

# Thermochemische opslag

## R&D Roadmap

Datum 11 maart 2016

Auteur(s)            dr. ir. P.A.J. Donkers – TU Eindhoven  
                              ir. E.K. Kooi – Hanzehogeschool Groningen  
                              dr. W.G. Planje – Hogeschool Utrecht  
                              ing. M.T. Vos – De Beijer RTB  
                              ir. M.T. Bakema – Liandon  
                              dr. ir. R. Cuypers – TNO Process & Instrument Development

In opdracht van:



## Inhoudsopgave

1	Inleiding .....	2
1.1	Korte techniekomschrijving .....	5
1.2	Visualisatie Roadmap .....	6
2	Uitwerking roadmap .....	7
2.1	Testopstelling/Productontwikkelingen .....	7
2.2	Reactorconcepten .....	8
2.3	Thermochemische warmteopslag materiaal ontwikkeling .....	8
2.3.1	Zeolieten/Silicagel .....	9
2.3.2	Zouthydraten/composieten .....	9
2.3.3	Alternatieve adsorptiematerialen/oplosmiddelen/composieten .....	9
2.3.4	Ander temperatuurbereik adsorptiematerialen/oplosmiddelen/composieten .....	9
2.3.5	Stabiliteit van TCM .....	10
2.3.6	Opschaling materiaalonderzoek .....	10
2.4	Verbetering warmte- en damptransport .....	11
2.4.1	Korrel (micro) .....	11
2.4.2	Interactie werkmedium/TCM (macro) .....	11
2.4.3	Anisotrope (structuur) vaste composieten .....	12
2.5	Component ontwikkeling .....	12
2.5.1	Warmtewisselaar .....	12
2.5.2	Kritische componenten .....	12
2.5.2.1	Voorkomen Corrosie .....	13
2.5.2.2	Realiseren vermogen .....	13
2.5.2.3	Ontwikkeling verdamper .....	13
2.6	Systeemontwikkeling .....	14
2.6.1	Systeem engineering en modellering .....	14
2.6.1.1	Modellering .....	14
2.6.2	State of charge .....	14
2.6.3	SysteeminTEGRATIE .....	14
2.6.4	Demonstratie en testen .....	15
2.7	Techno- economische analyse .....	15
2.7.1	Levenscyclusanalyse .....	15
2.7.2	Economische haalbaarheid .....	15
2.7.3	Technologische analyse .....	16
3	Bronnen .....	17

## 1 Inleiding

De energievoorziening in de gebouwde omgeving is momenteel onderhevig aan sterke veranderingen. Zo is er een verdergaande renovatieslag voor de bestaande woonvoorraad van meer dan 3 miljoen huishoudens [1] komende decennia te verwachten door aanscherpende wet- en regelgeving bij een toenemend aanbod aan betaalbare renovatietechnieken. Dit zorgt voor een sterke verlaging van de ruimteverwarmingvraag van woningen terwijl lokale duurzame elektriciteits- en warmteproductie toenemen door nieuwe daken met geïntegreerde zonnecollectoren en PV-panelen. Daarnaast ontstaat er door de verregaande isolatie en stijgende welvaartspeil een groeiende behoefte aan actieve koeling in woningen. Naast de lokale energieopwekking via zonne-energie voorzien de grotere inzet van windturbineparken in een sterker variërend energie-aanbod. Voor een verdere verduurzaming van de gebouwde omgeving is het van belang om de ongelijktijdigheid van vraag en aanbod op te vangen met energiebuffers. Daarmee kan ook de maximale piekbelasting van distributienetten sterk gereduceerd worden.

Op gebied van opslag van thermische energie zijn de bodem en bovengrondse waterbuffers wel bekend. Relatief nieuw en nog volop in ontwikkeling zijn systemen met thermochemische materialen (TCM), die warmte in potentie vele malen compacter op kunnen slaan dan waterbuffers. Bovendien kan warmteopslag met TCMs zonder langdurig grote stilstandverliezen. Opslagdichtheden van tot nu toe bekende TCMs liggen momenteel tussen de 1 – 3 GJ/m<sup>3</sup> op materiaalniveau [2]. Daarmee komt, naast kort-cyclische tapwaterverwarming-opslagsystemen en warmtegedreven koeling, seizoensmatige warmteopslag voor ruimte- en tapwaterverwarming in beeld. Zomerse zonnewarmte kan dan door middel van TCMs opgeslagen worden en in het stookseizoen weer aangesproken worden. Een 100% zonne fractie voor het verwarmen van gebouwen en leveren van warm tapwater is de ultieme duurzaamheidsambitie.

In het hoofddocument zijn een viertal use-cases beschreven welke betrekking hebben op warmte/koude gebruik in de gebouwde omgeving: 1. Portiekwoning; 2. Warm tapwater; 3. Koelen en verwarmen; 4. Verwarmen met behulp van bodemwarmte. Nummer 4 gaat expliciet over warmtepompen en is daarom buiten beschouwing gelaten in deze roadmap. In de beschrijving van de eerste drie use-cases zijn eisen gesteld aan een buffer voor warmte/koude. Deze hebben voornamelijk betrekking op de opslagdichtheid, (ont)laad temperatuur en stabiliteit van het systeem. De precieze invulling van deze eisen zijn samengevat in Tabel 1. De gestelde eisen per use-case zijn vergelijkbaar met elkaar en daarom is er voor gekozen om een generale roadmap op te stellen, die alle drie de use-cases omvat. De te verwachten knelpunten zullen vergelijkbaar zijn, is de inschatting, enkel het moment van marktrijpheid zal per use-case significant verschillen.

De te verwachten implementatiestappen van TCMs in de verschillende use-cases zijn schematisch weergegeven in Figuur 1. Use-cases waarin tapwater voor bewoners van een portiekwoning (2-3 GJ) of een gezinshuishouden (4 GJ) tussen het najaar en voorjaar verwarmd kunnen worden via reacties met TCMs lijken de eerste haalbare stappen in de vervanging van huidige verwarmingssystemen. Daarop volgend de use-case met de uitbreiding van het systeem voor tapwaterverwarming het gehele jaar. Bij verdere na-isolatie van woningen naar zeer lage ruimteverwarmingvraag (10 GJ en minder) ontstaan ook mogelijkheden voor nieuwe use-cases, waarbij het opslagsysteem niet alleen warm tapwater maar ook de ruimteverwarming gedurende het stookseizoen voor zijn rekening kan nemen met beperkte volumes. Dit laatste is zeker het geval wanneer compactere TCMs ontwikkeld zijn. Bij toenemende eisen van gebruikers in goede geïsoleerde woningen is ook actieve koeling niet meer uit te sluiten. In

Tabel 1: De beschreven use-cases met een samenvatting van de gestelde eisen aan het opslag materiaal.

Use case	Portiekwoning	Warm tapwater	Koelen en verwarmen
<b>Opslagcapaciteit</b>	2-3 GJ warm tapwater 25 GJ ruimteverwarming	4 GJ warm tapwater	4 GJ warm tapwater 8 GJ ruimteverwarming 5 GJ ruimtekoeling
<b>Reactieopslag-dichtheid op systeemniveau</b>	1.5 GJ/m <sup>3</sup>	1 GJ/m <sup>3</sup>	1.5 GJ/m <sup>3</sup>
<b>Laad-temperatuur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonnecollector: 80 °C (breed Europees implementeerbaar)</li> <li>• Restwarmte doucheafvoer: 32 °C</li> </ul>		
<b>Ontlaad-temperatuur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warm tapwater: &gt;60 °C</li> <li>• Ruimteverwarming: &gt;40 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warm tapwater: &gt;60 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warm tapwater: &gt;60 °C</li> <li>• Ruimteverwarming: &gt;40 °C</li> <li>• Hoge temperatuur koeling &lt;18°C</li> </ul>
<b>Stabiliteit (N-cycli)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dagelijkse opslag: Aantal cycli (N)=1000-3000</li> <li>• Seizoensopslag <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Vast systeem: N=20-30</li> <li>○ Wisselbaar systeem: N&gt;1</li> </ul> </li> </ul>		

combinatie met de eerdergenoemde verwarmingsdoeleinden kan kort-cyclische koeling geïntegreerd worden met het systeem voor seizoenopslag of de bereiding van warm tapwater. Zoals te zien is in dit figuur zijn er vier onderzoeklijnen. Drie onderzoeklijnen richten zich op losse onderdelen (warm tapwater; ruimteverwarming en zongedreven koeling) voor een warmte-/koude-opslagsysteem welke gecombineerd wordt in de vierde onderzoeklijn (Gecombineerd opslagsysteem).

Door het ontwikkelen vanuit een enkele functie (opslag voor tapwaterverwarming) naar uiteindelijk driedovoudige functies (opslag voor tapwaterverwarming, ruimteverwarming en kort-cyclische koeling) kunnen producten ontwikkeld worden voor diverse woningtypen. Tussentijdse invoering van de in ontwikkeling zijnde opslagsystemen wordt nagestreefd tijdens het proces. Wanneer onvolledige opslag van tapwater en/of ruimteverwarming mogelijk is, zal dit getracht geïmplementeerd te worden, deels om de markt er kennis mee te laten maken, maar ook om het kennisniveau van deze systemen te vergroten. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan opslag op wijkniveau, waar de energiedichtheid een kleinere rol speelt.

De eerste toepassingen met TCMs zijn al in de praktijk te vinden. Zo worden zeolieten en silicagel toepassingen op dit moment (kleinschalig) aangeboden in bv. sorptiewarmtepompen. Tegelijkertijd worden de eerste zouthydraten gedemonstreerd in pilots zoals MERITS. Maar voordat ook brede implementatie van TCMs kan plaatsvinden, zal het lage technology readiness level (TRL) van verschillende onderdelen van de TCMs (Silicagel en zeolieten: TRL 7-8; Demonstraties: TRL van 6-7; en materiaal technisch voor zouthydraten: TRL 2) omhoog moeten. Daarom is het noodzakelijk dat er nog een aantal vragen opgelost worden. Naast fundamenteel onderzoek naar de beschikbare hydratatiegraden, bijbehorende hydratatietoestanden en stabiliteit van de reacties is er ook behoefte aan component-, technologie-, en systeemontwikkeling ten behoeve van diverse toepassingen.



### Use-case PORTIEK

**Stookseizoen (okt-mei)**  
Warm tapw. 2-3 GJ  
Ruimteverw. 25 GJ



### Use-case RUIMTEVERW. + TAPW.

**Stookseizoen (nov-mrt)**  
Warm tapw. 3 GJ  
Ruimteverw. 10 GJ  
+ peakshaving  
(warmtepomp)



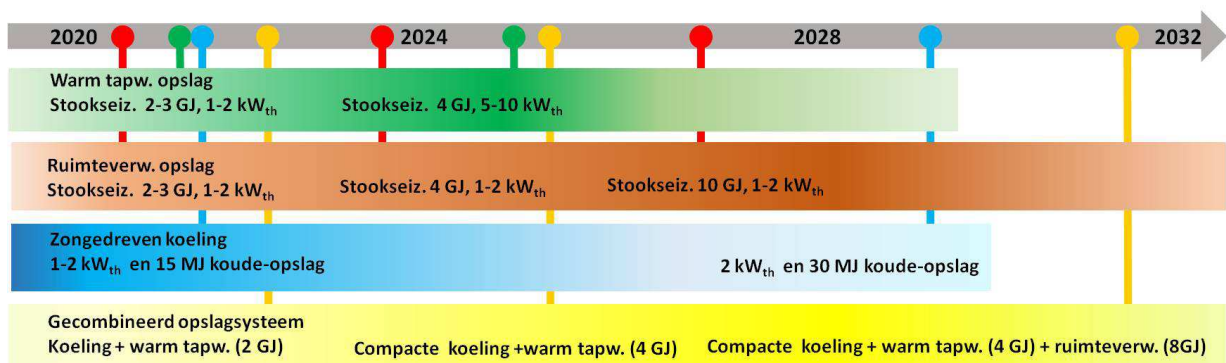
### Use-case TUSSENWONING

**Stookseizoen (okt-mei)**  
Warm tapw. 4 GJ  
Ruimteverw. 35 GJ



### Use-case RUIMTEVERW. + TAPW. + KOELEN

**Stookseizoen (nov-mrt)**  
Warm tapw. 3 GJ  
Ruimteverw. 8 GJ  
**Zomer**  
Ruimtekoeling 2-5 GJ



Figuur 1: Bovenaan een schematische weergave van de warmtevraag van de verschillende use-cases. De implementiestappen van TCMs als warmteopslagmedium zijn onder de pijl weergegeven aan de hand van vier onderzoeklijnen. De gebruikte waardes zijn indicatiewaardes (een van de stappen in de roadmap is om deze waardes beter af te schatten).

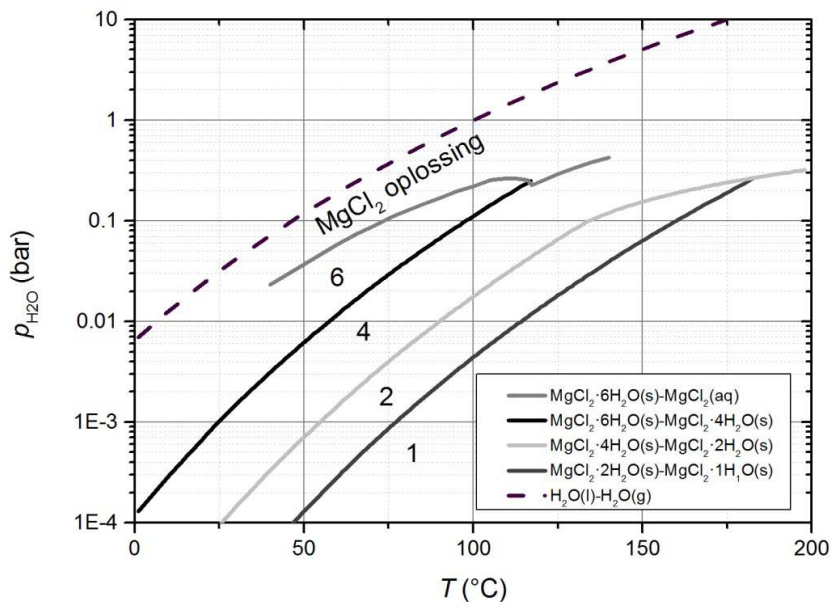
De noodzaak om onderzoek te doen naar warmteopslag is onderkend door verschillende organisaties zoals de Europese commissie en IEA [3,4]. In deze roadmap wordt uitgelegd welke stappen er nog genomen moeten worden voordat de warmteopslag gebaseerd op TCMs marktrijp is. Allereerst is er een korte techniekomschrijving, waarna een visuele weergave van de ontwikkelde roadmap is gegeven. Deze visuele weergave geeft de verwachte onderzoek- en ontwikkelingsactiviteiten in de loop van de tijd, en vormt tevens de inhoudsopgave van het vervolg van dit document.

## 1.1 Korte techniekomschrijving

De TCM materialen, die nu voornamelijk onderzocht worden, kunnen in twee groepen opgedeeld worden: adsorptiematerialen (bv. zeolieten en silicagel) en reactiematerialen (bv. hydraten zoals  $\text{Na}_2\text{S}\cdot x\text{H}_2\text{O}$  en  $\text{MgCl}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$ ). De chemische processen in deze materialen worden voornamelijk beïnvloed door opgelegde condities, zoals de waterdampdruk en temperatuur.

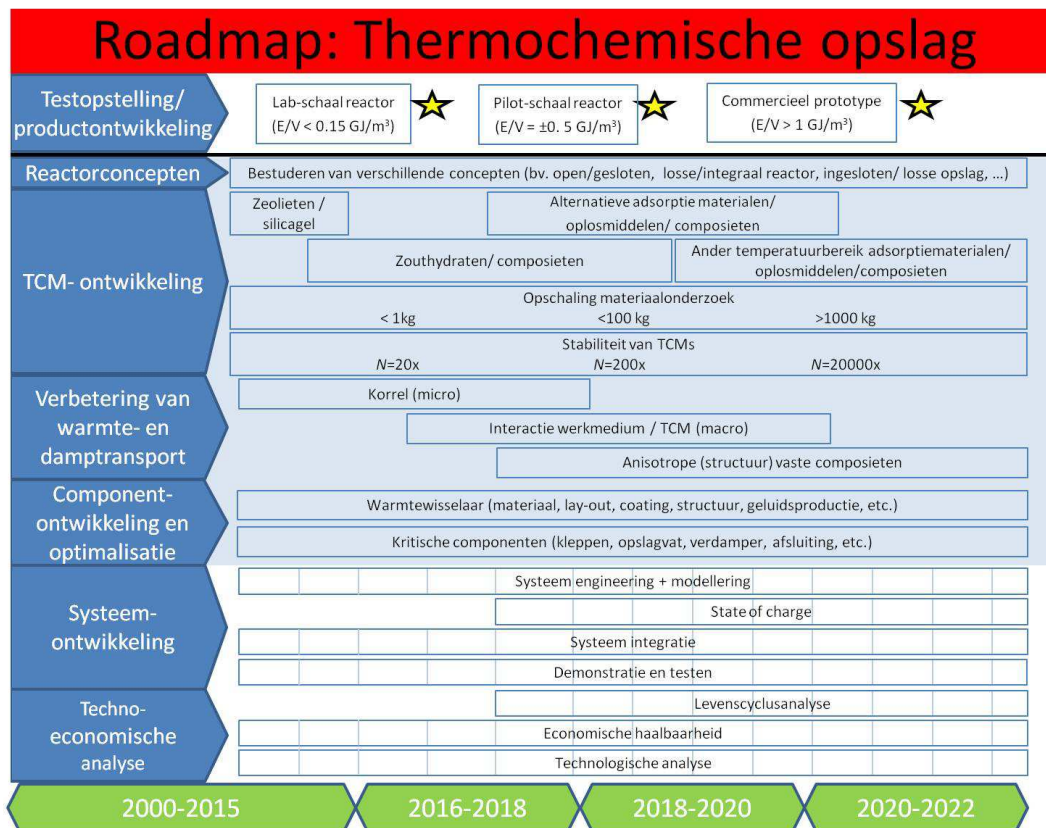
Als bijvoorbeeld naar het zout  $\text{MgCl}_2$  gekeken wordt, dan kan het in droge vorm bestaan,  $\text{MgCl}_2$  en in gehydrateerde vorm  $\text{MgCl}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$  ( $x = 1, 2, 4, 6$ ). De toestand van dit zout wordt bepaald door de waterdampdruk en temperatuur, en kan afgelezen worden in een  $p$ - $T$  diagram, zie Figuur 2. Zoals te zien is, kan het zout bij een temperatuur van  $50\text{ }^\circ\text{C}$  meerdere hydratatie toestanden hebben en is de toestand bepaald door de waterdampdruk in het systeem. Stel het zout is opgeslagen bij een waterdampdruk van  $1\text{ mbar}$  en een temperatuur van  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , dan zal het zout hydrateren tot  $\text{MgCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Wanneer dan de waterdampdruk verhoogd wordt tot  $10\text{ mbar}$ , zal het zout hydrateren tot  $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Tijdens de hydratatie reactie (het ontladen van de batterij) zal warmte vrij komen, deze kan gebruikt worden voor o.a. het verwarmen van een huis. Wanneer het zout gehydrateerd is tot  $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en de waterdampdruk blijft constant, maar de temperatuur wordt verhoogd tot  $75\text{ }^\circ\text{C}$ , dan zal het zout dehydrateren tot  $\text{MgCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Op dat moment is de batterij aan het opladen.

Door het variëren van de waterdampdruk en temperatuur rondom een TCM is het mogelijk om desgewenst warmte te onttrekken of toe te voegen aan een TCM. Let op: het verdampen van water kost energie. Wanneer waterdamp uit een ter plekke opgeslagen waterreservoir wordt betrokken dient aan dit reservoir bij ontladen van de warmtebatterij een hoeveelheid warmte (verdampingswarmte) te worden toegevoegd ter voorkoming van bevriezing van het waterreservoir. Bij gebruik van een open systeem speelt dit fenomeen niet, omdat dan de damp uit de buitenlucht gebruikt wordt. Enkel zal in dat geval de waterdampdruk meestal niet voldoende zijn om volledige hydratatie te doen van het zout.



Figuur 2: Een  $p_{\text{H}_2\text{O}}-T$  diagram van een  $\text{MgCl}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  systeem [5]. De getallen in de grafiek geven de hydratatie graad aan in  $\text{MgCl}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$ . De lijnen geven de  $p$ - $T$  lijnen van de verschillende reacties in het systeem.

## 1.2 Visualisatie Roadmap



Figuur 3: De visualisatie van de roadmap: Thermochemische opslag.  $E/V$  staat voor energiedichtheid voor het gehele systeem,  $N$  voor het aantal ont- en oplaad cycli van het materiaal. Het lichtblauw gearceerde gedeelte bevat de meer fundamentele onderzoeksgebieden, de witte blokken meer specifieke toegepaste onderzoeken.

In de figuur is de R&D roadmap geschetst zoals die door de betrokken partijen is voorzien. Zoals eerder aangegeven zijn er vier onderzoeklijnen (warm tapwater; ruimteverwarming; zongedreven koeling en gecombineerd opslagsysteem). Deze onderzoeklijnen zullen veelal parallel naast elkaar kunnen worden uitgevoerd wanneer er een goede kennisuitwisseling aanwezig is en zijn daarom gecombineerd in een roadmap. Het gearceerde gebied bevat algemene onderwerpen voor nader onderzoek, benodigd voor toepassing in alle use-cases en in alle onderzoeklijnen (de meer fundamentele kennisontwikkeling). Het niet gearceerde gebied (witte balken) bevat specifieke onderzoeken die weliswaar voor alle onderzoeklijnen en bijbehorende use-cases uitgewerkt moeten worden, maar die zeer verschillende informatie zullen opleveren per geval (de meer toegepaste kennisontwikkeling). Deze zullen in de loop der tijd herhaald moeten worden, vanwege voorschrijdende inzichten in de ontwikkeling van warmteopslagsystemen. Te zien is dat de tijdspanne in Figuur 3 korter is dan in Figuur 1. Dit komt doordat op dit moment niet alle stappen te overzien zijn om een werkend opslagsysteem te produceren die voldoet aan al de gestelde eisen in de verschillende use-cases. De verwachting is dat de huidige roadmap herzien moet worden tussen 2018-2020 zodat dan het onderzoek naar warmteopslagsystemen ook gestroomlijnd kan worden voor de periode 2022-2032. Dat wil niet zeggen dat er tussentijds geen systemen op de markt komen, enkel zijn dan nog niet al de doelen (zie Tabel 1) behaald.

De belangrijkste ontwikkelingsvragen van deze roadmap zijn in het navolgende hoofdstuk verder uitgewerkt.

## 2 Uitwerking roadmap

Het doel van deze roadmap is om de onderzoekslijnen zichtbaar te maken die leiden tot een warmteopslagsysteem. Zoals eerder aangegeven hebben de verschillende onderzoekslijnen veel overlap met elkaar. Tijdens het fundamentele onderzoek zal daarom goede kennisuitwisseling van belang zijn om dubbel werk te voorkomen. In deze roadmap wordt daarom niet afzonderlijk over de verschillende lijnen gesproken worden, maar in zijn geheel.

Een van de terugkomende eisen aan het warmteopslagsysteem (zie Tabel 1) is de energiedichtheid, omdat die bepaalt namelijk hoeveel ruimte een warmteopslagsysteem inneemt en daardoor in welke use-case het gebruikt kan worden.

Dat is dan ook de reden dat TCMs zijn gekozen als warmteopslagmedium, omdat de thermochemische reacties in TCMs een hoge energiedichtheid hebben (2-3 GJ/m<sup>3</sup> op materiaalniveau). Dit is dan ook één van de belangrijkste eigenschappen van TCMs in de concurrentiestrijd tegen voelbare warmteopslag ( $\pm 0.2$  GJ/m<sup>3</sup> op materiaalniveau). Een ander sterk punt van TCMs is het relatief kleine warmteverlies tijdens de opslagperiode. Afhankelijk van het regelsysteem en gebruikte TCM kan deze contributie wel variëren. In geval van seizoensopslag bij eenmalige laad- en ontlad cyclus zal het verlies ongeveer 2-15% zijn als gevolg van de warmtecapaciteit van de TCMs zelf<sup>1</sup>. In geval van voelbare warmte kan dit 100% zijn, omdat alle warmte is opgeslagen met behulp van de warmtecapaciteit. Deze warmte zal weglekken tijdens opslag in geval van seizoensopslag in geval de isolatie niet voldoende is.

De daadwerkelijke energiedichtheid van een warmteopslagsysteem moet berekend worden aan de hand van het gehele systeem en niet enkel aan de hand van de reactie-energie in de TCM. Het gehele systeem bestaat namelijk naast het opslagmateriaal ook uit o.a. een warmtewisselaar; opslag voor het verdampingsmedium en onvolledige vulgraad, welke alle op zichzelf de opslagdichtheid van het gehele systeem verlagen. Het verhogen van de opslagdichtheid van het systeem kan daarom verhoogd worden door het gebruiken van andere TCMs met hogere energiedichtheden, maar daarnaast ook door betere regulatie, ander reactorontwerp etc. Dit is belangrijk, omdat elke verbetering in de opslagdichtheid, zonder verhoging van de kosten, de toepasbaarheid van TCMs in de praktijk zal laten toenemen [7,8].

Om deze hoge energiedichtheid te ontwikkelen in het warmteopslagsysteem en daarnaast ook nog te voldoen aan ont- en oplaadtemperaturen, gevraagde vermogens en stabiliteit van het warmteopslagsysteem is extra kennis noodzakelijk over de verschillende onderdelen in het warmteopslagsysteem. De te verwerven kennis heeft betrekking op reactorontwerpen; de gebruikte TCMs; warmte- en damptransport; componenten en de interactie van de verschillende componenten in een opslagsysteem. Daarnaast worden extra eisen gesteld aan bijvoorbeeld de opslagdichtheid, stabiliteit van het systeem, kosten en massa. In het vervolg van dit hoofdstuk zullen deze punten besproken worden aan de hand van specifieke doelen voor de verschillende onderdelen en de daarbij behorende uitdagingen.

### 2.1 Testopstelling/Productontwikkelingen

Het onderzoeken van afzonderlijke onderdelen zal niet voldoende zijn om een werkend warmteopslagsysteem te ontwikkelen. Daarom zullen ook warmteopslagsystemen gebouwd moeten

---

<sup>1</sup> Bijvoorbeeld in geval van de reactie  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ :  $C_p = \pm 400 \text{ J/mol/K}$  (afhankelijk van hydratatie graad);  $\Delta H_r = 283 \text{ kJ/mol}$ . Dehydratatie na verhoging van 20-100 °C, waarna het materiaal afkoelt tot 20 °C. Verloren energie/Reactie-energie =  $32/283 \cdot 100\% = 11\%$  [6]



worden, zodat kennis vergaard kan worden over het warmteopslagsysteem en de interactie van afzonderlijke onderdelen. Het uiteindelijke doel is om een eerste industrieel prototype (4 GJ warmte opslag in 4 m<sup>3</sup> systeem) te ontwikkelen aan het einde van deze roadmap. Om dit te bereiken zullen er minimaal twee andere testopstelling gerealiseerd worden; één op labschaal (0.04 GJ warmteopslag in maximaal 0.25 m<sup>3</sup> systeem) en één op pilot-schaal (1 GJ warmte opslag in 2 m<sup>3</sup> systeem). Daarnaast kan er kennis gewonnen worden uit eerdere demonstratiereactoren gebaseerd op TCMs uit programma's zoals MERITS, PROMES, COMTES en SOTHERCO's.

## 2.2 Reactorconcepten

Het samenbrengen van de TCMs met het werkmedium is noodzakelijk voor het generen van warmte in een warmteopslagsysteem gebaseerd op TCMs. Hiervoor is het van belang dat de reactor deze bij elkaar kan brengen onder de juiste condities. Oftewel het ontwerpen van een reactor zal het gehele systeem beïnvloeden. Onderdelen die betrekking hebben op het reactorontwerp zelf zijn o.a.:

- **Open of een gesloten systeem.** Open systemen hebben lagere reactiesnelheden op micro-pore niveau, maar hebben betere thermische geleiding op macro-pore niveau ten opzichte van gesloten systemen. Het is nog niet goed bekend welke mechanisme het meest belemmerend is. Daarnaast kan in een open systeem gebruik gemaakt worden van lucht als warmtewisselend medium. Daar staat tegenover dat o.a. ventilatie-energie en veiligheid (blootstelling aan materialen) aandacht vragen, alsook beschikbaarheid van waterdamp in de periode van warmtevraag (winter: lage waterdampdruk in buitenlucht).
- **Interne of externe opslag van verdampfingsmedium.** Wanneer intern het verdampfingsmedium wordt opgeslagen is er meer ruimte nodig voor het opslagsysteem, maar dit vat kan ook gebruikt worden voor tijdelijke warmteproductie tijdens dehydratie van het zout. In dat geval condenseert de waterdamp in het vat en verhoogt daarmee de temperatuur. Daarnaast kan bij gesloten systemen overwogen worden een ander oplosmiddel te gebruiken dan water, wat het temperatuurbereik verandert van het opslagsysteem.
- **Bulkopslag met externe reactor of losse reactormodules.** Tijdens het laden of ontladen van de TCMs kan het energetisch gunstig zijn om alleen gedeeltes van het opslagvat te gebruiken. Dit heeft consequenties voor de complexiteit van het regelsysteem, het aantal kleppen, energiedichtheid etc.
- **Type reactor.** Gepakt bed en fluidisatie-bed zijn bekende opties in de literatuur [7].

Zoals gezegd, het ontwerpen van de reactor is noodzakelijk in de ontwikkeling van TCM-opslagsystemen en heeft zijn effect op de verschillende onderdelen van het systeem. Hierdoor zullen er parallel aan elkaar onderdelen onderzocht worden onder verschillende omstandigheden. Een combinatie van modellering en experimenteel onderzoek van de reactor is hierbij noodzakelijk, om het systeem voor parameters zoals vermogen en energieopslagdichtheid (op reactorniveau) te optimaliseren. Afhankelijk van een reactorontwerp zullen specifieke onderdelen opnieuw bekeken moeten worden, hierbij kan gedacht worden aan bv. de selectie van TCMs. Zo kan het zijn dat een TCM goed functioneert in een open systeem, maar niet in een gesloten.

## 2.3 Thermochemische warmteopslag materiaal ontwikkeling

Het concept van warmte opslag met behulp van TCM wordt al beschreven sinds de jaren tachtig. De afgelopen jaren hebben meerdere groepen onderzoek gedaan naar warmte opslag met behulp van TCMs. In de meeste materiaalonderzoeken is voornamelijk aandacht besteed aan de energiedichtheid van de materialen en dehydratie (oplaad) temperaturen. In de komende periode zal aandacht besteedt moeten worden aan o.a. hydratatie snelheden, het stabiliseren van TCMs onder de opgelegde

condities, het door ontwikkelen van technologische concepten en systeemontwerpen voor verschillende toepassingen voor verwarming- en koelingsdoeleinden (ontlaadtemperatuur).

### **2.3.1 Zeolieten/Silicagel**

Huidige onderzoeken naar TCMs hebben zich vooral gefocust op adsorptiematerialen zoals zeolieten en silicagels. Deze materialen hebben de eigenschap dat ze een hoge opnamesnelheid hebben van het water, waardoor relatief hoge vermogens bereikt kunnen worden. Ook is de krimp en uitzetting van het materiaal minimaal tijdens het ontladen en laden van het materiaal door de intrinsieke structuur van deze materialen. Nadelen van deze materialen zijn de relatief lage opslagdichtheid ( $<0.3 \text{ GJ/m}^3$ ) en de prijs per opgeslagen MJ (4-10 €/MJ [9]). Deze materialen zullen daardoor niet het uiteindelijke opslagmateriaal worden wanneer ruimtebeslag een kritische parameter wordt. Echter het zijn goede materialen voor de eerste testen met reactoren, die gebruikt kunnen worden als referentiemateriaal. Daardoor is het van belang om deze materialen te karakteriseren op eigenschappen zoals warmtetransport in de korrel, wateropnamesnelheden en dehydratatiekarakteristieken. Dan kunnen deze materialen gebruikt worden om reactoren te testen en modellen te ontwikkelen en valideren.

### **2.3.2 Zouthydraten/composieten**

Om de gewenste opslagdichtheid en werkcondities te bereiken die verwacht worden door de verschillende use-cases (zie tabel 1) wordt er gekeken naar andere TCMs dan zeolieten en silicagels. In de huidige literatuur is er vooral gekeken naar opslagdichtheden en uitstoottemperaturen. Huidige demonstraties met een niet op energiedichtheid geoptimaliseerd systeem levert op dit moment ongeveer  $0.1-0.7 \text{ GJ/m}^3$  [10].

In toekomstig onderzoek zal extra aandacht nodig zijn voor hydratatiecondities en reactiesnelheden onder de opgelegde condities, zoals temperatuur en waterdampdruk, om de gevraagde specificaties (zie Tabel 1) te behalen. Enkel hydrateren van een zout onder de opgelegde condities is niet voldoende, ook is informatie over reactiesnelheden noodzakelijk. Hierdoor zal er een gecombineerd literatuur/experimenteel onderzoek gedaan moeten worden. Met behulp van  $p$ - $T$  diagrammen is het mogelijk om de condities van het hydrateren van een zout te kunnen bepalen, evenals de maximale hydratatietemperatuur van een bepaald systeem. Hiermee kan een voorselectie gemaakt worden. Met experimenten is het dan mogelijk om de reactiesnelheden te verkrijgen onder de opgelegde condities. Idealiter zal hier een generiek model voor gemaakt kunnen worden op microschaal, zodat niet elk zout afzonderlijk getest moet worden. Met dit model kan het gedrag van het zout op microschaal worden beschreven wat nodig is voor een model op macroschaal. Daarnaast is Thermogravimetrische analyse<sup>2</sup> (TGA) data van belang voor reactie optimalisatie.

### **2.3.3 Alternatieve adsorptiematerialen/oplosmiddelen/composieten**

Op dit moment is er vooral interesse voor TCMs met een vast stof-damp reactie, waarbij de damp in het algemeen waterdamp is. Wanneer hogere opslagdichtheden bereikt willen worden, betere warmtegeleiding en /of betere  $p$ - $T$  aanpassing met betrekking tot use-cases, dan kan het noodzakelijk zijn om het blikveld op de materialen te vergroten. Hierbij kan gedacht worden aan andere verdampingsmedia zoals ammonia of methanol, of composieten van bv. zeolieten in combinatie met hydraten. Maar ook nog niet eerder genoemde chemische reacties of overgangen van bv. vaste stof-vloeistof zullen beschouwd moeten worden staan.

### **2.3.4 Ander temperatuurbereik adsorptiematerialen/oplosmiddelen/composieten**

De gekozen use-cases in deze roadmap zijn voor gebouwde omgeving waarbij de dehydratatie temperatuur  $<100 \text{ }^\circ\text{C}$  en de temperatuursuitgave van de opslag  $>60 \text{ }^\circ\text{C}$  ligt voor tapwater toepassingen

---

<sup>2</sup> Thermogravimetrische analyse (TGA) is een analytische methode waarbij men het gewicht van een monster meet tijdens verhitting.

en >40 °C voor ruimteverwarming (zie Tabel 1). Het doel van dit onderzoek is om binnen deze use-cases o.a. te kijken naar mogelijkheden om warmte onder hogere temperatuur op te slaan, zo kan er in de toekomst zonnecollectoren ingezet worden die hogere temperaturen genereren om de TCMs op te laden. Het voordeel hiervan is waarschijnlijk een hoger ontladvermogen. Over het algemeen geldt: hoe hoger de laadtemperatuur is, hoe lager de noodzakelijke druk van het verdampingsmedia is. Bij het verhogen van de laadtemperatuur is de verwachting te kunnen voorzien in extremere warmtevraag/ hogere opslagdichtheden/ andere temperatuurbereiken in de gebouwde omgeving. Dit is waarschijnlijk nog niet mogelijk met de eerdere gebruikte beperkingen van de materialen en daarom zullen alternatieve chemische reacties bestudeerd moeten worden.

Ca(OH)<sub>2</sub> is bijvoorbeeld een zout welke bekend staat om zijn goede laad- en ontladkarakteristieken [11], enkel voor de huidige toepassingen heeft het een te hoge oplaadtemperatuur. Naast het variëren van de vaste stof kan ook het verdampingsmedium gevarieerd worden voor het verkrijgen van een ander temperatuurbereik van de opslag. Wanneer het verdampingsmedium bv. ammonia, methanol of koolstofdioxide is, dan kan de warmteopslag ook functioneren onder de 0 °C.

### 2.3.5 Stabiliteit van TCM

Voor de gekozen use-cases is het doel om een stabiel systeem te hebben welke meerdere keren kan laden en ontladen met constante prestaties. Zo is het voor seizoensmatige opslag met een stabiel systeem voor bv. ruimteverwarming of tapwaterverwarming nodig dat het materiaal minimaal enkele decennia gebruikt kan worden zonder teveel degradatie (Aantal cycli ( $N$ )= 20 - 30), meer is beter. Het omzetten van een overmaat aan zonnearmte of elektriciteit is de wens minimaal 10 jaar het systeem robuust te laten opereren ( $N = 1000 - 3000$ ). Huidige onderzoeken laten zien dat voornamelijk de hydraten geen constant laad/ontlaad gedrag vertonen bij cyclisch gebruik [12], wat het laad-en ontladvermogen zal beïnvloeden. Dit zal gedeeltelijk komen doordat condities zijn opgelegd aan de TCMs waarin overhydratatie mogelijk is, maar voornamelijk doordat tijdens het hydrateren/dehydrateren de geometrie van de TCMs verandert. De meeste TCMs (vooral de reactieve varianten) hebben te maken met volumeveranderingen, wat zorgt voor afbrokkelen van de korrels, maar ook gedeeltelijke afsluiting van poriën in de korrel en samenklontering.

Een van de mogelijke oplossingen is encapsulatie van het materiaal. Hierbij kan gedacht worden aan het impregneren van een matrix met zouthydraten (bv. silicagel+ CaCl<sub>2</sub> [13]) of aan het encapsuleren van de TCMs (bv. core-shell). Naast impregnatie en encapsulatie is het aanbrengen van een dragende structuur (backbone) voor TCMs interessant om een stabiel gedrag te realiseren (matrix encapsulatie). Deze impregnatie-, capsulatie- en backboneontwikkelingen worden momenteel gedaan met een polymeer waarmee TNO en Wendelin de eerste experimenten doen. Daarnaast is er al wat ervaring met sproeidrogen van CaCl<sub>2</sub> [14].

Initieel zal de focus liggen op onderzoek naar het stabiliseren van TCMs tot 100 °C, als gevolg van de laadtemperatuur in de besproken use-cases. Enkel als er ook TCMs ontwikkeld worden voor andere temperatuursgebieden, dan zal de encapsulatie ook hiervoor ontwikkeld worden. Het stabiliseren van de TCMs zal de levensduur van TCMs verhogen en daardoor kan het mogelijk worden dat de investeringskosten over een langere periode terugverdiend kunnen worden.

### 2.3.6 Opschaling materiaalonderzoek

Het produceren van het TCMs materiaal in de gewenste korrelgrootte, korrelvorm en compositie zal ontwikkeld moeten worden. Het is belangrijk om vroegtijdig rekening te houden met de (on)mogelijkheden voor bulkproductie en daarmee de kosten. Te verwachte uitdagingen tijdens het opschalen zullen betrekking hebben op de vulgraad van de korrels (dichtheid), de homogeniteit van de korrelvorm, het zuiveren van het actieve TCM, het minimaliseren van encapsulatie-materiaal. Initieel zullen de materialen in kleine hoeveelheden geproduceerd worden voor karakterisering (<1 kg).

Gedurende het traject zal er opgeschaald worden voor de veelbelovende TCMs tot een productie niveau zodat de eerste prototypes gevuld kunnen worden (<100 kg). Uiteindelijk moeten de materialen ook grootschalig geproduceerd worden, zodat ze commercieel gebruikt kunnen worden in TCM-reactoren (> 1000 kg)

## **2.4 Verbetering warmte- en damptransport**

Het doel is om met behulp van een juiste keuze in de geometrie van het bed en korrels al de warmtepotentieel uit de TCM te halen op de gewenste temperatuur en met voldoende vermogen. Hierbij moet de TCM niet aangetast worden en stabiel zijn over meerdere cycli. Niet alleen moet de warmte uit de TCMs gehaald kunnen worden, maar ook het opladen van de TCMs (het dehydrateren) zal met een bepaald vermogen moeten plaatsvinden, zonder de korrel te beschadigen. Voor beide situaties is het nodig om op micro schaal (intern in de korrel) en op macro schaal (het reactor bed) de temperatuur en warmte transport te kunnen voorspellen. Dit onderzoeksblok is sterk gerelateerd aan het gebruikte reactorconcept. Daarnaast is ook de matrix zelf van belang (cf. carbon fiber voor warmtegeleiding-verbetering, en cellulose voor damptransport-snelwegen [14]).

### **2.4.1 Korrel (micro)**

De TCMs zijn over het algemeen een poreus materiaal. Dat verlaagt de warmtegeleidbaarheid en verlengt de af te leggen afstand van de damp in de korrels. Wanneer de damp niet met de TCM kan reageren, zal er geen vermogen geleverd kunnen worden, evenals wanneer de TCM-korrel zijn warmte niet kan uitwisselen.

Met behulp van een  $p$ - $T$ -diagram kan bepaald worden onder welke condities een TCM zal hydrateren of dehydrateren. Enkel wordt het vermogen dat geleverd wordt door een TCM voornamelijk bepaald door de warmteoverdracht en damptransport in een TCM-korrel. Deze beïnvloeden de interne condities van een TCM, welke effect hebben op reactie snelheden en dus het te leveren/absorberende vermogen. Over het algemeen zijn de hydratatie- en dehydratatiesnelheden sterk beïnvloed door het verschil in opgelegde waterdampdruk en de evenwichtswaterdampdruk van de thermochemische reactie. Dit verschil kan over het algemeen groter zijn tijdens het dehydrateren, zonder de korrel aan te tasten. Het hydrateren wordt het verschil meestal gelimiteerd door de deliquescence waterdampdruk<sup>3</sup> van het materiaal. Tijdens het dehydrateren aan de andere kant zal rekening gehouden moeten worden dat opgelegde temperatuur aan de TCMs niet hoger is dan de smelttemperaturen van de verschillende hydraten in de TCM. Over het algemeen zal het hydrateren meer tijd kosten [12] en daarmee een lager vermogen kunnen leveren dan het vermogen wat opgenomen wordt door de TCMs tijdens het dehydrateren.

In de huidige literatuur is er van enkele TCMs het transport van damp binnen een kristal gemeten tijdens dehydratatie reacties [15,16] en hydratatie reacties [17]. Hierbij zijn de opgelegde condities niet of minimaal gevarieerd. Over temperatuurmetingen in een korrel is geen literatuur gevonden. Experimenteel is het lastig om temperatuurmetingen intern uit te voeren zonder de geometrie van de korrel te beschadigen. Om temperatuurprofielen in een korrel te kennen zou een combinatie van massametingen en modellering een mogelijkheid zijn. Deze informatie is belangrijke input voor de ontwikkeling van modellen op reactor bed niveau [18].

### **2.4.2 Interactie werkmedium/TCM (macro)**

Op macro schaal is het van belang dat het transport van warmte en damp vanaf of naar de korrel voldoende is zodat het gevraagde (ont)laadvermogen kan worden behaald.

---

<sup>3</sup> De deliquescence waterdampdruk is de druk waarbij het hydraat een zoutoplossing vormt.

Hiervoor moet o.a. de warmtegeleiding naar de warmtewisselaar in kaart gebracht worden. Op dit moment is dat gedeelte, de warmtegeleiding tussen de korrel en de warmtewisselaar, een kritiek punt gebleken. Oplossingen zoals een honingraat structuur als warmtewisselaar, plakken van de TCMs aan de warmtewisselaar of lucht als warmtewisselend medium zijn nog in de experimentele fase. Vooral de stabiliteit op lange termijn moet nog verbeterd worden.

Een ander punt van aandacht is de toe- en afvoer van damp in de reactor. Het te leveren vermogen hangt sterk af van de massaflux van de damp in het systeem. Het optimaliseren van deze flux is daarom van groot belang, zeker in het geval de reactors van labschaal naar commerciële schaal gaan. Huidige experimenten laten al zien, dat het opschalen van lab naar grootschalige opslag nieuwe uitdagingen oplevert [7,18,19]. Hierbij kan gedacht worden aan het dichtslibben van transport kanalen door korrelvormveranderingen of veranderende warmteafvoer als gevolg van corrosie aan de warmtewisselaar. Een combinatie van modellering en experimenteel onderzoek op (sub)systeemniveau is hierbij noodzakelijk.

### **2.4.3 Anisotrope (structuur) vaste composieten**

De kennis opgedaan tijdens het bestuderen van korrels op micro schaal en de interactie tussen een werkmedium en TCM zal in dit gedeelte gebruikt worden. Met die kennis zal een model gemaakt worden, waarmee om een optimalisatie van de geometrie van de TCM-korrels gedaan kan worden, zodat het opslagsysteem voldoet aan de eisen (zoals: vermogen, uitvoer temperatuur en energiedichtheid) gesteld in de use-cases. Een reactor bestaat in de huidige literatuur uit bolvormige kogels van TCM-materiaal. Optimalisatieparameters zullen onder andere zijn: de geometrie van de kogels (diameter, diameter verdeling tussen de verschillende kogels, vorm) en de porositeit (in de kogel en in het bed). Tijdens het optimaliseren moet meegenomen worden dat de bedachte structuren ook geproduceerd kunnen worden.

## **2.5 Component ontwikkeling**

Om tot succesvolle toepassingen te komen zullen specifieke componenten ontwikkeld moeten worden voor de specifieke toepassing. Deze zullen hieronder besproken worden.

### **2.5.1 Warmtewisselaar**

Er kan gebruik gemaakt van een warmtewisselaar om warmte over te dragen van een transportmedium (water, lucht) naar een TCM en omgekeerd. Vooral in geval van luchtarme TCM-systemen is deze warmtewisseling kritisch. Optimalisatie hiervan levert grote winsten op in compactheid en efficiëntie van een systeem. Om tot de meest geschikte warmtewisselaar te komen moet er onderzoek gedaan worden naar diverse aspecten binnen de warmtewisselaar. Dit kan onderzoek zijn naar:

- De keuze van toe te passen materialen.
- Coatings om corrosie te voorkomen.
- Warmteoverdracht door het bed om zodoende een hoog vermogen te realiseren bij minimaal volume dat gebruikt wordt voor de warmtewisselaar.
- Optimale warmtewisselaarconfiguratie voor een specifiek TCM.
- Geluidsproductie van de warmtewisselaar tijdens het laden/ontladen.

### **2.5.2 Kritische componenten**

Onderstaand worden een aantal deelproblemen verder toegelicht welke betrekking hebben op de meest essentiële onderdelen van het systeem, het opslag/reactor vat, warmtewisselaar, kleppen en verdamper.

### **2.5.2.1 Voorkomen Corrosie**

Indien corrosie optreedt, dan vinden reacties plaats, waarbij veelal oxides ontstaan. Deze oxides vormen een blokkade in de werking van een systeem (depletie, uitdampen, blokkeren condensor). Corrosie kan ook de reactorwand aantasten met veiligheidsrisico's tot gevolg. Technisch zijn diverse oplossingen mogelijk. Voorkomen door middel van bijvoorbeeld materiaalkeuze of gebruikmaken van een coating. Daarnaast is er een sterke focus noodzakelijk op het aanbrengen van de coating op de (relatief) complexe geometrie die veelal gebruikt wordt. In dit onderzoek wordt gestreefd naar een solide oplossing die betrouwbaar, eenvoudig en goedkoop aangebracht kan worden. Daarnaast zullen de mogelijkheden om een warmtewisselaar met een ander materiaal te maken, bijvoorbeeld kunststof, moeten worden bekeken.

### **2.5.2.2 Realiseren vermogen**

Het gewenste vermogen is sterk afhankelijk van de beoogde toepassing. Door toepassing van waterbuffers kan eenvoudig een groot vermogen gerealiseerd worden. Echter is de energiedichtheid van waterbuffers relatief laag. Om hoge (systeem) opslagdichtheden te realiseren in vooral de korte termijn opslagsystemen zullen te grote waterbuffers voorkomen moeten worden. Bij verkleining van deze buffers zal het volume in kortere tijd opgewarmd moeten worden om altijd voldoende tapwater te kunnen leveren (of continue ontladen in een korte termijn opslagvat [6]). Een optie welke bekeken zal worden is directe opwarming waardoor buffering niet noodzakelijk is. Binnen deze roadmap wordt specifiek gericht op de woningmarkt, waarin momenteel een gasketel nog gangbaar is. De huidige gasketels leveren een vermogen tussen 18 en 30 kW in geval van de vraag naar warm tapwater. Ook is een vermogen van enkele kilowatts noodzakelijk om een woning op te warmen/koelen naar gewenste temperatuur of op temperatuur te houden.

In componentontwikkeling wordt specifiek gericht op optimalisatie van de warmteoverdracht aan zowel condensor/verdamperzijde als aan de reactorzijde (adsorber). Als een optimale warmteoverdracht gerealiseerd wordt is een minimum hoeveelheid warmtetransport medium noodzakelijk en slechts een klein temperatuurverschil tussen reactief materiaal en transportmedium.

Dit zal leiden naar hogere energiedichtheden van een systeem, geoptimaliseerd naar de toepassing. Ook voor het opladen zal moeten gebeuren met een bepaald vermogen zodat is een bepaald vermogen noodzakelijk

### **2.5.2.3 Ontwikkeling verdamper**

Het doel is om na afloop van het onderzoek een verdamper/condensor te kunnen ontwikkelen en uiteindelijk te produceren die onder diverse condities de gewenste warmteoverdracht realiseert en daarmee een voorspelbare waterdampdruk oplevert.

Bij grotere energiecapaciteiten neemt het zout een aanzienlijke hoeveelheid verdampingsmedium op, zoals: water, ammoniak of methanol. Hierdoor zal gedurende een laad-/ontlaadcyclus (adsorptie/desorptie) de warmteoverdracht variëren binnen de verdamper. Als gevolg hiervan fluctueert de temperatuur van het verdampingsmedium en daarmee de partiële dampdruk. Fluctuaties in de partiële dampdruk kunnen leiden tot onvoorspelbare prestaties. Zo is het mogelijk dat overhydratatie van zouten plaatsvindt, wat kan resulteren in het oplossen van de TCM. Dit zal de geometrie van de korrels/kogels aantasten en daarmee de prestaties van het systeem. Anderzijds kan indien onvoldoende warmte aangevoerd wordt bevrozing van het verdampingsmedium optreden, afhankelijk van het temperatuur regime en systeemkeus. Hierbij kan potentieel schade ontstaan aan constructies.

## **2.6 Systeemontwikkeling**

### **2.6.1 Systeem engineering en modellering**

Het doel van deze roadmap is om een systeem te ontwikkelen welke warmte kan opslaan op een zo efficiënt mogelijke manier. Dit onderzoek zal gaan om alternatieve design-concepten te ontwikkelen en de verschillende mogelijke concepten tegen elkaar af te wegen op basis van performance, initiële kosten en operationele kosten, materiaalgebruik, veiligheidsaspecten, milieuaspecten etc.

Nadat op basis van dit onderzoek een eerste prototype is gerealiseerd zal op basis van een post-implementatie toetsing worden nagegaan in welke mate het eerste industriële prototype voldoet aan de gestelde KPI's. Hieruit wordt bepaald of verdere doorontwikkeling nodig is voordat dit prototype geschikt is voor een eerste kleinschalige pre-productie serie. Voor thermochemische warmteopslag zijn er drie use-cases aangewezen welke beschreven zijn in Tabel 1. Al lijken zij veel op elkaar volgens de specificaties, toch zullen er verschillen bestaan. Hierdoor is het noodzakelijk dat er verschillende systemen ontworpen moeten worden. Deze systemen kunnen parallel van elkaar ontwikkeld worden in verschillende projecten, met in achtneming van goede uitwisseling van kennis tussen de projecten.

#### **2.6.1.1 Modelling**

Modelling is nodig voor onderzoek naar en de ontwikkeling en optimalisatie, van zowel het gehele energiesysteem van een gebouw (of een woning of een aantal woningen) als van het warmteopslagsysteem als component van dat systeem. Het gehele energiesysteem bestaat uit de in de regel fluctuerende elektriciteits- en warmtevraag van het gebouw; de door het systeem geleverde, ook vaak fluctuerende elektriciteit en warmte; de apparaten die elektriciteit en warmte leveren; en de opslagsystemen die elektriciteit en warmte opslaan. Daarnaast kunnen ook de netaansluitingen deel uitmaken van het energiesysteem.

Voor het onderzoek naar materialen en technologieën voor warmteopslagsystemen moeten een aantal specificatiewaarden van een uiteindelijk beoogd warmteopslagsysteem bekend zijn. Dit zijn o.a. de opslagcapaciteit, het laadvermogen en het ontladvermogen. Deze specificatiewaarden hangen af van de andere componenten in het energiesysteem en van de interactie van de verschillende componenten met elkaar. In hoeverre de specificatiewaarden daadwerkelijk gehaald kunnen worden kan bepaald worden met behulp van de resultaten op reactorniveau uit 2.2. Bij een gelijk gebruiksprofiel en een gelijk leverprofiel zijn meerdere combinaties van componenten en groottes van componenten mogelijk. Om de mogelijke combinaties van componenten en mogelijke specificaties van die componenten in het energiesysteem te kunnen bepalen moet een rekenmethode ontwikkeld worden met bijhorende rekentool.

#### **2.6.2 State of charge**

Tijdens het gebruiken van het warmteopslagsysteem is het van belang dat het systeem gecontroleerd wordt. Hierdoor kan er op het juiste moment warmte onttrokken of toegevoegd wordt aan het systeem. Hiervoor is het noodzakelijk dat een regelsysteem ontworpen wordt, welke o.a. de waterdampdruk, temperatuur in de TCM, de hydratatiegraad van de TCM, kan registreren. Hiermee zou het systeem na productie nog bijgeregeld kunnen worden zodat voldaan word aan specifieke eisen van klanten.

#### **2.6.3 Systeemintegratie**

De te ontwikkelen warmteopslagsysteem dient te worden geïntegreerd in de woning zoals beschreven in de use-cases van de roadmap. Dit betekent enerzijds integratie met de warmtebron, anderzijds integratie met het afgiftesysteem in de woning, zowel ten aanzien van temperatuurniveaus als watervolume stromen. Daarnaast is een regelsysteem nodig, dat geavanceerder kan zijn dan huidige

thermostaten gezien het feit dat het laden en ontladen van de TCM gestuurd wordt met behulp van de opgelegde waterdamp druk en temperatuur.

#### **2.6.4 Demonstratie en testen**

Om een goede vergelijking en validatie van modellen en testopstellingen te krijgen van de prestaties van een nieuw ontwikkelde warmteopslagsystemen zijn referentietesten noodzakelijk. Deze zouden vergeleken kunnen worden met een water opslag tank en met het systeem ontwikkeld onder MERITS. Hierbij zullen de prestaties vergeleken moeten worden aan de hand van:

- Volumedichtheid; totaal noodzakelijk volume incl. periferie instrumenten direct op de opslag in relatie to waterbuffer.
- Laad en ontlad temperatuur; behalen de gevraagde specificaties.
- Vermogen; behalen de gevraagde specificaties.
- Kostenindicatie; kosten huidige buffervaten met water in vergelijking met de te verwachten bulkkosten voor productie van materialen.
- Levensduur; is de cycleerbaarheid van het systeem zoals verwacht.
- Opslagduur vs. Verliezen; TCMs zijn noodzakelijk voor seizoensopslag [6].
- Gebruikerservaring; is het comfortniveau voldoende.

Naast objectieve laboratoriumtesten kunnen veldtesten informatie geven over vooral het dynamische gedrag van de warmte opslag in de praktijk, gegeven de wisselende situaties die in verschillende woningtypen bij verschillend gebruikersgedrag voorkomen.

### **2.7 Techno- economische analyse**

Het doel is dat een opslagsysteem ontwikkeld word welke zorgt voor een minimale milieu-impact en lage kosten. De haalbaarheid van deze doelen met de voorgestelde technieken om warmte op te slaan zal meermaals tijdens het proces geanalyseerd moeten worden aan de hand van een drietal analyses. Deze zullen afhankelijk van de use-cases uitgevoerd moeten worden.

#### **2.7.1 Levenscyclusanalyse**

Bij de realisatie van een totaal energiesysteem moet gekeken worden naar de milieu-impact van de gekozen materialen. Dit zal gedaan worden aan de hand van bijvoorbeeld levenscyclusanalyse (LCA). De consequenties van materiaalkeuzes van het hele energiesysteem worden hiermee inzichtelijk gemaakt over de hele levenscyclus van het systeem, van de winning van grondstoffen via productie en (her)gebruik tot en met afvalverwerking. Het doel is om te bepalen hoe de milieu-impact kan worden geminimaliseerd van een warmteopslagsysteem. Voor deze inschattingen en optimalisaties is een rekenmethode nodig met bijbehorende tool. Dit kan een uitbreiding zijn van de tool waarmee de mogelijke combinaties en mogelijke specificaties kunnen worden bepaald (zie 2.6.1.1). De per component van het systeem benodigde technische, economische en milieutechnische gegevens kunnen worden gehaald uit de literatuur en de resultaten op reactorniveau uit 2.2 . Deze analyse kan verschillen per use-case en zal meermaals tijdens het proces herhaald moeten worden, omdat bv. veranderende materiaalkeuze de haalbaarheid kan beïnvloeden.

#### **2.7.2 Economische haalbaarheid**

Een economische haalbaarheidsstudie moet gedaan worden om een inschatting van de financiële of economische mogelijkheden van het energiesysteem te geven en daarin te kunnen optimaliseren. Dit kan op vergelijkbare manier als beschreven is voor milieu-impact in 2.7.1. enkel nu naar kosten van het



totale energiesysteem. Deze analyse kan verschillen per use-case en zal meermaals tijdens het proces herhaald moeten worden, omdat bv. veranderende materiaalkeuze de haalbaarheid kan beïnvloeden.

### **2.7.3 Technologische analyse**

Hier wordt ingegaan op de meer algemene technologische ontwikkeling voor het invoeren van een warmteopslag gebaseerd op TCM. Uiteraard zijn er technologische ontwikkelingen die een bedreiging of een kans op kunnen leveren voor de invoer van deze warmteopslag welke kan verschillen per use-case. Het is een uitdaging om te kunnen beoordelen of dit het geval is. Gedurende het proces zal dit meermaals moeten worden geëvalueerd.

### 3 Bronnen

- [1] Cijfers over wonen en bouwen (4 februari 2016). Uit: <http://cowb.datawonen.nl/index.html>.
- [2] K. E. N'Tsoukpoe, T. Schmidt, H. U. Rammelberg, B. A. Watts, and W. Ruck, "A systematic multi-step screening of numerous salt hydrates for low temperature thermochemical energy storage," *Appl. Energy*, vol. 124, pp. 1–16, Jul. 2014.
- [3] European commission, Thematic research summary, Energy storage, 2014.
- [4] IEA (2011), Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment, IEA Technology Roadmaps, OECD Publishing, Paris.
- [5] G. J. Kipourous and D. R. Sadoway, "The chemistry and electrochemistry of Magnesium production," *Adv. Molten Salt Chem.*, vol. 6, pp. 127–209, 1987.
- [6] P.A.J. Donkers (2015). Experimental study on thermochemical heat storage materials. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. ((Co-)promot.: prof.dr.ir. Olaf Adan, dr.ir. Leo Pel & M. Steiger).
- [7] A. Solé, I. Martorell, and L. F. Cabeza, "State of the art on gas–solid thermochemical energy storage systems and reactors for building applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 386–398, 2015.
- [8] A. De Jong, L. Van Vliet, C. Hoegaerts, and M. Roelands, "Thermochemical heat storage – from reaction storage density to system storage density," in *SHC 2015, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, 2015.
- [9] B. Epp (24 November 2015). Austria: Promising Results from Test Facility with Solid Zeolite Storage Tank. Uit: <http://www.solarthermalworld.org/content/austria-promising-results-test-facility-solid-zeolite-storage-tank>.
- [10] B. Michel, N. Mazet, and P. Neveu, "Experimental investigation of an innovative thermochemical process operating with a hydrate salt and moist air for thermal storage of solar energy: Global performance," *Appl. Energy*, vol. 129, pp. 177–186, 2014.
- [11] Y. A. Criado, M. Alonso, and J. C. Abanades, "Kinetics of the CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> Hydration/Dehydration Reaction for Thermochemical Energy Storage Applications," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, pp. 12594–12601, 2014.
- [12] P. A. J. Donkers, L. Pel, and O. C. G. Adan, "Experimental studies for the cyclability of salt hydrates for thermochemical heat storage," *J. Energy Storage*, vol. 5, pp. 25–32, 2016.
- [13] Y. I. Aristov, M. M. Tokarev, G. Cacciola, and G. Restuccia, "Selective water sorbents for multiple applications, 1. CaCl<sub>2</sub> confined in mesopores of silica gel: sorption properties," *React. kinet. Catal. Lett.*, vol. 59, no. 2, pp. 325–333, 1996.
- [14] R. Cuypers, A. J. de Jong, J. Eversdijk, H. van 't Spijker, H. Oversloot, B. L. J. Ingenhut, R. K. H. Cremers, and N. E. Papen-Botterhuis, "Microencapsulation of Salts for Enhanced Thermochemical Storage Materials," in *40th Annual Meeting and Exposition of the Controlled Release Society, Honolulu, Hawaii, USA*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 212.
- [15] S. Lan, H. Zondag, A. van Steenhoven, and C. Rindt, "Kinetic study of the dehydration reaction of lithium sulfate monohydrate crystals using microscopy and modeling," *Thermochim. Acta*, vol. 621, pp. 44–55, 2015.
- [16] P. A. J. Donkers, K. Linnow, L. Pel, M. Steiger, and O. C. G. Adan, "Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O dehydration in view of thermal storage," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 134, pp. 360–366, 2015.
- [17] I. V. Koptug, L. Y. Khitrina, Y. I. Aristov, M. M. Tokarev, K. T. Iskakov, V. N. Parmon, and R. Z. Sagdeev, "An <sup>1</sup>H NMR Microimaging Study of Water Vapor Sorption by Individual Porous Pellets," *J. Phys. Chem. B*, vol. 104, no. 8, pp. 1695–1700, Mar. 2000.
- [18] A. J. De Jong, F. Trausel, C. Finck, L. Van Vliet, and R. Cuypers, "Thermochemical heat storage - System design issues," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 309–319, 2014.
- [19] A. Lass-Seyoum, M. Blicher, D. Borozdenko, T. Friedrich, and T. Langhof, "Transfer of laboratory results on closed sorption thermo- chemical energy storage to a large-scale technical system," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 310–320, 2012.