

TNO PUBLIEK

Westerduinweg 3  
1755 LE Petten  
Postbus 15  
1755 ZG Petten**TNO-rapport**[www.tno.nl](http://www.tno.nl)**TNO 2020 R10048 | Eindrapport**

T +31 88 866 50 65

**Openbare eindrapportage COMSTES**

Datum	22 januari 2020
Auteur(s)	Michel van der Pal, Robert de Boer
Aantal pagina's	11
Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Projectnaam	COMSTES
Projectnummer	060.38392

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

TNO PUBLIEK

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de samenwerkende partijen.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Bijdrage aan de doelstellingen van de regeling .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Spin off binnen en buiten de sector .....</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Openbare publicaties .....</b>	<b>10</b>
<b>7</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>11</b>

# 1 Inleiding

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## Gegevens project

Projectnummer	1407204
Projecttitel	Characterization of Materials and Systems for Thermal Energy Storage, COMSTES
Penvoerder en medeaanvragers	TNO, De Beijer RTB, SPIE, Liandon (Qirion)
Projectperiode	1/1/2018-21/11/2019

Deze rapportage is tot stand gekomen met bijdragen van Tijmen Salet en Rob Bremer (Qirion), Ricardo Crombeen (Spie), Janick Elferink (De Beijer RTB), Bas van Ravensteijn, Pim Donkers, Ruud Cuypers, Bobby van Hemert, Michel van der Pal (TNO).

## Contact en verkrijgbaarheid rapport

Exemplaren van dit rapport zijn te verkrijgen via de repository van openbare TNO-rapporten: <https://repository.tudelft.nl/tno/>.

Contactpersoon voor dit project is:

Robert de Boer

E-mail: [robert.deboer@tno.nl](mailto:robert.deboer@tno.nl)

Tel: 06-50009572



## 2 Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de samenwerkende partijen

De vraag naar warmte betreft >50% van de totale energievraag in Nederland. Om aan deze energievraag te voldoen wordt momenteel nog voor het overgrote deel gebruik gemaakt van fossiele bronnen, met name aardgas. Voor de gebouwde omgeving zal ruimteverwarming en de bereiding van warm tapwater in de energietransitie steeds meer op basis van duurzame energiebronnen ingevuld moeten worden, om aan de gestelde CO<sub>2</sub>-emissiereductie doelen uit het klimaatakkoord te kunnen voldoen. Er bestaan diverse opties voor besparing op het primair energiegebruik voor ruimteverwarming en warm tapwater bereiding voor woningen, kantoren, en utiliteitsgebouwen en voor de invulling van de warmtevraag vanuit duurzamere bronnen. In principe is er in ruime mate restwarmte en zonnewarmte beschikbaar om aan deze vraag te voldoen, echter de inbedding in de gebouwde omgeving maken een verschuiving in de tijd van vraag en aanbod en is er een efficiënte en compacte wijze van opslag nodig om deze potentie ten volle te kunnen benutten. De mismatch in tijd tussen duurzaam aanbod en vraag naar warmte, maakt dat er een toenemende behoefte ontstaat naar opslag van warmte om aanbod en vraag goed op elkaar af te stemmen.

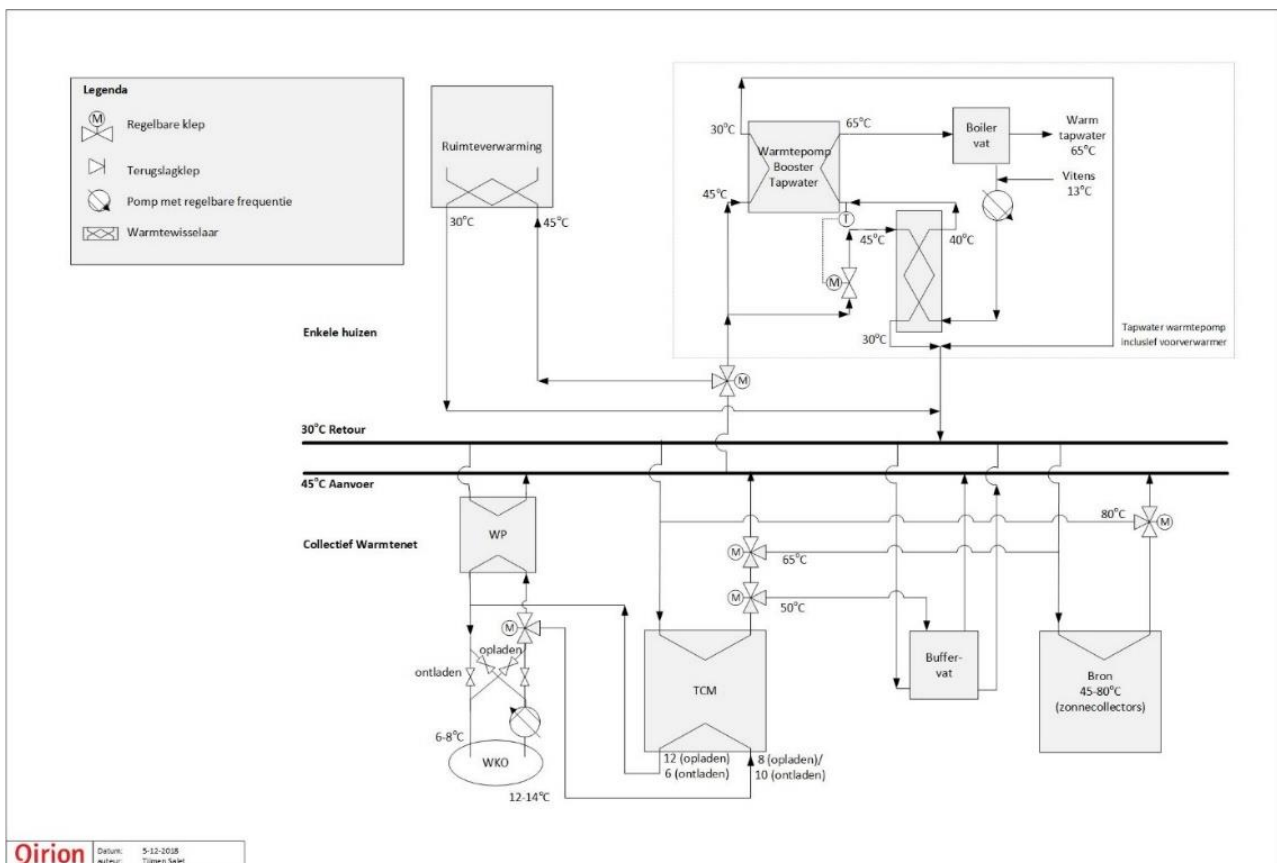
De doelstelling van het COMSTES-project is om de Nederlandse kennispositie op het gebied van compacte warmteopslag te versterken ten behoeve van de oplossing van het energievraagstuk. De focus in dit project ligt daarbij op kennisopbouw voor compacte warmteopslag in thermochemische materialen (TCM). Deze opslagtechnologie maakt het mogelijk om warmte compact en voor lange termijn te kunnen bewaren. Deze kennis dient als basis voor de verdere ontwikkeling van compacte warmteopslag naar concrete toepassingen.

In het project is hiertoe een systeemstudie uitgevoerd naar de inzet van TCM-warmteopslag op wijkniveau. Door middel van modelberekeningen van diverse configuraties van warmtenetwerken wordt de impact van thermochemische warmteopslag op de energiehuishouding bepaald. Daarnaast zijn in het project een drietal meet methodes toegepast om de belangrijkste eigenschappen van de TCM's voor gebruik in een warmteopslagsysteem te kunnen beoordelen. De eerste methode betreft zogenaamde calorimetrische bepalingen op milligram schaal om de reactiewarmte, temperatuur, druk, reactiesnelheid en cyclische stabiliteit van het TCM vast te stellen. De tweede methode betreft metingen van het laad-ontlaad gedrag van TCM in hoeveelheden van  $\pm 100$  gram, waarbij de cyclische stabiliteit en uitzetting-krimp van de TCM wordt vastgesteld. Zeer waardevol daarin zijn de visuele observaties van het materiaal tijdens de reacties. Als derde methode is een meetstelsel toegepast voor bepaling van de thermische prestaties op kilogram schaal in een warmtewisselaar, als bouwsteen van een TCM systeem. Deze meetmethodes zijn aangevuld met de ontwikkeling van een TCM-reactormodel, waarin de verzamelde meetgegevens worden gebruikt. Dit model dient ter ondersteuning van het ontwerp van toekomstige TCM-systemen.

### 3 Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing

#### Rekenmodel op wijkniveau

Binnen het project is een rekenmodel ontwikkeld waarin de warmte vraag en -aanbod op wijkniveau dynamisch is gesimuleerd. De warmte vraagprofielen zijn samengesteld op basis van verschillende woningtypes met ruimteverwarming en tapwater. In dit model wordt naast TCM ook gebruik gemaakt van warmtepomp technologie om zo te komen tot optimaal warmtegebruik en een minimale carbon footprint. Twee type warmtenetwerken, waarin de warmte wordt in- en uitgekoppeld, zijn beschouwd: een lage temperatuur netwerk, weergegeven in Figuur 1, typisch voor nieuw aan te leggen netwerken, en een hoge temperatuur netwerk, typisch voor bestaande netwerken. Uit deze modelberekeningen is gebleken dat thermochemische warmte-opslag een significante bijdrage kan leveren aan het reduceren van de carbon footprint van woningen en wijken, zie Tabel 1. Aandachtspunt is het aantal cycli dat de thermochemische warmte opslag doorloopt per jaar: wanneer het slechts enkele keren per jaar wordt beladen/ontladen, het volledig TCM scenario, lopen de investeringskosten enorm op ten opzichte van de vermeden kosten voor de gegenereerde warmte.



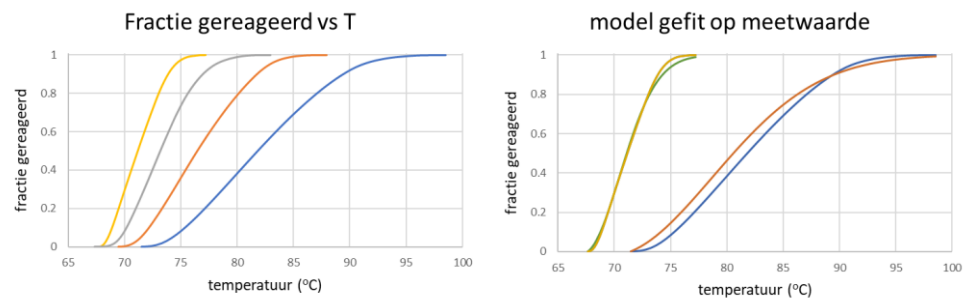
Figuur 1: Proces Flow Diagram van het lage temperatuur warmtenet.

Tabel 1: Resultaten modelberekeningen thermochemische warmteopslag op wijkniveau

Type net	Hoge temperatuur warmtenet				Lage temperatuur warmtenet				
Scenario	Volledig TCM		Volledig Warmte-pomp	Hybride		Volledig TCM		Volledig Warmte-pomp	Hybride
	Zon-thermisch	Rest-warmte		Zon-thermisch	Rest-warmte	Zon-thermisch	Rest-warmte		
Warmtebron									
Systeem-rendement [COP]	12,5	33	2,9	3,5	10	12,5	3,8	4,4	
Benutting warmtebron [%]	43	83	83	59	83	52	91	81	
Investeringskosten [k€/woning]	71,7	21,2	0,4	10,0	8,6	72,1	4,5	13,9	
Operationele kosten [k€/woning/jaar]	2,2	1	0,2	0,5	0,2	2,2	0,2	0,5	
Totale kosten [k€/woning] (15 jaar)	104,9	36,3	4,0	17,3	11,8	104,9	8	21,5	

### Thermochemische materiaalontwikkeling

Simultaan is er gekeken naar de verdere technische ontwikkeling van de thermochemische warmteopslag technologie. Centraal in deze technologie staan het sorptie materiaal en het warmtewisselaar concept. Het sorptiemateriaal – typisch een zouthydraat of ammoniakaat – wordt gedurende het gebruik van het systeem beladen en ontladen met water of ammoniak wat door uitzetting en krimp tot degradatie van het materiaal kan leiden. Om dit te voorkomen is gekozen de materialen van een coating laag te voorzien. Dynamische metingen aan de warmte-effecten over meerdere laad- en ontlad cycli in een hoge druk differentiale scanning calorimetry (HP-DSC) zijn uitgevoerd om de kinetiek en stabiliteit te analyseren. Uit deze metingen, zie Figuur 2, is gebleken dat kinetiek voldoende snel is van de zouten maar dat voor de hydraten de warmte en/of massatransport in de HP-DSC limiterend kan zijn en er andere methoden, bijvoorbeeld large temperatuur jump (LTJ) metingen, hier mogelijk geschikter voor zijn. Voor de stabiliteit blijkt de HP-DSC wel zeer geschikt. Alle geteste zouten blijken stabiel over meerdere cycli, alleen voor de gecoate ammoniakaten blijkt dat de coating na afloop van de experimenten niet meer aanwezig te zijn.



Figuur 2: Links toont de fractie  $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$  gereageerd tot  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$  als functie van temperatuur bij verschillende scansnelheden (0,5, 1, 2 en 4  $\text{K min}^{-1}$ ), rechts twee van de curves met het gefitte model.

Onderstaande Figuur 3 toont de uitzetting als gevolg van het hydrateren van calcium chloride. De hoeveelheid uitzetting/krimp verschilt danig per materiaal, en varieert tussen ongeveer 30% voor  $\text{K}_2\text{CO}_3$  tot ruwweg 400% voor  $\text{SrCl}_2$ . Coating van de pure materialen lijkt het uitzetten weliswaar te beperken, maar niet geheel ongedaan te maken. Daarbij wordt als gevolg van cycleren lekkage van het actief materiaal uit de

coating waargenomen aan de randen. Bij een van de gemeten materialen was de uitzetting in het gepakt bed zodanig dat het vacuüm in de cycleeropstelling werd gecompromitteerd, doordat er een scheurtje was ontstaan in het glas van de opstelling als gevolg van de ontstane fysische druk van het materiaal op dit glas.

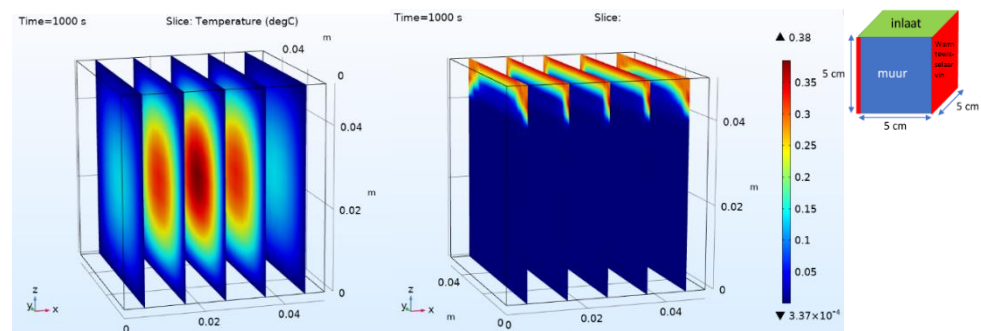
Aan de hand van bovenstaande resultaten is duidelijk dat bij gebruik van een warmtewisselaar gevuld met deze materialen een aantal zaken kan optreden:

- Materialen kunnen de warmtewisselaar als gevolg van cycleren en daardoor ontstane drukopbouw verbuigen/vervormen, waardoor de warmteoverdracht van/naar het actieve materiaal en daarmee het te behalen vermogen wordt beïnvloed;
- Materialen kunnen door de ontstane druk uit de behuizing van de warmtewisselaar worden geperst, waardoor (een deel van) het materiaal niet langer beschikbaar is voor reactie, en waardoor de warmtecapaciteit van de warmtebatterij wordt beïnvloed.



Figuur 3: Links  $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  ontvochtigd, rechts:  $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  bevochtigd.

Op basis van deze korrel simulaties is het gelukt om een eerste model op te stellen waarmee de conversie van anhydraat naar hydraat kan worden gesimuleerd en andersom. De eerste resultaten zijn in Figuur 4 te zien. Duidelijk hierin is dat de warmte gegenereerd tijdens de hydratatie reactie niet homogeen verdeeld is over de hele sample en dat dit ervoor zorgt dat er geen homogeen hydratatie profiel is. Na validatie van het model is het mogelijk de reactor te optimaliseren, waarbij het vermogen, werkcondities, korrelgrootte aan elkaar aangepast kan worden.



Figuur 4 Temperatuur profiel en conversie na 1000 seconden voor een blok geometrie

## 4 Bijdrage aan de doelstellingen van de regeling

### *Duurzame energiehuishouding*

De beoogde markt voor de thermochemische warmteopslag technologie is gebouwde omgeving. Momenteel wordt het merendeel van de warmtevraag in de gebouwde omgeving opgewekt door fossiele brandstoffen, met name aardgas.

De modelberekeningen voor toepassing van TCM op wijkniveau tonen aan dat hiermee duurzame warmte gewonnen in de zomerperiode kan worden ingezet voor het invullen van de warmtevraag in de winterperiode. Op deze wijze kan, afhankelijk van de gekozen uitvoeringsvorm, de warmtebehoefte volledig duurzaam worden ingevuld.

### *Kennispositie*

Het COMSTES-project heeft kennis gegenereerd op het gebied van kinetiek van thermochemische materialen welke bruikbaar zijn in de verdere ontwikkeling van de technologie. Ook is er kennis verzameld rondom het aanbrengen van coatings en de potentie van deze technologie om degradatie van thermochemische materialen tegen te gaan. Het werk gegenereerd in het COMSTES-project zal worden toegepast in vervolgprojecten op het gebied van thermochemische warmteopslag.



## 5 Spin off binnen en buiten de sector

Het werk op gebied van thermochemische warmteopslag wordt onder andere voorgezet in het missiegedreven innovatie programma voor de gebouwde omgeving, MMIP 3 en MMIP 4, waarin onlangs het project “Integrale Energietransitie Bestaande Bouw” is gehonoreerd. Hierin treedt TNO als penvoerder op voor 125 partners, waaronder ook RTB en SPIE, en wordt het onderwerp warmteopslag verder doorontwikkeld met deze partners. In Europees verband wordt het werk uitgebreid in het Horizon2020 project HEAT-INSYDE dat ook door TNO wordt geleid.

## 6 Openbare publicaties

Disseminatie van de resultaten was geen onderdeel van dit project en er zijn dan ook geen openbare publicaties beschikbaar.

## 7 Ondertekening

Petten, 22 januari 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, representing the authors Michel van der Pal and Robert de Boer.

Michel van der Pal, Robert de Boer  
Auteurs

TNO

A handwritten signature in blue ink, featuring a series of vertical, wavy lines and a horizontal stroke at the top, representing M.H.F. Overwijk.

M.H.F. Overwijk  
Research Manager