

# **Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland**

TNO 2024 R11963 – 14 november 2024

# Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland

Auteurs	Jochem Jongerius, Ruud Cuypers
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal kopieën	TNO Public
Aantal pagina's	82 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Deze rapportage is opgesteld in opdracht van RVO.nl voor de Topsector Energie op verzoek van TKI Urban Energy
Projectnaam	Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland
Programmanummer	202306039
Projectnummer	060.58056



# Samenvatting

Nederland is al decennialang koploper in de aanleg van Warmte Koude Opslag (WKO; ook wel open bodemenergiesysteem, OBES genoemd). Ook met de ontwikkeling van hoge temperatuur warmteopslag in de ondergrond (Hoge temperatuur opslag (HTO)), in thermochemische materialen (TCM) en faseovergangsmaterialen (Phase Change Materials, PCM's) zit Nederland wereldwijd in de kopgroep. De rol van warmteopslag wordt steeds belangrijker in het energiesysteem, en de potentie van warmteopslag is groot. Er zijn echter nog uitdagingen op verschillende fronten, zowel technisch – o.a. met betrekking tot opslagtermijn, vermogens, rendement, volumes, functionaliteit en/of temperatuurniveau's – als organisatorisch – als op het gebied van kostenverdeling, ruimtegebruik, installatie c.q. aanleg, systeemintegratie, en/of circulariteits- en milieuprestaties.

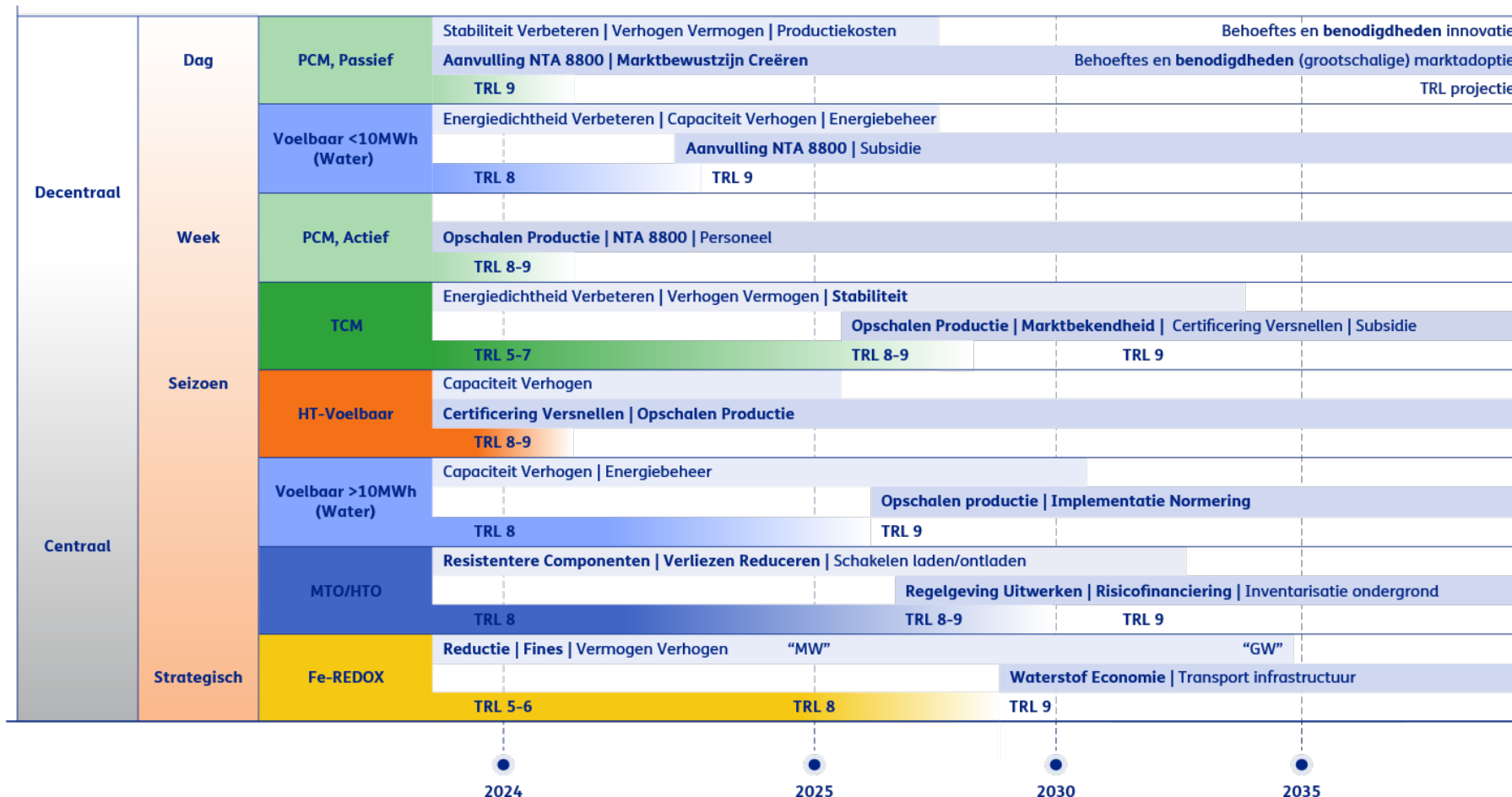
## Innovatie

De eerste roadmap warmteopslag van MJP CCO (2016) heeft gezorgd voor een gezamenlijk beeld van de warmteopslagtoepassingen PCM en TCM en de totstandkoming van nieuwe samenwerkingen, o.a. tussen ontwikkelpartners en gebruikers van deze technologie. Mede hierdoor vonden er belangrijke innovaties en kennisdeling plaats op dit gebied, om de bestaande uitdagingen het hoofd te bieden. Het onderliggende rapport in opdracht van RVO in samenwerking met TKI Urban Energy presenteert een hernieuwde Innovatieroadmap op basis van toepassingsvoorbeelden voor een nog bredere doorsnede van warmteopslagtechnologie in Nederland. Hierin komt de ontwikkelstatus van de verschillende opslagtechnologieën in Nederland naar voren en worden de uitdagingen duidelijk die in de voorzienbare toekomst moeten worden opgelost voor toekomstige grootschalige marktintroductie. Technologieën die behandeld worden zijn naast PCM en TCM ook verschillende vormen van voelbare warmteopslagtechnologie en redox-warmteopslag.

## Innovatieroadmap warmteopslag

De Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland is opgezet als een strategisch plan. Het beschrijft per warmteopslagtechnologie de benodigde technische innovaties en niet-technische randvoorwaarden om te kunnen komen tot grootschalige toepassing in de Nederlandse gebouwde omgeving.

Doel van deze Innovatieroadmap warmteopslag (doorsnede  $\sigma$  in Figuur 1) is bijdragen aan een breed gedragen gezamenlijke beeldvorming over de huidige stand der techniek voor de verschillende warmteopslagtechnologieën in ontwikkeling in Nederland. In totaal zijn er twee workshops gehouden waarbij bij elke workshop een vijftiental vertegenwoordigers van de Nederlandse ontwikkelaars van warmteopslagtechnologie aanwezig waren. 21 ontwikkelaars van warmteopslagtechnieken in Nederland hebben een geheel of gedeeltelijk ingevulde vragenlijst ingestuurd op basis waarvan deze Innovatieroadmap warmteopslag mede is opgesteld (zie Appendix voor de gehele lijst betrokken stakeholders als een brede vertegenwoordiging van de markt). De Innovatieroadmap warmteopslag geeft inzicht in de volgens de ontwikkelaars benodigde innovatieagenda. Daarnaast is het een uitnodiging voor geïnteresseerde partijen om deel te nemen aan de ingezette koers van doorontwikkeling en grootschalige implementatie van warmteopslagtechnologie, en hiermee bij te dragen aan de verdere verduurzaming van de gebouwde omgeving.



Figuur 1. Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland 2024, (doorsnede a). Van boven naar beneden wordt een indicatie gegeven van de use case (decentraal/centraal) met bijbehorende opslagduur (van dag tot seizoen of als strategische voorraad), en worden naast de verwachte TRL in de tijd de belangrijkste technische ontwikkelpunten en niet-technische uitdagingen benoemd voor de volgende technologieën: PCM passief (in bouwmaterialen); voelbare warmteopslag <10 MWh (in water, decentraal); PCM actief (in boilersystemen); TCM (zowel voor decentrale als centrale warmteopslag); HT-voelbaar (in materialen anders dan water); voelbaar >10 MWh (centraal, OBES); MTO/HTO; Fe-REDOX.

Het doel is met de Innovatieroadmap warmteopslag nieuwe samenwerkingen en kennisdeling te bevorderen, en input te leveren aan de Routekaart Energieopslag van EZK. De Innovatieroadmap warmteopslag beschrijft op basis van input van stakeholders uit de markt een gewenste eindsituatie per technologie op een heldere en haalbare manier. Hiervoor wordt een systematische aanpak voorgesteld, incl. tijdsindicatie voor doorontwikkeling tot markt-introductie.

### Conclusies

Nederland heeft een breed scala aan warmteopslagstechnieken in ontwikkeling die alle in meer of mindere mate bijdragen de klimaatdoelen van 2050 te halen, elk op hun eigen toepassingsgebied. Politieke keuzes uit het recente verleden stuwden de Nederlandse markt voor warmteopslag langzaam op, maar er zijn voor een verdere professionalisering van de markt en grootschalige toepassing van warmteopslagstechnologie nog stappen te maken. Warmteopslag neemt toe in zichtbaarheid en wordt erkend als potentiële technologie om duurzaamheid van de gebouwde omgeving te bevorderen, zowel op centraal als decentraal niveau (zie ook de Routekaart energieopslag<sup>7</sup>). Er zijn momenteel veel ontwikkelaars van warmteopslagstechnologie actief en verschillende technieken staan op het punt om de markt te betreden. Naast demonstraties in relevante toepassingen hebben recent enkele nieuwe technologieën voor warmteopslag de markt betreden (technologie op TRL8-9).

Voor de in ontwikkeling zijnde warmteopslagstechnologieën zijn in de Innovatieroadmap warmteopslag de ontwikkeluitdagingen expliciet gemaakt. Daarnaast wordt de toepassing van warmteopslag in use-cases beschreven waarmee o.a. de wederzijdse afhankelijkheid van het elektriciteitsnet en warmteopslag verduidelijkt wordt.

Op dit moment staat grootschalige marktimplementatie van warmteopslag nog in de kinderschoenen. Zowel over grootschalige (centrale) warmteopslag als voor kleinschalige (decentrale) warmteopslag bestaat bij het grote publiek nog weinig kennis en kunde. Warmteopslagstechnologie wordt bovendien nog niet standaard meegenomen in beoogde verduurzamingsactiviteiten op de betreffende schaalgrootte. Het verbeteren van de informatievoorziening rond het onderwerp is een eerste stap om deze situatie te verbeteren. Dit kan bijvoorbeeld door het verspreiden van de resultaten van demo- en pilotsystemen in onderzoekssituaties en *best practice* situaties onder particulieren en bedrijven, en door het opzetten van een kennisbank. Een gezamenlijke aanpak door stakeholders, bijvoorbeeld op basis van deze Innovatieroadmap, en bijbehorende community-vorming door middel van het voortdurend delen van resultaten, zal de kennispositie verder versterken.

Additionele investeringen en ondersteuning voor doorontwikkeling is nodig voor de laatste fasen in de technologieontwikkeling (ruwweg TRL 5-8). Dit kan in de vorm van gerichte subsidies voor innovatieve technologieën via onder andere langjarige programmatische aanpak, en voor versterking door internationale samenwerking. Echter is er vooral ook na het moment waarop een technologie marktrijp is en zich in de vroege opschalingsfase bevindt (vanaf TRL 9) gericht beleid benodigd. Aandacht voor regelgeving, het opstellen van standaarden, voor waardering, en normering van de ontwikkelde technologieën zal onzekerheid bij gebruikers en investeerders verminderen. Daarnaast zijn opschaling van productie en het uitbreiden van het distributienetwerk door de producenten en leveranciers noodzakelijk voor grootschalige marktintroductie en gebruik. Deze opschaling kan mede worden bevorderd door gericht beleid op het gebied van marktinrichting, prijsstructuren, en eisen aan nieuwbouw en renovatie.

### Aanbevelingen

Op korte, middellange en lange termijn is de markt geholpen met het volgende:

- **Subsidies en financiering:** er moet een gelijk speelveld komen voor warmteopslagstechnologie in centrale en decentrale use-cases ten opzichte van andere opslagstechnologie (zoals elektrische opslag) en ten opzichte van technologie voor

energievoorziening. Voorts dient er bekendheid te zijn over mogelijke verdienmodellen van warmteopslag bij potentiële financiers. De waarde van warmteopslag moet worden herzien waarbij een mogelijke integrale verlaging van de maatschappelijke kosten voor het energiesysteem door warmteopslag als flexibiliteitsmiddel wordt verrekend.

- **Integratie en sectorkoppeling:** er moet meer aandacht komen voor inpassing van warmteopslagtechnologie in het energiesysteem. Dit kan bijvoorbeeld door modelstudies, welke de kennis omtrent warmteopslag binnen de relevante sectoren zal vergroten. Het moet duidelijk worden op welke manier warmteopslag kan worden toegepast voor het oplossen van problemen in de elektriciteitsvoorziening (use-cases) en hoe de daaropvolgende maatschappelijke voordelen kunnen bijdragen aan de business-case. Het updaten van regelgeving is hiervoor noodzakelijk, omdat momenteel veel regelgeving is gericht op gas en elektriciteit met een lineaire vraag en aanbodrelatie in plaats van flexibiliteit.
- **Internationale kennisuitwisseling:** in het internationale speelveld kan Nederlandse warmteopslagtechnologie door kennisuitwisseling een grotere rol spelen in buitenlandse use-cases, waarmee een exportperspectief ontstaat. Daarnaast zal buitenlandse know-how meer moeten worden toegepast op de Nederlandse markt (zie ook het rapport over internationale stand der techniek<sup>6</sup>).

# Inhoudsopgave

Samenvatting .....	3
Inhoudsopgave .....	7
Lijst van afkortingen .....	9
1 Inleiding .....	10
2 Aanpak en opzet .....	12
3 Status van warmteopslagtechnieken .....	13
3.1 Introductie .....	13
3.2 Technieken .....	14
3.2.1 Ondergrondse opslag in aquifers (WKO, MTO en HTO) .....	14
3.2.2 Voelbare warmteopslag in water .....	18
3.2.3 Hoge Temperatuur Voelbare Warmteopslag .....	22
3.2.4 Phase-change materials (PCM's) .....	25
3.2.5 Thermochemische materialen (TCM) .....	28
3.2.6 Redox warmteopslag .....	30
3.3 Overzicht van huidige en verwachte warmteopslagontwikkelingen .....	33
3.3.1 Ondergrondse en bovengrondse centrale en decentrale voelbare warmteopslag in water .....	38
3.3.2 Hoge temperatuur voelbare warmteopslag .....	42
3.3.3 PCM warmteopslag .....	44
3.3.4 TCM warmteopslag .....	46
3.3.5 Redox warmteopslag .....	47
4 Toepassingsvoorbeelden (use-cases) .....	50
4.1 Introductie .....	50
4.2 Use-cases MJP CCO roadmap 2016 .....	51
4.3 Use-cases Innovatieroadmap warmteopslag 2024 .....	52
4.4 Case Study: Hoger aandeel duurzame energie .....	55
4.5 Case Study: Voorkomen van netcongestie .....	55
4.6 Conclusie use-cases warmteopslag .....	58
5 Innovatieroadmap warmteopslag .....	59
5.1 Introductie .....	59
5.2 Innovatieroadmap warmteopslag 2024 .....	59
5.2.1 Technologie in Ontwikkeling .....	61
5.2.2 Marktrijpe technologie .....	64
6 (Financierings)uitdagingen en ondersteuningsbehoefte .....	67
7 Aanbevelingen .....	70
8 Verantwoording .....	73
Ondertekening .....	74



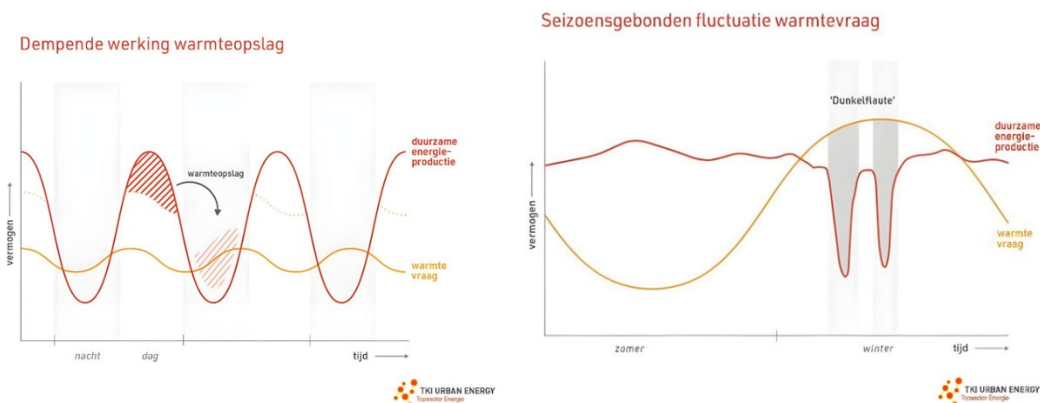
- Bijlage A: Stakeholders
- Bijlage B: Vragenlijst
- Bijlage C: Overzicht aanbevelingen
- Bijlage D: Overzicht van warmteopslagtechnieken uit de Routekaart energieopslag 2024

# Lijst van afkortingen

Afktoring	Betekenis	Afktoring	Betekenis
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage (LT-ATES=WKO)	OBES	Open Bodemenergiesysteem (= ATES)
BENG	Bijna Energieneutrale Gebouwen	OPEX	Operational Expenditures
BTES	Borehole Thermal Energy Storage	P2H(+S)	Power to Heat (+ Storage; met opslag)
CAPEX	Capital Expenditures	PCM	Phase Change Material
CCO	Compacte Conversie en Opslag	PTES	Pit Thermal Energy Storage
COP	Coefficient of Performance	PV	Photo-voltaïsche cellen (zonnecellen)
EIA	Energie-investeringsaftrek	PVT	Photo-voltaïsche cellen gecombineerd met thermische panelen
EMS	Energy Management System	Redox	Reductie-Oxidatie
ESNL	Energy Storage NL, Brancheorganisatie	ROI	Return on Investment
Fe-Redox	Oxidatie en Reductie Cyclus met IJzer Poeder	RVO	Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland
GBES	Gesloten Bodemenergiesysteem	SCOP	Seasonal Coefficient of Performance
GO	Gebouwde Omgeving	TCM	Thermo-Chemische Materialen
GW(h)	GigaWatt(uren)	TCO	Thermo-Chemische Opslag
HT(O)	Hoge Temperatuur (OBES), vaak wordt hiermee HT-ATES bedoeld	TKI	Topconsortium voor Kennis & Innovatie
ISDE	Investeringssubsidie duurzame energie en energiebesparing	TNO	De Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO
kWh	KiloWattuur	TRL	Technology Readiness Level
LT(O)	Lage Temperatuur (OBES)	TTES	Tank Thermal Energy Storage
MJP	Meerjarenprogramma	UE	Urban Energy
MT(O)	Midden Temperatuur (OBES), vaak wordt hiermee MT-ATES bedoeld	UTES	Underground Thermal Energy Storage
MW(h)	MegaWatt(uren)	UTTES	Underground TTES
NPE	Nationaal Plan Energiesysteem	WKO	Warmte Koude Opslag (=ATES / LT-ATES)

# 1 Inleiding

In 2050 zal de gebouwde omgeving netto energieneutraal moeten zijn. Daarom is het belangrijk dat we bestaande en nieuwe gebouwen zodanig (ver)bouwen dat ze (bijna) energieneutraal dan wel energiepositief worden. Door de transitie van gas naar alternatieve energiebronnen zal het in het toekomstige energiesysteem vaker nodig zijn om vraag en aanbod af te stemmen in een soepel samenspel op verschillende tijdsschalen. Met 41% is warmte de grootste fractie finaal energieverbruik in Nederland<sup>1</sup>, en door in te spelen op dit fluctuerende aanbod van energie kan warmteopslag een grote bijdrage aan de energietransitie leveren (Figuur 2). In een recente studie<sup>2</sup> wordt door CE Delft onder andere geconstateerd dat, onder de juiste voorwaarden, power-to-heat in combinatie met warmteopslag een belangrijke rol in de flexibilisering van het energiesysteem kan spelen.



Figuur 2. Een conceptuele weergave van de dempende werking van warmteopslag op de koppeling tussen vraag en aanbod van duurzame energie productie (*links*); Weergave van de seizoensgebonden fluctuatie van warmtevraag en duurzame energie productie, met een illustratie van een 'Dunkelflaute' waarbij productie meerdere dagen tegenvalt (*rechts*).<sup>3</sup> NB: in werkelijkheid is de warmtevraag veel groter dan het elektriciteitsaanbod: een factor 4-5 in de pieken, oplopend tot een ruwweg een factor 9 bij een koude winter. Zie ook de Routekaart Energieopslag.<sup>7</sup>

Efficiënter omgaan met warmte door middel van bijvoorbeeld isolatie zal de warmtevraag doen afnemen, maar de totale warmtevraag valt voor 2030 niet te verduurzamen of aardgasvrij te maken. Hernieuwbare bronnen produceren een significant aandeel van de Nederlandse elektriciteit, en dit zal blijven toenemen in de nabije toekomst. De combinatie van hernieuwbare bronnen van elektriciteit en maatschappelijke elektrificatie vraagt om een significante uitbreiding van het elektriciteitsnetwerk, maar de huidige capaciteitsproblemen zijn nu al een remmende factor op de energietransitie. Om te blijven voldoen aan de warmtevraag in de gebouwde omgeving zal in toenemende mate gebruik worden gemaakt van alternatieve en duurzame warmtebronnen zoals restwarmte, geothermie, en zonnewarmtesystemen op gebouwen of in combinatie met een collectief warmte/koudesysteem om verdere belasting van het elektriciteitsnetwerk te voorkomen. De lijst van nieuwe technieken waaraan gewerkt wordt is lang en divers zowel qua schaal (individueel, collectief, bovengronds, ondergronds), werkingsprincipe (voelbare

<sup>1</sup> Energie in Cijfers, Energie Beheer Nederland, *inforgraphic*, 2024

<sup>2</sup> Power-to-Heat en warmteopslag in warmtenetten – Businesscase, potentieel en rol in energiesysteem, CE Delft, februari 2024

<sup>3</sup> Bron: <https://topsectorenergie.nl/nl/kennisbank/grootschalige-en-compacte-warmteopslag/>

warmteopslag, PCM's TCM's, redox-warmteopslag) als wat betreft toepassingsvorm binnen de gebouwde omgeving (zoals seizoensopslag, dag/nacht-buffer, flexibiliteitslevering, infrastructuurkoppeling). In de branche wordt de behoefte aan een nieuwe, herijkte en breder opgezette innovatieroadmap voor warmteopslag in de gebouwde omgeving gevoeld, als opvolger van de in 2016 opgezette Roadmap Compacte Conversie en Opslag (CCO)<sup>4</sup>. TKI Urban Energy geeft daar in samenwerking met RVO middels deze Innovatieroadmap met de branche invulling aan. Sinds 2016 is het belang van energieopslag in het energiesysteem bovendien verder gegroeid. Deze nieuwe Innovatieroadmap warmteopslag is met input van een brede vertegenwoordiging van marktpartijen ontwikkeld en draagt daarmee bij aan een breed gedragen en gezamenlijke beeldvorming over de stand der techniek en innovatieagenda van warmteopslagtechnologie in de gebouwde omgeving. Daarnaast levert de Innovatieroadmap inhoudelijke input aan de Routekaart Energieopslag.

Voor nu wordt volstaan met de volgende definitie van deze Innovatieroadmap warmteopslag:

De Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland is opgezet als een strategisch plan. Het beschrijft per warmteopslagtechnologie de benodigde technische innovaties en niet-technische randvoorwaarden om te kunnen komen tot grootschalige toepassing in de Nederlandse gebouwde omgeving.

<sup>4</sup>Roadmap Compacte Conversie en Opslag, TKI Urban Energy, Topsector Energie, publicatie datum April 2016; contactpersonen Jos Blom (Alliander, projectleider WP Roadmap) en Huub Keizers (TNO, penvoerder MJP CCO)

## 2 Aanpak en opzet

In samenspraak met RVO en TKI Urban Energy is gedurende het vooronderzoek een klankbordgroep gevormd (zie Bijlage A). De huidige markt van warmteopslagtechnieken is met deze groep experts breed vertegenwoordigd, waarbij kennisinstellingen, onderwijsinstellingen, bedrijven en brancheverenigingen zijn aangehaakt. Het doel van deze klankbordgroep is om alle soorten warmteopslag zoveel mogelijk vertegenwoordigd te hebben qua schaalgrootte (individueel, collectief, bovengronds, ondergronds) en werkingsprincipe (voelbare warmteopslag met water, alternatieve materialen, bovengronds en ondergronds, PCM's, TCM's en warmteopslag op basis van redox-principes). Bij het opstellen van deze Innovatieroadmap ligt de nadruk op coproductie, dus de workshop met de klankbordgroep voor het ophalen van input over de verschillende opslagtechnologieën is in een vroeg stadium georganiseerd. Na het houden van een introductiebijeenkomst (12 december 2023 bij TKI UE in Utrecht) is een gezamenlijke vragenlijst opgesteld om input op te halen van de verschillende stakeholders over hun specifieke warmteopslagtechnologie. Naar aanleiding van deze antwoorden is een tweede klankbordgroep bijeenkomst gehouden (18 maart 2024) en is de laatste input opgehaald, waaruit de (beleids-)aanbevelingen volgden. De use cases die in de rapporten van het Nationale Programma Energiesysteem geïdentificeerd worden (zoals in het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) 2050 rapport)<sup>5</sup> hebben hier als inspiratie gediend, zoals zoveel mogelijk gebruik maken van lokale energie (ook warmte), maximale inzet op aanbod duurzame energie, levering van flexibilitieitsopties, leveringszekerheid, centraal en decentraal, en met inachtneming van issues voor systeemintegratie.

Naast de hernieuwde Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland behoorde een presentatie van de belangrijkste resultaten tijdens een publiek toegankelijke webinar (op 2 april 2024<sup>6</sup>) in afstemming met RVO en TKI Urban Energy expliciet tot de resultaten.

Te verwachten kosten van de verschillende warmteopslagtechnologieën zijn vanwege het feit dat alleen nog in ontwikkeling zijnde technologieën in ogenschouw zijn genomen niet meegenomen. Een modelstudie incl. bijbehorende berekeningen aan bv. kosten zijn expliciet geen onderdeel van de eindresultaten.

Met inachtneming van de hierboven genoemde factoren geeft de Innovatieroadmap weer waar in Nederland in de komende jaren de innovatieprioriteiten moeten liggen. Daarnaast geeft de Innovatieroadmap inzichten in de (financierings)uitdagingen van de ontwikkelpaden van deze technieken en de ondersteuningsbehoeftes en (publieke) investeringen die nodig zijn in de tijd om deze te adresseren. Deze inzichten kunnen gezien worden als (beleids)aanbevelingen en -adviezen en zijn zoveel mogelijk aanvullend op de aanbevelingen die in de Routekaart Energieopslag worden geadresseerd.

In voorliggend rapport wordt achtereenvolgens antwoord gegeven op de genoemde onderzoeksvragen voor de 4 sub-onderwerpen, in respectievelijk de hoofdstukken 3. Status van Nederlandse warmteopslagtechnieken; 4. Toepassingsvoorbeelden (use-cases); 5. Innovatieroadmap warmteopslag; en 6. (Financierings)uitdagingen en ondersteuningsbehoeftes. Hierna worden op basis van de inzichten (beleids)aanbevelingen gedaan in hoofdstuk 7.

<sup>5</sup> Nationaal Plan Energiesysteem, [Nationaal plan energiesysteem \(NPE\) \(rvo.nl\)](https://topsectorenergie.nl/nl/kennisbank/innovatieroadmap-warmteopslag-en-internationale-stand-van-zaken/), geraadpleegd maart 2024.

<sup>6</sup> <https://topsectorenergie.nl/nl/kennisbank/innovatieroadmap-warmteopslag-en-internationale-stand-van-zaken/>

# 3 Status van warmte-opslagtechnieken

## 3.1 Introductie

In Nederland zijn verschillende partijen volop bezig met het doorontwikkelen, demonstreren en implementeren van warmteopslagtechnieken, zowel centraal als decentraal, en zowel kleinschalig als grootschalig. Centrale warmteopslag is gedefinieerd als opslag die bij een collectief net hoort (dus bijvoorbeeld inclusief de collectieve blokverwarmingsnetten in een appartementencomplex). Dit wordt in het MMIP4-programma ook wel grootschalige warmteopslag genoemd. Decentrale (compacte) warmteopslag is opslag die in of bij een gebouw hoort. In het MMIP4-programma wordt dit kleinschalige warmteopslag genoemd. Zo is Nederland al decennialang koploper in de aanleg van WKO, een vorm van grootschalige warmteopslag (Tabel 1)<sup>7</sup>.

Tabel 1. Huidige marktpenetratie van warmteopslagtechnologie in Nederland volgens de Routekaart energieopslag<sup>7</sup>. NB: PTES (HoCoSto) en PCMs (Orange Climate) worden inmiddels wel structureel in Nederland geïnstalleerd. Daarnaast is gesmolten zout niet specifiek voor de gebouwde omgeving (maar voor hoge temperatuur warmtetransportvloeistof bij bijvoorbeeld concentrated solar power), en lijken de aantallen open en gesloten bodem energiesystemen sterk te zijn onderschat.

Warmteopslagtechnologie	Marktpenetratie in Nederland
Kleine warmwater tank woning (boilervat)	100.000 – 1 miljoen
Lage temperatuur bodemenergie (ATES WKO, open, gesloten)	3000+ open, 80.000 gesloten
Midden- en hoge temperatuur ondergrondse opslag (MTO, HTO)	Enkele
Hoge temperatuur gesloten bodemenergie (BTES)	Enkele
Warmteopslag in mijnen	Enkele
Kuil thermische opslag (PTES)	Niet in NL
Grote warmwater tank (lange-termijn, lager vermogen) (TTES)	Experimenteel
Thermochemische materialen (TCM)	Experimenteel
Redox warmteopslag	Experimenteel
Faseovergang (PCM)	Tientallen ijsbuffers, nichemarkten, gesmolten zout nog niet in NL
Vaste stof (Beton, steen)	Experimenteel

Maar ook met de ontwikkeling van HTO / HT OBES, in TCM's en PCM's zit Nederland wereldwijd in de kopgroep. Voor een uitgebreidere beschrijving hiervan wordt gerefereerd naar het rapport van Renewable Heat B.V., dat parallel aan de huidige rapportage tot stand is gekomen.<sup>6</sup>

Gebruikte definities	
WKO	Warmte Koude Opslag, een vorm van een Open Bodemenergiesysteem (OBES), op temperaturen van ruwweg 5 – 25°C. ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) wordt vaak als synoniem gebruikt, waarbij technisch gesproken alleen Lage-temperatuur ATES als synoniem geldt.
MT-ATES	Midden-temperatuur ATES, op temperaturen van ruwweg 30 – 50°C.
HT-ATES	Hoge-temperatuur ATES, op temperaturen van ruwweg 50 – 90°C

<sup>7</sup>Routekaart Energieopslag, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, publicatiedatum voorjaar 2023.

Warmteopslagtechnieken welke in Nederland worden ontwikkeld zijn UTES (waaronder verschillende vormen van ATES, LT-ATES ook wel bekend als WKO / OBES en ondergrondse TTES (UTTES)), PTES, TTES, Hoge Temperatuur Voelbare Warmteopslag (HTO), warmteopslag op basis van latente warmte (PCM) en van Thermochemische Materialen (TCM). Warmtegeneratie door middel van oxidatie van ijzerpoeder (IJzer Redox, Fe-redox) is technisch gezien geen warmteopslagtechniek, maar is wel inbegrepen in het overzicht omdat de combinatie met een warmtenet wordt gedemonstreerd en omdat de toepassing in de gebouwde omgeving wordt onderzocht.

In totaal zijn er twee workshops gehouden waarbij bij elke workshop een vijftiental vertegenwoordigers uit de Nederlandse ontwikkelaars van warmteopslagtechnologie aanwezig waren. In totaal zijn er 22 ontwikkelaars van warmteopslagtechnieken in Nederland met een vragenlijst benaderd, waarvoor er 21 een geheel of gedeeltelijk ingevulde vragenlijst hebben ingestuurd. In dit hoofdstuk zijn de antwoorden van de enquêtes verwerkt om een zo volledig mogelijk maar algemeen beeld te geven van de huidige status van de warmteopslagtechnieken in Nederland. Naar aanleiding van de antwoorden van de stakeholders wordt in de volgende paragraaf een algemene beschrijving gegeven van de verschillende technieken, met daarbij een indruk van het mogelijk toepassingsgebied. Daarna wordt er in een overzicht dieper ingegaan per ontwikkelaar van een warmteopslagtechnologie. Een overzicht van alle benaderde partijen is opgenomen in de appendix (Bijlage A).

## 3.2 Technieken

In deze paragraaf worden de verschillende warmteopslagtechnieken die in Nederland worden ontwikkeld behandeld op basis van deskstudie en de antwoorden verkregen op de uitgestuurde vragenlijst. De status van ontwikkelingen en het werkingsprincipe van de technologie wordt gegeven, en de verschillende ontwikkelaars worden benoemd voordat er een korte uitleg van de verschillende bestaande en gewenste technologische ontwikkelingen van de technologie wordt gegeven.

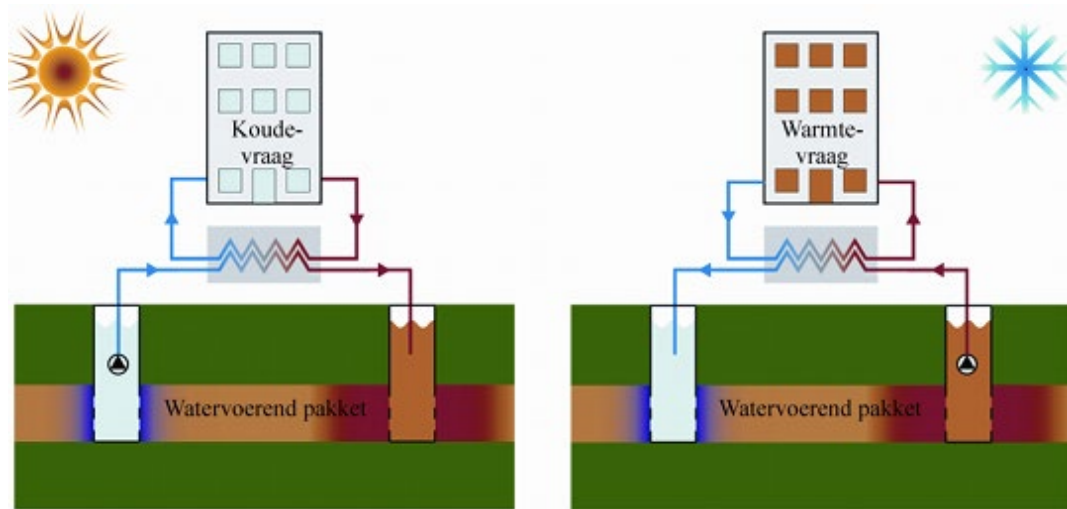
### 3.2.1 Ondergrondse opslag in aquifers (WKO, MTO en HTO)

#### 3.2.1.1 Introductie

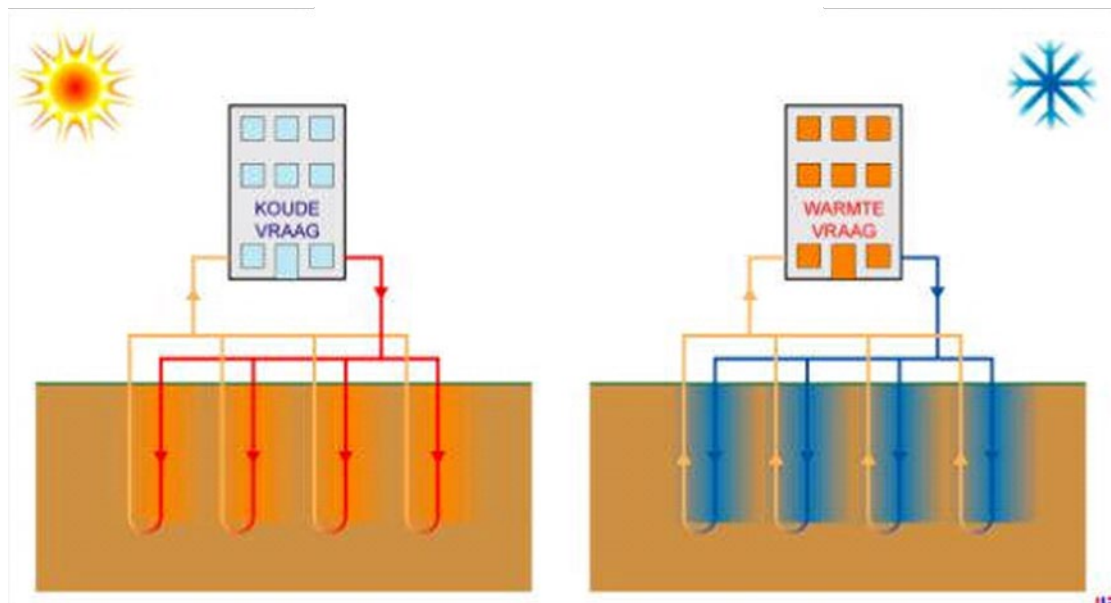
Warmte en of koudeopslag in de ondiepe ondergrond gebruikt grondwater als warmteopslagmedium. Er zijn twee soorten bodemenergiesystemen: Open energiesystemen (OBES) en Gesloten energiesystemen (GBES). Een OBES (zie Figuur 3) maakt gebruik van warmte of koude die van nature in de bodem en het grondwater aanwezig is. Grondwater van een bepaalde temperatuur wordt onttrokken, de warmte wordt uitgewisseld voor gebruik in de gebouwde omgeving, en het grondwater wordt elders met een veranderde temperatuur opnieuw geïnjecteerd. Systemen kunnen bestaan uit een monobron, een doublet of meervoudige doubletten. Een open bodemenergiesysteem of Warmte- koudeopslag (WKO) bodemenergiesysteem kan op verschillende manieren worden aangelegd. Bij een monobron zijn de koude en warme bron boven elkaar gelegen, waardoor slechts één boorgat nodig is. Bij een doublet of meervoudige doubletten zijn de bronnen horizontaal uit elkaar gelegen.

WKO, een vorm van aquifer thermal energy storage (aquifer thermische energieopslag, ATEs, onderdeel van UTES) is de meest toegepaste vorm van warmteopslag in Nederland (TRL 9) met een ver ontwikkeld ecosysteem en branchevertegenwoordiging.

Bij gesloten bodemenergiesystemen (zie Figuur 4) wordt geen grondwater verplaatst, maar wordt slechts gebruik gemaakt van de warmte uit de bodem. In deze systemen wordt een vloeistof, vaak met toegevoegde antivriesmiddelen, in buizen door de bodem geleid. De vloeistof komt dan ook niet in direct contact met het grondwater. De warmte- en koude-uitwisseling met het grondwater vindt plaats via het contact met de wand van het gesloten buizenstelsel in de ondergrond. Een veel gebruikte naam voor deze systemen is daarom 'bodemwarmtewisselaar'.



Figuur 3. Open bodemenergiesystemen (OBES, WKO).<sup>6</sup>



Figuur 4. Gesloten bodemenergiesysteem (GBES, of bodemwarmtewisselaar).<sup>7</sup>

Er zijn momenteel meer dan 3000 open WKO systemen (OBES) en meer dan 80.000 gesloten systemen (GBES) actief in Nederland.

<sup>6</sup>Bron van de figuur: Kenniscentrum InfoMil, Rijkswaterstaat.



WKO wordt al 35 jaar toegepast voor warmte en koude opslag in de temperatuurrange van ruwweg 5-25 °C, en is een ver ontwikkelde technologie. Vanwege het lage temperatuurniveau kan WKO niet gebruikt worden voor directe verwarming in de gebouwde omgeving of koppeling aan een warmtenet in verband met te laag vermogen, met uitzondering van mogelijke toepassing in een zeer-lage temperatuur warmtenet. Er wordt in plaats daarvan een warmtepomp gebruikt om de benodigde temperatuurlift te creëren, wat het vermogen en daarmee de elektriciteitsbehoefte verhoogt, hoewel deze warmtepompen over het algemeen wel efficiënter zijn dan lucht/water-warmtepompen.<sup>9</sup> Er worden daarnaast tegenwoordig wel bronnetten aangelegd waarbij warmte/koude direct uit de bronnen kan worden gedistribueerd naar individuele gebruikers.

Midden-temperatuur OBES (MTO) en hoge temperatuur OBES (HTO) zijn specifieke vormen van ATES. MTO en HTO zijn anders dan WKO in de zin dat het alleen om warmteopslag gaat en niet om koude. Daarnaast maakt HTO vaak gebruik van een significant diepere bron. WKO wordt ook wel LT-ATES genoemd; MTO en HTO ook wel MT- en HT-ATES. Hierbij wordt dus geen onderscheid gemaakt tussen het feit dat alleen bij lage temperatuur ook gebruik wordt gemaakt van koude.

MTO en HTO worden ontwikkeld om warmte op te slaan op hogere temperatuurniveaus dan standaard WKO en zijn momenteel ruwweg op TRL 7 en 6 respectievelijk. De hogere temperatuur verhoogt de energiedichtheid van de opslag, en hiermee de capaciteit en het vermogen significant van respectievelijk enkele GWh en MW, tot tientallen GWh en tientallen MW per installatie, waarbij de grootte van een installatie afhangt van de grootte van het gebouw/warmte net, en waarbij door het toevoegen van bronnen de capaciteit van installaties kan worden vergroot. De hogere temperaturen maken de techniek ook geschikt voor directe koppeling met een warmtenet als centrale warmteopslag, idealiter zonder benodigde warmtepomp. Vaak is er echter alsnog een warmtepomp nodig omdat de productietemperatuur gedurende de productiefase afneemt door warmteverliezen in de bodem.

Het temperatuurverschil tussen de bronnen schaal met de thermische capaciteit van de verschillende systemen. Dit temperatuurverschil is ruwweg 4-8 °C voor OBES, 15-30 °C voor WKO, en 25-60 °C voor MTO en 60-90 °C voor HTO (als ook gedefinieerd in de Routekaart energieopslag<sup>7</sup>).

Een veel voorkomend gesloten systeem is Borehole Thermal Energy Storage (BTES), een andere specifieke vorm van WKO, welke voornamelijk wordt toegepast op individuele woningen. Een huidige ontwikkelijn is de toepassing van BTES voor hogere temperaturen, maar dit wordt momenteel niet in Nederland onderzocht.

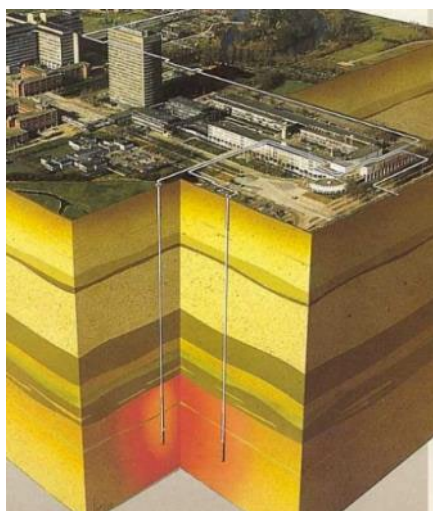
### 3.2.1.2 Principes

WKO / ATES is een open bodemenergiesysteem en maakt gebruik van watervoerende lagen in de bodem als opslagreservoirs voor voelbare thermische energie. De watervoerende lagen worden aangeboord op twee punten op enkele tientallen tot honderden meters diep (typisch 50 – 250m voor WKO en MTO). Het water wordt opgepompt uit een van de boorpunten om vervolgens te worden opgewarmd of gekoeld, waardoor de thermische energie kan worden gebruikt voor de beoogde use-case, waarna het weer geïnjecteerd wordt in het tweede boorpunt (zie voor een schematische weergave van het principe Figuur 3). Het is een systeem dat gebruikmaakt van bovengrondse warmtewisselaars waardoor netto geen grondwater verlies optreedt. Deze techniek wordt typisch gecombineerd met een warmtepomp, waarmee de vereiste gebruikstemperaturen kunnen worden verkregen. De voornaamste toepassingen zijn woning/wijkverwarming, kasverwarming, en restwarmte herwinning.

<sup>9</sup>CE Delft, Mkba bodemenergie, Publicatienummer: 23.220318.129, september 2023.

LT-ATES / WKO heeft een temperatuurbereik van 5 tot 25 °C. WKO is al een ver ontwikkelde technologie in Nederland met een geschiedenis van toepassing van al 35 jaar en komt voor in de open variant en de gesloten variant. WKO vindt zijn toepassing voornamelijk in de agrarische sector en gebouwde omgeving, waar de techniek typisch gebruikt wordt voor het verwarmen van woningen en grotere gebouwencomplexen. Naast verwarming kan WKO ook gebruikt worden voor opslag van koude, voor gebruik als koeling. WKO systemen hebben een capaciteit van ruwweg 30 MWh tot 15 GWh, en vermogens van 100 kW tot 30 MW voor grotere systemen. WKO kan gebruikt worden voor meerdere cycli per dag tot seizoensopslag, met een SCOP van 30 tot 60 bij een efficiëntie van typisch boven de 80% voor koeling, en een SCOP van ~10 voor gecombineerd warmte/koude levering. Vanwege de lage temperatuur heeft een WKO systeem een warmtepomp nodig om de warmte geschikt te maken voor een warm water systeem voor de beoogde use-case, met significante elektriciteitsvraag tot gevolg. WKO is een doorontwikkelde technologie en zal daarom niet worden meegenomen als innovatieve technologie in de Innovatieroadmap. Voor opschaling van de techniek is echter wel degelijk betere planning nodig om alle potentiële gebruikers te kunnen accommoderen. Regelgeving t.a.v. plaatsen van deze systemen wordt als erg conservatief ervaren.

Medium Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (MTO) is al in ontwikkeling sinds de jaren 1990 en wordt momenteel toegepast van 25 tot 60 °C, omdat daarboven niet meer met PVC gewerkt kan worden zoals bij LT-OBES (zie ook de Routekaart energieopslag<sup>7</sup>). De hogere temperatuur is bruikbaar voor directe koppeling met duurzame warmte en een laagtemperatuur (LT) warmtenet. Het piekvermogen van MTO begint rond de 800 kW voor een kleine boorput, en zal in de toekomst waarschijnlijk nog toenemen. De opslagcapaciteit van een MTO systeem is tot ruwweg 600 MWh. MTO kan gebruikt worden voor meerdere cycli per dag tot seizoensopslag, met een SCOP van 30 tot 200. Omdat MTO een lager temperatuur bereik heeft, zijn er minder eisen voor de gebruikte materialen dan bij HTO en is de kans op mineraaldepositie kleiner. Er zijn momenteel enkele MTO systemen in Nederland en er wordt een toenemende vraag waargenomen in de markt.



Figuur 5. HTO systeem Universiteit van Utrecht (bron: IF Technology)

High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HTO, zie Figuur 5) heeft een opslagtemperatuur van ruwweg 60°C tot 90 °C op een diepte van typisch 150-450m, en is momenteel aan het einde van de ontwikkelfase op TRL 8. Vanwege de hoge temperatuur ligt de opslagcapaciteit momenteel typisch rond de 30 GWh met een minimaal vermogen van ruwweg 1.5 MW tot 50 MW, en daarmee kan het direct aangesloten worden op een middentemperatuur (MT) warmtenet, kasverwarming, industriële verwarming, zonthermie, of voor terugwinning van industriële restwarmte. HTO kan momenteel alleen lange cycli draaien (bij voorkeur voor seizoensopslag) met een Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) van 30 tot 140 per seizoen. De efficiëntie ligt momenteel tussen de 40% en 80%, maar verdere ontwikkeling van isolatiematerialen in de pijpen, leidingen, en componenten kunnen de efficiëntie mogelijk nog verhogen. Een belangrijk

aspect voor de efficiency is het effect van natuurlijke convectie in de aquifer, wat samenhangt met de lokale permeabiliteit van de bodem. Bij het optreden hiervan heb je

onderin de ATES kouder water dan bovenin. Om hier goed mee om te kunnen gaan is een specifiek ontwerp van de bron nodig. Daarnaast worden er strengere eisen gesteld aan de materialen die gebruikt worden dan bij WKO, en vanwege verhoogde kans op neerslag van mineralen zijn er mitigerende maatregelen nodig. Er is door het grotere temperatuurverschil ook een groter risico op grondwatercontaminatie en er is ook daardoor extra aandacht nodig voor mitigerende maatregelen en monitoring. Specifiek gaat dit ook om grondwaterbehandeling om bijvoorbeeld kalkneerslag te voorkomen. Bovendien is er ten opzichte van WKO op lage temperatuur een hogere systeemcomplexiteit.

### 3.2.1.3 Ontwikkelaars

Vanwege de schaalgrootte en technologische aspecten van MTO/HTO systemen zijn projecten meestal een samenwerking tussen veel verschillende partijen, zoals het HEATSTORE project<sup>10</sup>, Push IT,<sup>11</sup> en het WarmingUP-programma en haar voortzetting WarmingUP GOO, waaronder o.a. het project WINDOW valt<sup>12</sup>. Om een praktisch inzicht te krijgen van de toepassing is de vragenlijst verstuurd naar de volgende ontwikkelaars van MT en HT ATES systemen; ECW Energy, IF Technology, KWR, en TNO.

### 3.2.1.4 Onderzoekslijnen

Hoewel er veel ontwikkeling plaatsvindt, is de complexiteit van de directe koppeling en integratie in lokale warmtenetten een uitdaging voor grootschalige toepassing. De verhoogde temperatuur brengt voor HTO ook nieuwe technische uitdagingen met zich mee. Er is een grotere afhankelijkheid van de kleilagen en watervoerende lagen in de ondergrond op de capaciteit, vermogen, en levensduur bij een hogere temperatuur, wat een beter inzicht in de bodem vereist om het toepassingspotentieel te kunnen inschatten.

Voor HTO is componentenontwikkeling nodig om de levensduur en specificaties te kunnen garanderen door de effecten van mogelijke mineraaldepositie en corrosie die zouden kunnen optreden bij deze temperaturen tegen te gaan. Hiervoor worden er strengere eisen gesteld aan de te gebruiken materialen. Het verminderen van warmteverliezen door middel van verbeterde isolatie is een bijkomend aspect van componentontwikkeling voor HTO, om de efficiëntie van de techniek te verhogen.

HTO is momenteel alleen toepasbaar als seizoensopslag. Ontwikkeling vindt plaats om de omschakeltijd tussen laden en ontladen van minimaal een week te verkorten om op die manier buffering korter dan een dag mogelijk te maken.

Algemeen dient de bewustwording voor ruimtelijke ordening te worden verhoogd. Om te zorgen dat de opschaling van warmteopslag niet vastloopt op een gebrek aan ondergrondse ruimte is een ondergrondse ruimtelijke planning nodig. Ontwikkeling op dit gebied moet nog van de grond komen.

## 3.2.2 Voelbare warmteopslag in water

### 3.2.2.1 Inleiding

Naast de eerder besproken ATES behelst voelbare warmteopslag in water verschillende andere technieken, bestaande uit grootschalige en kleinschalige ondergrondse opslag, en grootschalige en kleinschalige bovengrondse opslag. De capaciteit varieert van ruwweg 20 kWh tot GWh-schaal voor dag tot seizoensopslag, en kan worden onderverdeeld in centrale systemen en decentrale systemen. Hierbij zijn centrale systemen typisch groter dan 1 MWh

<sup>10</sup> HEATSTORE, <https://www.heatstore.eu/>

<sup>11</sup> Push IT, <https://www.push-it-thermalstorage.eu/>

<sup>12</sup> WarmingUP, <https://www.warmingup.info/>

met een vermogen groter dan 1 MW. De technologie is redelijk ver ontwikkeld en heeft momenteel een TRL tussen de 7 en 9. Er zijn momenteel verschillende ontwikkelaars in Nederland actief (zie hieronder).

Grootschalige centrale voelbare warmteopslagtechnieken opereren bij opslagtemperaturen tot 110 °C, met vermogens van MW tot tientallen MW<sup>13</sup>. Grootschalige ondergrondse opslag wordt ontwikkeld voor koppeling met grotere gebouwcomplexen of kleinschalige warmtenetten. Bovengrondse systemen worden naast gebruik met andere energiebronnen o.a. als buffer voor zonnewarmte geïnstalleerd. Beide technieken hebben naast de gebouwde omgeving mogelijke toepassing voor warmtevraag onder de 90 °C in de industrie.

Decentrale voelbare warmteopslag heeft twee ontwikkelaars op TRL 8. Technieken hiervoor worden ontwikkeld in een bovengrondse en ondergrondse variant, gericht op individuele woningen of gebouwen met een capaciteit van ruwweg 20 kWh tot 200 kWh respectievelijk. De ondergrondse variant is groter en heeft daardoor een grotere capaciteit, en heeft toegang tot een grondoppervlak nodig voor installatie. De bovengrondse variant kan binnenshuis worden geïnstalleerd en heeft hiermee een universeel toepassingsgebied in de gebouwde omgeving.

### 3.2.2.2 Principe

Voelbare warmteopslag bestaat uit aangelegde ondergrondse en bovengrondse reservoirs en buffers met water als opslag medium om warmte op te slaan tot een temperatuur van 80 tot 110 °C (bij gebruik van drukvaten), voor warmteopslag van enkele dagen tot weken. Bekende technieken hiervoor zijn Underground Thermal Energy Storage (UTES, met o.a. boreholes, cavernes en mijnen, maar ook ondergrondse TTES (UTTES)), Tank Thermal Energy Storage (TTES), en Pit Thermal Energy Storage (PTES). Vanwege de limitatie op temperatuur worden systemen met een grotere capaciteit en dus ruimtevraag vaak (deels) ondergronds geïnstalleerd. Door gebruik te maken van stratificatie van temperatuurlagen in het opslagmedium is het vermogen niet afhankelijk van de beladingsgraad (state of charge, resterende capaciteit, water van bepaalde benodigde temperatuur) van de warmteopslag, maar maakt de opslagtechniek wel gevoelig voor interne menging. Het temperatuurbereik van water als opslagmedium maakt een directe koppeling mogelijk met wijkverwarming en centrale verwarming wat aanleg simplificeert. Daarnaast brengt water als opslagmedium weinig risico met zich mee. Naast directe verwarming zijn veelgebruikte toepassingen opslag van restwarmte, gebruik naast warmtepompen, en toepassing van zonnewarmte.

<sup>13</sup> Zie bijvoorbeeld <https://group.vattenfall.com/nl/newsroom/archive/nieuws/2015/nuon-buffer-diemen-garandeert-stadswarmte>

### 3.2.2.3 Ontwikkelaars

HoCoSto (Figuur 6) heeft een ondergronds warmteopslag systeem ontwikkeld voor water tot 95 °C. Het systeem maakt gebruik van een belastbaar frame dat wordt ingegraven waardoor de bovengrond beschikbaar blijft voor personen en verkeer. Het systeem wordt voornamelijk geïnstalleerd op locaties waar WKO systemen niet mogelijk zijn. De grootte kan variëren van ruwweg 200 m<sup>3</sup> tot 2500 m<sup>3</sup>, en de opslag kan gebruikt worden voor peak shaving of seizoensopslag, of een combinatie ervan. Hoewel het mogelijk is leent het formaat zich niet typisch voor particulier gebruik. Momenteel wordt het warmteopslag systeem voornamelijk ingezet voor grotere gebouwcomplexen, hotels, industriële partners of beheer van netcongestie. Ook kan de opslag gekoppeld worden aan warmtenetten. Doorontwikkeling vindt plaats naar een hogere energiedichtheid door gebruik te maken van de latente warmte van het water (bevriezing voor koelbehoefte) en door een hogere temperatuur te bereiken door middel van drukopbouw. Kostenreductie wordt gerealiseerd door een modulair systeem voor eenvoudige installatie, al houdt een gebrek aan normen en certificeringen schaalbaarheid van productie en installatie momenteel tegen.



Figuur 6: Installatie van een HoCoSto warmteopslagmodule

Een oplossing voor thermische energieopslag voor een enkele woning die enkele dagen gebruik van warm water of centrale verwarming kan leveren is ontwikkeld door BORG, waarin water tot 95 °C wordt opgeslagen met een totale capaciteit van 200 kWh. Het systeem heeft een goede isolatie, waardoor de warmte tot twee weken kan worden opgeslagen met een efficiëntie van 95%. Stratificatie zorgt voor een minimaal effect van de te gebruiken capaciteit op het vermogen, welke tot 25 kW gaat voor centrale verwarming. De warmtebatterij wordt geladen door een hoge-temperatuur warmtepomp, aangestuurd door een zelf ontwikkeld controle systeem welke optimaliseert voor een dynamisch tarief en weer. Het systeem gebruikt voornamelijk beschikbare materialen, en is toepasbaar in bijna 40% van de Nederlandse woningen. Het bedrijf geeft aan productie op te schalen tussen de 250 en 1000 systemen per jaar in de komende jaren.



Newton Energy Solutions biedt compacte warmteopslag die in de woning of binnen een gebouw geplaatst kan worden. De NEStore (Figuur 7) slaat warmte op in water tot 110 °C en heeft een capaciteit van 20-30 kWh afhankelijk van het volume (200-300L). Door gebruik te maken van vacuüm isolatie zijn er minimale verliezen met een efficiëntie van 98% voor dagelijks gebruik, en maakt het lange-termijn opslag binnenshuis mogelijk met een efficiëntie van 90% na 7 dagen. Door middel van stratificatie heeft de beladingsgraad minimale invloed op het vermogen, dat tot 40 kW kan gaan. Het product is momenteel in TRL 8-9 en bevindt zich in de eerste fase van opschalen van productie. Newton Energy Solutions wil doorontwikkelen naar een verdubbeling van de capaciteit, en de mogelijkheid tot combinatie met warmtepomp en zonthermie onderzoeken.



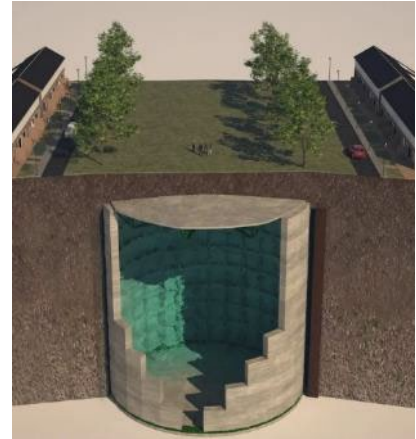
Figuur 7: De NEStore warmteopslag van Newton Energy Solutions



Figuur 8. Warmtebuffer van G2 Energy gecombineerd met zonnethermie

De warmteopslag van G2Energy (Figuur 8) wordt geïmplementeerd als onderdeel hun zonnewarmte-installaties met een collector oppervlak tussen de 100 m<sup>2</sup> en 15000 m<sup>2</sup>. Het warmteopslag systeem bestaat uit een grote tank waarin water tot 95 °C wordt opgeslagen, en welke fungeert als thermische buffer tot enkele dagen. Het systeem reduceert gasverbruik significant en werkt optimaal als de energie die overdag wordt opgewekt gedurende de nacht wordt gebruikt. Al hun producten worden gemaakt in hun eigen faciliteiten, waardoor elk project op maat wordt uitgevoerd. De installaties worden vooral geïnstalleerd in de landbouw en voedselindustrie. In de gebouwde omgeving is het product te koppelen met een warmtenet, waar het systeem ook gecombineerd kan worden met een warmtepomp of met restwarmte. Het huidige systeem is TRL 9 en beschikbaar als onderdeel van een zonnewarmte installatie, maar G2Energy geeft aan dat doorontwikkeling richting lange termijn warmteopslag voorzien is.

Groene Warmte heeft tot begin dit jaar grootschalige ondergrondse warmteopslag in water ontwikkeld (Figuur 9). Een tank tussen de 10.000 m<sup>3</sup> en 100.000 m<sup>3</sup> wordt ingegraven. De maximale opslag capaciteit die is aangelegd is 5 GWh, bij een opslagtemperatuur van 95 °C. Het systeem is ontworpen voor koppeling met een warmtenet, restwarmte, zonnewarmte, of warmtepompen en kan de warmte opslaan voor meerdere weken met een efficiëntie rond de 90%. De buffer stelt warmtenetbeheerders in staat om meer warmte te verkrijgen uit hernieuwbare bronnen zoals zonnewarmte en om effectiever gebruik te maken van het beschikbare vermogen. Stratificatie in de tank zorgt voor een constant vermogen. Installatie is afhankelijk van de staat van de ondergrond en grondwater, en wordt door het volume duurder bij bijvoorbeeld rotsachtige ondergrond. Hoewel de wanden van de ondergrondse buffer een uitdaging vormden bij grotere volumes, was de ambitie van Groene Warmte om op te schalen naar 50 GWh met een doelstelling in 2027. Het bedrijf benoemt “de trage ontwikkelingen in de Nederlandse warmtetransitie, vergeleken met onze verwachtingen” als een van de oorzaken van het recente faillissement.



Figuur 9. De ondergrondse warmtetank van Groene Warmte.

### 3.2.2.4 Onderzoeklijnen

Ontwikkeling in voelbare warmteopslag in water vindt voor grootschalige centrale opslag plaats ter verhoging van het temperatuurbereik, om zo de energiedichtheid te verhogen voor verwarmen en koelen. Verder wordt er voor centrale opslag gewerkt naar schaalbaarheid om grotere capaciteiten mogelijk te maken, en deze sneller te kunnen produceren en installeren. Daarnaast wordt er gekeken naar energiemangement en effectieve integratie in warmtenetten.

De ontwikkeling van decentrale voelbare warmteopslag gaat richting een hogere capaciteit om te kunnen voldoen aan langere overbruggingsperiodes. Daarnaast vindt ontwikkeling plaats om de opslag effectiever in te zetten als flexibel middel, waarbij is aangegeven dat het gebrek aan standaardisatie van communicatieprotocollen voor energiebeheersystemen (Energy Management Systems, EMS) een probleem kan zijn voor grootschalige marktadoptie.

Omdat het decentrale systeem voor woningen wordt toegepast waarbij steeds dus slechts een of enkele opslagvaten worden geïnstalleerd is opschalen van productie noodzakelijk om aan de vraag te kunnen voldoen. Er is aangegeven dat er een gebrek aan financiering is om deze opschaling van productie mogelijk te maken. Dit komt mede doordat de businesscase bemoeilijkt wordt door een gebrek aan waardering in de normering (o.a. NTA8800), en door het in stand houden van de salderingsregeling waardoor warmteopslag met gebruik van overtollige duurzame elektriciteit nog geen goede businesscase oplevert.

## 3.2.3 Hoge Temperatuur Voelbare Warmteopslag

### 3.2.3.1 Inleiding

Hoge temperatuur warmteopslag in Nederland bestaat uit 3 ontwikkelaars met een TRL van 8 tot 9, en 1 ontwikkelaar met een TRL van 5. Hiervan is er een met een toepassing in de gebouwde omgeving, en hebben 3 ontwikkelaars een focus op de industrie.

De producent van hoge temperatuur voelbare warmteopslag in de gebouwde omgeving is ver ontwikkeld en heeft een TRL van 8-9. Er wordt gebruik gemaakt van een vast opslag medium wat direct verhit wordt door middel van overtollige energie van PV, en kan centraal of decentraal worden toegepast voor dag, week, of seizoensopslag.

### 3.2.3.2 Principe

Hoge temperatuur voelbare warmte (HT-Voelbaar) gebruikt warmte bij een temperatuur hoger dan 200 °C en slaat die op. Het opslagmedium kan een vaste stof zijn of een vloeistof. Een vaste stof vereist geen temperatuurbestendig of hoge druk vat voor opslag en kan tot hogere temperatuur geladen worden (water bouwt bij 125 °C al significante druk op, gesteente blijft stabiel tot boven 800°C). Warmteoverdracht bij opslag in een vaste stof vindt plaats door middel van gas, stoom, hittebestendige olie of gesmolten zout. Een vloeibaar opslagmedium zoals gesmolten zout kan een significant hogere warmteoverdracht leveren ten opzichte van een vast medium bij gelijke temperatuur, omdat de vloeistof geforceerd door een warmtewisselaar kan worden gepompt, met significant hogere warmteoverdracht. Als warmtebron kan overtollige elektriciteit worden omgezet in warmte door middel van directe elektrische verwarming of er kan restwarmte of zonnewarmte gebruikt worden door middel van koppeling met het warmteoverdrachtsmedium. Het vermogen van een HT-Voelbaar systeem neemt lineair af met de temperatuur van het medium. De randapparatuur en bouwmaterialen voor de opslag zijn in de meeste gevallen limiterend voor een hoger temperatuurbereik. HT-Voelbaar wordt historisch gezien voornamelijk gebruikt in de industrie, waar het wordt gebruikt om restwarmte periodiek voor een korte periode op te slaan. Momenteel is er maar een ontwikkelaar van HT-Voelbaar warmteopslag in Nederland die een systeem levert voor de gebouwde omgeving, en drie ontwikkelaars voor industriële toepassing.

### 3.2.3.3 Ontwikkelaars

De hoge temperatuur warmtebatterij van CESAR (Figuur 10) is momenteel op TRL 8-9 en slaat overtollige elektriciteit direct op als warmte door keramisch materiaal / gesteente te verhitten tot ruwweg 500 °C. De warmte wordt door lucht overgedragen naar een buffervat voor korte termijnopslag dat wordt gebruikt om warm water te leveren. Door middel van een adequate isolatie worden verliezen geminimaliseerd, en is seizoensopslag mogelijk met een efficiëntie van 70%. Het systeem is ontworpen voor koppeling aan een warmtenet, maar kan eventueel verbonden worden met een centrale verwarming. Door het gebruik van duurzame en veel voorkomende materialen en technieken en een eenvoudig ontwerp principe kan de CESAR batterij kostencompetitief worden gebouwd. Het systeem slaat warmte op bij een dichtheid van 250 kWh/m<sup>3</sup>, en heeft een specifieke 'voetafdruk' van ongeveer 1 m<sup>2</sup> per 500 kWh. Het piekvermogen van het hoge temperatuur materiaal naar de korte termijnbuffer is 1 kW per m<sup>3</sup> materiaal, en is lineair afhankelijk van de temperatuur van dat materiaal. CESAR geeft aan productie op te willen schalen en is bezig het specifiek vermogen significant te verhogen.



Figuur 10. Hoge temperatuur voelbaar warmteopslag systeem van CESAR.



EnergyNest is een Noors bedrijf, actief in Nederland, dat modulaire hoge temperatuur voelbare warmtebatterijen ontwikkelt voor de elektrificatie van de industrie. De modules hebben grofweg het formaat van een container en slaan de warmte op bij ruwweg 400 graden in een zelfontwikkeld beton voor een periode van enkele dagen. Door het beton lopen leidingen voor stoom of olie die warmte onttrekken of toevoeren aan de opslag. Een enkele module heeft een opslagcapaciteit tot 2 MWh, met een piekvermogen van 1MW. Het vermogen kan worden gestuurd door de stroomsnelheid van de vloeistof te variëren, en het is op die manier mogelijk om een constant vermogen te waarborgen. Externe componenten zoals een stoomaccumulator/condensatie vat, water tanks, en pompen zijn ver ontwikkeld en verbruiken minimaal hulpenergie. Hierdoor heeft het systeem een verwachte levensduur van langer dan 30 jaar. In het geval van elektrificatie wordt het systeem gekoppeld met een e-boiler, en eventueel PV. Het systeem is momenteel op TRL 8 met stoom als warmteoverdrachtsmedium, en TRL 7 met olie als warmteoverdrachtsvloeistof.

Brabetech ontwikkelt voelbare warmteopslag met gesmolten zout als medium. Door gebruik te maken van een mengsel van zouten kan de technologie warmte opslaan tussen de 130 en 550 °C voor een periode van meerdere dagen. Het ontwerp van het systeem is modulair, waarbij modules met een capaciteit 5,5 MWh en met het formaat van een zeecontainer gekoppeld kunnen worden. Het gesmolten zout dient ook als warmteoverdrachtsvloeistof en het vermogen wordt geleverd via een aparte warmteoverdrachtsmodule. Voor het smelten van het zout is een smeltmodule ontwikkeld in samenwerking met een zonnearmtecentrale in Portugal. Een gesmolten zout warmteopslagsysteem kan gebruikt worden voor procesverbetering en maakt elektrificatie van industrie mogelijk. Brabetech brengt dit jaar hun product op de markt, en is van plan om in 2025 de productie op te schalen.

De toepassing van hoge temperatuur voelbare warmteopslag op basis gesmolten zoutopslag wordt onderzocht door TNO in de testopstelling in het Carnot Lab. Het systeem is momenteel op TRL 5 en wordt gebruikt om tot 500 kg gesmolten zouten tot 600 °C te onderzoeken op mogelijke procesintegratie in de industrie, met een vermogen tussen de 10 kW en 100 kW afhankelijk van de toepassing. Opschaling naar een vermogen van 1 MW van het systeem vindt plaats in de komende 6 jaar voor mogelijke toepassing in warmteterugwinning in industriële processen en het faciliteren van elektrificatie.

#### 3.2.3.4 Onderzoekslijnen

Voor HT-Voelbaar in de gebouwde omgeving is het verhogen van het specifiek vermogen van het vaste hoge temperatuur materiaal een ontwikkellijn, naast het verhogen van de productiecapaciteit.

HT-Voelbaar in vaste materialen voor industriële toepassing zal de flexibiliteit van toepassing vergroten en het vermogen verhogen, onder andere door onderzoek naar alternatieve warmteoverdrachtmedia. Voor HT-Voelbaar in vloeibare materialen voor industriële toepassing is het opschalen van het vermogen een ontwikkelingslijn naast het verbeteren van de stabiliteit van het materiaal en het reduceren van verliezen.

## 3.2.4 Phase-change materials (PCM's)

### 3.2.4.1 Inleiding

In totaal zijn er 5 warmteopslagontwikkelaars die gebruik maken van PCM's met een TRL niveau tussen de 5 en de 9, en is er een producent van PCM actief in Nederland. Drie ontwikkelaars zijn actief in de gebouwde omgeving met een TRL van 8-9, met diverse toepassingen van grootschalige ondergrondse seizoensopslag, passieve opslag voor en door integratie in bouwmaterialen, en actieve decentrale compacte opslag voor warmwatervoorziening.

De ontwikkelaars actief met oplossingen voor de industrie zijn op TRL 5 en 9, en de technologieën worden ontwikkeld voor het gebruik van dag en nacht temperatuurschommelingen voor effectiever koelen van datacenters, en voor optimalisatie van energiegebruik van industriële batchprocessen.

### 3.2.4.2 Principe

PCM's maken gebruik van de latente warmte die nodig is om te smelten, en die weer vrijkomt bij stollen van het materiaal. De warmte komt vrij bij een constante temperatuur gedefinieerd door het smeltpunt. De vrijkomende warmte kan bijvoorbeeld gebruikt worden om een ruimte te verwarmen, waarbij het materiaal weer kristalliseert en vast wordt. De temperatuur waarbij de faseovergang plaatsvindt bepaalt voor een belangrijk deel de bruikbaarheid als warmte of koudeopslagmiddel. Het soort materiaal en de daarmee samenhangend chemisch bepaalde smeltempthalpie bepaalt de opslagdichtheid van het materiaal in praktische toepassingen. De hoeveelheid energie benodigd voor de faseovergang en de thermische massa in combinatie met het gebruikte temperatuurregime (en daarmee samenhangend de nog bruikbare voelbare warmte) bepaalt de praktische en dus bruikbare energieopslagdichtheid.

PCM materialen bestaan in vele soorten en hebben daarmee theoretisch een breed temperatuurbereik. Deze materialen worden onder andere geselecteerd op hun energiedichtheid, en daarnaast op smeltemperatuur, potentiële warmteoverdracht en stabiliteit tijdens de levensduur.

### 3.2.4.3 Ontwikkelaars

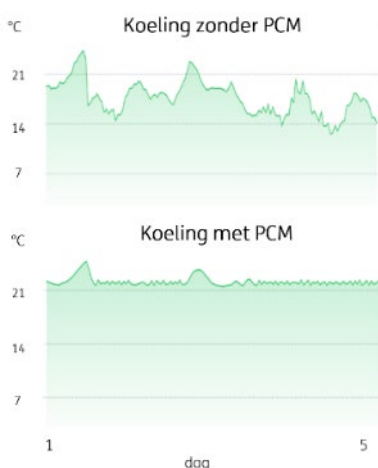
SolarEis is een ontwikkelaar die gebruik maakt van latente en voelbare warmte van water in een ondergrondse buffer tot meer dan 800 m<sup>3</sup> als bron voor een warmtepomp voor seizoensopslag. Hierbij fungeert het vat als koude bron in de zomer, en wordt het vat gebruikt als warme bron in de winter waarbij de latente warmte van het bevroren van water gebruikt wordt als bron. Het vat is te combineren met zonnecollectoren en de stabilisatie van de brontemperatuur van de warmtepomp verhoogt de Coefficient of Performance (COP) theoretisch naar 4,5 in de winter en naar 7,5 in de zomer. Het formaat van de opslag is een limitatie op het toepassingsgebied; de opslag kan niet worden toegepast met de gewenste capaciteit als de ruimte ondergronds niet beschikbaar is. De technologie maakt gebruik van standaard materialen en gebruikt geen complexe of schaarse materialen. Wel gebruikt de technologie een warmtepomp. Ontwikkelingen van nieuwe componenten voor het leveren van een hoger vermogen worden verwacht nog enkele jaren te duren. Het bedrijf geeft aan dat het vinden van voldoende gekwalificeerd personeel momenteel de grootste limiterende factor is voor het doorgroeien. Hoewel het vermogen en een groot gedeelte van de capaciteit komt door het voelbare warmte-aspect maakt het systeem van SolarEis gebruik van de latente warmte van water en is daarom ingedeeld onder PCM.

Orange Climate maakt gebruik van PCM voor temperatuur stabilisatie rond 'kamertemperatuur' tijdens dag en nacht cycli door middel van directe integratie van omhulde PCM in bouwmaterialen (Figuur 11). Deze vorm van passieve warmte- of koudeopslag kan zowel in nieuwbouw als in bestaande bouw geïmplementeerd worden, waarbij verschillende PCMs met een verschillende smelttemperatuur een gebouwafhankelijke oplossing kunnen bieden. Hierbij wordt in bestaande bouw potentieel een energiebesparing van 30% of meer gerealiseerd, evenals in nieuwbouw ten opzichte van conventionele technieken. Een groot voordeel zijn de relatief lage kosten van onderhoud. Bij uitwerking op gebouwniveau blijkt dat het systeem gerealiseerd kan worden tegen gelijke of soms zelfs lagere stichtingskosten ten opzichte van een klimaatconcept met een gelijkwaardige comfort- en energieprestatie. Recent zijn twee nieuwe productielijnen voor toepassing van PCM in klimaatplafondsysteem en vloerverwarmingssystemen in gebruik genomen. Deze stevige investering heeft geleid tot een verdere kostendaling. Naarmate de markt verder groeit en volume en omzet toeneemt, zijn nog verschillende kostenstappen denkbaar die t.z.t. zelfstandig te financieren zijn. Hoewel de vraag naar deze toepassing toeneemt, geeft het bedrijf aan dat marktkennis over het product onder ontwikkelaars en uitvoerders beperkt is. Echter, op meerdere bekende adviesbureaus die actief zijn bij advisering en ontwerp van gebouwen is kennis aanwezig om deze systemen af te kunnen wegen, te kunnen ontwerpen en te vertalen naar marktoplossingen en inkoop.



Figuur 11. Een omhuld PCM paneel van Orange Climate Systems.

De aanbieder van een PVT-systeem Triple Solar biedt een compacte warmteopslag systeem aan op basis van PCMs voor warmwatervoorziening bij 60 °C binnenshuis, ontwikkeld door SunAmp in het Verenigd Koninkrijk. Deze opslag is verkrijgbaar van 3,5 tot 14 kWh en kan door hoge isolatiewaardes een opslagduur tot enkele weken overbruggen. Een hinderende marktsituatie bestaat omdat het, hoewel het systeem goed te integreren is met het PVT-systeem van Triple Solar, momenteel niet onder bestaande subsidieregelingen valt.



Figuur 12: Het effect van de toepassing van het DuraFlow PCM modules op de koeling in een datacenter

DuraFlow ontwikkelt een toepassing in de industrie op basis van PCM, en maakt gebruik van het temperatuurverschil tussen dag en nacht om het energiegebruik voor koelen van datacenters te verminderen tijdens de warmste zomermaanden (Figuur 12). Door omhulde PCM modules te integreren in datacenterkoelers kan er per installatie een gespecificeerde 6 kW koelvermogen geleverd worden. Door middel van het plaatsen van de juiste capaciteit en met behulp van een meet en regelsysteem kan een seasonal performance factor (equivalent aan de SCOP) behaald worden tussen de 20 en 30. De verwachting is dat door verdere optimalisatie van het productieproces van de PCM modules de stabiliteit van het materiaal kan worden verbeterd en de warmteoverdracht en vermogen kan worden verhoogd met een factor 1.5.

Voor toepassing in batch processen in de industriële sector ontwikkelt TNO momenteel een thermisch opslagsysteem dat warmte ontladst bij

een temperatuur van 150 °C op basis van omhuld PCM materiaal voor de productie van industriële processtoom. De huidige installatie bevat 60 kg aan PCM-materiaal en heeft een maximaal vermogen van 20 kW. In de toekomst wordt het systeem opgeschaald naar MW capaciteit, en het specifieke vermogen verhoogd, om te komen tot TRL 8 in 2028. Vanwege thermische verliezen is het systeem vooral voor opslag van een tot enkele dagen geschikt. Binnen de gebouwde omgeving vindt het systeem vanwege de hoge temperatuur alleen toepassing in combinatie met een warmtenet.

PLUSS Advanced Technologies (PLUSSAT) is de Europese tak van het Indiase PLUSS, een van de grootste producenten van PCM-materialen ter wereld. Hoewel het bedrijf zelf geen toepassing ontwikkelt worden de materialen met een temperatuurbereik van -75 tot 151 °C in vele toepassingen gebruikt. Een aantal van deze toepassingen zijn koeling tijdens transport van voedingsmiddelen en medicijnen, transport in de agrarische sector, en integratie in bouwmaterialen. De producten blijven actief verbeterd worden in hun onderzoeklaboratorium in New Delhi, India, en in Nederland gaat PLUSSAT samenwerkingen aan met onder andere TNO en de Wageningen Universiteit voor doorontwikkeling van producten en ontwikkeling van nieuwe toepassingen.

Voorts heeft de Universiteit Twente recent het project SmartHeat afgerond naar supercooled PCM's voor toepassing als kostenefficiënte korte- en langetermijn warmteopslag met hoge energiedichtheid, en voor gebruik in grootschalige seizoenopslagsystemen.<sup>14</sup> Daarnaast heeft Flamco / Aalberts Hydronic Flow Control sinds enige tijd PCM-gebaseerde boilers onder de naam Flextherm Eco in de handel.<sup>15</sup> Bij dit systeem worden 'PCM-bolletjes' in een buffervat met warmwater gebruikt om de energiedichtheid van het watervat te vergroten, en om een stabiele temperatuur van levering te kunnen garanderen. Als compact alternatief voor een warmwaterbuffer is het systeem ontworpen voor binnenshuis en het heeft hiermee een vrijwel universeel toepassingsgebied in de gebouwde omgeving. Omdat deze technologie al op de markt is, is de ontwikkeling hiervan niet meegenomen in de beschrijving van de Innovatieroadmap.

#### 3.2.4.4 Onderzoeklijnen

Voor omhulde PCM modules vindt ontwikkeling plaats in optimalisatie van de warmteoverdracht van het PCM met de omgeving door middel van verbetering van het ontwerp.

Onderzoek op het gebied van materiaalontwikkeling vindt plaats voor verbetering van de stabiliteit en levensduur van het materiaal. Hysterese, een niet-gelijkwaardig gedrag van het PCM bij smelten en stollen, kan worden onderdrukt door het toevoegen van specifieke contaminaties met materialen die als nucleatiekern kunnen dienen (nucleators). Hiermee wordt een uniform en optimaal gebruik van het materiaal tijdens de temperatuurtransities steeds beter gewaarborgd. Interne warmtegeleiding in het materiaal is vaak een beperking voor het leveren van voldoende hoge vermogens. Er wordt onderzoek gedaan naar de verbetering van de warmtegeleiding om hogere potentiële vermogens te bereiken en voor een uniforme temperatuur distributie. Dit speelt zowel voor materialen in de lagere als in de hogere temperatuurregimes.

Verder wordt er onderzoek gedaan om het temperatuurbereik en de energiedichtheid van de technologie te vergroten en productiekosten van PCM en PCM opslagtechnologie te verlagen.

<sup>14</sup> TKI UE, SMARTHEAT – final report, M. Mehrli, A. ten Elshof, projectperiode 22-5-2020 – 12-11-2023.

<sup>15</sup> Zie bijvoorbeeld: <https://flamco.aalberts-hfc.com/nl/catalog/buffervaten-en-boilers/thermische-batterijen/flextherm-eco/flextherm-eco/groups/g+c+p+a+view>

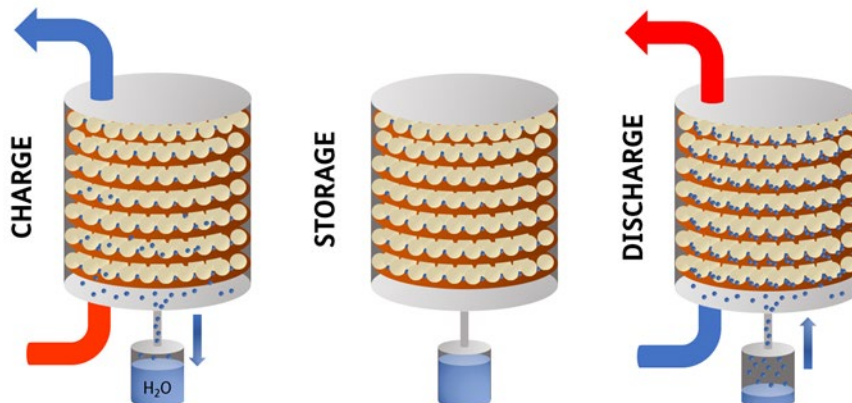
## 3.2.5 Thermochemische materialen (TCM)

### 3.2.5.1 Inleiding

Thermochemische warmteopslag gebruikt thermochemische materialen (TCM) om warmte te genereren, veelal door middel van hydratatie en dehydratie van het actieve materiaal. Typisch gebruikte materialen zijn bijvoorbeeld zouten, zeolieten, of metaalcomplexen, die een reactie kunnen aangaan met een sorbaat, bijvoorbeeld water. Doeltreffende toepassing van thermochemische warmteopslag in een use-case is afhankelijk van het vereiste temperatuurbereik van het materiaal en het systeemontwerp. Thermochemische warmteopslag kan naast warmteopslag ook gebruikt worden als koudeopslag; in dat geval zal de warmte (koude) van de toe en afgevoerde waterstroom als nuttige energie worden gebruikt. Daarnaast kan het systeem als thermochemische warmtepomp worden toegepast, waarbij een lage temperatuur warmtebron kan worden opgewaardeerd tot hogere temperatuur. Afhankelijk van het temperatuurbereik is koppeling met een elektrisch aangedreven warmtepomp of met zonnewarmte mogelijk.

### 3.2.5.2 Principe

Het principe berust op het chemische feit dat tijdens exotherme reactie met water warmte vrijkomt o.a. door het verbreken van moleculaire bindingen en het vormen van nieuwe met de waterfase. Endotherme dehydratie gebeurt door het opwarmen van het materiaal waarbij de waterfase verdampt, en de bindingen weer verbroken worden.



Figuur 13. Schematische weergave van de laad- en ontladcycli van een TCM reactor (TNO vacuüm systeem).

Het principe van thermochemische opslag wordt getoond in Figuur 13. Omdat het principe werkt op basis van scheiding van stoffen (TCM en water), kan door effectieve scheiding de warmte zonder verlies worden opgeslagen. Het type materiaal bepaalt, in combinatie met de laadtemperatuur (en daarmee de dampdruk), het temperatuurbereik voor afgifte. Een open systeem is over het algemeen goedkoper, heeft geen opslag van de sorbaatfase nodig maar gebruikt waterdamp uit de omgevingslucht. Vanwege het directe contact met de buitenlucht zijn niet alle materialen toepasbaar in open systemen die wel gebruikt kunnen worden in gesloten systemen, waaronder ook sommige materialen met een hoge energiedichtheid. Bovendien vermindert de thermische massa van de lucht de maximale temperatuurstijging die behaald kan worden. Gesloten systemen zijn daarentegen over het algemeen complexer en daarmee duurder, mede omdat deze systemen geëvacueerd zijn en lekdicht moeten blijven. Daarbij kost het verdampen van water energie, wat aan de gesloten systemen apart moet worden aangeleverd.



### 3.2.5.3 Ontwikkelaars

ARES BV. gebruikt natriumsulfide als TCM in het warmteopslagsysteem in ontwikkeling. Dit systeem is ontworpen als compacte warmteopslag voor individuele woningen. Het zouthydraat natriumsulfide is reactief met de atmosfeer en wordt daarom gebruikt in een gesloten systeem. Het heeft een theoretisch effectieve opslagdichtheid van  $450 \text{ kWh/m}^3$  wat vanwege de benodigde randapparatuur op systeemniveau gereduceerd zal zijn. Natriumsulfide slaat warmte op tussen de  $60$  en  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , en heeft een afgifte temperatuur tussen de  $40$  en  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . De technologie is momenteel op TRL 6-7; ARES richt erop in 2025 op TRL 8 te zijn. Ontwikkelingen vinden plaats op het vlak van het verhogen van de effectieve energiedichtheid van het opslagsysteem, en op het verbeteren van ontlading door middel van gecontroleerde afgifte (gebruik van korte-termijnbuffers).

Cellcius gebruikt kaliumcarbonaat als TCM in een open warmteopslag systeem dat momenteel op TRL 7 is, en ontwikkeld is in nauwe samenwerking met TUE en TNO. Het systeem kan afhankelijk van de aangelegde dampdruk warmte leveren tot  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , en kan door variatie van de waterdampdruk tussen laden en ontladen worden opgeladen bij een temperatuur van  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Met een energiedichtheid rond de  $280 \text{ kWh/m}^3$  richt het bedrijf zich op transport van restwarmte door het leveren van koeling aan de industrie en het leveren van warmte aan de gebouwde omgeving, zonder afhankelijkheid van een warmtenet. Het bedrijf hoopt door middel van verder onderzoek de laadtemperatuur verder te kunnen verlagen naar  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hiermee kan lage temperatuur restwarmte opgeslagen worden voor gebruik in woningen.

De Universiteit Twente, TU Eindhoven, TU Delft en TNO werken in samenwerking met de genoemde partijen, maar daarnaast ook individueel aan laag TRL onderzoek voor TCS warmteopslag. Verschillende aspecten van warmteopslagtechnologie op basis van thermochemische materialen worden door deze onderzoeksorganisaties onderzocht, onder andere via modelmatige beschrijving op verschillende schaal (van materiaal, naar component, module en systeem), alsook via experimentele technieken en opschaling. Er zijn meerdere pilots gedemonstreerd van bijvoorbeeld een gesloten warmteopslag systeem op basis van natriumsulfide gericht op de gebouwde omgeving (TNO, UT), en deze technologie is momenteel op TRL 6. De systemen hebben een opslagdichtheid gedemonstreerd van  $90 \text{ kWh/m}^3$  op systeemniveau.

### 3.2.5.4 Onderzoeklijnen

Een van de terugkomende eisen aan het warmteopslagsysteem op basis van TCM's is de energiedichtheid. Die bepaalt mede hoeveel ruimte een warmteopslagsysteem inneemt en daardoor in welke use-case het systeem gebruikt kan worden. De intrinsiek hoge opslagdichtheid van de actieve materialen is mede de reden dat TCM systemen ondanks hun complexiteit zijn gekozen als potentiële warmteopslag voor de gebouwde omgeving; TCM's halen theoretisch  $555 \text{ kWh/m}^3$  op materiaalniveau of zelfs meer, waarbij voelbare warmteopslag slechts ruwweg  $55 \text{ kWh/m}^3$  op materiaalniveau haalt (beide afhankelijk van het gebruikte temperatuurniveau). Echter, de daadwerkelijke energiedichtheid van een warmteopslagsysteem moet berekend worden aan de hand van het gehele systeem en niet enkel aan de hand van de reactie-energie in het TCM. Het gehele systeem bestaat namelijk naast het opslagmateriaal ook uit bv. een warmtewisselaar, opslag voor het verdampfingsmedium, lege ruimte door een onvolledige vulgraad. Deze aspecten verlagen alle op zichzelf de opslagdichtheid van het gehele systeem en moeten geoptimaliseerd worden voor adequate toepassing.

De opslagdichtheid van het systeem kan verhoogd worden door het gebruik van andere TCM's met hogere energiedichtheden, maar daarnaast ook door betere regeling, een ander reactorontwerp en mogelijk het gebruik van warmteterugwinning. Dit is belangrijk, omdat elke verbetering in de opslagdichtheid, zonder of met beperkte verhoging van de kosten, de toepasbaarheid van TCM's in de praktijk zal doen toenemen. Een andere onderzoekslijn minimaliseert warmteverlies tijdens de laad- en ontladperiode. Afhankelijk van het regelsysteem en gebruikte TCM kan deze contributie variëren. In geval van seizoensopslag bij eenmalige laad- en ontlad cyclus zal het verlies ongeveer 2-15% zijn als gevolg van de warmtecapaciteit van de TCM's en het systeem zelf. Vergelijk het geval van voelbare warmte, waarbij dit uiteindelijk 100% zal zijn bij volledig afkoelen naar kamertemperatuur.

De te verwerven kennis voor thermochemische materialen heeft in het algemeen betrekking op het reactorontwerp, de gebruikte TCM's, verbetering van warmte- en damptransport, optimaliseren van componenten en de interactie van de verschillende componenten in een opslagsysteem, en stabiliteit van de materialen. Daarnaast worden extra eisen gesteld aan bijvoorbeeld de kosten en massa van een systeem.

## 3.2.6 Redox warmteopslag

### 3.2.6.1 Inleiding

Er zijn enkele ontwikkelaars van reductie en oxidatie van ijzerpoeder (IJzer - RedOx) warmteopslag oplossingen in Nederland. De techniek is momenteel in TRL 3 tot 6 en er zijn meerdere prototypes gedemonstreerd met verschillende use-cases. Echter, er zijn nog meerdere aspecten die moeten worden doorontwikkeld voor succesvolle commercialisatie. Er zijn 3 ontwikkelaars van redox warmteopslag op basis van ijzer met een TRL 5 tot 6 die de techniek hebben gedemonstreerd met een prototype als onderdeel van een warmtenet en voor generatie van proceswarmte in de voedingsindustrie.

### 3.2.6.2 Principe

Gereduceerd ijzerpoeder bezit de potentie om warmte te genereren als chemische enthalpie. IJzerpoeder met een grootte van tientallen microns is een energiedrager wanneer het zich in gereduceerde toestand bevindt, en staat ook wel bekend als "Iron Fuel". Afhankelijk van welke nuttige reactie in ogenschouw genomen wordt, heeft het materiaal een hoge energiedichtheid (rond de 4000-7200 kWh/m<sup>3</sup>). Bij oxidatie komt de opgeslagen energie vrij als warmte, waarmee de reductie-oxidatie cyclus (redox) opnieuw kan plaatsvinden. Anders dan waterstof zijn er minder eisen aan de opslag van ijzerpoeder in grote volumes: het kan bij droge atmosferische condities verliesvrij worden opgeslagen. Het ijzer wordt geoxideerd in een special ontwikkelde oxidator (brander) bij temperaturen tot 2000 °C vlamtemperatuur, en output temperatuur tot ongeveer 1000 °C (in de vorm van warm water, stoom of hete lucht). De hoge temperatuur betekent dat er intrinsiek veel vermogen geleverd kan worden. Het geoxideerde poeder wordt bij de teruggaande reactie gereduceerd door middel van waterstof. Dit gebeurt voor de meeste toepassingen die momenteel zijn voorzien niet op dezelfde locatie als de oxidatie; transport van het materiaal is dus noodzakelijk. Het oxidatie en reductie proces zijn compleet CO<sub>2</sub>-vrij; dit wil zeggen dat gedurende het oxidatie en reductieproces geen CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten.

Redox warmteopslag is technisch gezien niet exclusief warmteopslag maar eerder “chemische opslag”, vanwege het feit dat geen cyclus wordt doorlopen waarbij aan het begin en eind van de cyclus dezelfde componenten aanwezig zijn. Er is immers in de reductiefase een andere externe stof nodig dan in de oxidatiefase (waterstof, respectievelijk zuurstof). De technologie wordt wel inbegrepen in de analyse voor innovatieve warmteopslagstechnologie omdat het expliciet de mogelijkheid biedt voor warmtegeneratie op hoge temperatuur (na laden van het actieve materiaal) en daarmee dus voor ‘warmteopslag’. Specifiek wordt de mogelijkheid tot opbouw van grootschalige (strategische) reserves voor warmtegeneratie genoemd als mogelijke use-case, bijvoorbeeld voor lange termijn opslag voor bedrijven.



Figuur 14. Boiler prototype van RIFT, Helmond 2024

### 3.2.6.3 Ontwikkelaars

RIFT (Renewable Iron Fuel Technology) heeft in 2022 een 1MW boiler prototype demonstratie uitgevoerd voor de verwarming van 500 woningen in Helmond, en aangetoond dat de technologie toepasbaar is in combinatie met een warmtenet met een focus op piekvraag. Het ijzerpoeder werd na oxidatie in de brander gereduceerd in hun eigen faciliteit. RIFT zet ontwikkeling voort met zicht op TRL 8 in 2025, om erna te richten op hoge temperatuur warmte voor de industrie, elektriciteitsproductie, en piekvraag productie voor wijkverwarming. Hiertoe wordt nu gewerkt aan de volgende generatie (20m hoge) industriële boilerinstallatie (oplevering in juni 2024, zie Figuur 14). Daarnaast is in Arnhem nu ook een (12m hoge) industriële reductieplant gerealiseerd van 100kW fluidized bed, modulair op te schalen naar 1MW binnen dezelfde ruimtelijke footprint, met uitzicht op TRL8 in 2025.

IronPlus is onderdeel van een consortium samen met Metalot. Na een demonstratie in de voedselindustrie van een 1 MW brander zijn ze klaar voor de verkoop van hun eerste commerciële brander, en plannen ze in het komende jaar op te kunnen schalen naar 5 MW. Voor industriële doeleinden is de verwachting dat een 1 GW brander gerealiseerd kan worden binnen 10 jaar. Hoewel de oxidatiestap ver ontwikkeld is, vindt er nog veel ontwikkeling plaats met betrekking tot de reductiestap van het proces. Metalot verbetert bestaande concepten en ontwikkelt nieuwe prototypes in het Future Energy Lab.

De toepassing van IJzer Redox als compacte warmteopslag in de gebouwde omgeving wordt ook onderzocht door TNO, en is momenteel op TRL 4 voor een geïntegreerde reductie/oxidatie reactor. Het systeem levert warmte op basis van een fixed bed of gefluidiseerd bed. De mogelijkheid bestaat dat reductie extern kan plaatsvinden, of in het systeem zelf. Verder onderzoek is gericht op het verbeteren van de energiedichtheid en het optimaliseren van het vermogen van het systeem, alsook op de afstemming van het verkregen temperatuurniveau aan het gewenste gebruiksniveau.

### 3.2.6.4 Onderzoeklijnen

Reductie met waterstof is een van de aspecten van de Fe-Redox technologie waar nog veel ontwikkeling plaatsvindt. Het mogelijk sinteren van gereduceerd ijzer gedurende de reactie limiteert de reactietemperatuur, wat de reactietijd voor volledig gebruik ongunstig beïnvloedt. Agglomeratie is in het fluidized bed systeem van RIFT onder controle, waarbij nog



wel optimalisatie plaatsvindt (oa. balanceren reactiesnelheid en mate van agglomeratie). Meerdere principes zijn gedemonstreerd en de techniek is ruwweg beschikbaar op TRL 4 – 6, maar opschalen presenteert nieuwe uitdagingen. Er worden naast reductie met waterstof ook andere methodes onderzocht zoals elektrochemische reductie.

Om te voldoen aan de vraag voor toekomstige industriële toepassingen wordt de schaal van de branders verder ontwikkeld. Momenteel zijn er 1 MW branders gedemonstreerd en deze zullen worden vergroot richting GW-schaal. Materiaaltransport is hierbij een uitdaging wanneer pyrofoor ijzer wordt geproduceerd. Bij het produceren van de juiste productkwaliteit door de reactorcondities te optimaliseren kan dit onder controle gehouden worden, zoals is aangetoond in het RIFT pilotsysteem in Arnhem.

Het regenereren van het materiaal na oxidatie wordt onderzocht om materiaalintegriteit te waarborgen en de formatie van fines, een zeer fijn verdeeld poeder dat als product ontstaat na ongewenst afbrokkelen van het gebruikte materiaal, te voorkomen.

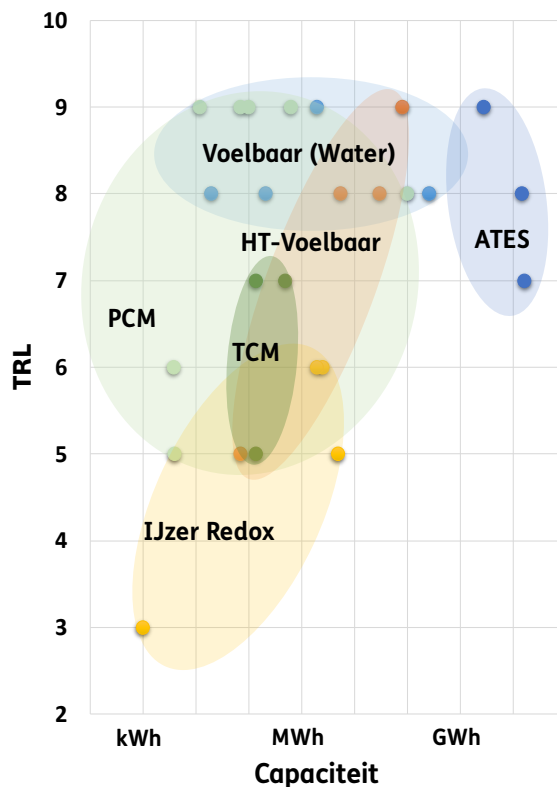
### 3.3 Overzicht van huidige en verwachte warmteopslagontwikkelingen

In deze paragraaf worden de resultaten van de enquête onder warmteopslagontwikkelaars in Nederland verenigd weergegeven per technologiegroep, zonder onderscheid te maken tussen gebouwde omgeving en industriële toepassing als use-case.

De beschikbaarheid van de datapunten varieert per technologie afhankelijk van de informatie gegeven door de respectievelijke producenten. Nederland ontwikkelt meerdere innovatieve opslagslagtechnieken voor verschillende toepassingen, ieder met unieke selling-points die een oplossing kunnen bieden voor verschillende vormen aan warmtevraag in Nederland.

De in de grafieken / overzichten weergegeven getallen gelden voor gangbare warmteopslagmodules zoals die realistisch gezien in de markt aangeboden (zullen) worden. Wanneer meer capaciteit of vermogen benodigd is voor een specifieke toepassing, kan dit worden gerealiseerd dit door installatie van meerdere parallelle modules.

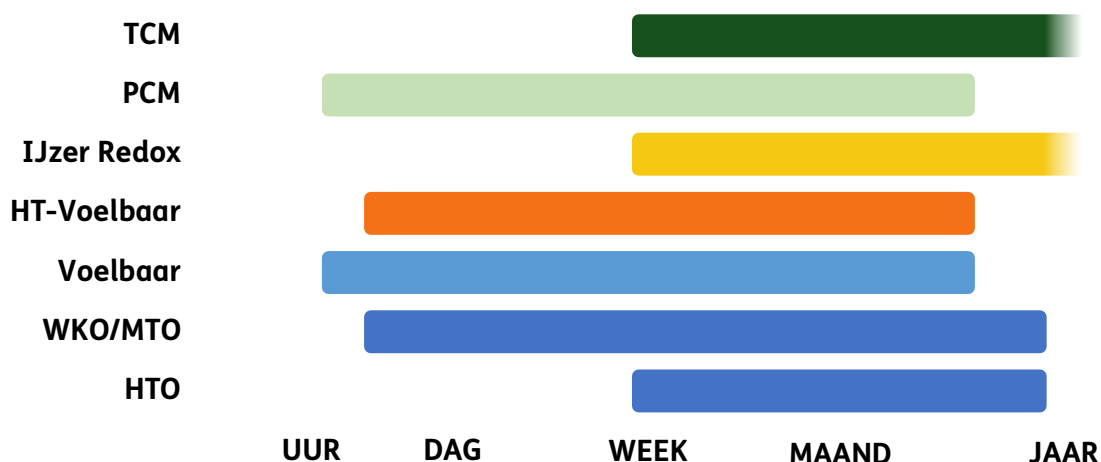
De meest ontwikkelde warmteopslagtechnieken in Nederland zijn WKO en MTO en decentrale voelbare opslag (alle onderdeel van voelbare opslag met water), hoge temperatuur voelbare warmteopslag in vaste materialen, en warmteopslag in PCM, met een TRL van 8 of 9 zoals te zien in Figuur 15.



Figuur 15. Aangegeven TRL en capaciteit per opslagtechnologie. Legenda: Voelbare opslag met water: lichtblauw; ATEs: donkerblauw; HT-voelbare opslag: oranje; PCM: lichtgroen; TCM donkergroen; Redox: geel. Let op: verschillende opslagopties worden mogelijk voor verschillende use-cases toegepast, dus zijn in de praktijk niet direct vergelijkbaar.

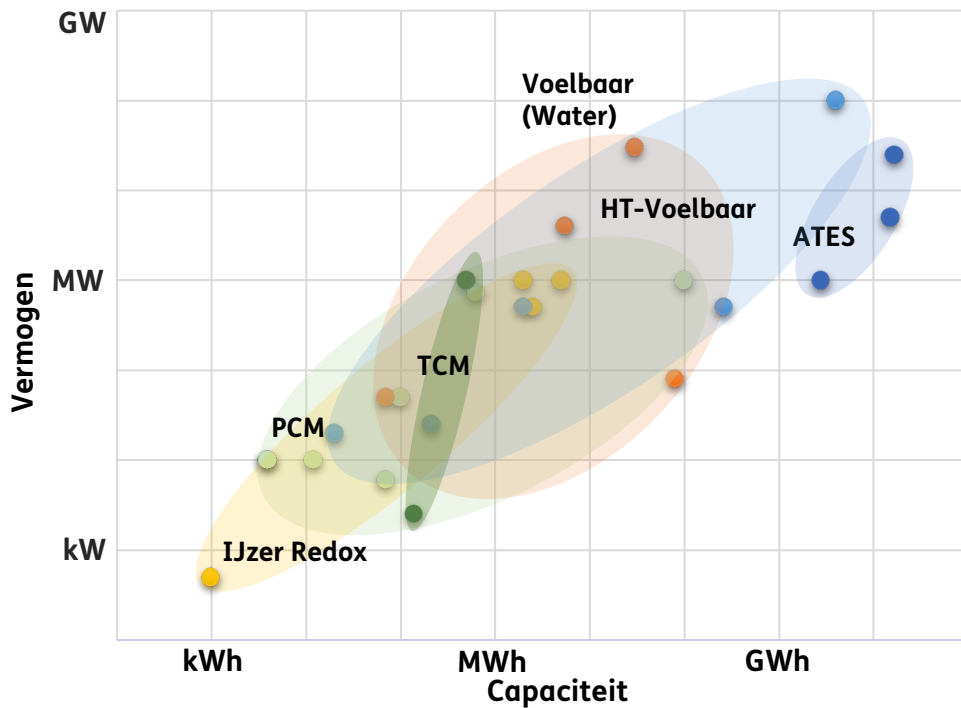
Opslagtechnieken met een TRL van 7 of lager welke nog in ontwikkeling zijn voor de gebouwde omgeving zijn HTO en warmteopslag in TCM. Warmteopslagstechnieken welke ontwikkeld worden vanuit een industriële toepassing met een mogelijke toepassing voor warmtenetten zijn hoge temperatuur voelbare warmteopslag in vloeibare materialen en IJzer Redox.

De minimum en maximum opslagduur voor de verschillende technologieën wordt indicatief getoond in Figuur 16. Hierbij is rekening gehouden met de input van de stakeholders; er is geen rekening gehouden met eventuele economische optimalisatie. De verschillende technieken die in Nederland worden ontwikkeld bieden toepassing als korte termijn opslag (dag en nacht warmtebuffer) tot langere termijn opslag (dag – week) tot lange-termijn opslag (zelfs tot seizoensopslag). Hierbij valt op dat twee technieken door middel van tijdsafhankelijke verliezen toepassing kunnen vinden als strategische opslag of warmtetransportmiddel, namelijk ijzer-redox opslag en TCM. Partijen hebben aangegeven dat de mogelijkheid tot doorlopen van kortere cycli een belangrijk aspect is voor de economische haalbaarheid van een opslagtechniek toegepast als buffer. Het is de verwachting dat langere termijnopslag (van maand tot seizoensopslag) een grotere maatschappelijke rol zal spelen als element in de energietransitie wanneer steeds meer energie opgewekt zal worden uit zon PV of zonnethermie.



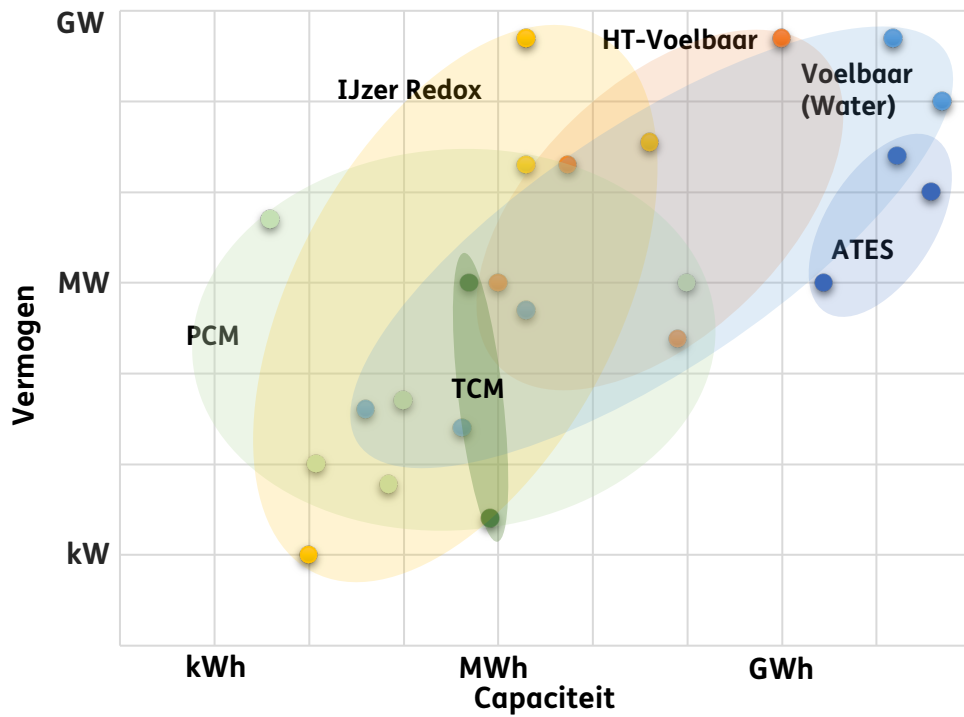
Figuur 16. Opslagduur per technologie. De maximale duur van TCM en IJzer Redox worden niet gegeven, omdat de verliezen niet tijdsafhankelijk zijn.

Het huidig maximaal te installeren vermogen en capaciteit als aangegeven door de respondenten van de vragenlijst wordt getoond in Figuur 17. Er lijkt een verband te bestaan tussen geïnstalleerde capaciteit en geïnstalleerd vermogen, als te zien door de concentratie van technieken rond de diagonaal. De uitzondering is ATES, dat momenteel de grootste capaciteit aanbiedt, maar met gelimiteerd vermogen. Reden is gelimiteerd warmtetransport en gelimiteerde temperatuur. Met name modulaire systemen hebben een directe relatie tussen capaciteit en vermogen. Het benodigde geïnstalleerde vermogen is afhankelijk van de piekvraag in de gebruikssituatie, en een toename in capaciteit voor het tegelijkertijd bedienen van bijvoorbeeld meer woningen of gebouwen zal gepaard gaan met een toename in benodigd vermogen. Hoewel een techniek mogelijk limieten heeft op het te leveren vermogen kan hierop geanticipeerd worden door middel van koppeling met een andere buffertechniek.



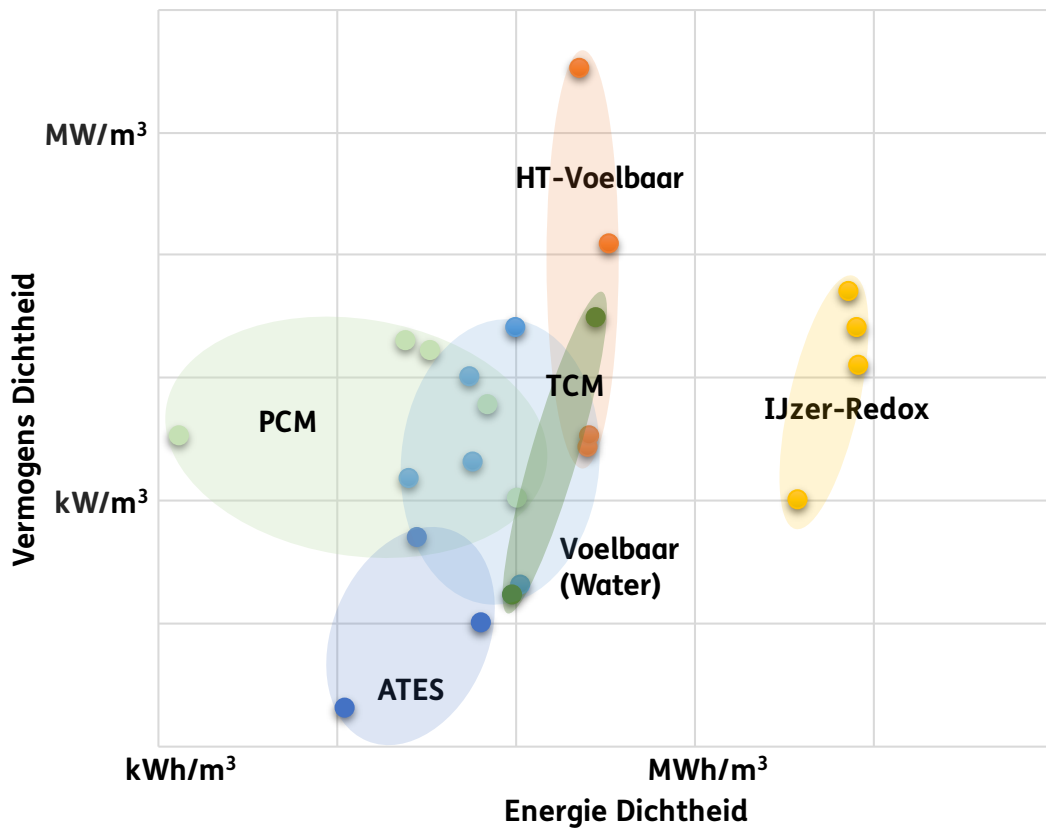
Figuur 17. Huidig maximaal te installeren vermogen en capaciteit als aangegeven door de respondenten voor de beschreven productmodules. ATES wordt gebruikt als verzamelnaam voor WKO, MTO, en HTO. Let op: verschillende opslagopties worden mogelijk voor verschillende use-cases toegepast, dus zijn in de praktijk niet direct vergelijkbaar.

De verwachte ontwikkeling in het maximaal te installeren vermogen en de maximaal te installeren capaciteit per product als aangegeven door de respondenten van de vragenlijst wordt weergegeven in Figuur 18. Voor deze producten is een ontwikkeltermijn aangegeven van tussen de 1 en 7 jaar.



Figuur 18. Toekomstig maximaal te installeren vermogen en capaciteit, binnen 1 tot 7 jaar als aangegeven door de respondenten voor de beschreven product modules. ATES wordt gebruikt als verzamelnaam voor WKO, MTO, en HTO. Let op: verschillende opslagopties worden mogelijk voor verschillende use-cases toegepast, dus zijn in de praktijk niet direct vergelijkbaar.

De ontwikkeling per technologie wordt in de volgende paragrafen in meer detail beschreven.



Figuur 19. Huidige vermogensdichtheid en energiedichtheid op systeemniveau als aangegeven door de respondenten voor de beschreven product modules. ATEs wordt gebruikt als verzamelnaam voor WKO, MTO, en HTO. Let op: verschillende opslagopties worden mogelijk voor verschillende use-cases toegepast, dus zijn in de praktijk niet direct vergelijkbaar.

Wanneer de ontwikkelaars bij het invullen van de enquêtes of tijdens de klankbordgroepsessies geen ontwikkelingsverwachtingen hebben aangegeven, worden de toekomstige technieken behandeld alsof ze op gelijk TRL-niveau als de huidige situatie staan.

De voornaamste aangegeven ontwikkelingen vinden plaats in de technieken met een lage TRL. Deze technieken verwachten toepassing in de industrie, waarvoor vermogen per installatie belangrijker is dan capaciteit. Uitrol van de technologie of vergroting van de schaalgrootte voor toepassing is te herkennen door een toename in zowel capaciteit als vermogen. Dit wordt voorzien voor HT-Voelbaar (voor industriële toepassing) en voor voelbare warmteopslag in water voor de gebouwde omgeving. Voelbare warmteopslag in water verwacht een capaciteit kunnen installeren die vergelijkbaar is met HTO en MTO systemen, zonder de limitatie van die technieken. MTO en HTO ontwikkelaars verwachten in de nabije toekomst een toename in capaciteit en vermogen.

Wat betreft warmteopslag dichtheid (Figuur 19) spant ijzer-redox de kroon, al is deze technologie niet direct vergelijkbaar met de andere warmteopslagstechnieken vanwege het feit dat formeel geen cyclus van laden en ontladen op basis van warmte plaatsvindt en respectievelijk waterstof en zuurstof benodigd zijn (zie boven). Wanneer dit buiten beschouwing wordt gelaten hebben HT-Voelbaar en TCM de hoogste opslagdichtheid van alle warmteopslagstechnieken. Deze technieken zijn bovengronds voorzien waardoor de capaciteit en vermogen ervan direct in relatie staan tot de voetafdruk van het systeem. Dit is niet zo voor ATEs en andere ondergrondse voelbare opslag (UTES), die in hun toepassingen een relatief

kleine bovengrondse voetafdruk hebben vergeleken met hun potentiële capaciteit en bijbehorend vermogen. Hierbij moet voor ondergrondse voelbare warmteopslag in water wel rekening gehouden met een maximale gewichtsbelasting van de bovengrond. Het dient opgemerkt te worden dat voor passieve PCM technieken de opslag en vermogensdichtheid minder relevant is vanwege de integratie ervan in bijvoorbeeld bouwdelen zoals wanden of plafonds.

Hierna wordt per technologiegroep in zogenaamde ‘bubbleplots’ een specifiek en meer gedetailleerd overzicht gegeven van de range van opslagcapaciteit en vermogen in de huidige situatie en in de toekomstige projectie zoals aangegeven door de respondenten van de vragenlijsten. In aanvulling daarop is de energiedichtheid weergegeven per technologie aan de hand van de grootte van de bubbels, eveneens voor de huidige en toekomstige situatie. Waar mogelijk is een referentiewaarde van een commercieel beschikbare technologie toegevoegd. Let op dat vanwege de grote verschillen in de verschillende technologiegroepen de grootte van de bubbels in de verschillende figuren niet overeenkomt met gelijkwaardige energiedichtheid.

Na dit overzicht is voor de verschillende technologieën een kort puntsgewijs overzicht gegeven van de belangrijkste eigenschappen per technologie, met daarbij de potentie en uitdagingen benoemd.

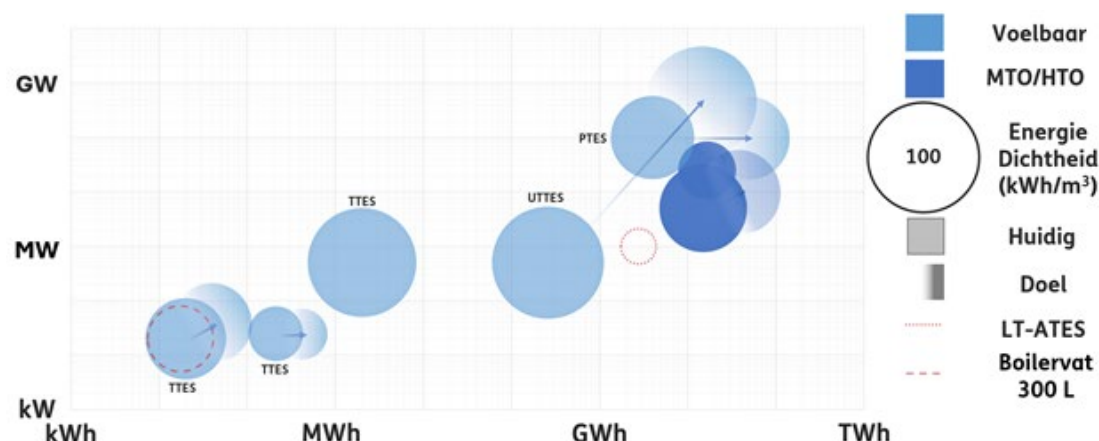
### 3.3.1 Ondergrondse en bovengrondse centrale en decentrale voelbare warmteopslag in water

MT- en HT-ATES en ‘bovengrondse’ (decentrale) voelbare opslag maken gebruik van water als opslagmedium. Omdat deze technieken water als medium gebruiken zijn ze goed schaalbaar, en daarmee goed te integreren in bestaande infrastructuur van de gebouwde omgeving. Onder andere is koppeling met geothermie en stadswarmte zeer goed mogelijk. Daarnaast hebben MTO en HTO potentie om te worden toegepast in de industrie, bij temperaturen hoger dan 100 °C.

Uitdagingen bestaan voor ATES voornamelijk uit de-risking. Voorafgaand aan toepassing is een bodeminventarisatie nodig om de geschiktheid van de locatie te waarborgen. Daarnaast is er momenteel relatief weinig toepassingskennis voorhanden. Uitrol van meer demonstratieprojecten en pilots zal bijdragen aan een betere kennisbasis en daarmee een beter overzicht van de mogelijke toepassingsuitdagingen. Daarnaast geldt vooral voor WKO dat gebouwkoppeling van gebouwen met een WKO systeem nog in de kinderschoenen staat. Nederland loopt hierin voorop, echter, er is vooralsnog geen kennispartij die dit als onderwerp adopteert.

Er bestaan voor decentrale opslag nog weinig producenten. Decentrale opslag heeft momenteel een gebrek aan incentive, dat opschaling van productie en daarmee grootschalige installatie verhindert. Eindgebruikers profiteren nog onvoldoende van de voordelen van de geïnstalleerde opslagtechnologie. Mogelijk biedt aanpassing van wetgeving op dit gebied hierin verandering.

Warmteopslag in water heeft de potentie om over een grote capaciteitsrange opslag te plegen. Zowel voor kleinschalige (tot MWh) als grootschalige (tot tientallen GWh) opslag biedt voelbare warmteopslag mogelijkheden. De gehele range die voelbare centrale en decentrale warmteopslag beslaat is weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20. Huidige representatieve opslagcapaciteit, energiedichtheid, en vermogen als aangegeven door de respondenten in hun productmodules, per ontwikkelaar van MTO/HTO bodemsystemen en voelbare warmte in water (van rechts naar links: PTES, ondergrondse TTES (UTES), en TTES). De pijlen geven een toekomstige situatie aan, met voorziene ontwikkeling naar een realistisch einddoel binnen een realistisch tijdsbestek als aangegeven door de betreffende respondent. Ter referentie zijn een buffervat van 300L (decentrale standaard ‘boilervat’, gebaseerd op een standaard OEG 300L buffervat incl. isolatie bij 95 degC.<sup>16</sup>) en een WKO systeem zoals aangegeven in de enquête opgenomen. Let op: De opslagopties bestaan nagenoeg altijd als modules voor een bepaalde use-case die de genoemde combinatie van capaciteit en vermogen vertegenwoordigen. Indien noodzakelijk kunnen meerdere modules naast elkaar geïmplementeerd worden om een navenant hogere opslagcapaciteit te bewerkstelligen en zo inzetbaar te zijn voor een andere use-case. Verschillende hier weergegeven opslagopties worden daardoor mogelijk voor verschillende use-cases toegepast, en zijn dus in de praktijk niet altijd direct vergelijkbaar.

In de gebouwde omgeving wordt ATES gebruikt als centrale of collectieve warmteopslag en heeft in Nederland een grote potentie voor toepassing met een relatief lage investeringskosten. De mogelijkheid voor directe koppeling met een warmtenet zonder warmtepomp maakt HTO en MTO aantrekkelijk voor congestieverlichting en -preventie, al is er nog wel ontwikkeling nodig voor grootschalige koppeling aan warmtenetten. Met enkele tientallen gerealiseerde projecten is er momenteel nog een beperkte ervaring met MTO en HTO systemen<sup>17,18</sup>. De Nederlandse ondergrond is zeer geschikt voor WKO systemen maar voor MTO en HTO systemen is het nog onduidelijk waar het toegepast kan worden. De vergunningsprocedure voor een MTO of HTO systeem is momenteel langdurig en vormt een aanzienlijk deel van de investering. Er zijn strengere eisen aan de ondergrond, en de techniek kan niet altijd voldoen aan het balansprincipe volgens de waterwet; dit is dus een aandachtspunt. Er kan dieper geboord worden dan 500 meter, maar dit vertraagt het vergunningsproces. Nieuwe concepten zoals een ATES Triplet en de ontwikkelen van ATES systemen die warmte opslaan bij 120°C beginnen in hun ontwikkeling en kunnen in de toekomst zorgen voor meer flexibiliteit in de toepassing.

Decentrale voelbare warmteopslag heeft twee ontwikkelaars op TRL 8 en wordt ontwikkeld in een bovengrondse (zie als voorbeeld Figuur 21) en ondergrondse variant, gericht op individuele woningen of gebouwen met een capaciteit van 20 kWh tot 200 kWh respectievelijk. De ondergrondse variant heeft een hogere potentiële capaciteit, en heeft een toegang tot grondoppervlak nodig voor installatie. De bovengrondse variant kan binnenshuis

<sup>16</sup> OEG, <https://www.oeg.net/nl/buffervat-300-l-516005299>, bezocht Maart 2024

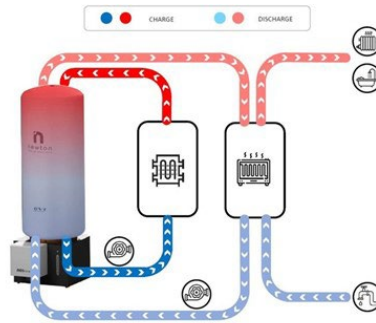
<sup>17</sup> Oerlemans et al.; State of the art of HT-ATES in The Netherlands, publicatiedatum 2019

<sup>18</sup> Oerlemans et al.; Hoge Temperatuur Opslag: Potentieel en kosteninschatting, [https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2023/06/presentatie\\_potentieel\\_kosten\\_hoge\\_temperatuur\\_opslag\\_zuid-holland\\_warmteatelier\\_13jun23.pdf](https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2023/06/presentatie_potentieel_kosten_hoge_temperatuur_opslag_zuid-holland_warmteatelier_13jun23.pdf), publicatiedatum juni 2023.



worden geïnstalleerd en heeft hiermee een universeel toepassingsgebied in de gebouwde omgeving.

Voelbare warmteopslag in Nederland voor langere termijn heeft een grote potentie met momenteel weinig tot geen technische belemmeringen. De warmteopslagsystemen maken gebruik van toegankelijke bouwmaterialen en bestaande componenten.



Figuur 21: Het NEStore principe van Newton Energy Solutions

Centrale ondergrondse opslag (niet in aquifers) heeft minder fysieke beperkingen op de schaalgrootte van de opslag, en kan daardoor in grotere capaciteiten worden geïnstalleerd dan decentrale opslag. Met een relatief kleine voetafdruk voor benodigde bovengrondse componenten is alleen beschikbare ruimte en gewichtsbelasting van de bovengrond beperkend. Het type ondergrond heeft wel invloed op de installatiekosten. Directe koppeling met een MT warmtenet of de centrale verwarming van een gebouw is mogelijk door hogere temperaturen. Zonthermie en een (hoge temperatuur) warmtepomp als bron maken de techniek aantrekkelijk voor het voorkomen en verminderen van netcongestie. Projectaanvragen en geplande doorontwikkeling laten zien dat er een behoefte is aan vergrote capaciteit en vermogen om grotere economische schaalvoordelen te kunnen behalen in de toekomst. Het faciliteren van deze ontwikkeling zou het mogelijk maken om op plekken waar HTO en MTO niet mogelijk zijn equivalente capaciteiten aan te leggen met decentrale voelbare ondergrondse opslag, om bijvoorbeeld voor meer dan 1000 woningen seizoensopslag te verwezenlijken.

### 3.3.1.1 Overzichtsdata MTO/HTO



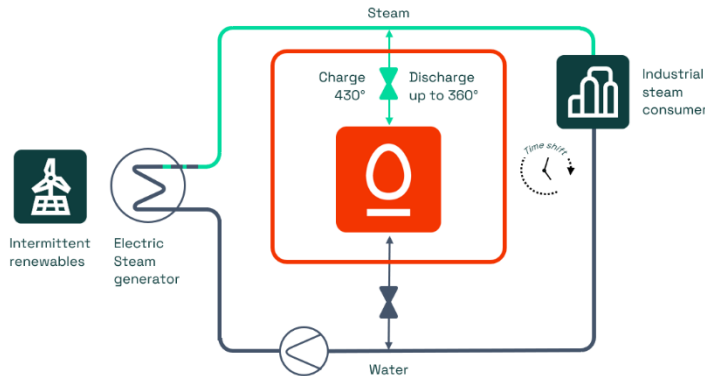
Figuur 22: Pompinstallatie voor de HTO demo in Middenmeer (bron: IF Technology)

<b>TRL:</b>	7-8 (MTO), 6-7 (HTO)
<b>Toepassing:</b>	Centrale opslag gebouwde omgeving; industrie; koppeling met geothermie; buffer warmtenet
<b>Potentie:</b>	(zeer) hoog; grootschalige toepassing mogelijk; klein bovengronds ruimtegebruik per capaciteit  Nederland koploper wereldwijd, kan kennispositie voor export gebruiken  Koude opslag mogelijk (WKO)
<b>Uitdagingen:</b>	Ruimtelijke ordening – Bodeminventarisatie nodig.  HT ATES: meer toepassingskennis nodig om risico's te kennen

### 3.3.1.2 Overzichtsdata decentrale voelbare warmteopslag

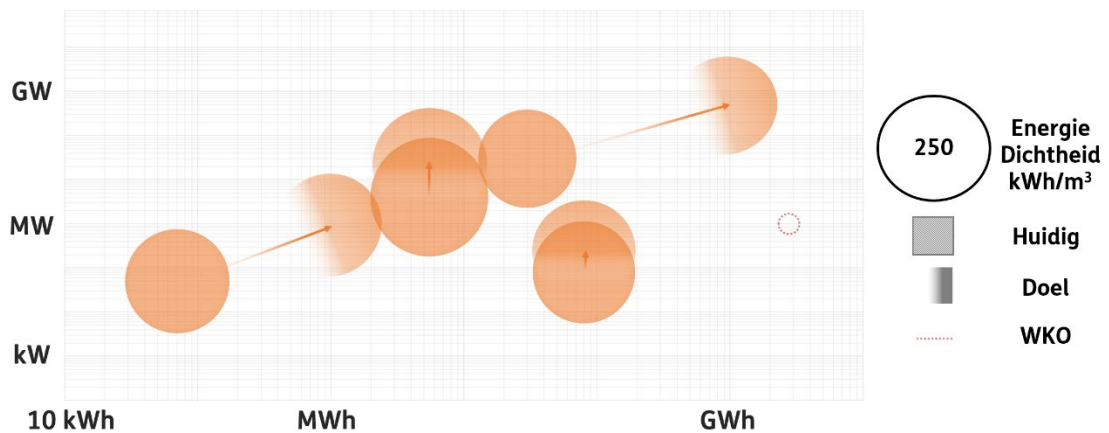
<b>TRL:</b>	Typisch 8-9; producten verkrijgbaar
<b>Toepassing:</b>	Gebouwde omgeving en industrie; koppeling warmtenet
<b>Potentie:</b>	(zeer) hoog; geen technische drempels  Makkelijke koppeling bestaande infrastructuur  Brede toepassing  Schaalbaar  Koude opslag mogelijk
<b>Uitdagingen:</b>	Opschalen van productie door gebrek aan financiering  Weinig producenten  Gebrek aan certificering/normering;  Wetgeving - Eindgebruikers profiteren nog onvoldoende van de voordelen van geïnstalleerde opslagtechnologie

### 3.3.2 Hoge temperatuur voelbare warmteopslag



Figuur 23. Schematische weergave van hoge temperatuur warmteopslag (EnergyNest)

Hoge temperatuur voelbare warmteopslag wordt voornamelijk ontwikkeld voor industriële toepassingen, met één ontwikkelaar voor de gebouwde omgeving. Op korte termijn vindt ontwikkeling in de hoge temperatuur voelbare warmte voornamelijk plaats om een toename in vermogen per installatie te bewerkstelligen. Op langere termijn wordt verwacht dat de capaciteit en vermogen per installatie aanzienlijk toe zal nemen, als weergegeven in Figuur 24, met de voornaamste toename in een industriële toepassing.



Figuur 24. Huidige representatieve opslagcapaciteit, energiedichtheid, en vermogen per ontwikkelaar van hoge temperatuur voelbare warmte als aangegeven door de respondenten, met verwachte ontwikkeling binnen een aangegeven tijdsbestek. Let op: HT-voelbare opslag wordt mogelijk voor verschillende use-cases toegepast dan de andere opslag opties, dus is in de praktijk niet altijd direct vergelijkbaar.

Er is momenteel een producent van hoge temperatuur voelbare warmteopslag in de gebouwde omgeving. Deze slaat warmte op in een vaste stof door middel van direct elektrische verhitting. Het systeem maakt elektrificatie van warmteopslag mogelijk en kan daarmee potentieel gebruikt worden om netcongestie te voorkomen door middel van een directe koppeling met bijvoorbeeld PV of windenergie. Het systeem kan vanwege de hoge benodigde temperaturen niet gebruikt worden in combinatie met zonthermie of met een warmtepomp. Door middel van een korte termijnbuffer wordt het direct vermogen ontkoppeld van de temperatuur van het systeem. De ontwikkelaar geeft aan het specifiek vermogen significant te willen verhogen. Het vaste medium en de eenvoud van de

technologie drukken de CAPEX en zorgen door middel van een lange levensduur voor een lage OPEX. Een gebrek aan mogelijke certificatie bemoeilijkt momenteel nog de vergunningprocedures en vormt een barrière voor het aantrekken van investeerders. De ontwikkelaar geeft aan dat investering nodig is om op te schalen.

Hoge temperatuur voelbare warmteopslag in de industrie bestaat uit opslag in beton als vast medium, en gesmolten zout voor opslag in vloeibaar medium, te gebruiken voor dag tot week opslag. Twee ontwikkelaars hebben momenteel TRL 8 bereikt, met een huidige capaciteit van enkele tot tientallen MWh. Tijdens de stap naar marktadoptie zal de verwachte capaciteit en vermogen per installatie toenemen richting 100 MWh en GW. Restwarmte of elektriciteit kan gebruikt worden als bron, waarmee elektrificatie mogelijk wordt en procesefficiëntie verhoogd. Er wordt gebruik gemaakt van modulaire systemen, waarmee schaalbaarheid gewaarborgd is. De ontwikkelaars voor industriële toepassing hebben aangegeven dat buiten koppeling met zonthermie er momenteel geen ontwikkeling verwacht wordt voor toepassing in de gebouwde omgeving.

### 3.3.2.1 Overzichtsdata hoge temperatuur voelbare warmteopslag

<b>TRL:</b>	Typisch 8-9; producten verkrijgbaar
<b>Toepassing:</b>	Industrie en gebouwde omgeving; centraal/decentraal
<b>Potentie:</b>	Hoog; relatief lage CAPEX/OPEX door eenvoudige technieken en materialen Duurzame materialen Schaalbaar
<b>Uitdagingen:</b>	Opschalen – gebrek aan investeringen Weinig producenten Gebrek aan certificering/normering

### 3.3.3 PCM warmteopslag



Figuur 25. Geïntegreerde PCM modules in klimaatsysteem van DuraFlow

De toepassingen van PCM materialen in de gebouwde omgeving (zie voorbeeld in Figuur 25) hebben een hoge potentie, met een brede variatie aan toepassingsvormen. In totaal zijn er vijf warmteopslag ontwikkelaars waarvan drie ontwikkelaars actief zijn in de gebouwde omgeving op hoog TRL-niveau.

Een significante toename in de toepassing van de technologie wordt verwacht in de komende vijf jaar in de gebouwde omgeving, terwijl industriële toepassing verder zal ontwikkelen met een significante toename van capaciteit en vermogen op de geschikte temperatuurniveau's.

De toepassing van PCM voor passieve warmteopslag in bouwmaterialen is een effectieve manier om de effectieve warmtecapaciteit van de gebouwde omgeving te verhogen zonder een significante toename in benodigde bouwmaterialen. Omdat de warmteopslag geïntegreerd wordt in al gebruikte ruimte is er minder behoefte aan compactheid van de opslag oplossingen. Passieve PCM warmteopslag heeft zeer lage onderhoudskosten en de eenvoud van implementatie maakt het een aantrekkelijke optie voor de reductie van de energievraag voor verwarming en koeling binnen de gebouwde omgeving, mits het juiste temperatuurniveau voor de faseovergang kan worden benut. PCM modules hebben een korte productieketen, en kunnen met een korte instructie geïnstalleerd worden. Hiermee is het een snel schaalbare optie voor warmteopslag. Optimale implementatie vereist echter nog wel integratie in het energie-management en klimaat-beheersysteem.

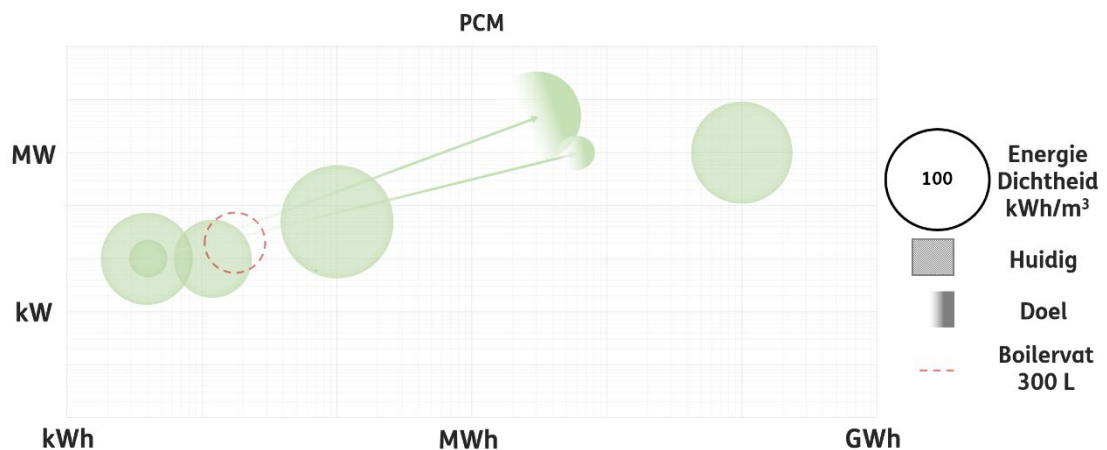
Actieve PCM warmteopslag in grootschalige ondergrondse warmteopslag is een aanpassing op de al bestaande varianten van grootschalige ondergrondse voelbare warmteopslag. Het systeem op basis van ijs kan geïmplementeerd worden in verschillende groottes als centrale en decentrale opslag. Implementatie is veelal gelimiteerd door beschikbare ruimte.

Daarnaast wordt door de ontwikkelaar een tekort aan personeel aangehaald als limitering

voor opschaling. De techniek is ver ontwikkeld en verbetering zal voornamelijk nog plaatsvinden op componentniveau.

Een decentrale vorm van actieve PCM warmteopslag is de toepassing als warmwaterbuffer, welke wordt geïnstalleerd in koppeling met een PVT (PV-thermisch) systeem (Flextherm Eco, zie referentie<sup>15</sup>). Momenteel heeft het systeem een maximale capaciteit van 14 kWh met een effectieve opslagduur van meer dan een week. Het systeem wordt gebruikt voor warm tapwater en verwarming. Naast onbekendheid bij de eindgebruiker is het gewicht een limiterende factor voor het verder opschalen van de geïnstalleerde capaciteit.

Dag en nacht temperatuur-stabilisatie voor koeling in datacenters is een toepassing van PCM's met TRL 9 in de industrie, waarin verder ontwikkeld wordt richting een hoger vermogen van de PCM modules. Toepassing van PCM met een transitie temperatuur van 150 °C wordt onderzocht als buffer voor het verhogen van de efficiëntie van industriële batch processen, en heeft momenteel TRL 5. De industriële toepassingen van PCM warmteopslag zijn momenteel niet direct toepasbaar in de gebouwde omgeving. Onderstaand (Figuur 26) is een overzicht gegeven van de range aan opslagcapaciteit en vermogen dat voor PCM en TCM is opgegeven door de respondenten, zowel voor de huidige stand der techniek als na de verwachte ontwikkeling.



Figuur 26. Huidige representatieve opslagcapaciteit, energiedichtheid, en vermogen als aangegeven door de respondenten voor PCM warmteopslag, met verwachte ontwikkeling binnen een aangegeven tijdsbestek. Let op: PCM opslag wordt mogelijk voor verschillende use-cases toegepast dan de andere opslag opties, dus is in de praktijk niet altijd direct vergelijkbaar.

### 3.3.3.1 Overzichtsdata PCM

TRL:	Typisch 5-9; producten verkrijgbaar
Toepassing:	Centrale/decentrale ondergrondse opslag; Passieve temperatuurstabilisatie in bouwmaterialen; Decentrale compacte opslag; Temperatuurstabilisatie koelsystemen; Korte termijn buffer industrie



<b>Potentie:</b>	<p>Zeer Hoog; Zeer breed toepassingsgebied, materialen breed beschikbaar</p> <p>Relatief lage CAPEX/OPEX passieve systemen – korte productieketen, eenvoudige installatie en zeer lage onderhoudskosten</p> <p>Ook koudeopslag mogelijk</p>
<b>Uitdagingen:</b>	<p>Onbekendheid – Bestaande verkoopstructuren van alternatieve oplossingen verminderen het zicht van de klant op de voordelen van PCM's</p> <p>Opschalen productie actieve PMC systemen is complex (vanwege gewicht)</p> <p>Weinig producenten</p>

### 3.3.4 TCM warmteopslag

In Nederland zijn er drie ontwikkelaars van warmteopslagsystemen op basis van TCM actief, met een opgegeven TRL tussen de 5 en 7. De ontwikkelingen zijn alle gericht op toepassing in de gebouwde omgeving, waarbij zowel warmte als elektriciteit als warmtebron voor opslag kunnen worden ingezet. Use-cases die genoemd worden zijn decentrale langdurige warmteopslag, warmtetransport (als 'rijdend warmtenet'), het voorkomen van piekbelasting en opwaardering van laagwaardige warmte (chemische warmtepomp).

Comfort en onafhankelijkheid van het energienetwerk en van eventuele buitenlandse aanbieders worden gebruikt als unique selling point, waarbij terugverdientijd minder van belang wordt geacht. Op deze manier worden early adopters geworven die ondanks de relatief hoge aanschafprijs toch tot koop moeten overgaan.

Daarnaast wordt genoemd dat het voorkomen van piekbelasting in de elektriciteitsvoorziening mogelijk ook een interessante businesscase is. Naast kleinschalige toepassing die in groten getale wordt toegepast zou dit ook als centrale opslagtechnologie toegepast kunnen worden.

De ontwikkeling van TCM als te zien in Figuur 26 wijst op grotere capaciteit voor TCM systemen. Voor TCM's betekent een grotere capaciteit niet noodzakelijkerwijs een groter opslagvolume, omdat bij verhoging van opslagdichtheid het volume mogelijk zelfs verkleind kan worden.

De koppeling van thermochemische warmteopslag met andere technologieën zoals warmtepompen wordt momenteel ook onderzocht. Hiermee zou een hogere efficiëntie van opslag mogelijk worden, wat directe koppeling van het elektriciteitsnet interessanter zou maken.

Naast verwarming met thermochemische materialen kan ook koeling worden geleverd, wanneer niet de warmte maar koude zijde van de opslagtechnologie als nuttige energie wordt beschouwd. Bijkomend voordeel is dat voor koeling tijdens warme perioden mogelijk meer cycli gemaakt kunnen worden, waarmee de terugverdientijd mogelijk kan worden bekort.

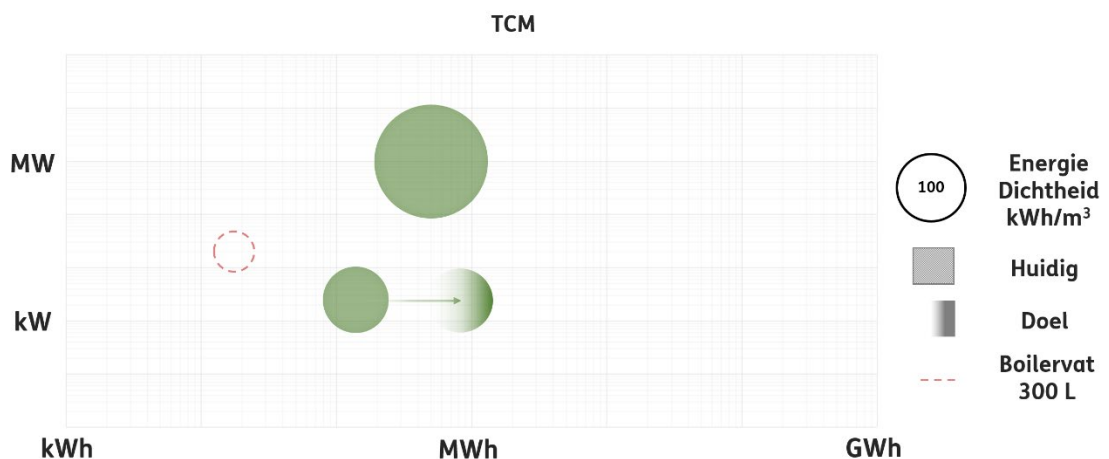
Een juiste belemmering voor doorontwikkeling als genoemd in de respons op de vragenlijsten is een gebrek aan financiering. Nadat de Europese Commissie in het verleden een aantal calls heeft gewijd aan ontwikkeling van thermochemische opslagtechnologie om van TRL 5 naar TRL 8-9 door te ontwikkelen is dit de laatste jaren niet meer het geval.

Daarnaast ontbreekt stimulering om de slag te maken van enkele demonstratiesystemen naar grootschalige productie en integratie in de gebouwde omgeving.



### 3.3.4.1 Overzichtsdata TCM

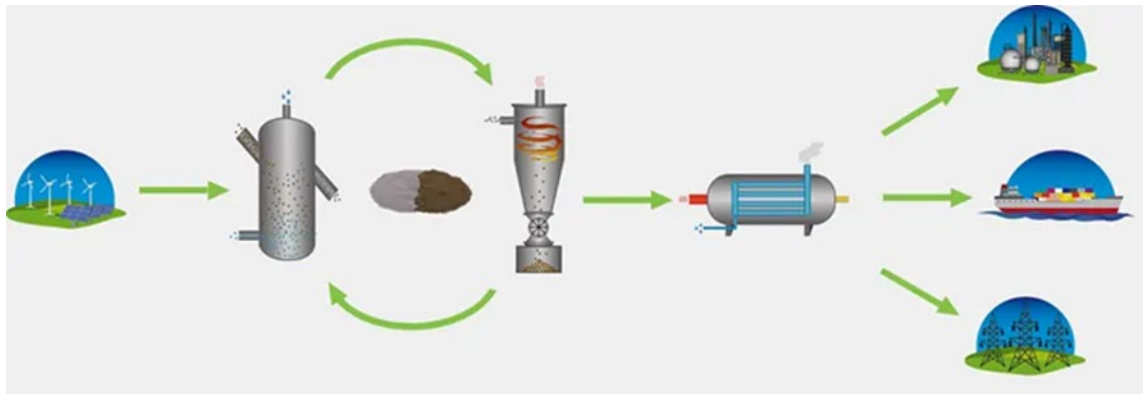
<b>TRL:</b>	TRL typisch 5-7; prototypes gedemonstreerd
<b>Toepassing:</b>	Decentrale lange-termijn warmteopslag; collectieve systemen, voorkomen piekbelasting netwerk, warmte transport; opwaardering warmte.
<b>Potentie:</b>	Hoog; Verlies-vrije opslag, materialen breed beschikbaar  Ook koudeopslag mogelijk
<b>Uitdagingen:</b>	Relatief hoge CAPEX/OPEX – Complex systeem voor installatie, mogelijk onderhoudsintensief  Gefragmenteerde subsidie – Geen structurele nationale / Europese subsidies voor doorontwikkeling naar TRL7; zeer beperkte subsidies voor opschaling productie na TRL9



Figuur 27: Huidige representatieve opslagcapaciteit, energiedichtheid, en vermogen als aangegeven door de respondenten voor TCM warmteopslag, met verwachte ontwikkeling binnen een aangegeven tijdsbestek.

### 3.3.5 Redox warmteopslag

Nederland is momenteel koploper in de ontwikkeling van ijzer-redox (Fe-Redox) technologie en heeft een sterke kennispositie met een ontwikkeld ecosysteem dat sterke banden heeft met de industrie en een diepe samenwerking met academische instituten, voornamelijk met de TU Eindhoven.



Figuur 28. Schematische weergave van het Fe-Redox proces, met links reductie en rechts oxidatie voor generatie van warmte, vermogen, of elektriciteit. (bron: Metalot)

Fe-Redox wordt voornamelijk ontwikkeld voor industriële toepassing waar ijzer als CO<sub>2</sub>-vrije brandstof kan worden toegepast voor hoge temperatuur verwarming. Vanwege de koppeling met industrie zal de ontwikkeling voornamelijk plaatsvinden richting hogere vermogens. De oxidatiestap is gedemonstreerd voor toepassing in de gebouwde omgeving door koppeling van de technologie met een warmtenet. De verwachte toepassing is voor hoog vermogen piekvraag waar WKO of voelbare warmteopslag niet kan voldoen vanwege een trage reactietijd. De opslagcapaciteit is onafhankelijk van het te leveren vermogen waardoor op langere termijn indien nodig grote energiereserves kunnen worden opgebouwd. Voor opladen (reductie) is de technologie afhankelijk van de waterstofeconomie. Deze afhankelijkheid kan op termijn leiden tot een vertraging in de verdere ontwikkeling indien in de nabije toekomst onvoldoende waterstofinfrastructuur beschikbaar komt.

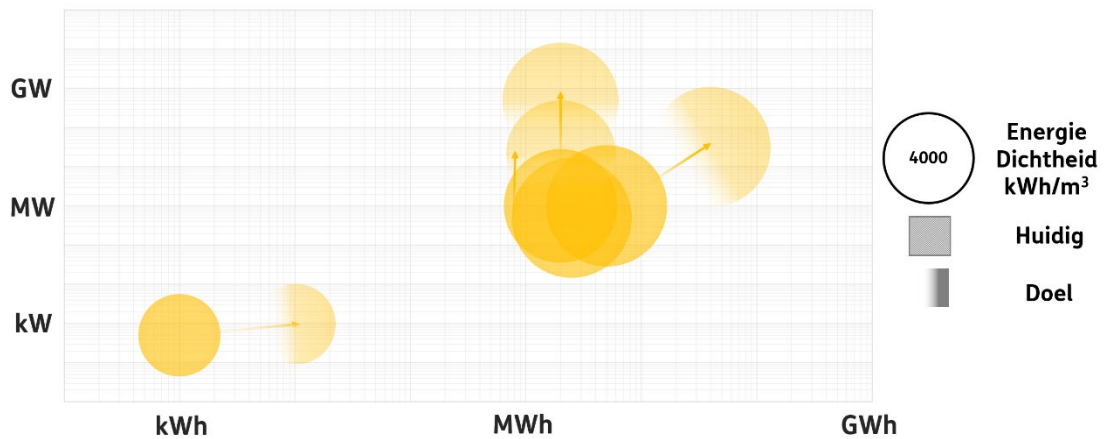
De reductiestap op basis van waterstof is momenteel op TRL 6 (industriële pilot RIFT in Arnhem) en zal op korte termijn doorontwikkelen tot TRL 8 (outlook 2025). Er wordt momenteel ook gekeken naar alternatieve methodes van reductie, bijvoorbeeld directe elektrochemische reductie. De reductiestap geeft momenteel nog een uitdaging voor de economische haalbaarheid van het proces. Deze stap zal mogelijk alleen plaatsvinden op locaties waar waterstofgeneratie en een overschot aan duurzame elektriciteitsproductie wordt verwacht. Voor off-site transport wordt momenteel gebruik gemaakt van bestaande infrastructuur (truck, trein, schip). Voor op en overslag van grote volumes ijzerpoeder zijn kolenterminals zeer geschikt. Gezien de dalende vraag aan kolen biedt ijzerpoeder voor deze partijen ook een toekomstig verdienmodel. Voor on-site transport worden nu mechanische transportsystemen gebruikt in de huidige pilot installaties, die grotendeels gebruik maken van bestaande technologie. Voldoende aan- en afvoer moet bij grootschalige toepassing gewaarborgd kunnen worden. Daarbij moeten energieverliezen tijdens transport worden voorkomen.

De complexiteit van de technologie, onder andere in verband met intern transport van metaalpoeder met de hoge temperaturen tijdens het proces, betekent dat de technologie momenteel een relatief hoge CAPEX heeft per geleverd vermogen. De verwachting is echter bij de ontwikkelaar dat dit zal afnemen naarmate het vermogen toeneemt.

Doorontwikkeling en ervaring door middel van projecten zullen ook leiden tot betere en bredere systeemintegratie.

Decentrale toepassing van redox warmteopslag bevindt zich momenteel nog in TRL 3-6 bij verschillende ontwikkelaars. Deze technologie zal eerst moeten worden gedemonstreerd op schaalbaarheid alvorens doorontwikkeling kan plaatsvinden.

Onderstaand (Figuur 29) wordt een overzicht gegeven van de range aan opslagcapaciteit en vermogen dat voor redox warmteopslag is opgegeven door de respondenten, zowel voor de huidige stand der techniek als na de verwachte ontwikkeling.



Figuur 29. Huidige representatieve opslagcapaciteit, energiedichtheid, en vermogen als aangegeven door de respondenten, per ontwikkelaar van redox warmteopslag, met verwachte ontwikkeling binnen een aangegeven tijdsbestek. Let op: Redox warmteopslag wordt mogelijk voor verschillende use-cases toegepast dan de andere opslag opties, dus is in de praktijk niet altijd direct vergelijkbaar.

### 3.3.5.1 Overzichtsdata Redox warmteopslag

<b>TRL:</b>	Typisch 3-6; Prototypes gedemonstreerd
<b>Toepassing:</b>	Industrie; Strategische Opslag; Piekvraag levering warmtenet
<b>Potentie:</b>	Middel tot hoog; Nederland heeft kennispositie Hoge temperatuur (1200+ °C) generatie Hoge energiedichtheid; Geen verlies over tijd
<b>Uitdagingen:</b>	Afhankelijkheid waterstof en ijzer-prijs Reductie en regeneratie nog laag TRL Relatief hoge CAPEX per geleverd vermogen (NB: niet per energiec capaciteit) Transport infrastructuur ontbreekt – nog geen voorzieningen aanwezig voor grootschalig transport van geladen/ontladen ijzerpoeder

# 4 Toepassingsvoorbeelden (use-cases)

## 4.1 Introductie

Zoals ook weergegeven in de Routekaart Energieopslag<sup>7</sup>, sluit energieopslag in de vorm van warmte goed aan bij de Nederlandse energievraag. Ruwweg de helft van de totale energievraag is voor warmte, en deze kent duidelijke pieken (winter, ochtend/avond) en dalen (zomer, overdag).

Voor warmteopslag bestaan markten die de volgende doelen of functies dienen:

- Het balanceren van vraag en aanbod (op korte, middellange en lange termijn);
- Het verlichten van netcongestie;
- Het voorzien van de warmtepiekvraag;
- Het bieden van strategische voorraden.

Het balanceren van vraag en aanbod binnen het elektriciteitssysteem en het verlichten van netcongestie door warmteopslag kan via Power-to-Heat (P2H). Dat gebeurt nu met name met grote en kleine warmwater tanks, maar zou ook moeten kunnen met andere warmteopslagstechnieken. Waar het gaat om de warmtepiekvraag, wordt deze momenteel voornamelijk bediend door gas. In de toekomst dient deze te worden vervangen door de combinatie van duurzame warmtebronnen, seizoensopslag en korte-termijn opslag.

Het belangrijkste verschil tussen elektriciteits- en moleculenopslag enerzijds en warmteopslag anderzijds, is dat de aard van warmteopslag zeer lokaal is. Er bestaan geen regionale of internationale warmte-markten, omdat warmte (middels warmtenetten) met de huidige technieken slechts beperkt te transporteren is. Dat verandert wellicht met de komst van thermochemische opslag, dat in principe oneindig houdbaar is (zonder warmteverlies in tijd of transport), maar deze technologie is nog in ontwikkeling (TRL 5-6, zie boven).

Er zijn verschillende soorten marktmodellen voor warmtelevering die uiteenlopen van traditionele warmtebedrijven die verantwoordelijk zijn voor de hele keten (van opwek naar eindgebruiker) en (open) warmtenetten waar andere partijen verantwoordelijk zijn voor de transport- en distributie infrastructuur en levering aan de eindgebruiker. Hierbij kunnen de verschillende onderdelen van de keten in handen zijn van zowel private als publieke partijen (met name gemeentes) of combinaties daarvan. Op 25 oktober 2022 is in de Tweede Kamer een voorstel ingediend voor collectieve warmtesystemen, waarbij warmte-infrastructuur in de toekomst voor meer dan 50% in handen is van een publieke partij en private partijen als minderheidsaandeelhouders kunnen deelnemen.<sup>19</sup> De maximale tarieven voor warmtelevering aan kleinverbruikers (bijv. huishoudens) worden bepaald door de ACM. Er zijn geen maximale tarieven voor warmtelevering aan grootverbruikers.

<sup>19</sup> Kamerstuk 30196-799; <https://www.tweedekamer.nl/downloads/document?id=2023D31224>

De bruikbaarheid en potentie van verschillende technieken voor warmteopslag 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. Onderstaand worden een aantal realistische en richtinggevende use-cases beschreven die gebruikt worden om het belang van prestatie-eisen af te leiden en de gewenste waarden van die prestatie-eisen mede te bepalen, ter ondersteuning aan de innovatieontwikkelingen in de markt voor warmteopslag. De cases zijn bedoeld als voorbeeld, en daarmee een leidraad voor het begrip van beschreven warmteopslagtechnieken zodat deze duidelijk in het kader worden geplaatst van een gebruikerswens en niet zuiver technisch worden beschouwd. De cases zijn niet bedoeld om te worden gebruikt om daadwerkelijke warmte opslagtechnologie mee te dimensioneren, of daaraan een positieve businesscase te verbinden.

## 4.2 Use-cases MJP CCO roadmap 2016

In de versie van de roadmap uit 2016<sup>4</sup> werd uit een scala van use-cases een selectie gemaakt van drie. De long-list van use-cases bevatte de volgende use-case beschrijvingen: 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 zonnewarmte; 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); Warmteopslag voor warmtenet (centrale opslag); Warmteopslag voor CHP plants en – WKK biogas; Trigeration warmte/koeling met WKK; Flatgebouw duurzaam verwarmen en warm tapwater; Goed geïsoleerde woning verwarmen met magnetocalorische warmtepomp.

Uit deze long-list zijn destijds 3 use-cases uitgewerkt, afhankelijk van hoe relevant de case geacht werd voor de markt (een case met een hoog toepassingsgebied kreeg een hogere score dan een case met een beperkte toepasbaarheid), en van hoe illustratief de case was voor de vraagstelling (een case die meer eisen stelt aan compactheid en de noodzaak voor opslag kreeg een hogere score). De destijds uitgewerkte cases waren: 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 kan 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).

Omdat de omschrijving van de hier genoemde use-cases tamelijk summier was, is gemeend een iets uitgebreidere beschrijving te geven van mogelijke use-cases. Deze is hieronder opgenomen.

## 4.3 Use-cases Innovatieroadmap warmteopslag 2024

In 2050 moeten bijna 7 miljoen woningen en 1 miljoen andere gebouwen aardgasvrij zijn. Tot en met 2030 is in het Klimaatakkoord de afspraak om 1,5 miljoen woningen en andere gebouwen te verduurzamen. Dit zal gebeuren volgens het Nationaal Programma Nationale Warmte. Warmtevoorziening uit fossiele bronnen zal worden vervangen en nieuwe projecten zullen worden ontwikkeld zonder aansluiting op het fossiele netwerk.

Op korte termijn zal de toename van energieopwekking uit hernieuwbare bronnen en elektrificatie door middel van de grootschalige adoptie van warmtepompen de vraag naar korte termijn (dag tot week) decentrale en centrale opslag doen toenemen. Op locaties waar elektrificatie niet mogelijk is zal de vraag naar korte en langere termijn opslag toenemen, om de overstap weg van fossiele brandstoffen voor warmte te faciliteren.

Voor seizoensopslag van warmte ligt de focus op centrale collectieve systemen voor de gebouwde omgeving. Het gaat om warmteopslag die een groot of klein warmtenet van (additionele) warmte kan voorzien, en voor korte en lange termijn buffering om integratie van duurzame warmtebronnen in warmtenetten te optimaliseren. Warmtenetten hebben de potentie om in Nederland een derde van de benodigde warmte in de gebouwde omgeving te leveren.<sup>20</sup>

Daarnaast zal koudeopslag relevanter worden in de toekomst naarmate zomers warmer worden en hittegolven vaker en langer zullen voorkomen.

Voorts zal warmteopslag in de industrie een standaard worden om proces efficiëntie te verhogen, om de CAPEX en OPEX van elektrificatie te reduceren, en om elektrificatie te faciliteren.

Zowel ondergrondse als bovengrondse systemen worden in een collectief systeem (warmtenet) gebruikt. Onder deze vorm van opslag vallen onder andere bodemenergie systemen waaronder warmte/koudeopslag (WKO) en gesloten bodemlussen, midden- en hoge temperatuur ondergrondse warmteopslag (ofwel MTO of HTO) in diepe aquifers of in mijnstructuren, bore-hole warmteopslag en kuil- en tank warmteopslag (zie ook de rapportage van Renewable Heat<sup>6</sup>). De marktpenetratie van deze technieken loopt uiteen van 'beperkt toegepast in Nederland' voor kuil warmteopslag, enkele installaties voor zowel MTO of HTO in diepe aquifers, als tank warmteopslag, warmteopslag in mijnstructuren en borehole warmteopslag, tot enkele duizenden open systemen voor bodemenergie. Het Technology Readiness Level (TRL) van deze systemen is dusdanig hoog dat uitrol naar de markt mogelijk is, maar nog niet voor elke techniek is er sprake van grootschalige toepassing.<sup>7</sup> Daarnaast is grootschalige toepassing van deze technologieën sterk afhankelijk van de mogelijkheid om grootschalig warmtenetten in Nederland te realiseren.

Decentrale opslag in vorm van bovengrondse of ondergrondse voelbare warmteopslag of PCM warmteopslag zijn nog in het proces van opschalen van productie maar hebben minder belemmering van wet en regelgeving, en zijn hierdoor voornamelijk afhankelijk van consumenten. Deze vormen van opslag kunnen gebruikt worden voor het efficiënter gebruik maken van duurzame energieproductie en prijsfluctuaties in de energieprijzen. Hoewel er nu al significante vraag is zullen regelingen zoals subsidies en de salderingsregeling een groot effect hebben op grootschalige adoptie. Het aanpassen van deze regelingen zal een groot effect hebben op marktadoptie en financiering van opschaling. Met een hoog TRL, en meer vraag dan aanbod is deze sector dichtbij een opschaling van toepassing.

<sup>20</sup> PBL - Startanalyse aardgasvrije buurten; Gemeenterapport met toelichting bij tabellen met resultaten van de Startanalyse. Den Haag: PBL, 2020.



Warmte vormt een significant deel van ons energiegebruik, vooral in de gebouwde omgeving. Warmteopslag biedt de mogelijkheid om pieken in energieaanbod op te vangen en pieken in vraag te dempen.

Voor elektrificatie van warmtevoorziening kan warmteopslag hiermee een kostenefficiënte rol spelen om 'restcapaciteit' van het elektriciteitsnet te benutten. In Quebec, Canada installeert de energieproducent HydroQuebec een hoge temperatuur warmteopslag module in combinatie met centrale luchtverwarming ter waarde van \$20.000 per klant<sup>21</sup>. Hoewel de staat Quebec aanzienlijk minder dichtbevolkt is dan Nederland geeft dit aan dat de potentiële kostenbesparing significant is. Onderzoek naar de mogelijke maatschappelijke besparingen op de uitbreiding van het elektriciteitsnet in Nederland door middel van de toepassing van warmteopslag ontbreekt vooralsnog.

Daarnaast biedt grootschalige warmteopslag de mogelijkheid om nieuwe woningen te bouwen waar anders geen aansluiting op het net mogelijk zou zijn door de koppeling aan een warmtenet in combinatie met duurzame opwekking van energie.

Uit de voorgaande paragrafen en hoofdstukken mag duidelijk zijn dat de Nederlandse warmteopslag sector een solide technische basis heeft, met een groot palet aan toepassingsgebieden. Daarnaast blijkt uit het parallel onderzoek van Renewable Heat B.V. de mondiale koppositie in aquiferopslag in Nederland<sup>6</sup>, en voor de overige technologieën eveneens een sterke kennispositie. De respondenten van de vragenlijsten noemen daarom ook een groot scala aan use-cases voor hun respectievelijke warmteopslagtechnologie vanwege de bijbehorende voordelen van relatief lage kosten (vergeleken met bv. elektriciteitsopslag) en het gebruik van weinig tot geen zeldzame of kritische materialen. De geschetste use-cases uit 2016 schetsen voor de huidige vraagstelling een te beperkt beeld: netwerkproblematiek is niet meegenomen in de vraagstelling, en louter lokale (decentrale) en dus kleinschalige opslagtechnologie werd meegenomen in de toepassingsmogelijkheden.

Hoofddargument voor gebruik van warmteopslag is dat warmteopslag de koppeling van warmtegebruik met duurzame energiebronnen faciliteert. Warmteopslag maakt dit mogelijk door spreiding van vraag en aanbod in tijd en plaats. Opslag zorgt ervoor dat eerder opgeslagen duurzame energie kan worden toegepast als warmte, bijvoorbeeld voor ruimteverwarming of voor warm tapwater. Korte termijnopslag zal pieken in beschikbaarheid van duurzame energie opvangen en later afgeven als ruimteverwarming of warm tapwater (voor de gebouwde omgeving) of als procesverwarming (in de industrie). Met korte termijnopslag kan hier uren, dagen, of weken worden bedoeld; het toepassen van warmteopslagtechnologie verhoogt in deze use-case potentieel het aandeel duurzame energie door koppeling van vraag en aanbod in tijd en plaats.

Daarnaast zorgt grootschalig toegepaste warmteopslagtechnologie (dus zowel centraal als decentraal) potentieel voor verlaging van de kosten van elektrische netverzwaring, door reductie van piekvraag bij zowel vraag als aanbod. In de gebouwde omgeving kan centrale warmteopslag in een wijk of bij huishoudens in boilers of buffervaten bijvoorbeeld zorg dragen voor piekvraag van warmte (voor bijvoorbeeld douchen) of voor het overbruggen van extreem koude perioden, waarmee het in dat geval de alternatieve energiesystemen ontlast. Uit een studie van CE Delft<sup>2</sup> blijkt dat omzetting van elektriciteit in warmte (P2H) en warmteopslagtechnieken (P2H+S) voldoende potentieel heeft voor een merkbare impact op de verduurzaming van warmtenetten. Daarnaast zal zelfs bij netverzwaring balancerende van de beschikbare energie een rol blijven spelen.

<sup>21</sup> Hydro-Quebec; LogisVert Efficient Homes Program, 2023



Het dient te worden opgemerkt dat de eigenaar voor de gemaakte kosten voor warmteopslag idealiter gecompenseerd zou moeten worden uit de besparing voor de netbeheerder, zoals bijvoorbeeld geldt voor aggregatoren. Aggregatoren, relatief nieuwe spelers op de energiemarkt die zorgen voor een betere afstemming tussen vraag en aanbod van elektriciteit, maken gebruik van het gezamenlijk effect vraag- of aanbodflexibiliteit van hun klanten. Deze flexibiliteit wordt gebundeld en geaggregeerd op een flexibiliteitsmarkt aangeboden. Veel kleine spelers bewerkstelligen daarmee een effect op het netwerk. Een aggregator kan zo het energieverbruik van de vertegenwoordigde partijen verplaatsen naar 'dalmomenten'. De aggregator treedt in feite dus tegen vergoeding op als intermediair tussen verbruikers, netbeheerders en leveranciers. Een soortgelijke regeling zou ook voor warmteopslag kunnen werken.

Naast technische of financiële aspecten speelt het aspect van leveringszekerheid een rol bij de implementatie van warmteopslagtechnologie. Zekerheid, beschikbaarheid, en betrouwbaarheid van warmtelevering (i.e. "resilience") worden gezien de huidige geopolitieke situatie en grillige energiewereld genoemd als belangrijke factoren. Leveringszekerheid kan bijvoorbeeld worden bereikt door lokale opslag van warmte, dit om de vraag naar aardgas in het winterseizoen te ontlasten. Ook lange-termijn warmteopslag (of zelfs seizoensopslag) kan worden aangewend om dit te bewerkstelligen; dit maakt het mogelijk dat duurzame energiebronnen uit perioden van overschot beter benut worden in een situatie van tekorten. Opslag biedt daarmee een oplossing voor piekvraag, en maakt duurzame bronnen ermee rendabeler. Simpelweg de goedkoopste energieoplossing aanleveren is niet langer het belangrijkste argument. Bedrijven kunnen deze argumenten nog niet te gelde maken, want de huidige manier van energiebeprijzing (kosten per kWh of MWh) neemt deze argumenten nog onvoldoende mee.

Op basis van bovenstaande overwegingen zijn de voornamelijk genoemde use-cases uit de antwoorden op de vragenlijsten de volgende:

- **Use-case 1:** Aardgasverbruik verminderen, grootschalige CO<sub>2</sub>-emissiereductie realiseren: warmteopslag faciliteert de koppeling met zowel lokale als centrale duurzame bronnen door spreiding van vraag en aanbod.
- **Use-case 2:** Verminderen van netcongestie door beperken van afschakelen duurzame opwerk ('curtailment'): Door overtollige duurzaam opgewekte elektriciteit om te zetten in warmte en deze op te slaan, zorgt warmteopslag ervoor dat overmatig aanbod van duurzame (elektrische) energie lokaal wordt gedempt, en daardoor meer duurzame opgewekte elektriciteit nuttig kan worden besteed zonder noodzaak tot afschakelen.
- **Use-case 3:** Voorkomen van netcongestie door beperken van piekvraag ('peak shaving'): Realiseren van nieuwbouw met lokale duurzame energieopwekking met bijbehorende warmteopslag zorgt voor minimale afhankelijkheid van het energienetwerk tijdens momenten van piekvraag.

In principe kan elk van de toepassingen uit eerdere hoofdstukken ook onder deze use-cases geschaard worden. Echter, het voert te ver om elke toepassing apart in detail te beschrijven. Om de complexiteit aan te geven van het toepassen van warmteopslag in een bepaalde gebruikssituatie met relevante randvoorwaarden worden hier twee realistische use-cases als voorbeeld uitgewerkt, waarbij netcongestie grotendeels voorkomen zal worden. Deze voorbeelden zijn aangeleverd door een respondent en met enkele inkortingen integraal overgenomen.

## 4.4 Case Study: Hoger aandeel duurzame energie

Hoge temperatuur opslag (HTO) richt zich op warmteopslag met een temperatuurbereik dat kan oplopen tot 90 - 110 °C. Door de gebruikte diepte van HTO valt HTO buiten het bereik van de als drinkwater gedefinieerde aquifers en is het energieverlies bij opslag beperkt. Dit betekent lagere OPEX en een lage CO<sub>2</sub>-emissie dan voor ATES. Een pilot HTO is gerealiseerd in Middenmeer. In de provincie Noord-Holland bevindt zich het tuinbouwgebied Agriport, waar het energiebedrijf ECW warmte levert en produceert, onder meer via geothermie. Om de geothermieputten niet stil te hoeven leggen en in de winter meer kassen van warmte te kunnen voorzien, heeft het ECW een hoge temperatuur opslag gerealiseerd (Figuur 22). De HTO bestaat uit een injectieput (de warme put), een productieput (de koude put) en een monitoringsput. De HTO slaat water met een temperatuur van maximaal 85°C op in een zandige laag op een diepte van 370 m. De efficiëntie van dit systeem is in de eerste jaren relatief laag omdat de ondergrond nog opgewarmd moet worden. Verwacht wordt echter dat na ca. 5 jaar de efficiëntie reeds meer dan 85% van de maximale efficiëntie heeft bereikt. Deze HTO is onderdeel van het internationale HEATSTORE project waarin diverse vormen van (MT en HT) warmteopslag verder zijn ontwikkeld en gedemonstreerd.

## 4.5 Case Study: Voorkomen van netcongestie

Het gebruik van warmteopslagtechnologie voor het voorkomen van netcongestie en het reduceren van piekvraag is momenteel een van de meest-voorkomende use-cases. Bij sommige van de ondervraagde stakeholders vertegenwoordigt deze use-case ongeveer 50% van de aanvragen voor het aanleggen van warmteopslagtechnologie, zowel in Nederland als bijvoorbeeld ook in België. Voorwaarde voor de toepassing van warmteopslag is het voorkomen van de toestand die in de betreffende situatie netcongestie veroorzaakt. In het voorkomen van netcongestie betekent dit specifiek dat elektrisch gedreven warmtevoorziening via warmteopslag en op voldoende grote schaal voor een effect zal moeten zorgen op het elektriciteitsnetwerk. Let op dat in het huidige onderzoek het technische aspect van reactietijd van opslagtechnologie niet specifiek is meegenomen in de enquête. Dit speelt echter wel een rol in netwerkbelasting. Warmteopslag maakt het mogelijk dat pieken en dalen van flexibele middelen gelimiteerd kunnen worden, om ervoor te zorgen dat de relatief snelle wisselingen geen piekbelasting zal veroorzaken als reactie op een negatieve energieprijs. Maar hier moet dus wel rekening gehouden worden met de reactietijd.

Met toestemming van de betreffende stakeholder is hieronder een geanonimiseerde casus over congestiemanagement door middel van warmteopslag opgenomen.<sup>22</sup>

### 4.5.1.1 Vraagstelling

Een hotel in Nederland wil graag zijn warmtevoorziening verduurzamen. Het hotel is gelegen in een gebied waar geen boringen zijn toegestaan en er is sprake van netcongestie zowel aan de afname- als de invoerzijde. Er is een fysieke aansluiting van 630 KVA, echter het contractueel vermogen is beperkt tot 270 kW. In 2022 is het totaal verbruik 847.000 kWh-e. In de data per kwartier is de hoogst gemeten piek 170 kW-e. Het gasverbruik is 161.716 m<sup>3</sup> gas in het jaar 2022. In het gasverbruik is de maximale piek vastgesteld op 71 m<sup>3</sup> gas, in de ochtenduren komen er frequent pieken voor tussen 40 m<sup>3</sup> en 70 m<sup>3</sup> gas. Met een efficiëntie

<sup>22</sup> Congestiemanagement met warmteopslag, geanonimiseerde casus, 19-2-2024.

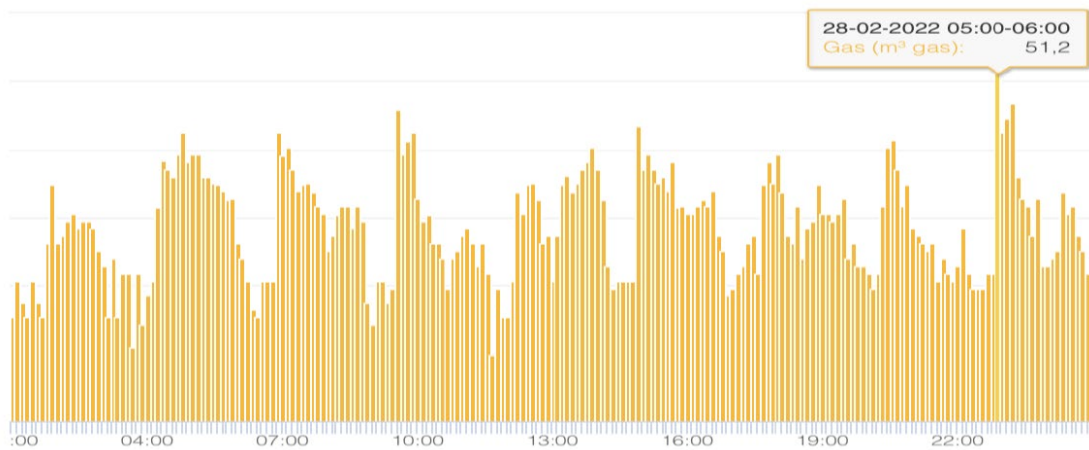
van ca 8.9 kWh-th per m<sup>3</sup> gas betekent dat een totaal verbruik van (afgerond) 1.450.000 kWh-th met pieken van 625 kWh-th.

### 4.5.1.2 Uitwerking & analyse

De totale beschikbare elektrische energie bij een aansluitvermogen van 270 kW bedraagt  $365 \cdot 24 \cdot 270 = 2.365.200$  kWh. Wanneer voor de veiligheid wordt uitgegaan van een 90% maximale belasting dan is 2.128.680 kWh-e beschikbaar. Daarvan gebruikt het gebouw in de huidige situatie 847.000 kWh-e, en resteert als capaciteit 1.281.680 kWh-e.

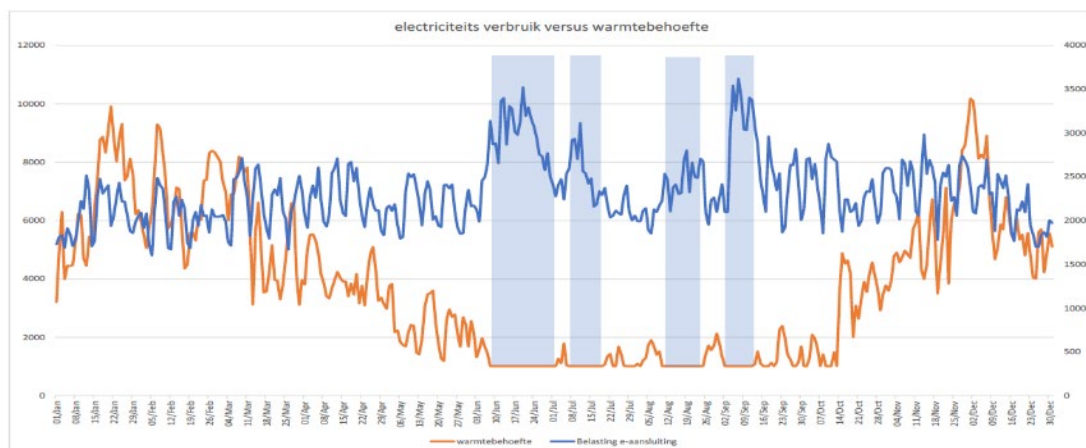
Uitgegaan van een worst case warmteopwekking met een SCOP van 3 heeft de warmteopwekking behoefte aan:  $1.450.000 \text{ kWh-th} / 3 = 483.333$  kWh-e. Dat past dus ruim binnen de beschikbare 1.281.680 kWh-e. Hieruit kan worden geconcludeerd dat met warmte-buffering deze verduurzaming opgelost kan worden. Opvallend genoeg gaat hiermee de conclusie worden dat de contractwaarde omlaag kan in plaats van omhoog moet. De vraag resteert: hoe groot moet de buffering worden. Daarvoor kijken we naar de waarden per kwartier.

Het gasverbruik heeft repeterende pieken in 2022 op ca 50 m<sup>3</sup> per uur. De piek zit steeds in de ochtenduren tussen 05:00 en 06:00. We zien dit in de gehele maand Dec./Jan./Febr. Dit komt neer op een thermisch vermogen van 460 kW-th.



Figuur 30. Gasverbruik 20 feb – 28 feb 2022 in gekozen situatie.

Er is in deze situatie geen relatie tussen warmtebehoefte en elektriciteitsverbruik. Wel is te zien dat wanneer de warmtevraag wegvalt, er meer elektrische energie verbruikt wordt, vermoedelijk voor koeling (blauwe kolommen in onderstaande figuur). Dit zit echter een verduurzaming van de warmtebehoefte niet in de weg.



Figuur 31. Relatie warmtebehoefte (oranje, linker as) en elektriciteitsverbruik (blauw, rechter as) in kW, op jaarbasis. Blauwe kolommen geven perioden aan waarin warmtevraag wegvalt en waarin meer elektrische energie wordt gebruikt (vermoedelijk door koelbehoefte).

### 4.5.1.3 Conclusie

De ruimte binnen de huidige contractwaarde elektriciteit is in het bijzonder gedurende de dag te laag om te voldoen aan de warmtevraag in het geval van “all electric” warmtevoorziening. In de avond wil men immers het liefst geen warmte opwekken d.m.v. elektriciteitsgebruik in verband met piekmomenten. Echter in de nachturen, en in de weekenden is er voldoende ruimte voor opwekking van warmte.

Een ont koppeling tussen warmtevraag en warmte opwekking door middel van opslag kan dit probleem oplossen. Dit kan een intraday oplossing zijn. Met een warmteopslag, welke voldoende voorraad heeft voor een hele dag, kan warmteopwekking worden ontkoppeld van warmtevraag en kan piekvraag worden beperkt.

Een directe opwekking zonder buffering is in dit geval niet altijd mogelijk, omdat er een warmtevraag is met pieken die variëren van 460 kW-th repeterend tot 630 kW-th incidenteel.

Met een COP van 3 betekent dit een ongecontroleerde belasting van 150 tot 210 kW-e.

Het is aantrekkelijk om wel een deel van de beschikbare ruimte binnen het contract overdag te gebruiken om warmte op te wekken, omdat de buiten temperatuur overdag vaak hoger is dan gedurende de nacht, en omdat er op die momenten over het algemeen meer/vaker duurzame elektriciteit beschikbaar is. Daardoor wordt de opwekking zowel efficiënter (hogere COP) als goedkoper.

Door de hoofdaansluiting te monitoren, kan er binnen grenzen, maximaal gebruik worden gemaakt van deze efficiëntie.

De verduurzamingsmogelijkheden worden beperkt door:

- Geen open WKO in traditionele zin.
- Plaatsing PV-panelen alleen voor direct nuttig verbruik, aangezien invoeren in het net geen optie lijkt. Daarmee komt voorziening van koelenergie/ventilatie het dichtst bij de mogelijkheden.
- Vergroten van de E-aansluiting lijkt ook beperkt, wegens congestie op gebied van stroom afname.

Een verzwaring van de bestaande aansluiting lijkt daarom ook niet opportuun.

Een mogelijke oplossing is dus het gebruiken van de bestaande niet gebruikte capaciteit binnen de contractwaarde. Een deel daarvan is niet te plannen verbruik, maar het deel warmte/koude voorziening kan planbaar gemaakt worden met buffering. Daardoor kan dit verschuiven naar periodes waarin er ruimte is binnen het bestaande verbruiksprofiel.

In het doorgerekende scenario moet de energie opslagbuffer in totaal 8500 kWh-th op kunnen slaan in een traject 40-20 graden. Het benodigde volume is dan bijvoorbeeld 400 m<sup>3</sup> water.

De energieopslag buffer kan ondergronds worden geplaatst en volledig met water worden gevuld. De energieopslagbuffer stelt de opgeslagen energie ter beschikking aan een water-water warmtepomp. Daarnaast is een peakshaver buffer voorzien van 10 MWh-th, een volledige dag warmtebehoefte. En daarboven is er de optie tot koelen terwijl er warmte wordt gemaakt. Bij tapwaterproductie in de zomer is dit mogelijk een aantrekkelijke optie, die deels ook voorziet in ruimteverwarming op andere momenten (nacht).

## 4.6 Conclusie use-cases warmteopslag

Gelet op bovenstaande is te concluderen dat warmteopslag door middel van energieconversie (power to heat) congestieverlichting en balanceringsdiensten kan bieden. Warmteopslag kent een scherp onderscheid tussen technieken die voor het balanceren van vraag en aanbod juist geschikt zijn op de korte tot middellange termijn en op de middellange tot lange termijn.

Daarnaast kan warmteopslag worden ingezet voor strategische voorraden, wanneer de opslagcapaciteit en opslagduur voldoende zijn. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld elektriciteitsopslag, dat weliswaar geschikt is voor korte-termijn functies omdat de omzetting weinig energieverliezen kent, maar waarbij energie niet langdurig opgeslagen kan worden.

Collectieve warmteopslagtechnologieën hebben een unieke propositie voor lange termijn opslag in de gebouwde omgeving, en kunnen daarnaast ingezet worden voor het voorkomen van netcongestie.

Voor korte termijn opslag zijn individuele warmteopslagtechnieken toepasbaar, alsook voor middellange termijn afstemming van vraag en aanbod. Een kleine warmwater tank of PCM opslag is bijvoorbeeld ook goed inzetbaar voor korte termijn netondersteuning en netcongestie. TCM kan ook gebruikt worden voor lange termijn balancering van vraag en aanbod, door zowel gebruik voor verwarming als voor koeling. Hoewel de kosten per kWh voor TCM (nog) significant hoger dan voor andere lange termijn warmteopslag opties heeft een directe vergelijking van decentrale TCM warmteopslag met centrale technieken geen zin, omdat de centrale techniek alleen kan worden uitgevoerd in combinatie met een warmtenetwerk. De kosten daarvoor dienen ook in de vergelijking meegenomen te worden. Unique selling point is wel dat TCM een verliesvrije opslag betreft, dus uniek gericht op decentrale lange termijnopslag. Op individueel niveau zal er mogelijk behoefte zijn aan lange termijn warmteopslag om bijvoorbeeld zomer zonnearmte of gebouwarmte op te slaan voor wintergebruik. Competitie van decentrale alternatieven op prijs, complexiteit, veiligheid en/of ruimtebeslag ligt dan op de loer.

# 5 Innovatieroadmap warmteopslag

## 5.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt de Innovatieroadmap voor warmteopslag in de gebouwde omgeving in Nederland gepresenteerd en wordt uitleg gegeven over de aspecten die belangrijk zijn voor verdere innovatie uitgesplitst voor nagenoeg marktrijpe warmteopslagtechnologieën en technologieën die nog volop in ontwikkeling zijn.

De Innovatieroadmap is opgesteld vanuit de antwoorden verkregen uit de uitgestuurde vragenlijst, naar aanleiding van verdiepende gesprekken met ontwikkelaars, en na verkregen input van de klankbordgroep uit de werksessies. In totaal zijn er twee workshops gehouden (de eerste in persoon op 12 december 2023 bij TKI UE in Utrecht, en de tweede online op 12 maart 2024) waarbij bij elke workshop een vijftiental vertegenwoordigers uit de Nederlandse ontwikkelaars van warmteopslagtechnologie aanwezig waren. Daarnaast hebben 21 ontwikkelaars van warmteopslagtechnieken in Nederland een geheel of gedeeltelijk ingevulde vragenlijst ingestuurd.

Op basis van de vragenlijst, de verdiepende gesprekken en de klankbordgroepsessies zijn technologische ontwikkelpunten per technologie en externe uitdagingen voor grootschalige toepassing verzameld. Voorts worden kritieke punten voor doorontwikkeling naar grootschalige toepassing per technologie uitgelicht. Externe behoeftes en uitdagingen zoals wet en regelgeving, blinde vlekken in beleid, financiële drempels, en andere afhankelijkheden worden ook benoemd.

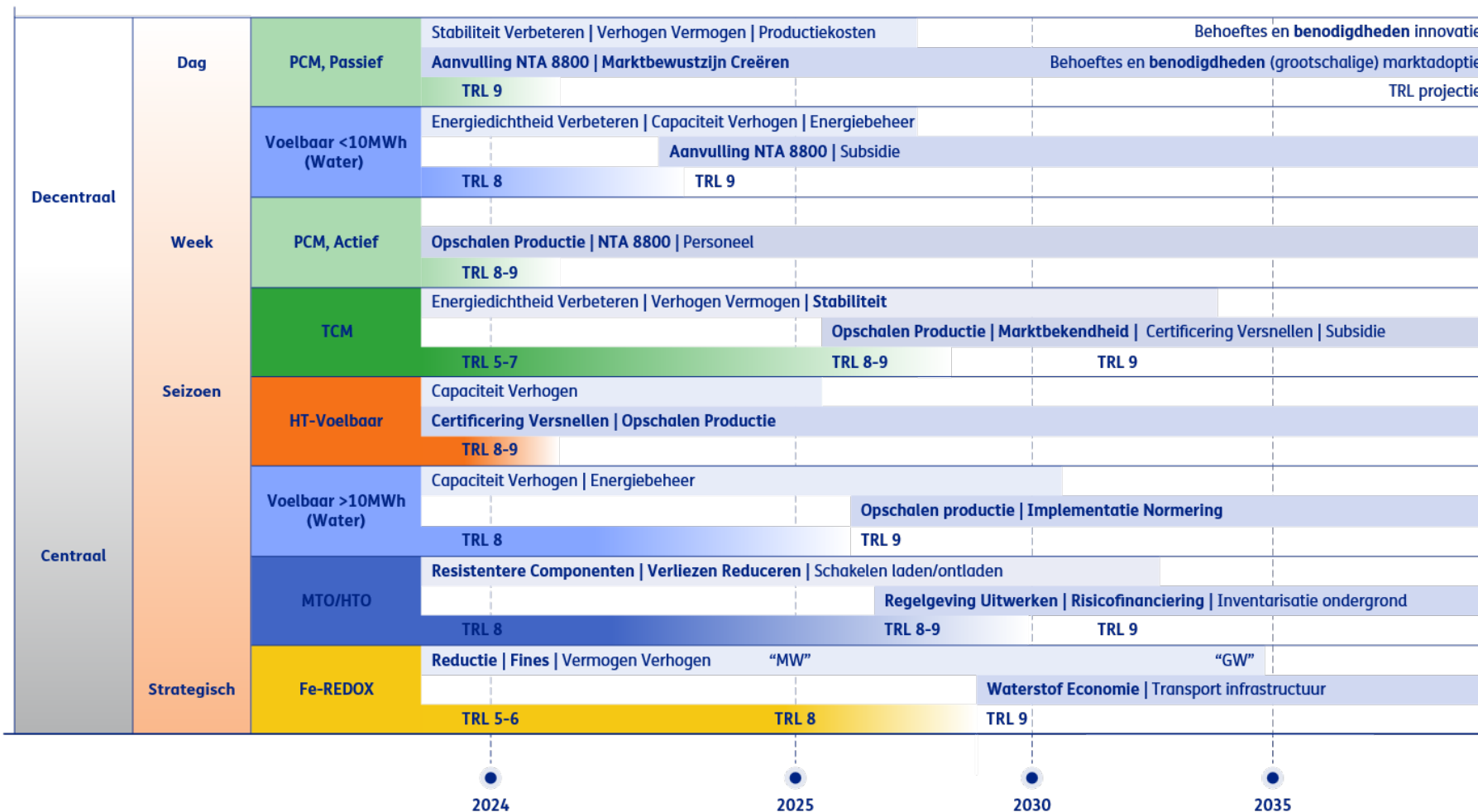
## 5.2 Innovatieroadmap warmteopslag 2024

De Innovatieroadmap warmteopslag is te zien in Figuur 32 (*doorsnede a*). Op de verticale as worden de beschreven warmte-opslagtechnologieën met een toepassing in de gebouwde omgeving weergegeven. De geselecteerde technieken zijn ruwweg in centrale en decentrale opslag met het aangeven van toepassing als dagopslag, via weekopslag tot seizoensopslag. Voor ijzer-redox warmteopslag is de categorie strategische opslag genoemd. Zowel de specificering 'centraal' of 'decentraal' als de specificering voor 'dag', 'week' of 'seizoen' moet niet strikt worden genomen; verschillende technieken zullen potentieel meerdere vormen van opslag kunnen bewerkstelligen.

Op de horizontale as wordt met jaartallen de tijdlijn aangegeven waarover de door de respondenten voorziene ontwikkeling plaatsvindt. Het huidige TRL niveau staat genoemd bij het jaartal 2024, waarna er per technologie wordt aangegeven wat de verwachte ontwikkelingstijd is tot TRL 9. Hierbij zijn per warmteopslagmethode de door de respondenten onderverdeeld benoemde technologische ontwikkelpunten aangegeven in de bovenste balk, en worden genoemde potentiële externe uitdagingen gegeven in de onderste balk vanaf TRL 9. De splitsing in PCM passief en actief geeft aan of het PMC opslag betreft in bouwmaterialen (passief) of als toevoeging in bijvoorbeeld boilersystemen (actief) betreft. De splitsing binnen voelbare warmteopslag in water in capaciteit onder en boven 10 MWh geeft aan of het decentrale (onder 10MWh) of centrale (boven 10MWh) opslag betreft.



Figuur 32. Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland 2024, (doorsnede a). Van boven naar beneden wordt een indicatie gegeven van de use case (decentraal/centraal) met bijbehorende opslagduur (van dag tot seizoen of als strategische voorraad), en worden naast de verwachte TRL in de tijd de belangrijkste technische ontwikkelpunten en niet-technische uitdagingen benoemd voor de volgende technologieën genoemd: PCM passief (in bouwmaterialen); voelbare warmteopslag <10 MWh (in water, decentraal); PCM actief (in boilersystemen); TCM (zowel voor decentrale als centrale warmteopslag); HT-voelbaar (in materialen anders dan water); voelbaar >10 MWh (centraal, OBES); MTO/HTO; Fe-REDOX.

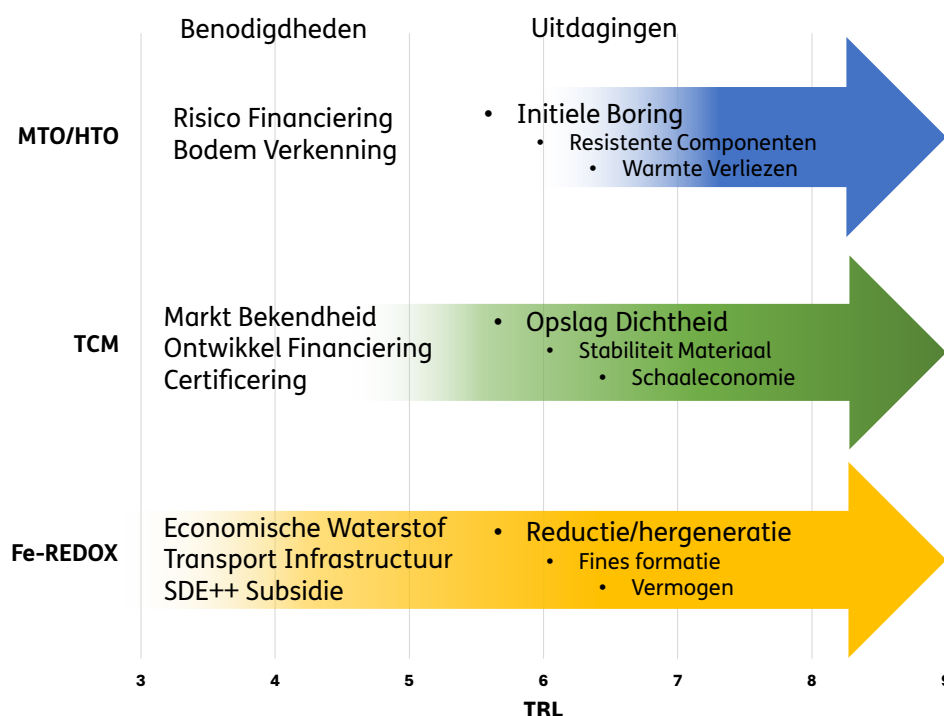




In onderstaande paragrafen wordt nog een andere doorsnede van de Innovatieroadmap warmteopslag gegeven, waarin vanwege de aard van de benodigde innovaties en aanwezige uitdagingen onderscheid gemaakt wordt tussen nog in ontwikkeling zijnde technologieën en al nagenoeg marktrijpe technologieën. Daarin wordt in meer detail ingezoomd op de Innovatieroadmap en de benodigde ontwikkelingen in de tijd.

## 5.2.1 Technologie in Ontwikkeling

In deze paragraaf wordt een doorsnede van de Innovatieroadmap warmteopslag gegeven voor nog volop in ontwikkeling zijnde technologieën (MTO/HTO, TCM en Fe-Redox). Deze doorsnede van de Innovatieroadmap wordt weergegeven in Figuur 33.



Figuur 33. Innovatieroadmap warmteopslag voor nog in ontwikkeling zijnde technologieën (MTO/HTO, TCM en Fe-Redox; *doorsnede b-1*)

Onderstaand worden de benodigde innovaties en uitdagingen van de genoemde technologieën toegelicht.

### 5.2.1.1 MTO/HTO warmteopslag (TRL 6-8)

HTO en MTO worden ontwikkeld door twee partijen. HTO is momenteel in de demonstratiefase, en MTO is na het opdoen van meer ervaring klaar om de markt op te gaan.

#### Initiële boring

De toepassing en effectiviteit van UTES is afhankelijk van het type ondergrond. De aanwezigheid van kleilagen is noodzakelijk voor het scheiden van de waterreservoirs, en variaties in ondergrond kunnen zorgen voor afwijkende specificaties. Ondergrondse

waterstromen en grondwatercontaminatie tussen lagen (i.e. het weglekken van water van de actieve aquifer naar een andere laag) kunnen leiden tot ongewenste warmteverliezen. Vanwege de hogere temperatuur van MTO en HTO is er een groter risico op contaminatie tussen de reservoirs en is er minder ondergrond geschikt dan voor andere technieken zoals bijvoorbeeld conventionele WKO. Hierdoor kunnen nieuwe systemen ook niet te dicht naast al bestaande systemen geplaatst worden. Tevens is het balansprincipe (zoals beschreven in de waterwet) een aandachtspunt bij HTO en om problemen te vermijden wordt dit systeem dieper aangelegd.

### **Bodemverkenning**

Voor verdere ontwikkeling van HTO is de initiële investering van een proefboring een drempel vanwege het risico op een niet geschikte bodem. Het risico kan worden verlaagd door voorafgaand bodemonderzoek.

### **Risicofinanciering**

Op korte termijn kan het risico verkleind worden door middel van subsidiering van de initiële boringen. Het risico kan verder verkleind worden door belastingvoordeel bij CO<sub>2</sub>-besparing en uitzicht op een grotere besparing van energiekosten door onderzoek naar de koppeling met restwarmte en zonnewarmte, zeker wanneer de prijs van duurzame warmte omlaag zal gaan.

### **Resistente componenten**

Momenteel ligt de levensduur van een ATES systeem rond de 25 jaar. Vanwege de hogere temperatuur van HTO dan WKO treedt er potentieel meer corrosie en mineraaldepositie op. Verdere ontwikkeling om corrosie en mineraaldepositie te verminderen en het resistenter maken van componenten zal de levensduur van een boorput verlengen en de OPEX in de toekomst kunnen verlagen.

### **Warmteverliezen**

Componentontwikkeling is ook nodig voor verbeterde isolatie om de verliezen bij de hogere temperaturen van HTO te verminderen.

Meer ervaring met MTO/HTO technologie is nodig om de initiële risico's te verminderen. Er zijn meer installaties nodig om de toegevoegde waarde breder en beter te demonstreren. In het WarmingUP GOO (Geothermie en Opslag Opschaling) project, het vervolg op WarmingUp, wordt momenteel op basis van een model onder andere de ondergrond onderzocht op waar MTO en HTO systemen toepasbaar zijn. Deze kennis zal de adoptie van MTO en HTO significant versnellen. In een recent MTO project duurde de technische en juridische voorbereiding op de proefboring 3 jaar<sup>23</sup>. Dit geeft aan dat ervaring en marktrijpheid van HTO en grootschalige adoptie van MTO zeker 5 jaar kan gaan duren.

## **5.2.1.2 TCM warmteopslag (TRL 5-7)**

Thermochemische materialen voor warmteopslag worden ontwikkeld door drie partijen in Nederland, waarvan er twee op TRL 7 zijn en een op TRL5, met een focus op hoge dichtheid warmteopslag en opwaardering en koppeling van industriële restwarmte voor de gebouwde omgeving. Dit komt met hogere kosten dan voor alternatieve technieken, mede door de complexiteit van de technologie. De hogere kosten dan voor alternatieve methoden maken de businesscase moeilijker in de huidige markt.

<sup>23</sup> IF Technology; Middelhoge Temperatuur Opslag voor overtollige warmte van zonnewarmtepark, 2023

### **Certificering**

Op dit moment is er nog geen certificering voor warmteopslag op basis van thermochemische materialen. De mogelijkheid tot certificering zou de garantie kunnen geven om het makkelijker te maken investeerders aan te trekken.

### **Ontwikkel financiering**

Investerings en subsidies zijn nodig om door te ontwikkelen. Technologisch is er nog ruimte voor hogere energiedichtheid, hoger vermogen, en verbeterde stabiliteit. Een gefragmenteerd subsidieschema voor innovatie in de sector maakt planning en consistente ontwikkeling moeilijk. Daarnaast zijn investeringen nodig voor opschaling van productie om de kosten te reduceren en voor grootschalige implementatie in de markt.

### **Marktbekendheid**

TCM is nog relatief onbekend als oplossing voor warmteopslag. De complexiteit van het systeem maakt het een breed toepasbaardere technologie met toepassingen als warmtetransport en warmteopwaardering, maar bemoeilijkt eenduidige communicatie erover.

### **Technische aspecten**

Energiedichtheid is het aspect dat bij TCS intrinsiek mogelijk wordt gemaakt door de hoge materiaalopslagdichtheid van de gebruikte reactieve zouten. Typisch moet per toepassing een geschikt TCM gevonden worden dat voldoet aan de gestelde eisen, zowel technisch (temperatuurlevering, vermogenslevering, energieopslagdichtheid) als wat betreft omgevingsfactoren (veiligheid, stabiliteit, levensduur, kosten). Onderzoek naar deze technische aspecten is nog in volle gang, en omdat per toepassing mogelijk andere materialen worden toegepast kan een uitontwikkeld materiaal niet zonder meer worden toegepast voor elke alternatieve use-case. Dit maakt generieke ontwikkeling van TCS voor meerdere use-cases schier onmogelijk.

### **Schaaleconomie**

TCM warmteopslag heeft opschaling van productie nodig om de kosten van productie en opschaling te verlagen. Uit de antwoorden van de respondenten blijkt dat TRL 8 in de komende twee jaar bereikt zal worden, maar voor adequate marktadaptatie is een duidelijk beleid en goede communicatie nodig.

De complexiteit van de technologie en daarmee samenhangende afhankelijkheid van beleid en gebrek aan subsidies en investeringen voor doorontwikkeling en opschalen worden genoemd als risico voor de groei van de technologie in de stap van TRL 8 naar TRL9. Grootschalige productie wordt verwacht bereikt te worden over 5 tot 10 jaar.

## **5.2.1.3 IJzer Redox warmteopslag (TRL 3-6)**

IJzer redox warmteopslag wordt in Nederland ontwikkeld door vier partijen, waarvan 2 op TRL 6 zijn en 1 op TRL 5, en een op TRL 3. De toepassingen variëren van industriële warmte, piek warmtelevering aan warmtenetten en compacte warmteopslag.

### **Economische waterstof en subsidie**

De technologie heeft een sterke afhankelijkheid van de prijs van waterstof voor de reductiestap (opladen) en voor economische haalbaarheid. Hoewel er alternatieve vormen van reductie worden onderzocht zijn die nog op laag TRL. De opschaling van de productie van waterstof zal tot een mogelijk alternatief beschikbaar komt een grote invloed hebben op

de ontwikkeling van de technologie. Deze aspecten maken dat de onrendabele top van deze technologie voorlopig waarschijnlijk nog afhankelijk is van subsidies.

### Reductie/regeneratie

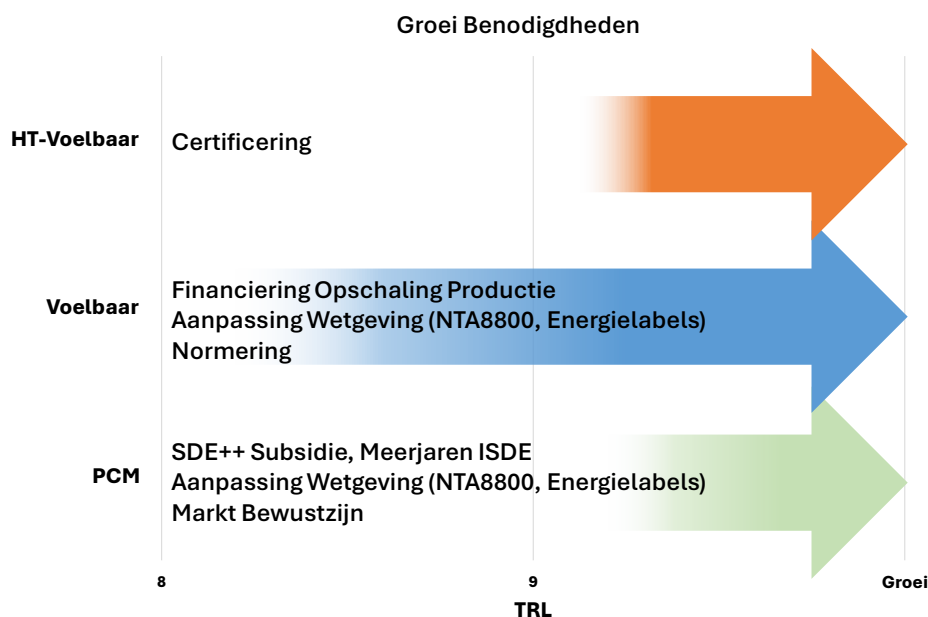
De reductie stap van het proces (opladen) is momenteel op TRL 4; de werking van het proces is aangetoond in een labomgeving. Deze stap vereist doorontwikkeling naar hoger TRL en opschaling naar grotere vermogens en capaciteiten voordat toepassing van deze stap op industriële schaal mogelijk is. Daarnaast dienen andere technische aspecten zoals het vormen van 'fines' gedurende het proces, en het optimaliseren van het vermogen te worden doorontwikkeld om de schaalbaarheid en economische haalbaarheid van de toepassing mogelijk te maken.

### Transport infrastructuur

Verliesvrij transport van ijzerpoeder vereist opschaling en aanpassing van bestaande transport infrastructuur. Voor off-site transport van ijzerpoeder wordt momenteel gebruik gemaakt van bestaande infrastructuur (truck, trein, schip). Op- en overslag van geladen of ongeladen ijzerpoeder is momenteel nog niet grootschalig beschikbaar. Voor op- en overslag van grote volumes ijzerpoeder zijn in de toekomst ongebruikte kolenterminals mogelijk zeer geschikt. Daarnaast ontbreekt momenteel grootschalige transportinfrastructuur voor waterstof.

De sterke samenwerking van de sector met de industrie laat zien dat de markt bereid is tot adoptie. De afhankelijkheid van de ontwikkeling van de waterstofeconomie is een grote factor in de ontwikkeling en toepassing van de technologie. De reductie stap is een kritisch punt, maar de verwachting is dat de toenemende schaal van projecten ontwikkeling van de reductie stap zal versnellen en dat het daarmee 5 tot 10 jaar duren voordat de technologie marktrijp is.

## 5.2.2 Marktrijpe technologie



Figuur 34. Innovatieroadmap warmteopslag voor nagenoeg marktrijpe technologieën (HT-voelbare opslag, voelbare warmteopslag in water, en PCM; *doorsnede b-2*).

In deze paragraaf wordt een doorsnede van de Innovatieroadmap warmteopslag gegeven voor marktrijpe en nagenoeg marktrijpe technologieën (HT-voelbare opslag, voelbare warmteopslag, PCM). Deze doorsnede van de Innovatieroadmap wordt weergegeven in Figuur 34.

Onderstaand worden de benodigde innovaties en uitdagingen van de genoemde technologieën toegelicht.

### 5.2.2.1 Hoge temperatuur voelbare warmteopslag

Hoge temperatuur voelbare warmteopslag is een ver ontwikkelde oplossing op TRL 8-9 met een hoge energiedichtheid, met momenteel maar een producent voor toepassing in de gebouwde omgeving in Nederland.

#### **Certificering**

Hoge temperatuur voelbare warmte heeft door de relatief lage CAPEX en OPEX vaak een positieve businesscase voor toepassing in de gebouwde omgeving en de eenvoud van de technologie en het gebruik van beschikbare materialen maken het rijp om productie op te schalen voor een grotere marktadoptie.

De enige beperking die genoemd is door de respondent is een gebrek aan certificering, dat het vergunningsproces bemoeilijkt. Dit maakt het moeilijker om investeringen aan te trekken voor opschaling van productie.

### 5.2.2.2 Voelbare warmteopslag in water

Voelbare warmteopslag in water heeft op dit moment vier ontwikkelaars met een TRL tussen de 8-9, met meerdere producten voor onder andere TTES en PTES. Deze producten zijn al beschikbaar van grootschalige centrale opslag (>10 MWh) tot kleinschalige decentrale opslag (<10MWh) welke over het algemeen worden toegepast voor weekopslag en zgn. 'dunkelflaute overbrugging' tot seizoensopslag.

#### **Financiering**

Alle producenten geven aan dat het opschalen van de productie noodzakelijk is om de benodigde schaalgrootte te behalen om aan de vraag te kunnen voldoen, maar dat financiering van deze opschaling van productie ontbreekt.

#### **Aanpassing Wetgeving**

Het gebrek aan waardering van warmteopslag binnen de huidige bepaling NTA8800 van eisen voor Bijna Energieneutrale Gebouwen (BENG) en de kaders van de energie labels maakt het toepassen van deze vorm van warmteopslag niet aantrekkelijk voor projectontwikkelaars en consumenten. Een aanpassing van deze regels zou de toepasbaarheid en daarmee de grootschalige toepassing in de maatschappij bevorderen.

#### **Normering**

Een gebrek aan uniforme normering en wetgeving met betrekking tot grootschalige centrale ondergrondse warmteopslag en collectieve systemen bemoeilijkt de coördinatie van stakeholders en vertraagt de vergunningsfase, de financiering, en verzekering. Een gebrek aan normering en certificering maakt meedoen aanbestedingen lastiger.

Decentrale voelbare warmteopslag heeft een mogelijke snelle marktadoptie omdat de techniek gericht is op toepassing in woningen, waardoor er geen vergunningen en financieringstraject aan vooraf gaat. Hierdoor is adoptie voornamelijk afhankelijk van externe waardering zoals BENG, en de mogelijkheid tot het opschalen van productie.

Afhankelijk van het financieringstraject kan dit volgens de respondenten nog tot 5 jaar duren.

Marktadoptie van centrale opslag heeft een grotere afhankelijkheid van verandering in wetgeving om het significante aandeel van tijd en kosten dat in beslag wordt genomen door de voorbereiding (de vergunningsfase, de financiering, en verzekering) te verminderen. Daarnaast is ook financiering nodig voor het opschalen van productie om de constructieprijs te verlagen. Hiervoor is de verwachting van stakeholders dat het minimaal 5 jaar kan duren tot grootschalige marktadoptie voor centrale opslag plaats kan vinden.

### 5.2.2.3 PCM

De ontwikkeling van PCM voor warmteopslag in de gebouwde omgeving in Nederland bestaat uit 3 producenten met een TRL 8-9 en een breed toepassingsgebied van passieve opslag in bouwmaterialen, weekopslag voor warm tapwater, en week tot seizoensopslag in grootschalig ondergrondse opslag. Producten zijn beschikbaar op grote schaal, maar de volgende punten zijn aangegeven als uitdagingen voor marktadoptie.

#### **Aanpassing wetgeving**

Het gebrek aan waardering van warmteopslag binnen de huidige bepaling NTA8800 van eisen voor Bijna Energieneutrale Gebouwen (BENG) en de kaders van de energielabels maakt het toepassen van deze vorm van warmteopslag niet aantrekkelijk voor projectontwikkelaars en consumenten. Een aanpassing van deze regels zou de toepasbaarheid en daarmee de grootschalige toepassing in de maatschappij bevorderen.

#### **Marktbewustzijn**

Een gebrek aan marktbewustzijn is een van de voornaamste aangegeven redenen voor een langzame adoptie, wat wordt versterkt door de terughoudendheid van producenten van bouwmaterialen om PCM te verwerken in hun materialen langs bekende verkoopkanalen.

#### **Subsidies**

De Investeringssubsidie duurzame energie en energiebesparing (ISDE) en Energie-investeringsaftrek (EIA) vasthouden en uitbreiden voor actieve en passieve warmteopslagtechnologie zal adoptie van actieve en passieve PCM warmteopslagtoepassing volgens de respondenten versnellen.

Hiermee is er voor passieve PCM warmteopslag naast de aangegeven punten alleen een afhankelijkheid van andere marktpartijen voor de integratie van hun product en is de verwachting dat grootschalige marktadoptie binnen 5 jaar kan plaatsvinden. PCM systemen voor decentrale en centrale warmte en koude opslag bevinden zich momenteel in het proces van opschalen van productie. Hiervoor is de verwachting dat grootschalige toepassing mogelijk is binnen 5 jaar.

# 6 (Financierings)uitdagingen en ondersteuningsbehoefte

In de maatschappij is men momenteel op zoek naar meer kennis over het brede scala van warmteopslagtechnieken dat beschikbaar is voor verschillende uitvoeringsvormen (o.a. centraal/decentraal, bovengronds en ondergronds), use-cases en opslagtermijnen (korte/lange termijn). Daarnaast is men benieuwd naar wanneer de, in potentie efficiëntere lagere TRL warmteopslagtechnieken met hogere capaciteiten en vermogens, beschikbaar komen voor de markt om bij te dragen aan de gestelde klimaat en energiedoelstellingen. De uitrol van nieuwe elektriciteitsaansluitingen zal bijvoorbeeld versneld kunnen worden door denken vanuit het systeemperspectief, en daarmee samenwerking tussen warmte en elektriciteit. Samenwerking tussen energiebedrijven en eindgebruikers is hierin van belang. Een mogelijke oplossing is de invoering van een gepaste subsidie voor energieopslag die toepassing van opslag naar een zelfde niveau tilt als bijvoorbeeld zonnepanelen. Een evenredig beleid en gelijkwaardige regelgeving is daarvoor vereist. Voor de uitdagingen als benoemd in de Routekaart Energieopslag 2023<sup>7</sup> werd een onderverdeling gemaakt tussen financiële, markt, en algemene uitdagingen, in het algemeen en waar mogelijk per technologie. De antwoorden van de stakeholders waren daar grotendeels mee in overeenstemming, en om overlap te voorkomen worden de uitdagingen uit de Routekaart hier niet herhaald. In het kort zijn de grootste genoemde uitdagingen de volgende:

- **Subsidies en financiering:** Er is geen gelijk speelveld voor warmteopslag m.b.t. andere energietechnologie.
- **Integratie en sectorkoppeling:** Inpassing van warmteopslag in het elektriciteitssysteem is vooralsnog onbekend.
- **Internationale kennisuitwisseling:** Er wordt onvoldoende gebruik gemaakt van de internationale kennispositie van Nederland op het gebied van warmteopslag.

Onderstaand worden alle in de uitvraag door de stakeholders genoemde punten meegenomen. In het volgende hoofdstuk wordt de daarop gebaseerde ondersteuningsbehoefte voor versnelde toepassing van warmteopslag in de gebouwde omgeving toegelicht. Algemeen worden ontwikkeluitdagingen voor warmteopslagtechnologie expliciet gemaakt en wordt de wederzijdse afhankelijkheid van warmteopslag met het energienet inzichtelijk gemaakt.



## Algemeen

- De toegevoegde waarde met betrekking tot leveringszekerheid van warmte door warmteopslag binnen Nederland wordt nog onvoldoende onderkend. Decentrale warmteopslag als flexibel middel wordt niet meegenomen in de huidige nationale analyses.<sup>24</sup> Warmteopslag wordt hiermee onvoldoende meegenomen in de markt. Warmte heeft een groot aandeel in het finale energiegebruik in de gebouwde omgeving, en warmteopslag biedt een kans om naast en met elektrificatie afgestemde oplossingen voor het energienet te leveren in decentrale en centrale use-cases.
- Warmte wordt momenteel nog niet behoorlijk gewaardeerd. Een mogelijke integrale verlaging van de maatschappelijke kosten voor het energiesysteem door warmteopslag als flexibiliteitsmiddel moet worden verrekend. Dit gebeurt momenteel nog niet of kan zelfs nog niet worden berekend.
- Achterblijvende regelgeving: Veel regelgeving is gericht op gas en elektriciteit met een lineaire vraag en aanbod relatie in plaats van balanceren. Er is een gebrek aan incentives voor de eindgebruiker om warmteopslag te installeren.
- Buffers maken systemen voordeliger door vermindering zware componenten, systeembelasting, en onderhoud. Niet alleen het energie-aspect bepaalt de business case, maar ook eventuele besparingen op de rest van het energiesysteem. De kostenverlaging van een energiesysteem door de toepassing van warmteopslag wordt momenteel nog niet berekend of kan nog niet berekend worden. Deze besparingen moeten worden meegenomen, en idealiter terugvloeien naar de investeerder voor de opslagtechnologie.
- Landelijke coördinatie rondom warmteopslag ontbreekt. Een grote hoeveelheid partijen beoordeelt de vergunningaanvraag bij warmteopslag (gemeenten, veiligheidsdiensten, Staatsbosbeheer, etc.) . Dit levert vertraging op.
- Juridisch kader is nodig voor hoge en midden temperatuuropslag. Warmteopslag in ondiepe aquifers (tot 500 meter) met een temperatuur hoger dan 25 graden Celsius is op grond van de Waterwet op het moment door invulling van de provincies alleen toegestaan voor pilotprojecten. Voor projecten in dieper gelegen aquifers geldt nu de Mijnbouwwet, met andere vergunningseisen dan de Waterwet.
- Bewustwording voor ruimtelijke ordening moet worden verhoogd. Om te zorgen dat de opschaling van warmteopslag niet vastloopt op een gebrek aan ondergrondse ruimte is een ondergrondse ruimtelijke planning nodig.
- Beleidskader financiering warmteopslag is nodig. Voor warmteopslag is in Nederland beperkt subsidie beschikbaar, en het verkrijgen van EU subsidies is een tijdrovend proces. Nationale subsidies worden soms door Europese staatssteunregels geblokkeerd.
- Er is een groot tekort aan (getraind) personeel om de benodigde technische ontwikkelingen voor opschaling van productie en integratie in het energiesysteem door te voeren.

<sup>24</sup> Energy Transition Model (ETM), <https://energytransitionmodel.com/>, geraadpleegd maart 2024

## Markttuitrol

- Er bestaat momenteel een gebrek aan toepasbare normen, standaardisering, en wetgeving voor bepaalde vormen van warmteopslag. Normen zijn nodig voor certificering, certificering is nodig voor verzekering, en verzekering is nodig voor aanbesteding. Het gebrek aan toepasbare normen zorgt voor vertraging in de uitvoering van projecten en toepassingen, en voor moeilijkheden in het financiering en verzekering proces.
- Meer transparantie over daadwerkelijke prestaties is noodzakelijk. Leren van pilotprojecten en doorontwikkeling op basis van de behaalde resultaten is momenteel beperkt, maar zal de marktintroductie versnellen.

## Centraal

- Het wegnemen of gedeeltelijk wegnemen van het risico voor investeerders is belangrijk. Eventuele garanties van de overheid maken het betaalbaarder voor investeerders en makkelijker voor ontwikkelaars om geld aan te trekken. Momenteel moet de ROI voor investeringen 25% zijn, maar dat is te hoog voor een technologie die nog goeddeels in ontwikkeling is. Een ROI van 10% (met garantstelling van overheden) zou veel beter te behalen zijn.

## Decentraal

- Er is nog geen gestandaardiseerde interface en systeembesturing waarin opslag geïntegreerd is. Er zijn momenteel verschillende energie management systemen (EMS), maar er is geen standaard.
- Warmteopslag gebouwde omgeving heeft voor producenten een hoog afbreukrisico: er zijn grote investeringen nodig voor opschaling van productie, waarbij een zekere afname van units gegarandeerd moet zijn voordat tot investering kan worden overgegaan. De technologie heeft voor producenten typisch overbruggingsgaranties nodig van 10 tot 1000 eenheden productie per jaar om dit risico te minimaliseren.

## PCM, Passief

- Installateurs en projectontwikkelaars hebben een gebrek aan markt bewustzijn en incentives om duurzame materialen te verwerken. De terughoudendheid van producenten van bouwmaterialen om PCM te verwerken in hun materialen langs bekende verkoopkanalen is een van de voornaamste aangegeven redenen voor een langzame adoptie.

## IJzer Redox

- Beleid en regelgeving lopen achter met betrekking tot ijzer als energiedrager. Hierdoor is ijzer nog niet geregistreerd bij de EU als duurzame brandstof, omdat momenteel alleen vloeistoffen en gassen als zodanig gekwalificeerd worden.

# 7 Aanbevelingen

## In het kort

Op korte, middellange en lange termijn is de markt geholpen met het volgende:

- Subsidies en financiering: er moet een gelijk speelveld komen voor warmteopslagtechnologie ten opzichte van andere opslagtechnologie (zoals elektrische opslag) en ten opzichte van technologie voor energievoorziening. Als de werkelijk behaalde maatschappelijke besparingen worden verrekend in de vorm van subsidie of risicoverlaging van implementatie van warmteopslagtechnologie, kan een lagere prijs per opslagcapaciteit worden verkregen, en wordt warmteopslagtechnologie een stuk interessanter voor consumenten, ontwikkelaars, en dus investeerders. Dit kan bijvoorbeeld door het meenemen van decentrale opslag in subsidie voor verduurzaming van woningen tot projecten op wijk of industrie/businessparken, tot warmtenetten. Voorts dient er bekendheid te zijn over deze mogelijke verdienmodellen van warmteopslag bij potentiële financiers.
- Integratie en sectorkoppeling: er moet meer aandacht komen voor inpassing van warmteopslagtechnologie in het grotere energiesysteem. Inpassing van warmteopslag in het elektriciteitssysteem is momenteel nog slechts kleinschalig. Modelstudies zouden kunnen bijdragen aan verduidelijking op welke manier warmteopslag kan worden toegepast voor het oplossen van de problemen in de elektriciteitsvoorziening (use-cases) en daaropvolgende mogelijke besparingen voor de maatschappij (mogelijke business-cases).
- Internationale kennisuitwisseling: in het internationale speelveld kan Nederlandse warmteopslagtechnologie door kennisuitwisseling een grotere rol spelen in buitenlandse use-cases, waarmee een exportperspectief ontstaat. Daarnaast zal buitenlandse know-how meer moeten worden toegepast op de Nederlandse markt (zie ook het rapport over internationale stand der techniek).

## In meer detail

Nederland heeft een breed scala aan technieken in ontwikkeling die alle in meer of mindere mate nodig zijn om de klimaatdoelen van 2050 te halen. Grootschalige warmteopslag als MTO, HTO, en grootschalige ondergrondse opslag helpen potentieel met het flexibiliseren van het warmtenet en maken seizoensopslag mogelijk voor grote systemen. Op locaties met een tekort aan ruimte en overschot aan PV kan compacte hoge temperatuur warmteopslag voorzien in middellange tot lange-termijnopslag. Decentrale ondergrondse en bovengrondse opslag kan van week tot seizoen opslag van warmte en koude voorzien op locaties zonder warmtenet, en implementatie van passieve opslag (PMCs) voor de reductie van piekvraag tijdens de dag nacht cyclus helpt lokaal ook. Daarnaast kan verliesvrije opslag worden gerealiseerd door TCM en door IJzer-Redoxopslag, wat piekvraag voor warmtenetten kan leveren of als strategische opslag kan dienen. Daarnaast kan TCM worden ingezet voor opslag en transport van restwarmte en als compacte warmteopslag in woningen.

Bestaande en uitontwikkelde opslagtechnieken voor de gebouwde omgeving zijn OBES en WKO. Technieken met een TRL van 8 of hoger zijn MTO, voelbare warmteopslag in water, PCM en HTO voor de gebouwde omgeving. Technisch worden hiervoor geen grootschalige belemmeringen voorzien om een grootschalige adoptie binnen 5 jaar te realiseren. HTO en

TCM zijn warmteopslagtechnieken met een TRL 7 of lager, waarvoor doorontwikkeling nodig is, op het gebied van bijvoorbeeld resistente componenten voor HTO en energiedichtheid en stabiliteit voor TCM. Marktadoptie wordt voor deze technieken voorzien binnen 5-10 jaar. IJzer-Redox warmteopslag heeft momenteel een TRL van 6 en heeft een sterke koppeling met de industrie. Doorontwikkeling van de reductiestap is kritisch voor toekomstige grootschalige toepassing ervan en de prijs van waterstof zal dit mede beïnvloeden.

Grootschalige toepassing van warmteopslag binnen Nederland kent een aantal uitdagingen. Per warmteopslagtechniek en toepassingsmogelijkheid is er slechts een beperkte hoeveelheid producenten. Hierdoor kan het zijn dat nationale subsidies soms door Europese staatssteunregels worden geblokkeerd. Een gebrek aan kennis over warmteopslag onder beleidsmakers en vakmensen over de toegevoegde waarde en implementatie houdt een blinde vlek in stand en leidt tot het ontbreken van een ontwikkelplan voor de sector, een gebrek aan standaarden, en een personeelstekort.

## Kansen

Warmteopslag in Nederland heeft een internationale koploper-positie in de toepassing van ATES systemen en innovatieve nieuwe technieken zoals IJzer Redox en TCM, met aanzienlijke exportpotentie in de toekomst. Warmteopslag kan in Nederland een grote rol spelen in de besparing van energie en kosten en het faciliteren van de stap naar een fossielvrije gebouwde omgeving. Veel technieken staan op het punt van toepassing en hebben ondersteuning nodig in de uitvoering en opschaling van productie om aan de vraag te kunnen voldoen bij opschaling. Het wachten op benodigde beleidswijzigingen voor de inherente incentivering van warmteopslag welke de groei van hernieuwbare energieopwekking mogelijk maakt is kostbare tijd welke het aantal ontwikkelaars in Nederland nog verder kan doen krimpen. Investering is direct nodig voor een gezonde sector en uitbreiding van innovatieve technieken om toekomstige knelpunten in de warmtetransitie te voorkomen.

## Helder nationaal beleid is noodzakelijk

Grootschalige marktadoptie van warmteopslagtechnieken op een hoog TRL vindt nog niet op korte termijn plaats. Warmteopslag ondervindt op dit moment significante uitdagingen vanuit wetgeving en de markt. Normering en certificering zullen het aantrekkelijker maken voor verzekeraars, wat het makkelijker zal maken om financiën aan te trekken voor implementatie. Hierbij blijft cofinanciering van opschaling en subsidie voor marktstimulering een vitaal onderdeel. Voor grootschalige ondergrondse en bovengrondse warmteopslag beslaan vergunningprocedures door onduidelijke wetgeving rondom gedeelde systemen een groot gedeelte van de kosten. Verduidelijking van de wetgeving zal het proces mogelijk versnellen en de kosten drukken. Warmteopslag vindt momenteel geen waardering in de berekening NTA 8800 binnen de BENG eisen, en financiële incentives voor eindgebruikers ontbreken door vaste energietarieven en de salderingsregeling. Door warmteopslag mee te nemen in de NTA 8800 waardering kan dit worden verholpen. Daarmee zal het maatschappelijk bewustzijn over warmteopslag toenemen en wordt het mogelijk dat grootschalig toegepaste warmteopslag kan bijdragen aan ondersteuning van het elektriciteitsnetwerk met flexibele tarieven en afbouw van de salderingsregeling.

## Een brede inzet voor warmteopslag

Door te investeren in innovatieve warmteopslagtechnieken kunnen toekomstige bottlenecks in de energietransitie worden voorkomen. Hiervoor is consistente doorinvestering noodzakelijk voor technologie op TRL5-8 om de groei van innovatieve technieken te garanderen in de vorm van onderzoek en ontwikkeling. Het wegnemen van investeringsrisico's voor grootschalige projecten zoals HTO vanaf TRL9 is daarnaast van belang om groei van productiecapaciteit en inpassing in het energiesysteem mogelijk te maken.

## Blinde vlek toegevoegde waarde

Integratie van centrale en decentrale warmteopslagtechnologie in modelstudies verduidelijkt de toegevoegde waarde van warmteopslagtechnologie als flexibel middel. Momenteel is er beperkte kennis over de mogelijke kostenbesparingen bij toepassing van warmteopslagtechnologie voor de energietransitie. Daarnaast wordt de toegevoegde waarde met betrekking tot leveringszekerheid van warmte door warmteopslag binnen Nederland nog onvoldoende onderkend. Decentrale warmteopslag als flexibel middel wordt tot nu toe niet meegenomen in de huidige nationale analyses.<sup>24</sup>

De specifieke en puntsgewijze aanbevelingen met referentie naar soortgelijke aanbevelingen als gedaan in de Routekaart Energieopslag (RKEO)<sup>7</sup> en in de rapportage van ESNL<sup>25</sup> zijn opgenomen in de appendix (Bijlage C).

## 8 Verantwoording

Het voorliggende document is tot stand gekomen na uitgebreide feedback van stakeholders in verschillende workshops, feedback-sessies en aan de hand van vragenlijsten. De expertise van de experts is hierbij onontbeerlijk geweest. Naast input van TNO voor de resultaten zoals weergegeven in dit document is uit brede kring gebruik gemaakt van input uit het werkveld. RVO en TKI UE hebben TNO ondersteuning verleend bij het samenstellen van de klankbordgroep en de administratieve en organisatorische ondersteuning verleend voor de workshop en de webinar.

Ook Energy Storage NL (ESNL), de brancheorganisatie voor de Nederlandse energieopslagsector, heeft input geleverd aan dit document. ESNL is actiehouder m.b.t. de Routekaart Energieopslag 2023<sup>7</sup> die vraagt om het professionaliseren en organiseren van de samenwerking en gezamenlijke vertegenwoordiging van de warmteopslagsector. ESNL heeft een plan van aanpak voor deze actie gemaakt, waarin zij ingaat op verschillende aspecten die nodig zijn voor het verder professionaliseren van deze sector.<sup>25</sup> De inhoud hiervan is meegenomen bij de totstandkoming van dit document, en de makers van dit document hebben op hun beurt de mogelijkheid gehad om input te leveren op het genoemde plan van aanpak. De inhoud van beide documenten beoogt daarom volledig met elkaar in lijn te zijn.

Als laatste is vermeldenswaard dat naast dit proces om te komen tot een Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland een tweede project liep. Dit project, uitgevoerd door Renewable Heat B.V. (zie link in deze referentie<sup>6</sup>), had tot doel om de Nederlandse positie op het gebied van warmteopslag in internationaal verband weer te geven, en aan te geven hoe Nederland kan profiteren van die positie, enerzijds door slim gebruik te maken van kennis die al in het buitenland aanwezig is op dit gebied, anderzijds om Nederlandse kennis in het buitenland te gelde te maken. De samenwerking met Renewable Heat B.V. (Wim van Helden) is als zeer prettig ervaren en zijn input om te komen tot voorliggend document wordt zeer gewaardeerd.

<sup>25</sup> Plan van Aanpak voor het verbeteren van de professionalisering en organisatie van de warmteopslag sector in Nederland, ESNL, 2024.

# Ondertekening

TNO › Energy & Materials Transition › Rijswijk, 14 november 2024

Ir. R.M.A. Kroeze  
Research Manager

Dr. ir. R. Cuypers  
Auteur



## Bijlage A

# Stakeholders

De volgende stakeholders zijn gecontacteerd om een bijdrage te leveren aan de klankbordgroep en input te geven op de vragenlijsten.

Aalbrechts-HFC	IfTechnology
Alliander	Iron+
ARES B.V.	KWR Water
ARES/RTB	Meewind
ArtEnergy	Newton Energy Solutions
Borg Energy	Novar
Brabetech	Orange Climate/PCMTechology
Cellcius	PLUSS Advanced Technologies
CESAR	Pure Energie
DuraFlow	Renewable Heat
EBN	RIFT
ECWEnergy	SolarEis
Eneco	SolarFreezer BV
Energy Storage NL, FME	TKI Urban Energy
ENERGYNEST	TNO
Ennatuurlijk	TU Twente
GroeneWarmte	TU/e
HoCoSto	Windunie

## Bijlage B

# Vragenlijst

In deze paragraaf is de integrale vragenlijst opgenomen die tot stand is gekomen in samenspraak tussen TNO, Wim van Helden, en TKI UE, en die is verstuurd aan de hierboven genoemde stakeholders.

Voor effectieve verwerking van de gegeven antwoorden op de vragen voor het produceren van waardevolle overzichten is gebruikt gemaakt van classificatie van de antwoorden en van visuele hulpmiddelen en weergaves. De vragenlijst is verstuurd als word-document.

Vanwege het internationale karakter van het onderzoek naar verschillende vormen van warmteopslag is de vragenlijst in het Engels gesteld. Antwoorden zijn zowel in het Engels als in het Nederlands ontvangen, maar voor verwerking is slechts de Nederlandse taal gebruikt.

### Questionnaire:

Thermal Energy Storage in the Netherlands

Dear expert, thank you for participating in this questionnaire as part of the assignment "Innovatieroadmap warmteopslag voor de gebouwde omgeving in Nederland" performed by TNO and Renewable Heat on behalf of the Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

In this questionnaire we aim to gather the information required to develop a roadmap of current state and latest innovation of the thermal energy storage sector in the Netherlands, and provide an outlook in anticipation of the requirements of the energy transition. Hereby we hope to answer the following questions:

1. What is the current status of the Dutch thermal energy storage techniques.
2. What are the use-cases and specifications for classification?
3. What is the expected time-to-market for thermal energy storage systems in development?
4. What are the financial bottlenecks and where is support desired?

There are two type of questions, closed and open questions as indicated by the suggested options or the free form description suggestion. The document is provided as a word document to allow for custom space requirement of free form answers. Feel free to edit the document at your own insight. Similarly, if your answer requires a combination or anything other than one of the provided options for a closed question, feel free to answer accordingly.

This questionnaire contains 51 questions and is expected to take between 15-30 minutes.

To submit the questionnaire and for further questions:

Dr. Wim van Helden  
+31 62 014 32 24  
wim@wimvanhelden.com

Ir. Jochem Jongerius  
+31 62 197 59 18  
jochem.jongerius@tno.nl

Dr. Ruud Cuypers  
+31 62 113 43 93  
ruud.cuypers@tno.nl

*General*

1. Expert Name:
2. Storage Principle (Sensible/latent/thermochemical/redox/other):
3. What is your work sector in storage? (Research/demonstration/scale-up/development/deployment):
4. What external sectors are involved in the development? (Industry/R&D/independent/other):
5. Would you like to have a meeting to discuss or explain the position of your technology?
6. If yes, which format would you like to meet? (TEAMS/in-person/telephone)
7. If yes, what would be the preferred date and time of the meeting?

*Technology*

8. Description (Free form description):
9. What is the active storage material? (Free form description):
10. TRL of the technology (1-9):
11. Current Storage Density [kWh/m<sup>3</sup>, GJ/m<sup>3</sup>]:
12. Current Effective Storage Capacity (per installation/module) [kWh, GWh]:
13. Target Effective Storage Capacity (per installation/module) [kWh, GWh]:
14. What are the physical limitations for upscaling the storage capacity of the technology? (Free form description):
15. Current Typical Output Power (per installation/module) [kW, MW]
16. Future Expected Typical Output Power (per installation/module) [kW, MW]
17. What is the expected timescale for achieving the target performance improvements? (years)
18. What are physical limitations for upscaling the power output of the technology? (Free form description):

19. What is the relation between power output and State-of-Charge of the system? (Free form description):
  20. What is the effective storage time? (Days/Weeks/Months/Season):
  21. Percentage of Capacity Loss During Effective Storage Time [%]:
  22. Proposed end-user(s) of Technology (Free form description):
  23. Description of the Storage Technology Application (Free form description):
  24. Operational Temperatures (source/sink temperatures, temperature lift) [degC]:
  25. Cycle Efficiency (per application(s)):
  26. Active/passive Storage:
  27. Auxiliary Equipment (Free form description):
  28. What is the ancillary energy use per cycle? (per installation/module) [Wh, kWh, MWh]:
  29. Does the auxiliary equipment pose a limitation to scaling of the storage capacity? (Free form description):
  30. Operational Footprint [m<sup>2</sup>]:
  31. Which are the Main Materials Used? (excl. the storage material) (Free form description):
  32. Shape of the Storage including Auxiliary Equipment (Free form description):
  33. Picture of the Setup (Insert picture):
  34. Schematic of the Setup (Insert schematic):
  35. What aspects of this technology should be further developed? (Free form description):
- Use Cases*
36. Typical projected use-case such as seasonal, day-night, flexibility or other, what are the source and sink, typical powers, control strategy ...(Free form description):
  37. Is the storage technology for individual or collective use? (Free form description):
  38. What is the application potential in the built environment? (Free form description):
  39. What is the application potential in other sectors such as industry, food, etc.? (Free form description):
  40. What are the external infrastructure requirements for installation of the storage technology? (Free form description):
  41. What are typical locations where the storage can be applied (Free form description):

42. What are typical locations where the storage cannot be applied (Free form description):

*Market*

43. For TRL <8, when do you expect the technology to be on the market? (Free form description)

44. If so, when can the technology be applied/distributed on large scale? (Free form description):

45. What are the factors defining a positive business case for OEM (Free form description, such as energy price, material price, market size, etc.)?

46. When is there a positive business case for the end-user? (Free form description, such as energy price, subsidies, taxes, loan & interest rate, etc.):

*Bottlenecks*

47. Are there technical bottlenecks for further development/implementation/scalability? (Free form description):

48. Are there financial bottlenecks for further development/implementation/scalability? (Free form description):

49. What would be desired as support from government to increase application speed? (Free form description, such as subsidies, taxes, development funding):

50. What would be desired as support from the knowledge community as a network? (Free form description, such as joined research, collaboration, conferences, industry networks, etc.):

51. Any other remarks? (Free form description).

## Bijlage C

# Overzicht aanbevelingen

Onderstaand zijn de specifieke en puntsgewijze aanbevelingen gegeven met referentie naar soortgelijke aanbevelingen als gedaan in de Routekaart Energieopslag (RKEO)<sup>2</sup> en door ESNL.

<b>Nationaal Beleid: Betrokken overheid en maatschappelijke planning</b>	(RKEO, 51)
<b>Inventarisatie</b> benodigde en mogelijke toepassing korte termijn en seizoensopslag met en zonder koppeling warmtenet	(RKEO, 52, 66) (ESNL, 16)
<b>Waardebepaling</b> kleinschalige en grootschalige warmteopslag GO als flexibiliteitsmiddel en verminderen van CO2 uitstoot.	(RKEO, 64) (ESNL, 1, 2, 3, 4, 19, 36)
<b>Brede inzet</b> door middel van een innovatiesnelweg laag TRL technieken	(RKEO, 67)
<b>Lange termijn visie</b> m.b.t. levensduur opslagtechnieken en afnemende restwarmte industrie	
<b>Bepaal normen</b> voor grootschalig en kleinschalige voelbare warmteopslag	
<b>Standaardisatie vergunningaanvraag</b> grootschalige ondergrondse voelbare opslag	(ESNL, 13)
<b>Wettelijke kader MTO/HTO</b> bepalen onafhankelijk van diepte	(RKEO, 65)
<b>Versnel formatie wetgeving</b> innovatie producten	(RKEO, 69)
<b>Aanpassen NTA8800:</b> energieprestatie bepaling gebouwen	(RKEO, 55) (ESNL, 12)
<b>Nationaal Platform Warmte</b> , incl. bijeenkomsten en uitwisseling 'best-practice', coördinatie en samenwerking tussen marktpartijen en kennis/onderzoeksinstituten.	(RKEO, 61) (ESNL, 7, 24, 35, 42, 49)
<b>Bewustwording: Promotie warmte naast elektrificatie</b>	
<b>Training en informatievoorziening wetgevers en beleidmakers</b> voor het versnellen van vergunningen en verandering wetgeving	(RKEO, 53) (ESNL, 6, 37)
<b>Lighthouse project:</b> Grootschalige projecten met toepassing verschillende vormen warmteopslag in bijvoorbeeld scholen of sportclubs.	(ESNL, 7, 8, 14)
<b>Publicaties</b> met demonstratie van toegevoegde waarde warmteopslag door middel van waardebepaling flexibiliteitsmiddel en doorrekenen kostenvermindering	(ESNL, 23, 24, 34)
<b>Marktondersteuning</b> van o.a. communicatie (Zou kunnen via InvestNL en mogelijk Nationaal Platform Warmte)	(ESNL, 46: LCOS, 47)

**Tools voor consumenten** voor bepaling optimale thuisconfiguratie, en voorkomen inefficiëntie (ESNL, 9)

## Financieel: Ondersteun waar nodig

**Afbouw fossiele subsidie:** Reduceer oneerlijke competitie

**Innovatiesnelweg** met consistente ontwikkel financiering voor laag TRL technieken (RKEO, 67) (ESNL, 19, 20)  
**CO2 emissie reductie focus subsidie** (bredere focus, niet techniek specifiek) (ESNL, 11)

**Cofinanciering TRL 7-9** voor het overbruggen 'valley of death' en opschalen van productie of aanvraag certificering (ESNL, 25)

**Meerjarige belastingvoordeel grote projecten:** beter voor TCM dan eenmalige subsidie (ESNL, 12)

**Afbouw saldering** voor inherente incentivering

**Risicofinanciering:** proefboring HTO/MTO en afbreukrisico in GO (stimuleert langer termijn denken investeerders)

**Subsidie kleinschalige warmteopslag:** Pas de ISDE regeling aan voor innovatieve warmteopslag (RKEO, 68) (ESNL, 12)

**Alternatieve Transportrechten:** Tijdsafhankelijke transportcapaciteit aansluiting

## Technisch

**Standaardisatie communicatie energiemangement:** Digitale communicatie protocol producent afhankelijk voor warmtepomp, e-boilers, opslag (ESNL, 19 niet benoemd maar onderdeel van)

**Ontwikkel Reactietijd Protocol** voor voorkomen pieken tijdens overschakelen naar dal tijd.

## Uitvoering

**Financiering bijscholing** voor personeel om tekort te reduceren (ESNL 27, 40)

**Tools voor berekenen benodigde grootschalige warmteopslag** capaciteit en vermogen als flexibel middel in warmtenet



## Bijlage D

# Overzicht van warmteopslagtechnieken uit de routekaart energieopslag 2024

	Technologie	Vermogen	Toepassing	Termijn	Temp.	TRL	Marktpenetratie NL
Seizoensopslag warmte	Lage temperatuur bodemenergie (open, gesloten)	50 kW – 1 MW	Collectief / Individueel GO	Maanden	<25 °C	9-11	3000+ open, 80.000 gesloten
	Midden- en hoge temperatuur ondergrondse opslag (aquifers, ATEs)	1 MW – 30 MW	Collectief GO	Maanden	25-90 °C	7-8	Enkele
	Hoge temperatuur gesloten bodemenergie (boreholes, BTES)	500 kW – 5 MW	Collectief / Individueel GO	Maanden	<90 °C	7-8	Enkele
	Warmteopslag in mijnen	1 MW – 30 MW	Collectief GO	Maanden	<90 °C	7-8	Enkele
	Kuil thermische opslag (PTES)	1 MW – 15 MW	Collectief GO	Maanden	<90 °C	7-8	Niet in NL, Enkele in Denemarken
Korte-termijn opslag warmte	Grote warmwater tank (lange-termijn, lager vermogen) (TTES)	1 MW – 5 MW	Collectief GO	Maanden	<90 °C	6-7	Experimenteel
	Grote warmwater tank (korte-termijn, groot vermogen) (TTES)	100 kW – 150 MW	Industrieel, Glastuinbouw	Uren-dagen	<90 °C	9-11	Tientallen (e-boiler) tot honderden (WKK)
	Kleine warmwater tank (woning) (TTES)	1 kW – 50 kW	Individueel GO	Uren-dagen	<95 °C	9-11	100.000 tot 1 miljoen
	Faseovergang (PCM)	Divers	Divers	Uren-dagen	Variabel	6-9	Tientallen ijsbuffers, Niche Markten, gesmolten zout nog niet in NL
	Vaste stof (Beton, steen)	10 MW – 100 MW	Collectief GO, Industrieel	Uren-weken	<1200 °C	6-7	Experimenteel
	Thermochemische materialen (TCM)	Divers	Collectief GO, Industrieel	Weken	Variabel	4-6	Experimenteel

Figuur 35. Overzichtstabel als weergegeven in de routekaart energieopslag 2023, met bijbehorende kentallen per technologie<sup>7</sup>.

Energy & Materials Transition

Lange Kleiweg 137  
2288 GJ Rijswijk  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**TNO** innovation  
for life