und somit eine Tauscherfläche von 0.16 m^2 pro m^3 Speicher.

Realistischerweise sollte von tieferen $\Delta \vartheta_m$ von $5\text{-}10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgegangen werden. Dies ergäbe dann bei $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Tauscherfläche von 0.43 m^2 pro m^3 Speicher. Im Entladefall müssen dann bloss 100 kWh/m^3 , dafür schneller (10 Tage à 24h – Ladung des Wasserspeichertanks), abgeführt werden, was eine Wärmeübertragungsrate von 0.3 kW pro m^3 Speicher ergibt. Die Übertragung erfolgt in diesem Fall durch Wärmeleitung des nassen Speichermaterials (k -Wert entspricht in diesem Fall etwa demjenigen von Wasser). Dies ergäbe bei einem $\Delta \vartheta_m$ von $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Tauscherfläche von 0.20 m^2 pro m^3 Speicher.

Die Heizschlaufen wurden daher wie folgt ausgeführt: Es wird eine einlagige Schlaufe mit 5 Bögen verwendet (Abbildung 21). Der Rohrdurchmesser soll der gleiche wie beim Solarkreislauf sein (ausser 18 mm). Die Anschlüsse sind seitlich angebracht. Die Tauscherschlaufen der einzelnen Betonelemente werden mittels eines Stahlwellschlauchs und Schraubverbindungen verbunden. Da sich bei der Verschraubung kaum Verschiebungen ergeben (das flexible Zwischenstück soll gerade die Spaltbreite zwischen den Betonblockreihen überbrücken), kann das Rohr präzise geformt werden und muss nur eine gewisse thermo-hygrische Verformbarkeit (Betonaussparungen oder Dilatationspuffer) aufweisen. Aus Herstellungsgründen (Maximallänge Biegen von Kupferstangen) wurde eine Schlaufenlänge von 5 m und der Tauscherfläche von 0.28 m^2 pro Schlaufe (1 Betonmodul) verwendet. Dies entspricht 1.13 m^2 Tauscherfläche pro m^3 Beton (totale Tauscherfläche des Speichers 6.80 m^2). Die somit zur Verfügung gestellte Tauscherfläche ist deutlich grösser als die oben berechneten Tauscherflächen und auch deutlich grösser als analoge Werte bei einem Wasserspeichertank.

Der für den k -Wert angesetzte Wert ($300 \text{ W/m}^2\text{K}$) ist zu Beginn der Trocknung bzw. im Entladefall realitätsnah, es ist jedoch nicht ganz klar, wie sich dieser Wert im zeitlichen Verlauf der Trocknung verhalten wird. Wenn die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz geringer wird, voraussichtlich bei Temperaturen über $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, nimmt auch der Rest-Ladungsenergiebedarf rasch ab (Anhang Tabelle 7). Eine umfangreiche Analyse wäre sehr aufwändig und würde zudem die Erfassung weiterer Materialkenndaten bei unterschiedlichen Feuchtegehalten und Temperaturen beinhalten. Zudem ist die Feuchte- und Temperaturverteilung im Speicherblock auch vom jeweiligen zeitabhängigen solaren Energieeintrag und der Regelung/Steuerung der verschiedenen Kreisläufe abhängig. Diese Vorgänge können nicht analytisch gelöst werden und sind selbst durch Computersimulation schwer fassbar. Dies kann daher nicht Teil des vorliegenden Projekts sein, eine „vernünftige“ Dimensionierung wird

als vorerst ausreichend erachtet. Der Druckabfall in den Heizschlaufen ist gleich dem von 3 derartigen in Serie geschalteten Elementen (Berechnung für 8 parallele Lagen). Die parallelen Reihen führen zu keinem weiteren Druckabfall, hingegen erniedrigt sich der Volumenstrom. Wird von einer Geschwindigkeit von 0.5 m/s im Solarkreis ausgegangen, ergibt sich in eine Geschwindigkeit von 0.0625 m/s in den Schlaufen (8 Lagen). Bei einem Rohrlinnendurchmesser von 16 mm führt dies zu einem Volumenstrom von 0.0451 m³/h in einer Lage. Die Reynoldszahl Re lässt sich errechnen zu

$$Re = \frac{v * d_l * \rho}{\eta} = 2141$$

⇒ ≈ laminare Strömung

$$\Rightarrow \lambda = \frac{64}{Re} = 0.03$$

Der Druckabfall in einem Element (mit Anschluss ans nächste Element) Δp lässt sich auf Basis einer äquivalenten Rohrlänge $l_{\text{äq}}$ errechnen:

$$l_{\text{äq}} = 6 * 0.7 \text{ m} + 6 * 50 * 0.016 \text{ m} = 9 \text{ m}$$

$$\Delta p = \frac{\lambda * l_{\text{äq}} * v^2 * \rho}{d * 2} \approx 32 \text{ Pa}$$

Bei 3 Elementen in Serie ergibt sich somit ein Gesamtdruckabfall von ca. 96 Pa. Dazu kommen noch gewisse Druckabfälle infolge der Anschlussstücke. Dieser Druckabfall ist daher problemlos zu bewältigen. Bei einer seriellen Verbindung von 24 Elementen (siehe Abb. 22) erhöhen sich die Geschwindigkeit und damit die Reynoldszahl entsprechend um einen Faktor 8. Der Praxistest zeigte, dass zwar höhere, aber unkritische Werte für den Druckabfall erreicht wurden.

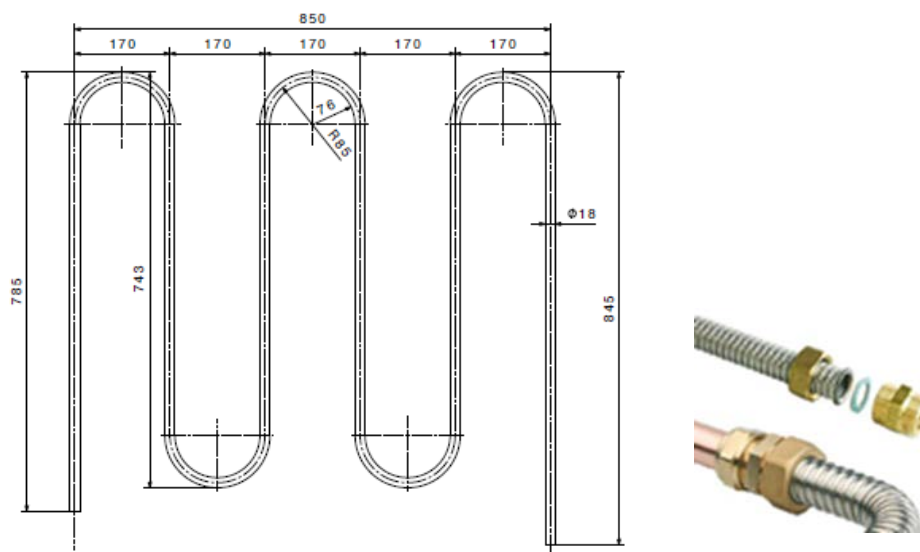


Abb. 21 Dimensionierung der in die einzelnen Betonelemente eingegossenen Kupferschlaufen mit Anschlussfittings.



In Anbetracht des Gewichts eines Betonmoduls von über 400 kg (nasser Zustand) kommt bei der Aufschichtung der Elemente ein Stapler oder eine entsprechende Hebevorrichtung zum Einsatz. Die Betonelemente werden daher bereits mit Aussparungen für die Staplerschaufeln produziert. Es ergibt sich auch die Möglichkeit, zusätzliche Transportkanäle für den Dampf-/Wassertransport auszusparen. Die Heizschlaufen (Wärmetauscherschlaufen) werden in diese vorgefabrizierten Elemente mit einbetoniert. Dabei sind die unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten respektive das Schwinden des CSA-Betons zu berücksichtigen. Alle Rohranschlüsse kommen vorne zu liegen, damit sie bei (allfälligen) Leckagen prinzipiell zugänglich gemacht werden könnten. Es müssen auch Vorkehrungen wegen des unterschiedlichen thermo-hygrischen Verhaltens des Betons resp. der Heizschlaufen getroffen werden. Aus diesem Grunde sollen die Verbindungen zwischen den Elementen durch Edelstahlwellschläuche an Stelle von starren Heizschlaufen (Kupfer) gelöst werden. Betonaussparungen bei den Rohrverbindungen ergeben die nötigen „Arbeitsflächen“. Auch der Anschluss an die Verbindungsleitungen zum Wasserspeichertank wird über flexible Metallschläuche sichergestellt. Ein derartig zusammengesetzter Betonkern ist schematisch in Abbildung 22 dargestellt. Diese Anordnung bedeutet auch, dass der Speicher in Serie beheizt wird. Zwischen den Reihen und aussen herum (Abstand zu Innenhülle) ist ein Luftspalt für einen (vereinfachten) Luftaustausch (Konvektion/Diffusion von Feuchtigkeit) beim Laden, aber auch für die Wasserverteilung beim Entladen (Wärmefreisetzung im Winter) vorgesehen.

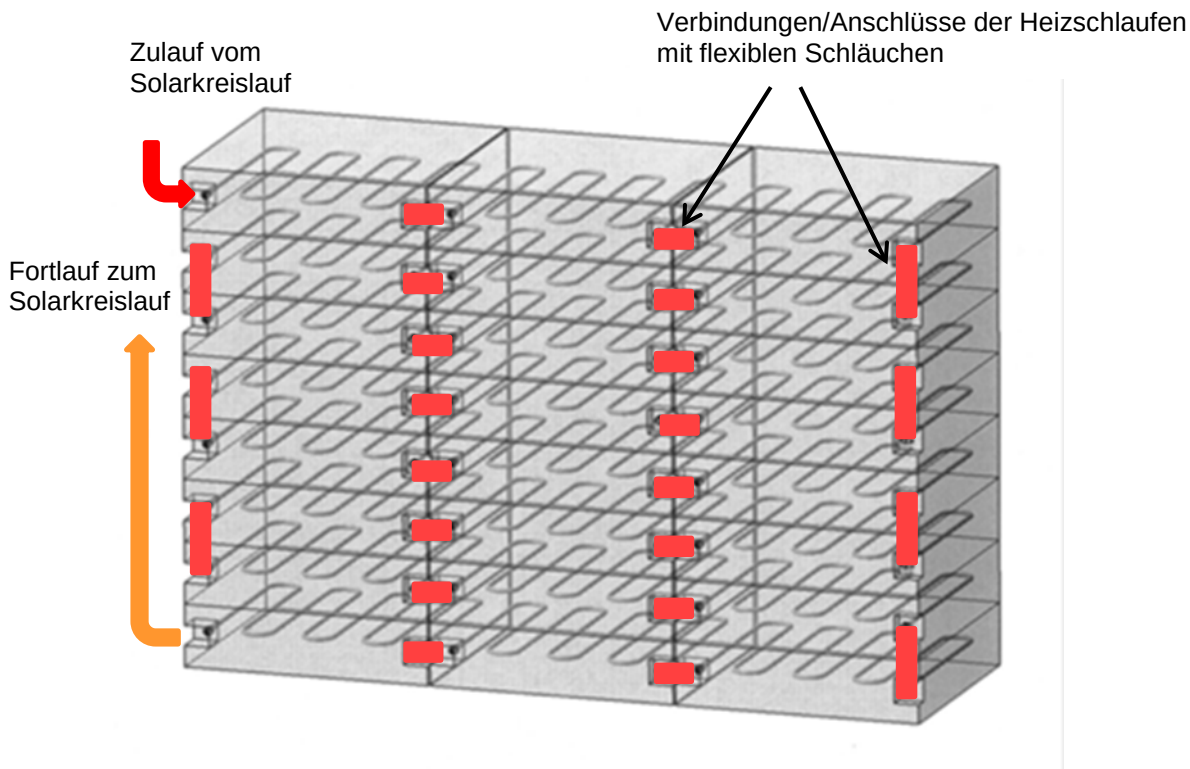


Abb. 22 Aufbau des Betonkerns mit Verteilerrohren Heizkreislauf (serielle Verbindung) ($3 \times 1 \times 2 \text{ m}^3$).

Innenhülle (Dampfsperre)

Der modular aufgebaute Speicherkern aus Ettringitbeton wird mit einer Wasserdampfsperre ummantelt. Diese innere Dampfsperre wurde (möglichst) wasserdicht und strukturstabil geplant, um den Ettringitspeicher allenfalls bei der Wiedersättigung (Entladung) sogar fluten (unter Wasser setzen) zu können. Die unten beschriebene, effektiv auch realisierte Variante, ist allerdings sehr aufwändig. Einfachere Lösungen, welche in erster Linie Luft- und Dampfdichtigkeit voraussetzen, sind nach den gemachten Erfahrungen denkbar und zu favorisieren. Dabei muss bei der Materialwahl darauf geachtet werden, dass diese hitzebeständig (bis 110°C) und dauerhaft sind. Prinzipiell könnten Lösungen mit Folien (z.B. aus EPDM, PTFE oder ETFE) realisiert werden. Auch könnten Kunststoffplatten oder evtl. sogar verleimte Wärmedämmplatten eingesetzt werden. Denkbar wären auch Lösungen, bei denen die Innenhülle zuerst erstellt wird (z.B. aus wasserdichtem Normalbeton) und dann als verlorene Schalung dient, in welche der Ettringit-Beton eingegossen wird. Dies liess sich am vorhandenen Wohnobjekt ohne deutliche Mehrkosten nicht realisieren. Die wasserdichte Innenhülle wurde ebenfalls modular aus Einzelelementen aufgebaut. Sie wurde aus Stahlblechen zusammengesetzt. Als Material kamen zwecks sicherer Vermeidung allfälliger Korrosion Edelstahlbleche zum Einsatz. Ein allfälliger Rückbau musste sichergestellt werden (Prototyp). Da das Speichermaterial aus vorgefertigten Betonmodulen zusammengesetzt wird, muss die Innenhülle nach deren Platzierung um diese herum errichtet werden können. Dabei sind die Platzverhältnisse eng und der Speicher kam zudem in einer

Raumecke zu stehen. Die Innenhülle lässt sich am Einfachsten durch den Zusammenbau von Wannen- und Plattenelementen (U-Profile) realisieren (Abbildung 23). Boden und Deckel bestehen aus rechteckigen, grossflächigen Flachblechstücken ($3 \times (0.15 \text{ bis } 1.5) \text{ m}^2$). Vorder- und Hinterseite wurden aus drei (resp. 2) grossflächigen U-Profilen zusammengesetzt. Längsseitig war bei diesen U-Profilen ein Rand von ca. 3 cm umgeklappt. Dieser diente quasi als Flansch beim Zusammenbau. Die beiden seitlichen Stirnflächen bestehen aus Wannen (ca. $2 \times 1 \text{ m}$) mit umgeklapptem 3 cm hohem in den Ecken verschweisstem Rand. Dieser überstehende Rand diente als Flansch zur Befestigung von Dach-, Boden- und Frontseitenelementen.

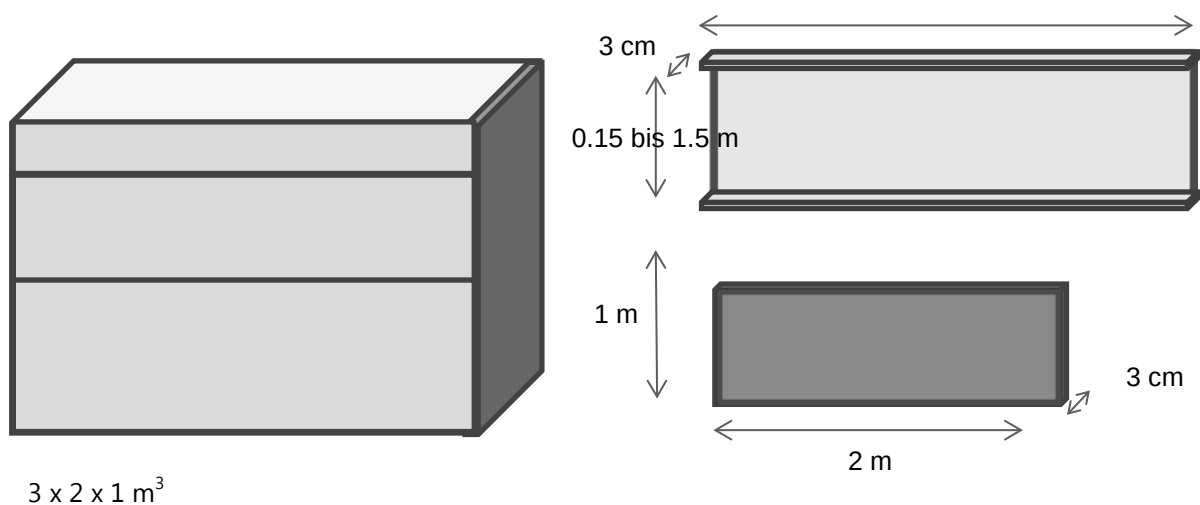


Abb. 23 Modular zusammenbaubare Blechelemente für die dampfdichte, stabile Innenhülle.

Zwischen die vorstehenden flachen Ränder (Flansche) wurde eine Dichtung aus PTFE eingequetscht (siehe Abbildung 24), welche die Wasserdichtigkeit erhöhen sollte. Die Quetschung erfolgte durch mit Schrauben zusammengepressten Edelstahlprofilstangen. Problematisch war vor allem das Bohren einer ausreichenden Anzahl Schraubenlöcher in die überstehenden Ränder der Wannen und U-Profile. Die zusammengefügte Ränder dienen zudem der mechanischen Verstärkung der Innenhülle in der Form von vorstehenden Rippen (doppelte Blechdicke). Die Profilstangen sorgten für eine zusätzliche Stabilität der zusammengebauten Edelstahlkiste. Als Boden diente eine Blechplatte, welche auf eine Wärmedämmschicht (Foamglas) am Boden zu liegen kam und mit den Wannenelementen in gleicher Weise verbunden wurde. Die Wannen und U-Profilelemente wurden grossflächig gewählt. Möglich ist aber mit dieser Technik auch ein Aufbau aus mehreren viel kleineren, handlicheren Elementteilen.

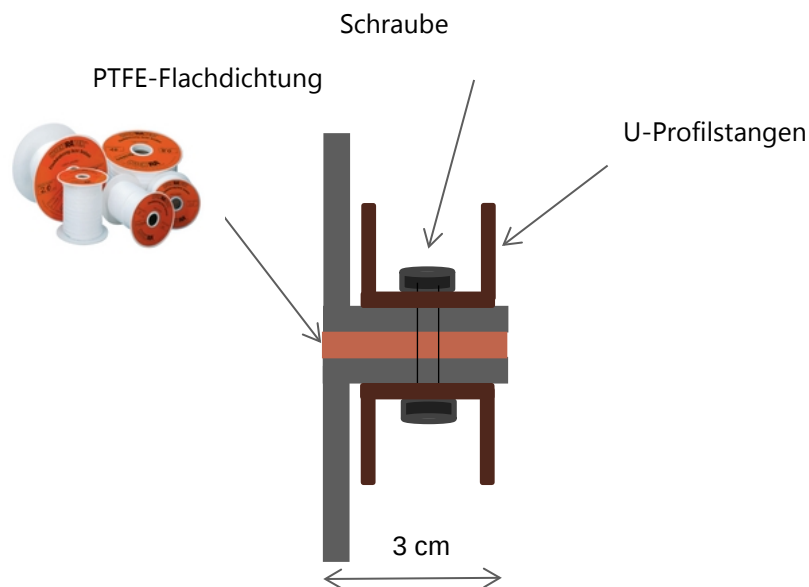


Abb. 24 Zusammenfügen der Elemente Innenhülle (inkl. Dichtung und Klemmprofile).

Dadurch sollte es möglich sein, bei einem maximalen hydrostatischen Druck von 2 bar (im schlimmsten Fall) ausreichend geringe Leckraten zu erzielen (<Liter/h). Kritisch sind dabei vor allem die Ecken, welche zusätzlich durch temperaturbeständige Klebbänder oder wo nötig durch Schweissstellen gesichert werden können. Um allfälliges Leckwasser ableiten zu können wurde zwischen Garagenboden (massiv und tragfähig) und Bodendämmung eine Drainagematte eingelegt. Die derart zusammengesetzte Innenhülle kann im Bedarfsfall selbstverständlich von aussen (vorne) wieder geöffnet werden.

Luftzirkulation

Über den Speicherblöcken zirkuliert ein Luftstrom, welcher zur Aufgabe hat, während des Ladevorgangs (Sommer) die freigesetzte Feuchtigkeit abzutransportieren. Der grosse Vorteil dieser Bauvariante besteht darin, dass sich die Apparate zur Luftentfeuchtung dadurch ausserhalb der Innenhülle anbringen lassen und so einerseits eine effizientere Entfeuchtung, andererseits eine allfällige Reparatur/Ersatz einfach und ohne Öffnung der Innenhülle realisieren lässt.

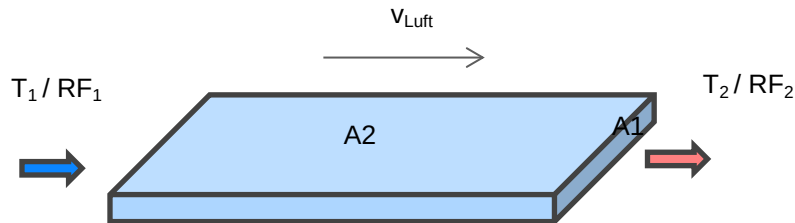


Abb. 25 Luftaustausch im Speicher (vereinfachtes Schema, Luftraum oberhalb der Betonelemente $3 \times 2 \times 0.1 \text{ m}^3$).

Die eintretende Luft der Temperatur T_1 (Annahme: relative Feuchte $RF_1=100\%$ (gesättigt, da von Kondensator)) wird erwärmt (RF sinkt) und kann somit wieder Feuchtigkeit aufnehmen und verlässt die Innenhülle des Speichers mit der Temperatur T_2 und RF_2 .

Nimmt man an dass $T_1=50^\circ\text{C}$ und $T_2=70^\circ\text{C}$, $RF_2=70\%$, so kann pro m^3 Luft ca. 80 g Wasser aufgenommen (und abtransportiert) werden. Sollen nun in 20 Tagen ($\approx 24 \text{ h}$, Annahme Speicher bleibt auch in der Nacht feuchtheiss) ca. 2400 kg Wasser (400 kg/m^3 Speicher) in Form von Dampf abgeführt werden können (vollständig gesättigtes Kapillarporensystem, siehe Tabelle 7), so ergibt das $30'000 \text{ m}^3$ Luft, welche in dieser Zeit durch den Speicher zirkulieren muss ($= 62.5 \text{ m}^3/\text{h}$ – Vergleich: In einer Finnen-Sauna beträgt der Luftaustausch pro Person ca. $10\text{-}20 \text{ m}^3/\text{h}$). Bei einer Querschnittsfläche A_1 von 0.1 m^2 ($1\text{m} \times 0.1 \text{ m}^2$) ergibt sich eine Geschwindigkeit von 625 m/h ($=0.174 \text{ m/s}$). Wird die Luft via ein Luftrohr von aussen zugeführt, ist die Luftgeschwindigkeit im Rohr je nach Rohrquerschnitt höher. Bei einem Rohrradius von 0.05 m ergibt sich beispielsweise eine Geschwindigkeit von 2.2 m/s . Dies sind durchaus realistische, technisch durch einen Ventilator zu realisierende Geschwindigkeiten.

Diese Luft muss beim Durchfliessen erwärmt werden. Dazu ist folgende Wärmeleistung $\dot{Q}$ notwendig:

$$\dot{Q} = v * A_1 * \rho * c_p * \Delta T \approx 350 \text{ W}$$

Andererseits kann die zur Erwärmung notwendige Tauscherfläche berechnet werden:

$$\dot{Q} = k * A_2 * \Delta T_m$$

Wird in obigem Beispiel zusätzlich angenommen, dass sich die Speichertemperatur nur unwesentlich ändert ($100^\circ\text{C} \Rightarrow 90^\circ\text{C}$) so lässt sich ein mittleres ΔT von 35° errechnen. Mit einem angenommenen Wärmeübertragungswert k von $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ ergäbe sich eine dazu benötigte Tauscherfläche von 0.33 m^2 . Das Rechenbeispiel hat gezeigt, dass bereits mit relativ geringen Temperaturunterschieden und realistischen Luftströmen und Tauscherflächen der geplante Feuchtigkeitsabtransport realisiert werden kann. Praktisch soll die Zuluft bereits in Rohren, welche durch den Speicher geführt, vorgewärmt und erst dann eingeblasen werden. Dabei soll beim Einblasen, zwecks einer effizienteren Entfeuchtung, eine gewisse Luft-Zirkulation durch den Speicher sichergestellt werden. Der limitierende

Prozess bei der Entfeuchtung dürfte eher der Transport der Feuchte zur durchströmenden Luft denn deren Feuchtigkeitsaufnahmefähigkeit sein.

Im realisierten Prototyp Seelisberg wird die Luft daher frontseitig in der Speichermitte durch ein partiell perforiertes Rohr eingeblasen (Abbildung 26). Bei den zentralen Betonmodulen ist hierfür frontseitig eine Aussparung zwecks Einlegen des Luftrohres vorgesehen. Damit die Luft nicht direkt (nur auf der Frontseite) nach oben in das Luftpolster zirkuliert, wird der Zirkulationsweg durch eine Luftbarriere (in Form eines Moosgummischlauchs) abgeschnitten. Die Luftzirkulation kann demnach nur durch die 2 cm breiten Abstände zwischen den Reihen der Betonelemente und durch die Stapleraussparungen ($12 \times 8 \text{ cm}^2$) nach oben zur Decke (Höhe 10 cm) gelangen wo wieder aus dem Speicher abfließt. Die Fassung der Fortluft befindet sich dabei in der hinteren linken Ecke. Die Luftzirkulation ist daher nicht gleichmässig, aber ausreichend. Die Tauscherfläche zur Lufterwärmung beträgt so mehrere m^2 . Selbstverständlich wären auch andere (bessere, gleichmässiger) Varianten der Luftströmung möglich gewesen, jedoch ohne Kenntnis des Verhaltens des Speichers schwer berechenbar, so dass ein allfälliger Zusatzaufwand nicht gerechtfertigt war.

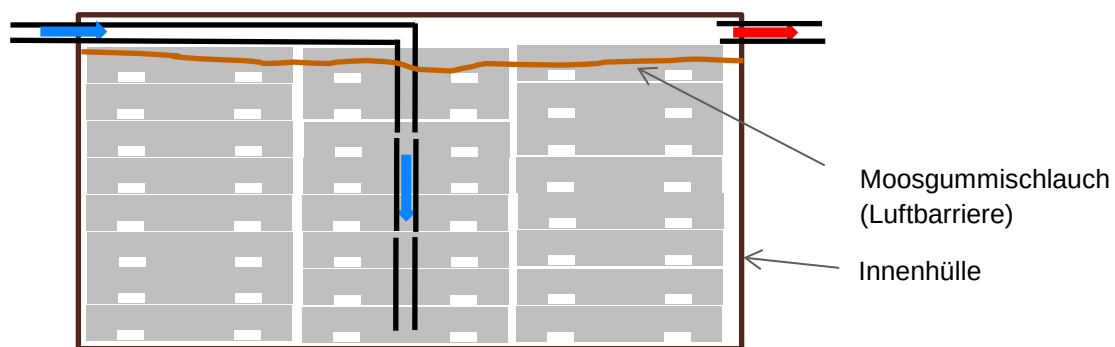


Abb. 26 Luftführung im Speicher.

Die Luft sollte in einer ersten Entfeuchtungsphase zunächst andauernd zirkulieren, da der Speicher dann in der Regel noch feucht ist, und grosse Wasserdampfmenen abgeführt werden müssen. Später kann eine reduzierte Zirkulation Sinn machen. Geeignete Luftstromvolumina und allenfalls Zeitregelungen müssen im Praxistest erprobt werden. Die realisierte Anlage erlaubte es beide Parameter zu steuern. Zwecks Luftzirkulation wurde ein Radialventilator aus Kunststoff eingesetzt. Dieser war via Potentiometer stufenlos einstellbar. Bei einem Luftstromvolumen von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ergab sich ein statischer Druck von 600 Pa.



Abb. 27 Ventilator zur Umwälzung der Luft (montiert an der Garagendecke ausserhalb des Speichers).

Luftentfeuchtung

Damit die durch den Speicher geführte Luft Feuchtigkeit aufnehmen und dann zwecks Trocknung (Dehydrierung) des Speichermaterials abführen kann, ist es notwendig, dass die zugeführte Luft einen geringeren Feuchtegehalt als die Fortluft aufweist. Dies kann prinzipiell auf zwei Arten sichergestellt werden:

Entfeuchtungsvariante I) Luftentfeuchtung zirkulierender Luft im Kondensator

Entfeuchtungsvariante II) Luftaustausch

Im Rahmen des beschriebenen Projekts wurden versuchsweise beide Varianten realisiert. Im ersten Versuchsjahr wurde die durch den Speicher zirkulierende Luft in einem wassergekühlten Kondensator getrocknet, im zweiten Jahr wurde die feuchtheisse Luft, unter teilweiser Wärmerückgewinnung im Gegenstrom-Luft/Luft-tauscher mit frischer Umgebungsluft ersetzt. Dabei war ursprünglich nur die Realisierung von Variante I vorgesehen, die Resultate des ersten Jahres führten aber zum Entscheid, die Anlage im zweiten Ladezyklus umzubauen und auch Variante II zu realisieren.

Entfeuchtungsvariante I)

Die durch den Speicher geleitete Luft wird bei dieser Variante nicht ersetzt, sondern zirkuliert im Kreislauf. Da sie bei der Zirkulation aber Feuchtigkeit aufnimmt, muss der Wassergehalt dieser Luft in einem Kondensator beim Durchlauf reduziert werden. Damit der Taupunkt unterschritten werden kann, muss gekühlt werden. Die trockenere (geringerer absoluter Wassergehalt), aber auch kältere Luft (mit hoher relativer (!) Luftfeuchtigkeit) wird dann wieder in den heissen Speicher geleitet und erwärmt, so dass deren relative Feuchtigkeit stark sinkt und sie erneut Feuchtigkeit aufnehmen kann. Idealerweise übersteigt die Lufttemperatur im Speicher den Siedepunkt von Wasser (ca. 100°C), da die Luft dann einen sehr hohen absoluten Wassergehalt aufweisen kann, so dass die Entfeuchtung äusserst effektiv erfolgen kann. Da die durch den Speicher zirkulierende Luft sehr heiss ist, kann beispielsweise Umgebungsluft oder Meteorwasser als Kühlmittel verwendet werden.

Es müssen im Extremfall bei vollständiger Trocknung eines komplett wassersatten Speichers maximal 400 kg Wasser pro m³ Speicher kondensiert werden (Tabelle 7). Zur Kondensation muss mindestens die dementsprechende Kondensationswärme durch das Kühlmedium abgeführt werden. Wie schon weiter oben diskutiert sollte diese Wärme nach Möglichkeit zurückgewonnen werden. Bei der Berechnung des Entfeuchtungs-Luftstroms durch den Speicher wurde von einer Ladedauer von (ideal) 20 Tagen à 24 Stunden ausgegangen (Luftstrom 62.5 m³/h). Dies ergibt einen Lade-Wärmestrom von $\dot{Q} \approx 3.1 \text{ kW}$. Dies würde durch die vorhandenen Kollektoren abgedeckt (siehe WUFI-Berechnungen Kapitel 4), ist aber wegen der komplizierten Feuchtediffusion im Speicherbeton selbst wohl eher optimistisch veranschlagt. Dieser Wert soll hier als orientierende Basis für den durch den Speicher zirkulierenden Luftstrom dienen. Die Luft würde in dieser Variante entweder als Plattenwärmetauscher (Luft/Luft) mit Kühlmedium Luft oder als Luft/Wassertauscher mit Kühlmedium Wasser ausgeführt. Die Feuchtigkeit wird durch Auskondensation an den kalten Tauscherflächen entfeuchtet.

la) Kühlmedium Luft

Würde zur Kondensation Luft als Kühlmedium eingesetzt, ergäbe sich mit $c_{p,L} * \rho_L \approx 1 \text{ kJ/m}^3\text{K}$

und einer angenommenen Temperaturerhöhung der Luft um 15 °C ein Luft-Volumenstrom von $\dot{V}_L \approx 630 \text{ m}^3/\text{h}$ und somit eine Kühlluftmenge von total 300'000 m³ Luft, welche im Verlauf der Speicherladung gesamthaft umgewälzt werden muss. Die benötigte Luftmenge ist zwar sehr gross, technisch gesehen aber nicht kritisch. Luftwärmepumpen beinhalten Volumenströme von über 3000 m³/h, allerdings nicht im Dauerbetrieb. Nur die Wärme wird getauscht, die Abluft also nur erwärmt und nicht befeuchtet. Eine Dampffahne kann also in diesem Fall nicht entstehen, auch nicht in kalten Nächten.



lb) Kühlmedium Wasser (Meteorwasser)

Wird als Kühlmedium Wasser verwendet errechnet sich mit $c_{p,W} * \rho_W \approx 4190 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ und einer Temperaturerhöhung des Wassers um 15°C ein Wasser-Volumenstrom von $\dot{V}_L \approx 0.17 \text{ m}^3/\text{h}$. Gesamthaft würden zur Kühlung mindestens 81 m^3 Wasser benötigt.

Die im jeweiligen Fall benötigten Tauscherflächen können wie folgt abgeschätzt werden:

$$A = \frac{\dot{Q}}{k * \Delta T_m} \quad \text{mit } \Delta T \approx 15 \text{ K ergibt sich}$$

$$\text{la) } k_{\text{Luft(Kondensator)/Luft}} \approx 30 \text{ W/m}^2\text{K} \Rightarrow A_{\text{Luft}} \approx 7 \text{ m}^2$$

$$\text{lb) } k_{\text{Luft(Kondensator)/Wasser}} \approx 100 \text{ W/m}^2\text{K} \Rightarrow A_{\text{Wasser}} \approx 2.1 \text{ m}^2$$

In beiden Fällen führt eine Über- oder Unterdimensionierung der Tauscher zu keinen prinzipiellen Problemen. Bei einer Unterdimensionierung verlängert sich aber der Ladevorgang des Speichers, da dem Luftkreislauf durch den Speicher nur so viel Wärme (resp. so viel Feuchte) wie möglich entzogen wird. Wird das Kühlmedium zu heiss, wird der Taupunkt nicht unterschritten und dann wird die Kondensation ineffizient.

Die Wasservariante hat den Vorteil von kleineren Transportrohren und generell geringeren Eingriffen auf das bestehende Wohnobjekt. Das gesamthaft benötigte Volumen an Kondensationsmedium ist (bei 15 K Temperaturerhöhung) aber beträchtlich. Zudem müssen bei der Wasserlösung relativ grosse Wassermengen umgewälzt (gepumpt) werden. Im Rahmen des Projekts wurde dennoch eine Kondensationsvariante mit einer Wasserkühlung realisiert. Nutzbar gemacht wurde ein Regenwassertank von allerdings nur 4 m^3 Inhalt. Die Wärmeabgabe des nichtisolierten Tanks an den ihn umgebenden Erdboden und frisches Meteorwasser sorgt für zusätzliche Kühlung. Hingegen werden weder der Warmwasserspeichertank (9 m^3) noch die Brauchwasseraufbereitung im vorliegenden Konzept zur Abführung der Kondensationswärme mit einbezogen. Zusätzlich wurde zunächst auch eine solare Nachtkühlung (Abstrahlung von den Kollektoren) angedacht, aufgrund des dafür notwendigen Eingriffs in den Kollektorkreislauf mit zusätzlichen Regelsystemen aber verworfen. Sie sei hier aber trotzdem kurz diskutiert: Da die Temperatur im Betonspeicher in der Nacht (ohne Verdunstung) kaum sinkt, kann (je nach Ladezustand) durchaus Wasser verdunstet werden. Der Heizkreis würde also in der Nacht mit Hilfe eines Ventils nicht durch den Speicher, sondern als Kühlsystem durch einen Kondensator und anschliessend die Kollektoren geführt. Im Kondensator dürfte das Fluid Temperaturen über 50°C annehmen mit entsprechend hohen Kühlleistungen. (Vergleiche Potentialstudie BFE Projekt 103213: Nachstunden bis 50 W/m^2 bis sogar 100 W/m^2 an Kühlleistung). Wie hoch die Kühlleistung bei den installierten Kollektortypen (20 m^2) und bei hohen Fluidtemperaturen effektiv wäre, ist nicht klar, sicherlich aber eine interessante zusätzliche Kühlquelle zur Kondensation des Wasserdampfs,

allerdings ohne Energierückgewinnung. Der Volumenstrom des Solarfluids beträgt ca. $0.36 \text{ m}^3/\text{h}$ (0.5 m/s). Bei einer Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklaufemperatur von nur 5 K ergäbe sich somit eine (ausreichende) Wärmetransportleistung von ca. 2 kW .

Die durch den Regenwassertank nutzbar gemachte Kühlleistung reicht aber nicht aus. Da es sich zunächst nur um eine Versuchsanordnung handelte, wurde entschieden, die fehlende Kühlleistung durch kaltes Leitungswasser einzubringen. Als Kondensator wurde ein Luftkühler verwendet (Abbildung 28). Der Luftkühler verfügte über eine Tauscherfläche von 18 m^2 und eine Kühlleistung von 4.54 kW und war somit sicher überdimensioniert.



Abb. 28 Luftkühler (Kondensator) mit Kühlschlangen für den Wasserdurchfluss und stirnseitigem Lufteinlass (Länge 2 Meter).

Entfeuchtungsvariante II)

Zumindest in einer späten Trocknungsphase (wenn die Kondensation nicht mehr effizient ist) ist es sinnvoller, die feuchtwarme Speicherluft durch (trockenere) Frischluft kontinuierlich zu erneuern. Da die Feuchtigkeitsfrachten in der Endphase der Trocknung (Endladephase) gering ausfallen dürften, ist diese Art der Entfeuchtung einerseits effizienter, andererseits sind nur damit deutlich tiefere Feuchtegehalte in der Speicherluft und somit eine bessere Ladung realisierbar.

Da sehr heiße und feuchte Luft ausgeblasen werden soll, ist es sinnvoll, die Wärme beispielsweise in einem Gegenstromplattentauscher zwischen Fortluft und Zuluft zu tauschen. Dies sollte auch die Dampffahnenproblematik (feuchtheiße Fortluft könnte in kälterer Umgebung kondensieren und zu einer unerwünschten Dampffahne führen) abmildern. Verwendet wurde ein Plattentauscher von Klingenburg (GS30/200). Die Wärmeleistung betrug 3.2 kW (feucht) bei einem Luftstromvolumen von $100 \text{ m}^3/\text{h}$. Das Prinzipschema der Luftführung ist in Abbildung 29 gezeigt.

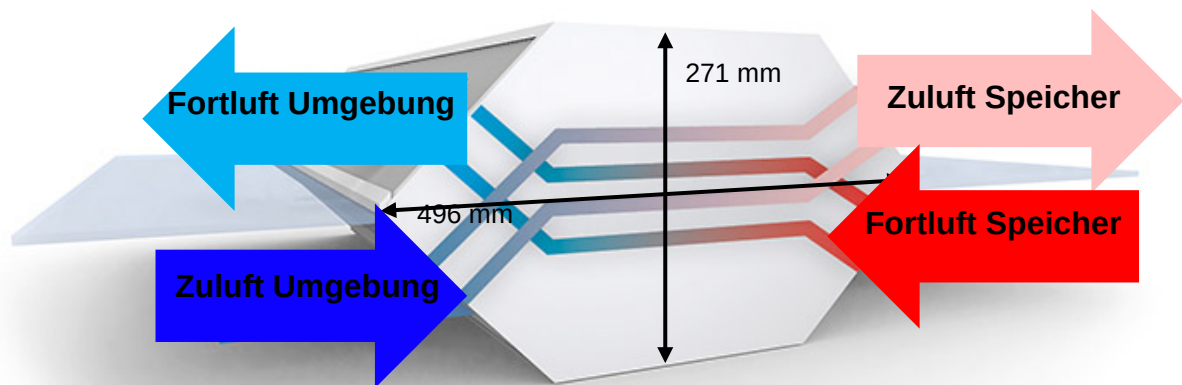


Abb. 29 Gegenstromtauscher mit Luftführung.

Nachteilig an dieser Lösung ist, dass die Feuchtemenge, die abgeführt wird, nicht direkt messbar ist. Sie kann aber bei Kenntnis der Luftfeuchten und Temperaturen der Zu- und der Fortluft, sowie dem Luftstromvolumen rechnerisch abgeschätzt werden. Auf die alternative Verwendung einer Grosswaage zur Gewichtsbestimmung des Speichers wurde aus Kostengründen und praktischen Erwägungen verzichtet. Zusätzlich ist aber auch allfällig gebildetes Kondensat zu berücksichtigen. Diese Variante lässt sich im Übrigen sehr kostengünstig realisieren, da ausser einem Gegenstromtauscher keine weiteren Apparate benötigt werden. Die notwendige Luftzirkulation kann bei luftdichtem Speicher problemlos mit dem gleichen Ventilator erfolgen.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts soll in erster Linie die Funktionstüchtigkeit des Ettringit-Betons als Speichermaterial nachgewiesen werden. Angesichts der sehr grossen Dampflasten konnte im Projektrahmen (mit Ausnahme der Wärmerückgewinnung im Gegenstromlufttauscher) ohne wesentliche Verkomplizierung der Regelung keine energetisch befriedigende Lösung mit Kondensationswärmerückgewinnung realisiert werden. Es wird aber für die Zukunft wichtig sein, Lösungen mit Wärmerückgewinnung zu finden. Immerhin steht im Sommer beim Wohnobjekt in Seelisberg ein deutlicher Solarüberschuss zur Verfügung. Da diese Energie sonst gar nicht genutzt würde, musste damit im vorliegenden Projekt nicht notwendigerweise haushälterisch umgegangen werden. Dies trifft auch generell zu, wenn die Kollektoranlagen auf die vollständige Abdeckung des Brauchwassers im Winter dimensioniert werden.

Heizkreis und Solarkreis

Die Trocknung des Speichermaterials Ettringitbeton bedingt die Zufuhr von Wärme. Diese stammt von Kollektoranlagen oder anderen Quellen wie zum Beispiel mit Photovoltaik betriebenen Wärmepumpen (nur Hochtemperaturpumpen, z.B. CO₂ basiert, sind allenfalls geeignet). Dabei sind Vorlauftemperaturen über 100°C wegen den involvierten Diffusionsprozessen und zwecks vollständiger Entwässerung des Kristallwassers des Ettringits besonders geeignet. Einschränkend sind die in Kapitel 2.4 beschriebenen Beständigkeitsprobleme von Ettringit in feuchtheisser Umgebung, so dass vermieden werden muss, dass derart hohe Temperaturen auf kapillar noch gesättigten Beton einwirken. Falls Temperaturen über ca. 90°C zur Ladung des Speichers eingesetzt werden sollen, so ist darauf zu achten, dass das Kapillarwasser bereits entfernt wurde, nur so sind auch höhere Temperaturen zur Entwässerung unproblematisch. Eine vollständige Entfernung von Kapillarwasser gelingt prinzipiell schon bei Temperaturen von ca. 50°C, jedoch ist insbesondere bei massiven Teilen und in Anbetracht langsamer Diffusionsprozesse und entsprechend langsamer Trocknung mit (zu) hohen Kernfeuchten zu rechnen. Zur Ladung des Ettringitbetons steht in Seelisberg eine Kollektoranlage (20 m², Flachbettkollektoren) zur Verfügung. Ein grosser Warmwasserspeicher (9.3 m³) wird damit gespeist. Zunächst wurde davon ausgegangen, dass der Kollektorkreislauf im Sommer statt durch diesen Warmwassertank durch den Ettringitspeicherprototypen geführt werden soll. Die zu Beginn des Projekts erkannten möglichen Dauerhaftigkeitsprobleme (Kapitel 2.4) führten zum Entschluss, nicht den Solarkreis durch den Speicher zu führen, sondern den maximal 90°C warmen Grosswassertank mit einem durch den Prototypen geleiteten unabhängigen Heizkreis anzuzapfen. Der Heizkreisreislauf übernimmt die Funktion Wärme zum Ettringitspeicher (Laden) zu transportieren, resp. aus dem Speicherprototypen wieder zu entnehmen (Entladen). Eine Fluidpumpe sorgte für den notwendigen Volumenstrom. Der vorhandene Solarkreislauf wurde unabhängig vom Betonspeicher weiter betrieben, ebenso der installierte Wassergrossspeicher. Diese Lösung hatte einige praktische Vorteile. So konnte Wasser anstelle des Solarfluids durch den Speicher geleitet werden und die Ladetemperatur konnte selbst ohne Reduktion/Limitierung der Kollektorrücklauftemperaturen stets auf unkritischem Niveau gehalten werden. Der Wassertank sorgte auch für eine gewisse Pufferung der Solarleistung, welche so in gewisser Weise auch nachts zur Ladung des Ettringitspeichers zur Verfügung stand. Der Solarkreis musste nicht verändert werden, der Grosswassertank wurde bei Bedarf und ausreichender Kollektortemperatur weiterhin durch diesen gespeist. Diese Entkoppelung hatte aber den Nachteil, dass die Ladetemperaturen stets relativ tief (<90°C) blieben und das Hochtemperaturpotenzial (Kollektorrücklauftemperaturen > 100°C) nicht verwertet werden konnte.

Befeuchtung

Zwecks Entladung des Prototypen in Seelisberg (Wärmefreisetzung im Winter) wird Wasser zugegeben. Der Vorteil besteht bei dieser Variante darin, dass Wasser einfach dosiert zugegeben werden kann und im Gegensatz zu Wasserdampf problemlos in der benötigten Menge (ohne Eingriffe in die Lüftungstechnik des bestehenden Wohnobjekts, Sorptionsvariante) zur Verfügung steht. Nachteilig ist aber, dass dadurch das Speichermaterial durch Sättigung des Kapillarporensystems übermässig Wasser aufnimmt. Die Kapillarwassermenge (Tabelle A-1 im Anhang - Wasser bis 50 °C) ist beträchtlich. Da die reversible Umwandlung von Ettringit zu Meta-Ettringit bei höheren Temperaturen (resp. tieferen Luftfeuchten) abläuft, wäre ein Verzicht auf eine Sättigung des Kapillarporensystems des



Speicherbetons erstrebenswert. Prinzipiell würde sich die Speicherdichte nicht signifikant zu verringern, das Kondensationsproblem aber deutlich entschärfen. Nur der Praxisversuch kann zeigen, ob und inwiefern durch eine reduzierte Wasserzugabe der Sättigungsgrad des Speichers tief gehalten werden kann, bzw. ob dann die Energiefreisetzungsraten ausreichend sind.

Da die Innenhülle annähernd wasserdicht ausgeführt wird, kann der Speicherprototyp (bei Bedarf) sogar geflutet werden. Eine partielle Wasserzugabe verspricht nur Erfolg, wenn auf eine Speicherflutung verzichtet werden kann, gleichzeitig aber eine gleichmässige Benetzung möglich wird. Dies wurde im Prototyp Seelisberg dadurch erreicht, dass die Wasserzugabe von oben erfolgt und das Wasser zunächst in mit Filzfliesen bestückten (zwecks zusätzlicher Wasserrückhaltung durch deren Schwammwirkung) Vertiefungen bei der obersten Betonmodulreihe eingeleitet wird und dort liegenbleibt. Durch eine Art Überlauf und eine Durchführung (zylindrische Aussparung) kann überschüssiges Wasser dann auf die nächste Ebene abfliessen, wo es zunächst wieder die dort angebrachten Vertiefungen befüllen kann (Abbildung 20). Durch diese an der Oberseite jedes Betonmoduls angebrachten Wasserkanäle ergibt sich so bei Wasserzugabe auf die oberste Lage eine kaskadenförmige Bewässerung des ganzen Speichers mit einer gewissen Verweilzeit des Wassers auf allen Speichermodulen. Die kapillare Wasseraufnahme des trockenen Speicherbetons ist beträchtlich (offenporiges System) und somit ist zu erwarten, dass das Speichermaterial ausreichend rasch Wasser aufnehmen kann und die Rehydratation des gesamten Ettringits ermöglicht.

4. Vorstudie Wufi

WUFI® (Wärme und Feuchte instationär) ist ein PC-Programmpaket zur realitätsnahen instationären Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen unter realen Klimabedingungen. Es wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen (D), entwickelt. Nähere Informationen finden sich unter www.wufi.de.

Im Gegensatz zu den stationären Dampfdiffusionsberechnungen nach Glaser werden mit WUFI die Wärme- und Feuchtespeicherung von Baustoffen, Latentwärmeeffekte durch Verdunstung und Kondensation sowie das parallele Auftreten von Dampfdiffusion, Flüssigtransport und Dampfkonvektion berücksichtigt. Neben den üblichen Randbedingungen wie Lufttemperatur und relativer Feuchte können auch Globalstrahlungs- und Niederschlagseinflüsse sowie andere Wärme- und Feuchtequellen erfasst werden. Die hygrothermischen Materialkennwerte werden aus den programmeigenen Datenbanken entnommen oder über Annäherungsformeln aus den gemessenen Materialkennwerten berechnet.

Auch wenn das Programm WUFI nicht für die Simulation von Latentwärme-Speichervorgängen konzipiert wurde, soll vorliegend versucht werden, die Lagevorgänge im Sommer hygrothermisch abzuschätzen. Zu diesem Zweck werden die Wärme- und Feuchtevorgänge in einem Betonelement ($0.25 \times 1.0 \times 1.0 \text{ m}^3$) inkl. angrenzende Luftschichten berechnet. Im Weiteren soll der Ladevorgang in einem „Elementturm“ von 8 übereinanderliegenden Betonelementen berechnet werden. Die thermohygrischen Vorgänge werden im eindimensionalen Berechnungsmodell simuliert, da zweidimensionale Modelle zu aufwändig wären und kaum zu wesentlich genaueren Ergebnissen führen würden.

Nebst den verwendeten Materialkennwerten ist für den Ladevorgang die Abschätzung der via Solarkollektoren zur Verfügung stehenden Wärmezufuhr von entscheidender Bedeutung. Aufgrund von Aufzeichnungen der hauseigenen Wetterstation in Seelisberg und Angaben der Fachliteratur kann für das gut 20 m^2 grosse Kollektorfeld im Mai/Juni mit einer Sonneneinstrahlung in der Grössenordnung von ca. 100 kWh/d gerechnet werden. Der Wirkungsgrad der Kollektoren hängt ab von optischen Verlusten und vor allem auch von thermischen Verlusten, welche wiederum massgebend von der Kollektortemperatur abhängen. Die für die WUFI-Berechnungen erzeugte Wärmequelle basiert auf folgenden Grundlagen:

- Wirkungsgrad Kollektor (s. Abb. 30)
- 10 Stunden Sonnenscheindauer pro Tag
- gleichmässige Verteilung auf 24 Betonelemente
- Betrachtungszeitraum 30 Tage.

Pro Betonelement ergeben sich somit Wärmequellen von beispielsweise 250 W/h (Kollektortemperatur 30°C) oder 150 W/h (Kollektortemperatur 70°C).

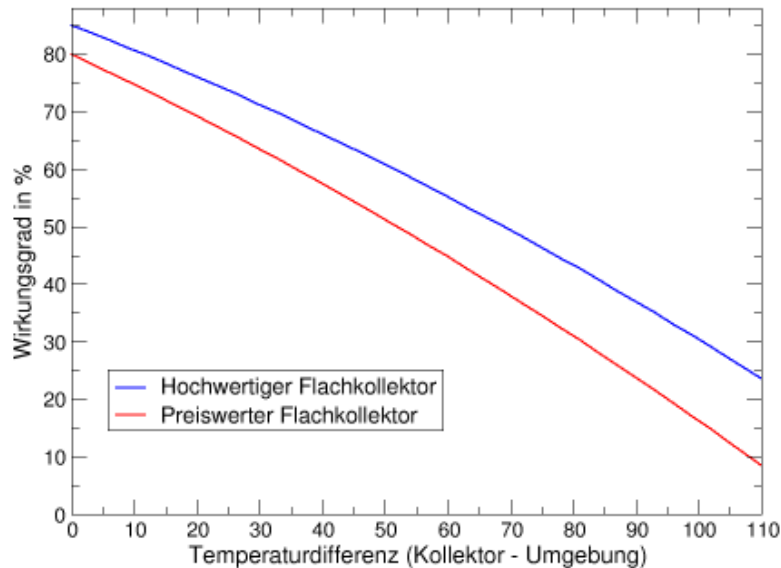


Abb. 30 Kollektorstufiger Wirkungsgrad.

Die Dampfabfuhr über die an jedem Betonelement angrenzenden Luftschichten ist nur grob abschätzbar. Wird von den in Kap. 3.2 ‚Luftzirkulation‘ erwähnten Annahmen ausgegangen, ergibt sich pro Betonelement eine Luftzirkulation von $62,5 / 24 = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei einer wirksamen Luftschichtdicke von 2 cm resultiert ein erforderlicher Luftwechsel von $2,5 / 0,02 = 125 \text{ h}^{-1}$.

Das gewählte Berechnungsmodell mit den Randbedingungen der Ausgangsvariante 1 ergibt sich aus den Beilagen Wufi-1. Bei der Ausgangsvariante wurde aus programmtechnischen Gründen davon ausgegangen, dass Aussenluft in den Spalten zwischen den Betonelementen zirkuliert. Die Beilage Wufi-2 zeigt den berechneten Feuchteverlauf im Speicherbeton, die Beilagen Wufi-3 den Temperatur- und Feuchteverlauf bei einzelnen Monitoren (Nummerierung der Monitore von aussen nach innen). Unter diesen Randbedingungen wurde somit eine Austrocknungszeit von durchschnittlich etwa 20 Tagen berechnet. Weitergehende Variantenberechnungen ergeben, dass unter diesen Randbedingungen (Zirkulation von Aussenluft) auch deutliche geringere Luftwechsel von z.B. 50 h^{-1} möglich wären, ohne dass die Austrocknung relevant beeinträchtigt würde.

Nebst verschiedenen Testvarianten wurde in einer weiteren Berechnungsvariante (Variante 5) für die einströmende Luft eine zunehmende Lufttemperatur von 20 - 50°C sowie konstant 70% rel. Feuchte angenommen. Die Auswertung zeigt, dass unter diesen Randbedingungen mit dem angenommenen Luftwechsel von 125 h^{-1} (bzw. pro Betonelement $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$) vermutlich alle Feuchtigkeit abgeführt werden kann (vgl. Beilage Wufi-4.1, Monitor Luftschicht). Die berechnete Austrocknungszeit des Betonspeichers liegt bei etwa 25 Tagen (vgl. Beilagen Wufi-4.2 und Wufi-4.3).

Weitergehende Berechnungen von 8 aufeinandergeschichteten Betonelementen ergeben, dass die kürzeste Austrocknungszeit bei möglichst gleichzeitiger bzw. gleichmässiger Wärmeversorgung aller Betonelemente zu erwarten ist.

Es wurde zudem der Wärmeverlust durch die Wärmedämmung beim Laden bzw. Entladen des Ettringit-Speichers errechnet. Während der Ladephase im Sommer ist mit durchschnittlichen Wärmeverlusten von ca. 200 W/h (1 Monat) bei 12 cm Wärmedämmung, statt 150 W/h bei 16 cm Wärmedämmung zu rechnen. Diese Verluste sind verkraftbar und werden von der Kollektoranlage problemlos nachgeliefert. Sie sind auch in der Garage ablüftbar. Beim Entladen im Winter unter ungünstigeren Bedingungen (Annahme 7 Tage Entladezeit, hohe Entladetemperatur) beträgt der Verlust bei 12 cm Dämmung ca. 60 kWh. Bei optimaler Entladung (schnellere Entladung bei hohen Speichertemperaturen zur Nachladung des installierten Wasserspeichers), d.h. instationär inkl. Beton ergibt sich bei einer Wärmedämmungsstärke von 16 cm ein Verlust von 31 kWh, bei 12 cm Wärmedämmung einer von 36 kWh (Beispiel Beilage Wufi-5).

Da hauptsächlich die Permanentspeicherkapazität (latente Wärmespeicherung) des Speichers untersucht und genutzt werden soll, wird die dünnere Wärmedämmung von 12 cm als ausreichend erachtet.



5. Anlagenkonzepte und Messtechnik

Ziel des Projekts ist die Erstellung und Erprobung eines Ettringitspeichers. Dabei steht das Verhalten der Speichereinheit selbst und nicht die Realisierung eines energetisch optimierten Gesamtkonzepts im Vordergrund. Zur Erfassung des Ladezustandes soll das bei der Trocknung abgedampfte Wasser (Kapillarwasser und Kristallwasser) gemessen werden. Eine (vollständige) Rückgewinnung/Nutzung der zur Trocknung aufgewendeten Verdampfungswäre ist im Projektrahmen nicht vorgesehen.

Im Entladefall (Winter) wird die freiwerdende Wärme dazu verwendet, den vorhandenen Warmwassergrossspeicher partiell wieder zu „laden“. Dieser soll nach Möglichkeit als Masseinheit für die freigesetzte Entladeenergie genutzt werden. Dies ist eigentlich nicht wirklich sinnvoll, da dies hohe Entladetemperaturen des Speichers mit entsprechenden thermischen Isolationsverlusten erfordert, jedoch muss so nicht die ganze Heizregelung des Wohnobjekts von Grund auf neu konzipiert werden (was den Projektrahmen deutlich gesprengt hätte). Realisiert wurden schliesslich zwei verschiedene Anlagenvarianten, wobei sich der Unterschied aus der Art der Luftentfeuchtung ergibt. Variante I wurde im Sommer 2015 getestet. Aufgrund der Resultate wurde beschlossen im Sommer 2016 auch Variante II zu realisieren.

Variante I beruht auf der Idee der Trocknung der Luft durch Auskondensation in einem Kondensator. Die Luft wird dabei in einem geschlossenen Kreislauf (Luftkreis) geführt. Das entsprechende Anlagenschema ist in Abbildung 31 aufgezeigt. Der Solarkreis blieb vollständig bestehen. Zur Ladung/Entladung des Ettringitspeichers wird der Grosswasserwärmespeicher via den Heizkreis angeschlossen. Die Fluidpumpe P1 (Solarkreis) wird wie vorhanden via Wassertanktemperatur und Kollektorrücklauftemperatur geregelt. Sie bleibt aktiv um den Wärmeentzug aus dem Wassertank zu ersetzen. Die Wasserumwälzpumpe P2 wurde im ersten Projektjahr manuell und vor Ort an- resp. abgestellt. Die Pumpleistung wurde weitgehend konstant gehalten und war in dieser Projektphase (Sommer 2015) dauerhaft (Tag und Nacht) in Betrieb.

Zur Trocknung der zirkulierenden Luft (Zwangszirkulation mittels Verdichter D_1) wurde ein Kondensator K_1 eingesetzt. Die Kühlung des Kondensators erfolgte via einem Kühlwasserkreis, in dem mittels Pumpe P_3 Regenwasser umgewälzt wurde. Die bereits bestehende Pumpe sollte beim Laden möglichst ständig laufen, ist aber auf 5 bar ausgelegt und damit völlig überdimensioniert und wurde sparsam eingesetzt. Die Pumpe wurde manuell geregelt. Bei Bedarf (und zur Schonung der Pumpe P_3) resp. zu hoher Rückflusstemperatur T_4 wurde der Kondensator mit Frischwasser gekühlt, welches dann ebenfalls in den Regenwassertank resp. bei zu hohem Füllstand in die Kanalisation floss. Der von der Wasserversorgung gelieferte Druck machte selbstverständlich eine Zusatzpumpe obsolet.

Der Verdichter $D1$ wurde im ersten Jahr komplett manuell gesteuert. Dessen Leistung wurde via Potentiometer geregelt. Die resultierenden Luftgeschwindigkeiten wurden mit einem Anemometer gemessen. Die ganze Anlage kam somit ohne jegliche Regelventile aus. Alle Umstellungen für Kühlwasser, Verdichter und Wasserpumpen erfolgten zunächst manuell.

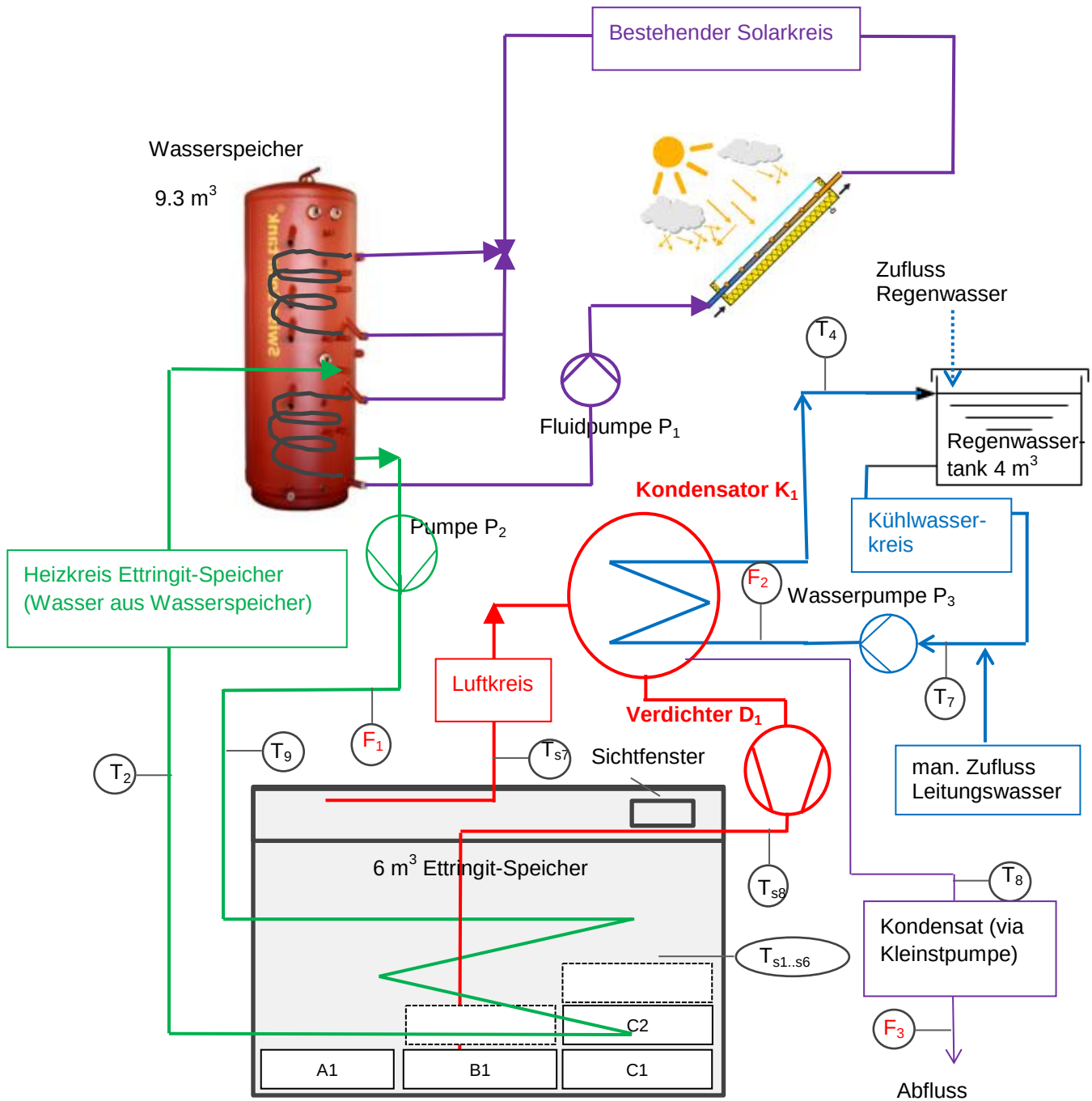


Abb. 31 Anlagenkonzept Variante I (2015) mit wassergekühltem Kondensator zur Luftentfeuchtung.



Es wurden folgende Flüsse erfasst:

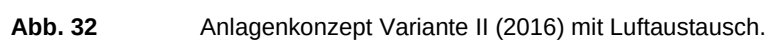
- Heizfluss durch den Ettringitspeicher (F1)
- Kühlwasserfluss durch den Kondensator (F2)
- Kondensatwasser (F3)
- Wasserzugabemenge beim Entladen (F4)

Es wurden folgende Temperaturen messtechnisch erfasst:

- Temperaturen des Ettringitspeichers an verschiedenen Positionen Ts1..s6
 - Ts1: oberhalb Modul C2 (Modulmitte)
 - Ts2: oberhalb Modul C6 (Modulmitte)
 - Ts3: oberhalb Modul B4 (Modulmitte)
 - Ts4: oberhalb Modul B4 (Modul hinteres Drittel)
 - Ts5: oberhalb Modul A1 (Modulmitte)
 - Ts6: oberhalb Modul A5 (Modulmitte)
- Lufttemperatur Speicher out TS7
- Lufttemperatur Speicher in TS8
- Temperatur des Kühlkreislaufs vor dem Kondensator T7
- Temperatur des Kühlkreislaufs nach dem Kondensator T4
- Temperatur am Ausgang des Heizkreises aus dem Ettringitspeichers T2
- Temperatur am Eingang des Heizkreises in den Ettringitspeicher T9
- Temperatur des Kondensats T8

Mit der Erfassung der Kondensatmenge kann bei dieser Variante die dem Speicher während der Lade- und Entlade-Phase entzogene Feuchtigkeitsmenge direkt erfasst werden. Zusätzlich wurden etwa Mitte Sommer 2015 erstmalig Feuchtesonden installiert. Zunächst waren diese nicht vorgesehen, da mit höheren Ladetemperaturen gerechnet worden war, was eine präzise Luftfeuchtemessung schwierig gemacht hätte, insbesondere da zuerst Feuchtesensoren, die bei hohen Temperaturen beständig waren, gefunden werden mussten. Der installierte Feuchtelogger mass Temperatur und Luftfeuchte bei Luftaustritt aus dem Speicher (vor dem Kondensator). Eine weitere Feuchtesonde mass die Luftfeuchte im Speicher direkt über dem obersten rechten Betonmodul C8. Diese Installationen waren nur provisorisch und orientierend. Es ergab sich kein kompletter Datensatz, auch wegen eines Teilausfalls der Instrumente.

Vor dem zweiten Ladejahr (Sommer 2016) wurde die Anlage umgebaut und Variante II realisiert (Abb. 32). Die Lufttrocknung erfolgte nun durch Luftaustausch in einem Gegenstromlufttauscher WT₁. Solarkreis und Heizkreis blieben bestehen, allerdings erfolgte die Wasserentnahme aus dem Grosswassertank weiter oben bei (voraussichtlich) höherer Temperatur.





Die Pumpenleistung der Fluidpumpe P_2 (Heizkreis) blieb weitgehend konstant, diesmal konnte der Pumpenbetrieb aber zeitgesteuert via App (Mystrom) geregelt werden. Auch die Verdichter/Ventilatorleistung wurde vor Ort manuell eingestellt, der Betrieb wurde aber ebenfalls via App (Mystrom) durch Zeitsteuerung der Stromzufuhr geregelt. Auf den aufwändigen Kühlkreis konnte vollständig verzichtet werden, was die Anlage weiter vereinfachte. Diverse zusätzliche Feuchtelogger (RF) wurden installiert. Diese lieferten neben der relativen Feuchte auch die dazugehörige Temperatur. Diese waren temperaturbeständig (bis ca. 105°C). Zwei dieser Sensoren (RF_{T1} und RF_{T2}) waren webbasiert und gaben jederzeit via Internet Auskunft über die relative Feuchte (und Temperatur) innerhalb des Speichers und der zugeführten Frischluft.

Es wurden folgende Stoffflüsse erfasst:

- Heizfluss durch den Ettringitspeicher ($F1$)
- Kondensatwasser ($F3$)
- Wasserzugabemenge beim Entladen ($F4$)

Es wurden folgende Temperaturen messtechnisch erfasst:

- Temperaturen des Ettringitspeichers an verschiedenen Positionen $T_{s1..s6}$ und $\text{RF}_{T1/SA}$
- Lufttemperatur Speicher out T_{S7}
- Lufttemperatur Speicher in T_{S8} und RF_{SB}
- Temperatur der Zuluft T_7 und RF_{T2}
- Temperatur der Fortluft T_4 und RF_{SC}
- Temperatur am Ausgang des Heizkreises aus dem Ettringitspeichers T_2
- Temperatur am Eingang des Heizkreises in den Ettringitspeicher T_9
- Temperatur des Kondensats T_8

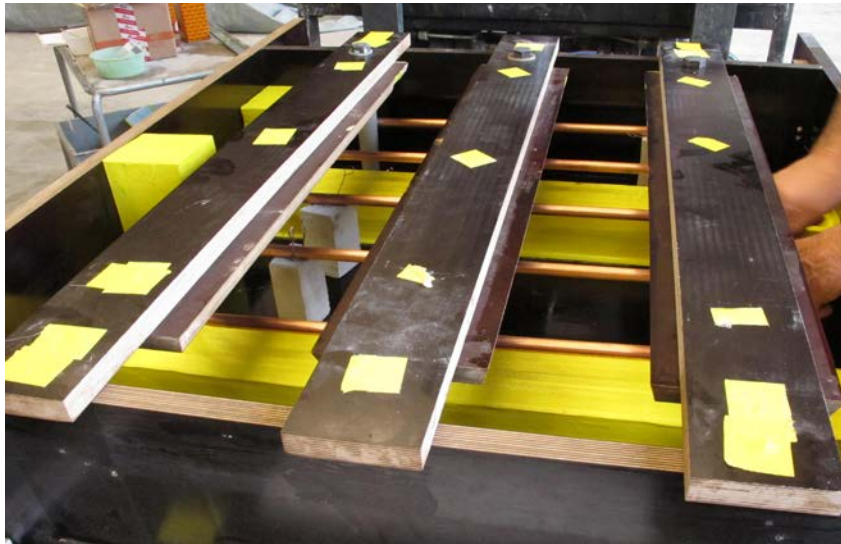
Es wurden folgende relativen Feuchten messtechnisch erfasst:

- Relative Feuchte an zwei Positionen innerhalb des Ettringitspeichers $\text{RF}_{T1/SA}$
- Relative Feuchte der Zuluft (zum Gegenstromplattentaucher) RF_{T2}
- Relative Feuchte der Fortluft RF_{SC}
- Relative Feuchte der Zuluft zum Ettringitspeicher RF_{SB}

6. Realisation

6.1 Herstellung der Speicherelemente aus CSA-Beton

Die einzelnen Betonmodule wurden an der Empa in Dübendorf hergestellt. Dazu wurden spezielle Schalungen aus Holz gefertigt, welche die verschiedenen Aussparungen zum Transport, dem Anschluss der Tauscherschlaufen und der Wasserzugabe bei der Entladung bereits beinhalteten. Die vorgefertigten und mit den Gewindeanschlüssen versehenen einzelnen Tauscherschlaufen (Abb. 33e) wurden in diesen Schalungen platziert (Abb. 33a). Der Betonmischer (Abb. 33b) wurde entgegen der üblichen Vorgehensweise zuerst mit Wasser befüllt, anschliessend wurden CSA-Zement und Gips zusammen beigegeben. Dazu kamen nachher die Fasern. Dann wurde alles zusammen ca. 1 Minute gemischt. Diese sehr spezielle Mischreihenfolge verhinderte die Verklumpung der Pulver und erlaubte eine sehr gute Durchmischung. Das sehr fließfähige Gemisch wurde sodann in die Schalung geleitet (Abb. 33d). Eine Verdichtung war unnötig. Die Oberfläche des befüllten Schalung wurde manuell nachbearbeitet, damit sie möglichst glatt war. Beim Abbinden wurde die Form sehr heiss und ein Teil des Wassers verdampfte. Die Form wurde nach einem Tag ausgeschalt. Damit eine sehr gute Stapelfähigkeit gegeben war, wurden die Module später noch parallel geschliffen. Bis zum Transport wurden die Module dann in einem Klimaraum bei 20°C/90%RF gelagert. Die fertig gestellten Module sind in Abbildung 34 gezeigt.



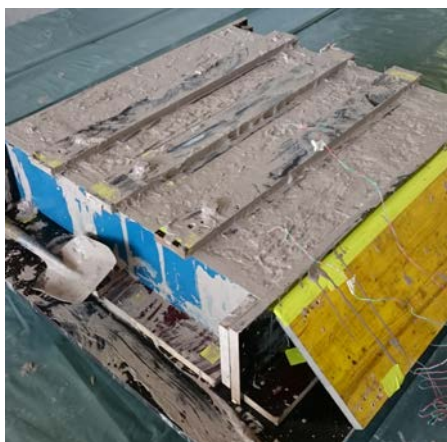
a)



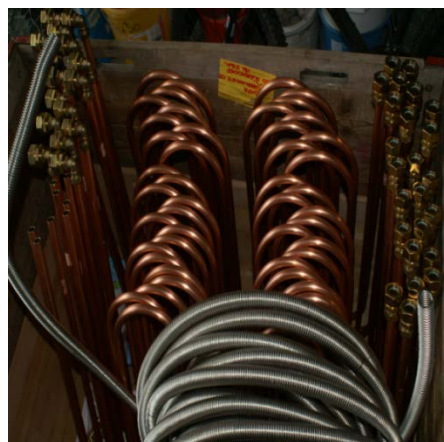
b)



c)



d)



e)

Abb. 33

Herstellung der Betonmodule a) Schalung mit eingebetteter Wärmetauscherschleife b) Betonmischer c) Einbringen des Betons d) befüllte Schalung e) Tauscherschlaufen.

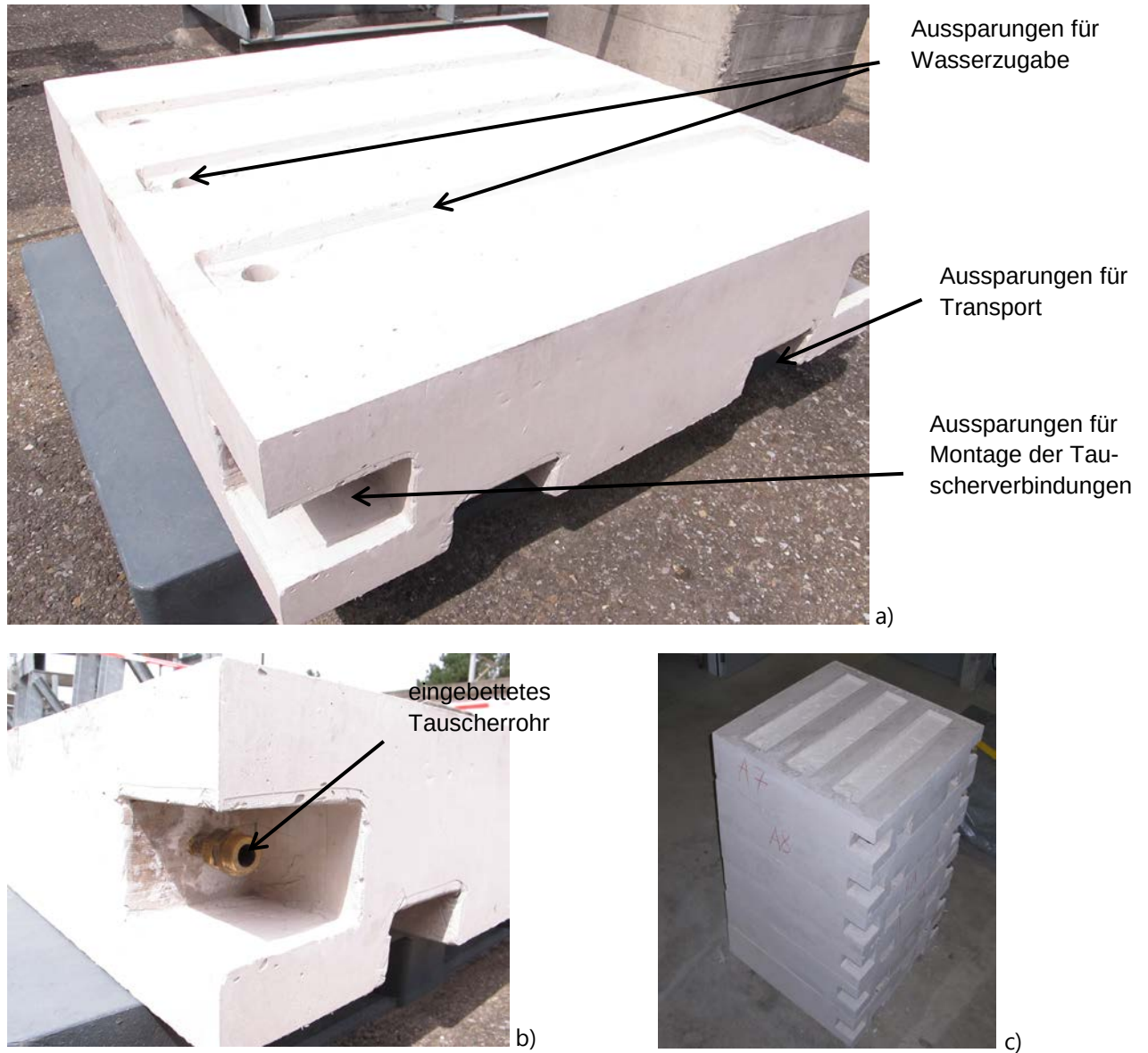


Abb. 34 Fertige erhärtete Elemente a) Modul mit Aussparungen für Wasserzugabe (oben) und Verbindung der Tauscherschlaufen (seitl.) sowie Transport (unten) b) Anschluss Tauscherschlaufe c) aufgestapelte Module.

6.2 Bau vor Ort

Der Ettringitspeicherprototyp wurde in Seelisberg (UR) mit bestehender Kollektoranlage (Abb. 35a) errichtet, die einzelnen Betonelemente aber an der Empa in Dübendorf produziert, wo auch das restliche Material bereitgestellt wurde. Der Transport des Baumaterials war problemlos. Die Betonmodule wurden zu Stapeln von jeweils vier Elementen lose geschichtet. Vor Ort wurde zuerst die thermische Bodendämmung aus Foamglas (ca. $3 \times 1 \text{ m}^2$) auf einer Drainageschicht verlegt (Abb. 35b). Der Garagenboden wie auch die verwendeten Materialien waren für die aufzunehmenden Lasten (max. 4 t/m^2) ausreichend fest. Die Wärmedämmung zur Garagenecke wurde in Glaswolle (12 cm Dicke) ausgeführt. Die Stahlblechelemente der wasserdichten Innenhülle wurden zunächst als gegen vorne offener Kasten gebaut (Abb. 35c). Leider erwiesen sich die teils sehr grossen Bleche mit abgekanteten Rändern als recht unhandlich, konnten aber dennoch verbaut werden. Problematisch war insbesondere, dass sie trotz Abkantungen immer noch sehr flexibel waren. Besonders instabil erwies sich das Dach, welches als reines Blech ausgeführt war. Wesentlich besser verhielten sich in dieser Hinsicht die stirnseitig verwendeten Wannen. Stabil wurde die „Stahlkiste“ erst mit deren Zusammenbau. Einfacher wäre wohl die Verwendung kleinerer, stabilerer Stahlelemente in Form von Wannen gewesen. Deutlich zu favorisieren, auch hinsichtlich der Kosten, sind Folienbasierte oder bauliche Lösungen. Da der Speicher in einer Raumecke positioniert werden musste, wurde dieser Teil auf die Wärmedämmung (bedeckt mit einem Blech wegen besserer Gleitfähigkeit) geschoben (Abb. 35d). Insbesondere da das Element vorne noch geöffnet war und so noch nicht seine volle Stabilität erreichte, war dies mit grossen Anstrengungen verbunden. Generell würde sich der Bau einer Innenhülle im Falle eines freistehenden Speichers, der von allen Seiten zugänglich ist, wesentlich vereinfachen. Die Betonmodule wurden gemäss separatem Bauplan zu jeweils vier Elementen geschichtet und vormontiert, das heisst die Wärmetauscherschlaufen entsprechend deren Position durch Fittings und flexible Wellschläuche miteinander verbunden (Abb. 35e&f), so dass sie schliesslich in Serie verbunden waren. Mit dem Gabelstapler wurden diese Vierermodulblöcke dann innerhalb der Stahlinnenhülle platziert (Abb. 35g&h). Gleichzeitig wurden die Thermoelemente zur Temperaturerfassung verlegt. Die unterste Lage wurde auf eine hitzebeständige Drainagematte gestellt. Zwecks Anschluss der Tauscherschlaufen an den Grosswasserspeicher wurden längere flexible Wellschlauchrohre beim Vor- und Rücklauf des Heizkreises montiert. Luftrohre zur frontseitigen Lufteinblasung und der oberen Luftentnahme wurden installiert. Zudem wurden die Wasserrohre zur Einleitung von Frischwasser bei der Entladung angebracht. Die Stahlinnenhülle wurde dann von aussen angebracht und verschlossen (Abb. 35i). Es ergab sich schliesslich eine sehr stabile geschlossene Hülle. Durch entsprechende Öffnungen im oberen Bereich wurden die flexiblen Wellschläuche des Heizkreises und die Luftrohre nach aussen geführt. Die Luftfeuchtesensoren wurden erst in einer späteren Projektphase bei den Sichtfenstern installiert. Danach wurde die frontseitige Wärmedämmung angebracht und mit Wellblech verkleidet (Abb. 35j). Schliesslich wurden die verwendeten Apparate - Ventilator, Pumpe und Kondensator - installiert und der Luft- und Heizkreis geschlossen. Schliesslich wurde noch der Kühlkreis zur Kühlung des Kondensators (1. Jahr) und eine Kleinstpumpe zur Sammlung und Messung (via Flussmeter) des Kondensats installiert. Im zweiten Jahr wurde der Kühlkreis mit dem Kondensator vollständig entfernt und durch einen Gegenstromlufttauscher ersetzt (Abb. 35k).



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)



j)



k)

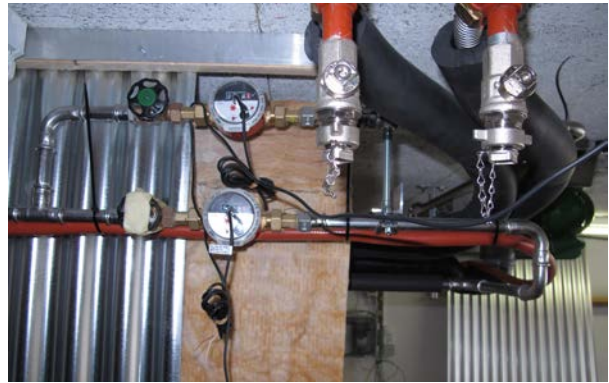
Abb. 35

Installation des Prototypen vor Ort a) bestehende Kollektoranlage b) thermische Boden- und Eckendämmung c) Vormontage Innenhülle d) Platzierung der Innenhülle in der Raumecke e) Anlieferung Betonmodule f) Vormontage von jeweils 4 Modulen g) Platzierung der Module h) fertig montierte Betonmodule mit Flexschlauchanschlüssen i) geschlossene Innenhülle mit installiertem Ventilator und Kondensator (Variante 2015) j) Wärmedämmung und Wellblechverkleidung k) Endmontage Luftrohre (Variante 2016).

Zur messtechnischen Erfassung wurden Thermoelemente (Abb. 36a) und Flussmeter (Abb. 36b) angebracht und an einen Datenlogger angeschlossen. Im zweiten Ladejahr wurden zudem Feuchtesensoren installiert. Die Anlage wurde angesichts der grossen Distanzen zwischen Beobachtungsort Dübendorf und Seelisberg generell internettauglich gemacht. Einerseits konnten die Messwerte via Internet abgerufen werden, andererseits konnte die Anlage (partiell) aus der Ferne gesteuert werden. Dies gelang durch einen entsprechend webbasierten Anschluss der Stromversorgung (www.mystrom.ch). Dadurch konnte der Ventilator und die Umwälzpumpe des Heizkreises zeitgesteuert und webbasiert geregelt werden. Der Internetzugang wurde durch mit dem lokalen WLAN verbundenen Kleinroutern ermöglicht. Die Anlage präsentierte sich entsprechend in zwei Varianten: Die erste Variante (Sommer 2015) ist in Abbildung 37a) abgebildet. Im Frühling 2016 wurde die Anlage umgebaut und messtechnisch erweitert. Der Kondensator wurde ersetzt (Abbildung 37b)). Die Zuluft zum Gegenstromtauscher wurde der Garage entnommen (Ersatz durch Frischluft von aussen). Die Fortluft wurde ausserhalb des Hauses abgeleitet. Zur Luftzirkulation reichte dabei ein einziger Ventilator aus, da der Luftkreis dicht realisiert war. Die Kondensatmenge wurde weiterhin erfasst.



a)



b)



c)



d)

Abb. 36 Installation der Messtechnik a) Anschlüsse Thermoelemente an Datenlogger b) Flussmeter c) Feuchte/Temperaturlogger (2016) d) WLAN basierte Datenübertragung und Potentiometereinheit zur Regelung der Ventilator Drehzahl.

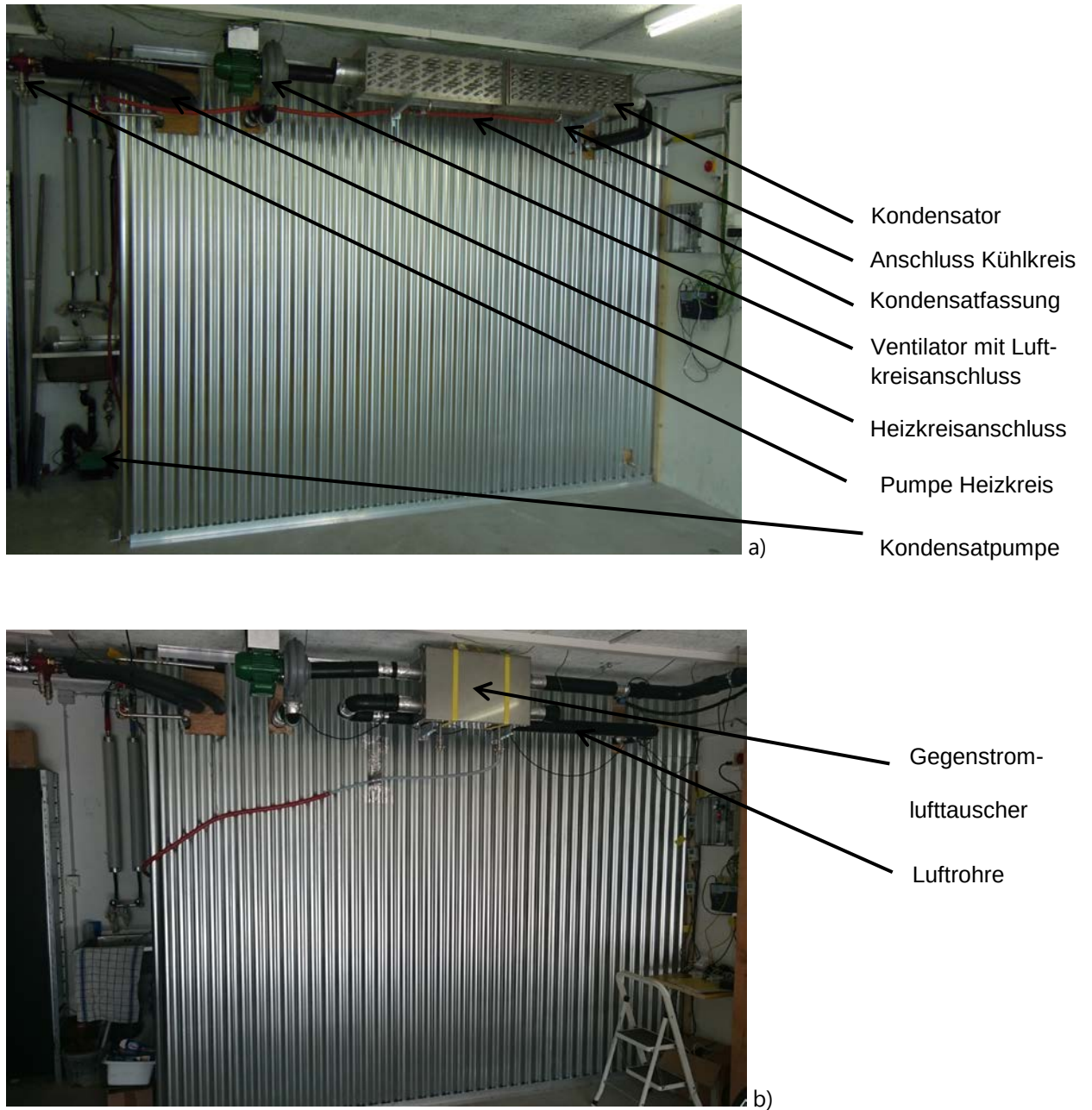


Abb. 37 Fertig installierte Prototypenanlage a) Variante Sommer 2015 mit Kondensator
b) Variante Sommer 2016 mit Gegenstromtauscher.

7. Resultate

7.1 Ladeperiode I (2015)

In der ersten Ladeperiode wurde der Ettringitbetonspeicher erstmalig erwärmt. Die Module waren bei 90%RF/20°C nach der Herstellung vorkonditioniert worden. Ein typisches Aufheizverhalten ist in Abbildung 38 wiedergegeben. Infolge verschiedener Anpassungen beim Kühlkreislauf des Kondensators konnte der Ladebetrieb (Trocknung) des Speichers erst im Juli durchgehend aufgenommen werden. Der Grosswasserspeicher lieferte dabei zunächst eine Heizkreisvorlauftemperatur von über 80°C. Zwischen Vorlauftemperatur (TS9) und Rücklauftemperatur (TS2) des Heizkreises ergab sich zunächst eine Temperaturdifferenz von mehr als 15 °C, welche sich dann aber rasch auf unter 5°C reduzierte. Einerseits stieg die Rücklauftemperatur rasch an und erreichte schon nach wenigen Stunden ein zwischenzeitliches Maximum, andererseits fiel gleichzeitig die Vorlauftemperatur um fast 10 °C. Diese geringe Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf ergab eine Heizleistung von durchschnittlich nur ca. 1-3 kW.

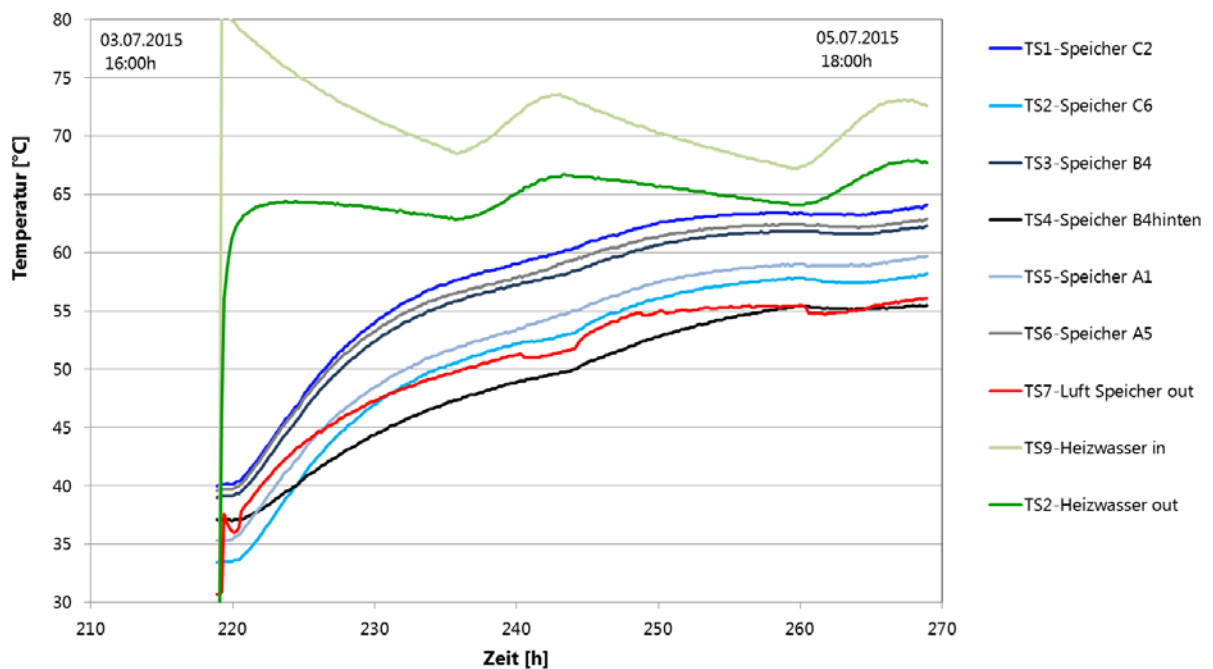


Abb. 38 Aufheizen des Ettringitspeichers in der ersten Versuchsperiode (2015).

Dabei ergeben sich deutliche Tag/Nachtunterschiede. In der hier gezeigten Erwärmungsphase erwärmte sich der Speicher zunächst rasch mit ca. 2°C/h, so dass Temperaturen über 50°C (auch bei Start ab 20°C) innerhalb eines Tages erreicht werden. Dies zeigt deutlich, dass der limitierende Faktor zur Erreichung hoher Speichertemperaturen zunächst nicht die Verdampfung des Wassers ist, sondern die Dimensionierung der Wärmetauscher und/oder die Wärmequelle. Anzumerken ist, dass das

Kapillarwasser bei Temperaturen von 50°C bereits entfernt werden kann, die involvierten Diffusionsprozesse aber langsam ablaufen. Der Luftkreis war in dieser Zeit aktiv, was sich daran äussert, dass das in der hinteren Mitte platzierte Thermoelement TS4 die tiefsten gemessenen Speichertemperaturen anzeigte. Die vom Kondensator zurückfliessende Luft strömt wie beabsichtigt der rückseitigen Innenhülle entlang nach oben und erreicht das obere Luftreservoir (TS7) fast mit Betontemperatur. Die Temperaturdifferenzen innerhalb des Speicher reduzieren sich mit zunehmender Betriebsdauer auf unter 5°C (Abb. 39). Auffällig ist die starke Temperaturabsenkung der Heizvorlauftemperatur TS9 (und auch der Rücklauftemperatur TS2) in der Nacht und bei Schlechtwetterphasen (zum Beispiel 1200h – 1400h, Abb. 39). Bei Dauerbetrieb erreichte die Heizvorlauftemperatur selten mehr als 75° C und erst nach einer sehr sonnigen Woche ausnahmsweise über 80°C (1600h, Abb. 39). Die Maximaltemperatur der Betonmodule erreichte dabei 70°C. Dies ist deutlich zu wenig um den Ettringit vollständig und rasch zu entwässern. Zwar galt der Sommer 2015 generell als sehr heisser Sommer, in Seelisberg ergab sich allerdings oft auch etwas dunstiges und gewittriges Wetter, und der Sommer wurde auch immer wieder von Schlechtwetterphasen durchbrochen.

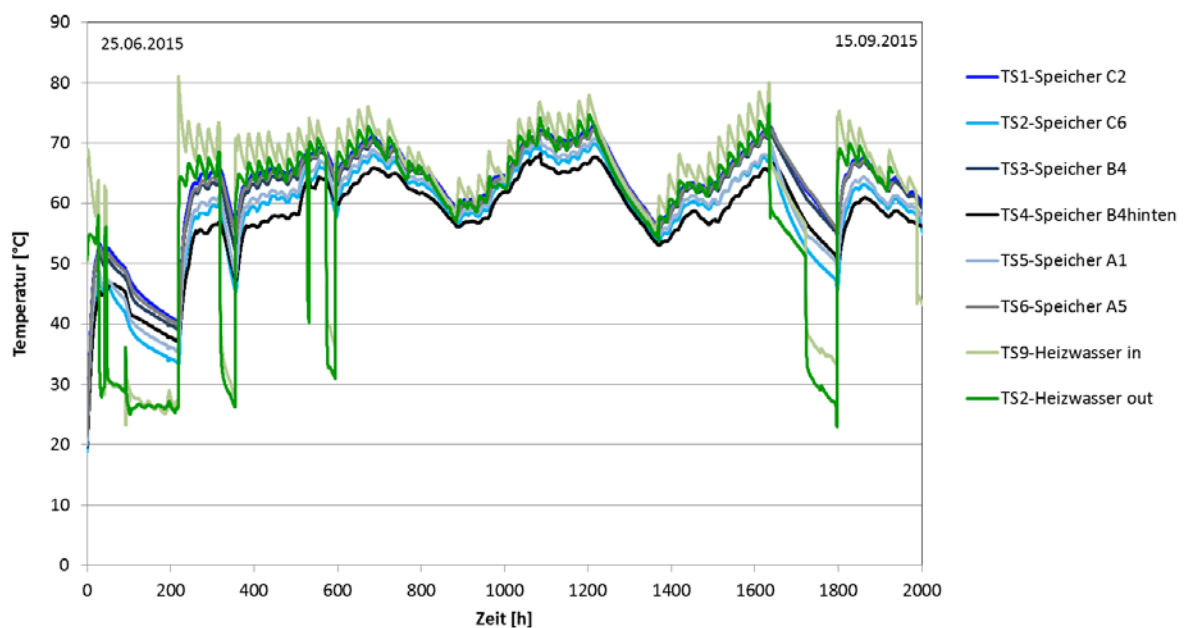


Abb. 39 Speichertemperaturen im Ladebetrieb Variante I (Sommer 2015).

Es wurden verschiedene Versuche unternommen, durch Regulierung der Heizleistung die Speichertemperatur zu erhöhen. In der ersten Ladephase musste diese Regelung noch manuell erfolgen, so dass keine spezielle Tag/Nacht-Regelung möglich war. Abschaltversuche haben aber gezeigt, dass es sinnvoll wäre, den Grosswassertank auf möglichst hoher Temperatur zu halten, also in der Nacht und bei Schlechtwetter die Anlage stillzulegen. Die thermischen Verluste sind verkraftbar, respektive die höhere Wärmeübertragungsrate der Wärmetauscherschlaufen bei höherer Vorlauftemperatur erhöhen die Speichertemperatur bei Neustart rasch wieder. Ausgiebig wurde das Verhalten bei verschiedenen Luftstromvolumina und unterschiedlicher Kühlleistung des Kühlwasserkreises untersucht.

Beides konnte im ersten Jahr nur manuell geregelt werden. Die Regelung des Luftstroms erfolgte über eine Potentiometereinstellung. Die Luftgeschwindigkeit im Luftkreisrohr wurde mittels eines Anemometers gemessen und mit der Potentiometereinstellung geeicht. Das Luftstromvolumen betrug zwischen ca. 50 – 60 m³/h. Es gelang aber nicht, die Lufteintrittstemperatur deutlich zu erhöhen, ohne die Kondensationswassermengenleistung gleichzeitig stark zu reduzieren. Bei ausreichender Kondensation nahm die Lufteintrittstemperatur in den Speicher fast die Temperatur des Kühlwassers (15–25°C je nach Zeitpunkt) an. Der „Kondensator“ funktionierte also wie ein Luftkühler. Konsequenterweise kühlte diese Zuluft auch den Speicher und deren relative Luftfeuchte dürfte bei annähernd 100% gewesen sein. Dennoch gelang es, grosse Mengen an Kondensat von insgesamt über 1000 Liter aufzufangen (Abb. 40). Die relativen Luftfeuchten im Speicher (hier aus Temperaturwerten errechnete Ausgleichsfeuchten, da in dieser Versuchsperiode noch nicht systematisch erfasst !) lagen aber mit über 20% noch recht hoch, so dass eine effiziente Entwässerung des Ettringits bei den gleichzeitig eher moderaten Speichertemperaturen schwer vorstellbar ist und zunächst vor allem Kapillarporenwasser abgeführt worden sein dürfte.

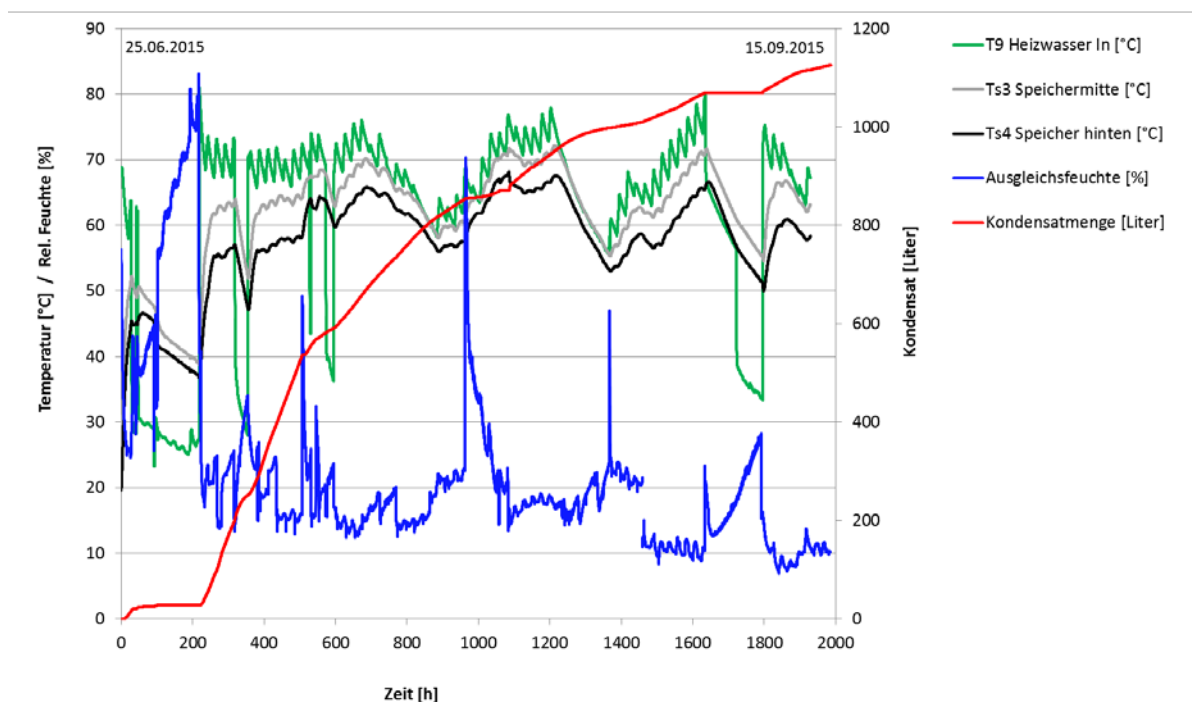


Abb. 40 Luftfeuchten und Kondensatmengenentwicklung in der ersten Ladeperiode (Sommer 2015, Variante 1).

Ab ca. 1450 h wurde daher ein Versuch mit einem veränderten System unternommen (Abb. 41). Die Luftzirkulation wurde unterbrochen, indem zunächst ein Teil der Luft, später das ganze Luftvolumen

mit der Garagenluft getauscht wurde, indem die Luftrohre gegen die Garage hin geöffnet wurden. Es erfolgte noch keine Wärmerückgewinnung. Die nun (partiell) ebenfalls gemessenen Luftfeuchten bei der aus dem Speicher strömenden Luft (kurz vor dem Kondensator gemessen) und innerhalb des Speichers begannen sich rasch zu senken, ebenso die berechnete Ausgleichsfeuchte im Speicher. Der Austausch der Speicherluft durch Frischluft aus der Garage war somit hinsichtlich Speicherentfeuchtung wesentlich effizienter als die Kondensatorlösung. Die eingeblasene Luft aus der Garage war zwar etwas wärmer als zuvor die vom Kondensator zurückströmende Luft, jedoch trotzdem trockener. Diese Erfahrungen führten schliesslich zum Umbau der Anlage 2016.

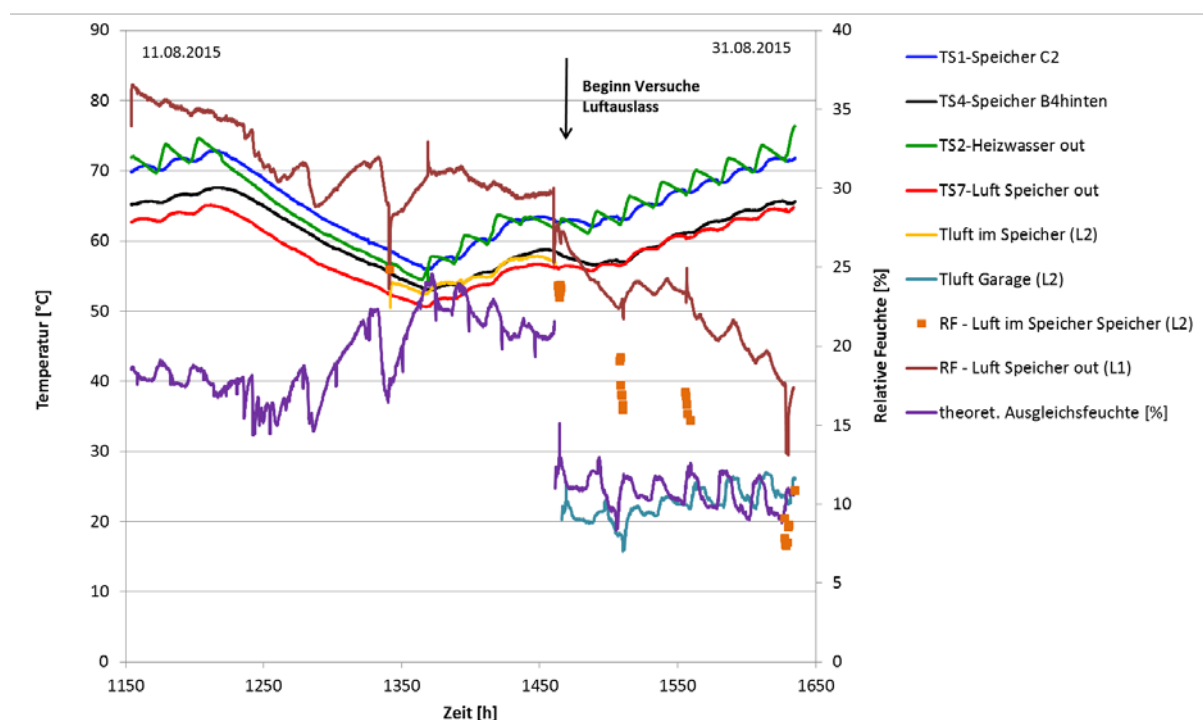


Abb. 41 Umstellung Kondensator zu Luftaustausch im Ladebetrieb Variante I (Sommer 2015).

Basierend auf Flussmeterdaten des Heizkreises und der Kondensatmenge (sowie teilweise der entsprechenden Ablesewerte, da die kontinuierliche Erfassung leider nicht lückenfrei blieb) sowie der verschiedenen Temperaturablesewerte konnten verschiedene Wärmemengen abgeschätzt werden. Es ergaben sich Schätzwerte für den Wärmeintrag in den Speicher, die thermischen Verluste, die Verluste durch Kühlung des Luftkreislaufs, sowie die durch das Kondensat abgeführte Kondensationswärme. Weitere Verluste wie die Abstrahlung bei den Zuleitungsrohren konnten nicht abgeschätzt werden.

Aus der Bilanz zwischen zugeführter Heizwärme, Verlusten, Kondensationswärme und sensibler (kapazitiver) Erwärmung liess sich eine Ladungsenergie, also die theoretisch im Speicher (latent !) gespeicherte Wärmemenge errechnen (Abb. 42). Diese fiel mit etwa 180 kWh bescheiden aus. Der Heizaufwand hierfür war beträchtlich. Neben den erwarteten hohen Verdampfungswärmen (Wärmever-

lust Kondensation), ergaben sich aber insbesondere sehr hohe thermische Verluste, welche deutlich höher als die prognostizierten Werte waren. Interessant ist die Beobachtung, dass ab einem gewissen Zeitpunkt die Ladeenergie und die Verdampfungsenergie weitgehend parallel verlaufen. So sank die Speichertemperatur nach der Unterbrechung der Heizpumpe (und der Luftzirkulation) am Ende der ersten Ladeperiode (2015) relativ rasch (Abb. 43). Zudem ergaben sich auch durch die Luftkühlung sehr hohe Verluste. Ein Teil der Verluste ist in Abbildung 44 mittels Wärmebildkamera sichtbar gemacht. Die zweistufige Temperaturschichtung des Speichers könnte darauf zurückzuführen sein, dass die kalte Luft vorne unten in den Speicher zurückgeblasen wurde. Sowohl thermische Verluste als auch Luftkühlverluste sollten deutlich reduziert werden. Im Nachhinein hätte eine Verbesserung der Wärmedämmung des Speichers (12 cm) einen deutlich zu grossen Aufwand bedeutet.

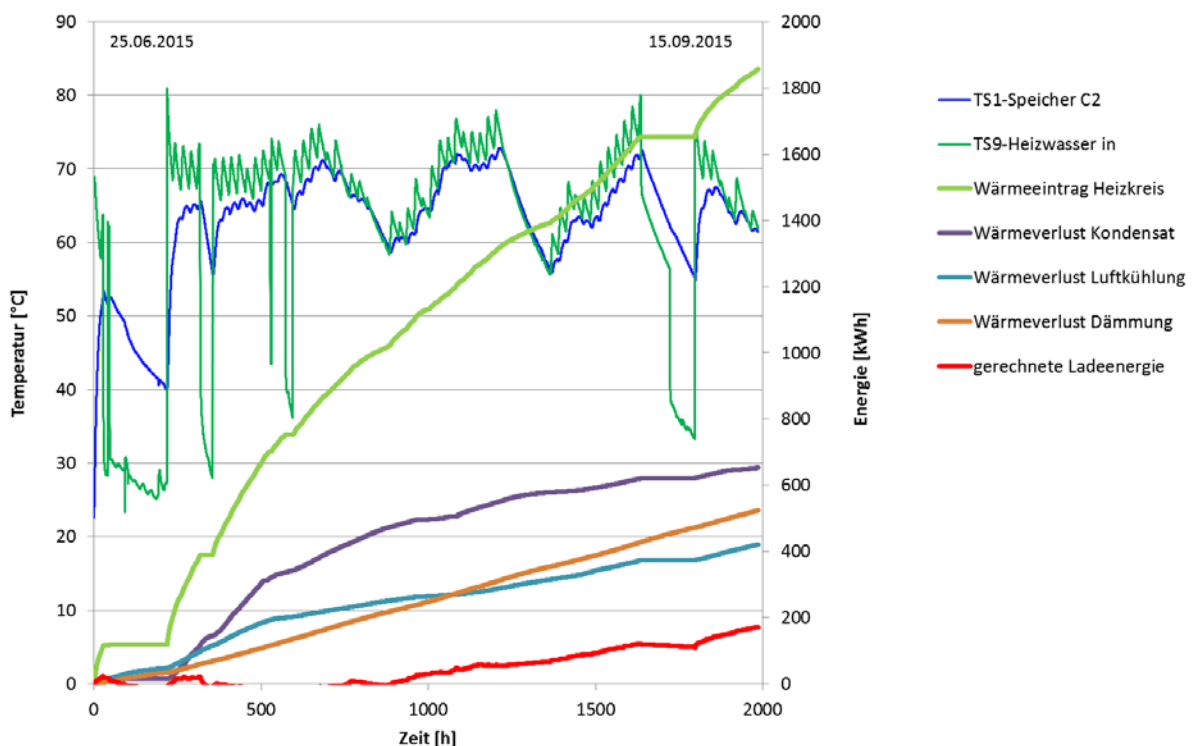


Abb. 42 Wärmebilanzen in der ersten Ladeperiode (Sommer 2015, Variante 1).

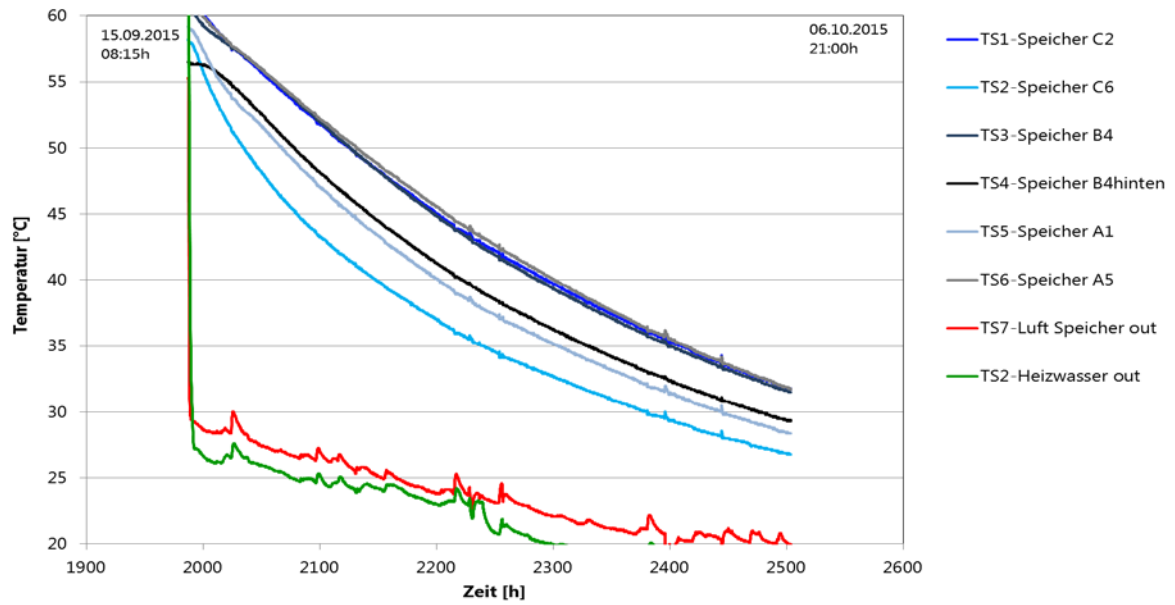


Abb. 43 Temperaturentwicklung in der Abkühlphase nach der ersten Ladeperiode. (Sommer 2015, Variante 1).

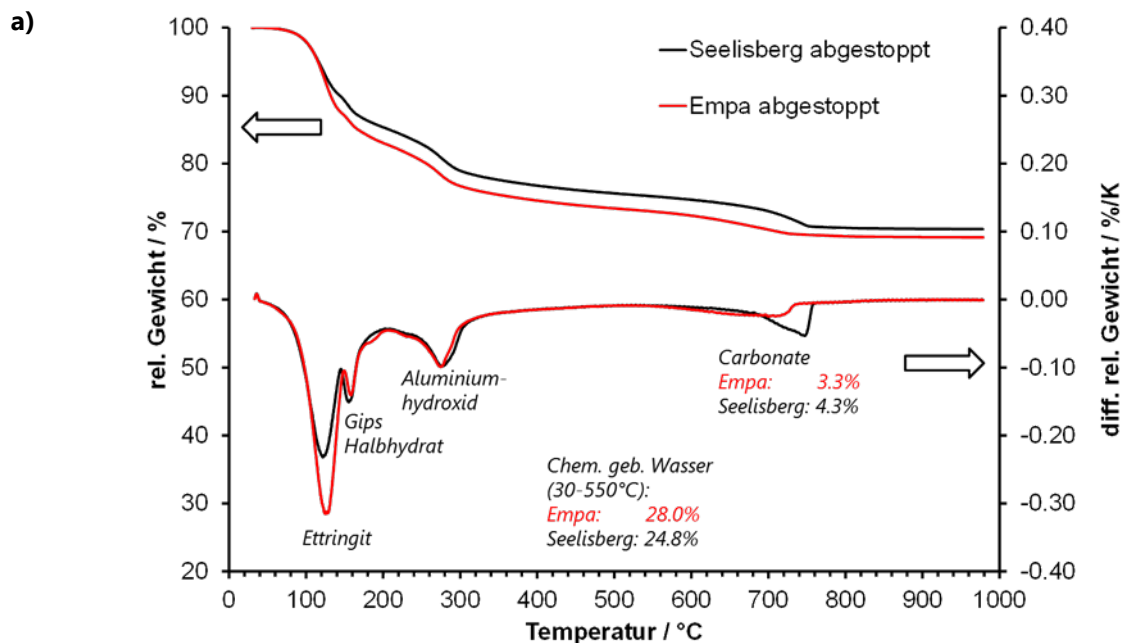


Abb. 44 Ursachen der thermischen Verluste.

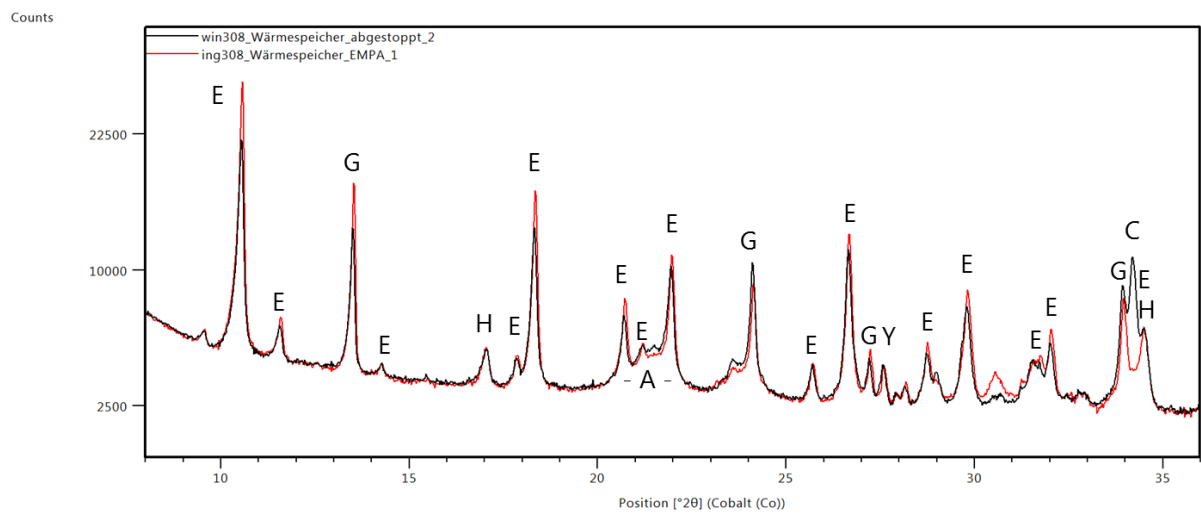
Am Ende der Ladeperiode wurde im Herbst 2015 an der vorderen linken oberen Ecke (beim Sichtfenster) eine Materialprobe entnommen. Röntgendiffraktion (XRD) und Thermogravimetrie zeigten dass im Vergleich zu einer im Labor gelagerten ungetrockneten Probe der Ettringitanteil der Seelisberg-Probe nur leicht reduziert war. Demnach wurde der Ettringit in dieser Ladeperiode wie aufgrund der Feuchte- und Wärmebilanzdaten erwartet nur geringfügig entwässert (Abb. 45).

Dennoch wurde entschieden, am 12. Januar 2016 einen ersten Entladeversuch durchzuführen. Dabei wurden dem Speicher gesamthaft 150 Liter Wasser (Wassertemperatur ca. 10°C) zugeführt, welches diesen via die Kaskadenaussparungen jeweils auf der Oberseite der Module befeuchtete. Die Bewässerung erfolgte wie geplant. Das Wasser befüllte die ausgesparten Rinnen und floss jeweils auf die nächst tiefer gelegene Stufe (Abb. 46). Wie eine Rechnung ergab, konnten mit dieser Wassermenge alle Rinnen gefüllt werden. In der Tat floss am Wasserauslass im untersten Teil des Speichers kein Überschusswasser ab. Die Befüllung funktionierte somit planmässig. Hingegen blieb die in der ersten Ladeperiode erreichte Temperaturerhöhung von 2-3 °C sehr bescheiden (Abb. 47). Dies zeigt, dass der Speicher nach der Ladeperiode 2015 nur in etwa einen zu einer bei knapp über 50°C getrockneten Probe äquivalenten Trocknungsgrad aufwies. Zumindest das Kapillarwasser konnte somit vollständig entfernt werden.

Die in den (vor dem Entladeversuch) entnommenen Proben gespeicherte Wärmemenge wurde schliesslich mittels eines isothermen Wärmeflusskalorimeters auf nur gerade 4.3 kWh/m³ bestimmt.



b)



E=Ettringit, G = Gips, H = Halbhydrat, A = Aluminiumhydroxid, Y = Ye'elimit

Abb. 45

a) Thermogravimetrie (TGA) und b) Röntgendiffraktion (XRD) im Probenvergleich Probenahme Seelisberg nach Ladung Sommer 2015 vs. ursprüngliche Probe (Sommer 2015, Variante 1).

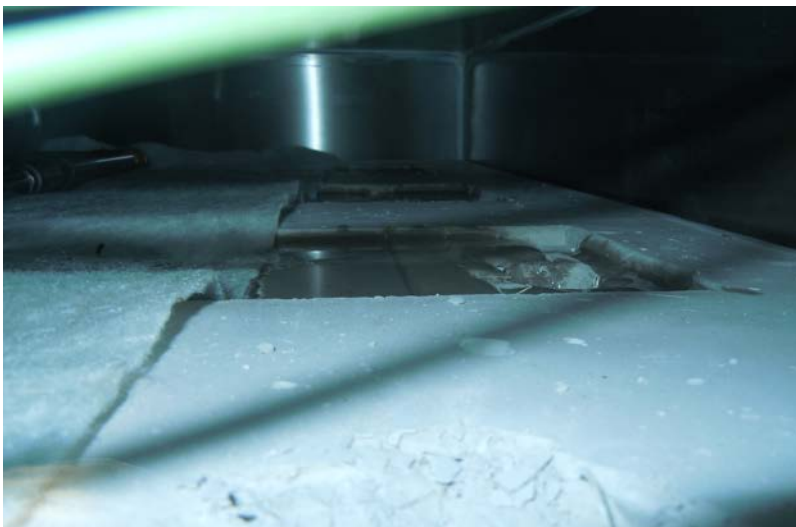


Abb. 46

Wasserzugabe im Speicher.

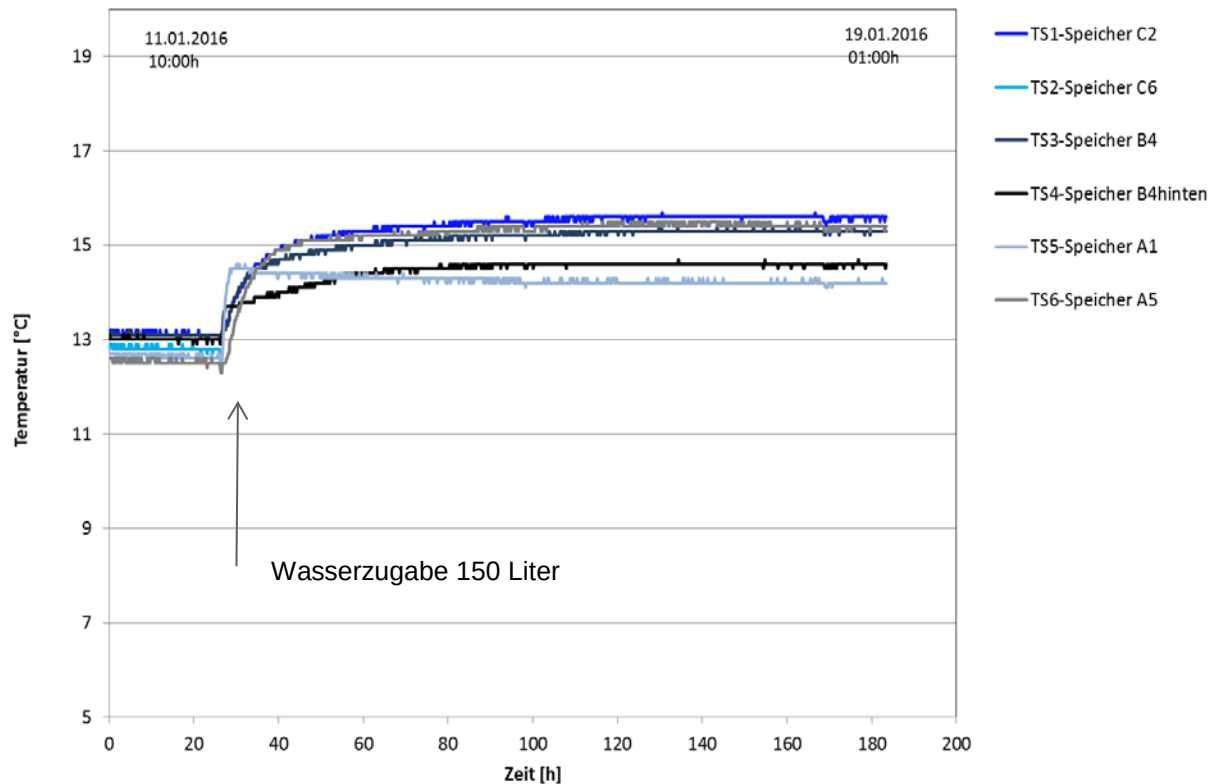


Abb. 47 Erster Entladeversuch (Winter 2015/2016, Variante 1).

7.2 Ladeperiode II (2016)

Im Frühling 2016 wurde die Anlage umgebaut. Der Kondensator wurde durch einen Gegenstromtauscher ersetzt, der Kühlwasserkreislauf entfiel. Verschiedene neue Feuchtelogger wurden installiert. Die Stromzufuhr zur Heizpumpe und zum Ventilator wurde zeitgesteuert (webbasiert) betrieben. Das Luftstromvolumen und auch das Heizflussvolumen mussten weiterhin manuell eingestellt werden. Daher konzentrierte man sich bei der Regelung der Anlage in verschiedenen Versuchen hauptsächlich auf die Zeitsteuerungseinstellungen.

Trotz des bis Mitte Juli eher „schlechten Sommers“, zur Veranschaulichung der Sonnenleistung vor Ort ist die PV-Ausbeute der ebenfalls neu installierten Anlage wiedergegeben, gelang es recht schnell höhere und vor allem auch länger anhaltend hoch bleibende Heizvorlauftemperaturen zu erreichen (Abb. 48).

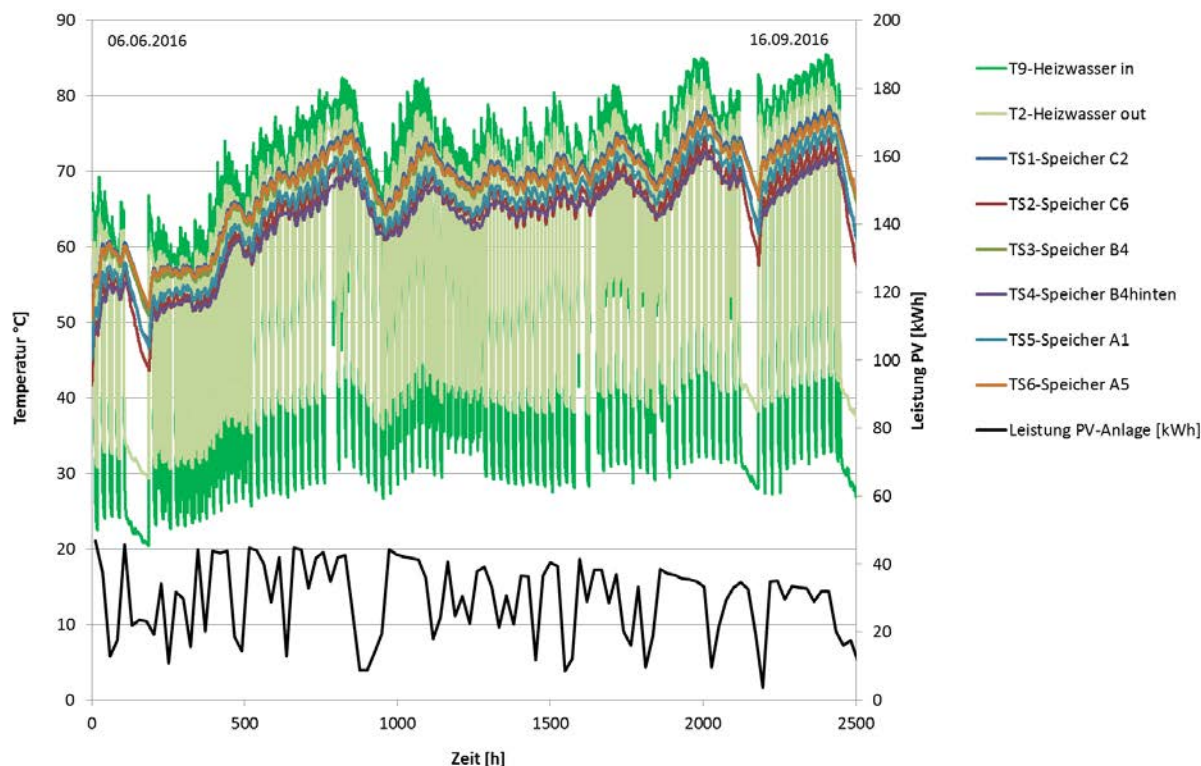


Abb. 48 Speichertemperaturen im Ladebetrieb Variante 2 (Sommer 2016).

Der periodische Abfall der Temperaturen ist auf die zeitlich gesteuerte Unterbrechung des Heizflusses zurückzuführen. Einerseits wurde nachts unterbrochen, andererseits musste verhindert werden, dass sich die Garage nicht zu stark erwärmt, so dass auch am Nachmittag Ventilator und Heizpumpe partiell unterbrochen wurden. Die Temperaturen im Speicher erreichten zwar mehr als 70°C, die höchsten Temperaturen (Speichertemperatur 78°C) wurden aber erst Mitte September nach einer ausgesprochenen Schönwetterlage erreicht. Generell waren zur Erreichung hoher Speichertemperaturen mehrere Sonnentage hintereinander notwendig. Der Speicher kühlte sonst zu schnell aus, allenfalls spielte dabei aber auch das Verhalten des Grosswassertanks, der als Wärmequelle angeschlossen wurde, eine Rolle (siehe Diskussion). Ein typischer Tagesverlauf ist im Detail in Abbildung 49 abgebildet. Deutlich ist das Ein-/Ausschalten von Pumpe und Ventilator anhand deren elektrischen Leistungsaufnahme erkennbar. Die Temperaturen innerhalb des Energiespeichers sind durch die zeitweilige Unterbrechung wenig beeinflusst, da bei Pumpenabstellung (zumeist) auch die feuchtigkeitsabtransportierende Luftzirkulation unterbrochen war.

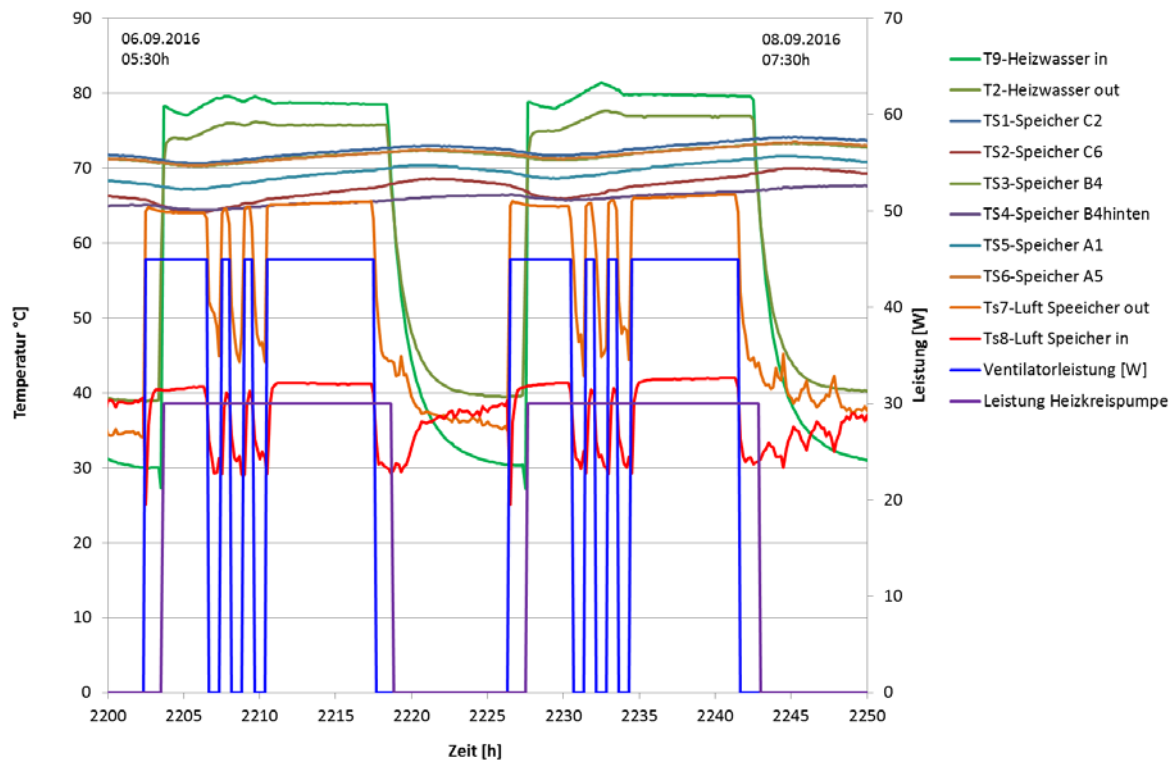


Abb. 49 Speichertemperaturen im Detail Variante 2 (Sommer 2016).

Dank der Wärmerückgewinnung bei der Luft konnten höhere Lufteinlasstemperaturen von bis 45°C erreicht werden (Abb. 50). Die Lufttemperaturen innerhalb des Speichers erreichten somit nicht ganz die Temperaturen der Betonmodule. Hier bestünde entsprechend weiteres Dimensionierungspotenzial beim Gegenstromtauscher und dessen Wärmedämmung. Hingegen wurde die Fortluft stark abgekühlt und war somit nicht mehr deutlich wärmer als die Zuluft. Deren Luftfeuchtigkeit war teilweise aber sehr hoch, bis zu 100% (Abb. 51). Trotzdem wurden von der ortsansässigen Bevölkerung keinerlei Dampf-fahren oder andere störende Einflüsse der direkten Luftausblasung rapportiert. Die im Speicher gemessenen Luftfeuchten, wie auch die gerechnete Ausgleichsfeuchte, konnten sehr tief (unter 10%) gehalten werden. In dieser zweiten Variante konnte die aus dem Speicher abgeführte Wassermenge nicht direkt in Form von Kondensat gemessen werden, sondern musste aus der Differenz zwischen den absoluten Luftfeuchten (errechnet aus den gemessenen Temperaturen und relativen Luftfeuchten) der Zuluft und der Fortluft, der Kondensatmenge des Gegenstromtauschers und des Volumenstroms des Luftaustausches berechnet werden. Die Erfassung der Kondensatmenge war diesmal recht ungenau, da der Gegenstromtauscher nicht dicht war und gelegentlich etwas Wasser auf den Boden tropfte. Allerdings handelte es sich dabei nur um Mengen in der Grössenordnung einiger Liter.

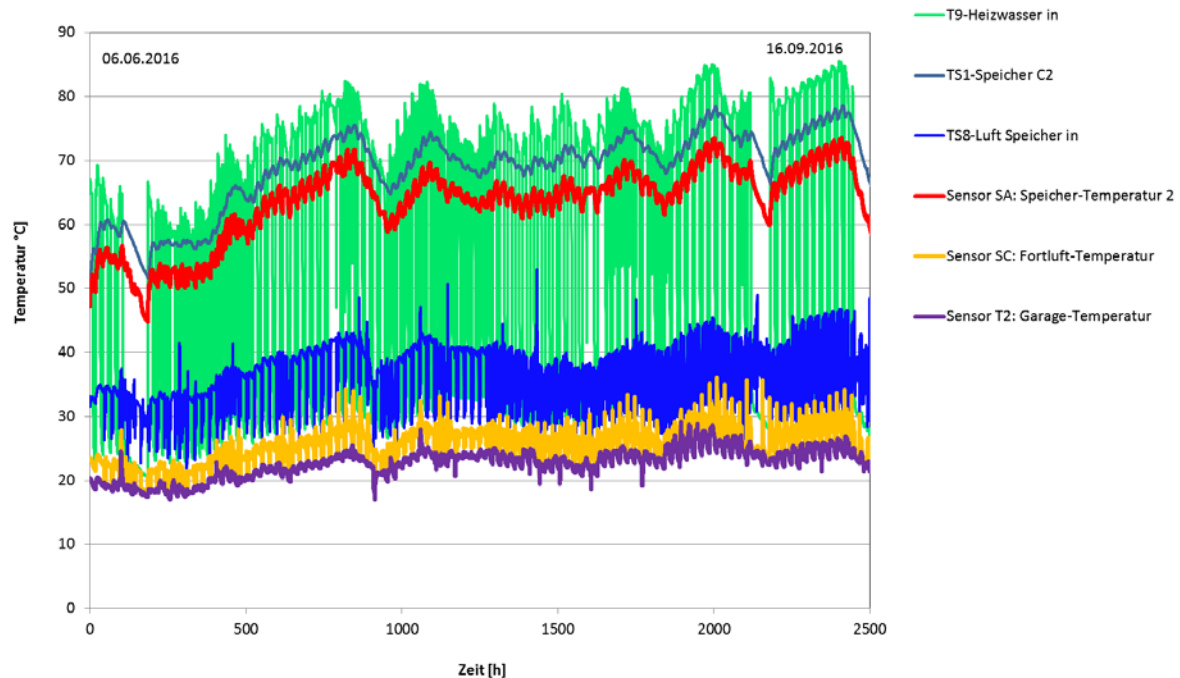


Abb. 50 Temperaturen Fort- und Zuluft (Sommer 2016, Variante 2).

Deutlich verbessert wurde in dieser Ladeperiode die Erfassung der relativen und der daraus berechneten absoluten Luftfeuchten an verschiedenen Positionen (Abb. 51 und 52). Insbesondere die minimalen Luftfeuchten sanken mit zunehmender Ladedauer, was die Bedingungen für eine Entwässerung des Ettringits (Umwandlung zu Meta-Ettringit) deutlich verbesserte. Die Maximalwerte, also jene Werte, die sich beim Einschalten von Ventilator und Pumpe ergaben, blieben jedoch über grosse Zeiträume recht konstant und sanken erst gegen Ende der Ladeperiode. Dies bedeutet, dass im Vollbetrieb der Anlage bei laufendem Ventilator die Luft sehr effizient entfeuchtet wurde. Durch Optimierung der Zeitsteuerung konnten die Speichertemperaturen etwas höher und die minimalen relativen Luftfeuchten im Speicher tiefer gehalten werden. Der Nachschub an Feuchtigkeit war aber anscheinend der limitierende Faktor. Da gleichzeitig die Temperatur im Speicher selbst bei Schönwetterperioden nur sehr langsam anstieg, waren es aber weniger die Diffusionsprozesse, welche hemmend wirkten, sondern der im Vergleich zur Kollektorleistung allzu hohe Energiebedarf des Gesamtsystems mit der puffernden Wirkung des Grosswasserspeichers und den verschiedenen Energiesenken. Insbesondere fallen die thermischen Nachtverluste ins Gewicht. Die absoluten Feuchtegehalte in der Speicherluft blieben trotz höherer Temperaturen infolge des ungenügenden Feuchtenachschubs tief. Dementsprechend war die pro m^3 getauschte Luft abgeführte Feuchtemenge eher niedrig, so dass die Entfeuchtung entsprechend langsam voranschritt.

Die berechnete abgeführte Wassermenge am Ende dieser Ladeperiode war kleiner als im Vorjahr, jedoch darf nicht vergessen werden, dass nach der ersten Ladeperiode (2015) dem Speicher nur gerade 150 Liter Wasser zugeführt wurden, sich somit nach der zweiten Ladeperiode letztlich ein deutlich höherer Trocknungsgrad eingestellt haben dürfte.

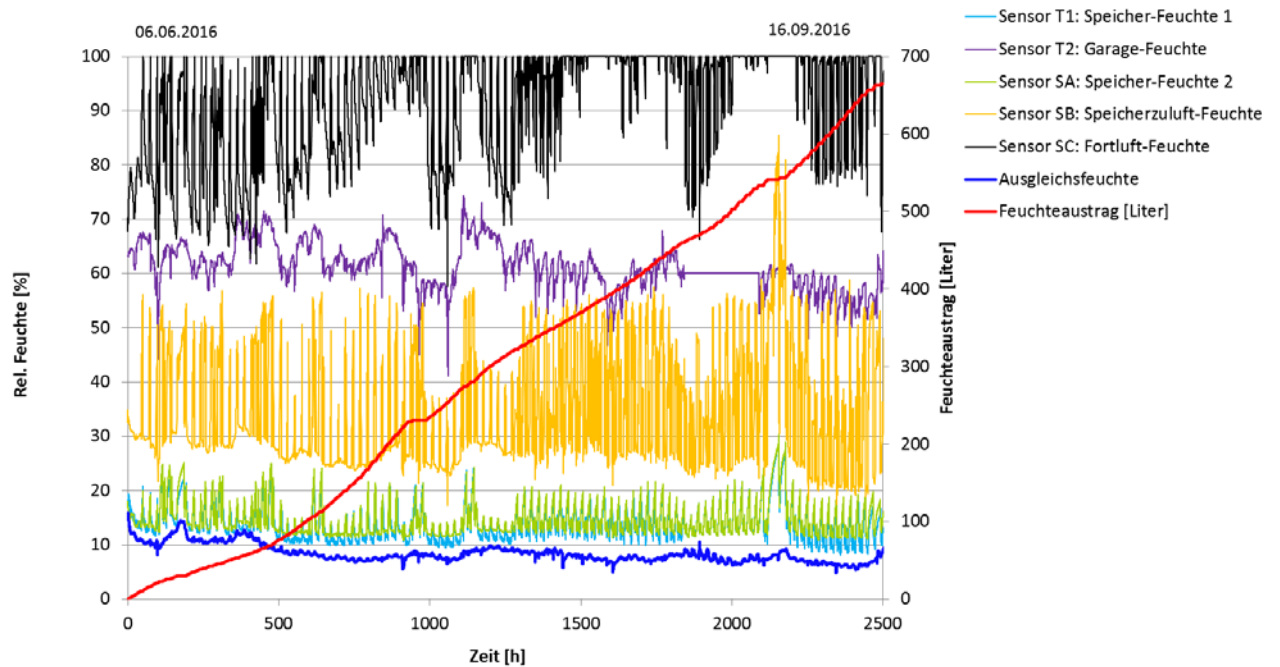


Abb. 51 Relative Luftfeuchten Fort- und Zuluft (Sommer 2016, Variante 2).

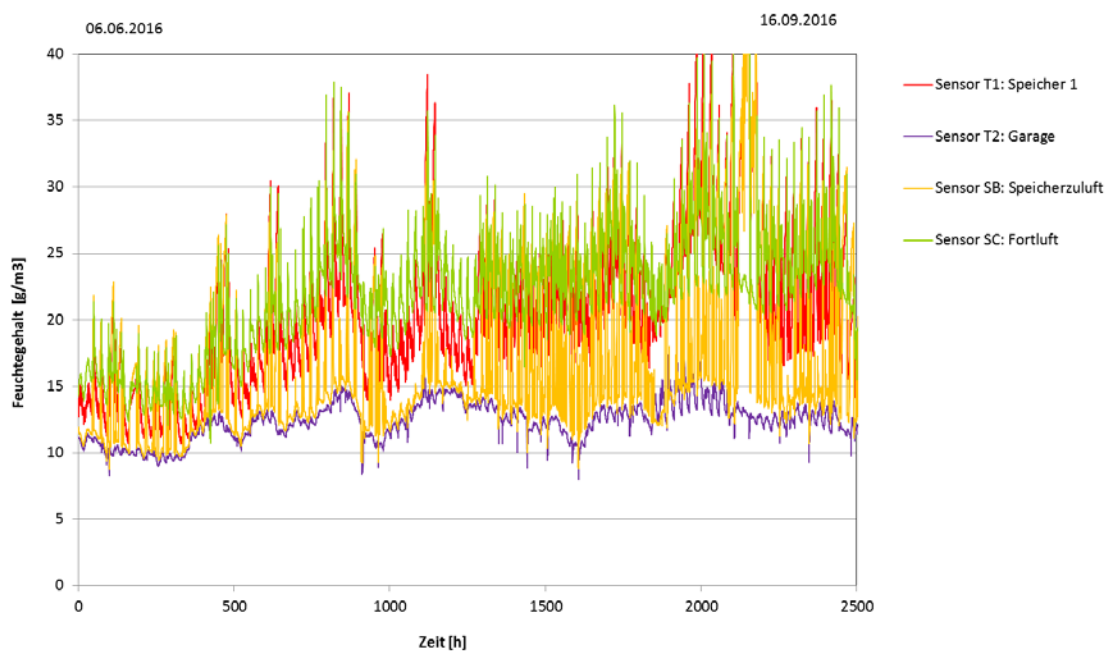


Abb. 52 Absolute Luftfeuchten Fort- und Zuluft (Sommer 2016, Variante 2).

Wiederum konnte der Wärmeeintrag und die entsprechenden Verluste bilanziert werden (Abb. 53). Deutlich geringer fielen die Verluste infolge Luftaustausch aus. Hier wirkte sich die Wärmerückgewinnung im Gegenstromtauscher positiv aus. Trotz der zeitlichen Beschränkung erreichte der Wärmeeintrag in den Speicher sehr hohe Werte. Dies ist den generell höheren Heizvorlauftemperaturen und die grössere Spreizung zwischen Vorlauf- und Rücklauf zu verdanken. Dies lässt den Schluss zu, dass eine noch striktere zeitliche Beschränkung des Pumpenbetriebs (und damit auch der Einsparung von elektrischer Pumpenenergie) kein Nachteil sein muss. Aus den Wärmebilanzen lässt sich wiederum eine Ladeenergie abschätzen. Bedenkt man, dass der Speicher nach der ersten Ladeperiode und dem ersten Sättigungsversuch mit 150 Litern Wasser immer noch relativ trocken war, ist anzunehmen, dass in der zweiten Versuchsperiode ein deutlich höherer Ladezustand erreicht wurde. Interessant ist auch der Vergleich zwischen gerechneter (latenter) Ladungsenergie und der für die Verdunstung des Wassers aufgewendeten Energie (Wärmeverlust Kondensat). Diese verlaufen hier ebenfalls (wie schon in der zweiten Hälfte der ersten Ladeperiode) weitgehend parallel.

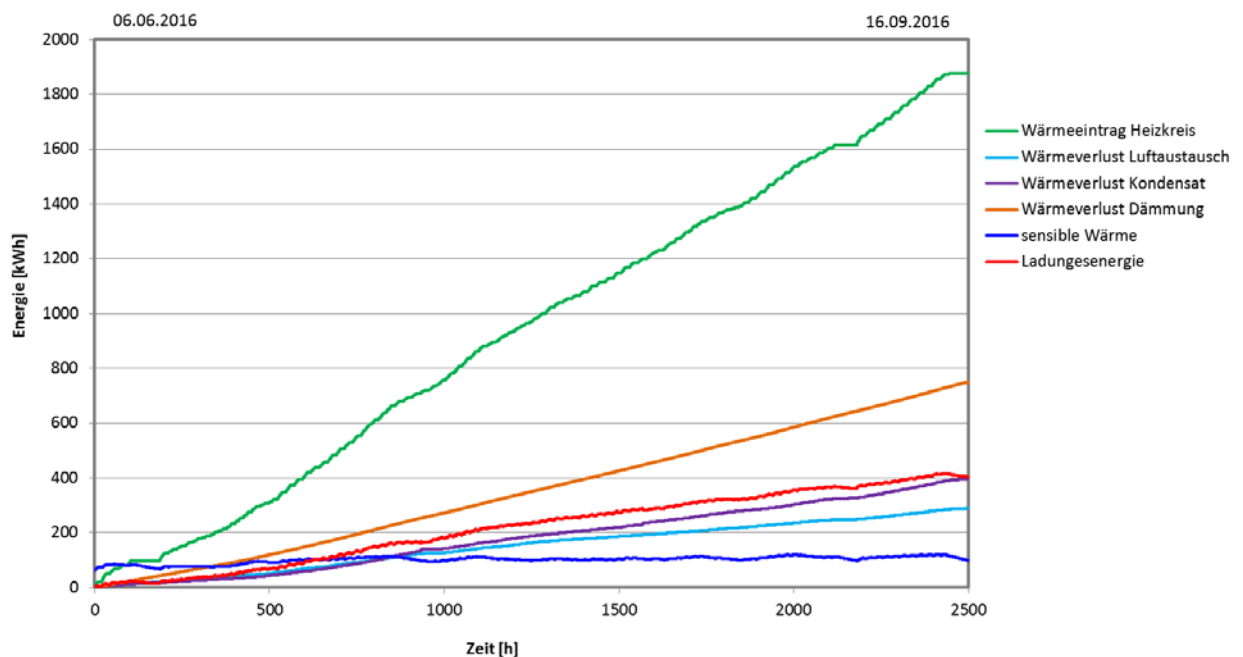


Abb. 53 Wärmebilanzen in der zweiten Ladeperiode (Sommer 2016, Variante 2).

Der Speicher wies nach einer mehrwöchigen Erkaltungsphase bei einer Temperatur von 20°C eine relative Luftfeuchte von 10.9% auf. Dies lässt auf eine gute Konservierung des Trocknungszustands und auf eine gleichmässige Trocknung schliessen. Es kann daraus auch geschlossen werden, dass in dieser Zeit keine Feuchtigkeit in den Speicher eingetreten ist.

Wiederum wurde am Ende der Ladeperiode 2016 an der vorderen linken oberen Ecke (beim Sichtfenster) eine Materialprobe entnommen. Die Röntgendiffraktionsanalyse (XRD) zeigt, dass der Ettringit nach dieser Ladeperiode (Ladezustand Winter 2016) zwar stärker, aber immer noch nicht vollständig entwässert worden ist (Abb. 54). Andererseits ist auch keine Bildung von schädlichen Phasen und auch keine zusätzliche Carbonatisierung erkennbar.

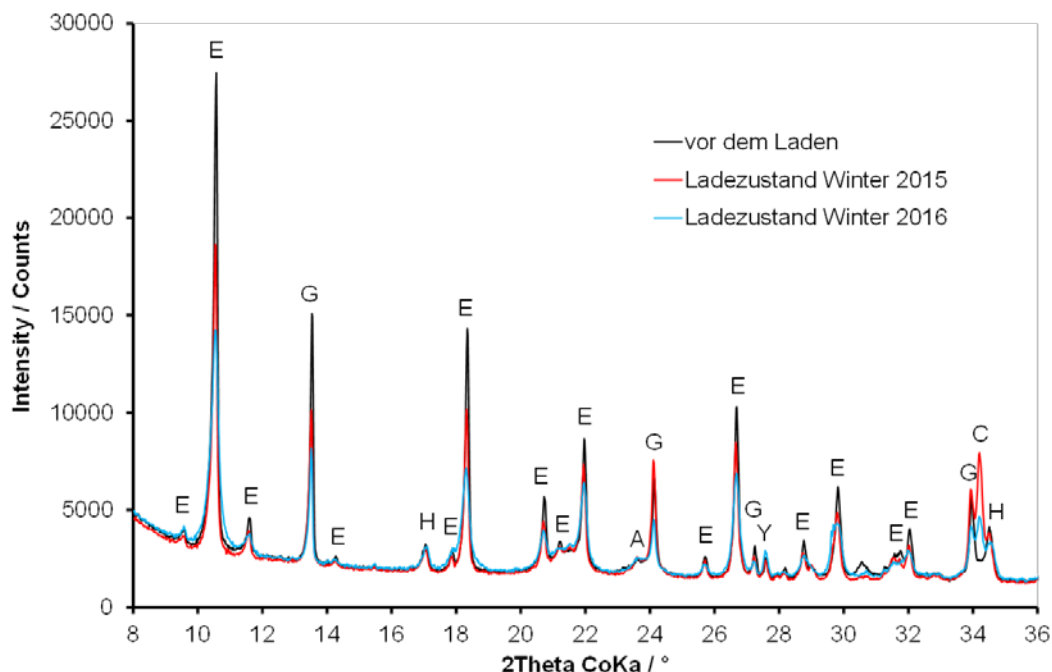


Abb. 54 Mittels XRD bestimmte Phasenzusammensetzung des Zementsteins im Vergleich zwischen Proben vor der Ladung, nach der Ladeperiode 2015 und nach der Ladeperiode 2016. (E=Ettringit, G=Gips, A= Anhydrit, Y=Ye'elimit, H=Hemihydrat, C=Calcit).

Beim Entladeversuch wurde Wasser mit einer Temperatur von ca. 8.5°C zunächst in zwei Schritten à je 120 Liter zugegeben. Bei Versuchsbeginn wies die Luft im Speicher (Abb. 55) eine Temperatur von 14°C und eine relative Feuchte von 10.4% auf. Die relative Feuchte stieg rasch auf fast 100%, der Temperaturanstieg betrug hingegen nur wenige Grad. Nach zwei Stunden erfolgte eine weitere Wasserzugabe von 110 Litern, davon flossen ca. 10 Liter beim Bodenablass wieder aus dem Speicher. Zuvor war kein Überschusswasser festgestellt worden, das Wasser blieb also wie gewünscht in den Vertiefungen der Betonelemente liegen. Die Temperatur in der Speicherluft stieg danach nur langsam an, während die relative Feuchte sehr hoch (über 95% r.F.) blieb. Nach ca. 24 Stunden wurde aber-

mals 100 Liter Wasser zudosiert. Deutlich erkennbar ist der kurzzeitige Temperaturabfall infolge der Zugabe des kalten Leitungswassers. Die Temperatur erholte sich danach wieder etwas, blieb aber mit einem gesamten ΔT von nur ca. 10°C bescheiden. Die Temperaturerhöhung an den verschiedenen Messpositionen widerspiegelte dabei interessanterweise im Wesentlichen die beim Ladevorgang erreichte Reihengfolge der Höhe der Ladetemperaturen. Bei den Elementen C2 und A5 war sie am höchsten, dort wurden auch die höchsten Ladetemperaturen erreicht. Bei den Elementen A1 und C6 war sie dagegen am tiefsten entsprechend den etwas tieferen Ladetemperaturen.

Das System reagiert sehr träge auf die zur Verfügung gestellte Feuchtigkeit. Insbesondere war angesichts des geringen Abfalls der Luftfeuchtigkeit auch die Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft sehr bescheiden. Es stellt sich die Frage, ob die Dimensionierung der Module mit einer Höhe von 25 cm nicht deutlich zu optimistisch ausgefallen ist. Andererseits dürfte auch der Ladezustand immer noch deutlich zu gering gewesen sein. Die in den (vor dem Entladeversuch) entnommenen Proben gespeicherte Wärmemenge wurde schliesslich mittels eines isothermen Wärmeflusskalorimeters auf $9.7 \pm 3.5 \text{ kWh/m}^3$ bestimmt. Dies ist mit der Grössenordnung der Temperaturerhöhung im Einklang und widerspiegelt den nach wie vor ungenügenden Ettringit-Umwandlungsgrad nach dieser Ladeperiode.

Im Labor wurde eine (vor der Bewässerung) entnommene Probe zudem im Umluftofen zuerst bei 50°C und dann bei 60°C getrocknet. Während sich bei 50°C kein Masseverlust ergab, reduzierte sich die Probenmasse bei 60°C um ca. 4 Masse-%. Somit war der Ladezustand immer noch geringer als jener bei einer Ofentrocknung bei 60°C und die Ladedichte entsprechend Tabelle 7 immer noch gering.

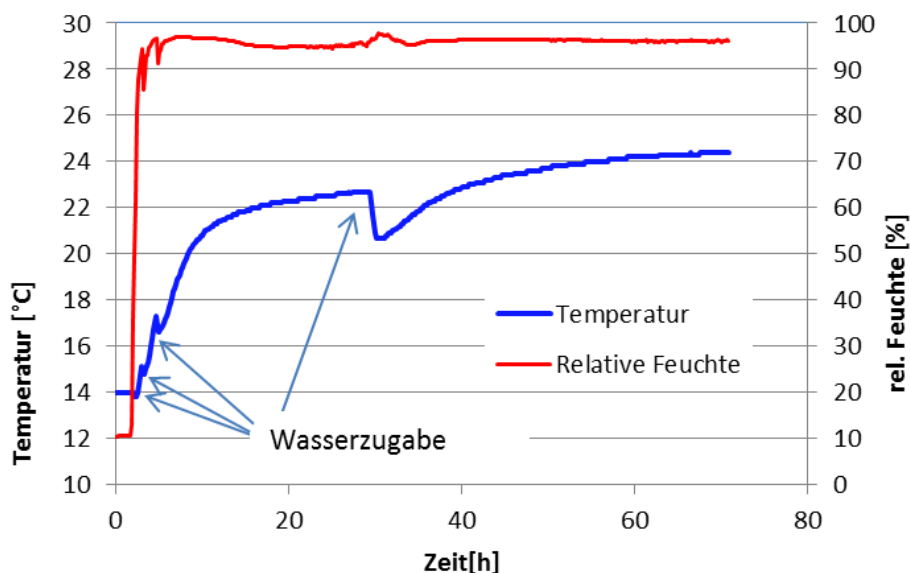


Abb. 55 Zweiter Entladeversuch (Winter 2016/2017, Variante 2). Temperatur und relative Feuchte in der Luft im Speicher.



8. Diskussion und weitere Optionen

8.1 Anlage Seelisberg

In Seelisberg konnte ein modular aus vorgefertigten Betonelementen aufgebauter Ettringitspeicherprototyp realisiert werden. Die modulare Bauweise hat sich bewährt. Da die Luftfeuchte im Speicher nach der zweiten Ladeperiode über lange Zeit bei ca. 11% (Raumtemperatur) konserviert werden konnte, sind allfällige Dichtelecks, welche sich allenfalls durch den Zusammenschluss der Tauscherschlaufen der einzelnen Module ergeben hätten, auszuschliessen.

Der Umbau von einem System mit Feuchtigkeitskondensation auf eines mit Luftaustausch erwies sich als vorteilhaft. Einerseits konnte auf die aufwändige Kondensatkühlung verzichtet werden, andererseits konnten tiefere Luftfeuchten beim Lufteintritt realisiert werden. Durch den Gegenstromlufttauscher konnte ein Teil der Abwärme zurückgewonnen werden, hingegen wurde die im Dampf enthaltene Verdampfungsenthalpie so nicht genutzt. Es hat sich gezeigt, dass durch den Luftaustausch ausreichend Feuchtigkeit aus dem Speicher abgeführt werden konnte. Ebenso war die Dimensionierung der Wärmetauscherschlaufen ausreichend, um den Ettringitspeicher zu erwärmen.

Für eine effizientere Be- und Entfeuchtung des Speichers sollte eine deutlich grössere Speicher Oberfläche zur Verfügung gestellt werden. So sollten die verwendeten Betonmodule Perforierungen aufweisen oder zum Beispiel analog dem einfachen Laborprototypen (Abb. 18) aus einzelnen dünneren, gerillten Platten aufgebaut sein.

Allerdings erwies sich die Erreichung hoher Speichertemperaturen (grösser als die erreichten Maximalwerte von 78°C) als sehr schwierig. Limitierend erwies sich die Tatsache, dass der Ettringitspeicher nicht direkt an die Kollektoranlage angeschlossen, sondern nur indirekt via einem Grosswasserspeicher aufgeheizt wurde. Dieser wirkte stark puffernd, musste er doch jeweils selbst zuerst aufgeheizt werden und limitierte die maximale Einspeisetemperatur. Die Wasserrücklauftemperatur vom Kollektor war zudem auf 90°C limitiert. Die Warmwasserentnahme zur Heizung des Betonspeichers erfolgte im mittleren Höhenbereich des Grosswasserspeichers. Eine Entnahme im oberen Bereich war nicht realisierbar, hätte aber sicherlich zu höheren Vorlauftemperaturen geführt. Die gesamten thermischen Verluste waren, auch wegen der langen Dauer der Ladeperiode, beträchtlich und die Dimensionierung der Stärke der Wärmedämmung des Betonspeichers erwies sich im Nachhinein als zu gering. Verluste ergaben sich auch bei der Luft, trotz Wärmerückgewinnung. Die Temperatur der wieder eingespeisten Luft war deutlich zu tief, was durch eine Wärmedämmung und stärkere Dimensionierung des Gegenstromtauschers aufgefangen werden könnte. Infolge dieser Verluste erwies sich der Kollektoreintrag in den Grosswasserspeicher als zu gering, respektive die Kombination Grosswasserspeicher und Betonspeicher als ungeeignet. Generell sollte daher die Kollektoranlage direkt eingebunden werden. Der aus praktischen Gründen in Seelisberg gewählte Weg ist nicht nur unnötig, sondern hat sich hinsichtlich der Erreichbarkeit hoher Temperaturen und effizienter Ladung negativ ausgewirkt. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der in Kapitel 2.4. besprochenen Beständigkeitsproblematik das Speichermaterial bei hohen Temperaturen (insbesondere Temperaturen über ca. 90°C) bereits vorgetrocknet sein muss. Ein zweistufiger Trocknungsprozess wäre demnach angebracht. Generell muss angestrebt werden, die Ladetemperaturen des Ettringitbetonspeichers auf über 100°C

zu erhöhen. Die höheren Temperaturen haben viele Vorteile. Einerseits könnte der Ettringit vollständig dehydriert werden, da bei Überschreitung des Siedepunkts von Wasser der Ettringit selbst bei hohen Dampfdrücken sein Kristallwasser verliert. Andererseits wäre der Wärmeeintrag effizienter und die involvierten Dampfdiffusionsprozesse deutlich beschleunigt. Generell ergäben sich dadurch deutlich kürzere Ladezeiten mit entsprechend geringeren thermischen Verlusten. Sollen diese hohen Temperaturen via Heizkreis des Ettringitspeichers realisiert werden, müsste dort das zirkulierende Wasser durch Solarfluid ersetzt werden und die Kollektoranlage direkt mit einbezogen werden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Vorheizung der zirkulierenden Luft. Insbesondere in der aktuellen Konfiguration Seelisberg wäre dies interessant und sollte realisiert werden.

In der Anlage in Seelisberg ergaben sich weitere Möglichkeiten zur Verbesserung, welche hier der Vollständigkeit halber erwähnt sein sollen. Die Regelung des Heizkreises sollte besser via Grosswasserspeichertemperatur statt einer reinen Zeitregelung erfolgen. Der Gegenstromlufttauscher sollte eher stärker (grössere Tauscherfläche) ausgelegt und thermisch isoliert werden. Der Ventilator sollte geräuscharmer sein. Die Wasserzugabe zur Entladung sollte durch ein Ventil gesteuert werden können und dosiert erfolgen.

8.2 Weitere Optionen

Teilentladung

Bei der Ladung eines nassen Ettringitspeichers müssen zuerst sehr grosse Wassermengen verdunstet werden. Dies benötigt eine grosse Menge an Energie in Form von Verdampfungswärme. Zunächst müssen dabei die Kapillarporen geleert werden, ohne dass überhaupt Energie gespeichert werden kann (Tabelle 7). Erst ab einer Trocknung bei Temperaturen über 50°C (Temperaturangaben beziehen sich auf eine Trocknung in einem Umluftofen, die Desorption von Ettringit ist eigentlich feuchte- und temperaturabhängig) erfolgt die eigentliche Speicherung von Wärme mit einer zunächst geringen Speicherdichte (50°C Trocknung im Umluftofen => Speicherdichte 6 kWh/m³). Interessant ist die Tatsache, dass beim verwendeten Speichermaterial ab einer Vortrocknung bei 60°C (rel. Feuchte ca. 8%) nur noch 55 Liter Wasser/m³ bis zur vollständigen Trocknung frei werden. Bei der Ladung muss danach also wesentlich weniger Wärme zur Verdampfung des Wassers aufgewendet werden. Unter diesem Gesichtspunkt macht es eigentlich wenig Sinn, das Kapillarporensystem des Ettringitspeicherbetons bei der Entladung komplett wieder zu sättigen. Eine Sättigung bis zu einem der Trocknung bei 50°C entsprechenden Sättigungsgrad wäre absolut ausreichend. Vorteilhaft wäre dies auch hinsichtlich chemischer Beständigkeit (Kap. 2.4) und der Verhinderung von Carbonatisierung. Zudem wären dann die Diffusionswege bei einer Ladung bereits offen. Alternativ könnte versucht werden, die Betonmischungen hinsichtlich geringerem Kapillarporengehalt zu optimieren, allerdings wären davon auch die Diffusionskonstanten ungünstig beeinflusst.

Sorptionsspeicher

Eine derartige Teilsättigung bei der Entladung wäre insbesondere bei der Verwendung von Wasserdampf zur Befeuchtung (Sorption) interessant. Dadurch liesse sich nicht nur die latente Energie zurückgewinnen, sondern zusätzlich auch noch die Verdampfungsenthalpie des zugeführten Dampfes.

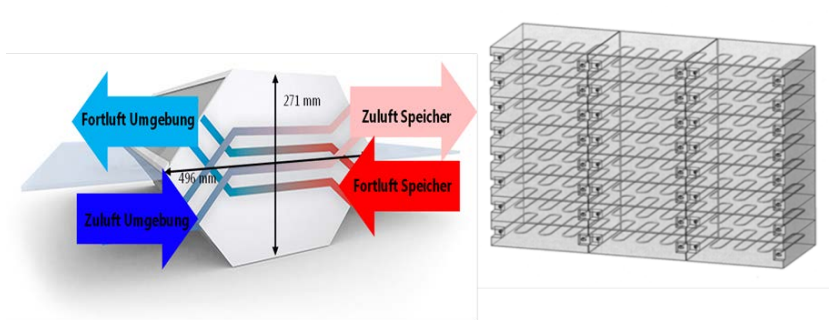


Diese beträgt 0.57 kWh/kg Wasserdampf. Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, einerseits ausreichend Wasserdampf zur Verfügung zu stellen, andererseits aber auch den Transport des Dampfes ins Materialinnere zu realisieren. Die Bereitstellung von grossen Dampfmen gen erweist sich als problematisch, da Wasser immer erst unter Energieaufwand verdunstet werden muss und eine technische Bereitstellung ist daher keinen Sinn macht. Es gilt, allenfalls schon vorhandene Dampfquellen zu nutzen. Ausreichend Feuchtigkeit steht prinzipiell in der Aussenluft zur Verfügung, allerdings in der Heizperiode nur bei tiefen Temperaturen und daher geringen absoluten Feuchtegehalten. Bei 5°C/70% r.F. sind dies nur 4.8 g/m³ bei einem Taupunkt von 0°C. Bei etwas höheren Temperaturen von 10°C/70% r.F. beträgt sie 6.6 g/m³ mit einem Taupunkt von 4.8 °C. In einem Einfamilienhaus fällt aber je nach Nutzung (insbesondere Bewohneranzahl) eine gewisse Menge an Feuchtigkeit in Form von Dampf durch Pflanzen, Dusche, Waschen etc. an. Unter der Annahme, dass dieser Wert ca. 0.3 kg/h (4 Personenhaushalt) beträgt, ergibt sich ein Rückgewinnungspotenzial von 0.17 kWh/h. In 3 Monaten (Dez/Jan/Feb, 2160 h) fielen ca. 630 kg an Wasserdampf an. Die dem entsprechende Kondensationswärme belief sich auf 360 kWh. Ein 3 m³ Speicher würde bei Zugabe diese Wassermenge entsprechend Tabelle 7 nur bis zu einer der Trocknung bei 50°C entsprechenden Sättigungsgrad gesättigt. Fast die gesamte latent gespeicherte Wärme würde dabei freigesetzt.

Der Temperaturhub wäre dann aber sehr gering, da die Dampfzufuhr über eine grosse Zeitdauer erfolgt. Die Wärme müsste aus dem Speicher, beispielsweise mittels einer Miniwärmepumpe (kleine Leistung, aber bei hohem COP), gepumpt werden. Da es sich beim Ettringitbeton um ein sehr feinporiges Material handelt, ist Kelvin-Kondensation schon bei 70% relativer Feuchte bedeutend. Die Speichertemperatur könnte sogar unter die Raumtemperatur abgesenkt werden (Temperaturabsenkung des Speichermaterials allenfalls unter den Taupunkt), um die Dampfaufnahme, durch Kondensation zu beschleunigen. Dabei darf der Nullpunkt des Betons (0° C) wegen möglicher Frosts chäden, und da Wasser als Transportmedium der Heizschlaufen verwendet wird, nicht unterschritten werden.

Bei einem Aufbau des Systems als Sorptionsvariante könnte durch die Schaffung zusätzlicher Oberfläche, insbesondere durch Perforation des Betons, allenfalls die Zugänglichkeit des Wasserdampf s erhöht resp. dessen Transportwege reduziert werden. Der grosse Vorteil gegenüber einer Wasserentladung (Seelisberg) bestünde vor allem auch im vereinfachten Systemaufbau. Durch reine Luftzirkulation (Ladung und Entladung) müsste ein solcher Speicher nur luft-, nicht aber wasserdicht gebaut werden. Insbesondere der Einsatz einer Mini-Wärmepumpe bei der Nutzbarmachung der gespeicherten Wärme hätte den Vorteil, dass sich durch die tieferen Speichertemperaturen keine thermischen Verluste ergeben würden. Eine technische recht einfache Möglichkeit wäre es, als Speicherzuluft die feuchtwarme Fortluft des Hauses zu nutzen (Abb. 56). Die Aussenluft würde via Gegenstromtauscher vorgewärmt und als Frischluft dem Haus zugeführt. Dem Speicher würde die Wärme via Miniwärmepumpe entnommen, so dass die Speichertemperatur ausreichend tief bliebe. Das System würde also bereits eine Raumlüftung beinhalten (Schimmelpilzgefahrreduktion bei Niedrigenergiehäusern).

Sommer (Speicher-Ladung)



Winter (Speicher-Entladung)

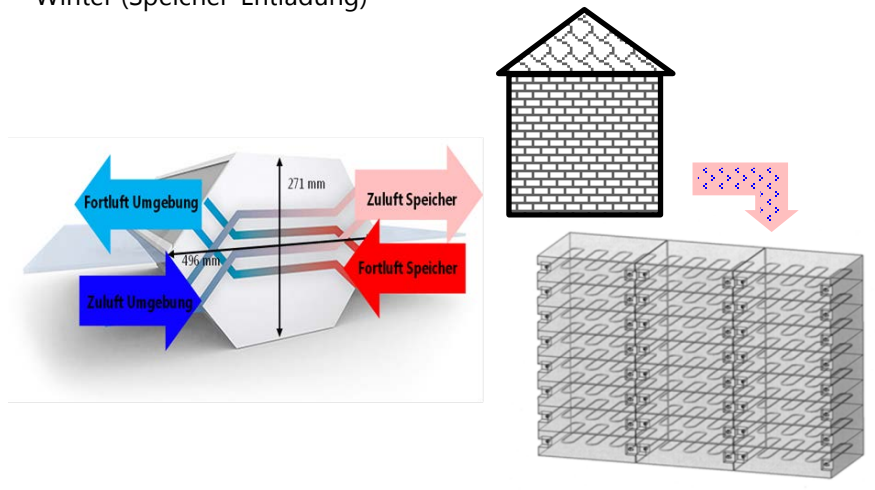


Abb. 56 Speichervariante Sorption mit Einbezug der Hauslüftung.

Sensible Speichereigenschaften des Ettringitbetons

Beim Speichermaterial Ettringitbeton handelt es sich um ein Material mit relativ hoher Dichte (im Vergleich zu anderen Speichermaterialien). Diese beträgt im getrockneten Zustand ca. 1400 kg/m^3 , im nassen Zustand sogar $1800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$. Entsprechend besitzt es auch eine recht hohe Wärmekapazität von $0.5 \text{ kWh/(K}\cdot\text{m}^3)$, welche jedoch im trockenen Zustand deutlich niedriger ca. $0.35 \text{ kWh/(K}\cdot\text{m}^3)$ sein dürfte. Das Material Ettringitbeton besitzt daher auch die Fähigkeit zur sensiblen (thermischen) Speicherung von Wärme, bei einem ΔT von 80°C also ca. 28 kWh/m^3 . Im Gegensatz zu einem Wasserspeichertank könnten theoretisch auch Lade-Temperaturen über 100°C realisiert werden. Auch die hohen Temperaturen am Ende der Lade-Phase können in der nachfolgenden Übergangszeit (Herbst) genutzt werden. Der Ettringitbeton-Speicher verfügt dadurch über ein nicht unbedeutendes Potenzial, Wärme zusätzlich sensibel zu speichern. Da der Speicherprototyp isoliert und vom Gebäude thermisch entkoppelt ist, sind hohe Speichertemperaturen zur rein sensiblen (kapazitiven) Speicherung unproblematisch. Es entsteht ein bedeutender Zusatznutzen ohne Mehrkosten. Diese thermische Speicherung kann unabhängig vom latenten Speicherpotenzial zur kurz- bis mittel-



fristigen Speicherung von Wärme genutzt werden. Eine dazu notwendige Wärmedämmung ist prinzipiell schon vorhanden. Vorteilhaft bei der Einspeisung resp. dem Entzug von Wärme ist die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit. Dies ist im getrockneten Zustand allerdings nicht mehr ohne weiteres gegeben und stellt allenfalls höhere Anforderungen an die Wärmetauscher. Vorteilhaft wirkt sich aus, dass es sich um einen Feststoff handelt. Temperaturschichtungen sind entsprechend (im Gegensatz zu Wasserspeichern) nicht zu erwarten. Andererseits kann der fehlende konvektive Temperatúraustausch zu verlängerten Ladeperioden führen.

Die thermischen Verluste in der Realisierung in Seelisberg sind infolge des thermisch nicht isolierten Luftzutritts (nur abgeklebt) und der eher moderat dimensionierten Dicke der Wärmedämmung von nur 12 cm (Glaswolle) eher hoch ausgefallen. Immerhin zeigt sich deutlich (Abb. 43), dass in der nach der Ladeperiode anstehenden Übergangszeit eine Nutzung der hohen Ladetemperaturen während einigen Tagen möglich ist. Gerade in der Übergangszeit (Sept./Okt./Nov) sind sensible Nachladungszyklen mit hohen Kollektor-Rücklaufftemperaturen häufig und könnten so zur kurz-/mittelfristigen Wärmespeicherung genutzt werden. Gleiches gilt auch für die Übergangszeit im Frühling (März/Apr/Mai), wo es sich wegen der hohen Ladetemperaturen noch nicht lohnt, den Speicher latent zu laden und ständig auf einem hohen Temperaturniveau zu belassen. Wird in dieser Zeit die Luftzirkulation im Speicher nicht aktiviert, ergeben sich auch keine Verdampfungsenergiesenken und der Speicher kann als Massivspeicher, im nassen Zustand (mit entsprechend optimaleren kapazitiven Speichereigenschaften) genutzt werden.

Da ein Ettringitspeicher die Wärme latent zu speichern vermag, zusätzlich aber aufgrund seiner Masse über eine sensible Speicherkapazität verfügt, ergibt sich gegenüber einem reinen sensiblen Massespeicher ein weiterer Vorteil: Eine „Niedrigtemperatur-Nachladung“. In einem Massespeicher (z.B. Wassertank) muss durch entsprechende Wärmedämmung oder Speichergrosse versucht werden, die Speichertemperatur möglichst lange hoch zu halten, um dann im Bedarfsfall (Winter) die gespeicherte Wärme abgeben zu können. Im Fall des Latentspeichers aus Ettringitbeton ist dies nicht nötig. Die zur Ladung des Speichers erforderlichen hohen Temperaturen lassen sich zunächst wie beim Wasserspeicher in der anschliessenden Übergangszeit (Herbst) nutzen. Die Speichertemperatur darf hier aber rasch abgebaut werden, selbst ein aktiver Abbau ist möglich, da die latent gespeicherte Wärme unabhängig von der Speichertemperatur erhalten bleibt. Da die Ettringitbeton-Temperatur sich dadurch rasch der Raumtemperatur nähert, kann anfallende Kollektorstärke selbst im Falle von bescheidenen Kollektorrücklaufftemperaturen dem Betonspeicher zugeführt werden, dessen Temperatur kurz- bis mittelfristig erhöhen und somit genutzt werden. Der grosse Vorteil dabei ist, dass anlagenseitig keinerlei weitere Installationen vorzusehen sind und dieses Potenzial unabhängig und zusätzlich genutzt werden kann. Dieses Potenzial kann als bedeutend erachtet werden, sind doch selbst im Winter, sicher aber in der Übergangszeit, bei Sonnenschein sehr viele Zyklen mit einem Temperaturhub von einigen zehn Graden zu erwarten. Demgegenüber weist ein Warmwasserspeicher immer deutlich höhere Tanktemperaturen auf und kann dieses Potenzial an deutlich weniger Tagen und nur bei entsprechend grossem Kollektorhub nutzen. Besonders interessant wird die Niedertemperaturnachladung, wenn die Speichertemperatur durch Pumpen der Wärme künstlich tief gehalten wird.

Generell ist es vorteilhaft, dass bei einem Speicher des Typs Ettringitbeton verschiedene Speicherarten und Wärmequellen kombiniert werden können. Ungleich einem Warmwasserspeicher kann die gespeicherte Energie mit einem derartigen System wesentlich weiter in den Winter hinein nutzbar gemacht werden. Die kurz- mittelfristigen sensiblen Speichereigenschaften bleiben (etwas reduziert) trotzdem erhalten.

Optionen zur Bereitstellung der Ladewärme

Die Ladung des Speichers in Seelisberg erfolgt durch solarthermisch lokal erzeugte Wärme. Insbesondere bei grossen heizungsunterstützenden Anlagen fallen im Sommer sehr grosse Wärmeüberschüsse an, welche ohne entsprechende Speicherlösung nicht genutzt werden können. Die Einspeisung von Überschusswärme in eine Speicherlösung hat zudem den Vorteil einer Reduktion der Höchstwerte der Kollektortemperaturen.

Die zur Ladung eines Ettringitspeichers benötigte Ladungswärme könnte prinzipiell aus anderen Quellen stammen. Allerdings muss beachtet werden, dass die Verdampfungswärme des abzuführenden Wassers in den meisten Fällen nicht sinnvoll zurückgewonnen werden kann und somit als Verlust zu verbuchen ist. Es lohnt sich daher nur absolute Überschussenergie direkt einzusetzen.

Die Bereitstellung der notwendigen hohen Ladetemperaturen im Sommer wäre allenfalls mit einer Hochtemperaturwärmepumpe realisierbar. Die dazu erforderlichen hohen Temperaturen lassen sich prinzipiell mit dem Kältemittel R744 (CO₂) oder durch zweistufige Prozesse realisieren. Vorlauftemperaturen von 90°C sind bereits heute mit mittलगrossen Anlagen erreichbar. Allerdings sind die erwünschten Ladetemperaturen über 100°C kaum realisierbar. Da Wärme mit hohem COP gepumpt werden würde (hohe Wärmequellentemperatur im Sommer), kann der Verdampfungsenergieverlust ausgeglichen werden, so dass selbst die Nutzung elektrischer Überschüsse denkbar wäre. Ideal stammen diese aus der eigenen Photovoltaikanlage. Selbst diffuse Sonneneinstrahlung könnte so zur Ladung des Speichers genutzt werden, insbesondere auch dann, wenn die Rücklauftemperatur der Solarkollektoren zu tief wäre. Solare Spitzeneinspeisungslasten würden reduziert, sei es ob der Strom von der eigenen Anlage kommt oder als Überschussstrom zugekauft würde. Voraussetzung wäre selbstverständlich, dass die Anschaffungskosten der Wärmepumpe nicht zusätzlich ins Gewicht fallen und diese generell für die Warmwasser/Heizung genutzt würde.

Sogar eine sensible Pufferung von elektrischer Sockel-Energie, welche in der Nacht und am Wochenende aufgrund einer geringeren Nachfrage preiswerter (bis Faktor 2) zur Verfügung steht, wäre in der Heizperiode möglich. Eine latente Nachladung des Ettringitspeichers im Winter ist aber aufgrund der langsamen Diffusionsprozesse und der hohen Verdunstungsverluste nicht sinnvoll.

Prinzipiell könnte sich eine derartige Kombination von Wärmepumpe und Betonspeicher als interessant erweisen: Der Ettringit-Speicher würde in der Heizperiode durch geschickte Ausnutzung der verschiedenen Potenziale sowohl als Puffer (sensible Speicherkapazität), als auch zur Lücken-Deckung (auch im Falle eines kurzzeitigen Versorgungsengpasses) bei tiefen Temperaturen (latente Speicherkapazität) betrieben. Die Multifunktionalität der sensiblen und latenten Speicherung von Wärme eines Ettringitspeichers könnte so seine Attraktivität im Hausbereich verbessern. Dabei könnten selbst kleinere Anlagen (2 m³) interessant sein.



Nationale Zusammenarbeit

Eine nationale Zusammenarbeit erfolgte wie vorgesehen ausschliesslich zwischen den beteiligten Projektpartnern.

Internationale Zusammenarbeit

Eine internationale Zusammenarbeit war nicht vorgesehen.

Bewertung 2016 und Ausblick

Nach umfangreichen Untersuchungen zur chemischen Stabilität und Dauerhaftigkeit von Calciumsulfoaluminatbeton mit einem hohen Gehalt an Ettringit konnten stabile Bedingungen und Mischungszusammensetzungen gefunden werden. Damit waren die notwendigen Voraussetzungen für die Errichtung einer Pilotanlage zur saisonalen (latenten) Speicherung von Wärme in Seelisberg UR basierend auf diesem neuartigen Speichermaterial gegeben. Da im Rahmen eines Pilotprojekts die Verwendung sehr stabiler Mischungen favorisiert wurde, konnten die angestrebten Speicherdichten ($> 100 \text{ kWh/m}^3$) allerdings nicht erreicht werden.

In Seelisberg wurde im Frühling 2015 ein 6 m^3 grosser, modular aus vorfabrizierten Betonelementen aufgebauter Ettringitspeicherprototyp realisiert. Die Betonelemente waren dabei jeweils mit einer Tauscherschleife bestückt, welche miteinander verbunden werden konnten, um so den Wärmeaustausch zur Ladung-/Entladung des Speichers ermöglichen. Die Dimensionierung der Tauscherschleifen erwies sich als ausreichend, hingegen wäre eine stärkere Wärmedämmung des Speichers wünschenswert gewesen.

Zur Ladung des Ettringitspeichers musste das Speichermaterial zunächst getrocknet (entfeuchtet) werden. In der ersten Ladeperiode (Sommer 2015) basierte die Trocknung auf durch den Speicher zirkulierende heisse Luft, welche in einem externen, wassergekühlten Kondensator getrocknet wurde. Diese Methode erwies sich anfänglich trotz des grossen Kühlaufwands als recht effizient. Es gelang aber nicht, mit dem installierten System ausreichend hohe Temperaturen und tiefe Wasserdampfdrücke für eine Phasenumwandlung von Ettringit zu Meta-Ettringit in gewünschtem Ausmass zur Verfügung zu stellen. Demzufolge war die Temperaturerhöhung bei einem ersten Entladeversuch im Winter 2015/2016 mit $2\text{-}3 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr bescheiden. Hingegen konnte damit gezeigt werden, dass das kaskadenförmig aufgebaute Wasserzugabesystem funktionierte.

Im Frühling 2016 wurde die Pilotanlage mit einer Trocknung basierend auf einem Luftaustausch umgebaut. Ein Gegenstromlufttauscher ersetzte den Kondensator und den Kühlkreislauf. Diese wesentlich preiswertere und effizientere Methode erlaubte zudem eine gewisse Wärmerückgewinnung, wenngleich aufgrund der Resultate eine etwas grössere Lufttauscherfläche sinnvoll gewesen wäre. Ausserdem konnte eine webbasierte Fernregelung und Messwerteerfassung installiert werden. Es

wurden in der Ladeperiode 2016 zwar deutlich höhere Speicherdurchschnitts- und Maximaltemperaturen (kurzzeitig bis 78°C) mit tieferen relativen Ausgleichsfeuchten und somit besseren Trocknungsergebnissen erzielt. Hingegen erwies sich die Kopplung der Pilotanlage an den Grosswasserspeicher und die damit nur indirekte Nutzung der Kollektorrücklauftemperaturen als ungeeignet zur Erreichung höherer Ladetemperaturen und somit besserer Trocknungsbedingungen. Schliesslich wies das Speicherinnere nach Abkühlung auf 20°C eine relative Luftfeuchtigkeit von 10.9 % auf. Im zweiten Entladeversuch im Dezember 2016 wurde eine höhere, aber immer noch deutlich ungenügende Entladetemperaturerhöhung des Speichers gemessen. Einerseits war der Ladezustand immer noch unzureichend woraus sich schliessen lässt, dass höhere Ladetemperaturen (idealerweise über 100°C) erforderlich sind. Andererseits sollte im Speicher durch Perforation mehr Oberfläche zur Verfügung gestellt werden, welche die Be- und Entfeuchtungsprozesse beschleunigen würden.

Das Projekt ist nun abgeschlossen. Sinnvoll wären weitere Versuche zur Erhöhung der Ladetemperatur unter Ausnutzung der vor Ort vorhandenen solaren Photovoltaiküberschüsse durch Nachheizen von Ladefluid und/oder Zirkulationsluft zur Erreichung höherer Ladetemperaturen.

Weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich des Speichermaterials Ettringitbeton besteht neben materialtechnologischen Optimierungen zur Erhöhung der Speicherdichte vor allem hinsichtlich seiner Verwendung als Sorptionsspeicher. Interessant ist auch die Kombinationsmöglichkeit der sensiblen (Massivspeicher) Wärmespeichereigenschaften zur kurz- bis mittelfristigen Speicherung von Wärme mit der latenten, saisonalen Wärmespeicherung. In diesem Zusammenhang könnte die Kombination mit einer Hochtemperaturwärmepumpe prüfenswert sein.

Die modulare Bauweise der Ettringitbetonpilotanlage hat sich bewährt. Diese Bauart könnte allenfalls auch bei sensiblen, betonbasierten Massivspeichern genutzt werden.



Referenzen

- [1] Kaufmann J., Winnefeld F. (2010/2016) Cement based chemical energy stores. European Patent EP 2576720(B2).
- [2] Winnefeld F., Kaufmann J. (2011) Concrete produced with calcium sulfoaluminate cement – a potential system for energy and heat storage. First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Dubai UAE.
- [3] Pourchez J., Valdivieso F., Grosseau P., Guyonneta R., Guilhot B. (2006) Kinetic modelling of the thermal decomposition of ettringite into metaettringite. *Cem. and Concr. Res.* **36**: 2054-2060.
- [4] Struble L., Brown P. (1986) Heats of dehydration and specific heats of compounds found in concrete and their potential for thermal energy storage. *Solar Energy Materials* **14**: 1-12.
- [5] Zhou Q., Glasser F. (2001) Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at < 120 °C. *Cem. and Concr. Res.* **31**: 1333-1339.
- [6] Wadsö L. (2005) Applications of an eight-channel isothermal conduction calorimeter for cement hydration studies, *Cement International* **5**: 94-101.
- [7] Damidot D., Glasser F. (1992) Thermodynamic investigation of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system at 50°C and 85°C. *Cem. and Concr. Res.* **22**: 1179-1191.
- [8] Berger S., Cau Dit Coumes C., Le Bescop P., Damidot D. (2011) Influence of a thermal cycle at early age on the hydration of calcium sulfoaluminate cements with variable gypsum contents. *Cem. and Concr. Res.* **41(2)**: 149-160.
- [9] Hall Ch., Barnes P., Billimore A., Jupe A., Turrillas X. (1996) Thermal decomposition of ettringite $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$. *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* **92(12)**: 2125-2129.
- [10] Satava V., Veprek O. (1975) Thermal Decomposition of ettringite under hydrothermal Conditions. *J. Amer. Cer. Soc.* Vol. **58** (No. 7-8): 357-359.
- [11] Meller N., Kyritsis K., Hall Ch. (2009) The hydrothermal decomposition of calcium monosulfoaluminate 14-hydrate to katoite hydrogarnet and β -anhydrite: An in-situ synchrotron X-ray diffraction study. *J. of Solid State Chem.* **182**: 2743-2747.
- [12] Albert B., Guy B., Damidot D. (2006) Water chemical potential: a key parameter to determine the thermodynamic stability of some cement phases in concrete? *Cem. and Concr. Res.* **36(5)**: 783-790.
- [13] Baquerizo L., Matschei T., Scrivener K. (2015) Thermodynamics of the water content of ettringite. *Cem. and Concr.* **73**: 143-157.



- [14] Zhou Q., Lachowski E., Glasser F. (2004) Metaettringite, a decomposition product of ettringite. *Cem. and Concr. Res.* **34**: 703-710.
- [15] Kaufmann J., Winnefeld F., Lothenbach B. (2016) Stability of Ettringite in CSA cement at elevated temperatures. *Advances in Cement Research* **28(4)**: 251–261.
- [16] Day R.L. (1992) The Effect of Secondary Ettringite Formation on the Durability of Concrete: A Literature Analysis. Research and Development Bulletin RD108T, Portland Cement Association Skokie, Illinois, USA.



Anhang

Wufi-Beilage 1

Wufi-Beilage 2-1

Wufi-Beilage 3-1

Wufi-Beilage 3-2

Wufi-Beilage 4-1

Wufi-Beilage 4-2

Wufi-Beilage 4-3

Wufi-Beilage 5