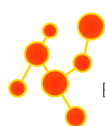


# ROADMAP COMPACTE CONVERSION EN OPSLAG



# INLEIDING

In 2050 zal de gebouwde omgeving netto energieneutraal moeten zijn om de industrie- en transportsector de dan nog benodigde toegang tot fossiele brandstoffen te kunnen geven. Daarom is een netto energieproducerende nieuwbouwsector noodzakelijk, naast een in hoge mate energie-efficiënte bestaande bouw. Bij grootschalige toepassing van duurzame energie zal om redenen van mis-match in vraag/aanbod van deze vorm van energie (dag/nacht, seizoenen) en van economische optimalisatie steeds meer opslagcapaciteit nodig zijn voor zowel warmte als koude. Dit kan en mag echter niet ten koste gaan van wooncomfort en betaalbaarheid. Opslag is de sleutel om duurzame bronnen (zoals zonnewarmte, winterkoude) en overtollige energie (bv. industriële restwarmte) in tijd en plaats te koppelen aan de vraagzijde.

Koppeling van vraag en aanbod kan worden gerealiseerd met warmteopslag, transport, en conversie van of naar andere energiedragers. Huidige oplossingen voor deze vormen van toepassing van warmte hebben verschillende nadelen:

- **OPSLAG**

Huidige vormen van voelbare thermische energieopslag zijn ofwel slechts voor korte termijn, lage temperaturen, met groot volume, of met een combinatie hiervan. Compacte thermische energieopslag (warmte en koude) kan op termijn met faseovergangsmaterialen (phase-change materials, PCM) of met thermochemische opslag materialen (TCM) worden gerealiseerd. Door de fysische en chemische processen die hierbij spelen wordt een veel compactere vorm van opslag gerealiseerd (factor 2-10), met daarbij, in geval van TCM gebaseerde opslag, zonder thermische opslagverliezen.

- **CONVERSIE**

Huidige compressiewarmtepompen gebruiken relatief grote hoeveelheden koudemiddelen, zijn relatief luidruchtig en groot. Een van de mogelijke oplossingen betreft magnetocalorische warmtepompen die naast een theoretisch hogere efficiëntie en daarmee gepaard gaand potentieel lager energiegebruik en compacter volume, tevens een veel lagere behoefte aan schadelijke koudemiddelen hebben. Ook warmtepompen gebaseerd op andere principes (bv thermo-akoestisch, thermo-elastisch) worden internationaal momenteel onderzocht voortoepassing in de gebouwde omgeving.

De uitdagingen waar we voor staan zijn zowel van technologische (kan het), economische (wat levert het op versus wat kost het) en sociale aard (willen gebruikers de nieuwe technologieën adopteren). Om deze uitdagingen aan te gaan is het MJP CCO consortium in 2015 aan een intensieve samenwerking begonnen (11 industriële partijen en 6

kennisinstellingen) dat zich als doel heeft gesteld compacte conversie en opslag technologieën uit te ontwikkelen tot een economisch aantrekkelijk alternatief en zo Nederland en het Nederlandse bedrijfsleven in staat te stellen om, en dit in analogie met de ontwikkelingen die een halve eeuw geleden hebben geleid tot de HR-ketel en daarmee een leidende positie op het gebied van (gas) verwarming door Nederlandse bedrijven (de zgn. Eerste Warmtereolutie), een leidende positie op te pakken op het gebied van compacte conversie en opslag: “de Tweede Warmtereolutie”.

Voorliggende roadmap is door de betrokken partners (TNO, TUD, TU/e, UT, Hanze, UT, DWA, Alliander, BJW, RTB, CCS, Wendelin, COMSOL, Liveliness, DOW, NEDMAG, Ithodaalderop) in nauwe samenspraak met TKI Urban Energy opgezet en omvat zowel het lopende programma MJP CCO als de noodzakelijke geachte activiteiten om in de komende jaren de leidende positie te bewerkstelligen. Als onderdeel van het lopende programma zal deze roadmap jaarlijks kritisch bekeken worden en waar nodig worden bijgesteld. De voorgestelde activiteiten richten zich in eerste instantie op compacte opslag en conversie van thermische energie voor het gebruik in individuele bestaande woningen, maar de te ontwikkelen opslag en conversieconcepten kunnen in principe ook op grotere schaal, decentraal op gebiedsniveau gebruikt worden.

De Roadmap Compacte Conversie en Opslag zal zowel gebruikt worden om verdere sturing aan het Meerjarenprogramma te geven als dat het een uitnodiging is voor geïnteresseerde partijen om deel te nemen aan de ingezette tweede warmte revolutie en hiermee bij te dragen aan de verdere verduurzaming van de gebouwde omgeving.

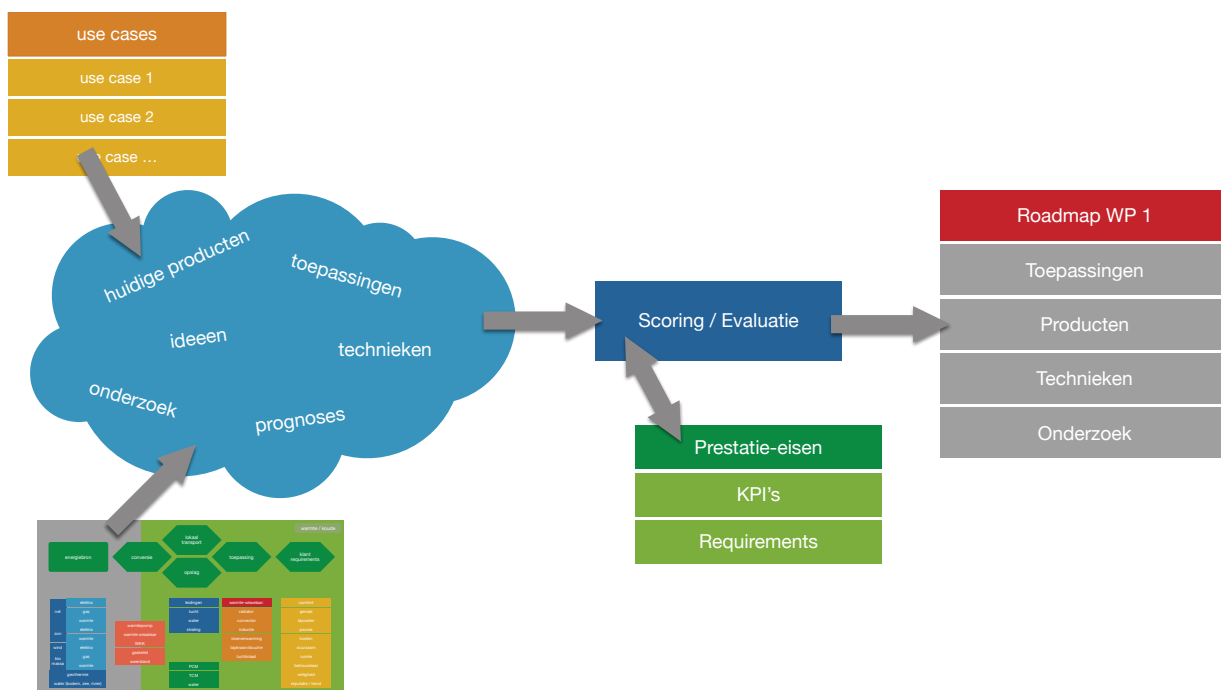
# ROADMAP PROCESS EN METHODOLOGY

De roadmap beschrijft de verschillende innovatie- en technologiepaden die nodig zijn om concepten voor warmte- en koude opslag en conversie voor de gebouwde omgeving succesvol te ontwikkelen en in de markt te zetten.

Voor het realiseren van de roadmap is gekozen voor de Scrum methode; een iteratief en resultaat gedreven aanpak welke flexibiliteit, creativiteit en het opleveren van de meeste waarde in de kortste tijd nastreeft. De scrum aanpak is aangepast aan de randvoorwaarden van het consortium; zo is er geen full-time beschikbaarheid en geen dagelijkse meetings, zaken die Scrum normaliter vereist, maar gekozen voor een 2-wekelijkse cyclus. Essentieel in Scrum is de iteratieve aanpak en het zo snel mogelijk opleveren van waarde.

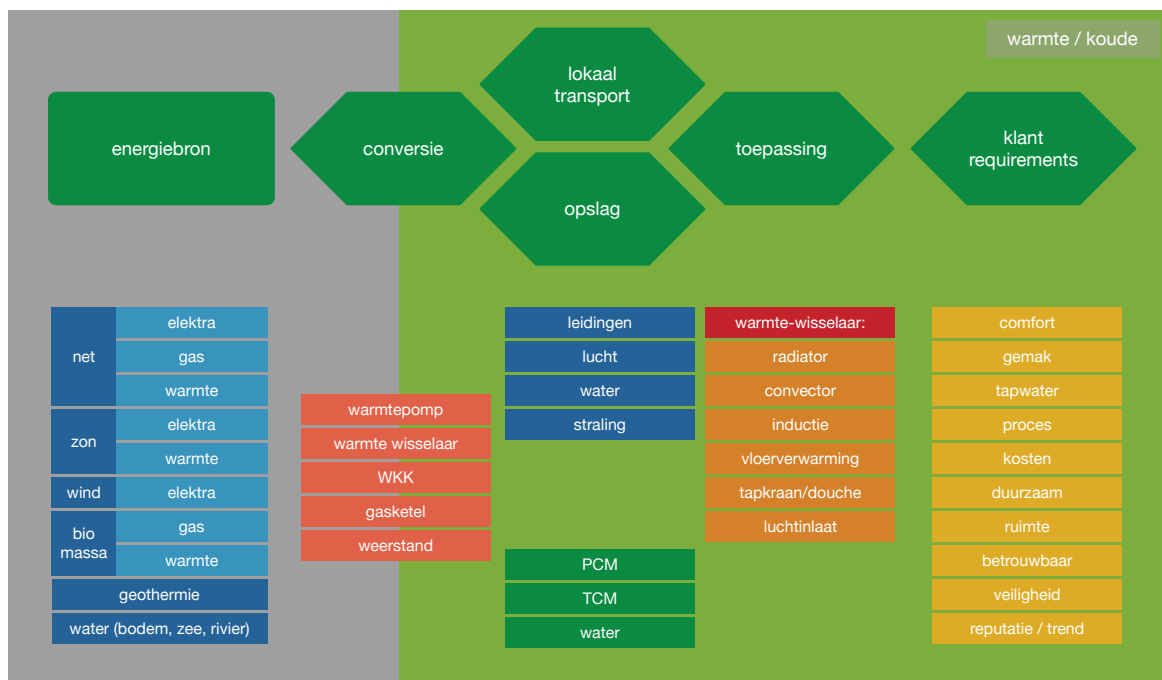
Navolgend figuur geeft de generieke aanpak weer zoals die gevolgd is voor het realiseren van de roadmap.

- 1 Vanuit functionele use cases is een selectie gemaakt van technieken en producten welke van toepassing kunnen zijn op de use case.
- 2 De use case impliceert Key Performance Indicators, KPI's, en beperkingen op de oplossing; in termen van beschikbare ruimte, beschikbaar vermogen, etc.
- 3 De huidige en potentiële technieken worden gescored op basis van deze prestatie eisen.
- 4 Definitie benodigd onderzoek om de potentie van technieken vast te stellen en om prototypes en (deel) producten te ontwikkelen waarmee aan de benodigde prestaties kan worden voldaan.



# ARCHITECTUUR

Onderstaande architectuur geeft het overzicht van mogelijke bronnen, technieken voor conversie en opslag en de toepassingen zoals die als basis voor de ontwikkeling van use-cases en systeemconcepten binnen de roadmap zijn meegenomen.



# USE CASES

De bruikbaarheid en potentie van verschillende technieken voor conversie en opslag moet worden afgewogen binnen de context van een toepassing. Door het mogelijke gebruik van de techniek in de markt voor te stellen, kunnen de noodzakelijke en gewenste prestatie eisen worden gedefinieerd. Het consortium heeft er voor gekozen om een aantal realistische en richtinggevende use cases te definiëren die gebruikt worden om het belang van prestatie eisen af te leiden en de gewenste waarden van die prestatie eisen te bepalen. De cases zijn bedoeld als leidraad voor de selectie en scoring van technieken zodat deze duidelijk in het kader worden geplaatst van een gebruikerswens en niet zuiver technisch worden beschouwd.

## Meegewogen use cases (samenvatting\*)

- Duurzame voorziening warm tapwater
- Appartement onafhankelijk van gas duurzaam
- Goed geïsoleerde woning duurzaam verwarmen, koelen en warm tapwater
- Goed geïsoleerde jaren-70 woning hele jaar duurzaam verwarmen, koelen en warm tapwater
- Gemiddelde grondgebonden woning, decentrale opslag zonnearmte
- Gemiddelde woning zo duurzaam mogelijk verwarmen
- Gemiddelde woning, PV plus elektrische warmtepomp, gedistribueerde grid-connected opslag
- Warmteopslag voor district verwarming (decentrale opslag) bij de eindgebruiker of in de wijk
- Gemiddelde woning zo duurzaam mogelijk verwarmen (geld besparen)
- Mobiele unit om ruimtes duurzaam bij te verwarmen
- Blokverwarming (wooncorporatie) vervangen door een energiezuinige alternatief
- Wijk gemeenschappelijk duurzaam kunnen verwarmen / koelen
- Kantoorpand duurzaam verwarmen
- Werkplek (kantoren) duurzaam verwarmd/gekoeld
- Kantoor (of woning) permanent op ondergrens 18 graden houden
- Markt voor restwarmte bedienen (industrie)
- Warmte opslag voor warmtenet (centrale opslag)
- Warmteopslag voor CHP plants en – WKK biogas
- Trigenation warmte/koeling met WKK
- Flatgebouw duurzaam verwarmen en warm tapwater
- Goed geïsoleerde woning verwarmen met magnetocalorische warmtepomp

## INVENTARISATIE EN SELECTIE VAN USE CASES

Vanuit de consortiumpartners zijn verschillende use cases gedefinieerd en door de experts gescored op twee aspecten:

- Hoe relevant is de case voor de markt (een case met een hoog toepassingsgebied krijgt een hogere score dan een case met een beperkte toepasbaarheid).
- Hoe illustratief is de case voor de CCO vraagstelling (een case die meer eisen stelt aan compactheid en de noodzaak voor opslag krijgt een hogere score).

Er zijn in totaal meer dan twintig cases besproken en beoordeeld. De top 3 van use cases zijn:

- 1 Als gebruiker wil ik minimaal warm tapwater volledig duurzaam kunnen voorzien.
- 2 Als bewoner van een appartement/portiekwoning in Nederland wil ik mijn woning ook duurzaam en onafhankelijk van gas kunnen verwarmen op een energiezuinige manier zodat ik geld kan besparen en zorgeloos kunnen beheren.
- 3 Als eigenaar van een goed geïsoleerde woning in Nederland wil ik mijn woning zo duurzaam mogelijk verwarmen en koelen en wil ik gebruik maken van warm tapwater, het hele jaar door, onafhankelijk van fossiele brandstoffen (koeling is hier als onderscheidend aspect meegenomen).

Use Case	1	2	3
<b>Functies</b>			
Ruimteverwarming		x	
Warm tapwater	x		
Ruimtekoeling			x
<b>Type ruimte/gebouw</b>			
Goed geïsoleerde woning			x
Beperkt geïsoleerde jaren 70 woning			
Portiekflat		x	
Appartement in flatgebouw			
Kantoorgebouw			
<b>Bron</b>			
Duurzaam (zon, wind, etc.)	x	x	x
WKK-systeem			
Wijkverwarming			
<b>Wijze toepassing</b>			
Mobiele units			
Combinatie met WKK			
<b>Locatie opslag</b>			
Lokale opslag	x	x	
Centrale opslag, gebouwniveau		x	
Centrale opslag, buurt/wijkniveau			
Centrale opslag, overig			
<b>Doel/motivatie van gebruiker</b>			
Toename comfort			x
Toename duurzaamheid	x	x	x
Besparing kosten, TCO		x	x
Besparing kosten, investering		x	x

\* Voor gehele beschrijving zie [www.projectcco.org](http://www.projectcco.org)

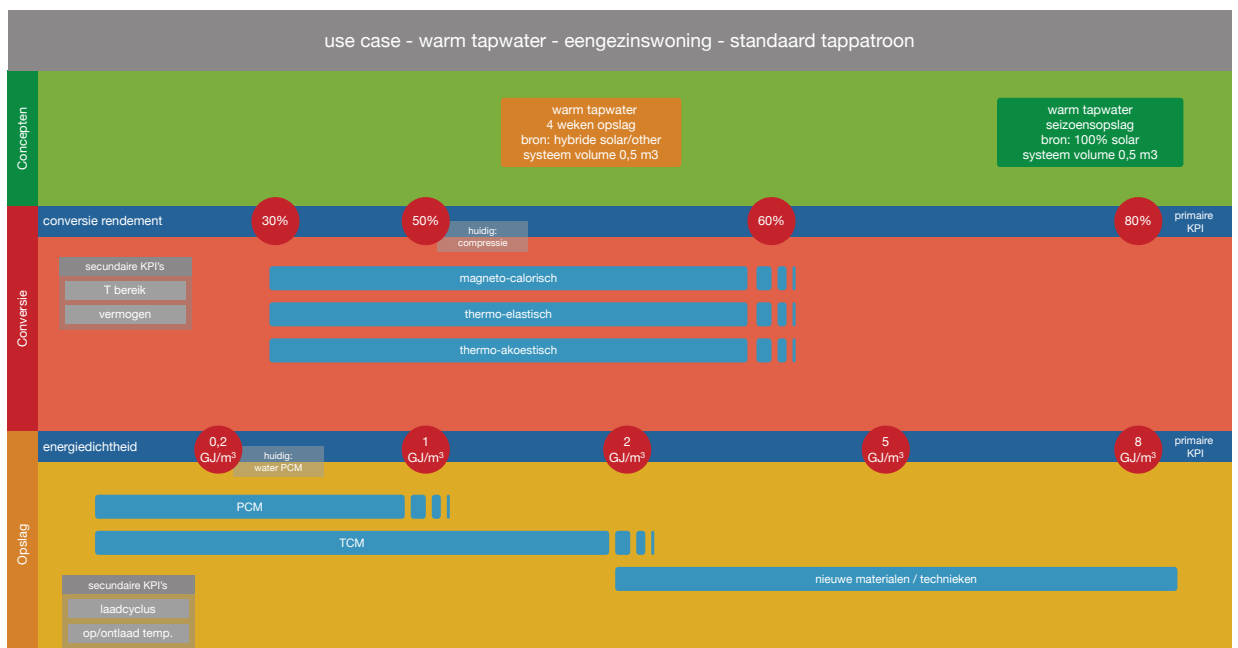
# RESULTATEN

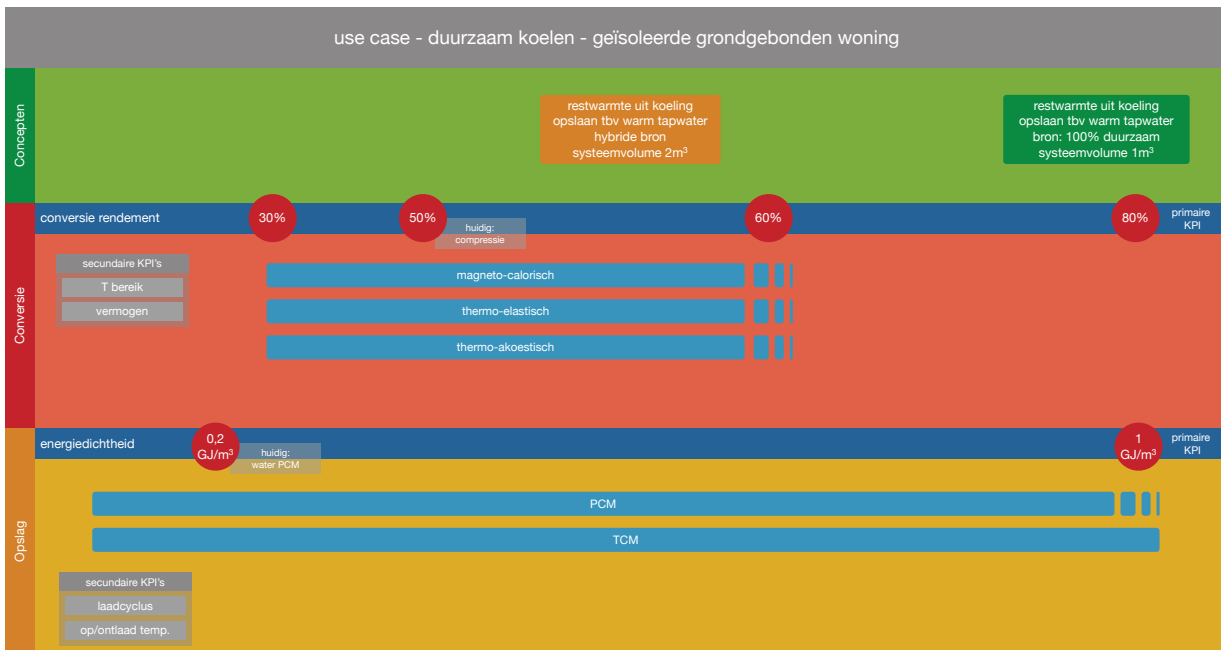
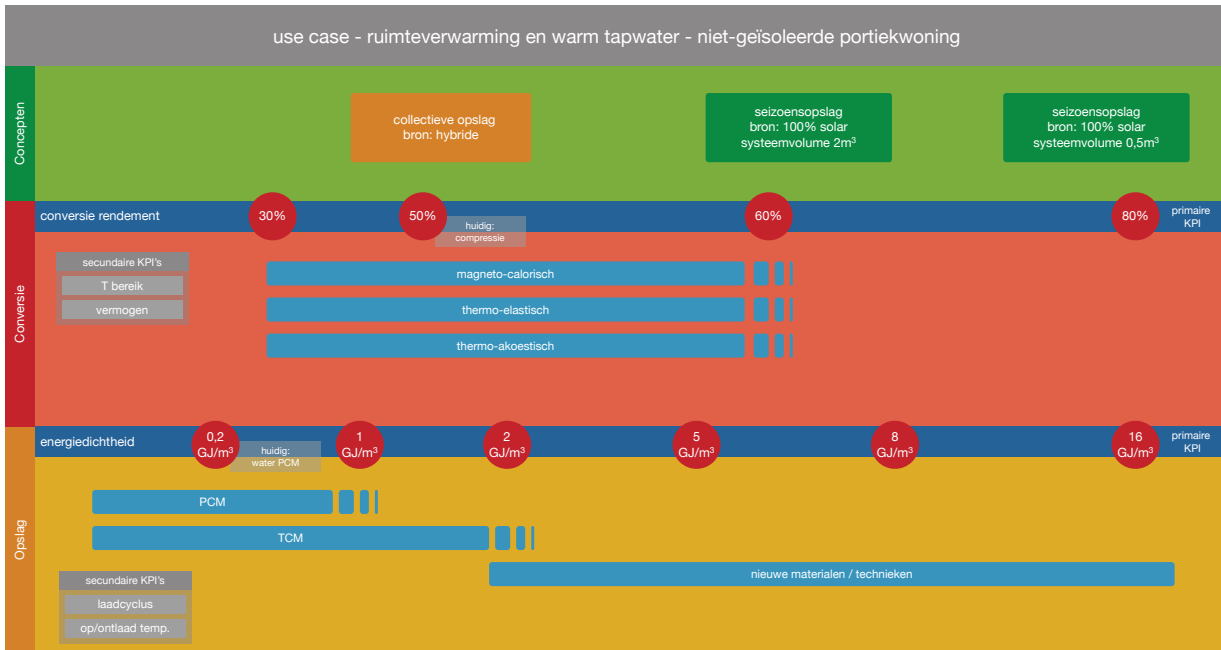
Door het consortium zijn de bekende, beschikbare en verwachte technieken in zogenaamde systeemconcepten geplaatst. Deze systeemconcepten bestaan uit mogelijke combinaties van bronnen, conversie en opslagsystemen om als systeem invulling te geven aan de use cases. Per case zijn verschillende systeemconcepten uitgewerkt. De concepten zijn vertaald naar de fundamentele prestatie eisen en criteria om de case te kunnen invullen. Daar waar mogelijk is onderscheid gemaakt tussen een ideale en volledige invulling van de case (bijvoorbeeld een 100% duurzame bron en een zeer compacte systeemomvang) en een mogelijk nuttige tussenoplossing welke op kortere termijn kan worden gerealiseerd en waarmee als wel invulling gegeven kan worden aan de belangrijkste criteria.

Secundair zijn de temperatuur bereiken en systeempare meters zoals de laadcyclus en het vermogen en kosten. Hierbij is geconcludeerd dat de technieken, althans voor het fundamentele onderzoek, apart van elkaar beschouwd kunnen worden. Verder blijken de verschillende use cases tot sterk vergelijkbare eisen te leiden en deze zijn daarom als leidend voor de korte en lange termijn doelstellingen in de roadmap gekozen. In de vervolgfase is voorzien de exercitie ook voor enkele van de andere use cases te doorlopen om zo te onderzoeken in hoeverre dit tot andere eisen en/of KPI's leidt.

De invulling van de use cases blijkt teruggebracht te kunnen worden naar twee fundamentele prestatie eisen, KPI's:

- energiedichtheid voor de opslag;
- het rendement voor de warmtepomp.





# TECHNIEKEN

## WARMTEOPSLAGTECHNIEKEN

PCM (Phase Change Materials) en TCM (Thermo Chemical Materials) kunnen worden gebruikt voor de opslag van warmte met een significant hogere energiedichtheid dan bijvoorbeeld water. Ze zijn daarmee de aangewezen technieken voor het compacte aspect van de CCO doelstelling.

### WERKINGSPRINCIPE PCM

In een PCM wordt de fase overgang, bijvoorbeeld van vast naar vloeibaar en omgekeerd, gebruikt om warmte op te slaan en af te staan. Het materiaal neemt warmte op en smelt - de warmte is in het materiaal opgeslagen. Later kan warmte onttrokken worden aan het materiaal om bijvoorbeeld een ruimte te verwarmen en het materiaal wordt weer vast. De temperatuur waarbij de faseovergang plaatsvindt bepaalt voor een belangrijk deel de bruikbaarheid van het materiaal in praktische toepassingen. De hoeveelheid energie benodigd voor de faseovergang bepaalt de energiedichtheid.

### WERKINGSPRINCIPE TCM

Bij een TCM wordt de warmte opgeslagen als chemische energie. De basis is een omkeerbare reactie, welke optreedt wanneer warmte wordt toegevoegd en omkeert wanneer warmte wordt onttrokken. Net als bij PCM's hebben verschillende materialen (en dus reacties) een effectief temperatuurbereik. De huidige TCMs zijn voornamelijk gebaseerd op zouthydraten, deze zouten nemen water(damp) op in het kristalrooster. Deze reactie is omkeerbaar en neemt veel warmte op - vergeleken met water is de energiedichtheid van deze materialen een factor 10 beter.

### MATURITY EN VERVOLGONDERZOEK

Zowel voor PCM als TCM gebaseerde opslag geldt dat al enkele jaren onderzoek wordt gedaan en de eerste werkzame prototypen beschikbaar zijn. De voornaamste uitdagingen zitten in het vermogen (hoeveel warmte kan er geabsorbeerd dan wel onttrokken worden per tijdseenheid), de stabiliteit van de materialen (hoeveel cycli kunnen even effectief worden benut) en daarnaast het fundamentele onderzoek naar de juiste materialen welke een hoge energiedichtheid combineren met een bruikbaar temperatuurbereik.

## WARMTEPOMPEN

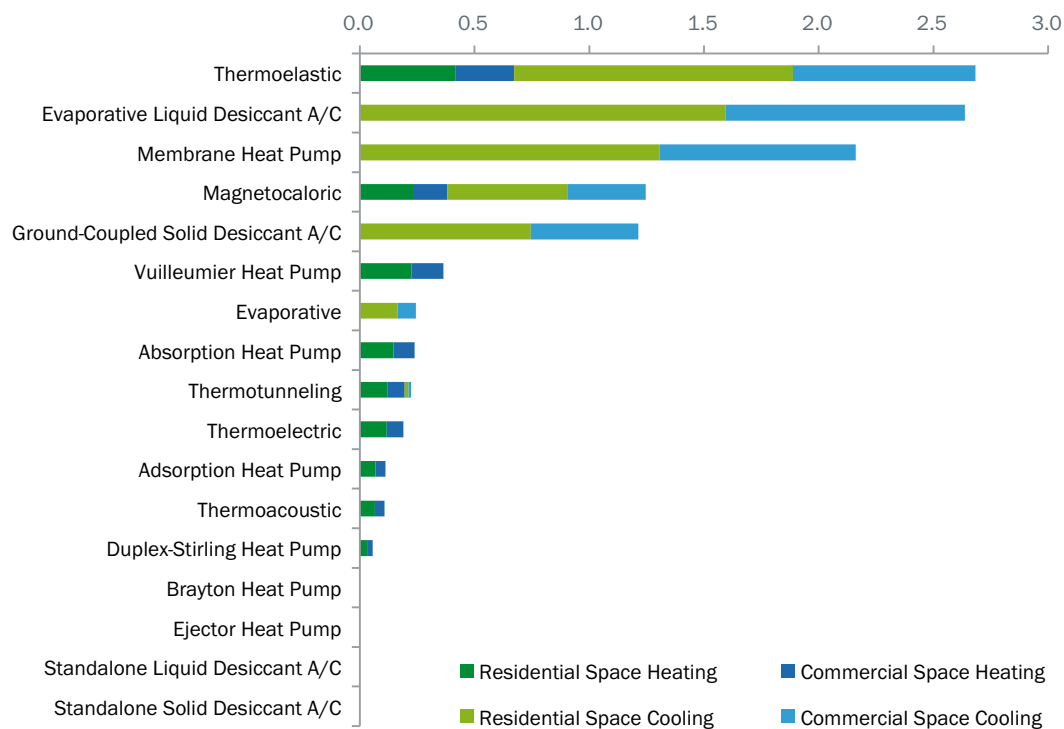
De warmtepomp is een techniek waarbij warmte (en/of koude) niet direct met gas door een vlam of elektriciteit door een weerstand gemaakt wordt maar door warmte en koude uit elkaar te trekken (pompen). Dit uit elkaar trekken kost energie maar minder dan de klassieke vormen. Deze energie kan op vele vormen toegepast worden zoals comprimeren, verdampen, verbuigen, trillen, chemisch, elektrisch, magnetisch.

Naast de traditionele warmtepomp die in een koelkast of airco zit zijn er diverse ontwikkelingen in de techniek. Een goed overzicht van mogelijkheden kan onder andere verkregen worden uit een publicatie van het USA DOE (Department of Energy).

<http://energy.gov/eere/buildings/downloads/non-vapor-compression-hvac-technologies-report>

Binnen Nederland zijn de afgelopen jaren de nodige ontwikkelingen geweest om warmtepompen op basis van klassieke technologie compacter en efficiënter te maken. Hier zijn flinke stappen gezet en verdere, incrementale reductie van zowel omvang, kosten en geluidproductie lijken hier nog zeker mogelijk. Om echt significante stappen zetten op te behalen rendement, compactheid en ook het gebruik van koelmiddel, lijkt het nodig om naar andere technologieën over te stappen. Naast warmtepompen op het magneto-calorische principe en op basis van het thermo-acoustische principe wordt hier echter binnen Nederland nog weinig aandacht aan besteed. Aangeraden wordt om hier in het kader van de voorliggende roadmap de komende jaren nader invulling aan te geven.





Vergelijk technisch energie besparingspotentieel (US; in Exa joule,  $10^{18}$  Joule).  
 USA gebruikt 100 ExaJoule, Nederland gebruikt ongeveer 3 ExaJoule.

### THERMO-ELASTISCH

Technologie op basis van vormgeheugenmetalen (Shape Memory Alloys, SMA). Thermo-elastische koelsystemen spannen en ontspannen een SMA-kern die warmte absorbeert uit of afgeeft aan de omgeving.

### MEMBRAAMWARMTEPOMP

Aangedreven door een vacuumpomp zorgen geavanceerde membraamwarmtepompen voor koeling en ontvochtiging en/of verwarming en bevochtiging door de overdracht van vocht via een aantal membranen.

### ADIABATISCHE AIRCONDITIONING

De adiabatische airconditioner bestaat uit een primair kanaal dat de inkomende lucht droogt en koelt met behulp van een vloeibare droogmiddelenstroom en een tweede kanaal dat door verdamping een waterlaag koelt met behulp van een deel van de gedroogde lucht waardoor de toevoerlucht verder gekoeld wordt. Het principe is hier dat de vochtigheid in de lucht te beïnvloeden door hygroscopische materialen. Het principe kan ook gebruikt worden om te verwarmen.

### MAGNETOCALORISCHE KOELING

Werkt met het magnetocalorische effect, een fenomeen waarbij paramagnetische materiaal reversibel temperatuurveranderingen vertoont bij blootstelling aan een wisselende magnetisch veld.

### THERMO-ACOUSTISCHE WARMTEPOMP

Werkt op het principe van thermo-akoestiek, een techniek waarbij laagfrequente geluidsgolven in gas gebruikt om warmte op te pompen naar de gewenste temperatuur.

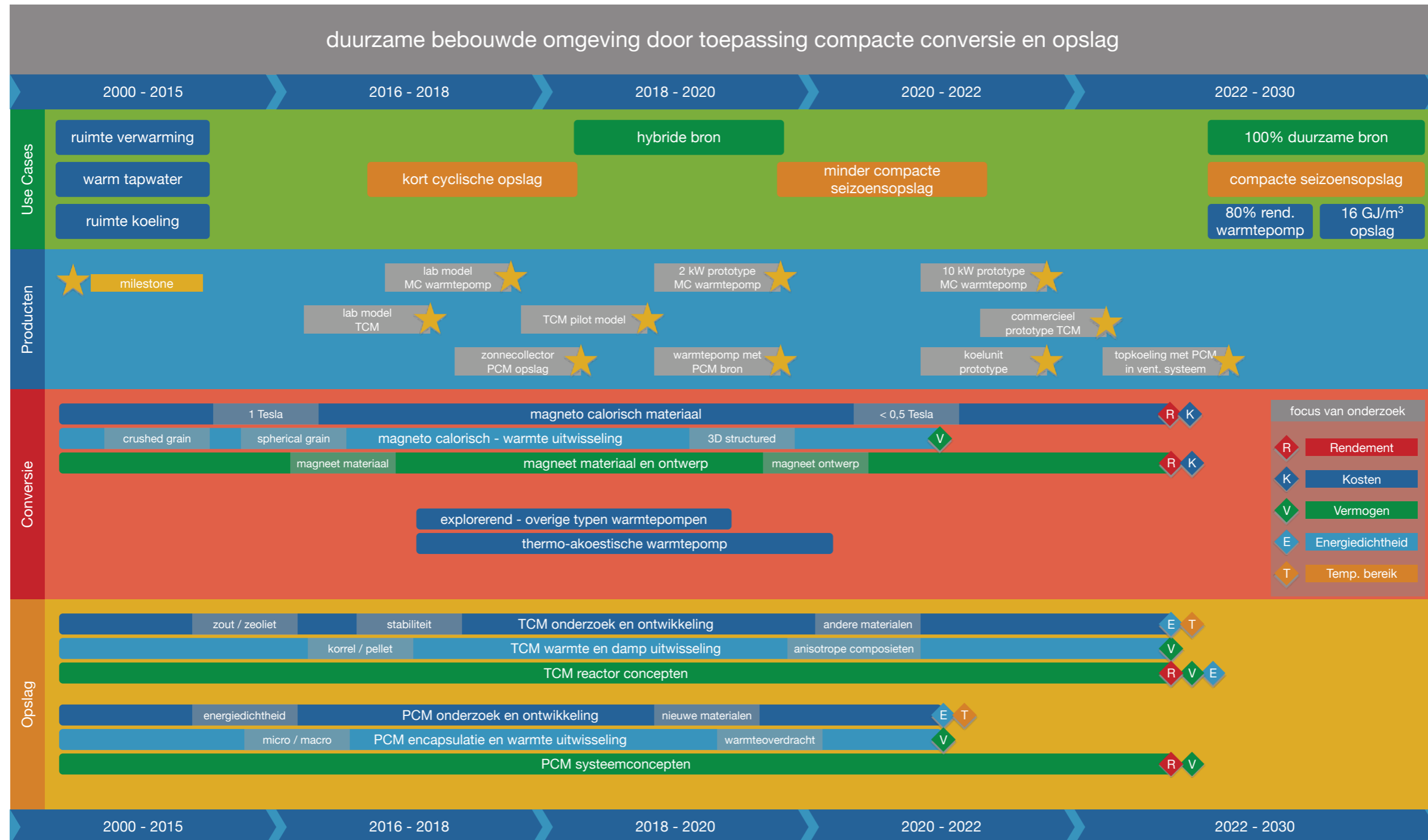
# ROADMAP COMPACTE CONVERSIE EN OPSLAG

Uitgaand van relevante use cases zijn op een systematische wijze KPI's, systeemeisen, vereiste technologie- en productontwikkelingen in kaart gebracht. Doelstelling hierbij is om, voor de gebouwde omgeving, in Nederland

een kennis en industriële basis neer te zetten waarmee een leidende positie ingenomen kan worden op het gebied van compacte conversie en opslag van warmte ("de Tweede Warmterevolutie"). Op basis van de roadmap kunnen

technologische opties naast elkaar gezet en gebenchmarkt worden en kunnen keuzes gemaakt worden met betrekking tot toekomstige onderzoeks- en implementatie programma's. Voorzien is deze roadmap gedurende de looptijd van

het Meerjaren plan CCO jaarlijks wordt geupdate. Voor nadere details worden belangstellenden verwezen naar de specifieke onderleggers zoals die voor de verschillende deelttechnologieën zijn opgesteld (zie [www.projectcco.org](http://www.projectcco.org)).





April 2016

**CONTACT**

Voor nadere informatie kunt u contact opnemen met:

Jos Blom, Alliander  
Projectleider WP Roadmap  
jos.blom@alliander.com

Huib Keizers, TNO  
Penvoerder Meerjarenplan CCO  
huib.keizers@tno.nl