

A dark blue vertical bar on the left side of the page. A blue arrow-shaped graphic points to the right from the bar, containing the date.

26-6-2020

# PCM's en de knelpunten

Technologische,  
Economische en  
Organisatorische

Project MKB-innovatiestimulering  
Regio en Topsectoren (MIT) 2020.

PCM voor het bevorderen van  
gasloos wonen.

Knelpunten en  
haalbaarheidsvragen.

# Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

## Inhoud

Aanleiding van het project PCM's .....	3
Beoogd product, dienst of proces .....	4
Doelstelling(en) en het beoogde resultaat .....	4
Omschrijving werkzaamheden .....	5
Warmteopslag inleiding .....	6
Warmteopslag: drie grote voordelen .....	7
Methodes voor compacte warmteopslag.....	9
Compacte vormen voor warmteopslag .....	10
Thermochemische opslag .....	11
Chemical Looping Combustion .....	15
Phase Change Materials (PCM) .....	17
Mogelijkheden voor grootschalige warmteopslag.....	18
Grootschalige warmteopslag in water .....	19
Ecovat .....	19
Innovatie opgaven .....	21
Conclusies .....	21
TNO: Warmte-opslag in zout .....	22
Duurzame oplossingen en de voordelen van de warmtebatterij op een rij .....	22
Meer inzichten in thermochemische principe .....	23
Gebruiksduur en inzet .....	24
Een warmtebatterij voor in huis: compact, stabiel en betaalbaar.....	24
Omkeerbaar en stabiel proces .....	24
Veel beter dan bestaande systemen .....	25
Breed toepasbaar .....	25
Wat is entropie? .....	26
Waarom raakt het snoer van je koptelefoon altijd in de war? .....	26
Wat is entropie? En waarom wil ik dat weten? .....	26
Water en ijsblokjes.....	27
Entropie als gangmaker van alles wat gebeurt .....	27
Onttrekt het leven zich aan de wet van de entropie? .....	28
Bepaalt entropie de richting van de tijd? .....	29

# **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

Het mysterie van de entropie van zwarte gaten .....	29
In het kort .....	30
Thermische energieopslag voor warmte en koude .....	31
Toepassingsvoorbeelden .....	31
Technische specificaties .....	31
Technologische knelpunten .....	33
GAIA PMC-bol .....	33
Economische knelpunten .....	34
Organisatorische knelpunten en benodigde samenwerkingspartners .....	35
Haalbaarheidsvragen .....	35

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's** **Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### Aanleiding van het project PCM's

In Nederland en in de Europese Unie zijn er doelstellingen gezet om milieuvriendelijkere en circulaire wijzen van energiewinning te promoten. Onze planeet ondergaat namelijk aanzienlijke en versnelde klimaatveranderingen tegemoet, als gevolg van broeikasgassen door menselijke activiteit. De effecten van klimaatverandering zijn voelbaar op alle continenten en zullen naar verwachting steeds heviger worden. Dat zal ernstige gevolgen met zich meedragen voor alle economieën en samenlevingen. Het gaat niet alleen om het winnen van energie uit circulaire bronnen maar ook het behouden van energie is van belang om deze doelstellingen te behalen. Wanneer warmte vastgehouden kan worden kan het op een later tijdstip alsnog gebruikt worden. Dit kan uitkomst bieden voor woningen en panden die van het gas afgaan. Bewoners kunnen dan de reserve warmte gebruiken op momenten dat het nodig is, zoals gedurende koude winterdagen.

Een techniek dat dit probeert te realiseren is phase change materials (PCM). Phase change materials zijn materialen waarvan de faseverandering (van vast naar vloeibaar en andersom) wordt gebruikt om warmte of koude op te nemen en af te staan. In PCM's wordt energie tijdelijk opgeslagen voor gebruik op een later moment. Door warmteopname uit de omgeving smelt het materiaal – een zoutoplossing of zoutkristallen in een zak of in een paneel - en wordt de omgeving gekoeld. Wanneer de temperatuur zakt, stolt het materiaal weer door warmteafgifte aan de omgeving en wordt de omgeving verwarmd. De techniek PCM is vrij jong en staat nog in de kinderschoenen. De verwachting is dan ook dat er veel meer potentie zit in PCM.

Hydrobag bv wil een haalbaarheidsonderzoek starten naar het opschalen van PCM binnen reguliere woningen/panden op een betaalbare wijze. Hydrobag zit momenteel in de ontwikkeling van de Hydrobag. Een zak van EPDM polymeer dat water vasthoudt, verwarmt en verdeelt door de woningen. De Hydrobag zorgt in combinatie met heatpipes dat een pand wordt verwarmd en zal op deze wijze gas vervangen en gasloos wonen aantrekkelijker maken. Echter, gedurende de koude wintermaanden kan de warmte van de Hydrobag onvoldoende zijn. Het toevoegen van PCM als techniek aan een nieuwe generatie Hydrobags zal ervoor zorgen dat de Hydrobag warmte effectiever vast kan houden en kan inzetten (om het pand te verwarmen) wanneer het nodig is, zoals gedurende de koude wintermaanden. Hierdoor zou de Hydrobag nog effectiever kunnen worden en kan het een nog grotere kostenbesparing worden voor de gebruiker, sinds die geen back-up hoeft te gebruiken zoals een CV-ketel. Kortom, de

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

beoogde ontwikkeling zorgt voor een nog grotere stap richting gasloos wonen.

### Beoogd product, dienst of proces

Het haalbaarheidsproject is gericht op het verkennen van de haalbaarheid van de ontwikkeling van een Hydrobag met PCM technieken die effectief de warmte kan vasthouden in de Hydrobag. Met het project worden nieuwe technieken en economische inzichten vergaard. Het doel van dit project is om de technische, economische en organisatorische haalbaarheid aan te tonen in een periode van 12 maanden. De resultaten van het haalbaarheidsproject bieden Hydrobag B.V. inzicht in de (on)mogelijkheden van zowel de technische, de economische als de organisatorische haalbaarheid van een toekomstig R&D-samenwerkingsproject.

Het doel van dit haalbaarheidsproject is om inzichtelijk te maken of het haalbaar is om een Hydrobag te ontwikkelen met PCM technieken. Zo wordt de warmte vastgehouden en kan een woningeigenaar energiebesparing realiseren door de warmte beter te verdelen. Zo kan warmte ingezet worden in strengere wintermaanden. Om het project haalbaar te laten zijn, moet er onderzocht worden welk type (o.a. organisch en niet-organisch) PCM toepasbaar is in een Hydrobag, hoe de warmte vastgehouden en losgelaten kan worden en of de effecten voldoende zijn voor een kostbaar vervolgtraject.

Naast deze technische haalbaarheidsaspecten spelen er ook verschillende organisatorische en economische haalbaarheidsvragen die binnen dit haalbaarheidsproject onderzocht moeten worden. Welke markten/doelgroepen kunnen vallen binnen de scope van dit product? Hoe groot zijn de doelgroepen? Welk businessmodel/verdienmodel past het beste bij deze doelgroepen? Verder moet er gekeken worden welke samenwerkingspartners benodigd zijn voor verdere ontwikkeling van het product.

Het beoogde resultaat van dit haalbaarheidsproject is een rapport met een grondige en gedegen analyse van de technische, organisatorische en economische haalbaarheid van het project. Op basis van deze resultaten zal er een go/no-go beslissing genomen worden om door te gaan met de ontwikkeling van een Hydrobag met PCM technieken. De resultaten zullen van invloed zijn op de verdere ontwikkelingsrichtingen van Hydrobag bv.

### Doelstelling(en) en het beoogde resultaat

Dit haalbaarheidsproject beoogt het vaststellen van de haalbaarheid van de ontwikkeling van een hydrobag met PCM om warmte nog effectiever

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

vast te houden en energiebesparing te realiseren bij woningeigenaren. Hydrobag bv heeft veel technische kennis en ervaring in onder andere engineering en het bedrijf heeft als doelstelling het ontwikkelen van innovatieve ontwikkelingen die de energietransitie bevorderen. Vanuit hun ervaringen ziet het bedrijf mogelijkheden om efficiënter warmte vast te houden middels PCM's in een hydrobag. Zo wordt er efficiënter met energie omgegaan, kan warmte beter besteed worden op de momenten dat het nodig is en wordt gasloos wonen nog interessanter voor woningeigenaren. Hierdoor zal er een kostenbesparing gerealiseerd worden doordat er minder elektriciteit en gas gebruikt hoeft te worden. Bovendien wordt er minder CO<sub>2</sub>-uitstoot gerealiseerd doordat huizen van het gas afgaan. Door middel van deskresearch en interviews hoopt Hydrobag bv te inventariseren of het mogelijk is dat PCM's functioneren in een hydrobag. De PCM's zullen warmte vasthouden en loslaten wanneer de warmte vereist is.

Aan het eind van dit haalbaarheidsproject zal worden besloten of de beoogde ontwikkeling ook daadwerkelijk haalbaar is. Mocht dit het geval zijn dan zal de Go gegeven worden en begint Hydrobag bv met een vervolg ontwikkelingsproject.

### **Omschrijving werkzaamheden**

De haalbaarheid van de beoogde innovatie wordt getoetst in twee verschillende fasen. In de eerste fase zal er voornamelijk deskresearch en gesprekken plaatsvinden met relevante partijen. Deskresearch wordt onder andere gedaan naar bestaande toepassingen van PCM en naar wetenschappelijke bronnen over PCM en de mogelijkheden ervan. Interviews zullen gedaan worden met diverse personen die betrokken zijn bij het proces. Zo zal er gesproken worden met ervaringsdeskundigen met PCM, hierbij kan er gedacht worden aan personen die er mee gewerkt hebben in de praktijk maar ook deskundigen van voorgaande ontwikkelingen. Bovendien wordt er gesproken met potentiële afnemers. Door gesprekken te voeren met de experts op het gebied van PCM trachten wij als Hydrobag bv meer inzicht te krijgen in de capaciteiten en mogelijkheden van de techniek en of het haalbaar is dat ze de werkzaamheden uitvoeren die het bedrijf voor ogen heeft. De interviews met experts is ook om de stand der techniek te bepalen als het aankomt op de toepassing van de techniek in woningen. Momenteel wordt er op kleine schaal al getest met PCM in andere toepassingen. Zo worden PCM's al eens verwerkt in het plafond en in de vloeren van enkele noemenswaardige gebouwen. Met de ontwikkeling van de PCM in de Hydrobag kan het betaalbaar en toepasbaar worden in de gehele woonmarkt.

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

De kennis hiervan kan een bijdrage leveren aan het bepalen van de haalbaarheid van de beoogde ontwikkeling van dit project. Door middel van deze gesprekken wil Hydrobag bv een beter beeld krijgen van de mogelijkheden en de haalbaarheid en kan er mogelijk zelfs een samenwerkingspartner op deze wijze gevonden worden. In de afsluitende en laatste fase zullen de verkregen data verwerkt worden in een eindrapportage op basis waarvan een Go/ No Go beslissing gemaakt kan worden voor een vervolg ontwikkelingsproject. In het vervolgproject wil Hydrobag bv de PCM gaan ontwikkelen en in een praktijkomgeving proeven uit voeren om het werkingsprincipe aan te tonen. Proeven zullen dan plaatsvinden op ons terrein van Hydrobag bv.

### Warmteopslag inleiding

De opslag van warmte in de gebouwde omgeving reduceert mogelijk drie problematische eigenschappen van onze toekomstige energievoorziening: een niet op de energieproductie afgestemde warmtevraag, een energietekort in de koudste weken van de winter en hoge kosten van het aanleggen van infrastructuur voor pieken als deze. Verschillende warmteopslagmethodes voor de gebouwde omgeving worden momenteel ontwikkeld en getest. Dit kennisdossier geeft een overzicht van de technologieën waar onderzoek naar wordt gedaan binnen het innovatieprogramma van TKI Urban Energy. Daarnaast werpen we een blik op de toekomst door te analyseren welke technologieën voor welke problemen een oplossing kunnen bieden. Er zijn KPI's en streefwaarden opgesteld om richtlijn te geven aan de innovatie opgaven en deze beter te kunnen monitoren.

Ruim driekwart van alle energie die in de gebouwde omgeving wordt gebruikt is nodig voor ruimteverwarming, warmtapwater en koken. Momenteel wordt bijna 90% van deze warmte gemaakt door de verbranding van aardgas. Vanwege de CO<sub>2</sub>-uitstoot hiervan past dit niet in een duurzame toekomst en heeft het winnen van Gronings aardgas negatieve lokale gevolgen. Daarom heeft het kabinet haar intenties kenbaar gemaakt om de gaskraan versneld dicht te draaien.

Er zijn verschillende alternatieve duurzame energiebronnen die de rol van aardgas kunnen overnemen. De Nederlandse warmtevraag is sterk afhankelijk van het seizoen, wat een direct uitdaging vormt voor deze duurzame energiebronnen. Waar aardgas gemakkelijk op te slaan, te transporteren en lokaal te verbranden is, is voor duurzaam gewonnen elektriciteit en warmte opslag in grote hoeveelheden lastig. Dit terwijl de energieopbrengst van bronnen als de zon en de wind sterk fluctueert zowel met het dag/nacht ritme als het seizoen afhankelijk zijn. Samen

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

vormt dit de eerste problematische eigenschap van ons toekomstige energiesysteem: een niet op de warmtevraag afgestemde duurzame energieproductie.

Een van de opties voor de verduurzaming van de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving is het gebruik van warmtepompen die gebruik maken van elektriciteit om warmte van een warmtebron op te waarden. Ook zijn er andere manieren om elektriciteit te gebruiken voor de productie van warmte, zoals met een elektrische kachel of infrarood panelen. Zodra een gedeelte van de warmteproductie wordt geëlektrificeerd, zal de elektriciteitsvraag vooral in de koude periodes groter worden. Naar verwachting kunnen duurzame energiebronnen voor een aantal weken per jaar niet genoeg energie leveren voor deze geëlektrificeerde warmteproductie, tijdens de zogenoemde 'windloze winterweken' ofwel de 'Dunkelflaute', waarin de productie van zonne-energie en windenergie erg laag is. Dit is een tweede problematische eigenschap van ons toekomstige energiesysteem: een energietekort in de koudste weken van de winter.

Om aan de grotere elektriciteitsvraag te kunnen voldoen moet het elektriciteitsnet in Nederland worden verzaamd. Deze dure maatregel moet voorkomen dat het net overbelast raakt met een (gedeeltelijke) uitval tot gevolg. Naast andere ontwikkelingen zoals de toename van elektrische auto's en meer decentrale zon-PV of zonnwarmte systemen, vormt de deels geëlektrificeerde warmtevraag een potentiële bedreiging voor het elektriciteitsnet, vanwege de grotere pieken. Omdat deze geconcentreerd zijn in tijdstippen en seizoenen is voor het grootste gedeelte van het jaar een grotere netcapaciteit niet nodig is. Dit is de derde problematische eigenschap van ons toekomstige energiesysteem: hoge kosten voor netverzwaring die is ingericht op de pieken van de warmtevraag. Eenzelfde voordeel van beperking van de zwaarte van het net en installaties als warmte bij piekvraag uit opslag gehaald kan worden, speelt bij warmtenetten en gebouwinstallaties. Ook deze kunnen dan lichter worden uitgevoerd.

### **Warmteopslag: drie grote voordelen**

Deze drie problematische eigenschappen van ons toekomstige energiesysteem vragen om slimme oplossingen. Een van de meest belovende oplossingsrichtingen is energieopslag. Waar elektrochemische energieopslag in het elektriciteitsnet op de onbalansmarkt een overduidelijk voordeel kan bieden, geldt dit ook voor warmteopslag in het afstemmen op van de energieproductie op de warmtevraag.

Warmteopslag voor de korte termijn biedt een oplossing voor de warmtevraag die fluctueert tussen nacht/dag en tussen dagen. Ten tijde

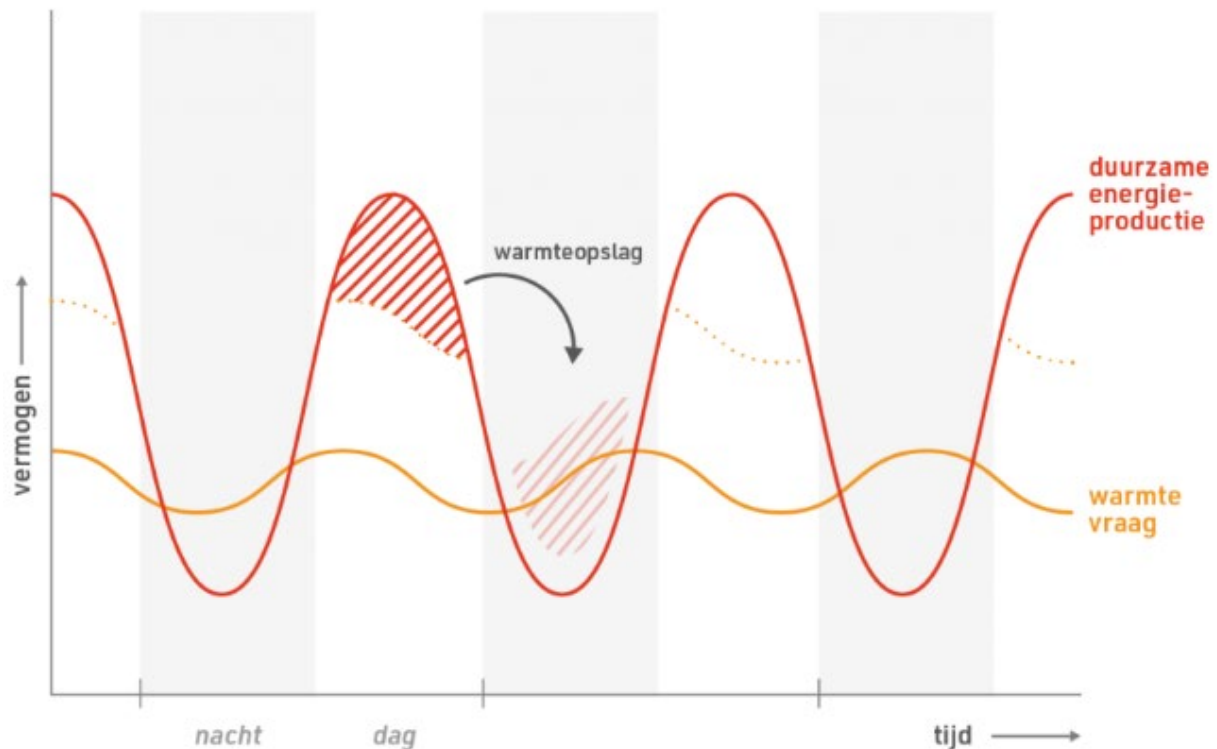


## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

van overvloedige elektriciteitsproductie kan energie worden opgeslagen in de vorm van warmte. Wanneer er warmte nodig is kan de opgeslagen warmte dan uit de warmteopslag worden onttrokken. Hierdoor heeft deze vorm van warmteopslag een dempende werking op de fluctuaties in het elektriciteitsnet, zoals te zien in onderstaand figuur.

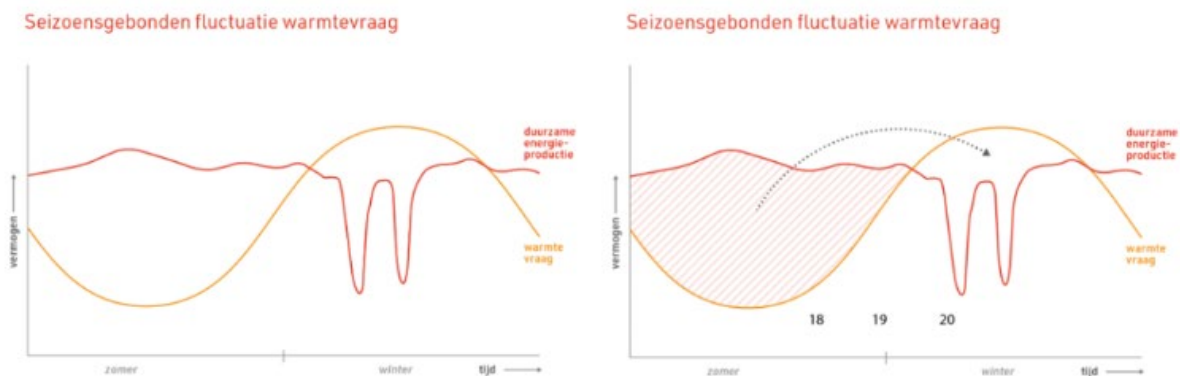
### Dempende werking warmteopslag



Naast de dempende werking die warmteopslag op de korte termijn kan hebben op het elektriciteitsnet, kan warmteopslag ook nuttig gebruikt worden voor de lange termijn. Met name zonne-energie is overvloedig aanwezig in de Nederlandse zomer, terwijl de warmtevraag met name in de winter groot is. Warmteopslag op de lange termijn maakt het mogelijk om de zomerwarmte in te zetten voor de warmtebehoefte in de winter. Dit principe is uitgebeeld in onderstaande figuren.

# Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv



De mogelijkheden om het overschot van warmte zowel op de korte als op de lange termijn op te slaan, kan ook gebruikt worden om de problematische 'windloze winterweken' door te komen. Naar verwachting zal er elke winter één of meerdere periodes van een aantal weken zijn waarin de duurzame energiebronnen niet toereikend zijn om voldoende elektriciteit en warmte te produceren. Warmteopslag kan slim worden ingezet om deze windloze winterweken door te komen. In onderstaand figuur is dit grafisch weergegeven.



Het derde voordeel van de integratie van warmteopslag in het toekomstige energiesysteem is dat het de noodzaak van dure netwerkverzwaring wegneemt of beperkt. Wanneer warmteopslag de pieken in de warmtevraag kan wegnemen, hoeft de infrastructuur niet te worden verzwakt. Dit voordeel is vooral relevant voor netbeheerders en warmteleveranciers. Momenteel is dit voordeel nog lastig in een waarde uit te drukken, omdat de warmtevoorziening gebaseerd op gas geen dergelijke congestieproblematiek ervaart.

## Methodes voor compacte warmteopslag

Er zijn verschillende vormen waarin warmte kan worden opgeslagen. De mogelijkheden om warmte op te slaan die in kleine schaal in woningen kan worden toegepast zijn:

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

- Warmteopslag in water;
- Warmteopslag in fase overgangsmaterialen;
- Warmteopslag in thermochemische materialen;
- Warmteopslag door redox principes.

Deze technieken worden hieronder in meer detail beschreven. Een aantal van bovengenoemde technologieën kan op termijn worden opgeschaald naar wijkniveau nadat de efficiency 's en kostenreducties zijn behaald op kleine schaal. De grootschalige systemen kunnen zich richten op de seizoensopslag van warmte (overbruggen van langere perioden). Deze systemen kunnen naast seizoensopslag ook flexibiliteit leveren aan het elektriciteitsnet door power-to-heat. Hiermee kunnen overschotten aan elektriciteit worden ingezet om via warmtepompen seizoen buffers te laden. Seizoensopslag kan ook helpen om warmte-infrastructuur te optimaliseren en daarmee de aanlegkosten te beperken.

Grootschalige opslag van warmte richt zich op schaalgroottes vanaf wijkniveau tot en met opslag ten behoeve van grote regionale warmtenetten. De huidige techniek om voor langere tijd warmte op te slaan wordt reeds toegepast in grootschalige bovengrondse buffers. Die worden toegepast om bijvoorbeeld bij energiecentrales warmte en elektriciteitslevering los te koppelen; zo wordt de inzet van de centrale meer flexibel. Onderstaande sub sectie gaat hier verder op in.

### [Compacte vormen voor warmteopslag](#)

Een van de meest voor de hand liggende opties is het gebruik van een warmwatervat, ook wel voelbare warmteopslag genoemd. Hierin kan bijvoorbeeld duurzame warmte uit zonnewarmte worden opgevangen. Het nadeel van warmwatervaten is dat ze relatief snel hun warmteverliezen (afhankelijk van de grootte) waardoor ze niet geschikt zijn voor warmteopslag voor een langere periode, bij groot volume, dan enkele weken. Daarnaast heeft een warmwatervat over het algemeen veel ruimte nodig voor toepassing in de gebouwde omgeving vanwege de lage energiedichtheid. Water met een temperatuur van ongeveer 90 °C heeft namelijk een effectieve energiedichtheid van ongeveer 0.25 GJ/m<sup>3</sup> voor warmteopslag. Een portiekwoning gebouwd in de periode 1992-2005 (zie het overzicht voorbeeldwoningen van RVO) heeft voor een koud periode van 4 weken een warmtebehoefte van ongeveer 2 GJ, uitgaande van een jaarlijkse warmtevraag van ongeveer 25 GJ. Een warmwatervat zou dus een minimaal volume van 8 m<sup>3</sup> moeten hebben, wat te omvangrijk is voor de plaatsing in een dergelijke woning. Grotere woningen en/of woningen uit een eerdere periode hebben een nog veel groter volume nodig.

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

Een tweede methode voor warmteopslag is het Warmte Koude Opslag (WKO) systeem. Warmte uit de zomermaanden wordt ondergronds opgeslagen en gebruikt als bron voor een warmtepomp in de winter, die door het gebruik van de warmtebron een hoge efficiëntie kan behalen. Dit systeem gebruikt een warmtepomp en dus elektriciteit tijdens de Dunkelflaute, wanneer elektriciteit juist schaars is en is niet overal toepasbaar.

Naast de genoemde voorbeelden zijn er drie andere warmteopslagmethodes die momenteel worden onderzocht binnen het Urban Energy domein. Deze drie methodes zijn: Thermochemische Materialen (TCM), Chemical Looping Combustion (CLC), Phase Change Materials (PCM). Deze verschillende methodes verschillen van elkaar in onder andere energiedichtheid, marktrijpheid, kosten en schaalgrootte.

### Thermochemische opslag

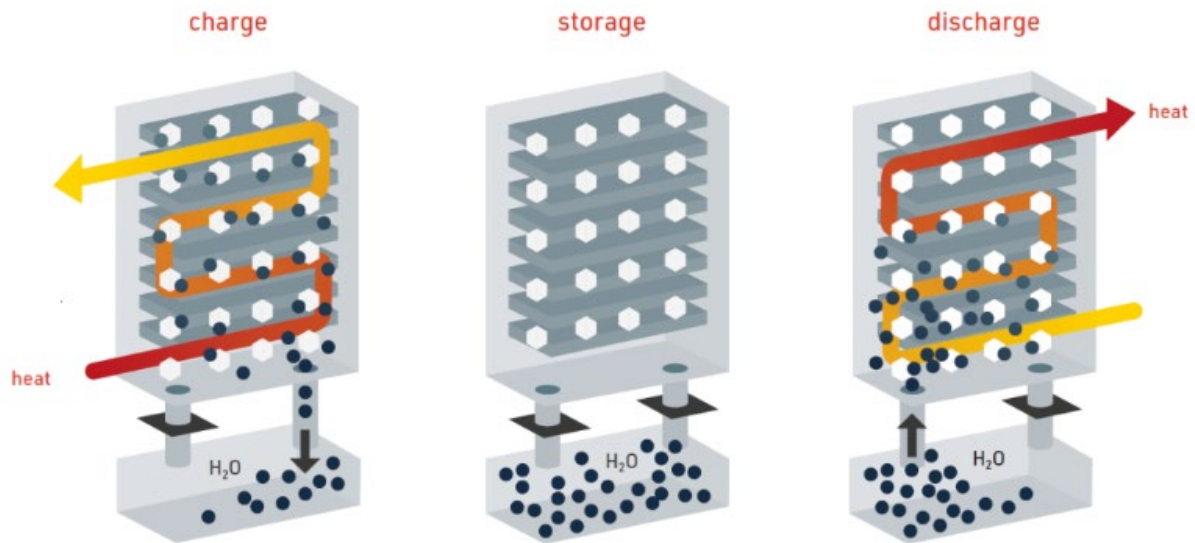
Thermochemische Materialen (TCM) zijn in staat warmte op te nemen of af te geven als ze in contact komen met water. Het TCM geeft warmte af en reageert dus exotherm wanneer het in contact komt met waterdamp. Water adsorbeert op het TCM-oppervlakte of ondergaat een chemische reactie met het TCM, waarbij warmte vrijkomt. Na reactie met water bevindt het TCM zich in een gehydrateerde staat. Voorbeelden van adsorptiematerialen zijn zeolieten en silicagel, en voorbeelden van reactiematerialen zijn zouthydraten als  $\text{Na}_2\text{S}\cdot x\text{H}_2\text{O}$  en  $\text{MgCl}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$ .

Water kan aan het TCM onttrokken worden door warmte toe te voegen, waardoor het verdampt en van het TCM gescheiden kan worden. Het TCM is dan gedehydrateerd. Het principe van warmteopslag middels TCM is erg vergelijkbaar met batterijen, omdat de bruikbare energie in een chemische vorm wordt opgeslagen. Het principe van thermochemische opslag is visueel weergegeven in onderstaande figuren. Ook is een overzicht van een volledig warmtesysteem weergegeven, met TCM-technologie als centraal systeemcomponent.

# Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

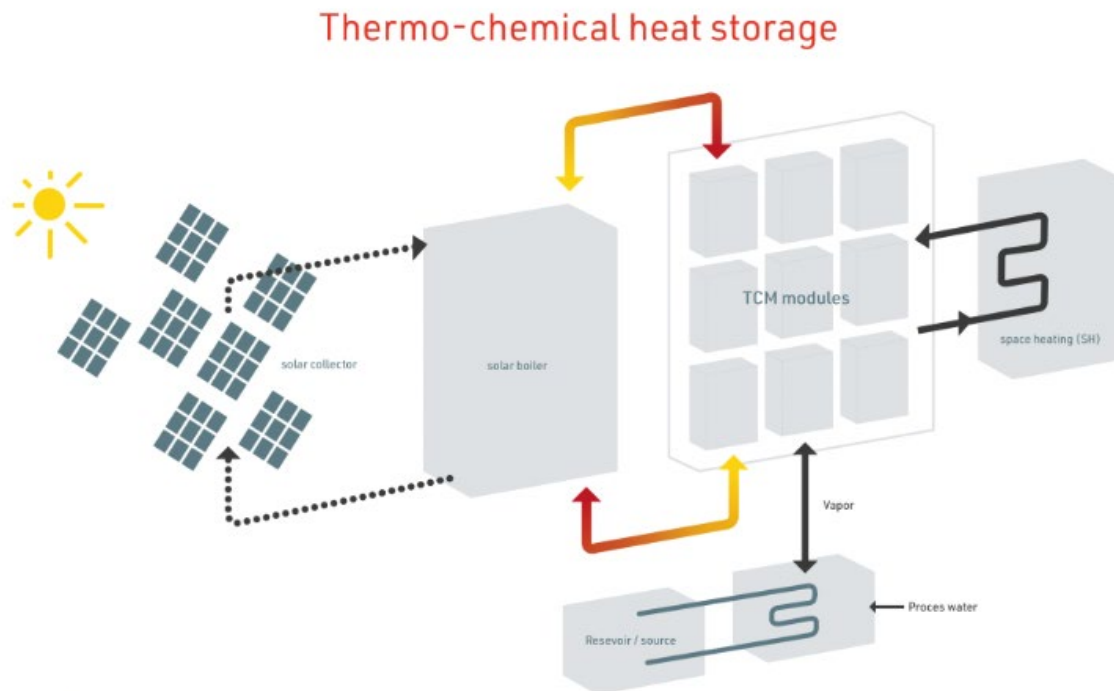
## Thermo-chemical heat storage



Een warmtesysteem met warmteopslag in TCM bestaat in principe drie verschillende circuits. De warmte uit een warmtepomp of zonnecollector wordt tijdelijk opgeslagen in een (zonne)boiler. Vervolgens, wanneer er warmteoverschot is en de TCM niet (volledig) is gedehydrateerd, wordt deze warmte door de TCM-modules geleid waardoor deze verder dehydrateert. In het tweede circuit wordt het proceswater onttrokken van of aangevoerd naar de TCM-modules. De verdamper/condensator zorgt ervoor dat de waterdamp opgeslagen kan worden in het reservoir als vloeibaar water. De warmte die vrijkomt bij condensatie wordt opgevangen in een apart reservoir. Als er op een later tijdstip warmtevraag is, wordt een hoeveelheid warmte aan dit reservoir onttrokken om het proceswater te verdampen. Dit wordt in contact gebracht met het TCM, waar het adsorbeert of reageert. De warmte die daarbij vrijkomt wordt via de warmtewisselaar overgedragen aan water uit het derde circuit dat kan worden gebruikt voor ruimteverwarming of warmtapwater.

# Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv



Zolang het TCM en het water gescheiden van elkaar bewaard worden, is de chemische energie verliesvrij opgeslagen. Daarmee is het systeem goed geschikt voor lange termijn opslag. De energiedichtheid op materiaalniveau kan een waarde bereiken van 3 GJ/m<sup>3</sup>, vergeleken met 0.25 GJ/m<sup>3</sup> voor warm water. Afhankelijk van de druk in het systeem en van het actieve materiaal kan tijdens ontladen warmte worden onttrokken op een temperatuur tot 65 °C, warm genoeg voor veilig warmtapwater. Tijdens ontladen wordt water opgewarmd dat direct in radiatoren kan worden geleid. Daarmee, en door de hoge dichtheid op materiaalniveau, is een TCM veelbelovend voor lokale warmteopslag in de gebouwde omgeving.

Hoewel het opslagmechanisme zelf verliesvrij is vinden er wel energieverliezen plaats. Na opladen, wanneer de TCM-modules gedehydrateerd zijn, is het TCM nog warm. Wanneer dit afkoelt gaat de energie overeenkomstig met de warmtecapaciteit verloren. Een soortgelijk verlies treedt op bij het ontladen: resterende warmte in het TCM, te lage temperatuur om te gebruiken voor ruimteverwarming, lekt weg en gaat verloren. Hierdoor is het rendement van een laad-ontlaadcyclus voor een systeem op basis van silicagel iets meer dan 90%. Wanneer het TCM-systeem zich binnen de gebouwde schil bevindt, wordt dit warmteverlies echter nuttig gebruikt. Verder is het systeem als geheel relatief complex door het reservoir dat nodig is om warmte te onttrekken om het proceswater te verdampen. De buitenlucht of een ondergrondse waterlaag



## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

kan fungeren als reservoir, en het systeem moet hier dus op worden aangesloten.

Huidig onderzoek richt zich naast optimalisatie van het opslagmateriaal vooral op het optimaliseren van het systeemontwerp. De energiedichtheid op materiaalniveau is veelbelovend, maar de energiedichtheid voor het systeem als geheel valt significant lager uit. Hoe compacter de componenten zijn en hoe groter de fractie TCM in het systeem, hoe groter de energiedichtheid van het systeem zal zijn. Een van de uitdagingen hierin is de relatief lage warmtegeleidingscoëfficiënt van het TCM, dat in korrels tussen de vinnen van een warmtewisselaar is gepakt. Hierdoor wordt de snelheid waarmee warmte kan worden onttrokken beperkt, en daarmee het maximale vermogen van het systeem. Door warmtewisselaars met fijnere vinnen te gebruiken kan een hoger vermogen worden bereikt, maar daarmee valt de energiedichtheid op systeemniveau lager uit. Andere routes om de warmtegeleiding te verbeteren is het TCM te omringen met een matrix van een materiaal met betere geleiding.

Een andere uitdaging is het garanderen van voldoende levensduur van het TCM. Bij de zouten vindt volumeverandering plaats wanneer water in de korrels wordt opgenomen, waardoor de korrels op den duur kunnen afbrokkelen en het contactoppervlak met de warmtewisselaar verbroken wordt. Het stabiliseren van de TCM korrels, bijvoorbeeld door encapsulatie of doping, is daarom ook een belangrijke onderzoeksrichting. Andere uitdagingen zijn het voorkomen van corrosie van de warmtewisselaar door contact met het reactieve TCM, en het beter op elkaar afstemmen van het design van verschillende componenten voor een efficiënter ruimtegebruik. In MERITS, een afgerond Europees project uit het FP7 subsidieprogramma, is een prototype systeem gebouwd met een opslagdichtheid op systeemniveau van 0.1-0.18 GJ/m<sup>3</sup>. Deze dichtheid kan theoretisch worden verhoogd tot 0.81 GJ/m<sup>3</sup> door een aantal designoptimalisaties. In CREATE, een Europees project uit het H2020 subsidieprogramma, wordt dit systeem verder verbeterd en wordt een hogere energiedichtheid beoogd. In het gelijknamige project CREATE onderzoekt een Nederlands consortium onder leiding van TNO een warmtebatterij gebaseerd op het materiaal Na<sub>2</sub>S. De hoge energiedichtheid en de lage materiaalkosten zijn grote voordelen, maar de toxiciteit en daaraan verbonden risico's maken dat op nadrukkelijke wens van de Europese Commissie naar alternatieve materialen wordt gezocht in vervolgonderzoek.

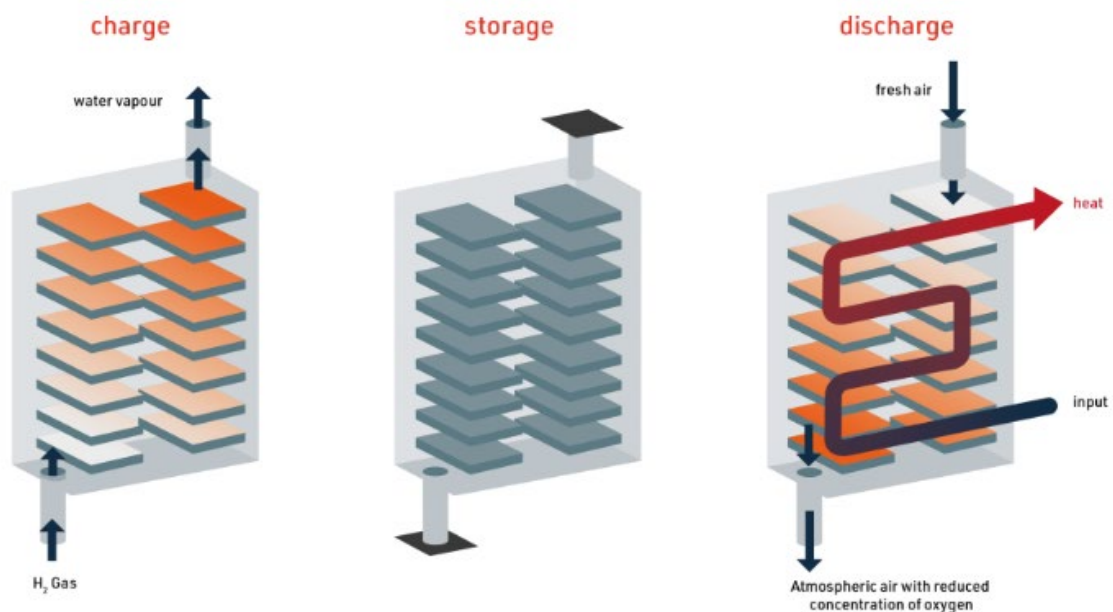
# Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

## Chemical Looping Combustion

Van oorsprong is Chemical Looping Combustion (CLC) een technologie voor het stoken van fossiele brandstoffen in energiecentrales waarbij de vrijgekomen CO<sub>2</sub> relatief gemakkelijk af te vangen is. Gezuiverde lucht wordt op hoge temperatuur van onderen over een gefluidiseerd bed van metaaldeeltjes geleid, waardoor het metaal oxideert. Het uitlaatgas van dit proces is een gas op atmosferische druk, dat een hogere concentratie stikstof (N<sub>2</sub>) en lagere concentratie zuurstof (O<sub>2</sub>) heeft dan lucht. De metaaloxide deeltjes bewegen naar een tweede gefluidiseerd bed, waar de brandstof (een koolwaterstofverbinding) overheen wordt geleid en het metaaloxide wordt gereduceerd. Hierbij ontstaat CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O. Het water kan worden gescheiden door condensatie, waardoor het wordt afgezonderd van CO<sub>2</sub>. Doordat de stromen van de oxidatie- en redoxreactie nooit met elkaar in aanraking komen, is de scheiding van CO<sub>2</sub> inherent en kan het dus worden opgevangen.

## Chemical Looping Combustion



CLC kan ook zonder fossiele brandstoffen worden gebruikt met het doel om warmte op te slaan voor een lange periode. Door een metaaloxide bed te reduceren met waterstofgas ontstaat metaal. Dit metaal kan later, wanneer warmteproductie nodig is, in contact worden gebracht met zuurstof uit de buitenlucht. Bij deze reactie tot metaaloxide komt warmte vrij waarmee de lucht opgewarmd kan worden, om vervolgens gebruikt te kunnen worden voor verwarming. Dit proces is visueel vormgegeven in bovenstaand figuur. Omdat waterstofgas met duurzaam opgewekte



## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

elektriciteit door een electrolyser uit water te produceren is, is er bij deze vorm van CLC geen CO<sub>2</sub> uitstoot.

Een voordeel van dit systeem is dat de operatie relatief simpel is, op hoge procestemperaturen na. Elke hoeveelheid geproduceerde H<sub>2</sub> gas kan direct over het metaaloxide bed worden geleid, dus het gas hoeft niet opgeslagen te worden. Daardoor leent dit systeem zich er goed voor uitsluitend gebruik te maken van de 'overproductie' van duurzame elektriciteit. Voor ontladen is slechts lucht nodig om over het metaalbed te leiden. Door een hogere luchtstroom toe te voeren wordt een groter verwarmingsvermogen geleverd. Dankzij deze flexibiliteit is het CLC-systeem geschikt voor warmteopslag en levering op korte en lange termijn. Omdat het systeem relatief gemakkelijk kan worden afgesloten van buitenlucht, vinden er tijdens opslag geen energieverliezen plaatsvinden.

In de COMPAS-projecten (COMPact energy storage by Alternative Storage methodology) wordt CLC toegepast voor warmteopslag. De energiedichtheid op materiaalniveau ligt nog hoger dan die van TCM's en kan een waarde bereiken van 6-12 GJ/m<sup>3</sup>, afhankelijk van het te gebruiken metaal. In het COMPAS-I project is een prototype systeem ontwikkeld met een energiedichtheid van bijna 3 GJ/m<sup>3</sup>. Hierbij moet vermeld worden dat de efficiëntie toeneemt bij hogere procestemperaturen door een beter omzettingsrendement van het metaal bed. De hoogste energiedichtheid is behaald bij een interne temperatuur van 700 °C, maar interne temperaturen zo laag als 175 °C zijn ook mogelijk. Hieruit blijkt de geschiktheid voor diverse toepassingen waaronder hoge temperatuur ruimte verwarming en warmtapwater. Ondanks dat soortelijke hoge temperaturen voorkomen in conventionele cv-ketels, is dit een aandachtspunt voor de ontwikkeling van het CLC systeem voor toepassing in de gebouwde omgeving.

In een serie van drie projecten wordt het COMPAS-concept getest vanaf laboratoriumopstelling tot systeemdemonstratie. In het COMPAS-I project, reeds afgerond, is een 100 Watt prototype gerealiseerd. In dit project zijn experimenten met verschillende metaalbedden uitgevoerd in een oven. In het nu lopende COMPAS-II project wordt het systeem opgeschaald en getest als autonoom systeem. Ook zal de business case verder worden uitgewerkt. In de derde en laatste fase wordt het systeem op relevante schaal gedemonstreerd.

Naast het opschalen zijn er nog een aantal uitdagingen. Ten eerste wordt tijdens ontladen van het systeem warme lucht geproduceerd en geen warm water. Dit is minder ideaal dan warm water om in te zetten voor

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's** **Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

ruimteverwarming of warmtapwater. Verder is het produceren van waterstofgas met een electrolyser relatief duur. Een alternatieve goedkopere manier wordt onderzocht die elektriciteitsoverschotten om kan zetten in H<sub>2</sub> gas. Warmteopslag op basis van CLC is dus veelbelovend, maar bevindt zich nog in een vroeg onderzoekstadium.

### Phase Change Materials (PCM)

PCM zijn materialen die een substantiële hoeveelheid warmte kunnen opnemen of afstaan in de faseverandering van vast naar vloeibaar en andersom. Dit opnemen en afstaan gebeurt bij dezelfde temperatuur, namelijk het smeltpunt van het materiaal. Wanneer het materiaal smelt, neemt het materiaal warmte op uit de omgeving en wordt de omgeving dus gekoeld. Wanneer het materiaal stolt, verwarmt het de omgeving juist.

De hoeveelheid energie die ervoor nodig is om het materiaal een faseovergang te doen ondergaan wordt ook wel de latente warmte genoemd. De latente warmte en de temperatuur waarbij de faseovergang gebeurt, is afhankelijk van het materiaal.

Binnen de gebouwde omgeving kunnen PCM's gebruikt worden om temperatuurfluctuaties tegen te gaan. Door gebruik te maken van PCM met een temperatuurtraject binnen comfortabele grenzen van een binnenklimaat, bijvoorbeeld 19-22°C, zorgt de integratie van PCM in een gebouw voor een effectief veel grotere warmtecapaciteit. Ter vergelijking: 1 kg PCM kan evenveel energie opslaan als 30 kg beton. Zeker in gebieden met een grote fluctuatie in dag- en nachttemperaturen heeft de integratie van PCM's een grote potentie om het energiegebruik voor verwarming en koeling te verminderen.

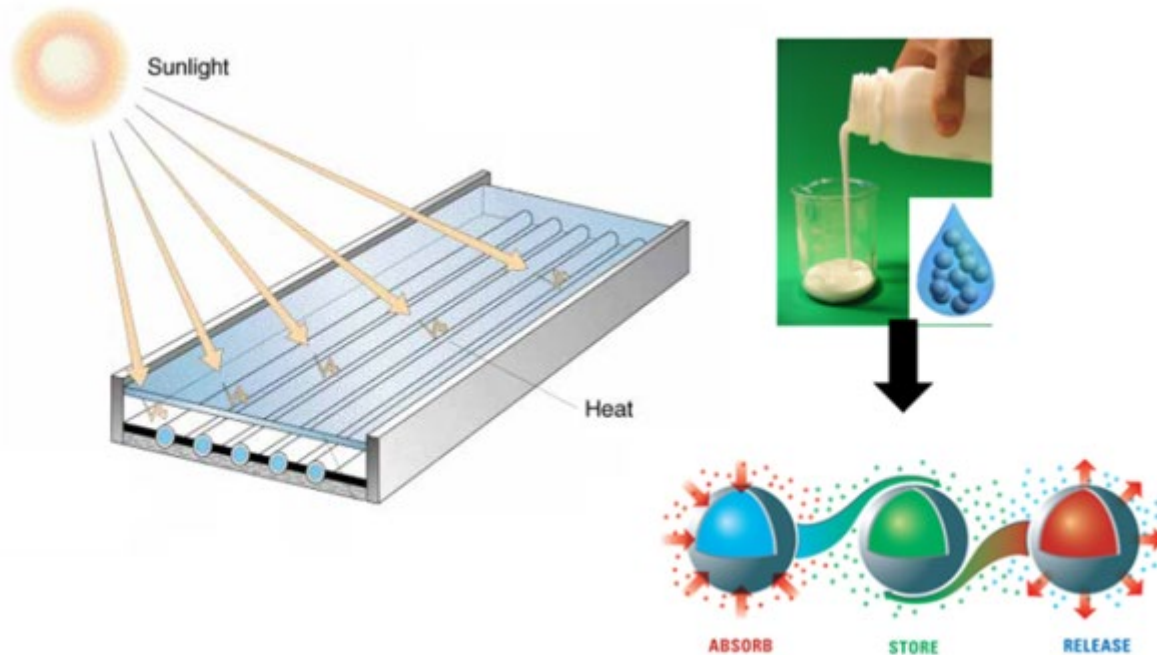
Deze technologie bevindt zich nog in het ontwikkelstadium. De grote potentie ervan is aangetoond en gevalideerd onder goed gedefinieerde omstandigheden in het lab. De technologie staat nu op het punt om het stadium te betreden van validatie in reële omstandigheden, geïntegreerd in het energie systeem. In essentie zijn er 3 elementen waarlangs verder ontwikkelingen plaats zal vinden:

1. Materiaal, met belangrijkste vragen in relatie tot verdere mechanische stabiliteit en verhoging vermogen bij grootschalige productie.
2. Reactor: verdere prestatie optimalisatie en kostenreductie huidige reactorprincipes.
3. Systeemintegratie: identificatie van de optimale configuratie(s) in het lokale en centrale energiesysteem en ontwikkeling van regel strategieën.

## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

Binnen het innovatieprogramma van TKI Urban Energy doet het project INNO-PCM onderzoek naar de inmenging van Micro Encapsulated PCM's in de warmteoverdracht van zonnecollectoren in de gebouwde omgeving. Het beoogde resultaat is een grote stap in de efficiëntie van zonne-energie in nuttige warmte in de gebouwde omgeving. In onderstaand figuur is visueel te zien hoe de twee principes kunnen worden gecombineerd.



### Mogelijkheden voor grootschalige warmteopslag

Opslag van warmte in de ondergrond is één van de goedkoopste vormen van seizoensopslag. Bodemenergie is een al veel gebruikte techniek, waarbij warmte en koude wordt opgeslagen in de ondiepe ondergrond (<500m) met temperaturen beneden 25 à 30°C.

Voor verdere verduurzaming van het warmte systeem biedt ondergrondse warmteopslag met hogere temperaturen (met temperatuurniveaus hoger dan 30°C, oplopend tot 90 à 120°C) kansen: het financiële en energetische rendement verbetert. Dit kan in open systemen maar ook in gesloten systemen (zoals vormen van pithole storage).

Ondergrondse warmteopslag bij temperaturen hoger dan 40°C wordt echter nog zeer beperkt toegepast in Nederland. Over de techniek, de effecten, de robuustheid van de business case en het bijbehorende juridische kader zijn er belangrijke uitdagingen. Kennisontwikkeling, kennisdeling en ervaring is nodig voor een snellere en verantwoorde implementatie van ondergrondse warmteopslag in Nederland.

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### Grootschalige warmteopslag in water

Ondanks innovatieve andere methoden is het gebruik van water als opslagmedium geen verleden tijd. Zoals eerder vermeld verliezen warmwatervaten binnen een paar dagen een aanzienlijk deel van hun energie. De isolatieschil die nodig is om de warmte langer te kunnen bewaren is te dik om praktisch toepasbaar te zijn in gebouwen. Ook is het benodigde opslagvolume om een koude periode in de winter te overbruggen te groot voor de gebouwde omgeving. Energieopslag in warm water is dus vooral mogelijk voor de korte termijn en wanneer volume geen beperking is ook voor een langere termijn.

Warmteopslag ondergronds in de vorm van buffervaten bevindt zich ook in de demonstratiefase. Een andere toepassing is warmteopslag in oude kolenmijnen. Hierbij wordt mijnwater in oude kolenmijngangen ingezet als warmtebuffer voor het warmtenet. De technologie kan worden gekarakteriseerd als TRL 7-8.

Grootschalige thermische opslag is een belangrijker schakel voor seizoensopslag en kan veel flexibiliteit bieden aan warmtesystemen en zo hoge investeringskosten in nieuwe bronnen en nieuwe transportcapaciteit verlagen. De impact is dat de warmtetransitie waarschijnlijk tegen lagere systeemkosten kan worden gerealiseerd. Ook kan warmteopslag op langere termijn veel flexibiliteit bieden aan het elektriciteitsnet, bijvoorbeeld middels power-to-heat. De impact van het programma zal erop gericht zijn dat deze wordt gemaximaliseerd door hogere temperaturen mogelijk te maken, inpassing van opslag in energiesysteem te optimaliseren en kosten van opslag te verlagen.

### Ecovat

Ecovat is een opslagvat voor warm water dat is ingegraven onder de grond. Het vat wordt modulair opgebouwd uit wandplaten. Door verschillende koppelstukken tussen de wandplaten te gebruiken kan de grootte van het vat gevarieerd worden, de typische hoogte en diameter is 20-30 meter. Eerst wordt een betonnen buitenvat geplaatst in een vooraf gegraven gat. Hierin wordt een geïsoleerd binnenvat geplaatst. Vervolgens wordt het vat gevuld met water. Met (lokale) overschotten elektriciteit kunnen warmtepompen of elektrische boilers koud water omzetten in warm water, dat door warmtewisselaars in de wand van het binnenvat loopt.

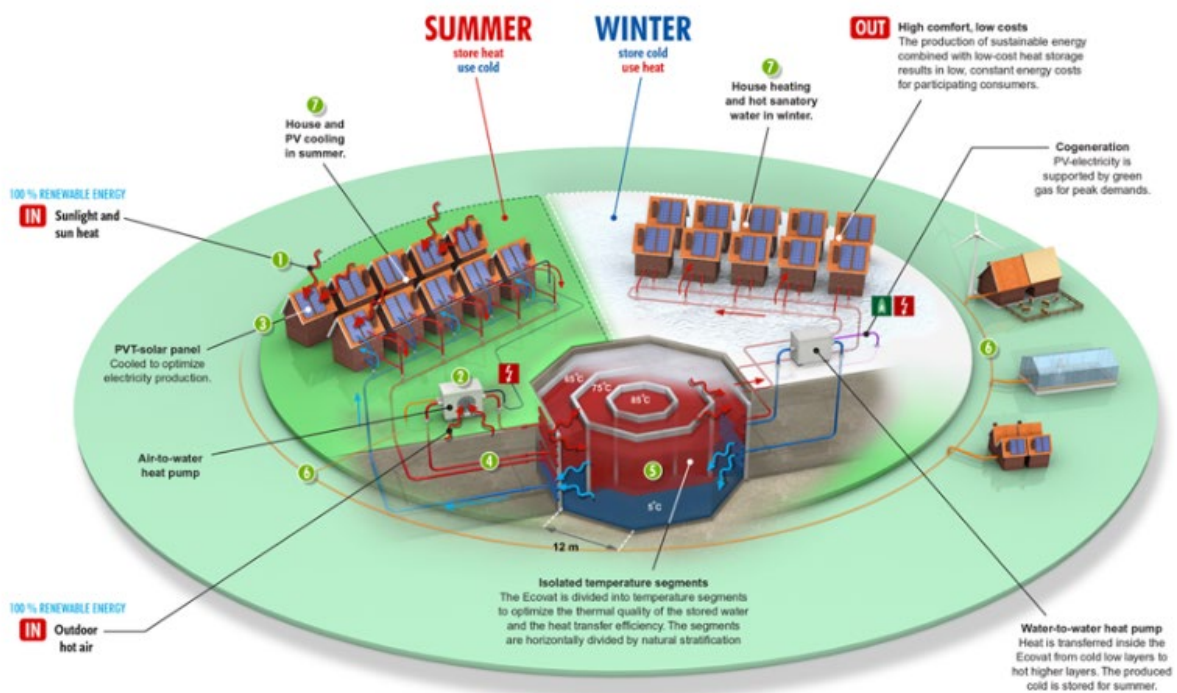
Hierdoor warmt het water in het vat op, tot een temperatuur van 90°C. Het water in het vat zelf wordt niet verpompt. Warmtevraag wordt op dezelfde manier voldaan uit het vat. Doordat de stromingen van het water verwaarloosbaar klein zijn, kunnen er thermoclines in het vat worden

# Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

aangebracht: waterlagen met een verschillende temperatuur. Op deze manier kan tijdens ontladen warmte worden afgetapt uit de laag met het juiste temperatuurniveau, zodat het exergieverlies minimaal is. Ecovat kan worden toegepast als middel om het net te balanceren op wijkniveau. Zelfsturende en zelflerende software regelt de energiestromen op basis van weersvoorspellingen en het actuele energieaanbod om maximale besparingen te realiseren. Bij lokale overschotten of lage elektriciteitsprijzen wordt elektrische energie omgezet in warmte. Zo wordt op de meest rendabele momenten energie opgeslagen om later in te zetten.

Een groot voordeel van Ecovat is dat het fysieke systeem geen bewegende onderdelen bevat en daardoor zeer beperkt slijt. De verwachte levensduur van een vat is daarom meer dan 50 jaar. Door het geïsoleerde binnenvat vindt slechts circa 10% energieverlies plaats in 6 maanden tijd, afhankelijk van de grootte van het systeem. De modulaire opbouw in het bouwproces is gestandaardiseerd en efficiënt. Verder is het een veilig systeem met bekende bouwmaterialen, zonder giftige chemicaliën of gevaarlijk hoge temperaturen en heeft het een minimale visuele impact. De grond boven Ecovat kan nuttig gebruikt worden voor openbare doeleinden, zoals parkeerplaatsen of openbaar groen. De beperkte energiedichtheid van water is geen belemmering aangezien het ruimtebeslag ondergronds is. Een nadeel aan het systeem is dat de aanleg van een warmtenet vereist is om warmte te kunnen leveren. Onderstaand figuur geeft een schematisch overzicht van het hele Ecovat systeem.



# Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

## Innovatie opgaven

Binnen kleinschalige en grootschalige opslag van warmte zijn nog diverse onderwerpen waar innovatie nodig zijn. Deze visie is ontwikkeld door het opstellen van Meerjarig Missie gedreven Innovatieprogramma voor duurzame warmte en koude in de gebouwde omgeving (MMIP 4). In dit document zijn de kennis- en innovatieopgaven opgesteld om een missie te helpen realiseren die vragen om een langjarige commitment en programmatische aanpak. Om de opgaven concreet te maken en te kunnen monitoren zijn KPI's met streefwaarden opgesteld.

Opslag principe	Systeem energie dichtheid (GJ/m <sup>3</sup> ) initieel	Systeem energie dichtheid (GJ/m <sup>3</sup> ) na 2 weken	Prijs (€/MJ)	Opslag verlies
Water opslag (1000 L)[1]	0,1-0,3	0,04-0,10	5	5-10 % per dag
PCM[2]	0,15-0,25	0,05-0,09	75	5-10 % per dag
TCM[3]	0,5-1	0,5-1	5-25	<1%
CLC <sup>3</sup>	0,5-5	0,5-5		<1%

Voor warmtebatterijen, kleinschalige warmteopslag voor huishoudelijk verbruik, zijn onderstaande KPI's en streefwaarden opgesteld.

Systeem KPI	Doel 2025	Doel 2030
Kosten (€/GJ)	8 - 12	6 - 10
Operationele kosten (€/GJ)	n.v.t.	n.v.t.
Opslagcapaciteit (MW)	8 - 10MW	15 - 35 MW
Beleidskader	Warmteopslag in provinciaal beleid opgenomen	In provinciaal beleid geëvalueerd en aangescherpt

## Conclusies

Om de duurzame energievoorziening betrouwbaar en betaalbaar te houden in een toekomst die meer afhankelijk wordt van duurzame energiebronnen, is het inpassen van lokale warmteopslag op huishoudelijk en grootschalig nodig. De windloze winterweken vormen een grote uitdaging voor een het toekomstige Nederlandse energiesysteem.



## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

Daarnaast moeten verschillende energiestromen zoals elektriciteit en warmte aan elkaar gekoppeld worden om de grote seizoensgebonden overschotten en tekorten op elkaar af te kunnen stemmen. Ook moet duurzame warmte gewonnen en opgeslagen worden uit/in thermische bronnen uit de aarde.

Warmteopslag kan hierin een cruciale rol spelen. Er zijn verschillende technologieën in ontwikkeling, zowel op gebouw- als op wijkniveau. Gebaseerd op de vooruitgang van de afgelopen jaren en de verwachte verdere verbeteringen in kostprijs en prestaties kan gesteld worden dat opslagtechnologieën als TCM, CLC en Ecovat over tien jaar ook in huishoudens hun intrede kunnen doen. Specifieke toepassingsgebieden fungeren hierin als startmotor om de markt voor warmteopslag, met bijbehorende marktpartijen als fabrikanten, installateurs en consumenten, vorm te geven. Ook kan er verwacht worden dat binnen denkbare termijn warmte kan worden opgeslagen op hogere temperatuur niveaus. Met onderzoek naar bodemrisico en het herzien van de juridische kaders zal deze techniek uitrollen binnen Nederland en een versnelling aanbrengen in de voorziening van duurzame warmte in het energiesysteem.

### [TNO: Warmte-opslag in zout](#)

Deze op gunstige dagen opgewekte energie kan je op twee manieren bewaren: zet het om in elektriciteit of sla het op als warmte. Hiervoor is de warmtebatterij die gebruik maakt van een zouthydraat. Met deze methode kun je per woning of huizenblok efficiënte warmteopslag mogelijk maken, dicht bij de gebruiker.

TNO en de TU/e hebben hiervoor een splinternieuw apparaat principe en een doorbraak materiaal ontwikkeld, waarin de warmte wordt opgeslagen. Tezamen vormen ze de warmtebatterij. Die is zo klein dat het past in de geringe ruimte die beschikbaar is in de meeste huizen. Het doorbraak materiaal is een zoutcomposiet, met  $K_2CO_3$  (kaliumcarbonaat) als basismateriaal.

Het is de eerste echte warmtebatterij voor in huis: compact, verliesvrij, stabiel en betaalbaar.

### [Duurzame oplossingen en de voordelen van de warmtebatterij op een rij](#)

In een maatschappij die vraagt om energiebesparende technologie is de warmtebatterij voor in huis een product voor een duurzame toekomst. Hier de voordelen op een rij:

## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

1. De prestatie van materiaal is stabiel; het materiaal heeft minimaal een beoogde levensduur van >20 jaar, bij maandelijkse op-/ontladen.
2. Het is een compacte oplossing; door de koelkastformaat opslag biedt het voldoende warmte aan een gemiddeld gezin om 2 weken van te douchen. De energiedichtheid van het systeem ligt daarmee op minimaal 10 x die van wateropslag, en het overstijgt ook ruimschoots de energiedichtheid van state-of-the-art elektrische huisbatterijen.
3. Het is een betaalbare oplossing, met een kostprijs die ver (factoren) beneden die van elektrische opslag ligt én in huis past.

### [Meer inzichten in thermochemische principe](#)

De warmtebatterij maakt gebruik van een zogeheten thermochemisch principe. De warmtebatterij voor in huis gaat uit van twee componenten: water en een zouthydraat. Zodra waterdamp en het zout bij elkaar worden gevoegd, bindt het water aan het zout en gaat het zout over in een nieuwe kristalvorm. Bij deze reactie komt warmte vrij. Deze reactie is omkeerbaar.

Warmte wordt toegevoegd om het water van het nieuwe kristal af te stoken en zo worden de 2 oorspronkelijke componenten weer verkregen. Feitelijk is het deze warmte die wordt opgeslagen en zolang die 2 componenten gescheiden zijn, blijft de opgeslagen warmte bewaard.

Hiermee is het een proces zonder warmteverlies, wat weer een voorwaarde is om warmte langdurig op te slaan. Op deze wijze kan er veel warmte opgeslagen worden in een klein volume. Aanzienlijk meer dan water, en aanzienlijk meer dan in zogeheten faseovergangsmaterialen.

Dat maakt het nog niet direct praktisch toepasbaar als opslag materiaal. In- en uitgaande warmte, en daarmee uit- en ingaande waterdamp, zorgen ervoor dat het kristal aanzienlijk in volume verandert. Het zoutdeeltje dreigt dan zijn samenhang te verliezen, scheurt, valt uit elkaar of anderszins. Dat hebben we opgelost. Er is nu een stabiel zoutcomposiet, dat blijvend zijn functie kan verrichten.

Het nieuw ontwikkelde apparaat principe benut de potentie van het zoutcomposiet ten volle; het zogeheten closed-loop principe. Het apparaat zelf blijft compact in omvang en is betaalbaar. Uniek aan de warmtebatterij voor in huis is dat het een vernuft staaltje techniek is wat met slechts vier componenten zijn prestatie levert. Die eenvoud is een belangrijk startpunt om het goedkoop te houden, maar ook om snelle ontwikkeling naar een product mogelijk te maken en zo op korte termijn de markt te betreden.



## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### Gebruiksduur en inzet

De reactie is inmiddels stabiel. Tests laten zien dat de batterij langdurig kan laden en ontladen zonder energieverlies. Hiermee komt de gebruikersduur van de warmtebatterij op twintig jaar, als je er van uit gaat dat de batterij eens per maand geheel wordt opgeladen en ontladen.

Het systeem kan zowel via warmte als elektrisch worden opgeladen, al dan niet in combinatie met een warmtepomp. We voorzien dat het elektrische warmtepompen beter laat functioneren op energiearme momenten en zonnecollectoren beter laat renderen. Het geheel heeft een belangrijk potentieel in het afvangen van piekbelasting van het energienet.

### Een warmtebatterij voor in huis: compact, stabiel en betaalbaar

Het aanbod van duurzame zonne- en windenergie is onzeker. Soms is het te groot en soms juist weer te klein om te voldoen aan de snel toenemende vraag. Energieopslag op momenten met een overmatig aanbod is een oplossing, maar die technologie was tot voor kort weinig efficiënt. De innovatieve warmtebatterij die TNO en TU/e hebben ontwikkeld, is wél efficiënt, breed toepasbaar en rijp voor de markt.

Opslag van duurzame energie is op zich geen nieuw idee, zegt TNO'er Olaf Adan: "Wel nieuw is, dat TNO en de TU/e een warmtebatterij hebben ontwikkeld die stabiel en zonder energieverlies presteert en bij juist gebruik ook nog eens minstens twintig jaar meegaat. De batterij is betaalbaar en niet groter dan een koelkast. Dat is een doorbraak, die energieopslag toepasbaar maakt tot op het niveau van huizenblokken of zelfs individuele woningen."

De warmtebatterij werkt met twee componenten: waterdamp en een zouthydraat. Breng die twee bij elkaar en het water bindt zich aan het zout, waarbij zoutkristallen ontstaan. Bij dat proces komt warmte vrij en die kan bijvoorbeeld worden omgezet in elektriciteit.

### Omkeerbaar en stabiel proces

Het grote voordeel is, dat het proces omkeerbaar is. Als je opnieuw warmte in het systeem brengt, bijvoorbeeld de energie van zonnepanelen op een stralende dag of van een lekker draaiende windturbine, dan komen water en zout weer los van elkaar. Samengevat: zolang water en zout gescheiden zijn, is er energie opgeslagen. Breng je die twee weer bij elkaar, dan komt er warmte en daarmee energie vrij.

"We gaan uit van een levensduur van tenminste 20 jaar als de batterij eens per maand geheel wordt opgeladen en ontladen"

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

De warmtebatterij van TNO en de TU/e kan laden en ontladen zonder dat er energieverlies optreedt, zegt Adan: “De kunst was te voorkomen dat de zoutdeeltjes tijdens het omzettingsproces zouden beschadigen en zo hun werking zouden kwijtraken. Dat is ons gelukt. We gaan uit van een levensduur van tenminste twintig jaar als de batterij eens per maand geheel wordt opgeladen en ontladen.”

### Veel beter dan bestaande systemen

De capaciteit van de warmtebatterij is voldoende om een gemiddeld gezin twee weken te laten douchen. Dat is tien keer beter dan energieopslag in water en ook ruimschoots meer dan wat de beste huisbatterijen tot nu toe konden presteren.

“De warmtebatterijen helpen ook om piekmomenten in het verbruik op het energienet op te vangen”

De warmtebatterij is te combineren met een warmtepomp, die naar verwachting beter gaat functioneren op energiearme momenten. De onderzoekers van TNO en de TU/e voorzien, dat ook zonnepanelen beter gaan renderen. Adan: “Een ander niet te onderschatten voordeel is, dat de warmtebatterijen helpen om piekmomenten in het verbruik op het energienet op te vangen.”

### Breed toepasbaar

Al met al spreekt Adan van een vernuftig systeem, dat heel eenvoudig werkt. Die eenvoud maakt het mogelijk om de warmtebatterij betaalbaar te houden, ook voor huizenblokken of zelfs voor individuele woningen. De kostprijs ligt ver beneden die van systemen voor elektrische opslag, terwijl de prestaties aanzienlijk beter zijn.

“Het marktpotentieel in de EU kan gaan om rond de 60 miljoen woningen”

Dat houdt niet alleen in dat er een markt is voor de warmtebatterij, maar ook dat het marktpotentieel aanzienlijk kan zijn. Alleen al in Nederland gaat het naar schatting om zo'n zeven miljoen woningen. In de EU kan het gaan om rond de zestig miljoen woningen. Daarnaast zijn er natuurlijk nog andere toepassingen denkbaar.

## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### Wat is entropie?

De kamer wordt als vanzelf een rotzooi. Natuurkundigen hebben een maat voor zulke wanorde bedacht - voor alle wanorde: entropie. Hoe groter de chaos, hoe hoger de entropie. Als je een scheutje melk in je koffie giet, neemt de entropie in je kopje bijvoorbeeld toe wanneer de melk zich verspreidt door de koffie. Wat is entropie precies? Is het de gangmaker van alles wat er in het heelal gebeurt? En onttrekt het leven zich niet aan de wet van de entropie?

Iedereen heeft weleens gehoord van de wet van behoud van energie: je kunt verschillende vormen van energie, zoals warmte, bewegingsenergie of elektriciteit in elkaar omzetten, maar het totaal blijft altijd gelijk. Energie komt niet uit het niets, en verdwijnt nooit. Alles wat op aarde en in de rest van het heelal gebeurt, is qua hoeveelheid energie niet meer dan vestzak-broekzak.

Je kunt je afvragen: waarom gebeurt er dan van alles? Wat drijft al die veranderingen aan, als energie niet de gangmaker is? Het natuurkundige antwoord luidt: de toename van entropie is de grote gangmaker.

### Waarom raakt het snoer van je koptelefoon altijd in de war?

Voorbeeld: als je een scheutje melk in je koffie giet, neemt de entropie in je kopje toe wanneer de melk zich verspreidt door de koffie. Daarom gebeurt dit spontaan. De overige natuurwetten verbieden niet dat die melk zich uit de koffie weer spontaan samentrekt tot een scheutje pure melk. Maar omdat daarbij de entropie zou afnemen, zie je dit nooit gebeuren.

Voor entropie geldt geen behoudswet, integendeel: bij alles wat er gebeurt, neemt de totale entropie toe. Entropie verschijnt wel uit het niets.

### Wat is entropie? En waarom wil ik dat weten?

Op z'n alledaags kun je entropie omschrijven als 'de mate van wanorde'. Zoals we in het dagelijks leven merken, is wanorde geneigd in de loop der tijd toe te nemen. Je kamer wordt vanzelf een rommeltje. Orde, daarentegen, ontstaat niet spontaan; je kamer opruimen, daar moet je gericht energie in stoppen.

Dat entropie alleen maar toeneemt, lijkt in dit simpele voorbeeld al weerlegd te worden, omdat je je kamer kunt opruimen. Dan neemt de entropie van de spullen in je kamer toch af? Toch niet, want de entropiewet stelt een extra voorwaarde: in een afgesloten systeem neemt de entropie alleen maar toe (of blijft gelijk, als daar binnen niets gebeurt). Zodra jij je kamer binnenloopt en gaat opruimen, is die kamer geen

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

afgesloten systeem meer; je brengt energie en daardoor ook entropie van buiten de kamer in. In het systeem 'ik en mijn kamer' neemt de entropie om die reden wel degelijk toe als je gaat opruimen.

### [Water en ijsblokjes](#)

In het water kunnen watermoleculen zich vrij bewegen, daar is de entropie dus hoog. In het ijs kunnen watermoleculen zich niet vrij bewegen, daar is de entropie dus laag. Doordat het ijs in het glas aan het smelten is wordt de totale entropie steeds hoger.

Elke vergelijking gaat ergens mank; als je natuurkundig correct zou willen analyseren hoe het zit met de entropie van een kamer in een huis, wordt het een ingewikkeld verhaal. Immers, in die kamer staan apparaten die elektriciteit verbruiken, met elke ademhaling warm je een paar liter lucht op tot 37 graden, de zon schijnt door het raam naar binnen, en ga zo maar door.

Om de wet van de entropie in al zijn facetten te begrijpen moet je heel wat van natuurkunde weten. Maar een belangrijke consequentie die iedereen zou moeten kennen is dat je warmte niet 100% efficiënt kunt omzetten in andere vormen van energie. Warmte is de meest wanordelijke vorm van energie; het is niet meer dan de chaotische beweging van de atomen en moleculen waaruit alle materie bestaat.

Je kunt de moleculen in hete verbrandingsgassen die zich kriskras door elkaar bewegen, niet als bij toverslag allemaal dezelfde kant op laten bewegen. Vooral daarom zetten automotoren maar een kwart van de verbrandingswarmte van benzine of diesel om in beweging van de auto. Ook de beste elektriciteitscentrales zetten maar iets meer dan de helft van de energie in kolen of aardgas om in elektriciteit. De andere helft blijft chaotische beweging van moleculen. Met andere woorden: afvalwarmte.

Dit is geen verspilling; een elektriciteitscentrale móet al die afvalwarmte lozen om elektriciteit te kunnen produceren, net zoals een waterkrachtcentrale zijn water moet lozen om te kunnen draaien. Daarom is er ook een grens aan de efficiëntie van zonnecellen: die kunnen zelfs in theorie hoogstens 40% van de zonne-energie omzetten in elektriciteit. De beste zonnepanelen halen nu bijna de helft daarvan, ofwel 20%.

### [Entropie als gangmaker van alles wat gebeurt](#)

Als je entropie in actie wilt zien, moet je een halfvolle fles cola flink schudden en dan de dop los draaien. Het lijkt alsof een woeste kracht al het CO<sub>2</sub>-gas dat uit de cola is vrijgekomen, uit die fles perst. Maar er is in feite niets wat perst. Als de dop nog dicht zit, bewegen de CO<sub>2</sub>-moleculen kriskras door de fles en botsen talloze keren met elkaar en tegen de

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

binnenwand. Als de dop open gaat, blijven ze dat doen, maar soms zal een CO<sub>2</sub>-molecuul toevallig richting de flesopening bewegen en zo buiten de fles terecht komen.

Omgekeerd zijn er moleculen in de omringende lucht die toevallig de opening van de fles binnen vliegen. Maar omdat in de fles meer moleculen per kubieke centimeter zitten dan daarbuiten, is het netto effect dat er gas naar buiten stroomt. Dit gaat door totdat het aantal moleculen per kubieke centimeter - de druk - binnen en buiten de fles gelijk is. Als je ziet hoe heftig gas onder hoge druk kan ontsnappen, krijg je een idee hoeveel beweging er in gasmoleculen zit: bij kamertemperatuur bewegen ze al met snelheden van honderden meters per seconde.

De toestand met alle CO<sub>2</sub>-moleculen in de fles en geen enkele daarbuiten, is minder wanordelijk dan een toestand waarin CO<sub>2</sub>-moleculen zowel in de fles als in de omringende lucht door alle andere moleculen heen bewegen. De toestand met lage entropie ontwikkelt zich dus puur door de chaotische bewegingen van de moleculen naar een toestand met hogere entropie.

Door simpele modellen met chaotisch bewegende deeltjes te bestuderen, ontdekt men eind negentiende eeuw het precieze, wiskundige verband tussen entropie, temperatuur en warmte. De natuurkundige Ludwig Boltzmann speelt een belangrijke rol bij die ontdekkingen.

We zagen al, dat verbrandingsmotoren hierdoor nooit 100% efficiënt kunnen zijn. Dit geldt voor alle processen waarbij energie wordt omgezet, op aarde of elders in het heelal. Overal heeft de entropiewet als de ware belasting op de energieomzet, keer op keer, totdat alle energie is gedegenereerd tot afvalwarmte waar we niets meer mee kunnen. Dan is de entropie maximaal. Zelfs met het heelal als geheel zal dat ooit gebeuren, nadat alle sterren zijn uitgedoofd.

### [Onttrekt het leven zich aan de wet van de entropie?](#)

Tot in de twintigste eeuw, lang nadat Boltzmann de wet van de entropie verklaart met de nuchtere statistiek van atomen, blijven veel wetenschappers geloven dat voor biologische processen speciale wetten gelden. Het is toch onmiskenbaar dat als een zaadje uitgroeit tot een plant, of een menselijke eicel tot een baby, de Natuur juist orde schept, geen wanorde? Een goddelijke scheppingskracht zou de wet van de entropie voor levende wezens buiten werking stellen.

Inmiddels weten we, dat de wet van de entropie ook geldt voor de biologie. De complexe orde van een levend wezen vertegenwoordigt inderdaad een lage entropie, maar een levend wezen is nooit een

## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

afgesloten systeem. Het moet altijd stoffen opnemen, verwerken en weer uitscheiden, waarbij het afvalwarmte en entropie loost in de omgeving. Zodra we ophouden om materiaal met een lage entropie (= voedsel) in te nemen, begint de entropie van ons lichaam toe te nemen. Met andere woorden, het lichaam sterft en valt uit elkaar.

### Bepaalt entropie de richting van de tijd?

Omdat entropie toeneemt bij alles wat er gebeurt, moet de totale entropie van het heelal het laagst zijn op het moment dat nog niets is gebeurd: op het moment van de oerknal. Sindsdien neemt de totale entropie alleen maar toe, vooral doordat het heelal steeds verder expandeert. Net als bij het CO<sub>2</sub>-gas dat uit de colafles ontsnapt, neemt de wanorde toe omdat alle materie en straling in het heelal meer ruimte krijgen.

De lage entropie van de oerknal lost een groot probleem met de overige natuurwetten op. Die maken namelijk geen onderscheid tussen verleden en toekomst. In alle natuurkundige formules waar de tijd (t) in voorkomt, kun je ook (-t) invullen, en dan verloopt het proces omgekeerd! Al het CO<sub>2</sub>-gas in de kamer trekt zich weer samen in de colafles. Een kuiken kruipt terug in het ei en dat floept terug in de kip.

Als je een filmpje van zoiets ziet, zeg je meteen: dat is achterstevoren afgedraaid. Intuïtief beseffen we, dat in zo'n filmpje de entropie afneemt, en dat dit in het echt niet kan (als je het helemaal correct wilt zeggen: de kans dat dit gebeurt is extreem klein). Toename van entropie maakt het verschil tussen verleden en toekomst.

### Het mysterie van de entropie van zwarte gaten

Het idee van zwarte gaten is al eeuwen oud, maar pas sinds de jaren zeventig wordt algemeen aanvaard dat het niet slechts theoretische curiositeiten zijn, maar dat ze echt bestaan.

Dat levert wel een groot probleem op: alles wat in een zwart gat valt, verdwijnt uit ons heelal, inclusief de bijbehorende entropie. Via een zwart gat zou dus de entropie van het heelal af kunnen nemen. Voor natuurkundigen is zo'n lek in hun stelsel van natuurwetten onverteerbaar.

Stephen Hawking vindt, met Nobelprijswinnaar Jacob Bekenstein, de oplossing: zwarte gaten hebben zelf een – zeer grote – entropie, die evenredig is met hun oppervlakte. Iedere keer dat er iets in het zwarte gat valt, neemt diens massa toe. Daardoor neemt zijn oppervlakte, en dus zijn entropie toe. Die toename is altijd groter dan de entropie die het invallende materiaal met zich mee draagt.

Voor dit model van een zwart gat moeten Hawking en collega's aspecten van de relativiteitstheorie en de kwantumtheorie combineren, de eerste

## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

keer dat zoiets lukt. Sommige exotische theorieën over hoe de natuur op het meest fundamentele niveau werkt, bouwen voort op deze benadering van zwarte gaten. De Nederlandse Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft noemt dit 'het holografisch principe' en daarin speelt 'kwantuminformatie' - een begrip dat verwant is aan entropie - een sleutelrol.

### In het kort

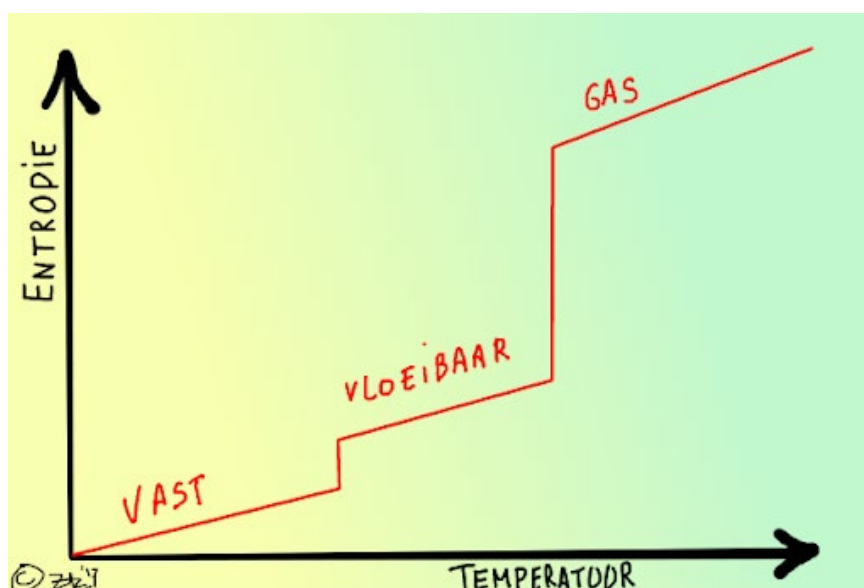
Entropie is 'de mate van wanorde'. Uiteindelijk heeft wanorde overal in het universum de neiging om toe te nemen. Voorbeelden uit het alledaagse leven zijn: melk die je in je koffie giet en ijsblokjes die smelten.

Wil je entropie in actie zien? Schud dan een fles cola. De CO<sub>2</sub>-moleculen willen dan uit de fles ontsnappen. Als je de fles opent zullen sommige moleculen 'toevallig' door de opening van de dop vliegen. Dit gaat door totdat het aantal moleculen per kubieke centimeter binnen en buiten de fles gelijk is. De entropie is dan van laag naar hoog gegaan.

De wet van de entropie geldt ook voor de natuur: een levend wezen heeft een lage entropie. Pas zodra een mens, dier of plant sterft zal de entropie toenemen. Het neemt dan niets meer tot zich met een lage entropie, zoals voeding.

Tijdens de oerknal was de entropie in het heelal het laagst. Sindsdien neemt de entropie toe, omdat het heelal steeds verder expandeert.

Zwarte gaten kunnen van alles opnemen, wat de entropie van het heelal in theorie zou verlagen. Dit gebeurt in praktijk toch niet, omdat de massa van een zwart gat iedere keer toeneemt als er iets in valt.





## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### Thermische energieopslag voor warmte en koude

Thermische energieopslag (TES) is een tijdelijke opslag van warmte of koude voor gebruik op een later moment. Het overbruggt het gat tussen vraag en aanbod van energie. Thermische energie-opslagsystemen met PCM's zijn geschikt voor korte (24h) en middellange termijn energieopslag van maximaal een week. Voor de meeste toepassingen moeten PCM's worden verpakt in goed afgesloten containers. Global-E-Systems heeft verschillende standaard types containers ontwikkeld geschikt voor diverse toepassingen.

De GAIA PCM-bal is een inkapseling van PCM-materialen in een bolvorm met een doorsnede van 63, 80, 100 of 125 mm Ø gefabriceerd uit hoogwaardige HDPE, PP of RVS. De PCM-bollen kunnen eenvoudig los in een buffertank voor een verwarmings- of koudekringloop aangebracht worden. Daarmee kan het opslagsysteem vergroot (in capaciteit) of verkleind (in volume) worden. De PCM-ballen worden speciaal voor ieder project geselecteerd met het juiste materiaal en fase overgangstemperatuur.

### Toepassingsvoorbeelden

- Bufferopslagsystemen voor thermische zonne-energie.
- Verkleining van het opslagvolume met een factor 3-4 zonder in te leveren op de opslagcapaciteit.
- Bufferopslag voor warmtepompen en koudwatermachines.
- Koude / warmte-opslag voor piekschering in de (proces)industrie.
- PCM-ballen kunnen in een luchtkanaal (rechthoekig of rond) gestapeld worden of simpelweg los gestort worden.
- Voorverwarming lucht-water warmtepompen. Laden in de dag cyclus, betere COP in nachtbedrijf.
- Voor ruimtekoeling. Kan met koude nachtlucht voorgeladen worden.
- Woningbouw. Bijvoorbeeld in serieschakeling met de HR-WTW.
- Het toepassen van PCM-ballen als actief opslagmedium in bouwmaterialen (bijv. beton). Voor deze toepassing zijn de PCM-ballen met een diameter van 50 mm Ø het meest geschikt.

### Technische specificaties

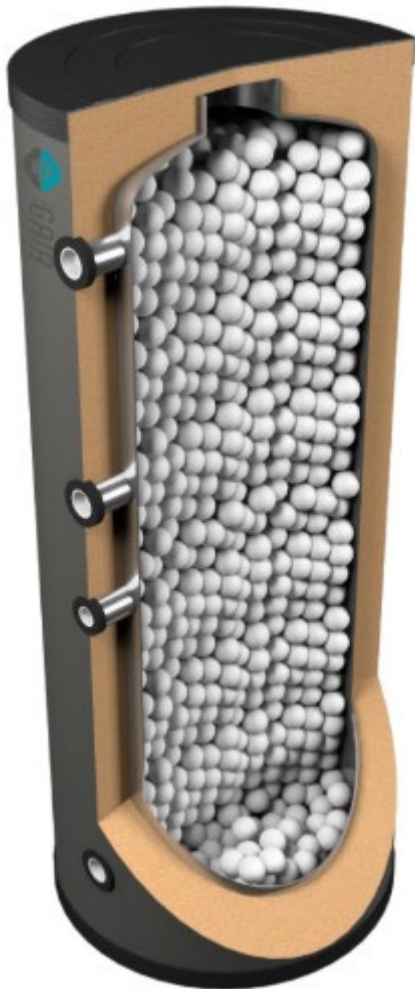
- **Basingrediënt:** Zouthydraat (warme) of een eutectische oplossing (koude) bijvoorbeeld water/glycol. Brandclassificering: DIN EN 13501-1 (niet brandbaar).
- **Warmteopslagcapaciteit:** Capaciteit per bal: 55 kJ/15,4 Wh bijvoorbeeld PCM58. Capaciteit per m<sup>3</sup>: 32 kWh.
- **Toepasbare temperaturen:** Toepasbaar van -30°C tot + 89°C.



## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

- **Specificaties bol** (80mm): Gewicht: 200 - 400 gram (afhankelijk van soortelijke massa PCM). Vulvolume: 180 mL. Totaalgewicht per m<sup>3</sup>: 540 - 765 kg (afhankelijk van soortelijke massa PCM). Aantal bollen per m<sup>3</sup>: 1920 stuks.
- **Materiaal bol**: Vervaardigd uit High-density polyethylene, Polypropyleen of RVS met een hoge warmtestabiliteit en een optimale energie-overdracht.
- **Max. installatiedruk**: HDPE / PP: 3 bar RVS: 6 bar.



## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### Technologische knelpunten

De doelstelling van het vervolgtraject is om de techniek in de praktijk te testen. Voordat het mogelijk is om het beoogde proces in de praktijk te testen, moet er eerst uitvoerig onderzoek gedaan worden. Momenteel worden PCM's soms toegepast in het plafond of in de vloer van grote gebouwen. Het is een techniek dat nog niet veelvuldig wordt toegepast in de woningmarkt en reguliere bedrijfspanden. Wij als Hydrobag bv willen deze nieuwe techniek gebruiken in onze Hydrobags. Wij onderzoeken of dit haalbaar is en hebben daarvoor meerdere haalbaarheidsvragen opgesteld. Zo wil Hydrobag onderzoeken welk soort PCM's toepasbaar zijn en die werken met het materiaal van de Hydrobag. Ook is de hoeveelheid aan PCM's van belang en wat het effect daarvan is op de Hydrobag. Wellicht is een combinatie van een aantal soorten PCM's het meest effectief, dit dient ook onderzocht te worden. Tot slot moet er onderzocht worden of het met PCM's mogelijk is dat Hydrobag zonder back-up voldoende warmte kan genereren in de wintermaanden.

### GAIA PMC-bol

De GAIA PCM-bol van Global-E-systems in Dordrecht lijkt in deze fase een goed product om mee te gaan experimenteren. Wat we moeten doen is het juiste product kiezen, op voorhand.

### Toepassingsvoorbeelden

- Bufferopslagsystemen voor thermische zonne-energie;
- Het opslagvolume kan met een factor 3-4 bij gelijkblijvende opslagcapaciteit verkleint worden;
- Bufferopslag voor warmtepompen en koudwatermachines;
- Koude / warmte-opslag voor piekschering in de (proces)industrie;
- PCM-bollen kunnen in een luchtkanaal (rechthoekig of rond) gestapeld worden, of simpelweg los gestort worden;
- Voorverwarming lucht-water warmtepompen. Laden in de dagcyclus, betere COP in nachtbedrijf;
- Voor ruimtekoeling. Kan met koude nachtlucht voor geladen worden;
- Woningbouw. Bijvoorbeeld in serieschakeling met de HR-WTW;
- Het toepassen van PCM-bollen als actief opslagmedium in bouwmaterialen (bijvoorbeeld beton).

## Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### temperatuuroverzicht

Product	Type PCM	Latente warmte	Smelt temperatuur	Stol temperatuur
GAIA OM PCM7	Organic	180 kJ/kg	7°C	6°C
GAIA OM PCM14	Organic	208 kJ/kg	14,5°C	13°C
GAIA HS PCM18	Inorganic	170 kJ/kg	18.5°C	17.5°C
GAIA HS PCM24	Inorganic	158 kJ/kg	24°C	22°C
GAIA HS PCM29	Inorganic	188 kJ/kg	29°C	27°C
GAIA HS PCM36	Inorganic	202 kJ/kg	36°C	34°C
GAIA HS PCM48	Inorganic	206 kJ/kg	48,7°C	45°C
GAIA HS PCM58	Inorganic	226 kJ/kg	58°C	52°C
GAIA HS PCM64	Inorganic	218 kJ/kg	64°C	61°C
GAIA HS PCM78	Inorganic	260 kJ/kg	78°C	75°C
GAIA HS PCM89	Inorganic	149 kJ/kg	89.3°C	84°C

### Economische knelpunten

De totale kosten kunnen door het complexe aspect van de beoogde ontwikkeling flink oplopen waardoor de beoogde vermarkting van het proces problemen gaat ondervinden. Het is daarom van belang om een gedegen onderzoek naar de kostprijs van de uitvoering van het proces te doen. Bovendien moet er gekeken worden naar het mogelijke verdienmodel en hoeveel kosten deze nieuwe techniek met zich meebrengen bij het eindproduct. Daarbij zal er ook een marktonderzoek plaatsvinden. Tevens kan het verkrijgen van voldoende financiering een knelpunt zijn. De aangevraagde subsidie dient daarom ook om het economische risico van Hydrobag bv enigszins in te perken. Met de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek wordt er verwacht dat het verkrijgen van externe financiering, indien het resultaat een Go betreft, eenvoudiger zal zijn dankzij de bewezen potentie.

## **Deskresearch & literatuuronderzoek naar PCM's Technologische-, Economische- en Organisatorische knelpunten**

Projectplan MKB-innovatiestimulering Regio- en Topsectoren (MIT) 2020 – Hydrobag bv

### Organisatorische knelpunten en benodigde samenwerkingspartners

Op het organisatorische vlak zijn er enkele knelpunten te verwachten voor wanneer het innovatieve product ontwikkeld kan worden. Er zal onderzocht moeten worden of (en welke) partners betrokken moeten worden om ook vervolgpunten te kunnen verwezenlijken. Hiervoor zal gekeken worden naar verschillende bedrijven en/of kennisinstellingen die bereid zijn om toe te treden in een ontwikkelingstraject. Hierbij zal met name gezocht worden naar experts die over voldoende kennis beschikken op het gebied van PCM. Hoe een toekomstige samenwerking gevormd gaat worden is onduidelijk en dient uitgezocht te worden in dit haalbaarheidsproject. Ook zullen wij in contact gaan met bedrijven die PCM kunnen leveren voor de toekomstige productie.

### Haalbaarheidsvragen

In dit haalbaarheidsproject zal antwoord worden gezocht op de volgende technologische en economische haalbaarheidsvragen:

1. Wat is op dit moment de stand der techniek van PCM's?
2. Hoe verhoudt de diverse types PCM's zich tot de Hydrobag en het materiaal waar het uit bestaat?
3. Zijn organische of niet-organische PCM's het meest effectief voor de Hydrobag?
4. Hoe kan de PCM de warmte loslaten wanneer dit nodig is?
5. Hoe effectief houdt het PCM de warmte vast in de Hydrobag?
6. Zijn combinatie van type PCM's effectiever dan een enkel soort?
7. Kan de Hydrobag met PCM's zonder back-up (warmtepomp / cv-ketel) in de wintermaanden standalone functioneren?
8. Kan de innovatie organisatorisch uitgevoerd worden? Met welke factoren moet rekening gehouden worden?
9. Wat zijn de verschillende typen en hoogtes van de kosten die bij deze innovatie gemaakt moeten worden?
10. Hoe verhouden deze kosten zich ten opzichte van de mogelijke opbrengsten?
11. Hoe ziet het verdienmodel eruit voor een Hydrobag met PCM's?
12. Welke strategische partnerschappen moeten aangegaan worden om een vervolgpunten te laten slagen?