

# Overzicht industriële warmteopslagtechnologie en toepassing

TNO 2025 R10406 – 4 maart 2025

# Overzicht industriële warmteopslagtechnologie en toepassing

Auteurs	Robert de Boer Simon Smeding Herbert Zondag
Rubricering rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	27 (excl. voor- en achterblad)
Opdrachtgever	Directie Klimaat van het DG Energie en Klimaat van het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)
Programmanaam	Onderzoeksprogramma Energietransitie Studies
Projectnummer	060.59381

Dit project is gefinancierd als onderdeel van het onderzoeksprogramma Energietransitie Studies onder regie van de directie Klimaat van het DG Energie en Klimaat van het ministerie van KGG met als doel het leveren van kennis voor energiebeleid.

**Alle rechten voorbehouden**

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

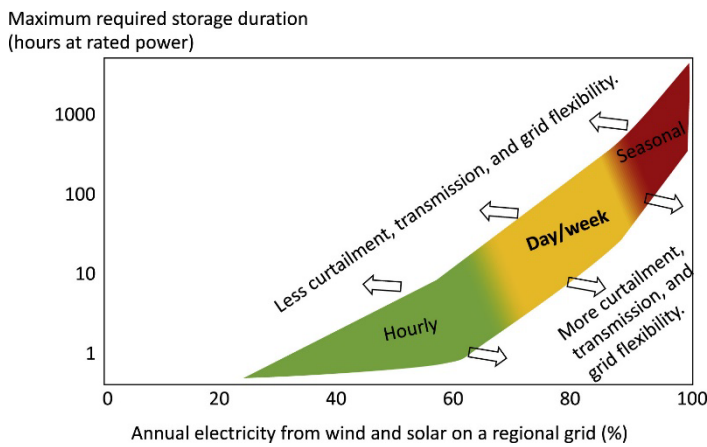
© 2025 TNO

# Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
2	Industriële toepassingen van warmteopslag.....	7
2.1	Conventionele toepassingen in de industrie.....	7
2.2	Pilot- & demonstratie projecten in industrie.....	8
3	Technologie-overzicht industriële warmteopslag.....	12
3.1	Inleiding.....	12
3.2	Overzicht grootschalige warmteopslagtechnologie – TNO database.....	12
3.3	Meest kansrijke warmteopslagtechnologieën.....	17
4	Toepassingspotentieel Nederlandse industrie.....	22
4.1	Conventionele toepassingen – Batch processen en WKK.....	22
4.2	Opkomende toepassingen – Elektrificatie en HT opslag.....	22
5	Conclusies en discussie.....	26

# 1 Inleiding

Het belang van energieopslag neemt toe met het stijgende aandeel duurzame ‘niet regelbare’ bronnen in het energiesysteem. De afstemming van aanbod en vraag van elektriciteit vraagt om innovaties die de flexibiliteit in het energiesysteem versterken. Onderstaande <sup>4</sup> illustreert dat naarmate het aandeel van zon en wind in de elektriciteitsvoorziening stijgt, er in toenemende mate energieopslag nodig is waarmee een langere opslagduur moet worden overbrugd.

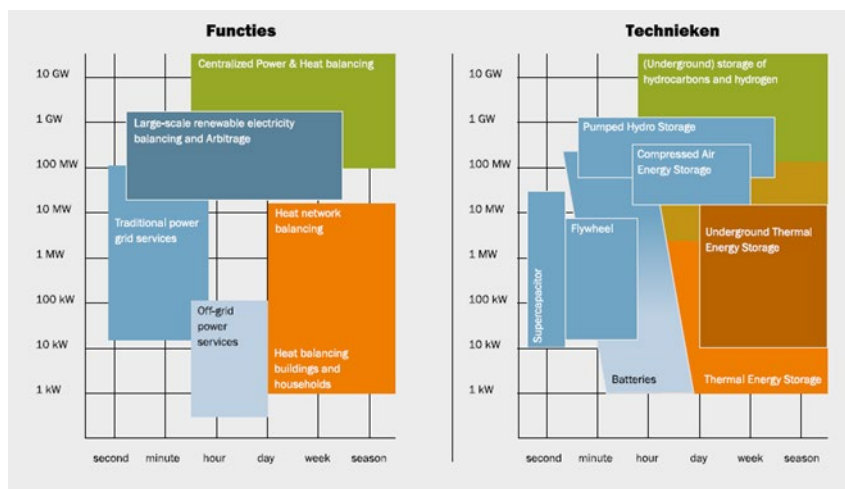


**Figuur 1.1:** Schematische weergave van de benodigde tijdsduur van energieopslag bij toenemend aandeel van zon en wind in de energiemix

De routekaart energieopslag door EZK<sup>2</sup> schetst welke functies in het energiesysteem gevraagd worden in samenhang met de typische kenmerken van de opslagtechnologieën die daarvoor ingezet kunnen worden (figuur hieronder).

<sup>1</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435119305392>

<sup>2</sup> <https://open.overheid.nl/documenten/7f9ca5c1-3f11-4efc-9b0d-1ffa36aa59ed/file>



De kleuren in de figuur geven weer in welke stroom de technieken en functies zich begeven: blauw = elektriciteit, groen = moleculen, oranje = warmte.

**Figuur 1.2:** Weergave van flexibiliteitsfuncties en technieken in het energiesysteem naar schaalgrootte en tijdsinterval

Deze figuur toont dat warmteopslagtechnieken een rol kunnen vervullen voor energieopslag op een tijdschaal van uren tot seizoenen, en met vermogens over een brede range van 1 kW tot 100 MW, ruwweg van huishoudelijke tot industriële schaal.

In de Nederlandse industrie is de vraag naar proceswarmte de dominante energiecomponent, en omdat dit hoofdzakelijk wordt geleverd uit fossiele bronnen (gas, olie, ..) heeft het de grootste bijdrage aan industriële CO<sub>2</sub> emissies. Verduurzaming van de industriële warmtehuishouding vormt de belangrijkste opgave voor de industrie om de afgesproken doelen voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie te behalen. Elektrificatie van de warmtehuishouding, op basis van duurzame elektriciteit is een route waarmee een grote bijdrage aan emissiereductie kan worden gerealiseerd<sup>3</sup>.

Toepassing van industriële warmteopslag kan daarbovenop een bijdrage leveren aan de invulling van de groeiende vraag naar energieopslag en flexibiliteit in een duurzaam energiesysteem, en tegelijkertijd de industrie in staat stellen een groot aandeel duurzame energie te benutten.

Internationaal is er toenemende aandacht voor industriële warmteopslag als bouwsteen voor energie flexibiliteit en worden nieuwe opslagsystemen gebouwd in de vorm van pilots, demo's en pre-commerciële toepassingen. Ook voor de Nederlandse industrie zijn er toepassingsmogelijkheden voor warmteopslag, als enabler voor verdere verduurzaming van de productieprocessen.

Bij het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG), in het Nationaal Programma Verduurzaming Industrie, is behoefte aan een overzicht van de technische mogelijkheden van warmteopslag en de toepassingsmogelijkheden ervan in de industrie. Dit overzicht kan als input gebruikt worden voor toekomstige beleid gericht op verduurzaming van de industriële warmtehuishouding, gericht op effectieve inzet van warmteopslagtechnologie.

<sup>3</sup> <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2022/09/19/routekaart-elektrificatie-in-de-industrie/Routekaart+Elektrificatie+in+de+Industrie.pdf>

Om een eerste beeld te verkrijgen van het toepassingspotentieel van industriële warmteopslag is TNO gevraagd informatie te verzamelen ter beantwoording van de volgende vragen:

- ) Welke toepassingen van warmteopslag worden momenteel in de Nederlandse industrie gehanteerd;
- ) Wat is de huidige (internationale) stand van de techniek van industriële warmteopslag;
- ) Wat is het toepassingspotentieel van warmteopslag voor de Nederlandse industrie.

Deze memo beoogt bovenstaande vragen te beantwoorden. Er wordt in de volgende hoofdstukken allereerst een beeld geschetst van de momenteel ingezette warmteopslagtechnieken bij industriële processen, zowel in Nederland als daarbuiten. Vervolgens wordt de stand van de techniek van industriële warmteopslag beschreven. De internationale literatuur en de verzamelde informatie van innovatieve warmteopslag pilots en demo's, gebundeld in de industriële warmteopslag-database van TNO, is daarvoor als basis genomen.

Op basis van de karakteristieken van de Nederlandse industriële warmtevraag, in combinatie met de technische mogelijkheden van bestaande en innovatieve warmteopslag technologieën, is het toepassingspotentieel van warmteopslag in de Nederlandse industriële processen geschat.

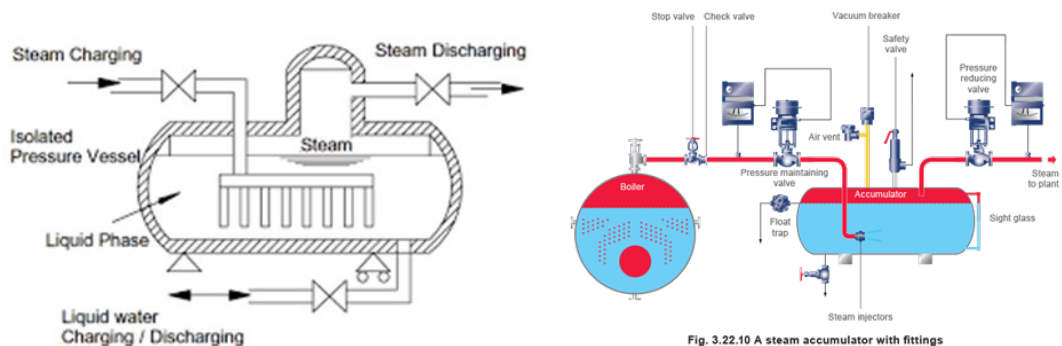
Deze studie is in een kort tijdsbestek (december 2024) uitgevoerd en daarbij is gebruik gemaakt van bestaande informatie en de bestaande TNO warmteopslag database. Er is geen extra tijd besteed om de database uit te breiden en de gegenereerde grafische uitvoer verder te verbeteren.

# 2 Industriële toepassingen van warmteopslag

## 2.1 Conventionele toepassingen in de industrie

Conventionele toepassingen van industriële warmteopslag hebben vooral te maken met ‘peak shaving’, veelal in batchprocessen en met hoge-temperatuur warmteterugwinning in zogenoemde regeneratoren.

Piek stoomvraag treedt vaak op bij batch processen waarbij stoom wordt gebruikt voor verwarming, of periodieke schoonmaak van installaties met stoom. Traditioneel worden voor piek stoomvraag stoomaccumulatoren gebruikt. Typische toepassingen zijn met name autoclaaf processen, bijvoorbeeld voor sterilisatie, maar ook andere opstart- en batchprocessen kunnen tot grote piekvraag leiden. Fabrikanten van stoomaccumulatoren zijn bijvoorbeeld Stork, Bosch en Spirax Sarco. Fabrikant Spirax Sarco geeft de volgende lijst processen: “Brewing, Textiles, Dry-cleaning, Canning, Lightweight concrete block manufacturers, Specialised areas of the steel making industry, Rubber industries with large autoclaves, Hosiery finishing, Rubber, Plastic and polystyrene moulding, Steam peeling, Hospital and industrial sterilisation.” Hoeveel stoomaccumulatoren in Nederland geïnstalleerd zijn is niet bekend, maar de technologie wordt al sinds het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw toegepast in stoomsystemen.



Figuur 2.1: Stoomaccumulatoren

Een andere klassieke industriële warmteopslag toepassing is bij hoge-temperatuur processen met regeneratorovens. In essentie betreft het hier warmtewisselaars, deels gevuld met keramische stenen voor kortdurende warmteopslag. De stenen worden eerst door een hete rookgasstroom verhit, waarna deze warmte weer wordt onttrokken door een instroom van koude verbrandingslucht die in tegengestelde richting door de warmtewisselaar stroomt, teneinde deze voor te verwarmen. Dit wordt met name toegepast in de staalindustrie (windverhitters of Cowpers) en de glasindustrie. Typische opslagduur (tijdsduur tot omkering van de stromingsrichting) is ongeveer 20 min. in glasovens en 30 min. tot 1 uur in Cowper heaters. Temperaturen zijn in de orde van 900-1500°C.





800°C opgewarmd en gebruikt om warmte op te slaan in een warmteopslag van Kraftblock op basis van ijzerslak<sup>4</sup>. Door het timen van het laadproces kan worden gehandeld op de elektriciteitsmarkt. Het project wordt ondersteund met een DEI subsidie.

- › Bij Mebin Europort is een pilot van EnergyNEST gerealiseerd in samenwerking met ENEL, met als doel om onder realistische condities aan te tonen dat flexibiliteit en duurzaamheid van thermische elektriciteitscentrales met deze warmteopslag kan worden verhoogd<sup>5</sup>. Dit is een pilot, die niet geïntegreerd is in een industrieel proces.
- › Bij de fabriek van Coca-Cola in Dongen zijn in 2023 de gasboilers vervangen door twee e-boilers voor de stoomproductie in combinatie met twee industriële elektrische warmtepompen die warm proceswater leveren en twee 20 m hoge gestratificeerde buffer-tanks voor opslag van warm water.<sup>6,7</sup>
- › Gulpener is bezig met het project ‘brouwen zonder stoomketel’. Doelstelling is om de gasboilers geheel te vervangen door stoom producerende warmtepompen, in combinatie met heet-water buffers<sup>8</sup>.
- › Holland Malt Eemshaven is bezig met het ontwikkelen van een CO<sub>2</sub> vrij moutproces. Hiervoor is een volledig geëlektrificeerd droogproces gerealiseerd met warmteterugwinning uit drooglucht, warmtepompen en een warmtebuffer<sup>9</sup>.

## 2.2.2 Buitenland

Het aantal gerealiseerde innovatieve industriële warmteopslagprojecten in Nederland is nog niet heel hoog. Om een completer overzicht te krijgen van de huidige mogelijkheden is hieronder ook een overzicht van hoge-temperatuur (>100°C) industriële warmtebufferprojecten in het buitenland toegevoegd.

Enkele industriële pilots met hoge temperatuur industriële warmteopslagsystemen:

- › Voedingsindustrie:
  - Bij PPF, een producent van diervoeding in Hongarije, en bij Tempo, een producent van bier en frisdrank in Israël, heeft Brenmiller (product bGen™, crushed rock verhitbaar tot 650°C, Figuur 2.5(a)) commerciële warmteopslag projecten gerealiseerd<sup>10</sup>, waarbij de opslag elektrisch geladen wordt, en ontladen voor stoomlevering.
  - Bij KALL Ingredients Ltd, een mais verwerkende industrie in Hongarije, wordt door Kyoto (product HeatCube, gesmolten zoutopslag voor stoomlevering tot 400°C, **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**(b)) een project gerealiseerd met levering van heat-as-a-service<sup>11</sup>.
- › Staal- en keramische industrie:
  - In de keramische industrie (Wienerberger, Tegulys, Villeroy & Boch) en de metaalindustrie (Arcelor Mittal, Aubert & Duval) zijn meerdere hogetemperatuur industriële warmteopslag projecten gerealiseerd door Eco-Tech Ceram (product Eco-

<sup>4</sup> <https://www.installatie.nl/nieuws/warmtebatterij-helpt-lays-om-duurzaam-chips-te-bakken/#:~:text=In%20de%20chipsfabriek%20van%20PepsiCo,warmte%20uit%20duurzame%20elektriciteit%20haalt.>

<sup>5</sup> <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i17119/energynest-en-enel-onderzoeken-potentie-thermische-batterij-in-haven-rotterdam>

<sup>6</sup> <https://www.change.inc/industrie/nederlandse-fabriek-coca-cola-werkt-co2-neutraal-op-groene-stroom-40607>

<sup>7</sup> <https://www.coca-cola.com/content/dam/onexp/nl/nl/documents/Whitepaper-Dongen-NL.pdf>

<sup>8</sup> <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/655/4b1/bbd/6554b1bbd7541578686402.pdf>

<sup>9</sup> <https://gpi-tanks.com/holland-malt-our-malting-facility-now-operates-completely-emission-free>

<sup>10</sup> <https://bren-energy.com/projects/>

<sup>11</sup> <https://www.kyotogroup.no/customers/kall-ingredients>

Stock, vaste stof opslag tot 1500°C, **Figuur 2.4(a)**<sup>12</sup>. In essentie is hun product ook weer een soort regeneratorenoven, waarbij de ene tank geladen wordt via afgassen, terwijl de andere tank ontladen wordt met inkomende verbrandingslucht. Periodiek keert de luchtstroom om.

- › Chemische industrie:
  - Bij Yara in Noorwegen heeft Energy Nest (product ThermalBattery™, betonopslag tot 400°C, **Figuur 2.4(b)**) een warmteopslag gerealiseerd, die piekstoom levert ten behoeve van peakshaving van de stoomreinigingsvraag<sup>13</sup>.
- › Elektriciteitsproductie
  - Bij ENEL<sup>14</sup> in Toscane/Italië heeft Brenmiller een warmteopslag gerealiseerd, die aanvullende flexibiliteit biedt in de elektriciteitsproductie, **Figuur 2.6**. De warmtebuffer wordt ingezet voor piekstoom en kan bij lage elektriciteitsvraag worden opgeladen.
- › Industriële utility
  - Bij GreenLab in Denemarken, onderdeel van een industriecluster, wordt een 100 MWh HeatBattery van het Amerikaanse Rondo Energy geïnstalleerd<sup>15</sup>. Dit systeem, gebaseerd op warmteopslag in keramisch materiaal, wordt met duurzame elektriciteit gevoed en levert warmte aan het industrieel warmtenetwerk voor de aangesloten gebruikers.



**Figuur 2.4:** (a) Eco-Tech Ceram installatie bij Teguly's, (b) Energy Nest installatie bij Yara in Porsgrunn (Noorwegen)



**Figuur 2.5:** (a) Brenmiller installatie bij Tempo, (b) Kyoto installatie bij KALL ingredients

<sup>12</sup> <https://ecotechceram.com/en/references/>

<sup>13</sup> <https://energy-nest.com/portfolio/case-study-yara/>

<sup>14</sup> <https://www.enelgreenpower.com/media/news/2022/11/storage-system-tes-santa-barbara>

<sup>15</sup> <https://www.greenlab.dk/knowledge/greenlab-will-replace-natural-gas-with-green-heat/>

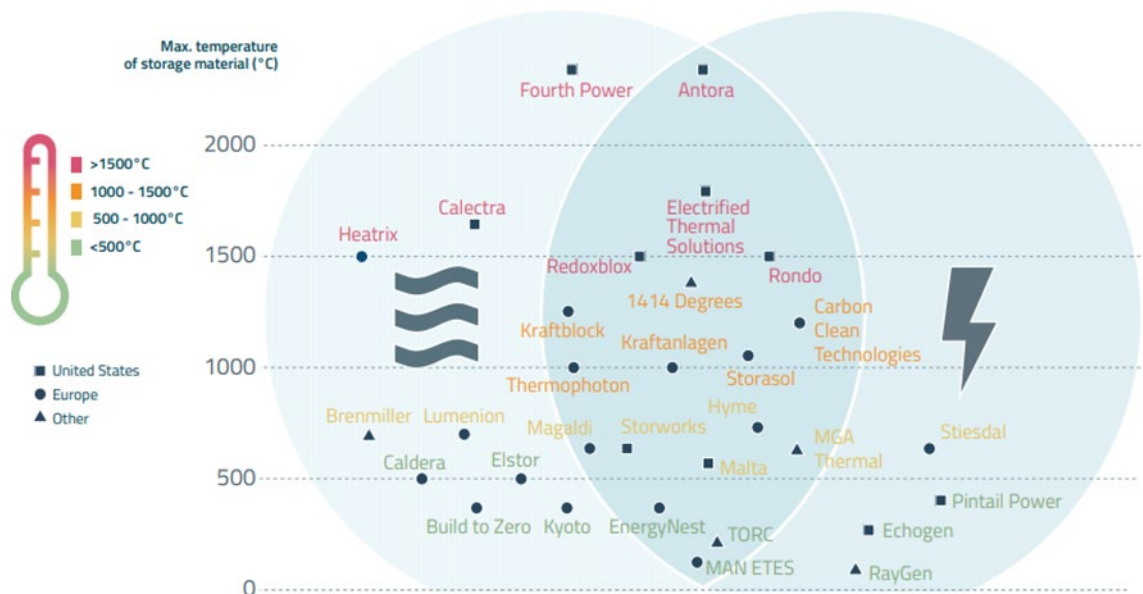


Figuur 2.6: Brenniler warmteopslag bij de Enel elektriciteitscentrale (Italië)

# 3 Technologie-overzicht industriële warmteopslag

## 3.1 Inleiding

De ontwikkeling van grootschalige industriële hoge-temperatuur warmteopslagsystemen is momenteel zeer dynamisch. Het aanbod neemt voortdurend toe en de schaalgrootte stijgt van lab en demonstratie van enkele MWh opslag naar ‘1st of a kind’ van tientallen MWh. Hierin is ook de trend zichtbaar om bij steeds hogere temperaturen de warmte op te slaan. Zodoende kan niet alleen de opslagdichtheid / capaciteit toenemen, maar neemt ook het aantal processen toe waar warmteopslag gebruikt kan worden. Tenslotte is naast warmtelevering ook elektriciteitslevering beter mogelijk (Rankine of Carnot battery). Bij hogere temperaturen ligt het conversierendement van warmte naar elektriciteit veel hoger.



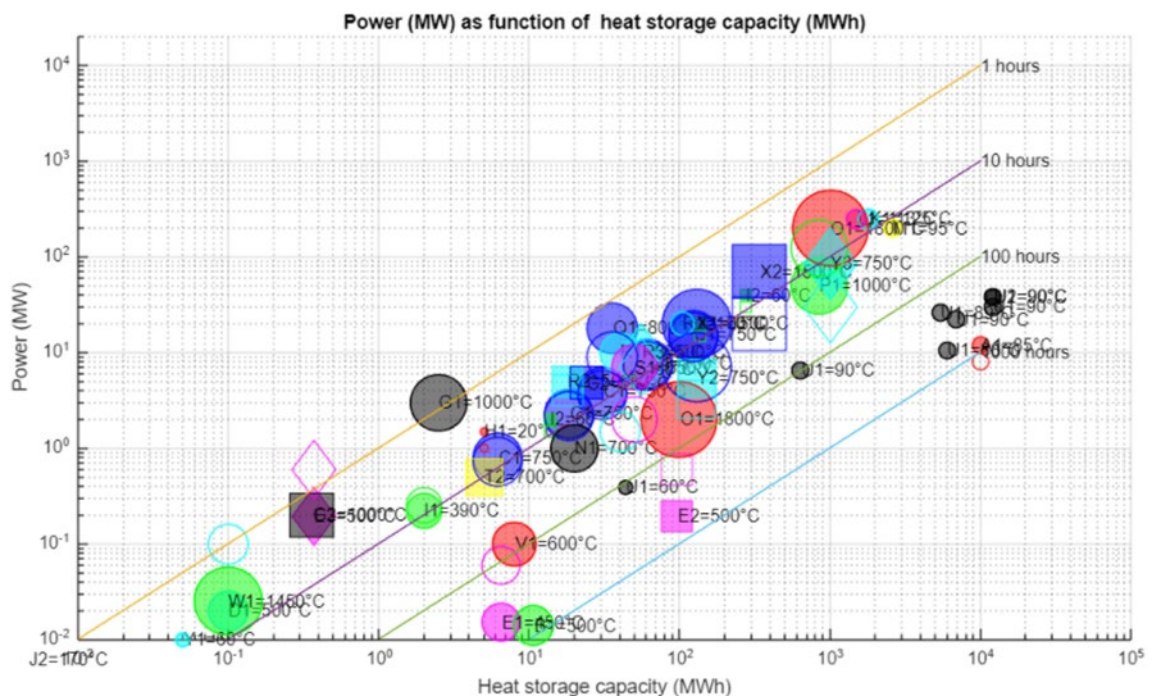
Figuur 3.1: De belangrijkste bedrijven die warmte opslag technologieën ontwikkelen naar temperatuurniveau, locatie hoofdkantoor en toepassing (warmte en/of elektriciteit levering).<sup>16</sup>

## 3.2 Overzicht grootschalige warmteopslagtechnologie – TNO database

TNO heeft een database ontwikkeld met hierin een reeks warmteopslagsystemen, en hun technische kenmerken. Door een grafische weergave en keuze van weergegeven parameters is het mogelijk meer inzicht te krijgen in de ontwikkelingen naar opslagduur,

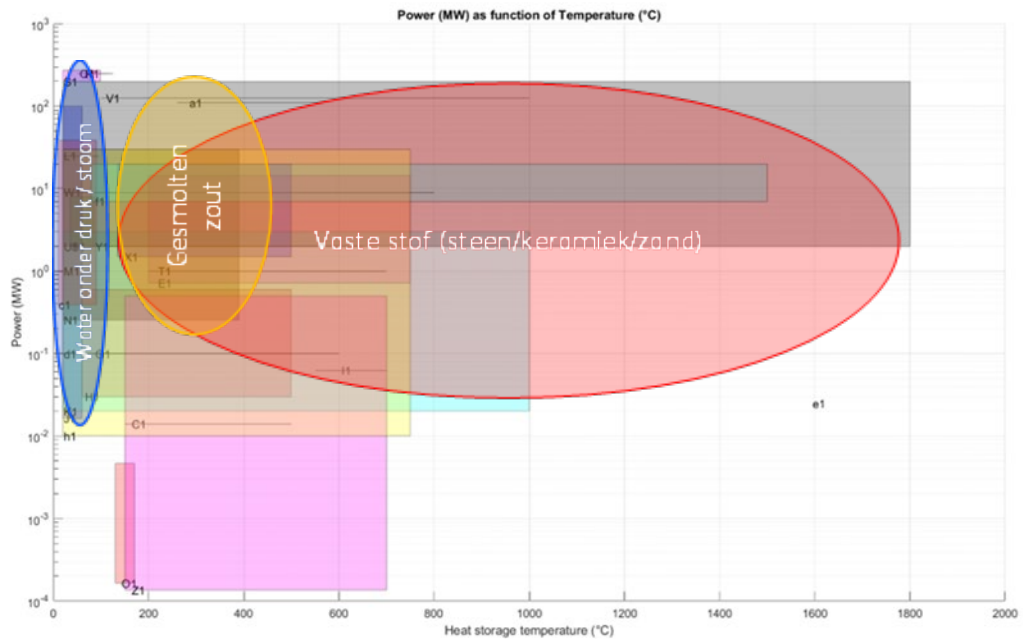
<sup>16</sup> Technical report of Future Cleantech Architects: *Decarbonizing High Temperature Heat in Industry*, October 2024.

energiedichtheid, temperatuurniveau en investeringskosten. In **Figuur 3.2** zijn van een groot aantal systemen de thermische vermogens weergegeven gerelateerd aan de opslagcapaciteit. Zodoende is het mogelijk om van een technologie te bepalen wat de opslagduur is. Systemen met opslagtijden van 500-2.000 uur zijn seizoenbuffers. Voorbeelden zijn de ‘bovengrondse’ opslagbekkens gevuld met heet water (PIT-storages) die veelvuldig in Denemarken worden toegepast. Veel thermische energieopslagsystemen worden ontwikkeld voor een opslagduur van ± 10 uur. Hiermee is het mogelijk gebruik te maken van dag/nacht cycli. In tegenstelling tot seizoensopslag zijn dan een paar honderd cycli per jaar te maken, hetgeen de buffer economisch aantrekkelijker maakt.



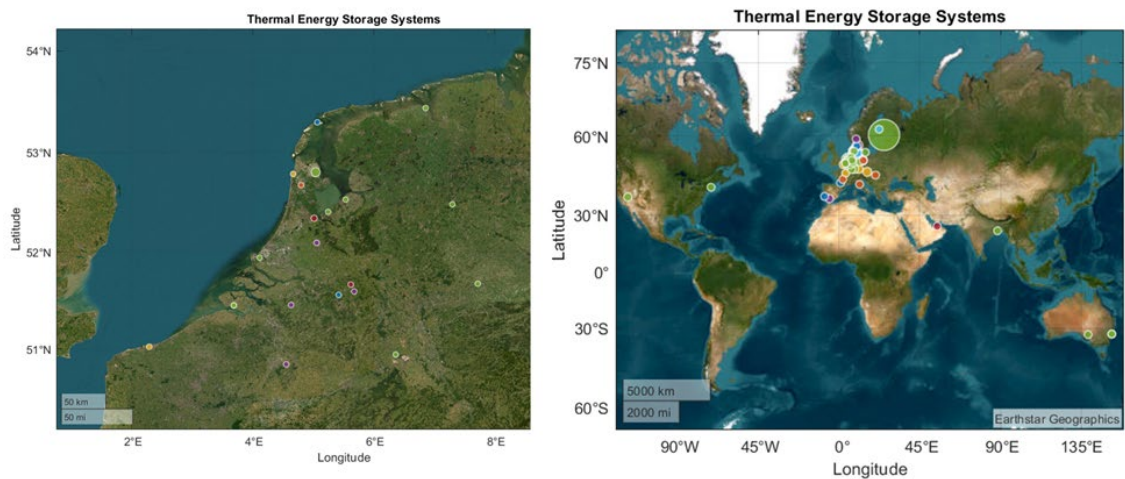
**Figuur 3.2:** Weergave van de warmteopslagsystemen naar capaciteit (MWh) en vermogen (MW) . De grootte van de symbolen geeft het (theoretische) temperatuurniveau van de technologie aan. Deze weergave is ter illustratie van de inhoud van de TNO database van industriële warmteopslagsystemen.

Voor industriële toepassingen is het temperatuurniveau waarmee de buffer ontladen kan worden erg belangrijk (zie **Figuur 3.3**). Voor toepassingen in staal, glas of cement productie zijn veelal temperaturen boven de 1000°C noodzakelijk. Een techniek als die van JouleHive of Rondo Energy, warmteopslag in vaste stoffen tot resp. 1800°C en 1500°C, zou hier mogelijk aan kunnen voldoen. Een groot aantal systemen is ontwikkeld voor maximum temperaturen van 500-700°C. Met commercieel goed verkrijgbare elektrische weerstandverwarming kunnen deze units geladen worden. Met lucht of gesmolten zout kan de warmte onttrokken worden. De overige systemen zijn ontwikkeld voor toepassingen in de voedings- en levensmiddelenindustrie waar veelal kan worden volstaan met heet water of stoom tot maximaal 200°C.



**Figuur 3.3:** Temperatuurniveau van warmteopslagsystemen gerelateerd aan het laad/ontlaadvermogen

Het aantal grootschalige warmteopslagsystemen dat in Nederland is toegepast is nog beperkt. Hiervan zijn de meeste ook nog opslagsystemen gebruikmakend van heet water (bijv. HoCoSto en tank systemen). Systemen op hogere temperatuur zijn een systeem van EnergyNest en Kraftblock (zie ook § 2.2.1), die beide gebruik maken van opslag in vaste stof, respectievelijk beton en staalslak.



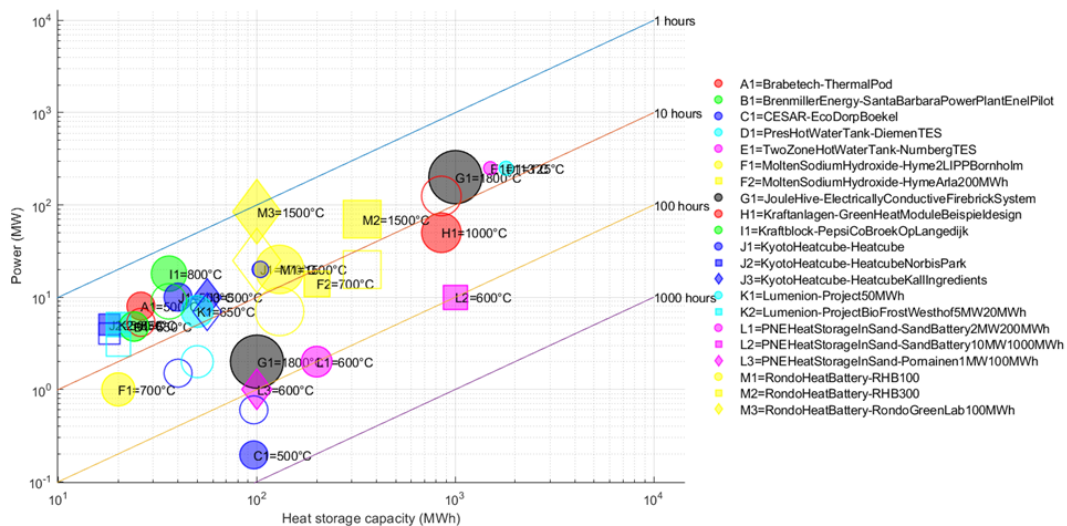
**Figuur 3.4:** Locaties in database opgenomen geplande / gerealiseerde warmte opslag systemen in Nederland / Wereldwijd

Om een beter idee te krijgen van de huidige status van de warmteopslag techniek die in Nederlandse industrie toegepast kan gaan worden, is de database gefilterd op een aantal parameters.

- › **Temperatuur > 100°C;** hiermee worden de systemen voor de gebouwde omgeving eruit gefilterd.

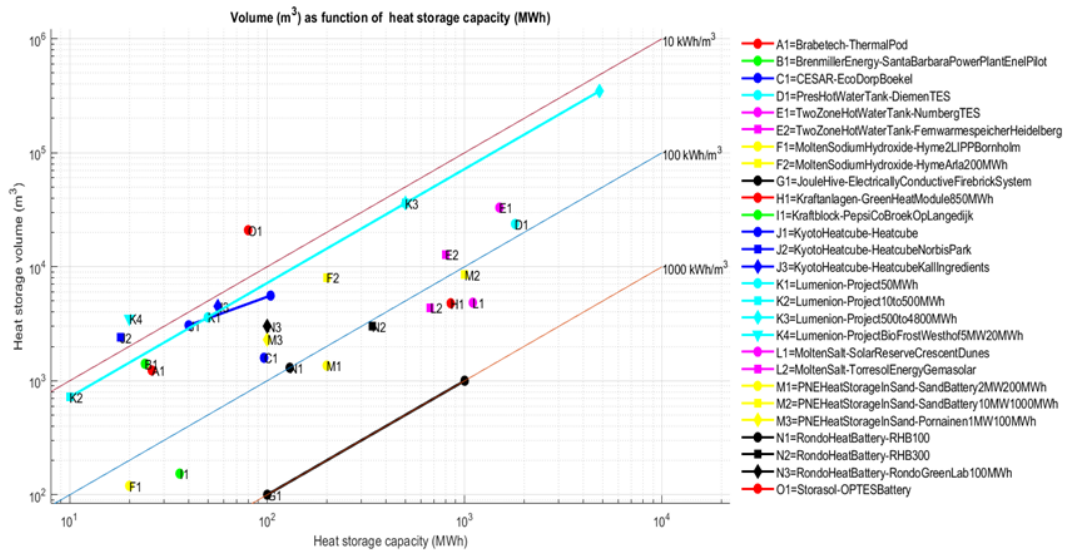
- › **TRL ≥ 6**; hiermee worden systemen in laboratoria die nog niet op kilowatt schaal getest zijn uitgesloten
- › **Omvang ≥ 1 MWh**; zodoende er sprake is van grootschalige systemen.
- › **Status is actief**; systemen waarvan de fabrikant failliet is of zijn gestopt worden niet meegenomen.

In **Figuur 3.5** worden de gefilterde gegevens weergegeven. Uitgezonderd de seizoensopslagsystemen van het Nederlandse CESAR en Batsand SandBattery gaat het veelal om opslagsystemen voor korte tot middellange termijn (± 10 uur). In de volgende paragraaf worden de systemen gecategoriseerd en verder beschreven. De opslagdichtheid van systemen ligt bij lagere TRL veelal wat hoger dan van systemen die werkelijk gedemonstreerd worden. Dit komt doordat in laboratoria doorgaans gerekend wordt met het kale opslagmateriaal en bij werkelijk gebouwde pilot- en demosystemen komt ook de integratie en infrastructuur bij het volume van het systeem.



**Figuur 3.5:** Weergave van geselecteerde systemen naar warmteopslag capaciteit, vermogen en opslagduur

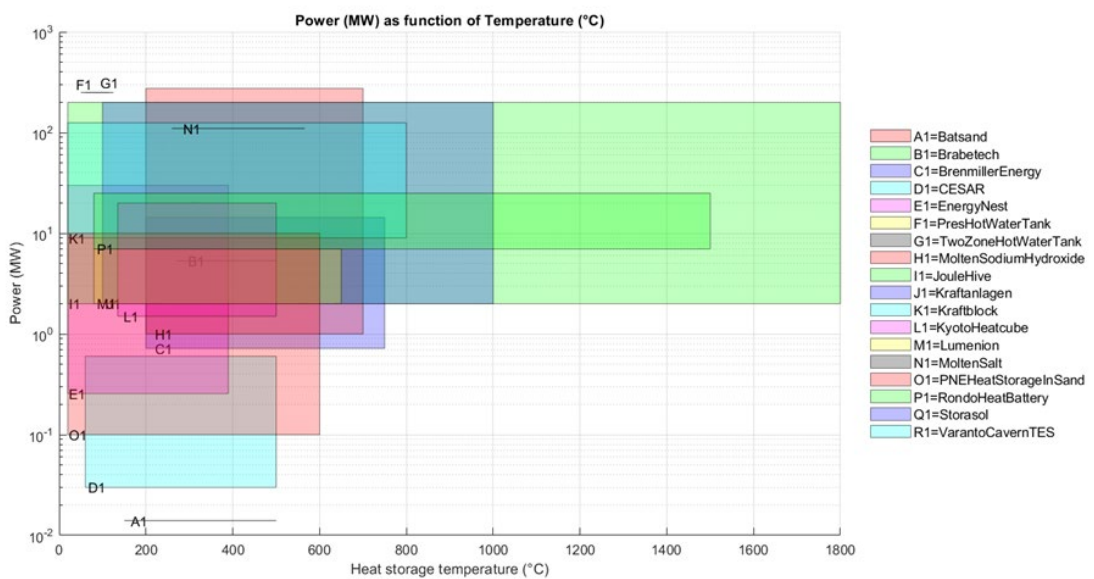




Figuur 3.6: Weergave van geselecteerde systemen naar warmteopslag capaciteit, opslagvolume en energiedichtheid

Voor veel systemen is ruimtegebruik van een opslag belangrijker dan de massa. In **Figuur 3.6** blijkt dat het JouleHives (G1) systeem bestaande uit steen met een geïntegreerde electrode, de hoogste energiedichtheid tot 1 MWh/m<sup>3</sup> laat zien. Het Storasol systeem komt door de grote luchtkanalen en isolatie niet verder dan 1-10 kWh/m<sup>3</sup>. Veel systemen hebben een energiedichtheid van ± 100 kWh/m<sup>3</sup>.

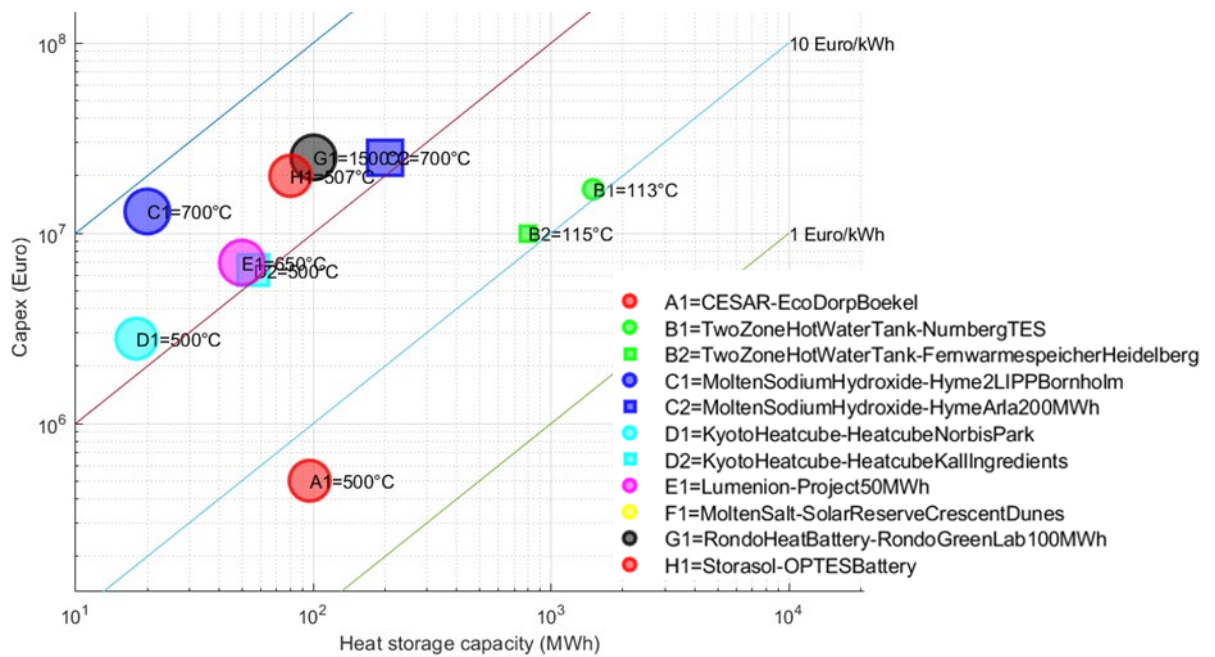
**Figuur 3.7** geeft een overzicht tussen temperatuur en vermogen. Voor een industriële toepassing moet het minimale temperatuurniveau voldoende zijn om aan de benodigde temperatuur van het proces te voldoen. Een hoger temperatuurniveau dan de toepassing draagt bij aan een hogere opslagdichtheid, maar niet aan de functionaliteit. Een technologie kan hierdoor ook complexer en duurder worden dan noodzakelijk.



Figuur 3.7: Temperatuurniveau van ‘gefilterde’ warmteopslagsystemen gerelateerd aan het laad/ontlaadvermogen

De investeringskosten (Capex) van warmteopslagsystemen zijn beperkt openbaar beschikbaar, en beschikbare informatie is in **Figuur 3.8** getoond. De huidige Capex van systemen zit rond de 100 euro/kWh. Bij opschaling en bij langere opslagtijden gaat deze prijs naar verwachting naar beneden. Duidelijk lagere kosten (~10€/kWh) zijn mogelijk met warmteopslag in waterbuffers (tot ~120°C) en ook met systemen die specifiek zijn uitgelegd voor langere termijn opslag (CESAR systeem).

Thermische systemen zijn enigszins goedkoper dan elektrische accusystemen, met een huidige kostenrange van 700-1300 €/kWh<sup>17</sup>. Daarnaast hebben thermische systemen betere mogelijkheden om bij gelijkblijvend vermogen de opslagcapaciteit te verhogen waarbij de potentieel lagere kosten van opslagmateriaal een groot voordeel kan zijn.



**Figuur 3.8:** Capex van een beperkt aantal warmteopslagsystemen. Systeem A1 (Cesar) is ontwikkeld als seizoenopslag en zodoende een lage Capex per kWh. B1 en B2 zijn heet water systemen van rond de 115°C

### 3.3 Meest kansrijke warmteopslagtechnologieën

De warmteopslag-systemen die op basis van de gehanteerde selectie criteria (filters) geschikt zijn voor industriële toepassingen kunnen onderverdeeld worden in een aantal categorieën:

- Voelbare warmte
  - › Vaste stof
    - Steen (beton, lava steen, rots, kiezel, ijzerslakken)
    - Keramiek
    - Zand
    - Staal

<sup>17</sup> <https://www.energystoragenl.nl/wp-content/uploads/2024/04/Elektroschmisch-Li-ion.pdf>

- › Vloeistof
  - Water (onder druk)
  - Gesmolten zout
- Latente warmte (fase overgang materiaal).

Het gaat veelal om goed beschikbare materialen of reststoffen (ijzerslakken). Er zitten grote verschillen in de wijze waarop de warmte wordt in- en uitgekoppeld. Sommige systemen maken gebruik van een interne verwarming. Dit kan zijn weerstandverwarming via verwarmingselementen, via de buizen of van geleidend gemaakte vuurvaste materialen. Verwarming door middel van stralingselementen zijn een alternatief hiervoor. De meeste systemen maken gebruik van een externe (rest) warmtebron. De warmte wordt overgedragen van en naar het opslagmedium in directe vorm, veelal lucht, of indirecte vorm (door buizen) met warmteoverdrachtsmedia als thermische olie, stoom of lucht.

De uitkoppeling van warmte hangt sterk van het temperatuurniveau af. Op lagere temperatuur is het mogelijk gebruik te maken van buizen waardoor thermische olie of water/stoom stroomt. Voor hogere temperatuur wordt veelal lucht gebruikt waarvan de warmte buiten de opslagunit wordt overgedragen via een stoomgenerator.

De opslagefficiëntie is nog lastig objectief vast te stellen. Voor een roundtrip-efficiency is geen vaste definitie of testprotocol en wordt veelal vastgesteld voor een periode van 24 uur. Opgaves van (potentiële) fabrikanten zijn veelal niet objectief te controleren. Waardes tussen de 90 en 95% lijkt in de praktijk de bovengrens. Grootschalige systemen hebben veelal relatief kleinere verliezen dan kleinschalige. Modulaire systemen, veelal op zeecontainerformaat, hebben een gelimiteerde isolatiedikte waardoor de verliezen iets hoger liggen.

De levensduur van opslagsystemen ligt minimaal op 20 jaar. Van vermoeiing of veroudering van opslagmedia lijkt nauwelijks sprake doordat vrijwel alle systemen op basis van voelbare warmte alleen aan mechanische vermoeiing bloot staan.

De gezondheids- en milieurisico's van de meeste opslagmaterialen is nihil of zeer gering. Het gebruik van staalslakken is een bijzonder geval. Nu wordt dit restproduct van de staalproductie ingezet als vulmiddel onder bijvoorbeeld wegen. Echter als daar vocht bij komt kan dit materiaal uitloggen. In de opslagbuffer zit het veilig opgesloten. Na afdanken van de warmtebuffer kan je spreken van een vertraagd afdanken van de afvalstroom. Veel materialen kunnen in de afdankfase weer opnieuw ingezet worden. Denk aan staal, zand, zouten. Voor beton is dit lastiger.

In onderstaande tabellen wordt per categorie de beschikbare technologie samengevat qua opslagmedium, wijze van in- en uitkoppelen warmte en de toepassing. Voor vloeistoffen is het warmteoverdrachtsmedium gelijk aan het opslagmedium.

**Tabel 3.1:** Overzicht voelbare warmte in vaste vorm: steen / keramiek / staal / zand

Naam	Opslagmedium	Inkoppelen warmte	Uitkoppelen warmte	Toepassing
<i>Batsand sand battery</i>	<i>Zand</i>	<i>Externe bron, weerstand verwarming, hete lucht</i>	<i>Hete lucht</i>	<i>Gebouwde omgeving</i>
Brennenergie	Gesteente	Weerstand verwarming, stoom door buizen	Stoom door buizen	Proces warmte
<i>CESAR (NL)</i>	<i>Vulkanische gesteente</i>	<i>Weerstand verwarming buizen</i>	<i>Hete lucht door buizen</i>	<i>Gebouwde omgeving 100-1000 MWh</i>
Eco Tech Ceram / EcoStock	Keramiek	Extern, hete lucht door keramische structuur	Hete lucht door keramische structuur	Regenerator
EnergyNest	Beton (Heatcrete)	Externe bron, Olie, stoom door buizen	Olie / stoom door buizen	Power-to-X Restwarmte benutting
<b>Joule Hive</b>	Geleidend keramiek	Weerstand verwarming door keramiek	Hete lucht	Staal, glas en cement productie
Kraftblock	Ijzerslakken	Externe bron, hete lucht door gepakt bed	Hete lucht door gepakt bed	Proceswarmte
Lumenion	Staal	Weerstandverwarming	Hete lucht tussen platen pakket	Proceswarmte
Polar Night Energy Sand battery	Zand Gemalen zeepsteen	Buizen met hete lucht; externe weerstands verwarming	Buizen met hete lucht	Process Industry 200-1000MWh 2-10 MW
Rondo Heat Battery	Keramiek	Stralingsverwarming	Hete lucht	Proces warmte en elektriciteit productie
Storasol	Kiezel / grind stenen	Externe bron, hete lucht door gestorte bed	Hete lucht	Proces warmte

**Tabel 3.2:** Overzicht voelbare warmte in gesmolten zout

Naam	Opslagmedium / warmte transport medium	Omvang gerealiseerd	Toepassing
Brabetech	Nitraat zout	28 MWh	Proces warmte
Kyoto Heatcube	Nitraat zout	56 MWh	Proces warmte / elektriciteitsopwekking

**Tabel 3.3:** Overzicht voelbare warmte in water onder druk (Temperatuur > 100°C)

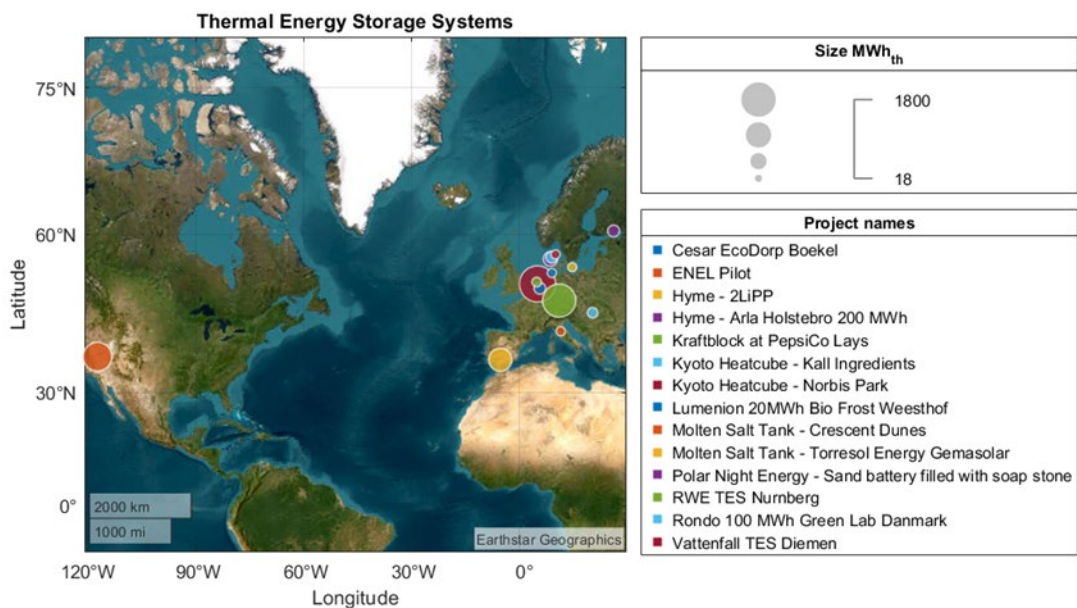
Naam	Opslagmedium / warmte transport medium	Wijze van opslag	Toepassing
Pressure Hot Water Tank	Water onder druk	Tank	Energiecentrale / stadsverwarming
Two Zone Hot Water Tank	Water onder druk	Tank	Stadsverwarming
Kraftanlagen	Water onder druk	Tank	Stadsverwarming
VarantoCavernTES	Water onder druk	Ondergrond	Stadsverwarming

Tabel 3.4: Overzicht fase transformatie materialen (PCM) systemen

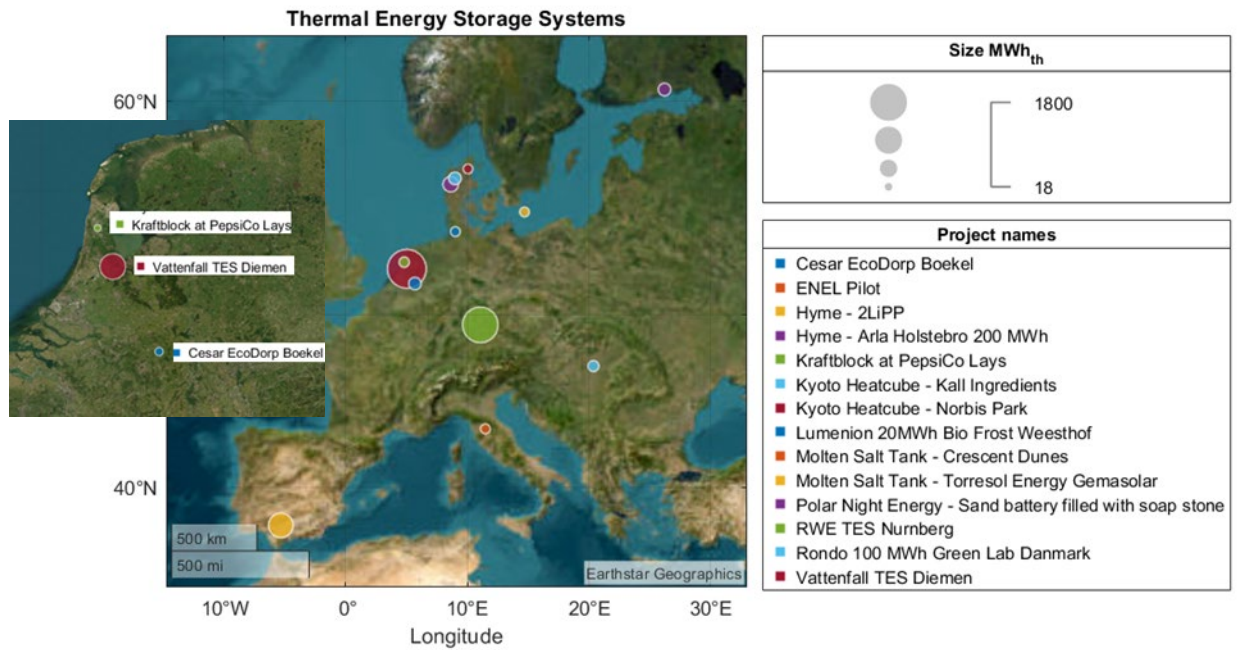
Naam	Opslagmedium	Inkoppelen warmte	Uitkoppelen warmte	Toepassing
MGA Thermal	Miscibility Gap Alloy (PCM composiet) Metalen deeltjes smelten en stollen in vaste matrix)	<i>Gesloten Stikstofstroming tussen MGA blokken</i>		<i>Industriële warmte, elektriciteit opwekking</i>

De geografische spreiding van hogetemperatuur warmteopslagprojecten is op één project na in de Verenigde Staten allemaal in Europa (Figuur 3.9). De bedrijven die deze technologie ontwikkelen bevinden zich vooral in Westerse landen (Noord Amerika, Europa en Australië). Vanuit Azië zijn wel veel batterij systemen bekend maar is informatie over warmteopslag zeer beperkt. Onduidelijk is waarom deze systemen minder zichtbaar zijn in de literatuur.

Kijkt men naar Nederland (Figuur 3.10) dan blijft er maar één echte industriële toepassing over, de Kraftblock unit bij PepsiCo. Met name Denemarken heeft relatief veel nieuwe initiatieven voor het testen van industriële opslagsystemen op schaal van ~100 MWh, met technologie van Hyme en Rondo Nu het percentage duurzaam opgewekte elektriciteit in Nederland toeneemt en er meer behoefte is aan flexibiliteit is het wenselijk om naast elektriciteitsopslag in batterijen voor de korte termijn en waterstofopslag voor de lange termijn ook warmteopslag voor de middellange termijn mogelijk te maken en in de praktijk te demonsteren.



Figuur 3.9: Spreiding van in de database bekende locaties van demonstratiesystemen hoge temperatuur warmteopslag wereldwijd



**Figuur 3.10:** Spreiding van in de database bekende locaties demonstratiesystemen hoge temperatuur warmteopslag in Nederland en Europa

# 4 Toepassingspotentieel Nederlandse industrie

## 4.1 Conventionele toepassingen – Batch processen en WKK

Zoals eerder aangegeven in hoofdstuk 2, wordt warmteopslag in de industrie meestal toegepast voor piek stoomvraag, die vaak optreedt bij batch processen waarbij stoom wordt gebruikt voor verwarming. Kiesewetter<sup>18</sup> (2001) geeft aan dat ongeveer 30% van het energiegebruik in de industrie gerelateerd is aan batchprocessen (200 PJ). Hierbinnen kunnen twee typen opslag worden onderscheiden:

1. Piekbuffering, waarbij een warmteopslag, vaak een stoomaccumulator, geladen wordt met stoom uit een stoomketel, en snel ontladen kan worden om piekstoom te leveren. Dit wordt al decennia commercieel toegepast; een deel van bovengenoemde 200 PJ kan via deze technologie geleverd worden.
2. Warmteterugwinning, waarbij restwarmte uit een batchproces wordt opgeslagen voor lokaal hergebruik. Hiervoor ligt het potentieel veel lager, omdat er randvoorwaarden zijn aan de temperatuur en vraag; Kiesewetter heeft hiervoor een potentieel ingeschat van 2,6 PJ, waarvan ongeveer een derde in de voedingsindustrie en een derde in de chemische industrie.

Ook wordt warmteopslag toegepast bij WKK (in combinatie met stadswarmte), omdat warmtevraag en elektriciteitsvraag vaak niet gelijktijdig zijn. De opgewekte warmte bij elektriciteitsproductie in 2022 was 17 PJ in centrale WKK en 138 PJ in decentrale WKK<sup>19</sup>. De warmtelevering door decentrale WKK bestaat uit 73 PJ in industrie (inclusief raffinage), 37 PJ in land- en tuinbouw en 19 PJ in afvalverbranding. Deze industriële warmtelevering is vooral in de chemie (40 PJ), gevolgd door raffinage en voeding (ieder 11 PJ). In principe kan al deze warmte worden opgeslagen in warmtebuffers, typisch in de vorm van heetwater/stoombuffers. Dit potentieel voor industriële WKK overlapt gedeeltelijk met het potentieel uit batchprocessen.

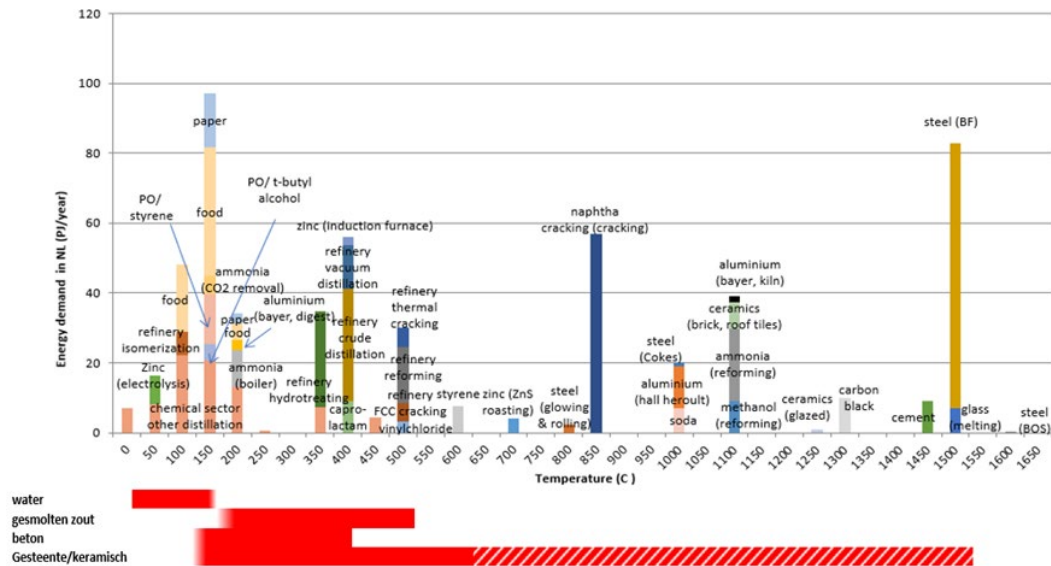
## 4.2 Opkomende toepassingen – Elektrificatie en HT opslag

De toename van fluctuerende duurzame elektriciteit op het net leidt ook tot meer fluctuatie in de tarieven. Dit leidt tot nieuwe mogelijkheden voor industrie om, na elektrificatie van hun warmtevraag, elektriciteit in te kopen als deze goedkoop is, te converteren naar warmte die wordt opgeslagen, en deze weer te gebruiken als de elektriciteitsprijs hoog is. Technisch gezien bestaan er warmteopslagmethoden die geschikt zijn voor vrijwel het gehele temperatuurbereik aan proceswarmte in de Nederlandse industrie, zoals geïllustreerd

<sup>18</sup> J. Kiesewetter (2001), Restwarmte uit batchprocessen, intern memo.

<sup>19</sup> CBS Statline

in **Figuur 4.1**. Daarmee is het leveringspotentieel van warmteopslag in principe gelijk zijn aan de industriële warmtevraag. Volgens het CBS was de Nederlandse finale industriële energievraag in 2023 gelijk aan 480 PJ, waarvan 115 PJ in de vorm van elektriciteit, dus 365 PJ (101 TWh) in de vorm van warmte. In deze vraag is de raffinagesector (121 PJ) nog niet meegenomen.



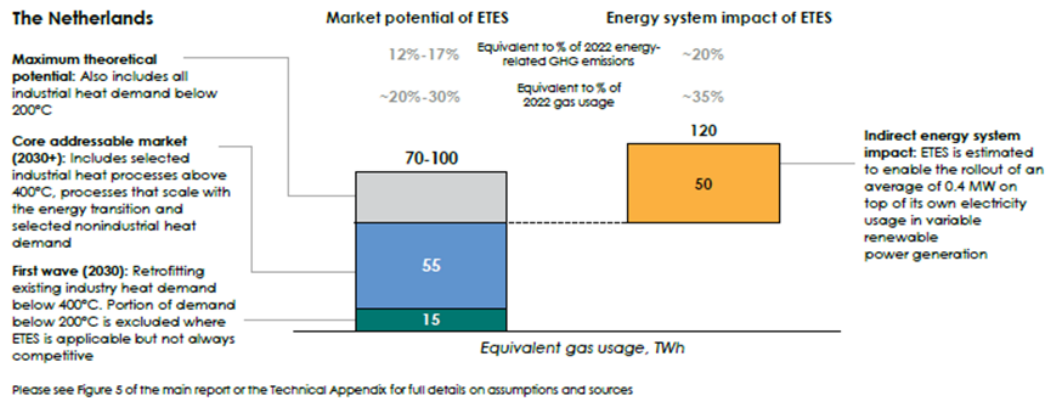
**Figuur 4.1:** Temperatuurverdeling van de industriële warmtevraag in Nederland (Zondag, 2017)<sup>20</sup>, vergeleken met toepassingsgebied van verschillende warmteopslag technologieën

Dit wordt ook onderschreven door een marktpotentieelstudie uit 2024 voor Nederland door Systemiq<sup>21</sup>. Hier wordt een totaal industrieel marktpotentieel van 100 TWh (360 PJ) aan equivalent gasverbruik gegeven. Daarmee gaat Systemiq er ook van uit dat de complete industriële warmtevraag in principe gedekt kan worden met ETES (ElectroThermalEnergyStorage), met de kanttekening dat de markt <200°C waarschijnlijk niet competitief is voor ETES, omdat deze grotendeels met industriële warmtepompen kan worden afgedekt, waarmee een hogere energie efficiency (daarmee lagere OPEX) dan directe elektrische verwarming wordt behaald.

<sup>20</sup> H.A. Zondag & S.F. Smeding (2017), interne ECN rapportage.

<sup>21</sup> <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2024/02/Global-ETES-Opportunity.pdf>



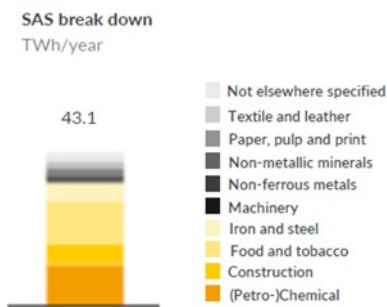


1: Netherlands draft NECP revision 2023; 2: Driving to Net Zero Industry, LDES Council; 3: Reuters

PAGE 1

Figuur 4.2: Grafische weergave van schatting van marktpotentieel voor ETES door Systemiq

Aurora (2021) heeft een potentieelstudie gedaan voor de Kyoto groep<sup>22</sup>, die een gesmolten zout warmteopslag heeft ontwikkeld met een temperatuur bovengrens van 500°C. Aangenomen is dat voor processen boven deze temperatuur (staal, naftakrakers etc.) alleen voorverwarming kan worden gedaan. Aanvullend wordt 4,3 TWh/jaar (15 PJ/jaar) aan restwarmte afgetrokken van het potentieel. Op basis van die aannames wordt voor Nederland een lager industrieel leveringspotentieel gegeven van 43.1 TWh/jaar (155 PJ/jaar) in de vorm van effectieve SAS (serviceable accessible segments), vooral in de petrochemie, voeding, bouwmaterialen en staal industrie. Het valt te verwachten dat dit potentieel significant hoger uit komt wanneer ook hoge temperatuur warmteopslag in vaste stoffen zou zijn meegenomen.



Figuur 4.3: “Serviceable accessible segments” voor geëlektrificeerde industriële warmtelevering in Nederland, uitgaande van een limiet van 500°C voor elektrische verwarming (Aurora, 2021, How big is the market potential for electrified thermal energy?)

Voor een heldere bepaling van het potentieel is het echter belangrijk om een aantal verschillende typen potentieel te onderscheiden:

1. Technisch gezien is het mogelijk om alle industriële warmte via een opslag te laten lopen. Warmteopslag is beschikbaar op alle benodigde temperatuurniveaus, van stoomaccumulatoren op 150°C tot keramische opslag op 1500°C of hoger, waarmee de complete range van industriële procestemperaturen kan worden afgedekt. Het technische leveringspotentieel is daarmee gelijk aan de industriële warmtevrage. De totale grootte van de industriële warmtevrage in 2023 is volgens het CBS gelijk aan

<sup>22</sup> <https://auroraer.com/insight/how-big-is-the-market-potential-for-electrified-thermal-energy/>

365 PJ. Indien de warmtevraag in de raffinage ook wordt meegenomen (121 PJ) en de hoogovens en cokesovens (samen 14 PJ), komt de proceswarmtevraag op een totaal van 500 PJ (138 TWh)<sup>23</sup>.

2. Het installatiepotentieel voor warmteopslag is uiteraard veel kleiner, omdat een opslag per jaar meerdere cycli maakt. Een warmteopslagsysteem met een opslagcapaciteit van 1 GJ kan, bij dagelijkse cycli, over een jaar 365 GJ aan energie leveren. Stel dat een typische opslag ongeveer 1 cyclus zou maken per 2 dagen, dan zou er bij een leveringspotentieel van 500 PJ/yr (138 TWh/yr) ongeveer 3 PJ (~800 GWh) aan warmteopslag gerealiseerd kunnen worden. Een realistische waarde voor het installatiepotentieel hangt sterk af van de aannames over fluctuaties in procescondities en in beschikbaarheid van (duurzame) elektriciteit. Een indicatie voor een ondergrens, uitgaande van alleen piekwarmtelevering in batchprocessen, is een aanname van een cyclustijd van 4 uur per batch bij 200 PJ/yr aan batchprocessen, wat ongeveer 0.1 PJ (28 GWh) installatiepotentieel oplevert. Een indicatie voor een bovengrens, bij volledige elektrificatie van de 500 PJ/yr aan industriële vraag en een “dunkelflaute” van 10 dagen levert ongeveer 14 PJ (4 TWh) aan gewenste opslagcapaciteit op. De mate waarin de industriële warmtelevering wordt geëlektrificeerd heeft dus een zeer grote invloed op het installatiepotentieel van warmteopslag. In hoeverre dit potentieel gerealiseerd kan worden is onder andere afhankelijk van de elektriciteitsprijzen en de grid infrastructuur. Op dit moment vormt de krapte op het elektriciteitsnet een belemmering voor industriële partijen om hun warmtevraag grootschalig te elektrificeren, wat ook een belemmering is voor het realiseren van elektrisch te laden warmteopslag.
3. Ten slotte hangt de economische haalbaarheid van de opslag, naast de CAPEX en OPEX, ook af van het verdienmodel en dus de fluctuatie in de elektriciteitstarieven en de energiecontractvorm voor de betreffende industriële plant. Naarmate de fluctuaties in de elektriciteitstarieven groter en elkaar sneller opvolgen wordt warmteopslag economisch interessanter. Eventuele contractuele begrenzings in het af te nemen elektrisch vermogen kunnen daarentegen het laden van de opslag belemmeren op momenten van overschot aan duurzame elektriciteit. Een studie naar de economische haalbaarheid van verschillende opslag scenario's valt echter buiten de scope van dit rapport.

<sup>23</sup> <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/en/dataset/83140ENG>

## 5 Conclusies en discussie

Het beeld dat in deze inventarisatie van industriële warmteopslag technologieën en toepassingen ontstaat, kan als volgt worden samengevat:

- Warmteopslag in de industrie wordt in enkele processen al sinds lange tijd toegepast, gedreven door energie-efficiency (warmteterugwinning) en capaciteitsbesparing (peak shaving).
- Recente toepassingen (demo's) van warmteopslag worden gekenmerkt door hun vermogen om de groeiende vraag naar energieflexibiliteit te kunnen invullen, wat tot besparing op energiekosten leidt.
- Tientallen innovaties voor warmteopslagtechnologieën worden sinds enkele jaren door startups en scale-ups ontwikkeld en via pilot- en demoprojecten in enkele EU landen geïntroduceerd, met beoogde commerciële toepassing in de nabije toekomst.
- Deze nieuwe technologieën bestrijken gezamenlijk een temperatuurbereik van 100-1500°C en kunnen een technisch toepassingspotentieel ontsluiten voor vrijwel de gehele Nederlandse industriële warmtevraag.
- De bestaande en nieuwe industriële warmteopslag-toepassingen zijn vrijwel allemaal gebaseerd op voelbare warmteopslag in vloeistoffen (water, gesmolten zout) en vaste stoffen (beton, staal, steen, ...). Warmteopslagtechnologie op basis van latente warmte of thermochemische reacties bevindt zich nog op lager TRL-niveau.

Enkele aspecten van warmteopslagtechnologieën en hun toepassingspotentieel die in deze studie naar voren gekomen zijn, maar buiten de scope van de studie vielen, zijn wel relevant om te benoemen, omdat dit in de toekomstige ontwikkelingen en toepassingen een belangrijke rol kan spelen:

- Nadere kwantificering van de totale behoefte aan opslag en flexibiliteit in het Nederlandse energiesysteem in toekomstprojecties naar 2030 en verder, uitgesplitst naar verschillende opslagduur. Dit helpt bij de waardering van de flex-bijdrage die via industriële warmte aan het systeem kan worden bijgedragen.
- Aanpassingen in regelgeving, wettelijk kader en tarieven rondom elektriciteitsgebruik en infrastructuur die energieflexibiliteit en -opslag faciliteren. Huidige regelgeving heeft vaak nog belemmerende werking op flexibiliteit.
- De verhouding van energiekosten voor elektriciteit en gas, inclusief transport/netwerkkosten en belastingen, vormen een belangrijke hefboom voor de economische haalbaarheid voor elektrificatie van industriële warmte.
- Inzet van HT-warmteopslag bij elektriciteitsproductie is een potentieel toepassingsgebied en driver voor partijen die met opslagtechnologie voor hoge temperatuur bezig zijn. Deze inzet van power-to-heat-to-power (ook wel CarnotBattery, of pumped heat energy storage) kan bestaande thermische elektriciteitscentrales meer flexibel maken in samenhang met duurzame opwekking. Ook wordt in deze ontwikkeling naar inzet als flexibele WarmteKracht bij industriële toepassingen gekeken, waarbij de opgeslagen HT-warmte in de vorm van warmte en kracht kan worden geleverd.
- Standaardisatie in de beschrijving van de technische kenmerken en prestaties van de verschillende warmteopslagtechnologieën is wenselijk om potentiële gebruikers te helpen de beste technologie voor hun specifieke toepassing te selecteren.

- Milieu- en gezondheidsrisico's bij de inzet van (rest)materialen voor warmteopslagtechniek moeten vroegtijdig worden meegewogen in de selectie van een warmteopslagtechniek.
- De Nederlandse technologieontwikkelingen voor hoge-temperatuur warmteopslag is nog beperkt tot 2 partijen, Cesar (gebouwde omgeving) en Brabetech. Een groter aandeel in de ontwikkelingen wordt gedaan door partijen uit Scandinavische landen, Duitsland en de VS. Met het grote toepassingspotentieel in de Nederlandse industrie kan een versterking van de Nederlandse ontwikkelingen ook bijdragen aan het economische groeipotentieel in Nederland.

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3  
1755 LE Petten  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**TNO** innovation  
for life