



# Kansen voor thermische opslagsystemen



*Committed to the Environment*

# Kansen voor thermische opslagsystemen

Dit rapport is geschreven door:  
Benno Schepers, Joram Dehens

Delft, CE Delft, augustus 2020

Publicatienummer: 20.200124.110

Energievoorziening / Warmte / Opslag / Vraag / Aanbod / Opslag / Technologie / Innovatie  
VT: Thermische opslag

Opdrachtgever: Invest-NL

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider [Benno Schepers](#) (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

## CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

# Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
	1.1 Aanleiding	8
	1.2 Doel en opzet	8
	1.3 Afbakening	10
	1.4 Leeswijzer	10
2	Thermische opslagsystemen	11
	2.1 Inleiding	11
	2.2 Wat, hoe en waarom?	12
	2.3 Scan van de mogelijkheden - longlist	15
	2.4 Kansen op korte en middellange termijn - shortlist	17
3	Functionele beschrijvingen	22
	3.1 Inleiding	22
	3.2 ATES: Aquifer Thermal Energy Storage	22
	3.3 TTES: Tank Thermal Energy Storage	23
	3.4 PTES: Pit Thermal Energy Storage	23
	3.5 BTES: Borehole Thermal Energy Storage	24
	3.6 Technisch en toepassingsoverzicht	24
4	Businesscase parameters	26
	4.1 Inleiding	26
	4.2 Overzicht van parameters	26
	4.3 Inputparameters warmtevoorziening	27
5	Analyse opslagsystemen	29
	5.1 Inleiding	29
	5.2 Resultaten van de businesscases	29
	5.3 Context: Kansen en bedreigingen	37
	5.4 Conclusies	40
6	Toekomstige marktverwachting	41
	6.1 Inleiding	41
	6.2 Opslagsystemen in het Nederlandse warmtesysteem	41
	6.3 Marktverwachtingen	44
	6.4 Concurrerende technieken	51
	Referenties	53
A	Longlist	55



B	Toelichting businesscases	62
	B.1 Toepassingsvarianten en opslagsysteemconfiguraties	62
	B.2 Resultaat parameters	64
	B.3 Achtergrond businesscases	65
C	Systeemanalyses	69
	6.5 ATES	69
	6.6 TTES	73
	6.7 PTES	76
	6.8 BTES	79
D	Uitwerking marktverwachting	82
E	Concurrerende technieken	85



# Samenvatting

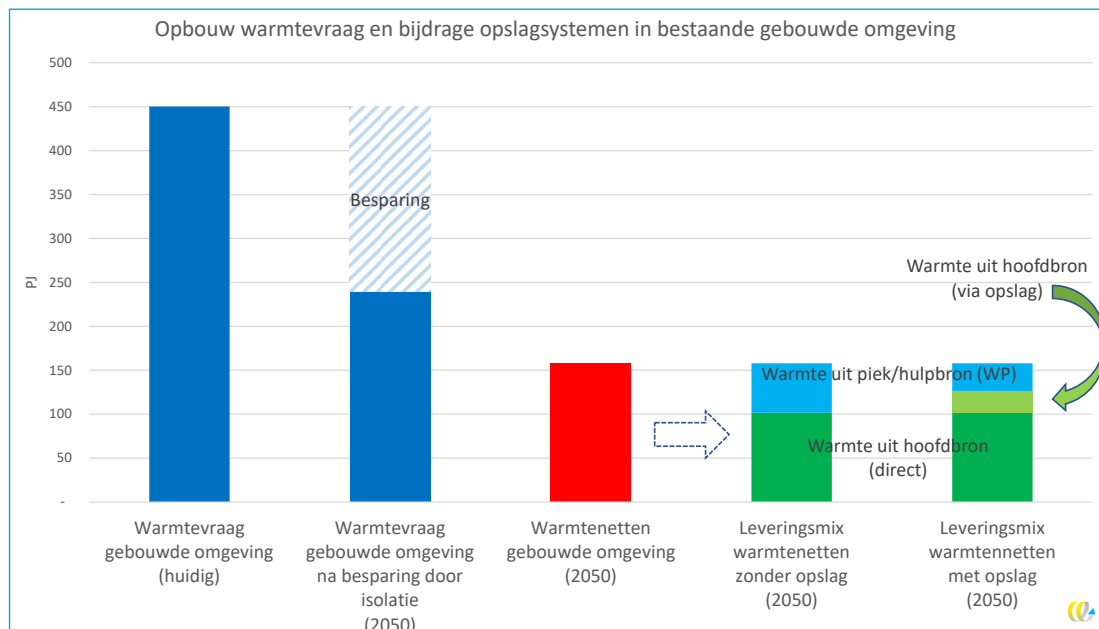
Wat is de markt voor collectieve, thermische opslagsystemen in Nederland?

In een warmtevoorziening die steeds meer gaat leunen op schone en duurzame warmtebronnen wordt dit een steeds belangrijkere vraag. Opslagsystemen kunnen een aanzienlijke bijdrage leveren om warmtenetten efficiënter (energetisch en financieel) en duurzamer te laten opereren. Ofwel door in de piekvoorziening van warmte te voorzien (in plaats van de piekkel die draait op een fossiele brandstof), ofwel door met dezelfde duurzame warmtebron een groter aantal woningen te belevaren.

In dit onderzoek is het marktpotentieel (tot en met 2035) van (grootschalige) collectieve seizoenopslagsystemen in warmtenetten voor de gebouwde omgeving onderzocht. Er is gekeken naar systemen die op dit moment (bijna) marktrijp zijn en aansluiten bij de huidige generatie warmtenetten:

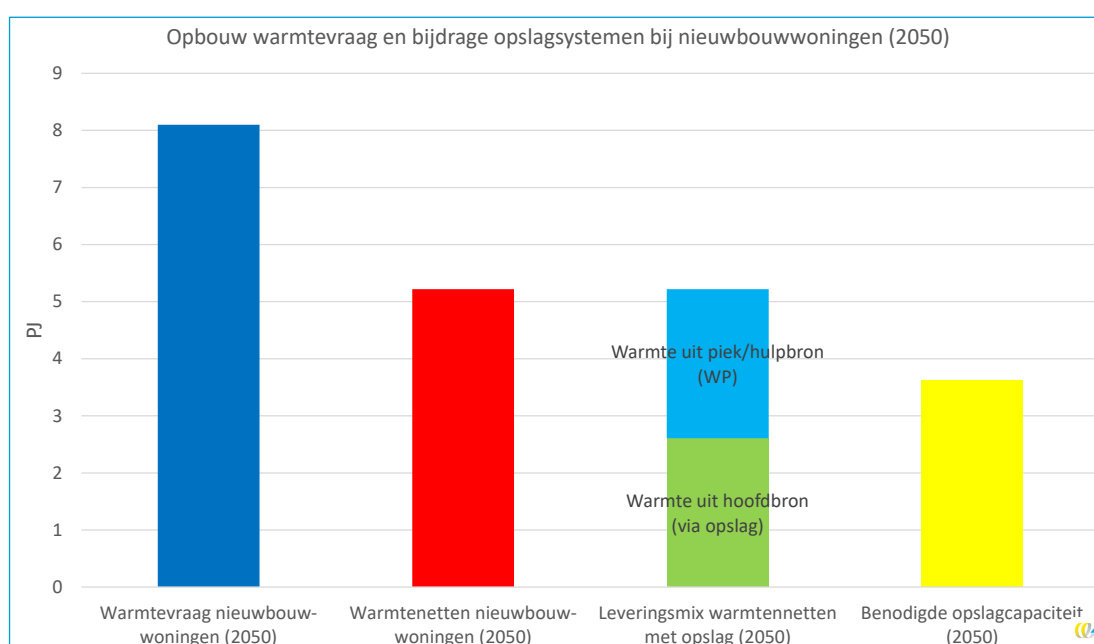
- ATES: aquifer thermal energy storage;
- BTES: borehole thermal energy storage;
- PTES: pit thermal energy storage;
- TTES: tank thermal energy storage.

Uitgangspunt voor het bepalen van de marktomvang is dat de levelized cost of energy ('LCOE') van het warmtenet verbetert of minimaal gelijk blijft door het toevoegen van een warmteopslag. Maatschappelijke kosten en baten (zoals bijvoorbeeld vermeden CO<sub>2</sub>-uitstoot) vormen geen onderdeel van de LCOE-berekening. De vermeden CO<sub>2</sub>-uitstoot is overigens wel berekend om de duurzame impact te bepalen.



Naar verwachting kan in de toekomst (2050) meer dan de helft van de warmtevraag van de bestaande gebouwde omgeving ingevuld worden door collectieve systemen (warmtenetten). Met behulp van de Startanalyse van het PBL is bepaald hoeveel warmtenetten er verwacht worden. En is gekeken waar de opslagsystemen de beste bijdrage kunnen leveren. Er wordt aangenomen dat opslagsystemen bij alle toekomstige warmtenetten (158 PJ, na energiebesparing in 2050) toegepast kunnen worden. Gezamenlijk hebben de opslagsystemen een potentiële opslagcapaciteit van 40 PJ voor de bestaande bouw. Door opslagverliezen wordt uiteindelijk 25 PJ (16%) van de warmtelevering ingevuld door warmte uit de opslagsystemen. De inzet van fossiele piekinstallaties wordt aanzienlijk gereduceerd.

Voor nieuw te bouwen nieuwbouw wordt daarnaast verwacht dat in 2050 ongeveer 2,6 PJ (50%) van de warmtevraag uit een collectief opslagsysteem wordt geleverd.



In 2035 wordt respectievelijk 6,4 PJ en 2,0 PJ geleverd door opslagsystemen aan bestaande en nieuwbouw. Door de inzet van de opslagsystemen wordt in 2035 additioneel ongeveer 0,2 Mton per jaar aan CO<sub>2</sub> bespaard.

Deze potentiële inzet van opslagsystemen voor de bestaande bouw correspondeert met een jaarlijkse investering die oploopt tot € 70 miljoen in 2035. Cumulatief bedraagt de investering voor opslagsystemen in de bestaande bouw in 2035 circa € 0,6 miljard.

Voor 2050 worden de jaarlijkse investeringen geraamd op circa € 140 miljoen en zijn de cumulatieve investeringen opgelopen tot € 2,2 miljard.

Voor de toepassing bij nieuw te bouwen woningen worden gemiddelde, jaarlijkse investeringen in de periode 2025-2035 geschat op € 75-125 miljoen. In de periode 2035-2050 op € 15-25 miljoen per jaar (in deze periode worden jaarlijks minder nieuwbouwwoningen verwacht). Dit hogere bedrag, in relatie tot bestaande bouw, komt doordat de verwachting is dat bij nieuwbouw capex-intensieve systemen toegepast worden. De cumulatieve investeringen bij nieuwbouw tot 2035 worden (zeer indicatief) geschat op € 0,5 tot 1,5 miljard. Voor 2050 ligt de cumulatieve investering voor nieuw te bouwen woningen (zeer indicatief) rond € 1 tot 2 miljard.

Tabel 1 - Verwacht verloop van investeringen tot 2035 en 2050

Jaar	Investering bestaande bouw		Opgestelde opslagcapaciteit	
	Jaarlijks	Cumulatief	Bestaande bouw	Nieuwbouw
2021	€ 4,7 miljoen	€ 4,7 miljoen	0,1 PJ	
2025	€ 23,9 miljoen	€ 71,6 miljoen	1,3 PJ	0,3 PJ
2030	€ 47,7 miljoen	€ 263 miljoen	4,7 PJ	1,4 PJ
2035	€ 71,6 miljoen	€ 573 miljoen	10,3 PJ	2,8 PJ
2050	€ 143,2 miljoen	€ 2.220 miljoen	39,9 PJ	3,6 PJ

Aan de hand van uitgewerkte businesscases van verschillende typen opslagsystemen, is het marktpotentieel bepaald. Dat hebben we gedaan door inzichtelijk te maken welke opslagsystemen de capaciteit van de piekkel tel dusdanig verkleinen of het aantal aansluitingen dusdanig vergroten dat de kosten van de opslag opwegen tegen de vermeden kosten van de piekkel tel respectievelijk de opbrengsten van het extra aantal aansluitingen.

Uit de businesscases blijkt dat de opties ATES en PTES het vaakst een financieel gunstig resultaat geven (een positief effect op de LCOE). De varianten TTES en BTES, varianten met hoge capex, kunnen binnen het gestelde financiële kader niet uit. Wel hebben deze varianten een significant maatschappelijk rendement (minder CO<sub>2</sub>-uitstoot, efficiënter gebruik duurzame bron).

Het toepassen van de verschillende systemen heeft wel nog diverse haken en ogen. Deze zijn deels meegenomen in de berekening van het marktpotentieel, zoals de grote thermische verliezen bij ATES en PTES. Maar deels ook niet, zoals vergunningen en ruimtebeslag. Het voordeel dat bijvoorbeeld TTES hierbij heeft is daarmee niet in de businesscase tot uitdrukking gebracht. Daarnaast zijn ook andere maatschappelijke rendementen niet financieel gemaakt, zoals de CO<sub>2</sub>-kosten of andere milieuprijzen van emissies. Wanneer deze rendementen wel worden meegenomen in de business case, zouden TTES en BTES in de toekomst mogelijk toch relevant kunnen worden, maar dit maakt ook ATES en PTES nog interessanter. Kijkend naar de toekomst, dan wordt ook verwacht dat de beter stuurbare opslagsystemen, die op meerdere temperatuurniveaus kunnen werken en beter gebruik kunnen maken van schaarse, duurzame warmtebronnen, beter toegepast kunnen worden in 4de of 5de generatie warmtenetten.

TTES heeft net als BTES op dit moment geen interessante financiële businesscase, maar heeft wel veel kansen om een centrale rol te spelen in toekomstige ontwikkelingen. Met name de mogelijkheden die dit systeem heeft als onderdeel van 4<sup>e</sup> of 5<sup>e</sup> generatie warmtenetten en daar waar ATES en PTES juridisch of praktisch niet mogelijk blijken, geeft het veel kansen voor de toekomst. Hoewel dit op de korte en middellange termijn nog beperkt in omvang zal zijn, aangezien de ontwikkelen van nieuwe generatie warmtenetten meerdere jaren duurt. Maar in een toekomst waarin veel meer intermitterende energiebronnen ingezet zullen gaan worden, waarbij de opslagsystemen meer cycli gaan hebben en koudelevering een grotere rol krijgt, wordt het grootste nadeel van de hoge capex gereduceerd. Hiermee wordt TTES interessanter en wordt ook de LCOE daarvan concurrerender. TTES is daarmee met name interessant voor nieuwbouw en grootschalige gebieds(her)ontwikkeling en is als zodanig meegenomen in de toekomstverwachtingen bij de nieuw te bouwen woningen.

Tabel 2 - Beknopt overzicht van kansen en bedreigingen

	ATES	BTES	PTES	TTES
<b>Kansen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lage capex</li> <li>- Goed toepasbaar in Nederland</li> <li>- Weinig bovengronds ruimtebeslag</li> <li>- Gunstige LCOE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimaal bovengronds ruimtebeslag</li> <li>- Schaalbaar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lage capex</li> <li>- Veel ervaring in buitenland</li> <li>- Gunstige LCOE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimaal bovengronds ruimtebeslag</li> <li>- Geschikt voor toekomstige generatie warmtenetten</li> <li>- Kleine opslagverliezen</li> </ul>
<b>Bedreigingen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Opslag boven 25°C in principe niet toegestaan</li> <li>- Technische uitdagingen</li> <li>- Grote opslagverliezen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Specifieke eisen aan ondergrond</li> <li>- Kan niet snel ontladen</li> <li>- Grote opslagverliezen</li> <li>- Ongunstige LCOE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Omvangrijk bovengronds ruimtebeslag</li> <li>- In sommige regio's niet toepasbaar</li> <li>- Aanzienlijke opslagverliezen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hoge capex</li> <li>- Aanzienlijke CO<sub>2</sub>-emissies bij constructie</li> <li>- Ongunstige LCOE</li> </ul>

Concluderend is er een groeiende potentie voor collectieve seizoensopslag voor warmte. Echter de ontwikkeling van warmtenetten is onzeker en afhankelijk van vele factoren, zoals politiek, CO<sub>2</sub>- en energieprijzen of de ontwikkelingen van alternatieven. Dit moet wel in ogenschouw genomen worden bij het interpreteren van de marktomvang. Deze uitkomsten zijn dan ook gebaseerd op de huidige inzichten en systemen.



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In de afgelopen jaren heeft de warmtetransitie in Nederland steeds meer vorm gekregen. Het ‘aardgasvrij verwarmen’ is inmiddels een breedgedragen ambitie en tal van nieuwe initiatieven ontstaan op landelijk en lokaal niveau. Zo zijn in 2019 de eerste BZK-proeftuinen gestart en is gasloze nieuwbouw de standaard geworden. Veel van deze initiatieven zijn gebaseerd op technieken en mogelijkheden die al vele jaren beschikbaar zijn.

Een belangrijke ontwikkeling die nog niet op grote schaal wordt toegepast en die de mogelijkheden in de warmtetransitie een stap verder kan helpen, zijn de thermische opslagsystemen. Opslag van warmte en koude biedt kansen om de huidige *directe* koppelingen tussen vraag en aanbod van thermische energie te ontkoppelen. Door gebruik te maken van opslag, wordt het mogelijk om duurzaam geproduceerde thermische energie op te slaan en die op een willekeurig moment te gebruiken. Zo kunnen dag/nacht-, week- of seizoensvariaties in vraag en aanbod op elkaar afgestemd worden.

Een bekend voorbeeld hiervan, dat al vele jaren wordt toegepast in Nederland, is het open bodemenergiesysteem (warmte-koudeopslag; wko). Hierbij wordt er warmte in de zomer uit de gebouwen gehaald en opgeslagen in een ondergrondse waterlaag (aquifer), waarna deze in de winter weer gebruikt kan worden voor het verwarmen van het gebouw. Ondanks dat het aantal wko-systemen in Nederland in de duizenden loopt, is de bijdrage aan de totale warmte- en koudevoorziening beperkt en vooral van toepassing bij utiliteitsgebouwen (kantoren, scholen, winkels en zorg).

Er zijn echter nog tal van andere mogelijkheden om thermische energie op te slaan. Welke hiervan interessant zijn voor Nederland en welke kansen zij hebben om een bijdrage te leveren aan de warmtetransitie, is op dit moment nog niet bekend. Deze studie is uitgevoerd om een eerste inzicht te geven in de diversiteit aan mogelijkheden, de economische parameters waarop de businesscase wordt bepaald en de marktpotentie. Tevens wordt kort vooruitgeblikt op de toekomstige ontwikkelingen die relevant zijn voor de waardering van opslag van warmte.

## 1.2 Doel en opzet

### 1.2.1 Doel van de studie

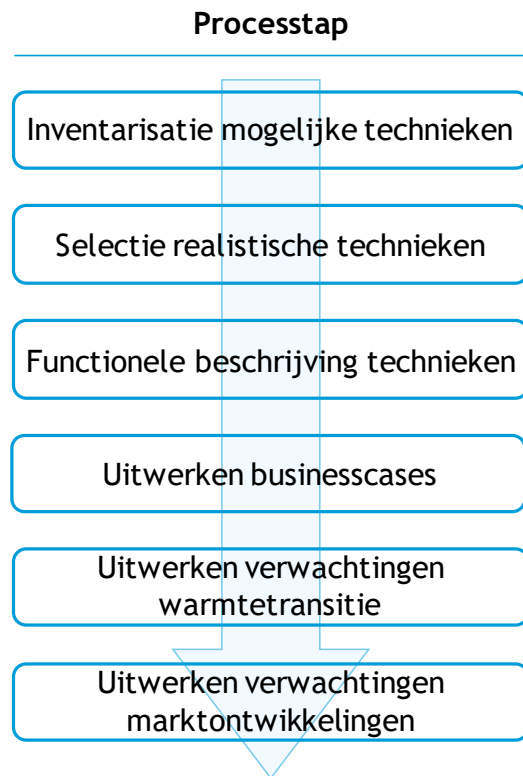
Het centrale doel van deze studie is het geven van **inzicht in de potentiële marktomvang van thermische opslagsystemen in Nederland**. Om dit inzicht te leveren worden de volgende deelvragen beantwoord:

- Welke thermische opslagsystemen zijn op dit moment en in de nabije toekomst beschikbaar in Nederland? (*longlist*)
- Welke systemen hebben daarbij op korte termijn het meeste potentieel om ingezet te worden bij collectieve warmtesystemen? (*shortlist*)
- Wat zijn de financiële parameters van de systemen en hoe ziet globaal de businesscase er uit?
- Wat is de verwachte marktomvang (capex) van het potentiële toepassingsgebied van de systemen?
- Hoe concurreren deze opslagsystemen met andere oplossingen voor de warmtetransitie?

## 1.2.2 Opzet van de studie

Om invulling te geven aan de doelstelling is het proces doorlopen zoals is weergegeven in Figuur 1. In de volgende hoofdstukken komen alle processtappen aan de orde en worden zij in meer detail toegelicht.

Figuur 1 - Processtappen



Tijdens het onderzoek is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van openbaar beschikbare kennis en informatie. Op dit moment is de toepassing van collectieve thermische opslagsystemen nog sterk in ontwikkeling in Nederland, zowel technisch als de inpassing in de huidige warmtevoorziening. Als gevolg daarvan ontbreekt bij veel opties een gedegen kennis- en informatiebasis. Om toch zo goed mogelijk invulling te geven aan de potentiële marktverwachtingen is daarom gebruik gemaakt van de volgende bronnen van informatie en kennis:

- Er is contact geweest met diverse producenten en ontwikkelaars van thermische opslagsystemen, waarbij specifieke informatie is ontvangen van verschillende types opslagsystemen.
- Voor het bepalen de potentiële marktomvang is gebruik gemaakt van de gegevens van de Startanalyse van het PBL. Dit betreft de oktober 2019-versie. Deze versie is slechts de ‘eerst werkbare’ versie van de Startanalyse. De aanstaande analyses bevatten aanzienlijke verbeteringen. Deze waren echter niet tijdig beschikbaar voor de voorliggende analyse.

Een totaaloverzicht van de gebruikte informatie is terug te vinden in de Referenties.

### 1.3 Afbakening

De focus van het onderzoek, en daarmee een belangrijke afbakening, is dat er wordt gekeken naar *grootschalige* collectieve opslagsystemen voor *seizoensopslag*, die *marktrijp* zijn.

– **Grootschalig**

Met grootschalig wordt bedoeld dat het om systemen gaat die gekoppeld kunnen worden aan collectieve warmtenetten, vanaf enkele honderden tot duizenden woningen en gebouwen. Individuele opslagsystemen of kleinschalige systemen die voor individuele of enkele woningen of gebouwen functioneren vallen buiten scope. Door de koppeling met grootschalige warmtenetten wordt op dit moment ook alleen gekeken naar de opslag van warmte. De opslag van koude ligt buiten scope.

– **Seizoensopslag**

Opslagsystemen kennen verschillende mogelijkheden. Van korte termijn (enkele minuten) tot lange termijn (enkele maanden). In deze studie ligt de focus op de systemen voor opslag op lange termijn, de zogenaamde seizoenopslag.

– **Marktrijp**

Met marktrijp wordt bedoeld dat zij binnen nu en maximaal vijftien jaar een significante rol kunnen spelen in de Nederlandse energievoorziening. Concreet betekent het dus dat het gaat om opties die al verder gevorderd zijn in hun ontwikkeling of al reeds worden toegepast (circa TRL5-6)<sup>1</sup>. Hiervoor is gekozen omdat het ontwikkelen van collectieve warmtesystemen, of het aanpassen daarvan, langjarige processen zijn. Daarvoor is een zeker mate van zekerheid vereist, waarbij het opslagsysteem zelf ook voor enkele decennia zekerheid moet kunnen bieden.

Daarnaast is de studie afgebakend op het toepassingsgebied van de gebouwde omgeving, met de daarbij behorende temperatuurniveaus.

### 1.4 Leeswijzer

Deze rapportage geeft een onderbouwing en toelichting op de uitgevoerde studie. Hierbij wordt in eerste instantie uitgelegd wat de essentie is van de thermische opslagsystemen die zijn bekeken en welke naar verwachting beschikbaar zullen zijn in Nederland (Hoofdstuk 2). De technieken met de hoogste verwachting voor de korte termijn (de shortlist) worden vervolgens nader uitgewerkt in functionele beschrijvingen (Hoofdstuk 3). Van de opties die op de shortlist staan, is vervolgens bepaald wat de financiële parameters zijn (Hoofdstuk 4) en hoe de globale businesscase van deze opties er uit zien (Hoofdstuk 5). Op basis van de voorgaande hoofdstukken is vervolgens een analyse gemaakt van het verwachte marktpotentieel van de opties op de shortlist (Hoofdstuk 6).

De rapportage vormt één geheel met de ondersteunende Excel-bestanden. In de rapportage wordt de kwalitatieve onderbouwing en de resultaten weergegeven van de kwantitatieve analyses in de Excel-bestanden. Deze bestanden bevatten daarmee dan ook meer informatie, details en opties, dan is uitgewerkt in de deze rapportage.

---

<sup>1</sup> Technology Readiness Level (TRL) 5 betekent dat de technologie is getest en gevalideerd in een relevante omgeving. TRL-6 betekent dat de werking van de technologie in een relevante omgeving gedemonstreerd is.

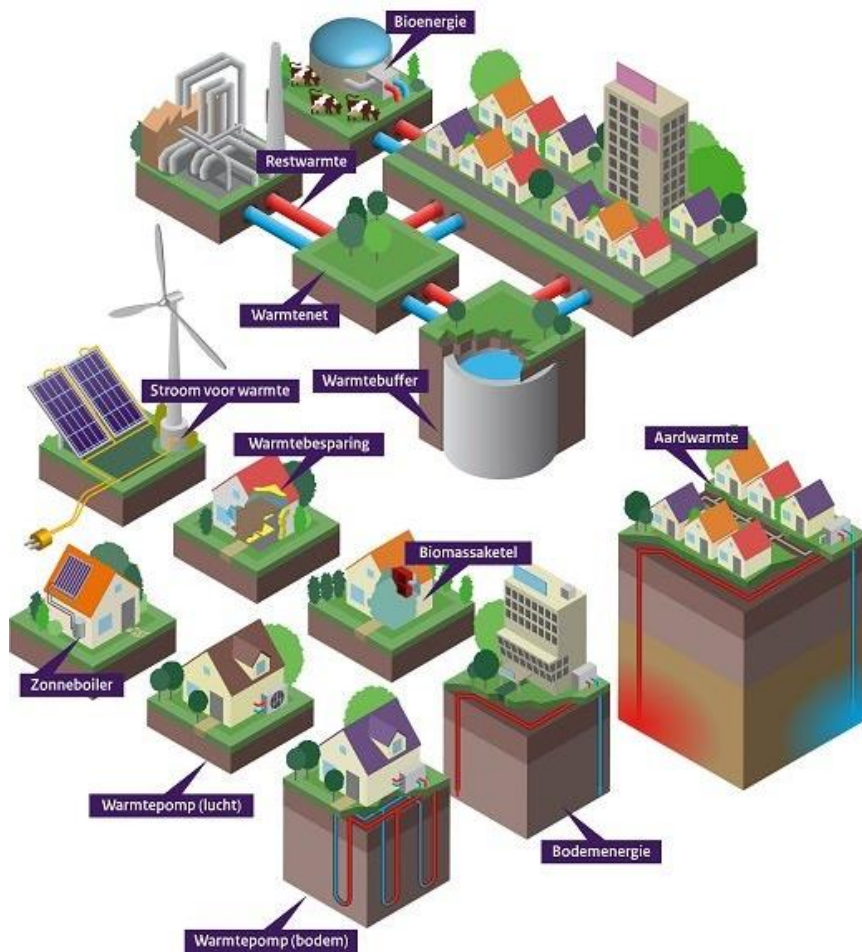
# 2 Thermische opslagsystemen

## 2.1 Inleiding

Nederland is op zoek naar een duurzame warmtevoorziening van de gebouwde omgeving. Er wordt gekeken naar het toepassen van duurzame warmtebronnen, het verbinden van die bronnen met de afnemers met behulp van warmtenetten en het beperken van de warmtevraag van de eindgebruikers. Om vraag en aanbod op een effectieve en efficiënte manier op elkaar te laten aansluiten, kan opslag waarde toevoegen. Zowel op dag-, week- als seizoensbasis. Door gebruik te maken van (tijdelijke) opslag van warmte valt flexibel om te gaan met vraag en aanbod. Dit zorgt ervoor dat duurzame warmte efficiënt ingezet kan worden.

Bij opslagsystemen kan onderscheid worden gemaakt tussen systemen die geschikt zijn voor één enkele woning of gebouw, of systemen die voor een collectief van woningen of gebouwen geschikt zijn. In deze studie wordt expliciet alleen gekeken naar de collectieve opslagsystemen voor de opslag van warmte die ingezet kunnen worden bij warmtenetten.

Figuur 2 - RVO warmtevoorziening gebouwde omgeving



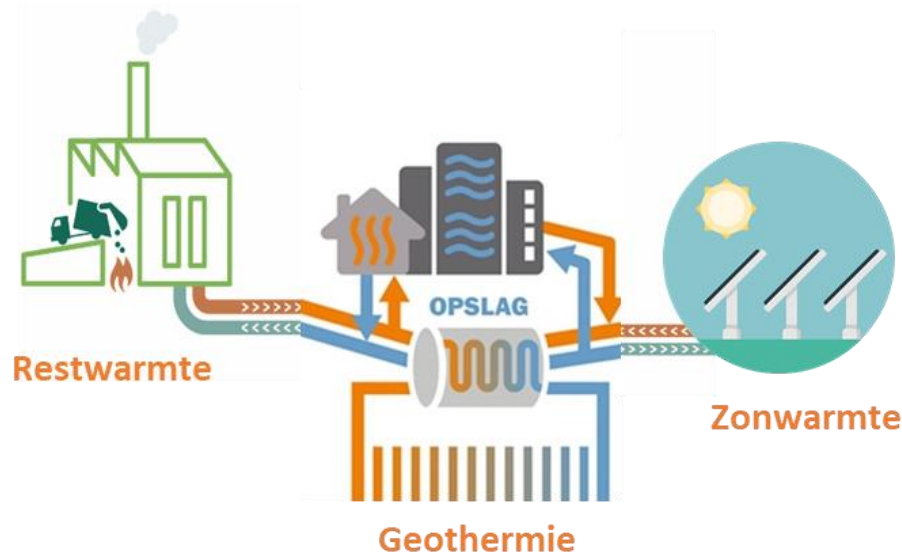
Bron: (RVO, 2020).

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de hoofdkenmerken van opslag en collectieve warmtesystemen. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de opslagsystemen die op dit moment bekend zijn (*longlist*) en de selectie hieruit van opties die nader worden uitgewerkt (*shortlist*).

## 2.2 Wat, hoe en waarom?

Een opslagsysteem vormt de koppeling tussen de bron, die de warmte levert, en de afnemer, die de warmte benut. Door toepassing van een opslagsysteem kan een tijds-onafhankelijke koppeling tussen vraag en aanbod worden gerealiseerd. Hiermee wordt bedoeld dat aanbod en vraag niet gelijktijdig van dezelfde grootte hoeven te zijn.

Figuur 3 - Schematisch voorbeeld van de toepassing van een opslagsysteem tussen aanbod en vraag



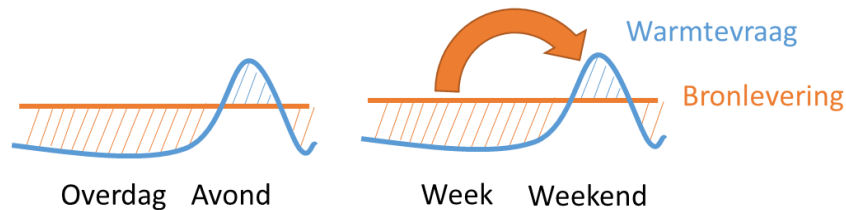
Naast het in tijd loskoppelen van aanbod en vraag, kent het toepassen van opslag ook nog andere voordelen, zoals:

- *Efficiëntere productie*: Verschillende warmtebronnen werken efficiënter in combinatie met het opslaan van warmte. Doordat vraag en aanbod bij toepassing van een opslagsysteem niet meer instantaan op elkaar hoeven aan te sluiten, kan de warmtebron gelijkmatiger produceren. Hierdoor vermindert het aantal keer dat de warmtebron moet opstarten of opschalen. Dit betekent minder opstartverliezen en een langere levensduur van de techniek.
- *Meer productie*: Een opslagsysteem kan ervoor zorgen dat thermische bronnen, zoals geothermie, meer vollasturen per jaar bereiken. Dit kan bereikt worden door overproductie toe te laten en op te slaan.
- *Minder inzet pieksetels*: Ook kan door warmteopslag de piekvraag worden opgevangen. Doorgaans is de hoofdwarmtebron uitgerust op de basiswarmtevraag en voorzien gasketels in de piekvraag. Als de hoofdbron bij lage warmtevraag de opslag vult, kan de opgeslagen warmte bij de piekvraag benut worden. Hierdoor kan de bron langer met een gunstig rendement warmte produceren, maakt de thermische bron meer vollasturen per jaar, waardoor er langer gebruik kan worden gemaakt van een duurzame bron en wordt het gebruik van de gasketels gereduceerd.

## Type opslagsysteem

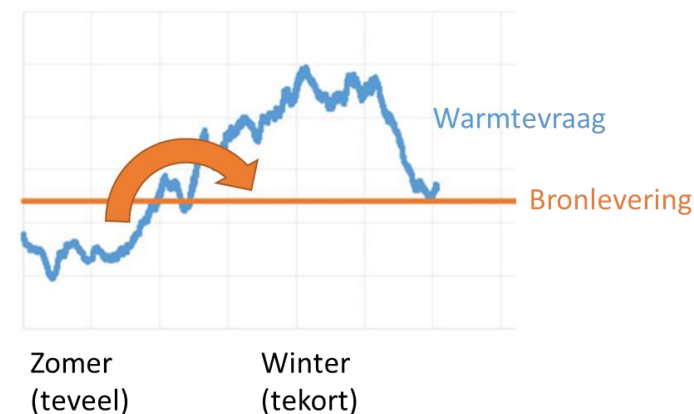
Thermische opslagsystemen slaan warmte (of koude) op wanneer het aanbod groter is dan de vraag. Deze opgeslagen warmte kan vervolgens op een later tijdstip, wanneer de vraag groter is dan het aanbod, benut worden. Een opslagsysteem wekt zelf dus geen warmte op. Het verplaatst enkel warmte van het ene moment bij aanbodoverschot van de productie naar het andere moment van grote warmtevraag met een aanbodtekort van de productie.

Figuur 4 - Schematische weergave van het effect van opslag op de korte termijn (dag/week)



Thermische opslag kan zich afspelen over verschillende tijdschalen. Op de korte termijn van een dag of week is er 's avonds of in het weekend een grotere vraag naar warmte dan op andere momenten in de week. Een kortetermijnbufferopslag dekt deze korte termijn variaties. Bij opslag op langere termijn, waarbij warmte uit de zomer wordt opgeslagen om te benutten in de winter<sup>2</sup>, spreekt men van seizoensopslag<sup>3</sup>.

Figuur 5 - Schematische weergave van het effect van opslag op de lange termijn (seizoen)



<sup>2</sup> Het is ook mogelijk om koude in de winter op te slaan voor gebruik in de zomer. Op dit moment is de koudevraag van gebouwen in Nederland echter vele malen kleiner dan de warmtevraag. Hoewel dit in de toekomst mogelijk gaat veranderen, is de opslag van koude op dit moment buiten scope van deze studie.

<sup>3</sup> Naast opslag of buffering voor dag, week en seizoen, is er ook echt kortetermijnbuffering mogelijk, op bijvoorbeeld 15 minuten-basis. Deze buffering wordt vooral ingezet om productie-eenheden (veelal elektriciteitscentrales) optimaal te laten presteren. Dergelijke opslagsystemen vallen buiten de scope van deze studie.

## Bron van warmte

Een opslagsysteem vormt de koppeling tussen de bron, die de warmte levert, en de afnemer, die de warmte benut. De bron heeft een productieprofiel waarop die warmte levert met een bepaald temperatuurregime en tijdsverloop. Zo is de productie van zonnecollectoren seizoensafhankelijk en produceren deze warmte op een temperatuur tussen 40 en 90 °C.

In Tabel 3 wordt een overzicht gegeven van de verschillende eigenschappen die relevant zijn voor opslagsystemen bij (duurzame) warmtebronnen, zoals temperatuurregime en op welke schaal bronnen toepasbaar zijn. Geothermie is bijvoorbeeld alleen rendabel als een grootschalige, collectieve en gecentraliseerde bron en vereist een warmtenet om de warmte te verdelen. Met zonnecollectoren op je eigen dak kan je ook warmte produceren en gebruiken zonder dat er een collectief warmtenet voor nodig is.

Tabel 3 - Overzicht warmtebronnen met een temperatuurregime relevant voor gebouwverwarming

Bron	Beschikbare brontemperatuur (indicatief)	Seizoensafhankelijke levering?	Collectief/Individueel
Aquathermie	15-25 °C	Oppervlaktewater: ja Drinkwater: ja Afvalwater: nee	Collectief
Ondiepe geothermie (lagetemperatuuraardwarmte)	40-60 °C	Nee	Collectief
Diepe geothermie	70-100 °C	Nee	Collectief
Ultradiepe geothermie	120-160 °C	Nee	Collectief
Restwarmte (LT/MT/HT)	20-120 °C	Nee	Collectief
Biomassacentrale	> 90 °C	Nee	Collectief
Elektrische weerstandverwarming	> 90 °C	Nee	Collectief/Individueel
Zonnecollectoren	40-90 °C	Ja	Collectief/Individueel

Opmerking: Diverse bronnen kunnen zowel met als zonder collectieve warmtepomp functioneren. De elektrische warmtepomp zorgt dan voor een opwaardering van de temperatuur van de hoofdbron.

## Vraag naar warmte

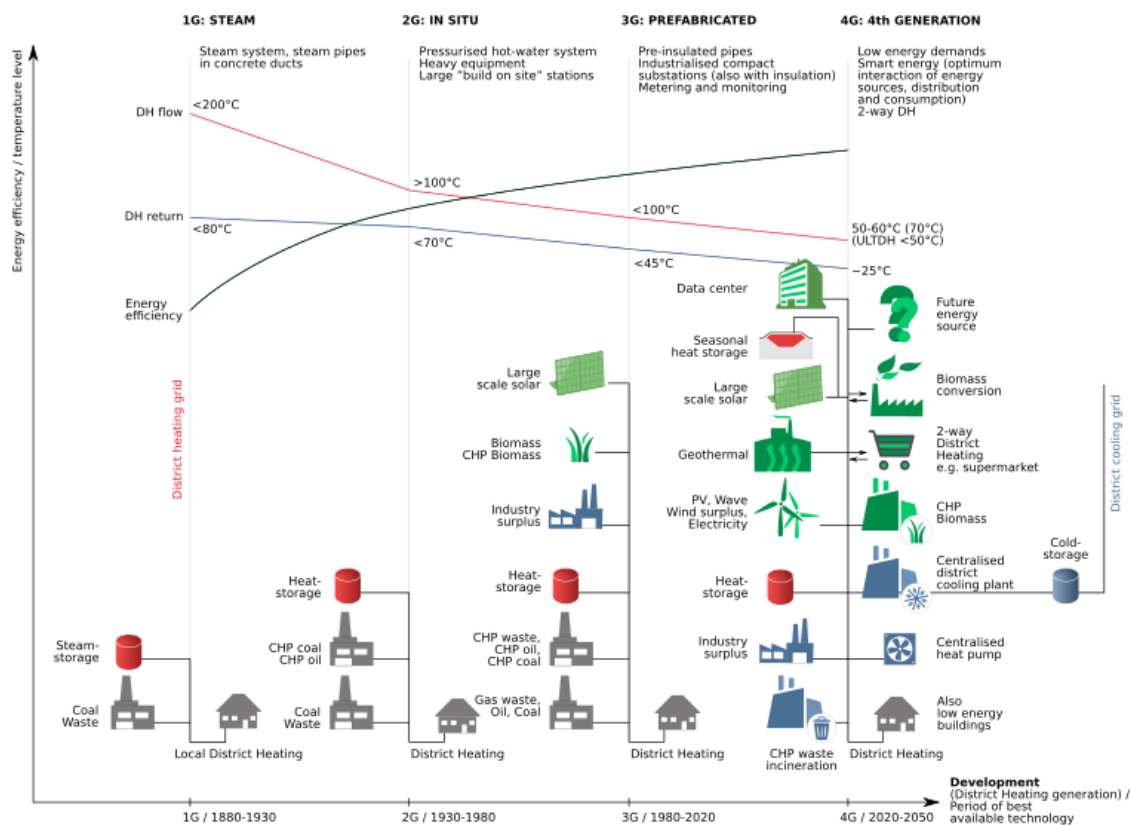
Ook de afnemers in een buurt waaraan de warmte geleverd wordt heeft een vraagprofiel met een bepaald temperatuurregime en tijdsverloop. Over het jaar heen piekt de warmtevraag in de winter en is deze gedurende de zomermaanden laag. En ook als naar een dag wordt gekeken, is een vraagprofiel zichtbaar. In woonwijken zijn veelal ochtendpieken (06:00-08:00 uur) en avondpieken (17:00-22:00 uur) in de warmtevraag zichtbaar. De temperatuur die gebouwen vragen om verwarmd te worden is afhankelijk van de isolatiegraad van de gebouwen. Oude buurten met niet of slecht geïsoleerde gebouwen hebben een hoge warmtevraag op hoge temperatuur van 70 °C of meer. Nieuwe of vernieuwde buurten met goed geïsoleerde gebouwen hebben een lage warmtevraag die voldaan kan worden op lage temperatuur (temperaturen rond 40 °C à 50 °C).

## Toekomstige ontwikkelingen

Collectieve warmteopslag vormt dus een onderdeel binnen een warmtenet dat het aanbod en de vraag verbindt. Figuur 6 geeft de ontwikkelingen in de tijd van verschillende generaties warmtenetten weer. De standaard vandaag de dag voor warmtenetten is een één-directioneel systeem (van bron naar klant), de zogenaamde 2<sup>e</sup> of 3<sup>e</sup> generatie

warmtenetten. In de toekomst zullen warmtestromen (en koudestromen) continu ‘slim’ worden uitgewisseld tussen ‘nodes’, waarbij er geen onderscheid meer is tussen klanten, bronnen en buffers (4<sup>e</sup> generatie en verder). In deze warmtenetten wordt op verschillende plekken in het net decentraal geproduceerd en/of verbruikt. Bij deze netten liggen over het algemeen de temperatuurregimes lager, waardoor ook lage temperatuurbronnen zonder al te veel thermische opwaardering benut kunnen worden. Deze lage temperatuurbronnen hebben ook vaak een duurzaam karakter. Daarnaast zorgen lagere temperaturen ook voor minder verliezen in het warmtenet.

**Figuur 6 - De opeenvolgende generaties warmtenetten**



Bron: (Wikipedia, 2018).

## 2.3 Scan van de mogelijkheden - longlist

Aan de hand van een bureaustudie is een longlist opgesteld van de thermische opslagsystemen die op dit moment beschikbaar zijn in Nederland, of waarvan wordt verwacht dat die in de komende vijftien jaar toegepast kunnen worden, maar op dit moment nog in ontwikkeling zijn. In Tabel 4 wordt hiervan een overzicht gegeven.

Het overzicht is ingevuld met de kennis van vandaag. De huidige ontwikkelingen in de warmtetransitie gaan echter snel en ook de kennis en ervaringen met opslagsystemen zullen de komende jaren nog tot vele nieuwe inzichten leiden. Hiermee is het overzicht dus ook niet uitputtend, maar worden de meest gangbare opties weergegeven. Daarnaast kennen veel opties ook nog varianten die verschillen in temperatuurregime, opslagduur en omvang. In Bijlage A is een uitgebreid overzicht opgenomen waarin de opties in meer detail zijn weergegeven.



In de tabel zijn opgenomen:

- ATES: aquifer thermal energy storage: opslag in ondergrondse waterlagen (aquifers);
- TTES: tank thermal energy storage: opslag in watertanks;
- PTES: pit thermal energy storage: opslag in gegraven kuilen/putten;
- BTES: borehole thermal energy storage: opslag in ondiepe ondergrond door middel van een gesloten warmtewisselaar;
- PCM: phase change materials: opslag door middel van faseovergangen van materiaal;
- TCM: thermal chemical materials: opslag door middel van thermochemische eigenschappen van materialen.

Tabel 4 - Longlist van thermische opslagsystemen

Optie	Beschrijving	Temperatuurregime	Praktijkvoorbeeld
ATES - wko	Warmte- en koudeopslag in een aquifer.	< 25 °C	> 2.000 toepassingen in Nederland
ATES - MTO	Middentemperatuuropslag in een aquifer.	25-50 °C	NIOO KNAW in Wageningen <sup>4</sup>
ATES - HTO	Hogetemperatuuropslag in een aquifer.	50-90 °C	ECW in Middenmeer <sup>5</sup>
Mijnwater	Thermische opslag in volgelopen mijngangen (geothermische buffer).	10-30 °C	Mijnwater in Heerlen <sup>6</sup>
Geothermieopslag	Thermische opslag in ondiepe geothermieputten (250-1.250 m diepte).	30-60 °C	
TTES - atmosferisch	Tankopslag waarin water op lage druk tot net onder het atmosferisch kookpunt van 100 °C kan worden opgeslagen.	< 100 °C	Tientallen tot honderden in de Nederlandse glastuinbouw
TTES - onder druk	Tankopslag waarin water onder druk tot boven het atmosferisch kookpunt van 100 °C kan worden opgeslagen.	> 100 °C	Warmtebuffer Diemencentrale in Diemen <sup>7</sup>
TTES - seizoensopslag	Goed geïsoleerd opslagvat waarin warmte lange tijden (zomer tot winter overgang) wordt bewaard.	20-100 °C	Ecovat <sup>8</sup>
PTES	Thermische opslag in een put gevuld met water en afgedekt met een isolatielaag.	< 100 °C	HoCoSto <sup>9</sup> Thermal Storage Pit in Vojens, Denemarken <sup>10</sup>
BTES	Systeem waarbij lussen de grond in worden geboord. Het medium verlaat de lussen niet. Het geeft zijn warmte af (of onttrekt warmte) aan de bodem via de luswand.	<25 °C	BTES proefproject in Chémery, Frankrijk <sup>11</sup>

<sup>4</sup> [Gebruikersplatform bodemenergie: Bodemenergiesysteem van NIOO nu ook voor bezoekers herkenbaar](#)

<sup>5</sup> [if Technology: Start van uniek Hoge Temperatuuropslag project Agriport in Middenmeer](#)

<sup>6</sup> [Homepage Mijnwater B.V.](#)

<sup>7</sup> [Automatie PMA: Speciaal warmtebuffer garandeert stadsverwarming](#)

<sup>8</sup> [Ecovat-projecten](#)

<sup>9</sup> [HoCoSto: product](#)

<sup>10</sup> [Ramboll: South-Jutland stores the sun's heat in the world's largest pit heat storage](#)

<sup>11</sup> [Heatstore: French national project : Coupling solar energy with borehole thermal energy storage](#)



Optie	Beschrijving	Temperatuurregime	Praktijkvoorbeeld
PCM	Opslag van latente warmte door faseovergang binnen een specifieke temperatuurrange. Op lage temperaturen voornamelijk materialen zoals zouthydraten en parafines.	20-80 °C	
TCM	Opslag door redoxreacties in materialen zoals zouthydraten zorgen voor uitwisseling van warmte.		Warmtebatterij TNO <sup>12</sup> Enerstore Salt-X <sup>13</sup>
<i>Stoomaccumulator</i>	<i>Opslagvat waarin warmte onder de vorm van stoom onder hoge druk wordt opgeslagen.</i>	100-200 °C	
<i>Warmteopslag in vaste materialen</i>	<i>Thermische opslag in vaste materialen, zoals beton, een bed van warme stenen en basalt.</i>	400-600 °C	EnergyNest <sup>14</sup>
<i>Vloeibare zoutopslag</i>	<i>Thermische opslag in vloeibaar zout.</i>	300-750 °C	

De cursief gedrukte opslagtechnieken zijn weliswaar opties voor thermische opslag, maar deze zijn/worden primair ontwikkeld voor inzet bij elektriciteitsproductie. Deze worden dus niet ingezet in (directe) combinatie met warmtenetten.

## 2.4 Kansen op korte en middellange termijn - shortlist

Op dit moment zijn er tientallen verschillende thermische opslagsystemen die worden toegepast, ontwikkeld of onderzocht in Nederland en daarbuiten. Een groot deel daarvan is opgenomen in de longlist. Om te komen tot een inschatting van het marktpotentieel van thermische opslagsystemen, is het nodig deze longlist in te korten en terug te brengen naar een shortlist. Deze shortlist wordt de focus van het verdere onderzoek naar de marktpotentie van deze systemen.

Het verschil in beschikbaarheid of marktrijpheid van de opslagsystemen wisselt sterk. Vanuit het perspectief van de warmtetransitie is het uiteraard wenselijk om een compleet beeld te hebben, maar tegelijkertijd ook een realistisch beeld van de concrete mogelijkheden die er zijn op de korte termijn. We beginnen immers gisteren. Daarom wordt vooral gekeken naar technieken die met name op korte en middellange termijn (10-20 jaar) naar verwachting interessant zijn in Nederland voor collectieve warmtesystemen. Dat betekent dat de shortlist een momentopname is, gekeken naar inpassing in de (bestaande) warmtesystemen van nu. Er wordt daarmee dus expliciet gekeken naar de inpassing van collectieve opslagsystemen in 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> generatie warmtenetten en niet naar inpassing in de toekomstige 4<sup>e</sup> en 5<sup>e</sup> generatie warmtenetten, die op dit moment nog vol in ontwikkeling zijn. In onderling verbonden systemen wordt de waarde van opslag alleen maar groter (zie ook de steeds complexere, gekoppelde warmtenetten in Figuur 6).

<sup>12</sup> [Topsector Energie: Create, publieke samenvatting](#)

<sup>13</sup> [SaltX Technology: World premiere for SaltX EnerStore - large-scale energy storage in salt](#)

<sup>14</sup> [EnergyNest: Applications](#)

Het is belangrijk om onderscheid te maken tussen de verschillende toepassingsgebieden van de opslagtechnieken (bijvoorbeeld gebouwde omgeving of industriële toepassing). Het doel van de shortlist is om de toepassingsgebieden te dekken die binnen de afbakening van deze studie vallen (gebouwde omgeving) en elk toepassingsgebied te voorzien van de meest veelbelovende technieken. Hierbij wordt aangesloten bij de afbakening van deze studie (zie Paragraaf 1.3).

Er zijn drie belangrijke factoren geïdentificeerd die bepalend zijn voor de toepassing van de warmteopslag in collectieve warmtenetten: de cyclusfrequentie, temperatuurniveaus en de omvang voor collectieve opslag.

## Cyclusfrequentie

**Cyclusfrequentie** heeft betrekking op het aantal keren het opslagsysteem wordt opgeladen en ontladen.

Eenzijds is er kortetermijn*bufferopslag*. Een bufferopslag functioneert als een opslagsysteem dat dagelijks of wekelijks warmte opslaat of invoedt. Een voorbeeld hiervan is dat overdag te veel geleverde warmte wordt opgeslagen om 's avonds de piekvraag in warmte te voorzien. Ook kan een bufferopslag toegepast worden om kleine pieken af te vlakken zodat de warmtelevering in basislastoperatie kan doorwerken zonder schakeling.

Op grote schaal worden buffers voornamelijk ingezet bij een met elektriciteitsproductie gekoppelde warmtelevering. Bijvoorbeeld bij warmtekrachtkoppelingen in de tuinbouwsector of de warmte/elektriciteitscentrale in Diemen. De elektriciteitsproductie is daarbij leidend. De warmte die als bijproduct geleverd en niet kan worden afgezet wordt opgeslagen om vervolgens te leveren wanneer er wel een warmtevraag is. De op elektriciteitsmarkt afgestemde regeling van bufferopslag is een vak op zich met techno-economische optimalisaties die buiten de scope van dit onderzoek vallen.

Anderzijds is er *seizoensopslag*. Een seizoensopslag slaat warmte op in de zomer om deze vervolgens in de winter te leveren. Een voorbeeld hiervan is het opslaan van warmte van een geothermiebron die in de zomer niet ingezet kan worden wanneer de warmtevraag laag is, en die warmte te gebruiken wanneer die nuttig is tijdens de winter.

De toekomstverwachtingen van de opslagsystemen verschillen. De ontwikkeling van systemen voor seizoensopslag is relatief goed te voorspellen. Het aantal mogelijkheden hiervoor is beperkt, en door de grote fysieke omvang is ook de concurrentie beperkt. Voor de collectieve (korte termijn) buffersopslag zit dat anders, want daar wordt ook relatief veel concurrentie verwacht van individuele opslagsystemen. Op dit moment geeft dat nog een aanzienlijke onzekerheid voor de toekomstontwikkelingen.

De opslagsystemen die worden ingezet voor korte termijn buffering worden veelal ingezet om de hoofdbron optimaler te laten produceren (bijvoorbeeld een wkk) of worden bijvoorbeeld ingezet voor *peak shaving*. In deze studie wordt alleen gekeken naar de opties of varianten die **seizoensopslag** mogelijk maken. Hiermee wordt maximaal ingezet op een groter deel van de (duurzame) hoofdbron te benutten en minder gebruik te maken van de (fossiele) piekinstallatie.

## Temperatuurniveau

Het **temperatuurniveau** is bepalend in drie fases: ten eerste het temperatuurniveau waarop de warmte geleverd wordt vanuit de bron, ten tweede de temperatuur waarop de warmte wordt opgeslagen en ten derde de temperatuur waarop de warmte nodig is om de gebouwde omgeving van warmte te voorzien.

Het volgende principe is heersend:

- Een beschikbare bron levert warmte op een bepaald temperatuurniveau. In Tabel 5 wordt daar een indicatief overzicht van gegeven. De temperatuur die de bron levert kan steeds verlaagd worden naar een gewenst temperatuurniveau. De kwaliteit van de warmte verlaagt hierdoor wel. Warmte op hoge temperaturen is voornamelijk bruikbaar voor hoogwaardige toepassingen buiten de gebouwde omgeving. Het opwaarderen van warmte naar een hoger temperatuurniveau is ook mogelijk, maar dit kost extra energie en brengt daarmee kosten met zich mee. Op een duurzame manier warmte opwaarderen kan met een warmtepomp. Hiervoor is extra elektriciteit nodig.
- De thermische opslag slaat de geleverde warmte op bij een bepaalde temperatuur. Het temperatuurregime van de opslagtechnieken wordt vermeld in de longlist. De capaciteit van de opgeslagen warmte wordt eveneens bepaald door het temperatuurregime: hoe groter het verschil tussen leverings- en retourtemperatuur van de opslag hoe groter de capaciteit van de opslag.
- De gewenste leveringstemperatuur aan de woning. Afhankelijk van de isolatiegraad van de woningen hebben woningen behoefte aan warmte op een bepaald temperatuurniveau. Goed-geïsoleerde woningen hebben met lage temperaturen al genoeg terwijl slecht-geïsoleerde gebouwen warmte nodig hebben op hoge temperatuur om het gebouw warm te krijgen. Dezelfde opmerking over verlagen of verhogen van de aangeleverde temperatuur zoals bij de leveringswarmte van de bron geldt hier eveneens.

In het geval van huishoudens speelt daarnaast de vraag naar warm tapwater. Als gevolg van de regelgeving moet tapwater minimaal opgewarmd worden tot 60 °C. Dit vereist in het geval van een LT-systeem een aanvullende installatie om dit mogelijk te maken. De leveringstemperatuur van collectieve warmtenetten wordt onderverdeeld in verschillende categorieën, zie tabel (TKI Urban Energy, 2020).

Deze studie focust zich op de inzet van opslagsystemen in warmtenetten met een voor de gebouwde omgeving relevante temperatuurrange. Dat betekent dat het gaat om systemen die geschikt zijn voor de **opslag van warmte van circa 100 °C en lager**.

Tabel 5 - Warmtenetten en aanvoertemperaturen

Type warmtenet	Aanvoertemperatuur
Hogetemperatuurwarmtenet (HT-net)	> 75 °C
Middentemperatuurwarmtenet (MT-net)	55-75 °C
Lagetemperatuurwarmtenet (LT-net)	30-55 °C
Zeer lagetemperatuurwarmte (ZLT) of bronnet	10-30 °C

## Collectiviteit (omvang)

De **omvang van de collectieve opslag** vormt een laatste punt<sup>15</sup>. De aard van de bron is hier eveneens bepalend. Collectieve opslag heeft zijn voornaamste toepassing bij grote collectieve warmtebronnen waarbij een warmtenet de warmte verdeelt. Het heeft weinig zin om de warmte dan eerst te verdelen naar woningen om die vervolgens lokaal op te

<sup>15</sup> De collectiviteit wordt op dit moment gezien vanuit de huidige toepassing van warmtesystemen in Nederland. Dit betreft primair één-directionele systemen (van bron naar klant). In de toekomst worden 4<sup>e</sup> en 5<sup>e</sup> generatie systemen verwacht, waarin warmtestromen (en koude) continu worden uitgewisseld tussen 'nodes', waarbij er geen onderscheid meer is tussen klanten, bronnen en buffers.

slaan<sup>16</sup>. Opslag op woningniveau is met name bruikbaar als de warmte op woning- of blokniveau wordt geproduceerd. De bron is hier lokaal. Denk aan zonnewarmte via collectoren of een elektrische warmtepomp.

Deze studie focust zich op de inzet van **opslagsystemen in collectieve warmtenetten** op buurtniveau. Dat betekent dat het gaat om systemen die geschikt zijn om minimaal enkele honderden woningen of gebouwen van warmte te voorzien.

## Van longlist naar shortlist

In Tabel 6 is de longlist opgenomen. In deze tabel wordt voor de drie voorgaande eigenschappen voor alle opties een indicatie gegeven of deze geschikt zijn voor toepassing in de gebouwde omgeving. Aan de hand van de beoordeling vindt een eliminatie plaats van de opties die niet voldoen aan de focus/afbakening van deze studie: (grootschalige) **collectieve seizoensopslag** met een temperatuurniveau in lijn met **gebruikstemperatuur gebouwde omgeving**.

Tabel 6 - Selectietabel longlist

Techniek	Beoordeling voor gebouwde omgeving			
	Cycl.	Temp.	Coll.	Meenemen?
ATES: wko	Ja	Ja	Ja	Ja
ATES: MTO	Ja	Ja	Ja	Ja
ATES: MTO voorbeeld NIOO Coppert Cress	Ja	Ja	Ja	Ja
ATES: HTO	Ja	Ja	Ja	Ja
Mijnwater (ATES MTO/HTO)	Ja	Ja	Ja	Ja
Geothermieopslag (ATES MTO/HTO)	Ja	Ja	Ja	Ja
TTES tank thermal energy storage: Algemeen	Ja	Ja	Ja	Ja
TTES: Bufferopslag niet onder druk	Nee	Ja	Ja	Nee
TTES: Bufferopslag onder druk	Nee	Ja	Ja	Nee
TTES: Vlakke bodem bufferopslag met drijvend dak	Ja	Ja	Ja	Ja
TTES: Seizoensopslag	Ja	Ja	Ja	Ja
TTES: voorbeeld Ecovat	Ja	Ja	Ja	Ja
TTES: voorbeeld Thermoskan Diemen	Nee	Ja	Ja	Nee
TTES: Buffervat op pandniveau	Nee	Ja	Nee	Nee
PTES: Algemeen pit thermal energy storage	Ja	Ja	Ja	Ja
PTES (pit thermal energy storage): Vojens	Ja	Ja	Ja	Ja
PTES (pit thermal energy storage): HoCoSto	Ja	Ja	Ja	Ja
BTES (borehole thermal energy storage)	Ja	Ja	Ja	Ja
BTES: voorbeeld bodemlus monobron	Ja	Ja	Nee	Nee
Lage temperatuur PCM zouthydraten of parafines	Ja	Ja	Nee	Nee
Stoom accumulator	Ja	Nee	Ja	Nee
Thermochemische opslag: Enerstore SALT X	Ja	Nee	Nee	Nee
PCM: heat storage Aluminum Alloy	Ja	Nee	Nee	Nee
Basalt Rock	Ja	Nee	Nee	Nee
Hot stone storage	Ja	Nee	Nee	Nee
Warmteopslag in beton	Ja	Nee	Nee	Nee
Set van twee gesmolten zout tanks	Ja	Nee	Nee	Nee
Gesmolten zout thermocline	Ja	Nee	Nee	Nee
Thermochemical storage for CSP	Ja	Nee	Nee	Nee
Thermocline with filler material	Ja	Nee	Nee	Nee

<sup>16</sup> Hierdoor verlies je de schaalvoordelen en moet op systeemniveau een veel grotere capaciteit aan opslag worden geplaatst en zijn de kosten naar verwachting aanzienlijk hoger.

Kijkend naar het beoogde toepassingsgebied, leidt de analyse in de tabel tot de volgende inkadering van de longlist op hoofdcategorieën:

- ATES;
- TTES;
- PTES;
- BTES.

Waarbij voor alle vier wordt gekeken naar de variant voor seizoensopslag. De vier opties verschillen sterk in hun uitvoering en geven daarmee een goede weergave van de breedte van de mogelijkheden in Nederland. In Tabel 7 worden zij indicatief met elkaar vergeleken op diverse aspecten.

Tabel 7 - Onderscheidende aspecten opslagsystemen

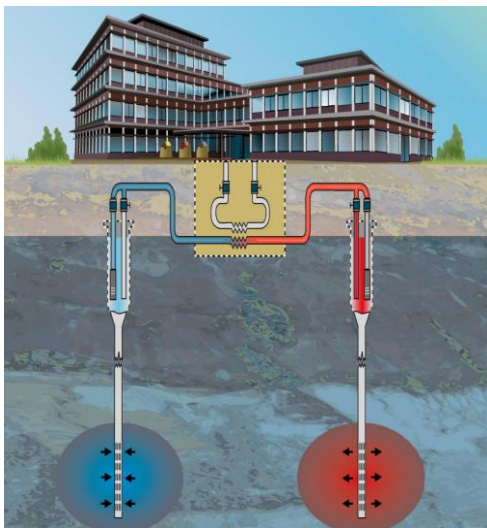
	ATES	TTES	PTES	BTES
Inpasbaar in bestaande bouw	Goed	Redelijk	Slecht	Redelijk
Inpasbaar nieuwbouw	Goed	Goed	Goed	Goed
Bovengronds ruimtebeslag	Weinig	Weinig	Veel	Weinig
Locatie	Ondergronds	Boven/Ondergronds	Bovengronds	Ondergronds
Open/gesloten	Open	Gesloten	Gesloten	Gesloten
Aquifer	Ja	Nee	Nee	Nee
Voorkeurstemperatuur	Laag/Midden/Hoog	Midden/Hoog	Midden/Hoog	Laag/Midden/Hoog
Invloed van lokale omstandigheden	Groot (ondergrond)	Klein	Groot (oppervlak)	Groot (ondergrond)

# 3 Functionele beschrijvingen

## 3.1 Inleiding

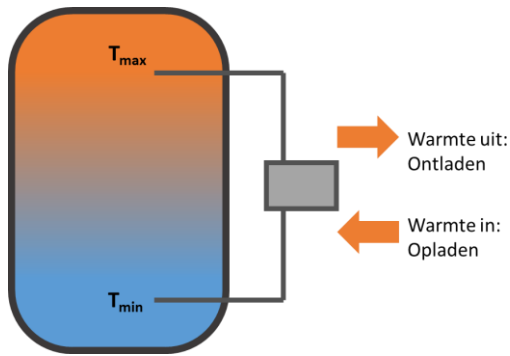
In dit hoofdstuk worden de karakteristieken en toepassingen van de geselecteerde opslagstechnieken besproken. In de eerstvolgende paragrafen wordt een kwalitatieve beschrijving per systeem gegeven. Gevolgd door een gedetailleerd overzicht van de technieken.

## 3.2 ATES: Aquifer Thermal Energy Storage



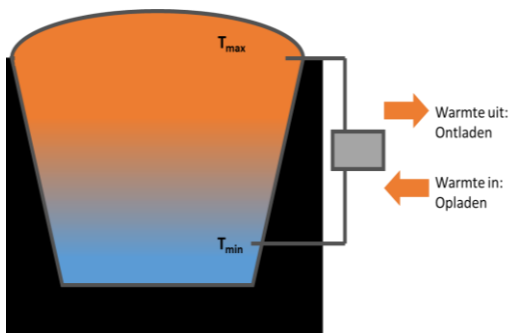
De aquifer, een watervoerende laag in de bodem, biedt mogelijkheden als thermische opslag. Door opgewarmd water via boorgaten in de grondwaterlagen te injecteren wordt warmte erin opgeslagen. Er zijn reeds meer dan 2.000 systemen in Nederland in de vorm van wko. Bij een wko heeft de opgeslagen warmte een lage temperatuur (Lage temperatuuropslag, LTO). LTO dient nadien nog opgewaardeerd te worden tot hogere temperaturen om bruikbaar te zijn voor ruimteverwarming of warm tapwater. De volgende uitdaging waar in Nederland aan gewerkt wordt betreffende warmteopslag in de aquifer, is MTO en HTO. MTO en HTO slaan warmte op bij respectievelijk midden temperatuur (25-45°C) en hoge temperatuur (50-90°C) en vereisen geen of slechts beperkte warmteopwaardering naar bruikbare temperaturen. Momenteel zijn er verschillende projecten gaande om deze toepassing te bewijzen. Bij de ontwikkeling van zowel MTO als HTO in een aquifer zijn er nog aanzienlijke uitdagingen. Zo is het volgens bepalingen in het Waterbesluit in principe niet toegestaan om een hogere infiltratietemperatuur dan 25°C te hanteren. Daarnaast zijn er ook nog uitdagingen in de materiaalkeuze van de componenten. ATES-systemen hebben een grote opslagcapaciteit en worden toegepast voor opslag over lange termijnen. Hoewel Nederland bodemkundig erg geschikt is voor toepassing van ATES-systemen, zijn wko's niet overal toegestaan. Zo zijn er verschillende aandachts- en verbodsgebieden. Ook zijn er interferentiegebieden waar al veel wko's zijn geïnstalleerd en de bodem verzadigd raakt.

### 3.3 TTES: Tank Thermal Energy Storage



Warm water opslaan in een opslagvat is één van de eenvoudigste methoden van warmte-opslag. Deze techniek wordt in alle vormen en maten reeds toegepast. Denk bijvoorbeeld aan een boiler voor warm water in de keuken of voor de douche. Op grote schaal wordt een tankopslag voornamelijk gebruikt als korttermijnbuffer. Een kortetermijnbufferopslag wordt veelvuldig op- en ontladen (dagelijks of enkele keren per week). Deze toepassing is vooral interessant bij warmtebronnen die hier een voordeel bij hebben, zoals een elektriciteitscentrale. Frequent cyclusegebruik is eenvoudig mogelijk omwille van het gesloten systeem. Seizoensopslag in een tank is ook mogelijk. Vooral voor grote systemen zorgen schaalvoordelen voor lagere opslagkosten per hoeveelheid opgeslagen warmte. In Nederland staan verschillende grootschalige TTES-systemen. Onder andere rondom Amsterdam bij de Diemencentrale en in het warmtenet, waarbij ze als buffer dienen. Tevens worden ze veelvuldig toegepast door glastuinders, die ze als buffer gebruiken om de inzet van hun wkk's te optimaliseren. Grootschalige seizoenopslag in een TTES wordt tot op heden nog niet toegepast in Nederland.

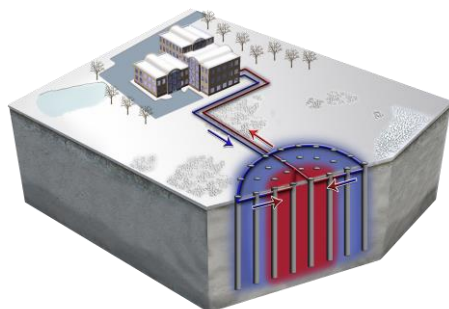
### 3.4 PTES: Pit Thermal Energy Storage



Thermische putten onderscheiden zich van thermische opslagtanks door hun lagere constructiekosten en hun grotere volume. Kort gezegd, zijn het 'slechts' grote gaten die in de grond worden gegraven en daarna gevuld met water. Ze worden al toegepast op zeer grote schaal in het buitenland, maar ook kleine versies zijn mogelijk. In combinatie met zonnecollectoren voorzien zij vaak direct bruikbare duurzame warmte op hoge temperaturen aan de eindgebruikers. Een nadeel van pit thermal energy storage is dat zij veel ruimte innemen.



### 3.5 BTES: Borehole Thermal Energy Storage



Gesloten bodem energiesystemen vinden vandaag hun voornaamste toepassing op woning-niveau. Denk hierbij aan de bodemlus waar een bodemwarmtepomp op aangesloten is (gesloten wko-systemen). Er zijn reeds meer dan 40.000 zulke gesloten systemen aanwezig in Nederland. We zien dat deze systemen ook hun intrede doen in grootschalige toepassingen. In een gesloten thermisch opslagsysteem wisselt een tussenmedium warmte uit met de bodem. Dit tussenmedium verlaat het systeem niet en zorgt zo voor een onderhoudsvriendelijker systeem. Bovendien is een BTES ook minder invasief in het bodem-ecosysteem. Een BTES is een modulair systeem dat eenvoudig met additionele boorgaten kan worden uitgebreid.

Voor gesloten bodemsystemen met een klein vermogen, minder dan 70 kW, is tot op heden enkel een meldingsplicht. Grotere systemen vereisen een vergunning.

### 3.6 Technisch en toepassingsoverzicht

Hierna volgt een overzicht van de belangrijkste technische parameters die de thermische opslagsystemen beschrijven. De opslagcapaciteit van de reservoirsystemen (TTES en PTES) worden gedefinieerd op basis van de warmteopslagcapaciteit. De opslagcapaciteit voor de bodemsystemen (ATES en BTES) worden gedefinieerd op basis van thermisch vermogen. Omwille van dit onderscheid worden beide groepen in afzonderlijke tabellen weergegeven.

Tabel 8 - Overzicht technische parameters opslagsystemen

	PTES Seizoensopslag	TTES Seizoensopslag	TTES Korte termijn buffer opslag	
			Onder druk	Standaard
$T_{min}$ (°C)	10	15	60-70	60-70
$T_{max}$ (°C)	90	90	140-180	98
Volume (m <sup>3</sup> )	85-210.000	6.000-90.000	1.000-6.000	1.000-50.000
Warmte opslagcapaciteit	5-15 GWh	Tot 5,6 GWh (bij $\Delta T=50K$ )	Tot 0,85 GWh	Tot 2 GWh
Schaal (aantal gemiddelde woningen*)	Ca. 1-1.200 woningen jaarverbruik	Ca. 450 woningen jaarverbruik	Ca. 3.500 woningen weekverbruik Ca. 25.000 woningen dagverbruik	Ca. 8.000 woningen weekverbruik Ca. 60.000 woningen dagverbruik
Cyclus frequentie	1-2/jaar	1-2/jaar	1/dag - 1/week	
Efficiëntie	< 81%	85%	99%	
Warmtecapaciteit	60-80 kWh/m <sup>3</sup>			

	ATES			BTES		
	MTO	HTO	wko	LTO	MTO	HTO
T <sub>min</sub> (°C)	25	30	5	7	25	30
T <sub>max</sub> (°C)	45	85	15	15	45	85
Vermogen	0,3-1 MW	Minimaal 5 MW	Gemiddeld 0,15 MW			
Warmte opslagcapaciteit				210 MWh-840 MWh <sup>17</sup>		
Schaal (aantal gemiddelde woningen*)	Ca. 120-400 op vermogen	Ca. 2.000 op vermogen	Ca. 50-100 op vermogen	Ca. 100-400 woningen jaarverbruik		
Cyclus frequentie	1-2/jaar		1-2/jaar	1-2/jaar		
Efficiëntie	60-85% <sup>18</sup>		75%	45-60% <sup>19</sup> of 70-90% <sup>20</sup>		
Warmtecapaciteit	30-40 kWh/m <sup>3</sup>			15-30 kWh/m <sup>3</sup>		

\* Een gemiddelde woning heeft een jaarlijks gasverbruik van 1.270 m<sup>3</sup> (CBS, 2018). Dit komt overeen met een jaarlijkse warmtevraag van ca. 11-12 MWh. Om een gemiddelde woning te verwarmen is ca. 7-13 kW vermogen nodig, welke deels wordt ingevuld door het opslagsysteem.

Niet alle warmtebronnen zijn bij elke opslagtechniek van toepassing. In Tabel 9 wordt indicatief een overzicht gegeven van welke bron-opslag-combinaties te verwachten zijn op basis van temperatuurniveau.

Tabel 9 - Bron-opslag-combinaties op basis van temperatuurniveau

Bron	Brontemp. (productie)	Toepassing TTES	Toepassing PTES	Toepassing BTES & ATES wko/LTO	Toepassing BTES & ATES MTO	Toepassing BTES & ATES HTO <sup>*)</sup>
Aquathermie	15-25 °C			✓		
Ondiepe geothermie (lagetemperatuuraardwarmte)	40-60 °C	✓	✓		✓	
Diepe geothermie	70-100 °C	✓	✓			✓
Ultradiepe geothermie	120-160 °C	✓				
Restwarmte (LT/MT/HT)	20-120 °C	✓	✓	✓	✓	✓
Biowarmtecentrale	> 90 °C	✓	✓			✓ <sup>**)</sup>
Elektrische weerstand-verwarming	> 90 °C	✓	✓			
Zonnecollectoren	40-90 °C	✓	✓		✓	✓

\*) ATES en BTES HTO gaan tot circa 85 °C. Dit zit in de HTO-range.

\*\*) Bronnen als biowarmtecentrales zitten traditioneel op temperaturen die hoger zijn dan de werkings-temperatuurrange van BTES en ATES. Voor nu wordt echter wel aangenomen dat dit een geschikte combinatie is. In specifieke gevallen kan blijken dat dit al dan niet mogelijk is.

<sup>17</sup> <https://www.solar-district-heating.eu/documents/sdh-guideline-storage/>

<sup>18</sup> (Wesseling, 2016)

<sup>19</sup> (Nielsen, et al., 2019)

<sup>20</sup> (Lanahan & Tabares-Velasco, 2017)



# 4 Businesscase parameters

## 4.1 Inleiding

Om toe te werken naar het uitwerken van globale businesscases wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de financiële parameters van de verschillende opties. Omdat de technieken in verschillende mate (niet, weinig, veel) worden toegepast in Nederland, zijn niet van alle technieken evenveel gegevens beschikbaar. Daarnaast is van een aantal technieken een duidelijke aanbieder aanwezig in Nederland, met daarbij uitgewerkte proposities voor hun oplossing. En bij andere technieken gaat het om generieke benaderingen, waarbij gebruik gemaakt moet worden van globale kentallen. Daarnaast zijn ook niet alle parameters in dezelfde eenheden beschikbaar. In de volgende alinea wordt per optie nader ingegaan op de financiële parameters. Hierbij is zo veel mogelijk aangegeven wat de herkomst van de parameters is. Tabel 10 laat alleen de gegevens zien die uiteindelijk gebruikt zijn in de businesscases. In de Excel-bestand(en) is tevens een grotere set van gegevens opgenomen, die inzicht geven in de bandbreedte van de gegevens.

## 4.2 Overzicht van parameters

In Tabel 10 worden gebruikte parameters van de opslagsystemen weergegeven.

Tabel 10 - Overzicht gehanteerde financiële parameters opslagsystemen

Onderdeel	Eenheid	ATES		TTES		PTES		BTES	
		Waarde	Bron	Waarde	Bron	Waarde	Bron	Waarde	Bron
Investing (vast)	€	725.000	<sup>1</sup>						
Investing (variabel)	€/MW	150.000	<sup>1</sup>						
Investing (variabel)	€/kWh			2,57	<sup>5</sup>	0,40	<sup>10</sup>	1,10	<sup>12</sup>
Investing (additioneel)	%			10	<sup>6</sup>				
O&M (jaarlijks)	% van de investering	1%	<sup>1</sup>	0,5%	<sup>7</sup>	3%	<sup>11</sup>	3%	<sup>11</sup>
Productiekosten	€/GJ	0,335	<sup>2</sup>	0,355	<sup>2</sup>	0,355	<sup>2</sup>	0,355	<sup>2</sup>
Rendement MTO	%	67,5%	<sup>3</sup>						
Rendement HTO	%	60,0%	<sup>3</sup>						
Rendement	%			89,0%	<sup>8</sup>	81%	<sup>10</sup>	80%	<sup>13</sup>
Levensduur	jaar	30	<sup>4</sup>	50	<sup>9</sup>	30	<sup>11</sup>	30	<sup>11</sup>

Bronnen	
1	HTO - Hoge temperatuur opslag in de ondiepe ondergrond (TNO, 2013) <i>Modelmatige aanname: kosten voor MTO en HTO zijn gelijk. In werkelijkheid liggen de kosten van MTO lager dan de bovengenoemde waarde voor HTO; Het is op dit moment echter niet eenduidig vast te stellen hoeveel deze kosten verschillen.</i>
2	Pompenenergie vergelijkbaar met geothermie (Functioneel Ontwerp 4.0 VESTA MAIS).
3	Thermisch rendement hoge & middelhoge temperatuur warmteopslag in de bodem (IF Technology, 2014).
4	Zoals geothermieputten (Geothermie voor Industrie, RVO, 2014).
5	Op basis van 14,6 M€ voor 5,68 GWh (Ecovat, 2020).
6	Aanname: opgegeven kosten van Ecovat zijn exclusief technische ruimte, warmtewisselaars, leidingen, pompen en verdeelstation.
7	Aanname op basis van productinformatie Ecovat (50k€/jaar=0,3-1,0% van investering) (Ecovat,2020).
8	Gemiddeld rendement (Ecovat, 2020).



Bronnen	
9	Productinformatie Ecovat (Ecovat,2020).
10	ECES ANNEX 30, 2018.
11	IRENA, Thermal Energy Storage, 2013.
12	HEATSTORE Underground Thermal Energy Storage (UTES) - state-of-the-art, example cases and lessons learned, (Kallesøe, et al., 2019).
13	Seasonal Thermal-Energy Storage: A Critical Review on BTES Systems, Modeling, and System Design for Higher System Efficiency, (Lanahan & Tabares-Velasco, 2017).

Naast de voorgenoemde gegevens van de opslagsystemen, zijn ook gegevens gebruikt van andere elementen uit een collectieve warmtevoorziening om uiteindelijk de businesscase in te vullen. De details hiervan zijn terug te vinden in de Excel-bestanden en worden verder toegelicht in het volgende hoofdstuk.

### 4.3 Inputparameters warmtevoorziening

Een warmteopslag maakt deel uit van een warmtevoorziening, in deze studie de warmtevoorziening van een warmtenet. De overige relevante parameters voor de warmtevoorziening worden weergegeven in Tabel 11, Tabel 12 en Tabel 13. In de laatste twee tabellen wordt ingezoomd op de karakteristieken van respectievelijk de hoofdbron en de piekvoorziening.

Tabel 11 - Overzicht gehanteerde parameters warmtevoorziening

	Eenheid	Restwarmte	Geothermie	Biomassa	Bron
Totaal vermogen energievoorziening	MW	10	10	10	Modelaanname
Warmtelevering piekvoorziening	% GJ	20%	30%	20%	O.b.v. FO4.0 Vesta (2020) - 2.4.1
Warmtelevering hoofdbron	% GJ	80%	70%	80%	O.b.v. FO4.0 Vesta (2020) - 2.4.1
Leidingverlies warmtewetverlies	%	20%	20%	20%	FO4.0 Vesta (2020) - Bijlage A.11; warmteverliezen

Tabel 12 - Overzicht gehanteerde parameters van de primaire warmtebron

Primaire warmtebron	Eenheid	Restwarmte	Geothermie	Biomassa	Bron
Investering uitkoppelkosten	€/kW	187,5	1.875	180	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 39; middenwaarde
Afschrijftermijn	Jaar	30	30	30	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 12
O&M uitkoppeling	Van investering	5%	1%	5%	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 39
Productiekosten	€/GJ warmte	0,36	0,36	8,50	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 48; waarde BMC; 2020
Rentevoet	%	6%	6%	6%	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 12
CO <sub>2</sub> -emissies	ton CO <sub>2</sub> /GJ warmte	0	0	0	Aanname Scope 1-emissies GHG-protocol

Tabel 13 - Overzicht gehanteerde parameters piekvoorziening

Piekvoorziening	Eenheid	Waarde	Bron
Piekketels	€/kW	€ 135,00	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 22; K_OS
Afschrijftermijn piekketels	jaar	30	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 12
O&M piekketels	% van investering	6%	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 30; R_OS
Rendement piekketel (op bovenwaarde)	%	83%	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 25
Rentevoet	%	6%	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 12
Gasprijs grootverbruik	€/m <sup>3</sup>	€ 0,335	FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 46; waarde Grootverbruik; 2020
Gasprijs grootverbruik	€/GJ	€ 9,53	Omrekening o.b.v. FO4.0 Vesta (2020) - Tabel 46; waarde Grootverbruik; 2020
Emissiekental aardgas	ton CO <sub>2</sub> /GJ	0,056	Standaard CO <sub>2</sub> -emissiefactor (NEA, 2020)

Om de kosten van de warmtevoorziening te bepalen, wordt in aanvulling op de voorgaande gegevens, gebruik gemaakt van de kengetallen die zijn opgenomen in het Vesta-MAIS-model van het PBL.

# 5 Analyse opslagsystemen

## 5.1 Inleiding

Om een beeld te geven van de mogelijkheden en de toegevoegde waarde van (groot-schalige) collectieve thermische seizoensopslagsystemen, zijn indicatieve businesscases uitgewerkt van de diverse opslagtoepassingen. Er is gekeken naar de invloed van verschillende configuraties van opslagsystemen met verschillende bronnen en verschillende karakteristieken voor de levering.

De nadruk ligt op de financiële waarde, maar ook een positieve maatschappelijke waarde wordt beschouwd (CO<sub>2</sub>-reductie of grotere duurzame bijdrage). In de komende paragrafen worden deze nader toegelicht. In de volgende paragrafen worden eerst de financiële resultaten gepresenteerd. Gevolgd door een algemene beschouwing van de kansen en bedreigingen. De verdere toelichting, onderbouwing en achtergrond van deze analyses staan in de bijlagen.

Centraal bij deze businesscases staat de kwantitatieve uitwerking hiervan in de bijbehorende Excel. Hierin zijn alle varianten doorgerekend. In bijlage wordt voor elk opslagsysteem de businesscase weergegeven van de meest gunstige variant voor de optie bestaande bouw. De achterliggende systeemanalyses zijn opgenomen in de Excel.

## 5.2 Resultaten van de businesscases

De businesscases resulteren in enkele algemeen geldende trends bij het toepassen van thermische opslagsystemen in warmtenetten. Deze worden hieronder weergegeven voor de kapitaal- en operationele lasten voor het geïntegreerde systeem van warmtenet en opslag. In de volgende subparagrafen worden deze verder toegelicht en onderbouwd.

Kapitaallasten:

- Als gevolg van het toevoegen van het opslagsysteem en de investeringen die daarmee gepaard gaan, nemen de totale kapitaallasten over het algemeen toe.
- Door toevoeging van het opslagsysteem kan de piekkel kleiner gedimensioneerd worden en wordt deze minder ingezet. Dit leidt dus zowel tot lagere investeringen als lager verbruik van de piekinstallatie.<sup>21</sup>

Operationele lasten:

- De totale jaarlijkse operationele lasten nemen over het algemeen af als gevolg van het toevoegen van het opslagsysteem. Doordat de totale productiemix van warmte verandert, veranderen ook de operationele kosten:
  - De hoofdbron produceert meer ‘goedkope’ warmte, maar heeft daardoor in totaliteit hogere productiekosten. Van de geproduceerde warmte gaat een deel verloren tijdens de opslag (het thermisch opslagrendement is kleiner dan 100%).
  - De piekkelens produceren aanzienlijk minder, waardoor ook de productiekosten een stuk lager zijn.

<sup>21</sup> Iedere warmtenetvoorziening heeft ook back-upinstallaties. In de meeste gevallen is de back-up gedimensioneerd ter grootte van de piekinstallatie. De back-up wordt immers gedimensioneerd naar de voorziening met het grootste vermogen. Indien het piekvermogen verminderd wordt nemen de investeringen in de back-upinstallatie daarmee ook af.



- De O&M-kosten, die worden bepaald als % van de investering, nemen voor de piek- en back-upketels af (minder opgesteld vermogen, lagere investering). Voor het opslagsysteem komen deze erbij.

De algemene trends komen voort uit een 70-tal businesscases die doorgerekend zijn. Deze businesscases variëren in configuratie, bron en vraagprofiel. In de komende paragrafen wordt dieper ingegaan op een drietal configuratie varianten van de opslagsystemen:

**Variant A: Opgeslagen warmte wordt gebruikt voor uitbreiding van een warmtenet.**

De seizoensopslag wordt ingezet om in de winter bij te springen bij de productie uit de hoofdbron. Er kunnen zo meer woningequivalenten (WEQ) worden voorzien met warmte uit de bron. Het zorgt in de winter voor (*fictief*) een uitbereiding van het vermogen uit de hoofdbron. De piekinstallatie behoudt het oorspronkelijke vermogen.

**Variant B: Opgeslagen warmte wordt gebruikt om in de pieklast te voorzien.** De seizoensopslag wordt ingezet om het aandeel van de hoofdbron in de totale levering te vergroten, zodat er een groter aandeel goedkope warmte beschikbaar komt en er minder capaciteit aan aanvullende piekinstallaties nodig is.

**Variant C: Opgeslagen warmte wordt gebruikt om de capaciteit van de bron te verminderen.** De seizoensopslag wordt ingezet om het vermogen van de hoofdbron te verminderen, zodat er een minder grote bron nodig is om aan eenzelfde hoeveelheid WEQ te leveren.

Voor deze varianten zijn de businesscases uitgewerkt en beoordeeld op de volgende elementen:

- kosten voor de warmtevoorziening;
- CO<sub>2</sub>-emissies;
- aantal aangesloten klanten (WEQ).

### 5.2.1 Kosten voor de warmtevoorziening

De kapitaalkosten van de bron, piekvoorziening en opslag alsook de operationele kosten worden gecombineerd tot een LCOE (Levelized Cost of Energy)<sup>22</sup>. De LCOE omvat de volledige voorziening van warmte die uiteindelijk wordt ingezet in een warmtenet<sup>23</sup>. Deze LCOE (€/GJ) wordt bepaald voor elke businesscase. In Tabel 14 wordt voor alle businesscases aangegeven wat de bijdrage van het opslagsysteem is op de LCOE als reductiepercentage van de warmtekosten.

<sup>22</sup> De LCOE wordt bepaald door de totale jaarlijkse kapitaallasten en operationele lasten te delen door het aantal jaarlijks geleverde GJ.

<sup>23</sup> De kosten van het warmtenet zelf en de aansluitingen worden niet meegenomen.

Tabel 14 - Overzicht van verandering van LCOE door toevoeging opslagsysteem

Verandering LCOE		Vraagprofiel			Vraagprofiel		
		slecht-geïsoleerde buurt			goed-geïsoleerde buurt		
		Restwarmte (HT/MT)	Geothermie	Biomassa	Restwarmte (LT)	Geothermie	Biomassa
ATES MTO	Variant A	-7%	-3%	5%	-6%	-2%	6%
PTES	Variant A	-6%	-11%	6%	-17%	-16%	0%
ATES HTO	Variant A	-2%	-2%	6%	0%	-2%	7%
BTES	Variant A	48%	6%	30%	30%	2%	26%
TTES	Variant A	113%	30%	59%	89%	23%	56%
ATES MTO	Variant B	-38%	-12%	2%	-34%	-12%	-1%
ATES HTO	Variant B	-34%	-11%	4%	-25%	-12%	5%
PTES	Variant B	-17%	-11%	9%	-25%	-17%	1%
BTES	Variant B	54%	10%	42%	30%	4%	31%
TTES	Variant B	134%	41%	77%	91%	36%	62%
PTES	Variant C	0%		2%	-9%		-3%
ATES MTO	Variant C	10%		8%	11%		9%
ATES HTO	Variant C	10%		9%	12%		10%
BTES	Variant C	35%		18%	23%		14%
TTES	Variant C	89%		89%	58%		58%

Opmerking: Negatieve waarden betekenen een reductie van de LCOE. Positieve waarden een toename.

## Verskil tussen de configuratievarianten

Variant B geeft de beste resultaten. De opslag vervangt hierbij een groot deel of (bijna) de volledige piekinstallatie en de gekoppelde investeringen. Bovendien wordt het grootste deel van de dure gasgestookte warmte van de piekinstallatie vervangen door goedkopere, duurzamere warmte uit de hoofdbron. Het is dus waarschijnlijk dat een opslagsysteem ter vervanging van een piekvoorziening ingezet gaat worden.

Variant A zorgt voor een groter invoeding van warmte uit de hoofdbron in de warmtevoorzieningsmix. De relatief dure piekvoorziening door de gasketel blijft bestaan. In het totale plaatje zorgt de extra invoeding van goedkope warmte uit de hoofdbron voor relatief lagere operationele productiekosten van warmte.

Variant C geeft geen goede resultaten. Kleinere dimensionering van de hoofdbron is beperkt mogelijk en zorgt voor een beperkte impact op de uitkoppelkosten van de bron. Lagere uitkoppelkosten van de bron wegen slechts beperkt op tegen de kapitaalkosten van het opslagsysteem. Er is enkel een positieve businesscase voor nieuwbouwwoningen met LT-warmtevraag. Dit komt doordat de opslag niet alleen het benodigde vermogen van de hoofdbron reduceert, maar ook dat van de piekketels en daarmee ook van invloed is op de back-upinstallatie. Hiermee halveren niet alleen de investeringen in de ketels, maar ook de jaarlijkse O&M van de ketels (die gerelateerd zijn aan de investering).

## Verskil tussen opslagsystemen

De relatief lage investeringskosten van ATES en PTES-systemen leiden tot een positief effect op de LCOE van deze systemen. De kosten van een ATES-systeem zijn gedreven door het vermogen waarmee het opslagsysteem kan opslaan en leveren, terwijl voor de kosten van een PTES-systeem de opslagcapaciteit (opslagvolume) leidend is. Dit effect zorgt voor



mogelijke verschillen in operationele inzet van het opslagsysteem naargelang de configuratie en vorm van het vraagprofiel.

TTES en BTES zijn kapitaalintensieve systemen. Operationele winst in warmteleveringskosten weegt niet op tegen de hoge investeringen in de opslagsystemen. Deze systemen hebben wel een beter opslagrendement en passen daarom beter bij systemen met dure warmtebronnen, zodat zoveel mogelijk van de warmte benut wordt.

Capex-gedreven systemen zoals BTES en TTES zijn financieel minder aantrekkelijk dan opex-gedreven systemen als PTES en ATES. Het financiële gat tussen deze systemen wordt kleiner wanneer de basislast bestaat uit een bron met dure warmte. De capex-gedreven systemen hebben immers een betere energetische efficiëntie, waardoor minder dure warmte verloren gaat. Ter illustratie: bij het gebruik van goedkope restwarmte is het verschil tussen PTES en BTES 71% ten opzichte van de referentieprijis, terwijl dit bij biomassa slechts 33% is. Bij geothermie speelt ook het effect dat de warmteopslag maar een deel van de piekketels vervangt, waardoor alle resultaten tussen de verschillende technieken minder uit elkaar lopen.

## Verschil tussen bronnen

Tabel 15 geeft kwalitatief weer hoe de bronnen zich ten opzichte van elkaar verhouden.

Tabel 15 - Kwalitatieve vergelijking tussen de warmtebronnen

	Investeringskosten uitkoppeling bron	Operationele kosten warmtelevering
Restwarmte	Laag	Laag
Geothermie	Hoog	Laag
Biomassa	Laag	Hoog

Bij een dure geothermiewarmtebron is de hoge capex bepalend voor de LCOE. De kosten van opslagsystemen en mogelijke operationele winsten worden als het ware gedempt door de hoge investeringen van de geothermiebron. De leveringscurve van geothermie heeft daarnaast een andere verhouding piek-/basislast ten opzichte van de andere bronnen<sup>24</sup>, dit veroorzaakt een onderscheidend gedrag.

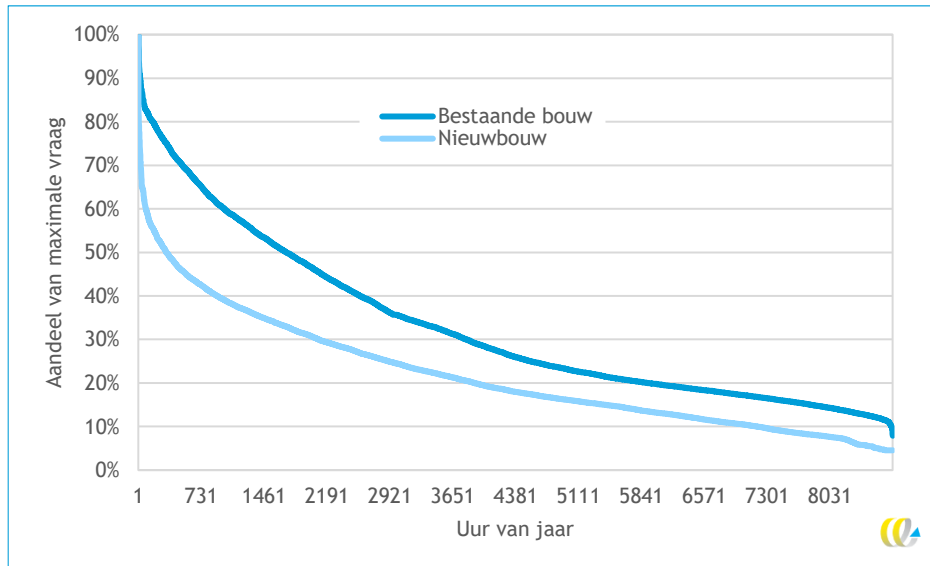
Bij dure warmtelevering (hoge operationele kosten) van een biowarmtecentrale heeft een opslagsysteem geen positief effect. Om warmte op te slaan moet deze warmte eerst extra opgewekt worden door verbranding van dure biomassa. Daarna verlies je een deel van deze warmte door het thermisch rendement van de opslag. Bij de andere bronnen wordt de hoofdbron beter benut en zijn de marginale kosten voor de productie van extra warmte, de operationele kosten, laag. Tot slot is biomassa zelf relatief eenvoudig op te slaan op lange termijn en is de aanlevering hiervan goed bestuurbaar, waarmee ook de noodzaak voor warmte-opslag, aanzienlijk minder is.

<sup>24</sup> Hierdoor heeft een geothermiebron meer vollasturen en wordt de bron dus beter benut.

## Verschil tussen oudbouw en nieuwbouw

De warmtevraagprofielen van oudbouw en nieuwbouw zijn verschillend, zie Figuur 7. Nieuwbouw heeft een vlakker profiel met een hogere piek. Dit verschil in profielen zorgt voor andere resultaten in de systeemanalyses.

Figuur 7 - Jaarduurkromme warmtenet bestaande bouw en nieuwbouw



Opmerking: In de grafiek is de warmtevraag per uur over een heel jaar gesorteerd van hoog naar laag.

### 5.2.2 CO<sub>2</sub>-emissies

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de warmtevoorziening is berekend volgens Scope 1 van het GHG protocol<sup>25</sup>. Alle uitstoot die lokaal wordt geëmitteerd bij de warmtevoorziening wordt in beeld gebracht. Van de beschouwde bronnen wordt aangenomen dat zij duurzaam of klimaatneutraal zijn en daarom netto geen CO<sub>2</sub> produceren<sup>26</sup>. Hiermee zijn de enige CO<sub>2</sub>-emissies afkomstig van de gasverbranding om de piek te voorzien.

In Tabel 16 staan de uitkomsten van de analyses op het vlak van CO<sub>2</sub>-emissiereductie. Hierin is de verandering van de CO<sub>2</sub>-emissies als gevolg van het toevoegen van een opslagsysteem bij een warmtebron weergegeven, ten opzichte van de situatie zonder opslagsysteem.

<sup>25</sup> <https://ghgprotocol.org/greenhouse-gas-protocol-accounting-reporting-standard-cities>

<sup>26</sup> Op dit moment wordt aangenomen dat de CO<sub>2</sub>-emissies van biomassa kortcyclisch zijn en daarmee niet meetellen. Het huidige publieke debat over de wenselijkheid van inzet van biomassa voor warmteproductie kan deze aanname op termijn veranderen.

Tabel 16 - Overzicht van verandering in CO<sub>2</sub>-emissie, door toevoeging van opslagsysteem

CO <sub>2</sub> -besparing		Vraagprofiel bestaande, slecht-geïsoleerde buurt			Vraagprofiel goed-geïsoleerde buurt		
		Restwarmte (HT/MT)	Geothermie	Biomassa	Restwarmte (LT)	Geothermie	Biomassa
TTES	Variant A	44%	23%	44%	61%	30%	61%
BTES	Variant A	43%	21%	43%	59%	30%	59%
PTES	Variant A	43%	21%	43%	59%	30%	59%
ATES MTO	Variant A	33%	4%	33%	45%	1%	45%
ATES HTO	Variant A	25%	1%	25%	30%	-2%	30%
TTES	Variant B	100%	43%	100%	100%	51%	100%
BTES	Variant B	100%	36%	100%	100%	42%	100%
PTES	Variant B	100%	40%	100%	100%	42%	100%
ATES MTO	Variant B	96%	33%	96%	99%	32%	99%
ATES HTO	Variant B	88%	30%	88%	90%	29%	90%
TTES	Variant C	0%		0%	0%		0%
BTES	Variant C	0%		0%	0%		0%
PTES	Variant C	0%		0%	0%		0%
ATES MTO	Variant C	0%		0%	0%		0%
ATES HTO	Variant C	0%		0%	0%		0%

## Verskil tussen varianten

Bij Variant A wordt een relatief beperkte hoeveelheid CO<sub>2</sub> vermeden, ten opzichte van Variant B. De piekketels blijven nog steeds eenzelfde piekvermogen vervullen, maar de relatieve hoeveelheid piekwarmte zelf neemt af. Dit komt omdat een groter deel van de warmtevoorziening door de warmtebron en het opslagsysteem wordt ingevuld<sup>27</sup>.

Bij Variant B wordt veel CO<sub>2</sub>-uitstoot vermeden. De opslag vervangt een groot gedeelte of bijna de volledige piekvraag.

Bij Variant C wordt geen CO<sub>2</sub>-uitstoot vermeden aangezien de bron voor pieklevering onveranderd blijft.

## Verskil tussen opslagsystemen

PTES, BTES en TTES scoren gelijkwaardig. ATES scoort het minst gunstig op de CO<sub>2</sub>-emissiereductie. Bij de andere systemen kan de inzet van de piekketels bijna volledig vermeden worden. ATES heeft steeds een resterend deel piekvoorziening nodig om de hoogste pieken te voorzien. Een ATES is immers beperkt in piekvermogenslevering: de hoeveelheid warmte die gelijktijdig uit de aquifer onttrokken kan worden is beperkt. Bovendien zijn de opslagkosten voor een ATES vermogensafhankelijk, waardoor het niet rendabel is om eindeloos vermogen uit te breiden voor een marginale extra opslag/winst van goedkope bronwarmte. Daarnaast heeft een ATES een relatief laag thermisch rendement waardoor er niet steeds voldoende beschikbare warmte voorhanden is om de warmte te leveren.

<sup>27</sup> In Variant A worden ook extra weq aangesloten. Indien het hierbij gaat om woningen die voorheen met aardgas werden verwarmd, dan wordt hier ook nog aanvullend CO<sub>2</sub> gereduceerd.

## Verschil tussen bronnen

Warmtenetten met een geothermiebron vertonen een afwijkend gedrag. Dit komt omdat een geothermiebron kleiner is gedimensioneerd en een grotere piekvoorziening heeft. Er is bijgevolg niet genoeg warmte beschikbaar om de piekvraag en de CO<sub>2</sub>-uitstoot die ermee gepaard gaat, op een gelijke wijze als bij de andere bronnen in te vullen met een opslagsysteem. Daarnaast komt als gevolg van aannames en optimalisaties bij ATES niet alleen extra warmte vanuit de bestaande hoofdbron beschikbaar, maar ook extra warmte uit piekketels. Daardoor valt de CO<sub>2</sub>-reductie bij ATES lager uit dan bij andere technieken.

### Prijsverrekening CO<sub>2</sub> in de businesscases

Op dit moment is de ETS-prijs van een ton CO<sub>2</sub> relatief laag (ca. 20 €/ton) en heeft deze emissiereductie slechts een beperkte invloed op de businesscase. Tevens wordt in de gehanteerde prijzen van aardgas en elektriciteit in het Functioneel Ontwerp van Vesta-MAIS op dit moment géén waarde voor CO<sub>2</sub> meegenomen (zie ook Tabel 13).

Wanneer echter niet wordt uitgegaan van de marktprijs (ETS-prijs) voor CO<sub>2</sub>, maar van de milieuprijs, inclusief de globale klimaatambities, dan ligt de prijs voor CO<sub>2</sub> in 2030 aanzienlijk hoger (ca. 150 €/ton, met een range van 120-560 €/ton)<sup>28</sup>. Als van dergelijke milieuprijzen wordt uitgegaan, dan zullen de businesscases voor de systemen die maximaal CO<sub>2</sub> reduceren interessant(er) worden.

## 5.2.3 Uitbreiding warmtenet

Karakteristiek voor de omvang van een warmtenet is het aantal WEQ (woningequivalenten) waaraan warmte geleverd wordt. Variant A zet de extra opgeslagen warmte in om meer WEQ aan te sluiten op het warmtenet. Tabel 17 geeft weer in welke mate een warmtenet uitgebreid kan worden door toevoeging van een opslagsysteem. Hierbij wordt dus aangenomen dat het vermogen van de hoofdbron en de piekketel gelijk blijft en dat de productiecurve dus omhoog schuift met het vermogen van de opslag<sup>29</sup>.

Tabel 17 - Overzicht van verandering in aan te sluiten WEQ, door toevoeging van een opslagsysteem

Toename WEQ		Vraagprofiel slecht-geïsoleerde buurt			Vraagprofiel goed-geïsoleerde buurt		
		Restwarmte (HT/MT)	Geothermie	Biomassa	Restwarmte (LT)	Geothermie	Biomassa
ATES HTO	Variant A	9%	14%	9%	6%	18%	6%
ATES MTO	Variant A	13%	14%	13%	10%	18%	10%
PTES	Variant A	18%	7%	18%	15%	6%	15%
BTES	Variant A	18%	7%	18%	15%	6%	15%
TTES	Variant A	19%	8%	19%	16%	6%	16%

<sup>28</sup> [CE Delft : Milieuprijzen](#)

<sup>29</sup> Met uitzondering van de combinatie van geothermie en ATES; zie 'Verschil tussen bronnen'.

## Verskil tussen opslagsystemen

Het aantal extra woningequivalenten loopt samen met de hoeveelheid energie die door een opslagsysteem opgeslagen/geleverd wordt en is dus gekoppeld aan het thermische opslagrendement. TTES met het hoogste rendement kan het meeste opgeslagen warmte terugleveren. Hierdoor kan het warmtenet met dit systeem het meest uitgebreid worden. Door de aannames en optimalisaties in de business komt er alleen bij ATES in combinatie met geothermie niet alleen extra warmte vanuit de bestaande hoofdbron beschikbaar, maar ook extra warmte uit piekketels. Daardoor valt het aantal extra aansluitingen bij ATES hoger uit dan bij andere technieken.

## Verskil tussen bronnen

Door de andere dimensionering van geothermienetten is er minder warmte beschikbaar om op te slaan en te leveren. Hierdoor kunnen minder extra woningequivalenten beleverd worden.

Dit geldt alleen niet voor de combinatie van geothermie met ATES. De hogere toenames van WEQ bij ATES en geothermie komt maar in beperkte mate door een betere inzet van de geothermieput. Dit komt hoofdzakelijk doordat in de modellering de piekketels aanzienlijk meer draaiuren krijgen. Dit verklaart ook mede de slechte scores van ATES en geothermie wat betreft CO<sub>2</sub>-emissies (zie Tabel 16 bij Variant A). Door de aannames en optimalisaties in de businesscase in het geval van geothermie komt er alleen bij ATES niet alleen extra warmte vanuit de bestaande hoofdbron beschikbaar, maar ook extra warmte uit piekketels. Daardoor valt het aantal extra aansluitingen bij ATES hoger uit dan bij andere technieken.

## Verskil tussen oudbouw en nieuwbouw

Het verschil tussen oudbouw en nieuwbouw is met name te wijten aan de verschillende vorm van de leveringsprofielen. Bij nieuwbouw is er een lagere warmtevraag, waardoor de hoofdbron in basislast al meer vollasturen heeft. Er is dus minder warmtepotentieel beschikbaar om door een opslagsysteem extra woningen van warmte te voorzien.

### 5.2.4 Bevindingen vanuit de businesscases

Vanuit bovenstaande analyses komen de volgende bevindingen naar voren.

#### Geen gunstige businesscase te maken voor Variant C

Variant C kent zowel geen positieve businesscase als positieve maatschappelijke effecten, voor zover die in deze studie zijn onderzocht. Variant C, waarbij de opslag wordt ingezet om een kleinere hoofdbron te plaatsen, zorgt op één uitzondering na steeds voor een slechtere LCOE. De kosten van de hoofdbron (€/kW) zijn in de meeste gevallen te laag om de meerkosten van het opslagsysteem goed te maken. Daarnaast vermindert de variant de CO<sub>2</sub>-emissies niet en zorgt de variant niet voor een uitbreiding van het warmtenet.

#### ATES- en PTES-systemen verbeteren de LCOE

ATES-systemen hebben een positieve impact op de LCOE. Zeker wat betreft de goedkopere bronnen (restwarmte) onderscheidt een ATES zich van de andere opslagsystemen. In dat geval daalt de LCOE met een derde als gevolg van het opslagsysteem. Ook PTES-systemen

hebben een positief effect op de LCOE, al is het in mindere mate. De grootste verbetering- en worden gehaald bij Variant B, waar opgeslagen warmte wordt gebruikt om in de pieklast te voorzien.

### **Capex-intensieve TTES- en BTES-systemen verslechteren de LCOE**

In de huidige markt en de huidige financiële parameters zien we dat een TTES-systeem niet goed scoort als seizoensopslag. Het leidt tot een hogere LCOE. TTES hebben hoge investeringskosten vergeleken met de andere beschouwde technieken. Een beter opslagrendement weegt hier zelfs voor kostbare warmtebronnen (zoals biomassa) niet tegenop. Als gevolg hiervan zijn de jaarlijkse kapitaallasten van een TTES-systeem aanzienlijk. Om een TTES-systeem een positief resultaat te geven, moet in het geval van nieuwbouw (geothermie, Variant A):

- de investeringskosten afnemen met ca. 40%; of
- de investeringskosten afnemen met ca. 20% en een rekenrente van 4% hanteren<sup>30</sup>.

Ook de BTES scoort slecht en zorgt voor een hogere LCOE. Zeker vergeleken met het andere type bodemopslag, ATES-variant, heeft de BTES een lage score.

### **PTES, BTES en vooral TTES hebben de grootste impact op CO<sub>2</sub>-reductie en vergroten het aantal WEQ het meest**

In grote lijnen scoren PTES-, BTES- en TTES-systemen beter dan ATES-systemen in Variant A, als het gaat om extra aangesloten WEQ en als het gaat om CO<sub>2</sub>-reductie in Variant B. Deze systemen en vooral TTES (hoogste opslagrendement) gaan het efficiëntst en meest duurzaam om met de duurzame warmtebronnen. Met uitzondering van ATES zijn de bekeken opslagsystemen in staat om volledig op de combinatie van hoofdbron en opslag te draaien zonder (fossiele) piekvoorziening, in het geval van restwarmte en biowarmte. Bij Variant B kan de inzet van de piekketels naar nul worden gereduceerd, waardoor volledige CO<sub>2</sub>-reductie mogelijk is. De enige uitzondering hierop is ATES in Variant B bij geothermie.

### **Onzekerheid op de resultaten**

- Capex: Van TTES, BTES en PTES is het niet bekend wat de verwachte kostenverlagingen in de toekomst zijn. ATES zit al redelijk aan het einde van de leercurve.
- Opslagrendement: De gebruikte getallen van de weergegeven opslagsystemen zijn gebaseerd op verschillende uitvoeringsvarianten. Het daadwerkelijk rendement zal afhangen van de lokale context. Met name bij ATES-systemen is er veel onzekerheid en variatie wat betreft het opslagrendement. Het opslagrendement is erg afhankelijk van de ondergrondssamenstelling, die je pas met enige zekerheid kan bepalen door een boring vooraf. Bij een TTES zijn er weinig onvoorspelbare factoren van het systeem.

## **5.3 Context: Kansen en bedreigingen**

Aanvullend op de bevindingen uit de businesscases wordt in de volgende paragrafen een beschouwing gegeven van de kansen en de bedreigingen vanuit de context die de verschillende systemen hebben om toegepast te worden.

<sup>30</sup> Uit documentatie van Ecovat blijkt dat in de komende jaren een kostprijs reductie van circa 20% te verwachten is (Groot, 2020).



### 5.3.1 ATES

#### Kansen

De brede toepassing van wko-systemen heeft aangetoond dat de ondergrond van Nederland op veel plaatsen geschikt is om met een ATES aan de slag te gaan<sup>31</sup>. Daarnaast geldt dat hoe groter het systeem, hoe hoger het opslagrendement is (IF Technology, 2019). Het bovengrondse ruimtebeslag van ATES is minimaal. Daarnaast kan een ATES ook in koude voorzien.

#### Bedreigingen

Het toepassen van MTO en HTO met ATES kent twee belangrijke bedreigingen:

- **Juridisch:**
  - HTO is voornamelijk alleen toegestaan als pilot. Wet- en regelgeving<sup>32</sup> staat het structureel niet toe, waardoor je afhankelijk bent van medewerking van bevoegd gezag om een ontheffing/vergunning te krijgen.
- **Technisch/Economisch:**
  - Bij HTO-projecten zijn in het verleden veel technische problemen opgetreden. Daar zijn oplossingen voor, maar er zijn nog te weinig succesvolle projecten (> 50 à 60°C).
  - Door het grote opslagverlies, is de combinatie van dure, duurzame warmte met opslag in een ATES niet gunstig (veel dure warmte gaat verloren).
  - Hoewel ATES op veel plekken in de Nederlandse bodem mogelijk is, is het Nederlandse bodemgebruik al druk. Met name in stedelijk gebied, waar de ATES toegepast kan worden in combinatie met warmtenetten, wordt de ondergrond al voor veel andere toepassingen gebruikt. Waaronder ook de eerdergenoemde wko-systemen, waarvan zich er al duizenden in de Nederlandse bodem bevinden. Interferentie met deze systemen is niet wenselijk.
  - De mogelijkheid van levering van de hoogste, meest variabele pieken is beperkt voor ATES.

### 5.3.2 PTES

#### Kansen

De ervaringen met grootschalige PTES in Nederland is beperkt, maar in andere delen van Europa worden deze systemen al langer toegepast. Er zijn dus voldoende ervaringen om op voort te bouwen (Kallesøe, 2019):

- 10.000 m<sup>3</sup> pilot storage in Marstal on the island Ærø in 2003;
- 75.000 m<sup>3</sup> full scale storage in Marstal in 2011-12;
- 60.000 m<sup>3</sup> full scale storage in Dronninglund in Northern Jutland in 2013;
- 122.000 m<sup>3</sup> full scale storage in Gram in Southern Jutland in 2014;
- 203.000 m<sup>3</sup> full scale storage in Vojens in Southern Jutland in 2015;
- 85.000 m<sup>3</sup> full scale storage in Toftlund in Southern Jutland in 2017;
- 70.000 m<sup>3</sup> full scale storage in Høje Taastrup near Copenhagen, planned 2019.

<sup>31</sup> Tot ca. 45 à 50°C is MTO technisch vrijwel identiek aan wko (gebruik van pvc-leidingen, geen waterbehandeling, etc.).

<sup>32</sup> 25°C-grens AMVB Bodemenergie.



## Bedreigingen

De toepassing van PTES kent drie belangrijke bedreigingen:

- De belangrijkste, en helemaal voor het dichtbevolkte Nederland, is het omvangrijke, bovengrondse ruimtebeslag dat deze systemen nodig hebben. Met name in de stedelijke gebieden kan dit een omvangrijke belemmering vormen.
- Het bouwen van PTES in gebieden met een hoge grondwaterstand kan complex of zelfs onmogelijk zijn. In de regio's Noord- en Zuid-Holland, Zeeland, Friesland, Groningen en Flevoland zit het grondwaterniveau vlak onder het maaiveld. Hierbij zouden dus complicaties op kunnen treden bij de bouw van een PTES. En omdat de pits niet geïsoleerd zijn, kunnen de thermische verliezen toenemen vanwege koeling door het grondwater.

De huidige systemen die gebouwd zijn, hebben een verwachte levensduur van 20 jaar. Dit is kort, zeker in vergelijking met de andere systemen.

### 5.3.3 TTES

#### Kansen

Hoewel de TTES op dit moment nog geen rendabele businesscase laten zien, zijn er wel kansrijke drijfveren die dergelijke systemen toch interessant maken:

- Voor TTES (en andere capex-gedreven systemen) is het gunstig om meerdere cycli per jaar te hebben (en dus niet enkel seizoensopslag). Hiermee kan het systeem kleiner gedimensioneerd worden en gaan er meer GJ'en per jaar doorheen.
- Een TTES kan snel schakelen tussen op- en ontladen met hoog vermogen en heeft de mogelijkheid om op meerdere temperatuurniveaus op te slaan en te leveren uit één installatie.
- Een bovengrondse TTES heeft een redelijk ruimtebeslag (meer dan ATES, maar veel minder dan PTES). Een ondergrondse TTES kan geïntegreerd worden met verdere bebouwing, zonder een grote bovengrondse ruimteclaim.
- De toepassing van TTES als grootschalige seizoensopslag is relatief nieuw en naar verwachting zal de techniek nog een leercurve doorlopen, met daarbij verwachte kostenreducties.

De eerste twee kansen zijn van toepassing bij toekomstige ontwikkelen van 4<sup>e</sup> en 5<sup>e</sup> generatie warmtenetten. TTES lijkt dan ook goede kansen te hebben om binnen dergelijke systemen van nut te zijn.

#### Bedreigingen

Zoals eerder gezegd, is de hoge capex van TTES één van de belangrijkste bedreigingen van de toepassing. De hoge initiële investeringen maken het systeem voor seizoensopslag ongunstig. Daarnaast hebben de ondergrondse TTES aanzienlijke CO<sub>2</sub>-emissies bij de bouw, omdat er veel beton en staal wordt gebruikt.



### 5.3.4 BTES

#### Kansen

Belangrijk voordeel is dat deze systemen een minimaal ruimtebeslag hebben en dat zij eenvoudig schaalbaar (modulair) zijn, ook naar kleinere systemen. Dit laatste is bijvoorbeeld minder goed mogelijk voor ATES en PTES. Daaraan gekoppeld zit dat de kosten voor de kleinere BTES-systemen ook laag liggen.

#### Bedreigingen

Naast de ongunstige businesscases van BTES kent de toepassing nog een aantal bedreigingen:

- Specifieke eisen aan de ondergrond. Net als bij ATES vindt er interactie met het grondwater plaats, dus daarmee moet rekening worden gehouden. Het is niet op voorhand te zeggen dat BTES overal in Nederland mogelijk is.
- De projectervaring met grootschalige BTES-systemen in Nederland is bijna geheel afwezig.
- BTES heeft net als ATES diverse juridische uitdagingen.
- BTES is niet in staat om snel te ontladen, waardoor deze optie minder geschikt is voor pieklevering<sup>33</sup>.
- De BTES kennen hoge thermische verliezen. De combinatie met dure, duurzame warmtebronnen ligt dan ook niet voor de hand.

### 5.4 Conclusies

In de voorgaande paragrafen is dieper ingegaan op financiële prestaties van de opslag-systemen en gekeken welke kansen en bedreiging er zijn. In combinatie valt op dat hoewel twee systemen (ATES en PTES) financieel gunstige resultaten laten zien, zij nog wel diverse bedreigingen kennen als het gaat om het toepassen hiervan. Veel van deze bedreigingen komen terug op specifieke toepassing en locatie van de toepassing.

Het BTES heeft financieel gezien niet de beste kansen en ook het aantal bedreigingen dat dit systeem kent, zijn aanzienlijk. Dit betekent echter niet dat dergelijke systemen niet mogelijk zijn in Nederland, maar vooral dat andere systemen waarschijnlijk de voorkeur genieten.

TTES heeft net als BTES op dit moment geen interessante financiële businesscase, maar heeft wel veel kansen om een centrale rol te spelen in toekomstige ontwikkelingen. Met name de mogelijkheden die dit systeem heeft als onderdeel van 4<sup>e</sup> of 5<sup>e</sup> generatie warmtenetten en daar waar ATES en PTES juridisch of praktisch niet mogelijk blijken, geeft het veel kansen voor de toekomst. Hoewel dit op de korte en middellange termijn nog beperkt in omvang zal zijn, aangezien de ontwikkelen van nieuwe generatie warmtenetten meerdere jaren duurt. Maar in een toekomst waarin veel meer intermitterende energiebronnen ingezet zullen gaan worden, en waarbij de opslagsystemen meer cycli gaan hebben, wordt het grootste nadeel van de hoge capex gereduceerd.

---

<sup>33</sup> Voor het bepalen van de LCOE is er modelmatig vanuit gegaan dat BTES wel wordt ingezet voor de pieklevering.



# 6 Toekomstige marktverwachting

## 6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is getracht om de toekomstige marktomvang van opslagsystemen te bepalen. Het is de eerste keer dat een dergelijke inschatting wordt gemaakt. In dit hoofdstuk is uitgewerkt hoe deze analyse is uitgevoerd en wat daarvan de resultaten zijn. In de komende paragrafen wordt als eerste een totaaloverzicht gegeven van de totale kansen van de opslagsystemen, in relatie tot de algehele warmtevraag van Nederland. Daarna wordt nader ingegaan op de bepalingswijze, de resultaten en kanttekeningen die bij deze analyse benoemd moeten worden.

## 6.2 Opslagsystemen in het Nederlandse warmtesysteem

Het centrale doel van deze studie is het geven van een indicatie van de verwachte marktomvang van grootschalige thermische opslagsystemen. Aan de hand van de voorgaande analyses is bepaald waar op dit moment de beste kansen liggen. Hierbij is het uitgangspunt dat de berekende LCOE wordt gebruikt om te bepalen wat de verwachte marktomvang is.

De Startanalyse<sup>34</sup> van het PBL wordt gebruikt om inzichten te krijgen in de toekomstige ontwikkeling van de warmtetechnieken in de bestaande bouw en dan met name de warmtenet-strategieën waarin een thermische opslag kan toegepast worden. Bij het gebruik van de Startanalyse van het PBL gelden wel de volgende kanttekeningen:

- In de Startanalyse wordt voor alle buurten van Nederland berekend wat de aardgasloze warmtevoorziening is met de laagste nationale kosten. Daar waar een warmtenet (MT of LT) de optie met de laagste kosten is, is in potentie een opslagsysteem zinvol.
- De analyse is uitgevoerd met de bestaande gebouwde omgeving (woningen en utiliteitsbouw). Nieuwbouw is niet meegenomen.
- De analyse is uitgevoerd voor de eindsituatie in 2050 (aardgasloos), maar in de Startanalyse worden de kosten en prijzen van 2030 toegepast.
- De Startanalyse geeft een goede indicatie maar heeft, zoals ieder vereenvoudigend model van de werkelijkheid, zijn gebreken en dient dus niet aangezien te worden als de ultieme waarheid.
- Daarnaast zijn in de Startanalyse vele aannames gedaan, die de uitkomst mede beïnvloeden. De onderstaande analyse is daarmee op een tijdelijke, maar desalniettemin de beste dataset gebaseerd die op dit moment in Nederland aanwezig is.

### Bestaande bouw

In Figuur 8 zijn deze kansen gekoppeld aan het warmtesysteem in Nederland. De figuur geeft de opbouw van het bestaande Nederlandse warmtesysteem weer en is als volgt samengesteld:

- Finaal verbruik voor warmte: jaarlijks bedraagt de warmtevraag van alle sectoren ongeveer 1.000 PJ (CBS, 2019).
- Warmtevraag gebouwde omgeving (huidig): ongeveer 450 PJ van de totale warmtevraag komt voort uit de warmtevraag van bestaande gebouwde omgeving (PBL, 2019). Dit is voor zowel huishoudens als utiliteit (kantoren, scholen, winkels, zorg, etc.).

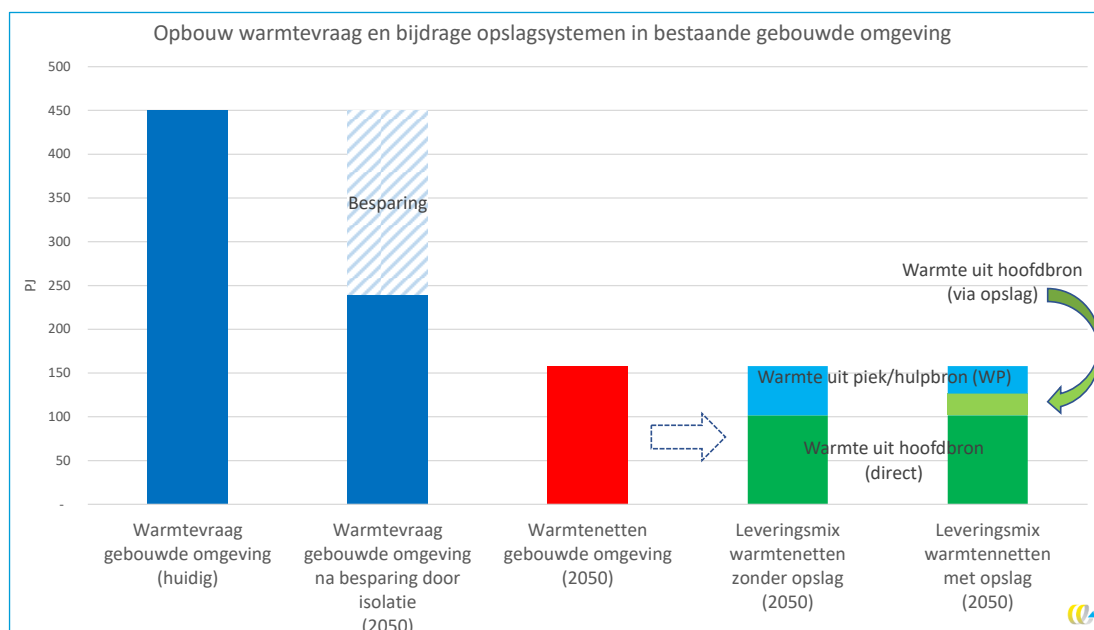
<sup>34</sup> Startanalyse v0.8 uit het jaar 2019.



- Warmtevraag na besparing door isolatie (2050): uit de strategie Laagste Nationale kosten (LN-strategie) van de Startanalyse blijkt dat in 2050 na besparing een warmtevraag van de bestaande gebouwde omgeving van ongeveer 240 PJ resteert.
- Warmtenetten gebouwde omgeving (2050): uit dezelfde LN-strategie blijkt dat bijna 160 PJ van de warmtevraag in 2050 voortkomt uit warmtenetten. Dit betreffen zowel MT-warmtenetten (Strategie S2 uit de Startanalyse) als LT-warmtenetten (Strategie S3 uit de Startanalyse)<sup>35</sup>.
  - Leveringsmix warmtenetten **zonder** opslag: uit de LN-strategie blijkt dat 100 PJ van de warmte in de warmtenetten uit de hoofdbron komt. Het overige deel komt voor de MT-netten uit de piekinstallaties (gemiddeld 20% van de vraag van MT-netten) en bij LT-netten komt dit uit de warmtepompen die worden ingezet voor het opwaarderen van de LT-warmte naar bruikbare warmte (circa 50% van de vraag van LT-netten).
  - Leveringsmix warmtenetten **met** opslag: indien opslagsystemen worden toegevoegd aan de warmtenetten, dan neemt het aandeel van de hoofdbron in de leveringsmix toe met 25 PJ. Dit gaat grotendeels ten koste van de piekketels in de MT-netten en in mindere mate van de warmtepompen bij LT-netten.

Waarvan Warmte uit hoofdbron (via opslag): uit de voorgaande hoofdstukken komt naar voren dat met name ATES en PTES op dit moment door hun gunstige LCOE de beste aansluiting hebben bij de huidige warmtenetten. Deze twee opslagsystemen zijn gekoppeld aan de verwachte warmtenetten. Hierbij heeft ATES in alle gevallen de voorkeur, omdat deze de beste financiële effecten heeft. Echter, voor een ATES is een aquifer noodzakelijk. Indien dit niet kan, dan wordt een PTES toegepast. Daarnaast is aan de hand van de technische analyses bepaald welk deel van de levering van de hoofdbron daadwerkelijk via de opslag verloopt. Om uiteindelijk de 25 PJ warmte uit de opslag te kunnen leveren, moet als gevolg van de opslagverliezen van ATES en PTES ongeveer 40 PJ gedurende de zomerperiode in de opslagsystemen worden geladen.

**Figuur 8 - Opbouw Nederlands warmtesysteem bestaande gebouwde omgeving**



<sup>35</sup> In Bijlage D staat een toelichting op de strategieën uit de Startanalyse.

## Nieuw te bouwen woningen

Figuur 9 geeft een indicatieve opbouw van de verwachte mogelijkheden van opslagsystemen bij nieuw te bouwen woningen in de toekomst. Dit zijn woningen die er nu nog niet zijn, maar in de toekomst worden gebouwd, conform de richtlijnen die vanaf 1 januari 2021 gelden: Bijna Energie Neutraal Gebouw (BENG)<sup>36</sup>. Hierbij zijn de volgende aannames gedaan:

- Het aantal huishoudens neemt tussen nu en 2050 toe met 0,9 miljoen (PBL/CBS, 2019). Er wordt geen rekening gehouden met sloop, want dat wordt in de gegevens van de Startanalyse ook niet gedaan. Daarom wordt aangenomen dat de extra huishoudens gelijk staat aan het aantal nieuwe woningen.
- De nieuwe woningen worden conform de BENG-norm gebouwd. Dat betekent dat zij een gemiddelde vraag van 25 kWh/m<sup>2</sup> hebben. Met een aangenomen gemiddeld woningoppervlak van 100 m<sup>2</sup> betekent dat een vraag van 2.500 kWh, ofwel 9 GJ per woning.
- Hiermee wordt aangenomen dat alle nieuwe woningen tot 2050 een gezamenlijke warmtevraag hebben van 8,1 PJ. En dat deze warmtevraag lage temperatuur is.
- Indicatief wordt aangenomen dat de verdeling tussen collectieve en individuele verwarming gelijk is aan de verhouding tussen de twee LT-strategieën in de Startanalyse (S1 en S3). Dit betekent dat LT-warmtenetten voor nieuwbouw 5,2 PJ leveren.
- De verwachting is dat deze netten met LT-opslagsystemen worden uitgerust, waarbij toepassing van ATES en TTES<sup>37</sup> het meest voor de hand liggen voor de Nederlandse situatie<sup>38</sup>. Een exacte verhouding tussen deze twee is niet op voorhand vast te stellen. Met name LT-warmtebronnen, zoals zon- en aquathermische bronnen zijn interessant voor dit segment.
- Aangenomen wordt dat, net als bij de LT-strategieën voor bestaande bouw, 50% van de warmte wordt geleverd door de hoofdbron (bijvoorbeeld LT-restwarmte, zonnewarmte of aquathermie) en 50% door een warmtepomp die de warmte nuttig bruikbaar maakt. Daarnaast wordt pragmatisch aangenomen dat alle warmte die gebruikt wordt van de hoofdbron via het opslagsysteem loopt<sup>39</sup>.
- Dit betekent dat van de 5,2 PJ aan warmtevraag 2,6 PJ in 2050 via een opslagsysteem als ATES en TTES loopt. In principe is het niet bekend wat de verhouding tussen beide opslagsystemen zullen gaan zijn, maar als wordt aangenomen dat zij ieder de helft van de warmtevraag uit opslag, dan is voor het nuttig toepassen van 2,6 PJ warmte een opslagcapaciteit nodig van 3,6 PJ.
- Deze analyse is exclusief utiliteitsbouw. Daarvoor bestaan geen integrale prognoses.

<sup>36</sup> Dit in tegenstelling tot de eerder geanalyseerde 'nieuwbouwwoningen', waarbij het gaat om recente, goedgeïsoleerde nieuwbouwwoningen gebouwd vanaf circa 2005.

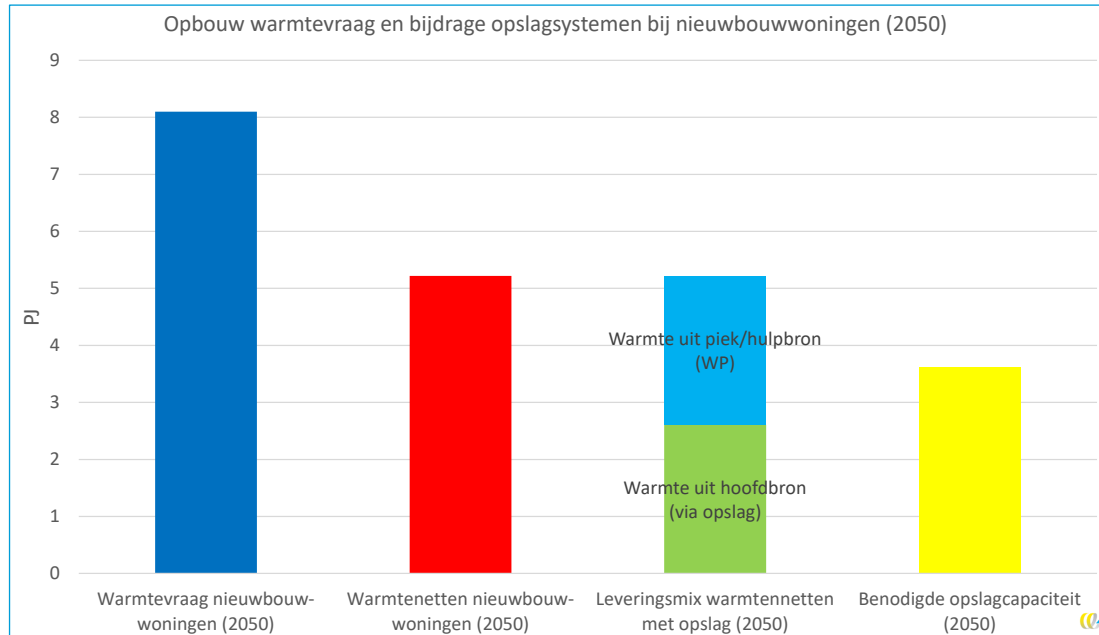
<sup>37</sup> Hoewel TTES op dit moment voor de bestaande bouw geen positieve uitkomst heeft met de LCOE, wordt hierbij aangenomen dat in het geval van toekomstige nieuwbouw de toepassing relatief gezien gunstiger uitkomt, omdat het enerzijds integraal (als onderdeel van het ontwerp van de warmte/koudevoorziening) meegenomen wordt in de energievoorziening en anderzijds optimaal gebruik kan maken van de 'stuurbaarheid' van de thermische stromen, voor zowel warmte als koude. Met name dit laatste, in combinatie dat meerdere cycli per jaar mogelijk zijn, heeft bij nieuwbouw een aanzienlijke financiële waarde. Dit is echter niet meegenomen in de huidige bepaling van de LCOE.

<sup>38</sup> PTES is vooral geschikt voor MT/HT-situaties; BTES is vooral geschikt voor ZLT-situaties.

<sup>39</sup> In de praktijk zal ook een deel van de geproduceerde warmte uit LT-restwarmte, zon- of aquathermie rechtstreeks ingezet kunnen worden, maar dit is slechts een beperkt deel en op dit moment niet in te schatten hoe beperkt.



Figuur 9 - Opbouw Nederlands warmtesysteem bij nieuwbouwwoningen (2050)



### Van 2050 naar 2035

De voorgaande benaderingen van de potentiële marktomvang is gebaseerd op aantallen voor 2050. Voor deze studie zijn we op zoek naar waarden voor 2035. Om deze te bepalen zijn de volgende stappen ondernomen:

- Bestaande bouw: in de periode 2020 tot 2050 wordt een lineaire jaarlijkse groei van de opslagcapaciteit verondersteld, waarmee de opgestelde capaciteit exponentieel groeit. Hiermee komt de opslagcapaciteit in 2035 op 10,3 PJ uit, waarmee 6,4 PJ aan warmte uit de hoofdbron via de opslag wordt geleverd.
- Nieuwbouw: in 2050 zijn er volgens de prognoses van PBL/CBS 0,9 miljoen nieuwe woningen. In 2035 is dat volgens dezelfde prognoses 0,7 miljoen. De potentiële capaciteit wordt naar rato van die verhouding verrekend. Dit betekent dat er voor nieuwbouw een opslagcapaciteit van 2,8 PJ wordt geraamd in 2035. Hieruit wordt 2,0 PJ geleverd aan de nieuwbouwwoningen.

Een verdere uitwerking van de potentieelbepaling is terug te vinden in Bijlage D.

### 6.3 Marktverwachtingen

In volgende alinea's worden de gedetailleerde uitkomsten van de voorgaande analyse weergegeven. De gepresenteerde getallen gelden voor het eindbeeld in 2050. In Bijlage D staat een verder toelichting op de analyse.

### 6.3.1 Detailoverzicht marktverwachtingen bestaande bouw

Tabel 18 geeft weer hoeveel WEQ conform de Startanalyse aangesloten kan worden per warmtebron en per opslagtype (op basis van de gehanteerde methodiek). Hiermee zou ongeveer 35% van alle WEQ in Nederland voorzien kunnen worden van warmte uit een warmtenet in combinatie met een grootschalig, collectief opslagsysteem.

Tabel 18 - Overzicht aantal WEQ dat aangesloten kan worden met een opslagsysteem

Woningequivalenten	ATES	PTES
Geothermie	470.000	197.000
Restwarmte MT/HT - strategie	1.445.000	374.000
Restwarmte MT/HT - bestaand net	307.000	13.000
LT-bron	513.000	8.000
Aquathermie	93.000	0
Wko	420.000	0
<b>Totaal</b>	<b>3.248.000</b>	<b>592.000</b>

Tabel 19 geeft weer hoeveel energieopslag er jaarlijks plaatsvindt in de opslagsystemen. De totale warmtevraag van de betreffende WEQ bedraagt ongeveer 160 PJ, waarvan 100 PJ rechtstreeks uit de hoofdbron komt. Door toevoeging van de opslagsystemen kan een aanvullende 25 PJ uit de hoofdbron aan de eindgebruikers worden geleverd. Dit komt overeen met 16% van de totale warmtevraag.

Tabel 19 - Overzicht aantal PJ dat voorzien kan worden met een opslagsysteem (bij bestaande bouw)

Opslagcapaciteit [PJ]	Laadcapaciteit		Ontlaadcapaciteit	
	ATES	PTES	ATES	PTES
<b>Warmtebron</b>				
Geothermie	2,2	1,0	1,6	1,0
Restwarmte MT/HT - strategie	13,7	3,4	8,5	2,8
Restwarmte MT/HT - bestaand net	2,6	0,1	1,6	0,1
LT-bron	4,4	0,1	3,0	0,1
Aquathermie	2,1	0,0	1,0	-
Wko	10,4	0,0	5,2	-
<b>Totaal</b>	<b>35,3</b>	<b>4,6</b>	<b>20,9</b>	<b>3,9</b>

Tabel 20 geeft weer wat de verwachte omvang is van de investeringen (voor laadcapaciteit) in alleen de opslagsystemen, die gedaan moeten worden om de voorgaande aantallen mogelijk te maken.

Tabel 20 - Overzicht verwachte omvang cumulatieve investeringen in opslagsystemen (in miljoenen euro's; bij bestaande bouw)

Opslagkosten investering [M€]	ATES	PTES	ATES	PTES
<b>Warmtebron</b>	<b>2050</b>		<b>2035</b>	
Geothermie	€ 248	€ 112	€ 64	€ 29
Restwarmte MT/HT - strategie	€ 762	€ 375	€ 197	€ 97
Restwarmte MT/HT - bestaand net	€ 162	€ 12	€ 42	€ 3
LT-bron	€ 271	€ 7	€ 70	€ 2
Aquathermie	€ 50	€ 0	€ 13	€ 0
Wko	€ 221	€ 0	€ 57	€ 0
<b>Totaal</b>	<b>€ 1.713</b>	<b>€ 506</b>	<b>€ 442</b>	<b>€ 131</b>

### Indicatieve verwachtingen nieuw te bouwen woningen

Naar verwachting is er in 2035 en 2050 respectievelijk ongeveer 2,8 PJ en 3,6 PJ aan opslagcapaciteit nodig bij nog nieuw te bouwen woningen. Om een indicatie te geven van de te verwachten investeringen die hierbij gemoeid gaan, wordt aangenomen dat deze opslag voor de helft bestaat uit ATES en voor de andere helft uit TTES<sup>40</sup>. In de onderstaande tabel staan de resulterende jaarlijkse investeringen en cumulatieve investeringen voor de periode tot 2050.

Tabel 21 - Indicatief overzicht van de verwachte investeringen bij nieuw te bouwen woningen

Jaarlijkse investeringen		Cumulatieve investeringen	
2025-2035	2035-2050	2035	2050
€ 75-125 mln	€ 15-25 mln	€ 0,5-1,5 mld	€ 1-2 mld

### 6.3.2 Aanvullende marktverwachtingen

Aanvullend op de voorgaande marktverwachtingen zijn er nog diverse andere opties die gebruik kunnen maken van collectieve opslagsystemen. Deze warmte-opties zijn echter (nog) niet doorgerekend in een Startanalyse. Het is daarom niet mogelijk om deze opties te kwantificeren in een technisch-economische analyse, zoals bij de voorgaande opties wel mogelijk is. Het is op voorhand dan ook niet aan te geven of de onderstaande opties leiden tot aanvullende vraag naar collectieve opslagsystemen of dat er substitutie plaatsvindt met de eerdergenoemde warmteopties. De opties leiden in ieder geval niet tot een verlaging van de verwachte marktvraag.

#### Zonthermie

Om zonnwarmte efficiënt in te zetten in de winter, wanneer het meeste warmte nodig is, is een opslagsysteem noodzakelijk. Een warmtenet dat opereert op basis van zonthermie heeft minimaal dezelfde opslagvraag als de voorgaande warmte-opties en afhankelijk van de uitvoering en de afgiftetemperatuur kan de gevraagde opslagcapaciteit nog toenemen<sup>41</sup>. In potentie kan de grootschalige ontwikkeling van warmtenetten op basis van zonthermie dus een aanzienlijke invloed hebben op de te verwachten marktomvang van opslagsystemen.

Voorlopige cijfers van het CBS spreken voor 2019 over 1,18 PJ zonwarmte productie. Hiervan wordt 0,28 PJ door systemen met een oppervlakte groter dan 6 m<sup>2</sup> geproduceerd. Deze systemen worden voornamelijk ingezet voor zwembaden, kantoren of voor groepen woningen. De overige zonthermiesystemen, de grote meerderheid, worden momenteel individueel bij de woning op het dak geplaatst (zonneboiler).

Er zijn drie stadsverwarmingsprojecten op basis van zonthermie in Nederland gerealiseerd op grotere schaal. Deze zijn goed voor een productie van 7,5 MW<sub>th</sub> met een productie van circa 0,02 PJ.

<sup>40</sup> Voor ATES wordt aangenomen dat de investering per woning ongeveer €500 is en voor TTES ongeveer €4.000. Dat zijn bedragen zonder rekening te houden met eventuele verandering in schaalgrootte en innovatie.

<sup>41</sup> In het geval dat er warmte wordt geleverd zonder tussenkomst van een warmtepomp, dan dient 100% gevraagde warmte uit het opslagsysteem te komen.



Tabel 22 - Overzicht bestaande, grootschalige zonthermische systemen

Locatie	Start levering	Eigenaar	Stad	Collector-oppervlak (m <sup>2</sup> )	Capaciteit (kW <sub>th</sub> )
Almere	2010	Vattenfal	Almere	7.000	4.900
Breda	1997	Van Melle	Breda	2.400	1.680
Lisse	1995	Dames&Werkhoven	Lisse	1.200	840

Bron: [Solar District Heating: Plant database : Ranking List of European Large Scale Solar Heating Plants](#)

De huidige stadverwarmingsmarkt met zonthermie is erg klein. In een potentieelstudie die is uitgevoerd door Berenschot, wordt het potentieel van zonthermie geschat op 39 PJ in 2030 en 94 PJ in 2050 (het 'warmtescenario': Beelden van een op warmte gerichte energievoorziening in 2030 en 2050). Deze cijfers omvatten zowel kleinschalige decentrale productie als centrale productie, en zowel systemen die zonthermie inzetten voor seizoensverwarming als dagelijkse warmwaterlevering. De verhouding tussen deze toepassingen is niet toegelicht in de potentieelstudie van Berenschot.

De voornaamste elementen die de groei van stadsverwarming met zonthermie belemmeren zijn de hoge productiekosten van zonwarmte (LCOE van 12 €/GJ (Groot, 2020)<sup>42</sup>) ten opzichte van andere warmtebronnen, concurrentie in ruimtegebruik met pv-installaties, concurrentie met de andere warmtetechnieken in het algemeen en zoals reeds is aangegeven is ook de noodzaak voor een omvangrijk opslagsysteem om ook warmte te voorzien in de winter. Zolang deze elementen gelden is het economisch potentieel voor collectieve zonthermieopslag beperkt.

## Lagetemperatuuraardwarmte en Mijnwater

In 2018 hebben CE Delft en IF Technology in opdracht van RVO en de TKI Urban Energy een eerste analyse gemaakt van de mogelijkheden van lagetemperatuuraardwarmte (LTA) en het Mijnwater-concept (lagetemperatuuruitwisselingsysteem met buffering) (CE Delft, IF Technology, 2018). Van ieder van deze concepten bestaat er één in Nederland en beide concepten zijn zéér geschikt voor de inzet van collectieve thermische opslagsystemen. In de studie is een potentieelstudie uitgevoerd naar de technische mogelijkheden van deze twee concepten. Beide opties kunnen zowel afzonderlijk als gezamenlijk toegepast worden. Indien beide concepten worden gecombineerd, dan is het technisch potentieel circa 227 PJ per jaar.

Het Mijnwater-concept in combinatie met LTA is een goed voorbeeld van een 4<sup>e</sup> generatie warmtenet. Het gebruik van ATES en TTES is hier integraal onderdeel van. In de studie is echter niet gekeken welke omvang deze opslagsystemen hebben.

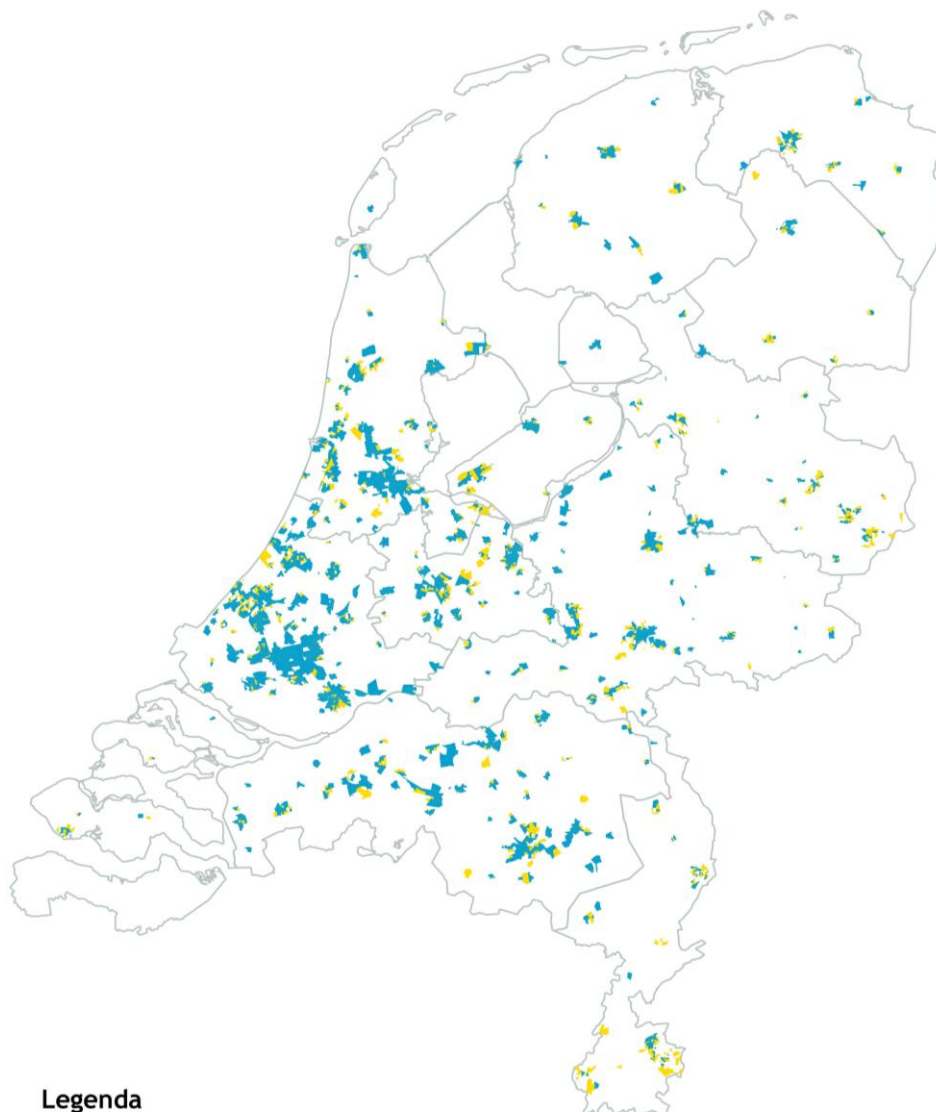
*In de studie naar LTA en Mijnwater zijn andere aannames gebruikt voor energiebesparing dan in de Startanalyse zijn gebruikt. In absolute zin, zijn de potentiëlen dan ook niet met elkaar te vergelijken. De essentie is met name dat LTA en Mijnwater, waarbij integraal gebruik wordt gemaakt van thermische opslag, een groot potentieel hebben voor de stedelijke omgeving van Nederland.*

De volgende kaart (Figuur 10) geeft de geografische mogelijkheden van de LTA en het Mijnwater-concept weer.

<sup>42</sup> Dit is exclusief eventuele subsidies.



Figuur 10 - Kaart van Nederland met buurten die potentieel bieden voor een Mijwater-concept in combinatie met LTA, huidige situatie



#### Legenda

Buurten met potentieel voor Mijwaterconcept i.c.m. LTA, volgend uit:

- ondergrensanalyse
- bovengrensanalyse (aanvullend op ondergrensanalyse)



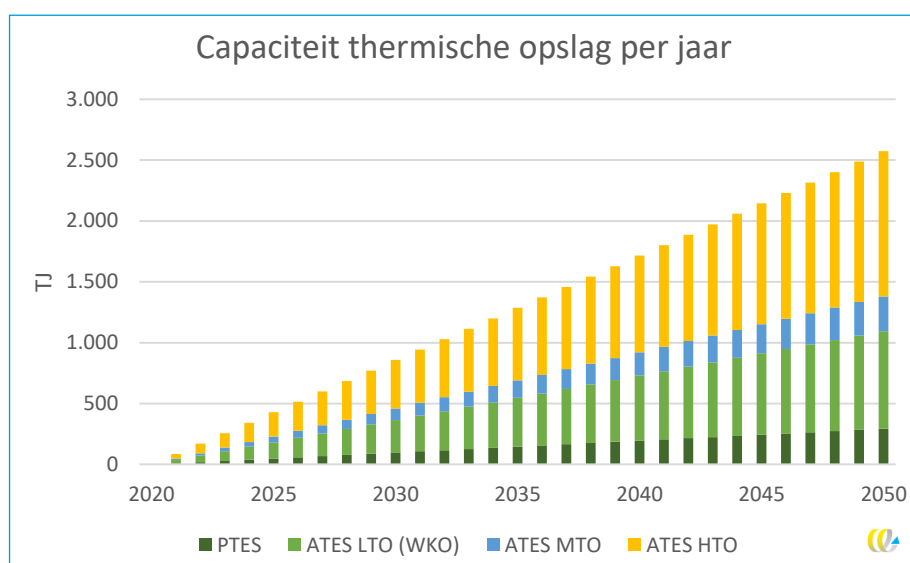
Bron: (CE Delft, IF Technology, 2018).

### 6.3.3 Ontwikkelpad opslagsystemen in bestaande bouw

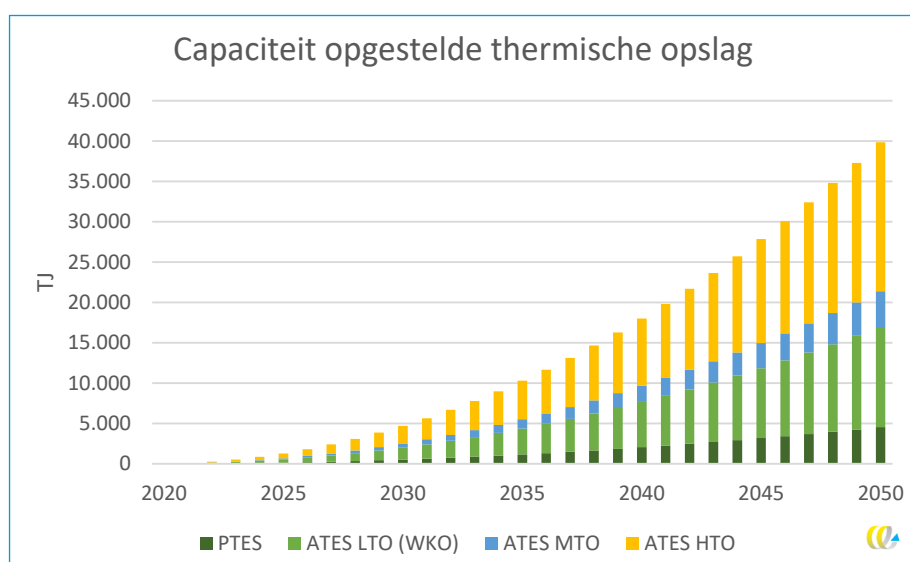
De Startanalyse laat een eindbeeld zien van een aardgasvrije gebouwde omgeving in Nederland (op basis van de bestaande bouw). Dit eindbeeld moet in 2050 bereikt worden. Het aantal WEQ uit Paragraaf 6.3.1 is dus het aantal WEQ dat in de komende 30 jaar de transitie moet maken van aardgas naar een collectief warmtesysteem. Om een indicatief beeld te geven van de mogelijke marktomvang van de opslagcapaciteit, is gekeken hoe deze zich ontwikkelt bij een lineair groeipad (Figuur 11). In Figuur 12 wordt de cumulatieve opslagcapaciteit weergegeven over de jaren.

In Figuren 13 en 14 zijn respectievelijk de jaarlijkse investeringen en de cumulatieve investeringen weergegeven van de opslagsystemen tot 2035. Dit betreffen enkel de investeringen in de opslag zelf en niet de reductie van de investeringen in andere componenten van de warmtevoorziening als gevolg van het opslagsysteem (o.a. kleinere piekketel)<sup>43</sup>. In 2035 lopen de jaarlijkse investeringen in de richting van € 70 miljoen. In 2050 zullen die opgelopen zijn tot € 140 miljoen per jaar. Cumulatief bedragen de investeringen in 2050 bijna € 2,2 miljard. Per woningequivalent betekent dat een investering van ongeveer € 575.

Figuur 11 - Overzicht verloop capaciteit thermische opslag (jaarlijkse toevoeging)

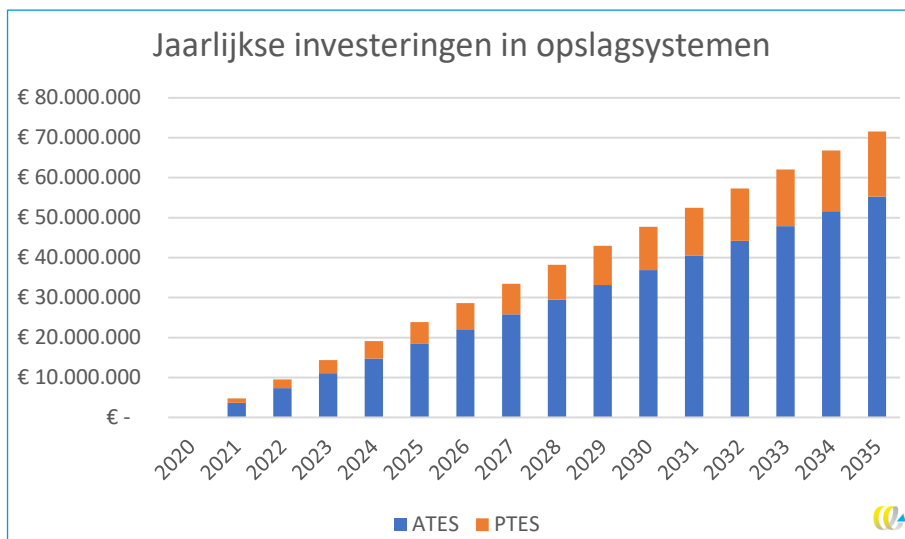


Figuur 12 - Overzicht verloop capaciteit thermische opslag (cumulatief)

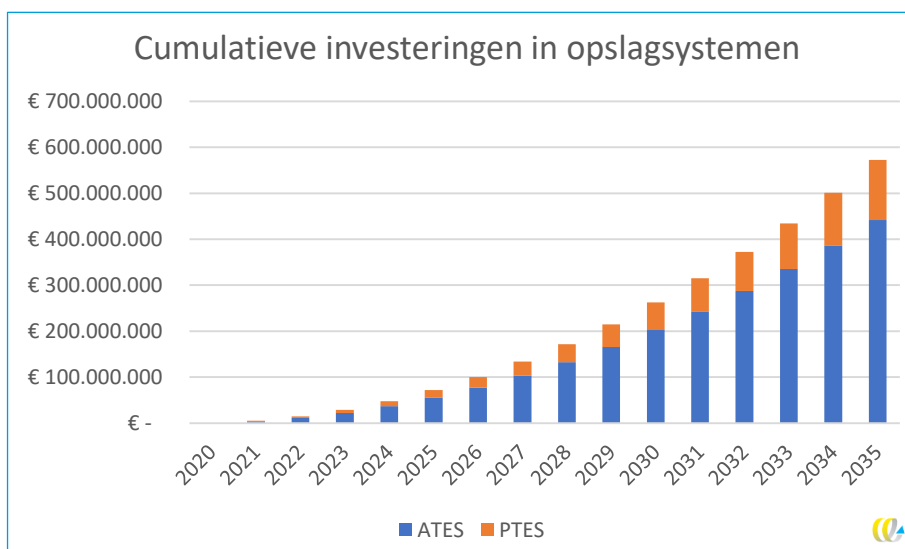


<sup>43</sup> Hierbij is gebruik gemaakt van de gemiddelde investeringen per WEQ die voortkomen uit de businesscases. Voor ATES is dat circa € 525 per WEQ en voor PTES € 850.

**Figuur 13 - Overzicht verloop jaarlijkse investeringen in opslagsystemen**



**Figuur 14 - Overzicht verloop cumulatieve investeringen in opslagsystemen**



### 6.3.4 Onzekerheden in analyses

De voorgaande analyses zijn gebaseerd op een zeer groot aantal aannames en verwachtingen. Niet alleen in deze studie, maar ook in de gebruikte prognoses die daar aan ten grondslag liggen, zoals de Startanalyse van het PBL. Dit betekent dat, ondanks de intentie om zo zorgvuldig mogelijk te zijn, de uitkomsten van deze analyse een grote gevoeligheid kennen. Gezien het grote aantal gebruikte parameters en aannames, voegt een kwantitatieve gevoeligheidsanalyse niet heel veel toe aan het inzicht. Kwalitatief kan echter wel een aantal punten aangegeven worden die als zogenaamde ‘game changers’ de toekomstige uitkomsten van de analyses (zeer) sterk kunnen beïnvloeden. Dit zijn onder andere:

- Ontwikkeling van nieuwe warmtebronnen en nieuwe netten: de huidige analyse gaat uit van bestaande systemen (2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> generatie warmtenetten), maar opslagsystemen bieden met name meerwaarde bij de volgende generatie warmtenetten. Deze staan echter nog in de kinderschoenen. Indien deze nieuwe generatie warmtenetten, in combinatie met nieuwe warmtebronnen, zoals zon- en aquathermie, de komende jaren op grote schaal ontwikkeld worden, dan verandert het potentieel van opslagsystemen ook sterk.
- Effecten mogelijke kostendalingen: in de businesscases is uitgegaan van de huidige kostenniveaus van de verschillende opslagsystemen. Omdat velen echter op dit moment nog aan het begin van de ontwikkeling staan en nog maar beperkt zijn toegepast, kan het zijn dat de toekomst nog kostendalingen met zich meebrengt. Deze lagere kosten kunnen ertoe leiden dat meer types, bij meer varianten, bij meer verschillende toepassingen een gunstige businesscase hebben. Hiermee verbeteren de proposities van de opslagsystemen en kan ook het potentieel worden beïnvloed.
- Beschikbaarheid hernieuwbaar gas: voor de analyse van het marktpotentieel is gebruik gemaakt van de Startanalyse. Hierin is een beperkte hoeveelheid groengas verondersteld voor de warmtevoorziening van de gebouwde omgeving. Aangezien een duurzame gasvormige energiedrager in bijna alle gevallen de laagste kosten met zich meebrengt, beïnvloedt de beschikbaarheid hiervan zeer sterk de uitkomsten van de Startanalyse. In de volgende versie van de Startanalyse (verwacht in augustus 2020) wordt een analyse uitgevoerd met aanzienlijk grotere hoeveelheden hernieuwbaar gas. De verwachting is dat de uitkomsten van de LN-strategie van de Startanalyse dan tot significant andere resultaten leidt. Daarmee zou ook het potentieel van grootschalige thermische opslagsystemen sterk worden beïnvloed.
- Arbeidspotentieel: de warmtetransitie vraagt zéér veel arbeid. Het aanpassen van meer dan 8 miljoen gebouwen, infrastructuur en energiebronnen is een zeer omvangrijke klus. Naast het bouwen van nieuwe woningen. Op dit moment vertoont de arbeidsmarkt voor de bouw- en installatiesector al veel krapte en dat zal naar verwachting alleen nog maar erger worden met de aanstaande vergrijzing. En dat terwijl de omvang van het werk alleen maar toeneemt. Er zijn op dit vlak nog maar weinig analyses beschikbaar, maar de verwachting is dat arbeidsintensieve oplossingsrichtingen in de warmtetransitie mogelijk zéér uitdagend, tot niet uitvoerbaar gaan blijken. Welke effecten dit op de opslagsystemen gaat hebben, is nog niet bekend.

## 6.4 Concurrerende technieken

In de voorgaande hoofdstukken is als gevolg van het onderwerp van de studie veel aandacht uitgegaan naar de toekomstige collectieve warmtevoorzieningen. Het is echter nog niet zeker in welke mate deze systemen in Nederland in de komende decennia uitgerold worden. Of dat zij er helemaal niet op grote schaal gaan komen. Op dit moment worden diverse analyses en onderzoeken uitgevoerd naar alle mogelijkheden en toekomstscenario's voor de warmtetransitie. In deze onderzoeken worden naast de collectieve systemen ook de

individuele systemen meegenomen. Tussen deze twee 'stromingen' bestaat concurrentie om invulling te geven aan de warmtevraag van de gebouwde omgeving. En hoewel voor sommige gebieden bepaalde oplossingen heel erg voor de hand liggen, is dat in grote delen van het land niet zo. En is de race nog lang niet gelopen, als het gaat om de toekomst-techniek. In de Startanalyse van het PBL worden de concurrerende technieken op een technisch-economische wijze afgewogen ten opzichte van de collectieve technieken. Een overzicht van deze concurrerende, individuele technieken is terug te vinden in de bijlagen.



# Referenties

- CBS, 2019. *Warmtemonitor 2017*, Den Haag: CBS.
- CE Delft, IF Technology, 2018. *Weg van gas*, Delft: CE Delft.
- Ecovat, 2020. *Ecovat- productinformatie (brochure)*, Veghel: Ecovat Werk B.V..
- Groot, D., 2020. *Comparison of Ecovat to large, seasonal, sensible, thermal energy storage technologies for district heating networks*, Veghel: Ecovat.
- Hellebrand, K., Post, R. J. & Groen, B. i. ', 2012. *Kansen voor Ondiepe Geothermie voor de glastuinbouw*, Arnhem: KEMA.
- IEA-ECES, 2018. *Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition - Benchmarks and Developments*, sl: IEA-ECES.
- IEA-ETSAP ; IRENA, 2013. *Thermal Energy Storage : Technology Brief* , sl: IEA-ETSAP ; IRENA.
- IF Technology, 2014. *Thermisch rendement hoge & middelhoge temperatuur warmteopslag in de bodem : Belangrijkste leermomenten voor toekomstige tuinbouwprojecten*, Arnhem: IF Technology.
- IF Technology, 2019. *Hoge Temperatuur Opslag (HTO)*. sl, Kennissessie HTO Greenport West-Holland.
- Kallesøe, A. & V.-P. T. (., 2019. *Underground Thermal Energy Storage (UTES) - state-of-the-art, example cases and lessons learned*, sl: HEATSTORE project report.
- Kallesøe, A., Vangkilde-Pedersen, T. & (eds.), 2019. *Underground Thermal Energy Storage (UTES) - state-of-the-art, example cases and lessons learned.*, sl: HEATSTORE.
- Lanahan, M. & Tabares-Velasco, P., 2017. Seasonal Thermal-Energy Storage: A Critical Review on BTES Systems, Modeling, and System Design for Higher System Efficiency. *Energies*, 10(6), p. article 743.
- NEA, 2020. *Publicatie standaard emissiefactor aardgas 2020*. [Online]  
Available at: <https://www.emissieautoriteit.nl/documenten/publicatie/2020/04/22/standaard-emissiefactor-2020>  
[Geopend mei 2020].
- Nielsen, J., Vangkilde-Pedersen, T. & (eds.), 2019. *HEATSTORE: D1.2 Underground Thermal Energy Storage (UTES) - general specifications and design*, sl: sn
- PBL/CBS, 2019. *PBL/CBS Regionale bevolkings- en huishoudensprognose 2019-2050*, Den Haag: CBS.
- PBL, 2019. *Startanalyse Leidraad Transitievisie Warmte*. [Online]  
Available at: <https://themasites.pbl.nl/leidraad-warmte/2019/index.php>  
[Geopend april 2020].
- RVO, 2020. *Warmtevoorziening Gebouwde Omgeving*. [Online]  
Available at: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/verduurzaming-warmtevoorziening/duurzame-warmtevoorziening/warmtevoorziening-gebouwde>  
[Geopend april 2020].
- TKI Urban Energy, 2020. *Kennisdossiers : Warmtenetten*. [Online]  
Available at: <https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmtenetten>  
[Geopend 2020].
- TNO, 2013. *HTO - Hoge temperatuur opslag in de ondiepe ondergrond*, Utrecht: TNO.
- Wesselink, M., 2016. *Prospects for HT ATEs in the Dutch energy system : Potentials, applications and business cases of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage*, Utrecht: Utrecht University ; TNO.



Wikipedia, 2018. *File:Generations of district heating systems EN.svg*. [Online]  
Available at:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Generations\\_of\\_district\\_heating\\_systems\\_EN.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Generations_of_district_heating_systems_EN.svg)  
[Geopend april 2020].



# A Longlist

Techniek	Uitleg	Toepassing	Temperaturniveau	Vermogenslevering (dimensioneerbaar op de vraag)	Cyclus frequentie	Efficiëntie	Type warmte	TRL	Ruimtegebruik
ATES: wko	Warmte opslaan in de aquifer op lage temperatuur.	District heating	0-25 °C	Zeer geschikt voor relatief grote vermogens, gemiddeld 150 kW per systeem.	1-2/jaar		Voelbare warmte	Commercieel	Zeer beperkt ruimtegebruik: voornamelijk twee boorgaten.
ATES: MTO	Warmte opslaan in de aquifer op middelhoge temperatuur.	District heating	25-50 °C		1-2/jaar		Voelbare warmte		Zeer beperkt ruimtegebruik: voornamelijk twee boorgaten.
ATES: MTO voorbeeld NIOO Coppert Cress	Warmte opslaan in de aquifer op middelhoge temperatuur. Praktijkvoorbeeld.	District heating	Regime 26-45 °C		1-2/jaar		Voelbare warmte		Zeer beperkt ruimtegebruik: voornamelijk twee boorgaten.
ATES: HTO	Warmte opslaan in de aquifer op hoge temperatuur.	District heating	50-90 °C		1-2/jaar		Voelbare warmte		Zeer beperkt ruimtegebruik: voornamelijk twee boorgaten.
Mijnwater	Warmte opslaan in volgelopen mijnen op middelhoge temperatuur.	District heating	25-50 °C		1-2/jaar		Voelbare warmte		Reeds bestaande ondergrondse mijnen benutten.
Geothermieopslag	Warmte opslaan in de ondiepe middelhoge temperatuur geothermieputten.	District heating	25-50 °C		1-2/jaar		Voelbare warmte		Reeds bestaande boorgaten geothermie benutten.



Techniek	Uitleg	Toepassing	Temperatuurniveau	Vermogenslevering (dimensioneerbaar op de vraag)	Cyclus frequentie	Efficiëntie	Type warmte	TRL	Ruimtegebruik
<b>TTES tank thermal energy storage: Algemeen</b>	Warmte opslaan in een afgesloten vat.	District heating	0-90 °C	Dimensioneerbaar naar wens	1-2/jaar		Voelbare warmte		Grote opslagtank (Mogelijk ondergronds d.m.v. omvangrijke graafwerken).
<b>TTES: Bufferopslag niet onder druk</b>	Opslagvat waarin water tot net onder kookpunt (100 °C) wordt opgeslagen.	District heating	60-98 °C	Dimensioneerbaar naar wens	1/dag tot 1/week	99%	Voelbare warmte	8-9	Grote opslagtank (Mogelijk ondergronds d.m.v. omvangrijke graafwerken)
<b>TTES: Bufferopslag onder druk</b>	Opslagvat waarin water onder hogere druk tot boven zijn atmosferisch kookpunt van 100 °C kan worden opgeslagen.	District heating	60-180 °C	Dimensioneerbaar naar wens	1/dag tot 1/week	99%	Voelbare warmte	8-9	Grote opslagtank (Mogelijk ondergronds d.m.v. omvangrijke graafwerken)
<b>TTES: Vlakke bodem bufferopslag met drijvend dak</b>	Opslagtanks met een platte bodem combineren een groot volume met een relatief lage kost. Maar tot op heden zorgt de niet gevulde ruimte aan de top van de tank voor hogere verliezen en minder goed werkingsregime van het opslagsysteem. Een nieuw ontwerp met een drijvend geïsoleerd plafond verhelpt deze problemen. Een demo project is gebouwd als onderdeel van het OBSERW-project.	District heating	< 98 °C	56 kW	1/dag	99%	Voelbare warmte	4-6	Grote opslagtank (Mogelijk ondergronds d.m.v. omvangrijke graafwerken)

Techniek	Uitleg	Toepassing	Temperatuurniveau	Vermogenslevering (dimensioneerbaar op de vraag)	Cyclus frequentie	Efficiëntie	Type warmte	TRL	Ruimtegebruik
<b>TTES: Seizoensopslag</b>	Goed geïsoleerd opslagvat waarin warmte lange tijden (zomer tot winter overgang) wordt bewaard. De beschikbare capaciteit wordt het beste benut bij zo hoog mogelijke opslagtemperatuur.	District heating	15-90 °C	Dimensioneerbaar naar wens	1-2/jaar	81%	Voelbare warmte	7-8	Grote opslagtank (mogelijk ondergronds d.m.v. omvangrijke graafwerken).
<b>TTES: voorbeeld Ecovat</b>	Een goed geïsoleerd, ondergronds, betonnen vat met een gegarandeerde levensduur van 50 jaar. Kan functioneren als een bufferopslag en een seizoensopslag naargelang de toepassing.	District heating	5-95 °C	Dimensioneerbaar naar wens	1/dag tot 1/jaar	86-92% in 12 maanden	Voelbare warmte	Ontworpen en pilot reeds in bedrijf.	Grote opslagtank (ondergronds d.m.v. omvangrijke graafwerken).
<b>TTES: voorbeeld Thermoskan Diemen</b>	Een watertoren van 50 m hoog en 26 m doorsnee, goed voor de opslag van 22 miljoen liter water. Een staalwand van 37 mm met daaromheen een isolatieschil van 50 cm dik zorgt voor een zeer beperkt warmteverlies.	District heating	125 °C		1/dag tot 1/week		Voelbare warmte	Commercieel	Grote opslagtank (bovengronds).
<b>TTES: Buffervat op pandniveau</b>	Vooral gebruikt om piekvraag op te vangen en ervoor te zorgen dat individuele warmtetechnieken zoals een pelletketel minder af en aan geschakeld moeten worden	Building level	15-90 °C	Dimensioneerbaar naar wens	1/dag		Voelbare warmte		Opslagvat (in de woning).

Techniek	Uitleg	Toepassing	Temperatuurniveau	Vermogenslevering (dimensioneerbaar op de vraag)	Cyclus frequentie	Efficiëntie	Type warmte	TRL	Ruimtegebruik
	en dus vaker in basislast kunnen werken.								
<b>PTES: Algemeen pit thermal energy storage</b>	Put in de grond gevuld met water en met isolatie afgedekt. Omwille van zijn lage prijs per hoeveelheid opgeslagen warmte voornamelijk toegepast als seizoensopslag.	District heating	10-90 °C	Dimensioneerbaar naar wens	1-2/jaar	< 81%	Voelbare warmte	9	Grote put eventueel afgedekt met een laag grond zodat het oppervlak bruikbaar is als open ruimte.
<b>PTES (pit thermal energy storage): Vojens</b>	Werelds grootste thermische put.	District heating	0-9 °C	50 m <sup>3</sup> /h			Voelbare warmte		Grote put eventueel afgedekt met een laag grond zodat het oppervlak bruikbaar is als open ruimte.
<b>PTES (pit thermal energy storage): HoCoSto</b>	Simpele pit storage constructie voor het bufferen van seizoenswarmte. Voornamelijk toegepast op kleine schaal (één gebouw of groepje gebouwen) Mogelijkheid tot verder uitbreiding.	District heating	0-90 °C				Voelbare warmte		Grote put eventueel afgedekt met een laag grond zodat het oppervlak bruikbaar is als open ruimte.
<b>BTES (borehole thermal energy storage)</b>	Gesloten systeem waarbij warmte in bodem wordt opgeslagen. Via leidingen in de bodem wordt warmte afgegeven aan de bodemlagen en zo opgeslagen.	District heating	0-90 °C				Voelbare warmte		Beperkt ruimtegebruik naarmate de opslag grootte stijgt meer boorgaten.

Techniek	Uitleg	Toepassing	Temperatuurniveau	Vermogenslevering (dimensioneerbaar op de vraag)	Cyclus frequentie	Efficiëntie	Type warmte	TRL	Ruimtegebruik
<b>BTES: voorbeeld bodemlus monobron</b>	BTES op kleine schaal voor een enkele woning of gebouw vaak een verticale leiding van 100-150 m. Het opslagsysteem in combinatie met een warmtepomp wordt een bodemwarmtepomp genoemd.	Building level					Voelbare warmte		Beperkt ruimtegebruik (wel ruimte nodig voor boorwerken).
<b>Lage temperatuur PCM zouthydraten of parafines</b>	Phase change materials (PCM) slaan latente warmte tijdens hun faseverandering voornamelijk voor kortstondig gebruik voor peak shaving van de warmte/koudevraag. Reeds veelvuldig toegepast in koeling (ijskristallen), momenteel in ontwikkeling om ook warmtevraag te voldoen. Toepassing voornamelijk in gebouwen.	Building level	20-80 °C	62 kW	1/dag	95%	Latente warmte	4-5	Bij verdere ontwikkeling van opslag technieken zoals PCM, TCM en CLC kunnen die ook dienen en worden toegepast voor grootschalige seizoensopslag. De innovatie opgave ligt voor de komende 5-10 jaar nog om deze methoden geschikt en levensvatbaar te maken voor huishoudelijke toepassingen.
<b>Stoom accumulator</b>	Opslagvat waarin warmte onder de vorm van stoom onder hoge druk wordt opgeslagen.	Industriële processen	100-374 °C		Meerdere keren/dag		Voelbare warmte	8-9	
<b>Thermochemische opslag: Enerstore SALT X</b>	Een chemische reversibele redoxreactie zorgt ervoor dat bij hoge temperatuur warmte wordt opgeslagen in chemische verbindingen. Wanneer de temperatuur	Power to high value heat	550 °C				Chemische warmte		

Techniek	Uitleg	Toepassing	Temperatuurniveau	Vermogenslevering (dimensioneerbaar op de vraag)	Cyclus frequentie	Efficiëntie	Type warmte	TRL	Ruimtegebruik
	vervolgens verlaagt breken deze chemische verbindingen weer af en komt de opgeslagen warmte terug vrij.								
<b>PCM: heat storage Aluminum Alloy</b>	Warmte opslag in vloeibaar geworden aluminium-legering.	Industriële processen, Power to high value heat	600 °C				Latente warmte		
<b>Basalt Rock</b>	Hoge temperatuurwarmte in vast materiaal opslaan.	Industriële processen, Power to high value heat	600 °C				Voelbare warmte		
<b>Hot stone storage</b>	Hoge temperatuurwarmte in vast materiaal opslaan.	Industriële processen, Power to high value heat	600 °C				Voelbare warmte		
<b>Warmteopslag in beton</b>	Hoge temperatuurwarmte in vast materiaal opslaan.	Industriële processen, Power to high value heat	430 °C				Voelbare warmte		
<b>Set van 2 gesmolten zout tanks</b>	Two-tank molten salt in a direct storage configuration.	Power plants: voornamelijk CSP concentrating solar power	290-565 °C		1/ dag		Voelbare warmte	Commercieel	
<b>Gesmolten zout thermocline</b>	Vloeibare zoutopslag.	Power plants: voornamelijk CSP concentrating solar power	290-560 °C	235 MW		>98%	Voelbare warmte	In ontwikkeling.	



# B Toelichting businesscases

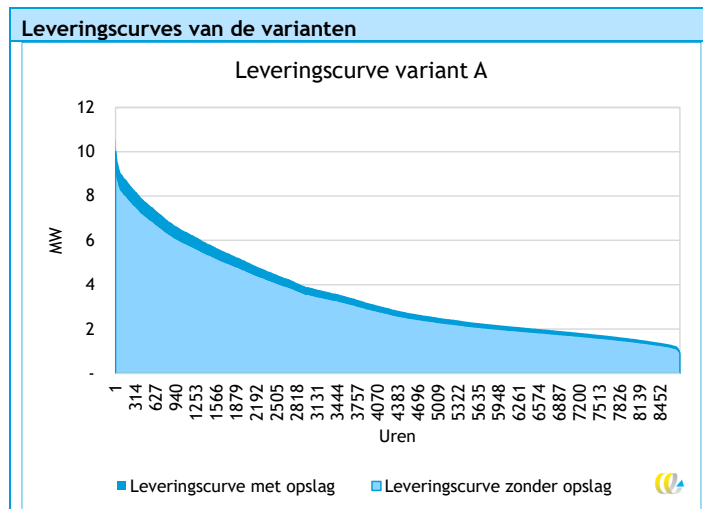
## B.1 Toepassingsvarianten en opslagsysteemconfiguraties

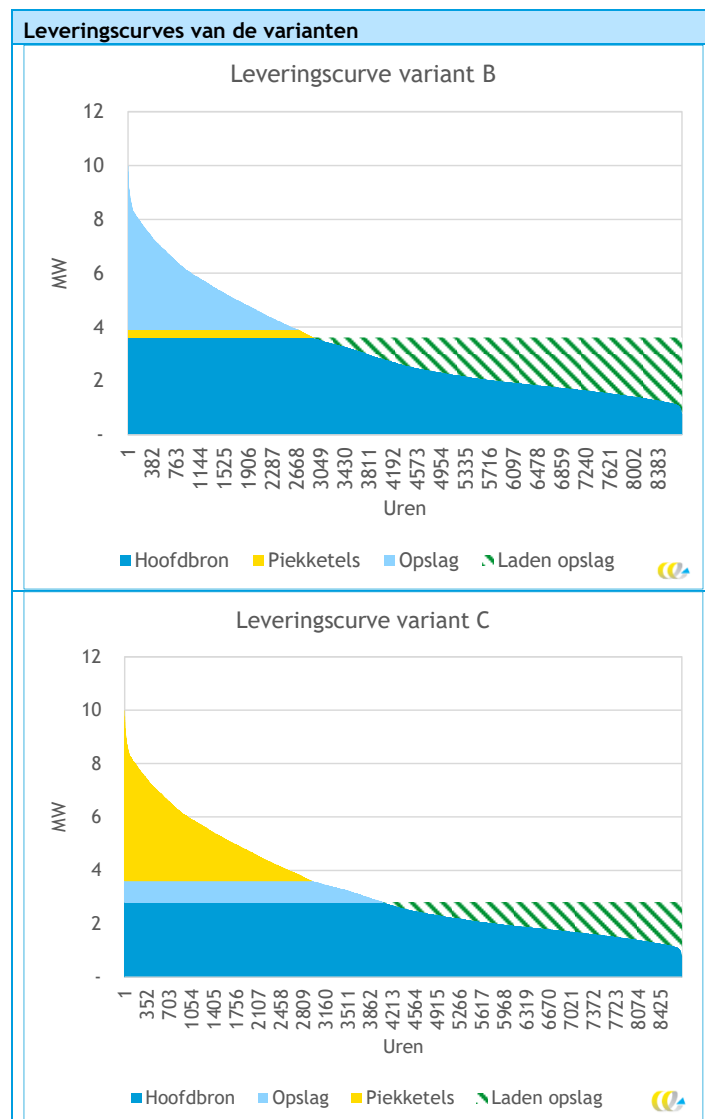
Seizoensopslag zorgt voor de opslag van extra beschikbare warmte uit een primaire bron die anders onbenut zou blijven. Met deze extra warmte kan ofwel de pieklast verminderd worden, ofwel extra woningen voorzien worden door warmte. Drie varianten zijn geselecteerd als de potentiële bijdrage van het systeem.

- A. **Opgeslagen warmte wordt gebruikt voor uitbreiding van een warmtenet.**  
De seizoensopslag wordt ingezet om het vermogen van de hoofdbron in de winter te vergroten, zodat meer woningequivalenten WEQ beleverd kunnen worden.
- B. **Opgeslagen warmte wordt gebruikt om de pieklast te voorzien.** De seizoensopslag wordt ingezet om het aandeel van de hoofdbron in de totale levering te vergroten, zodat er een groter aandeel goedkope warmte beschikbaar komt en minder piekcapaciteit nodig is.
- C. **Opgeslagen warmte wordt gebruikt om de capaciteit van de bron te verminderen.**  
De seizoensopslag wordt ingezet om het vermogen van de hoofdbron te verminderen, zodat een minder grote bron nodig is om eenzelfde hoeveelheid WEQ te leveren.

De verschillende varianten worden geïllustreerd aan de hand van onderstaande leveringscurves. Variant A gebruikt de extra opgeslagen warmte om de hele leveringscurve uit te breiden. Variant B gebruikt de extra opgeslagen warmte om de piekvoorziening grotendeels te vervangen. Variant C heeft een lager hoofdbronvermogen, dat aangevuld wordt tot de oorspronkelijk hoofdbroncapaciteit door middel van de gewonnen warmte.

Tabel 23 - Leveringscurves toepassingsvarianten opslag





Hiernaast worden ook verschillende warmtebronnen (restwarmte, geothermie en biomassa) alsook verschillende warmteleveringen (warmtelevering slecht-geïsoleerde bestaande bouw en goed-geïsoleerde nieuwbouw) meegenomen om de invloed ervan te bestuderen.

In Tabel 24 zie je een overzicht van de doorgerekende configuraties.



Tabel 24 - Overzicht van geanalyseerde configuraties

			Vraagprofiel slecht-geïsoleerde buurt			Vraagprofiel goed-geïsoleerde buurt		
			Restwarmte (HT/MT)	Geothermie	Biomassa	Restwarmte (LT)	Geothermie	Biomassa
ATES HTO	Seizoensopslag	Variant A	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant B	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant C	✓	*)	✓	✓	*)	✓
ATES MTO	Seizoensopslag	Variant A	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant B	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant C	✓	*)	✓	✓	*)	✓
BTES	Seizoensopslag	Variant A	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant B	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant C	✓	*)	✓	✓	*)	✓
PTES	Seizoensopslag	Variant A	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant B	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant C	✓	*)	✓	✓	*)	✓
TTES	Seizoensopslag	Variant A	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant B	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Variant C	✓	*)	✓	✓	*)	✓

\*) Deze variant wordt niet doorgerekend voor geothermie, omdat het vermogen of de grootte van een geothermiebron niet een sterk stuurbaar element is of op voorhand exact in te schatten. Gericht een 'kleinere geothermieput' ontwikkelen is daarmee geen realistische strategie.

In Tabel 24 komen de warmtebronnen zonthermie en aquathermie niet terug. Voor het leveren van seizoenswarmte functioneren deze systemen niet zonder opslag. De bovenstaande warmtebronnen functioneren ook zonder opslag. De analyse richt zich net op het extra effect dat een opslagsysteem kan brengen. Bij het bepalen van de verwachte markt-omvang van opslagsystemen, worden zonthermie en aquathermie wel meegenomen.

## B.2 Resultaat parameters

Het doel van de systeemanalyses is om de verschillende opslagconfiguraties met elkaar te vergelijken. Om een eerlijke vergelijkingsbasis te voorzien wordt er gekeken naar de impact op bijvoorbeeld de productiekosten van een GJ warmte voor enerzijds het oorspronkelijke systeem *zonder opslag* en anderzijds de variant *met opslag*. Een ontworpen warmtenet-systeem zonder opslag rekent vaak op subsidies om een onrendabele top weg te nemen. Met diezelfde omstandigheden dient men ook rekening te houden voor een uitbreiding van een warmtenetsysteem naar meer woningen door integratie van een opslag.

De opslagsystemen worden met elkaar vergeleken door te kijken naar drie verschillende parameters: **LCEO**, **CO<sub>2</sub>-emissies** en **WEQ**.

### LCEO

De kapitaalkosten van de bron, piekvoorziening en opslag alsook de operationele kosten worden gecombineerd tot een LCOE (Levelized Cost of Energy). Deze LCOE (€/GJ) wordt bepaald voor elke businesscase. Om deze kosten te bepalen, wordt in aanvulling op de gegevens in het voorgaande hoofdstuk, gebruik gemaakt van de kengetallen die zijn

opgenomen in het Vesta-MAIS model van het PBL. Het daarbij bijvoorbeeld om de kosten voor een warmtenet of uitkoppel en productiekosten van de verschillende typen van warmte.

## CO<sub>2</sub>-emissies

De CO<sub>2</sub> uitstoot van de warmtevoorziening is berekend volgens Scope 1 van het GHG protocol<sup>44</sup>. Alle uitstoot die lokaal wordt geëmitteerd bij de warmtevoorziening wordt in beeld gebracht.

**Prijsverrekening CO<sub>2</sub>:** Op dit moment is de ETS-prijs van een ton CO<sub>2</sub> relatief laag (ca. 20 €/ton) en heeft deze emissiereductie slechts een beperkte invloed op de businesscase. Echter, in de gehanteerde prijzen van aardgas en elektriciteit in het Functioneel Ontwerp van Vesta-MAIS wordt op dit moment géén waarde voor CO<sub>2</sub> meegenomen (zie ook Tabel 13).

Wanneer niet wordt uitgegaan van de marktprijs (ETS-prijs) voor CO<sub>2</sub>, maar van de milieuprijs, inclusief de globale klimaatambities, dan ligt de prijs voor CO<sub>2</sub> in 2030 aanzienlijk hoger (ca. 150 €/ton, met een range van 120-560 €/ton)<sup>45</sup>.

## WEQ

De opslagsystemen worden toegepast op warmtenetten die woningen voorzien van warmte. Karakteristiek voor de grootte van het warmtenet is het aantal WEQ (woningequivalenten) dit voorziet. Extra beschikbare opgeslagen warmte kan ingezet worden om meer WEQ aan te sluiten op het warmtenet.

## B.3 Achtergrond businesscases

Vanuit een modeleringperspectief de werkelijkheid benaderen vereist aannames en een benadering van de werkelijkheid. Daarnaast is er de situatie van het systeem eromheen, met name de randvoorwaarden waarbinnen het opslagsysteem opereert erg belangrijk voor begrip van de werking van de opslag.

### Methodiek en gebruikte parameters: Vesta-MAIS

Om inzichtelijk te maken wat de effecten zijn van de thermische opslagsystemen, zijn de businesscases zo opgesteld dat er telkens een vergelijking wordt gemaakt tussen een warmtenet zonder en mét opslag. Het warmtenet zonder de opslag is de referentie en er wordt bepaald welke effecten een opslagsysteem heeft op de *levelized cost of energy (LCOE)*. Hierbij worden dus ook parameters gebruikt die buiten het opslagsysteem zitten, maar integraal onderdeel zijn van de twee vergeleken systemen. Om dit mogelijk te maken is gebruik gemaakt van de parameters in het Vesta-MAIS-model van het PBL (in aanvulling op de gegevens die zijn weergegeven in het voorgaande hoofdstuk). Het gaat daarbij bijvoorbeeld om de kosten van de uitkoppeling/productie van warmte, kosten van de piekinstallaties, rendementen van opwek en distributie.

<sup>44</sup> <https://ghgprotocol.org/greenhouse-gas-protocol-accounting-reporting-standard-cities>

<sup>45</sup> [CE Delft : Milieuprijzen](#)

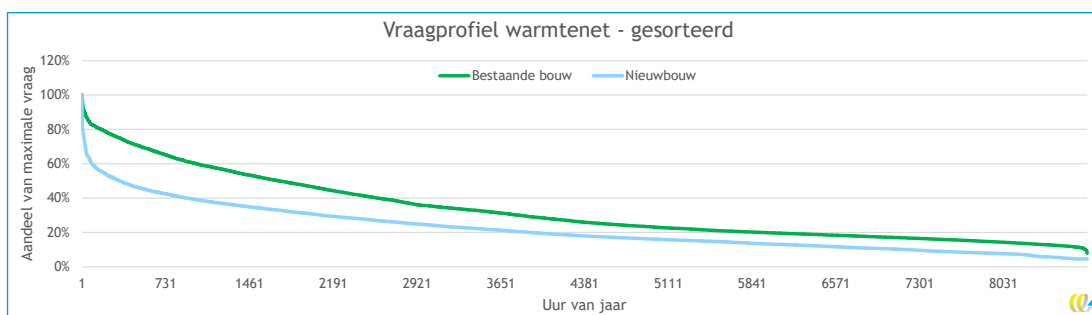
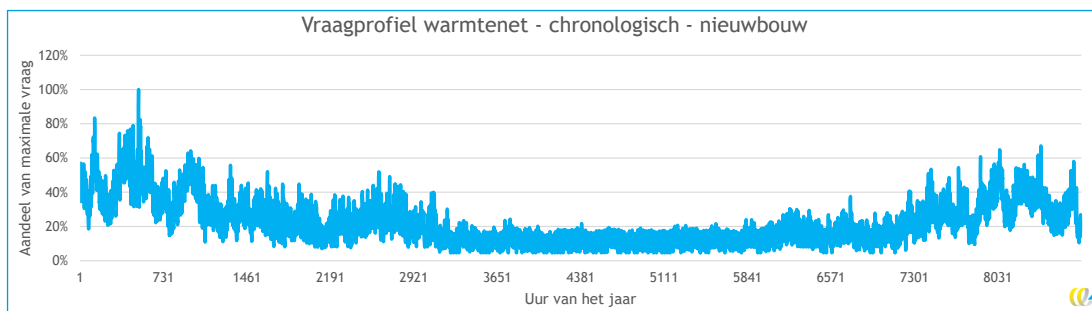
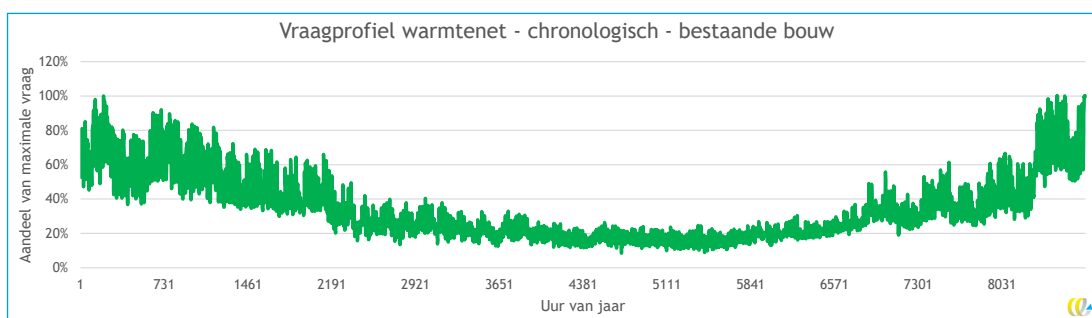


## Vraagprofiel

Het isolatieniveau van de gebouwen die aan het warmtenet gekoppeld zijn bepalen sterk het vraagprofiel. Nieuwbouwwoningen worden geleidelijk doorheen de dag verwarmd. Dit uit zich in een vlakker continu vraagprofiel. Oude woningen vragen warmte wanneer verwarmde ruimtes nodig zijn. Hierdoor is de vraag naar warmte erg gepiekt, vooral op de momenten dat iedereen verwarmt zoals in de avonden. Pieken en variaties in de vraag zijn net waar een bufferopslag goed tot zijn recht komt door deze af te vlakken.

In de volgende grafieken worden respectievelijk de vraagcurves weergegeven van warmtenetten met bestaande woningen en warmtenetten met nieuwbouwwoningen<sup>46</sup>. Deze vraagcurves zijn indicatief en representeren enkel de warmtevraag in een willekeurig jaar. In werkelijkheid varieert ieder jaar de curve, zowel qua vorm als pieken, maxima en minima. Zij worden enkel ingezet bij de businesscases voor het bepalen van de aandelen en verhoudingen tussen de hoofdbron, piekketels en opslagsystemen.

De volgende vraagprofielen zijn van toepassing op grote warmtenetten. Aangezien de gelijktijdigheidsfactor vanaf circa 500 aangesloten woningequivalenten (weq) niet meer significant verandert, geven de profielen dus zowel een goede indicatie voor warmtenetten met 500, 5.000 of 50.000 aangesloten weq.



<sup>46</sup> De vraagcurves zijn door CE Delft opgesteld en genormaliseerd op basis van werkelijke praktijkcurves.

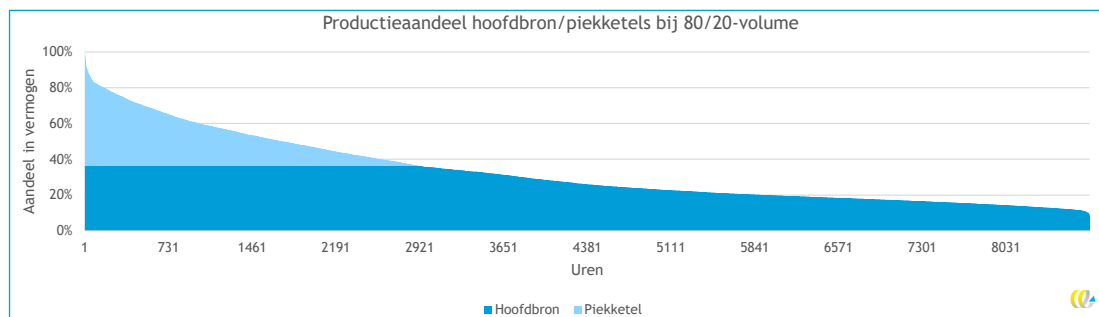
## Vraag- en productieomvang

Om de analyse uit te voeren is aangenomen dat de bronnen en opslagsystemen geschikt zijn voor een warmtenet dat circa 1.850 woningequivalenten (weq) beleverd. 1.850 weq komt met het huidige aardgasverbruik overeen met een warmtevraag van ongeveer 23.000 MWh. Inclusief verwachte distributieverliezen van 20% betekent dit een warmteproductie van ongeveer 29.000 MWh. Indien het vraagprofiel van de bestaande bouw op deze productie-vraag wordt gefit, dan is een opgesteld vermogen van 10 MW nodig om hieraan te voldoen. Voor de referentiesituatie (dus zonder het opslagsysteem) betekent dit de volgende samenstelling<sup>47</sup>:

- hoofdbron: 80% aandeel in volume; 36% aandeel in vermogen;
- piekketels: 20% aandeel in volume; 64% aandeel in vermogen.

In Figuur 14 wordt de bijbehorende belastingduurkromme voor een jaar weergegeven. Het toevoegen van een opslagsysteem verandert de bovenstaande verhoudingen, afhankelijk van de doorgerekende variant. In de Excel zijn hiervan de resultaten terug te vinden.

Figuur 15 - Verdeling aandeel hoofdbron en piekketels (indicatief jaar, bestaande bouw)



## Levering

De levering van warmte in een warmtenet gebeurt nagenoeg nooit uit één bron. Naast een primaire veeleer duurzame warmtebron is er standaard een piekketel aanwezig om de hoogste pieken in de vraag op te vangen. Naarmate netten groter en slimmer worden, is één bron onvoldoende om de vraag aan warmte te voorzien. Meerdere bronnen vullen elkaar aan om de totale warmtevraag te dekken. Restwarmte, geothermie, en warmte uit een biomassacentrale worden beschouwd.

Naast de onderzochte warmtebronnen, zijn opslagsystemen ook zeer geschikt voor nieuwe, duurzame toepassingen, zoals zonthermisch systemen of systemen op basis van aquathermie. Te meer omdat bij deze systemen een grote verschuiving van aanbod en vraag naar warmte is. Op dit moment worden beide opties nog slechts zeer beperkt toegepast in Nederland en er zijn dan ook geen bruikbare gegevens voorhanden om deze opties op dezelfde wijze te analyseren, zoals de andere warmtebronnen. Daarnaast zijn de (systeem)kosten van zon- en aquathermie systemen op dit moment nog aanzienlijk en hoger dan de onderzochte warmtebronnen. De tijdshorizon van dit onderzoek ligt op 2035 en de verwachting is dat deze bronnen tot die tijd niet leiden tot een interessantere propositie dan de onderzochte bronnen. Daarom zijn deze opties kwantitatief buiten scope gehouden. Wanneer in de komende jaren betere gegevens beschikbaar zijn (zowel energetisch,

<sup>47</sup> Dit is gebaseerd op basis van de 80/20-verhouding in volume uit het Functioneel Ontwerp 4.0 van Vesta MAIS.

In het geval van geothermie wordt uitgegaan van een 70/30-verhouding, waarmee het aantal vollasturen van de geothermieput automatisch hoger ligt.

technisch als financieel), dan kan de koppeling met deze duurzame warmtebronnen beter onderzocht worden.

### *Aanvullende opmerkingen*

De voorgenoemde uitkomsten zijn gebaseerd op een analyse waarbij met een specifieke afbakening naar de kansen van opslagsystemen is gekeken. Dit is gedaan vanuit het perspectief van de huidige warmtenetten en de kansen die er op korte termijn zijn. Voor verschillende opslagsystemen, zoals TTES, liggen de kansen echter niet bij de huidige 2<sup>e</sup> of 3<sup>e</sup> generatie warmtenetten, maar juist bij 4<sup>e</sup> of 5<sup>e</sup> generatie warmtenetten. Deze nieuwe generatie netten geven én vragen mogelijkheden van opslagsystemen die onder andere goed ingevuld kunnen worden door een TTES. Dit geldt tevens voor de bronnen die in de toekomst meer en meer ingepast zullen moeten gaan worden in de warmtenetten. Het gaat dan niet meer om redelijk constante en stuurbare bronnen, zoals industriële restwarmte of een energiecentrale, maar juist om fluctuerende bronnen, die veelal seizoensafhankelijk zijn, zoals zon- of aquathermie. Het ligt dan ook in de lijn der verwachtingen dat dergelijke grootschalige opslagsystemen beter tot hun recht komen bij toekomstige, variabele bronnen en nieuwe generaties warmtenetten.



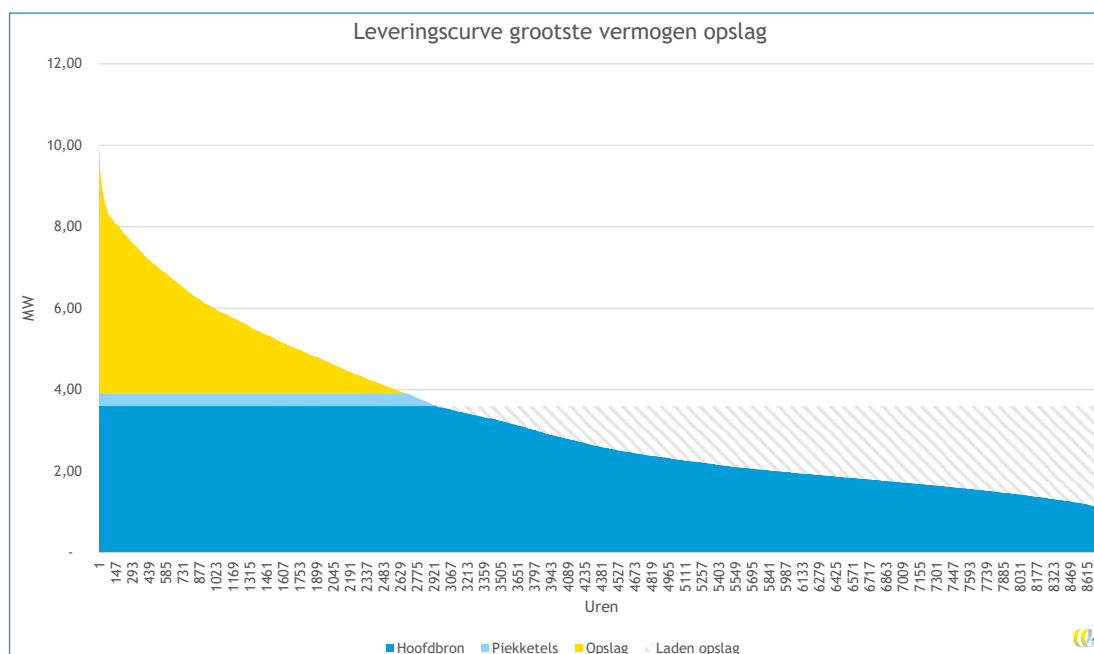
# C Steemanalyses

Deze bijlage bevat de steemanalyses per opslagtype.

## 6.5 ATES

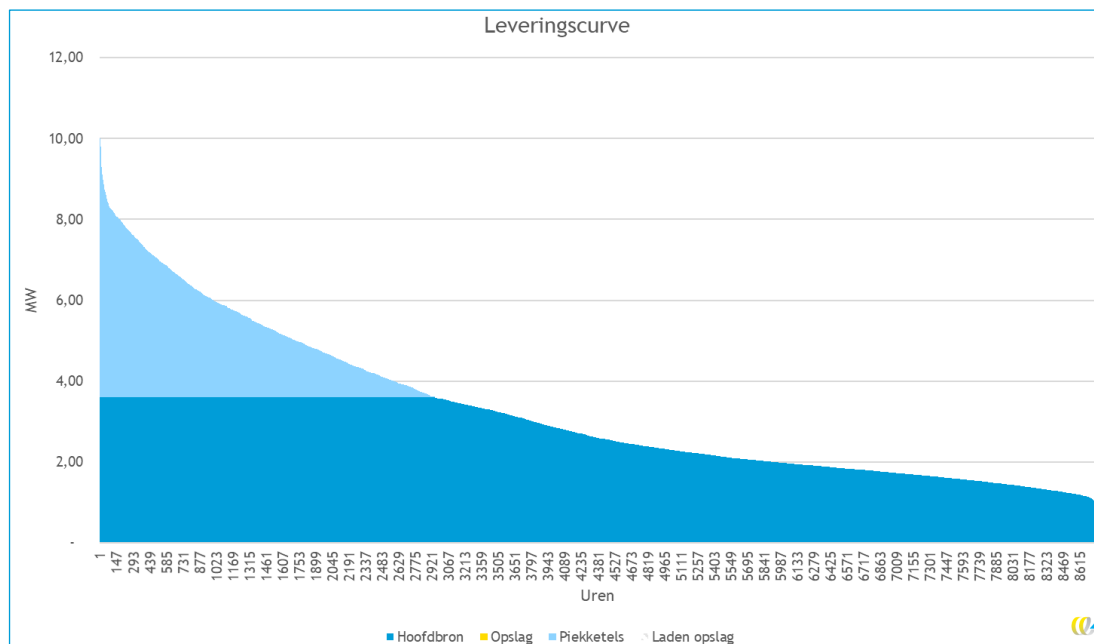
De variant die voor ATES op dit moment de meest gunstige businesscase geeft (de meeste reductie in €/GJ) is Variant B voor Restwarmte. In deze variant wordt de opslag gebruikt als seizoensopslag, waarbij de opslag de grootste vraagpieken opvangt. Dit resulteert in een aanzienlijk lagere inzet van de piekketels en een groter aandeel van de hoofdbron in de totale warmtelevering. In Figuur 16 wordt dit weergegeven.

Figuur 16 - Leveringscurve ATES-HTO - Restwarmte, Variant B

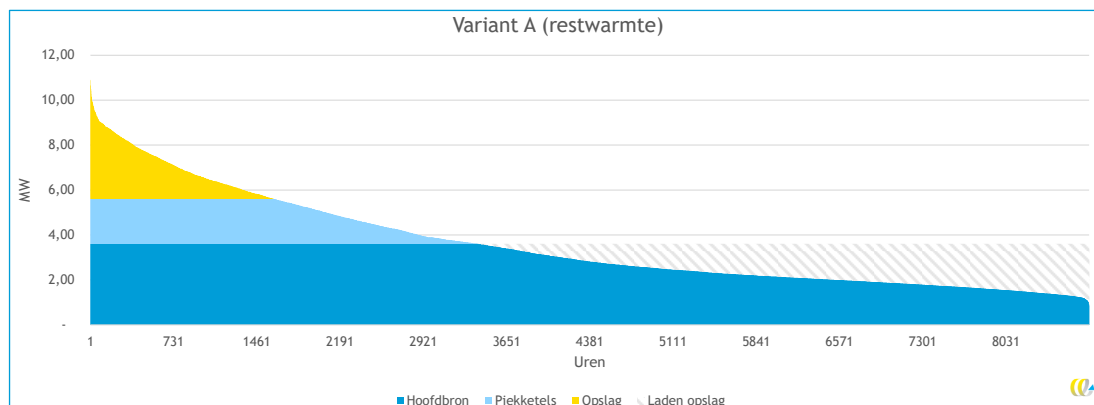


Ter vergelijking worden voor ATES-HTO onderstaand ook de effecten van de basecase en varianten A, B en C gegeven.

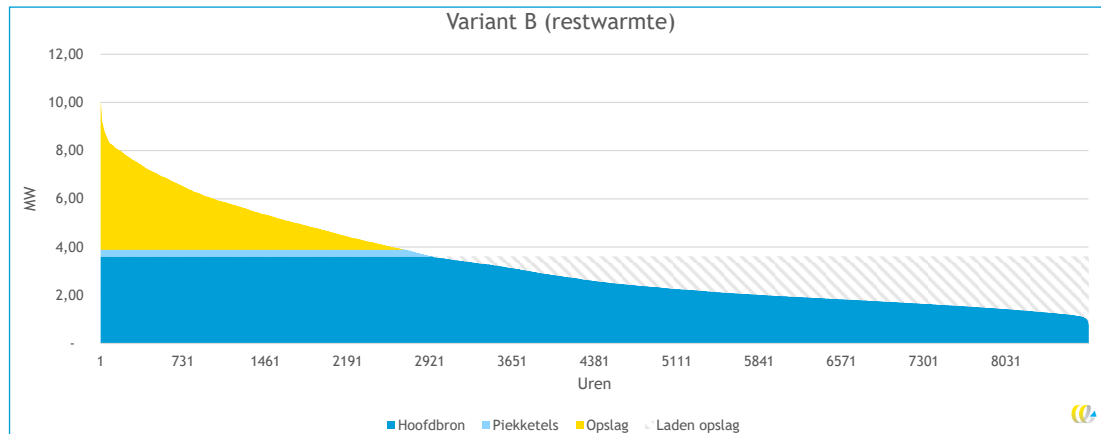
**Figuur 17 - Leveringscurve ATES-HTO - basecase**



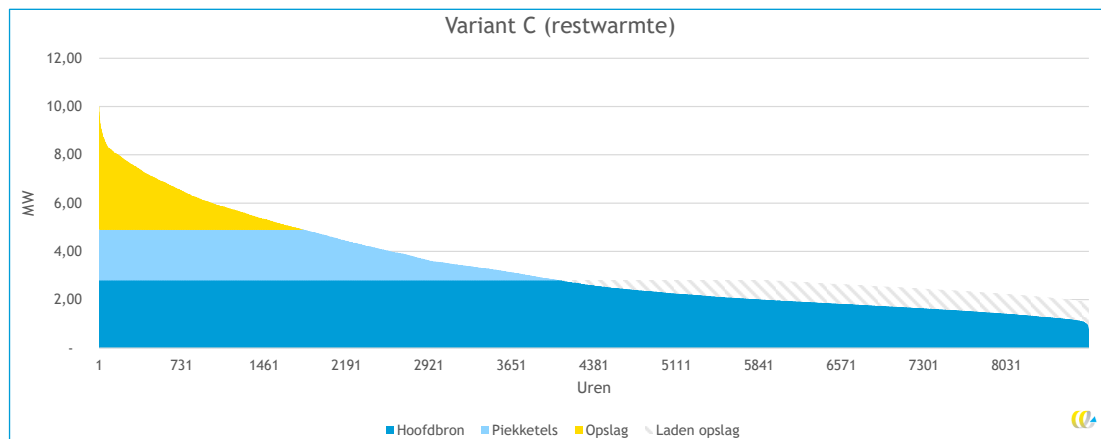
**Figuur 18 - Leveringscurve ATES-HTO - Restwarmte, Variant A (meer aangesloten weq)**



**Figuur 19 - Leveringscurve ATES-HTO - Restwarmte, Variant B (groter aandeel hoofdbron, minder piekketel)**



**Figuur 20 - Leveringscurve ATES-HTO - Restwarmte, Variant C (kleinere hoofdbron)**





In het volgende overzicht worden de kerngegevens van de businesscase weergegeven.

Resultaten analyse referentie		Resultaten analyse met opslag	
Max vraagvermogen (MW)	10	Max vraagvermogen (MW)	10
Vermogen Hoofdbron (MW)	3,6	Vermogen Hoofdbron (MW)	3,6
Vermogen Opslag (MW)	0	Vermogen Opslag (MW)	2,9
Vermogen Piekketel (MW)	6,4	Vermogen Piekketel (MW)	3,5
Geleverde (GJ)	83.089	Geleverde (GJ)	83.089
WEQ	1.846	WEQ	1.846
Productie Hoofdbron (GJ)	83.213	Productie Hoofdbron (GJ)	113.334
Productie Piekketel (GJ)	20.648	Productie Piekketel (GJ)	2.576
Opgeslagen in opslag (GJ)	0	Opgeslagen in opslag (GJ)	30.120
Levering door opslag (GJ)	0	Levering door opslag (GJ)	18.072
Vermogen redundante piekkel(MW)	6,4	Vermogen redundante piekkel (MW)	3,6

Businesscase berekening					
Referentie		Opslagstelsysteem			
CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 675.000	CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 675.000
	Investering piekkelsets	€ 1.728.000		Investering piekkelsets	€ 958.500
	Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 49.038		Investering ATES	€ 1.160.000
	Kapitaallasten piekkelsets	€ 125.537		Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 49.038
	<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 174.575</b>		Kapitaallasten piekkelsets	€ 69.634
				Kapitaallasten ATES	€ 84.273
				<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 202.945</b>
OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 33.750	OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 33.750
	O&M piekkelsets	€ 103.680		O&M piekkelsets	€ 57.510
	Productiekosten IR	€ 29.541		O&M ATES	€ 11.600
	Productiekosten piekkelsets	€ 236.265		Productiekosten IR	€ 40.233
	<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 403.236</b>		Productiekosten piekkelsets	€ 29.472
				Productiekosten ATES	€ 6.416
				<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 178.981</b>
	Totale jaarlijkse kosten	€ 577.812		Totale jaarlijkse kosten	€ 381.926
	Geleverde GJ	83.089		Geleverde GJ	83.089
	Productiekosten geleverde GJ (LCOE)	€ 6,95		Productiekosten geleverde GJ	€ 4,60
	Aantal woningen	1846		Aantal woningen	1846
	Totaal aantal CO2 emissies (ton)	1.158		Totaal aantal CO2 emissies (ton)	144
	CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,014		CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,002
	prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,28		prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,03

Conclusie:			
Capaciteit van de bron uitgebreid met		0 woningen	- GJ
Productiekost per GJ verminderd met	€	2,36 €/GJ	
CO2-emissies verminderd met		0,01220 ton/GJ	
Prijs CO2-emissies verminderd met	€	0,2440 €/GJ	

Het overzicht laat verschillende effecten van het opslagsysteem zien:

– Kapitaallasten:

- Door toevoeging van het opslagsysteem kan de piekkel kleiner gedimensioneerd worden en wordt deze minder ingezet. Dit leidt dus zowel tot lagere investeringen als lagere energiekosten voor de piekinstallatie.
- Ieder warmtenet heeft ook back-upinstallaties. Doordat als gevolg van het opslagsysteem het aantal ‘warmtebronnen’ toeneemt en het vermogen afneemt, heeft dit ook effect op de gewenste redundantie. De back-up wordt gedimensioneerd naar de bron met het grootste vermogen. In de situatie met opslag wordt dat hoofdbron. De investeringen in de back-upinstallatie neemt daarmee ook af (zit in post Piekkelsets).



- De totale jaarlijkse kapitaallasten nemen als gevolg van het toevoegen van het opslagsysteem met circa 15% toe.
- Operationele lasten:
  - Doordat de totale productiemix van warmte verandert, veranderen ook de operationele kosten:
    - De hoofdbron (industriële restwarmte) produceert meer en heeft daardoor hogere productiekosten.
    - Uit het opslagsysteem (ATES) wordt circa 60% van de opgeslagen warmte teruggewonnen, waaraan productiekosten verbonden zitten.
    - De piekketels produceren aanzienlijk minder, waardoor de ook de productiekosten een stuk lager zijn.
  - De O&M-kosten, die worden bepaald als % van de investering, nemen voor de pieken en back-upketels sterk af (minder opgesteld vermogen, lagere investering). Voor het opslagsysteem komen deze er bij.
  - De totale jaarlijkse operationele lasten nemen als gevolg van het toevoegen van het opslagsysteem met circa 55% af.
- De LCOE daalt door toevoeging van het opslagsysteem van 6,95 €/GJ naar 4,50 €/GJ. Een afname van 35%<sup>48</sup>.

## Maatschappelijke aspecten

Naast de financiële parameters, biedt het toevoegen van het opslagsysteem ook meerdere maatschappelijke voordelen:

- de productie uit de (duurzame) hoofdbron neemt met bijna 40% toe<sup>49</sup>;
- de productie uit de fossiele piekketels neemt met bijna 90% af;
- de CO<sub>2</sub>-emissies per geleverde GJ warmte nemen met bijna 90% af.

Op dit moment is de ETS-prijs van een ton CO<sub>2</sub> relatief laag (ca. 20 €/ton) en heeft deze emissiereductie slechts een beperkte invloed op de businesscase. Wanneer echter niet wordt uitgegaan van de marktprijs voor CO<sub>2</sub>, maar van de milieuprijs, inclusief de globale klimaatambities, dan ligt de prijs voor CO<sub>2</sub> in 2030 aanzienlijk hoger (ca. 150 €/ton, met een range van 120-560 €/ton)<sup>50</sup>. In het meest extreme geval, zou een de reductie van bijna 1.000 ton uit deze businesscase leiden tot een jaarlijkse kostenreductie van € 560.000. Hiermee zou de voorgaande businesscase nog gunstiger uitpakken.

## 6.6 TTES

De variant die voor TTES op dit moment de meest gunstige businesscase geeft (de meeste reductie in €/GJ) is Variant A voor Geothermie. In deze variant wordt de opslag gebruikt als seizoensopslag, waarbij de opslag ingezet wordt om het aantal klanten dat beleverd kan worden, te vergroten. Dit resulteert in een aanzienlijk lagere inzet van de piekketels en een groter aandeel van de hoofdbron in de totale warmtelevering. Uiteindelijk blijft de businesscase in alle bekeken gevallen negatief. In Figuur 21 wordt dit weergegeven.

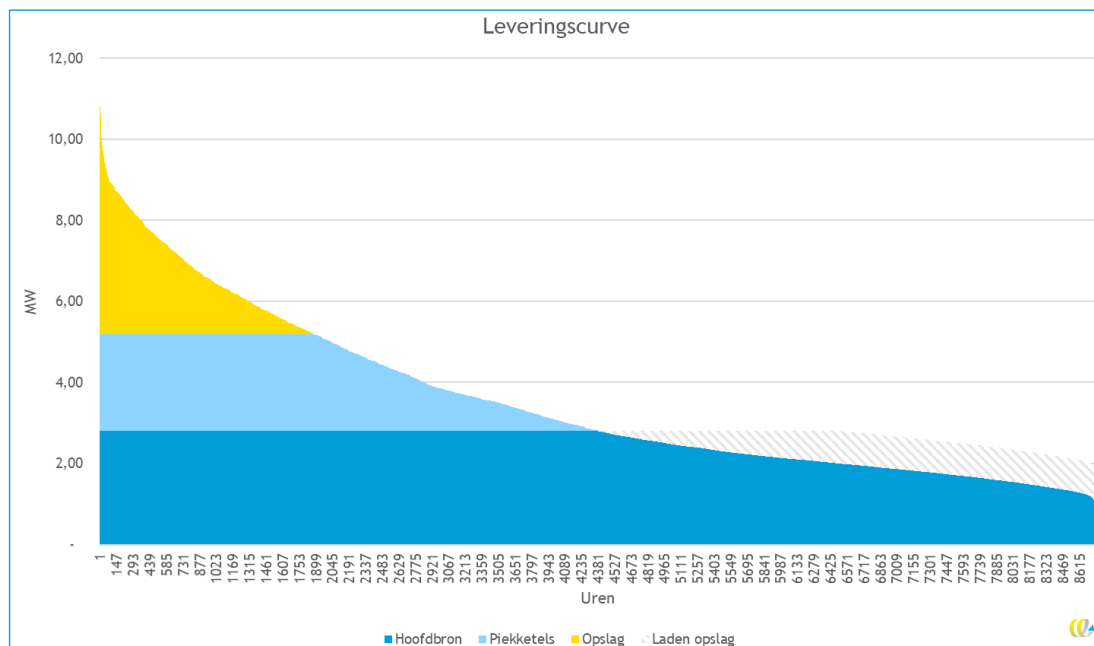
<sup>48</sup> Dit zijn dus enkel de kosten van de energie, de productie en opslag. De kosten van het distributienet zitten hier niet in.

<sup>49</sup> Hierbij dient opgemerkt te worden dat als gevolg van het thermisch rendement van de ATES (ca. 60%), een aanzienlijk deel van deze extra productie 'verdwijnt' in de bodem.

<sup>50</sup> [CE Delft : Milieuprijzen](#)



Figuur 21 - Leveringscurve TTES - Geothermie, Variant A (meer aangesloten weq)



In het volgende overzicht worden de kerngegevens van de businesscase weergegeven. In dit overzicht kunnen volgende effecten worden gezien:

- De hoofdbron houdt hetzelfde vermogen, maar de levering vanuit de hoofdbron neemt met 20%.
- Het opslagsysteem maakt het mogelijk om aan bijna 10% meer woningen te leveren.
- Als gevolg van het opslagsysteem nemen zowel het vermogen van de piek- als back-upketels af, en daarmee de investeringen hierin.
- De totale jaarlijkse kapitaallasten verdubbelden door toevoeging van het opslagsysteem, maar de operationele lasten nemen af, ondanks dat het geleverde volume en het aantal aangesloten woningen toe is genomen.

Resultaten analyse referentie	
Max vraagvermogen (MW)	10
Vermogen Hoofdbron (MW)	2,8
Vermogen Opslag (MW)	0
Vermogen Piekketel (MW)	7,2
Geleverde (GJ)	83.089
WEQ	1.846
Productie Hoofdbron (GJ)	73.053
Productie Piekketel (GJ)	30.808
Opgeslagen in opslag (GJ)	0
Levering door opslag (GJ)	0
Vermogen redundante piekkel(MW)	7,2

Resultaten analyse met opslag	
Max vraagvermogen (MW)	10
Vermogen Hoofdbron (MW)	2,8
Vermogen Opslag (MW)	5,6
Vermogen Piekketel (MW)	2,4
Geleverde (GJ)	89.736
WEQ	1.994
Productie Hoofdbron (GJ)	87.991
Productie Piekketel (GJ)	25.555
Opgeslagen in opslag (GJ)	12.504
Levering door opslag (GJ)	11.129
Vermogen redundante piekkel (MW)	5,6

#### Businesscase berekening

##### Referentie

CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 5.250.000
	Investering piekkel	€ 1.944.000
	Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 381.407
	Kapitaallasten piekkel	€ 141.229
	<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 522.636</b>

##### Opslagsysteem

CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 5.250.000
	Investering piekkel	€ 1.080.000
	Investering opslag	€ 8.741.683
	Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 381.407
	Kapitaallasten piekkel	€ 78.461
	Kapitaallasten opslag	€ 554.610
	<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 1.014.477</b>

OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 52.500
	O&M piekkel	€ 116.640
	Productiekosten IR	€ 25.934
	Productiekosten piekkel	€ 352.531
	<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 547.604</b>

OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 52.500
	O&M piekkel	€ 64.800
	O&M opslag	€ 43.708
	Productiekosten IR	€ 31.237
	Productiekosten piekkel	€ 292.418
	Productiekosten opslag	€ 3.951
	<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 488.614</b>

Totale jaarlijkse kosten	€ 1.070.241
Geleverde GJ	83.089
Productiekosten geleverde GJ (LCOE)	€ 12,88

Totale jaarlijkse kosten	€ 1.503.091
Geleverde GJ	89.736
Productiekosten geleverde GJ	€ 16,75

Aantal woningen	1846
-----------------	------

Aantal woningen	1994
-----------------	------

Totaal aantal CO2 emissies (ton)	1.728
CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,021
prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,42

Totaal aantal CO2 emissies (ton)	1.434
CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,016
prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,32

##### Conclusie:

Capaciteit van de bron uitgebreid met	148 woningen	6.647 GJ
Productiekost per GJ verminderd met	€ -3,87 €/GJ	
CO2-emissies verminderd met	0,00483 ton/GJ	
Prijs CO2-emissies verminderd met	€ 0,0965 €/GJ	

## Maatschappelijke aspecten

Naast de financiële parameters, biedt het toevoegen van het opslagsysteem ook meerdere maatschappelijke voordelen:

- de productie uit de (duurzame) hoofdbron neemt met 20% toe;
- de productie uit de fossiele piekkel neemt met bijna 20% af;
- het aantal weq dat kan worden beleverd met dezelfde bron neemt met bijna 10% toe;
- de CO<sub>2</sub>-emissies per geleverde GJ warmte nemen met bijna 20% af.

De financiële businesscase is op dit moment niet positief. En omdat deze variant vooral gericht is op het aansluiten van meer weq en minder op het reduceren van de inzet van de piekkel, is de CO<sub>2</sub>-reductie verhoudingsgewijs beperkt. Door rekening te houden met de toekomstige milieuprijzen van CO<sub>2</sub> wordt de businesscase wel iets gunstiger, maar deze zal naar verwachting daarmee toch altijd negatief blijven. In het geval van Variant B, waarbij



de reductie van de piekketels wordt nagestreefd, is de CO<sub>2</sub>-reductie aanzienlijk hoger. Als gevolg hiervan zou de businesscase van die variant positief worden bij een fictieve CO<sub>2</sub>-prijs van ongeveer 600 €/ton. Deze waarde valt binnen de bandbreedtes van de toekomstige milieuprijzen van CO<sub>2</sub>.

## Aanvullende kansen TTES

Hoewel TTES naar verwachting in de toekomst ook in de toekomst kansen kan bieden die financieel interessant zijn, liggen de grootste kansen van de tankopslagsystemen op dit moment vooral bij toepassingen die op dit moment nog buiten scope zijn van dit onderzoek:

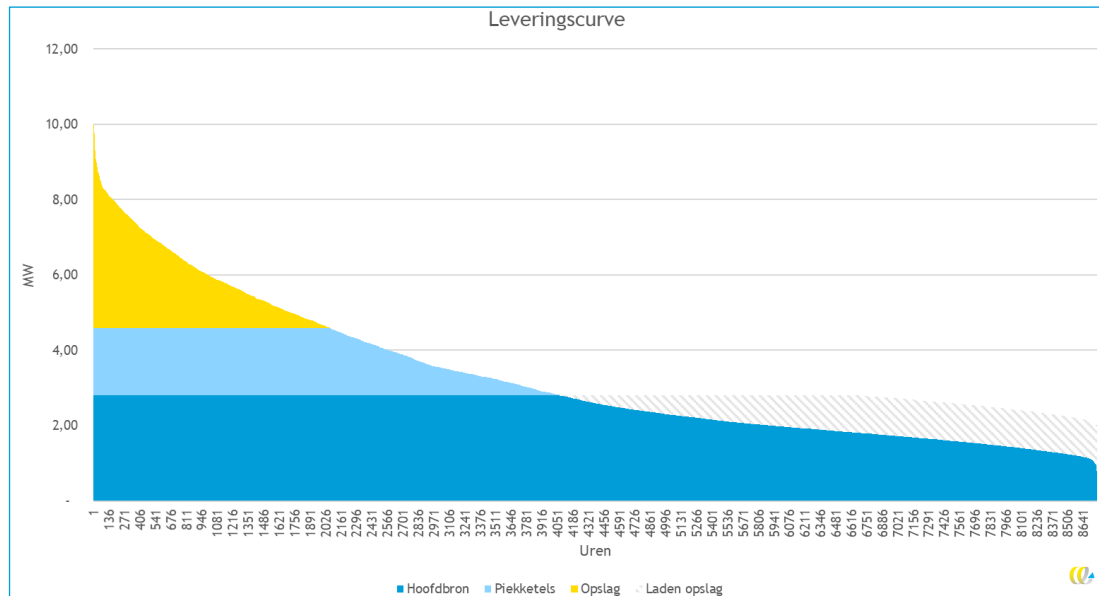
- Verhoging van het aantal cycli: opslagsystemen, zoals Ecovat, lenen zich heel goed voor kortetermijnbuffering. Door het vat niet te gebruiken voor seizoensopslag, maar bijvoorbeeld voor dagopslag, gekoppeld aan een duurzame bron, kan het systeem voor een veel groter aantal aansluitingen in worden gezet. Of kan het vat meerdere keren per jaar gevuld en geleegd worden. Hierdoor kunnen de uiteindelijke kapitaallasten over meer GJ worden gedeeld, waardoor het effect op de LCOE gunstiger wordt.
- Inpassing in 4<sup>e</sup> of 5<sup>e</sup> generatie warmtenetten: tankopslagsystemen hebben de mogelijkheid om nauwkeurig met verschillende temperatuurniveaus te werken. Zo is het mogelijk om een grotere diversiteit van klanten/aanbieders te voorzien met het opslagsystemen. In de huidige analyse wordt warmte als het ware als ‘bulkproduct’ behandeld, waarbij andere opslagsystemen (ATES en PTES) goed scoren. Met een TTES is het mogelijk om van warmte (én koude) een ‘specifiek product’ te maken, waarmee het ook een hogere economische waarde kan hebben. In de huidige, grootschalige warmtenetten in Nederland lijkt het toepassen van TTES niet interessant.
- Koppeling aan elektriciteitsproductie: in Nederland staan al tientallen TTES. Deze staan hoofdzakelijk in de glastuinbouw en zijn gekoppeld aan de wkk's die worden ingezet voor de productie van elektriciteit. Deze wijze van inzet van TTES valt buiten de scope van dit onderzoek, maar biedt veel mogelijkheden om rendabel een TTES te bedienen.

## 6.7 PTES

De variant die voor PTES op dit moment de meest gunstige businesscase geeft (de meeste reductie in €/GJ) is Variant B voor Geothermie. In deze variant wordt de opslag gebruikt als seizoensopslag, waarbij de opslag de grootste vraagpieken opvangt. Dit resulteert in een aanzienlijk lagere inzet van de piekketels en een groter aandeel van de hoofdbron in de totale warmtelevering. In Figuur 22 wordt dit weergegeven.



Figuur 22 - Leveringscurve PTES - Geothermie, Variant B



In het volgende overzicht worden de kerngegevens van de businesscase weergegeven.

De businesscase van het PTES, gecombineerd met een geothermiebron, laat een positief effect op de LCOE zien. Doordat de bron, met lage marginale kosten, een groter aandeel in de productie en levering heeft en de kapitaallasten van een PTES relatief gezien laag zijn, is deze optie goed geschikt.

Wat echter niet is meegenomen in deze analyse is dat een PTES een groot oppervlak nodig heeft. Daar waar oppervlak schaars en/of kostbaar is, zullen de kansen van het systeem dus ook kleiner worden.

Kopie resultaten analyse referentie	
Max vraagvermogen (MW)	10
Vermogen Hoofdbron (MW)	2,8
Vermogen Opslag (MW)	0
Vermogen Piekketel (MW)	7,2
Geleverde (GJ)	83.089
WEQ	1.846
Productie Hoofdbron (GJ)	73.053
Productie Piekketel (GJ)	30.808
Opgeslagen in opslag (GJ)	0
Levering door opslag (GJ)	0
Vermogen redundante piekketel(MW)	7,2

Kopie resultaten analyse met opslag	
Max vraagvermogen (MW)	10
Vermogen Hoofdbron (MW)	2,8
Vermogen Opslag (MW)	5,4
Vermogen Piekketel (MW)	1,8
Geleverde (GJ)	83.089
WEQ	1.846
Productie Hoofdbron (GJ)	88.130
Productie Piekketel (GJ)	18.596
Opgeslagen in opslag (GJ)	15.077
Levering door opslag (GJ)	12.213
Vermogen redundante piekketel (MW)	5,4

#### Businesscase berekening

Referentie		
CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 5.250.000
	Investering piekketels	€ 1.944.000
	Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 381.407
	Kapitaallasten piekketels	€ 141.229
	<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 522.636</b>

Opslagsysteem		
CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 5.250.000
	Investering piekketels	€ 972.000
	Investering opslag	€ 1.356.963
	Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 381.407
	Kapitaallasten piekketels	€ 70.615
	Kapitaallasten opslag	€ 98.582
	<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 550.603</b>

OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 52.500
	O&M piekketels	€ 116.640
	Productiekosten IR	€ 25.934
	Productiekosten piekketels	€ 352.531
	<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 547.604</b>

OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 52.500
	O&M piekketels	€ 58.320
	O&M opslag	€ 40.709
	Productiekosten IR	€ 31.286
	Productiekosten piekketels	€ 212.784
	Productiekosten opslag	€ 4.335
	<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 399.935</b>

Totale jaarlijkse kosten	€ 1.070.241
Geleverde GJ	83.089
Productiekosten geleverde GJ (LCOE)	€ 12,88

Totale jaarlijkse kosten	€ 950.538
Geleverde GJ	83.089
Productiekosten geleverde GJ	€ 11,44

Aantal woningen	1846
-----------------	------

Aantal woningen	1846
-----------------	------

Totaal aantal CO2 emissies (ton)	1.728
CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,021
prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,42

Totaal aantal CO2 emissies (ton)	1.043
CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,013
prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,25

#### Conclusie:

Capaciteit van de bron uitgebreid met	0 woningen	-	GJ
Productiekost per GJ verminderd met	€	1,44	€/GJ
CO2-emissies verminderd met	0,00825	ton/GJ	
Prijs CO2-emissies verminderd met	€	0,1649	€/GJ

## Maatschappelijke aspecten

Naast de financiële parameters, biedt het toevoegen van het opslagsysteem ook meerdere maatschappelijke voordelen:

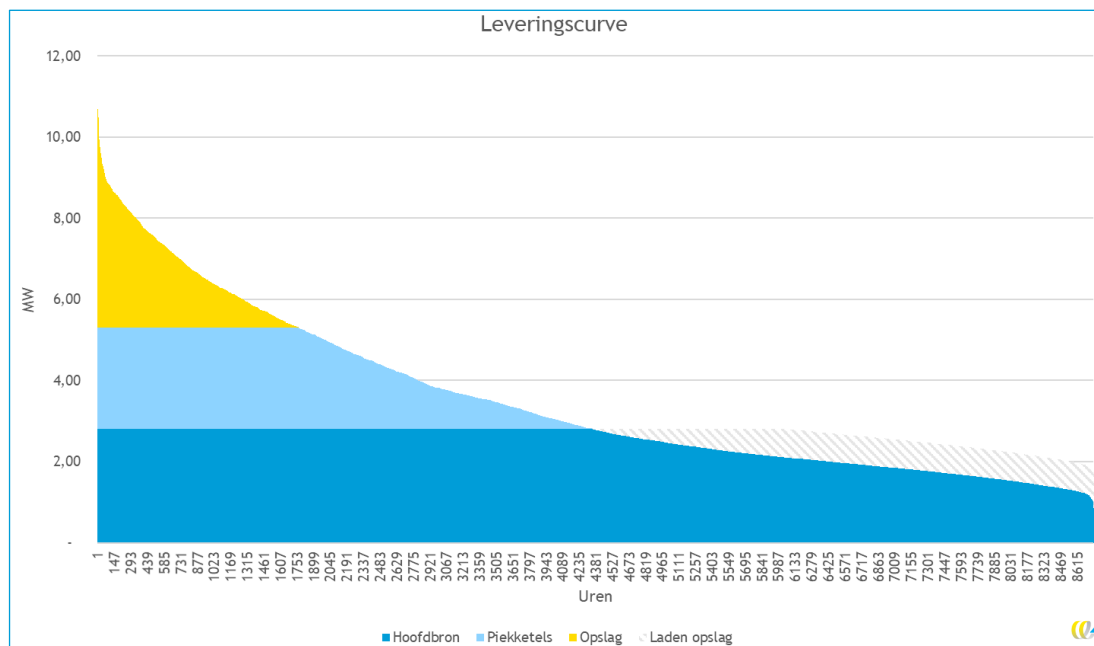
- de productie uit de (duurzame) hoofdbron neemt met 20% toe;
- de productie uit de fossiele piekketels neemt met 40% af;
- de CO<sub>2</sub>-emissies per geleverde GJ warmte nemen met bijna 40% af.



## 6.8 BTES

De variant die voor BTES op dit moment de meest gunstige businesscase geeft (de meeste reductie in €/GJ) is Variant A voor Geothermie. In deze variant wordt de opslag gebruikt als seizoensopslag, waarbij de opslag ingezet wordt om het aantal klanten dat beleverd kan worden, wordt vergroot. Dit resulteert in een aanzienlijk lagere inzet van de piekketels en een groter aandeel van de hoofdbron in de totale warmtelevering. Uiteindelijk blijft de businesscase in alle bekeken gevallen negatief. In Figuur 23 wordt dit weergegeven.

Figuur 23 - Leveringscurve BTES - Geothermie, Variant A



In het volgende overzicht worden de kerngegevens van de businesscase weergegeven.



Resultaten analyse referentie	
Max vraagvermogen (MW)	10
Vermogen Hoofdbron (MW)	2,8
Vermogen Opslag (MW)	0
Vermogen Piekketel (MW)	7,2
Geleverde (GJ)	83.089
WEQ	1.846
Productie Hoofdbron (GJ)	73.053
Productie Piekketel (GJ)	30.808
Opgeslagen in opslag (GJ)	0
Levering door opslag (GJ)	0
Vermogen redundante piekkel(MW)	7,2

Resultaten analyse met opslag	
Max vraagvermogen (MW)	10
Vermogen Hoofdbron (MW)	2,8
Vermogen Opslag (MW)	5,4
Vermogen Piekketel (MW)	2,5
Geleverde (GJ)	88.905
WEQ	1.976
Productie Hoofdbron (GJ)	87.447
Productie Piekketel (GJ)	26.135
Opgeslagen in opslag (GJ)	12.252
Levering door opslag (GJ)	9.802
Vermogen redundante piekkel(MW)	5,4

#### Businesscase berekening

Referentie		
CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 5.250.000
	Investering piekketels	€ 1.944.000
	Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 381.407
	Kapitaallasten piekketels	€ 141.229
	<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 522.636</b>

Opslagsysteem		
CAPEX	Investering uitkoppelkosten IR	€ 5.250.000
	Investering piekketels	€ 1.066.500
	Investering opslag	€ 2.995.027
	Kapitaallasten uitkoppelkosten IR	€ 381.407
	Kapitaallasten piekketels	€ 77.480
	Kapitaallasten opslag	€ 217.585
	<b>CAPEX totaal</b>	<b>€ 676.472</b>

OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 52.500
	O&M piekketels	€ 116.640
	Productiekosten IR	€ 25.934
	Productiekosten piekketels	€ 352.531
	<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 547.604</b>

OPEX	O&M uitkoppeling IR	€ 52.500
	O&M piekketels	€ 63.990
	O&M opslag	€ 89.851
	Productiekosten IR	€ 31.044
	Productiekosten piekketels	€ 299.052
	Productiekosten opslag	€ 3.480
	<b>OPEX totaal</b>	<b>€ 539.916</b>

Totale jaarlijkse kosten	€ 1.070.241
Geleverde GJ	83.089
Productiekosten geleverde GJ (LCOE)	€ 12,88

Totale jaarlijkse kosten	€ 1.216.388
Geleverde GJ	88.905
Productiekosten geleverde GJ	€ 13,68

Aantal woningen	1846
-----------------	------

Aantal woningen	1976
-----------------	------

Totaal aantal CO2 emissies (ton)	1.728
CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,021
prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,42

Totaal aantal CO2 emissies (ton)	1.466
CO2-emissies geleverde GJ (ton/GJ)	0,016
prijs CO2-emissies geleverde GJ (€/GJ)	€ 0,33

#### Conclusie:

Capaciteit van de bron uitgebreid met	129 woningen	5.816 GJ
Productiekost per GJ verminderd met	€ -0,80	€/GJ
CO2-emissies verminderd met	0,00431	ton/GJ
Prijs CO2-emissies verminderd met	€ 0,0862	€/GJ

## Maatschappelijke aspecten

Naast de financiële parameters, biedt het toevoegen van het opslagsysteem ook meerdere maatschappelijke voordelen:

- de productie uit de (duurzame) hoofdbron neemt met 20% toe;
- de productie uit de fossiele piekketels neemt met bijna 15% af;
- het aantal weq dat kan worden beleverd met dezelfde bron neemt met 7% toe;
- de CO<sub>2</sub>-emissies per geleverde GJ warmte nemen met bijna 20% af.

De financiële businesscase is op dit moment niet positief. En omdat deze variant vooral gericht is op het aansluiten van meer weq en minder op het reduceren van de inzet van de piekketels, is de CO<sub>2</sub>-reductie verhoudingsgewijs beperkt. Door rekening te houden met de toekomstige milieuprijzen van CO<sub>2</sub> wordt de businesscase wel iets gunstiger: vanaf een



CO<sub>2</sub>-prijs van ongeveer 560 €/ton wordt deze businesscase positief. Deze waarde valt binnen de bandbreedtes van de toekomstige milieuprijzen van CO<sub>2</sub>.



## D Uitwerking marktverwachting

Vertrekkende vanuit de Startanalyse is gekeken welke warmtesystemen precies aangevuld kunnen worden met opslagtechnieken. Naast individuele technieken worden de volgende collectieve warmtenetstrategieën doorgerekend door de Startanalyse:

<b>S2: Warmtenet met midden tot hoge temperatuurbron</b>
2A: MT Restwarmte
2B: MT Geothermie
2D: MT met bio-wkk
<b>S3: Warmtenet met een lage temperatuurbron</b>
3A-C: LT warmtebron op 30 °C - 70 °C - 50 °C
3D: wko-levering 50 °C
3E: TEO + wko-levering 70 °C

### Beschrijving strategieën<sup>51</sup>

- **S2A: Restwarmte**  
In deze variant wordt een middentemperatuurnet gevoed vanuit een restwarmtebron met een hoge temperatuur, waarbij rekening is gehouden met de aanwezigheid van restwarmtebronnen volgens de Warmteatlas.
- **S2B: Geothermie volgens kansenkaart**  
In deze variant wordt een middentemperatuurnet gevoed vanuit een geothermiebron, waarbij rekening is gehouden met schattingen over bodemgeschiktheid.
- **S2C: Geothermie overal (niet meegenomen)**  
*In deze variant wordt een middentemperatuurnet gevoed vanuit een geothermiebron, waarbij is aangenomen dat geothermie overal kan worden toegepast.*
- **S2D: Bio-wkk**  
In deze variant wordt een middentemperatuurnet gevoed met warmte van een bio-warmtekrachtkoppelingsinstallatie(wkk)-installatie met groengas als brandstof. Dit kan ook een biomassaketel zijn. Die variant is niet apart doorgerekend.
- **S3A: Warmtenet met lagetemperatuurbron - aflevering op 30 °C**  
De warmte wordt bij woningen en gebouwen afgeleverd op LT-niveau (30 °C) en binnen woningen en gebouwen met een individuele combiwarmtepomp opgewaardeerd naar bruikbare temperatuurniveaus voor ruimteverwarming en warm tapwater.
- **S3B: Warmtenet met lagetemperatuurbron - aflevering op 70 °C**  
De warmte wordt centraal met een warmtepomp opgewaardeerd tot MT-niveau (70 °C) en is daarmee binnen woningen en gebouwen direct geschikt voor gebruik voor ruimteverwarming en warm tapwater.
- **S3C: Warmtenet met lagetemperatuurbron - aflevering op 50 °C**  
De warmte wordt bij woningen en gebouwen afgeleverd op LT-niveau (50 °C), is daarmee direct geschikt voor toepassing voor ruimteverwarming binnen woningen en gebouwen. Voor warm tapwater wordt een boosterwarmtepomp ingezet om de temperatuur op te waarden naar een niveau dat geschikt is voor warm tapwater.

<sup>51</sup> [ECW Expertise Centrum Warmte : Strategiefactsheets](#)

- **S3D: Warmtenet met laagtemperatuurbron en warmte-koudeopslag (wko) met aflevering op 50°C (niet meegenomen)**  
*In deze variant wordt warmte-koudeopslag (open bodemenergiesysteem) toegepast, waarbij warmte en koude van gebouwen zelf worden opgeslagen in ondergrondse warmte-koudeaquifers. Met dit systeem kunnen gebouwen in de zomer gekoeld worden, door de warmte van gebouwen in de ondergrond op te slaan. In de winter wordt die warmte weer gebruikt om diezelfde gebouwen te verwarmen. Daarbij is opwaardering met een collectieve warmtepomp nodig om de warmte op een voldoende hoge temperatuur te brengen (50°C).  
 Warmte-koudeopslag is niet overal in Nederland toepasbaar; dat is afhankelijk van de geschiktheid van de ondergrond en van geldende wettelijke beperkingen zoals bescherming van drinkwaterwingebieden. De viewer van de Startanalyse bevat een kaart met gebieden waar warmte-koudeopslag kan worden toegepast.*
- **S3E: Thermische energie uit oppervlaktewater (+wko), levering op 70°C**  
 Dit is een variant voor gebruik van energie uit oppervlaktewater (TEO) van zeer lage temperatuur (circa 15°C). Dit is een vorm van aquathermie. De combinatie met warmte-koudeopslag maakt het mogelijk om warmte in de zomer ondergronds op te slaan en in de winter te benutten voor ruimteverwarming. De warmte wordt op een temperatuur van 70°C bij het gebouw afgeleverd na opwaardering met een collectieve elektrische warmtepomp. Bij deze variant gelden dezelfde beperkingen voor inzet van wko als bij variant S3D. Aanvullend is ook nabijheid van geschikt oppervlaktewater vereist.

## Toewijzing van de opslagsystemen aan de strategieën

Aan de hand van de voorgaande analyses wordt de volgende toewijzing gedaan van opslagsystemen aan strategieën uit de Startanalyse. Hierbij wordt een redenering aangehouden, die gekoppeld is aan de uitkomsten van de businesscases:

- ATES en PTES zijn de enige opties die op dit moment een positieve businesscase hebben.
  - Vanuit de warmtebron wordt gekeken wat het meest gunstige opslagsysteem is:
    - Geothermie:
      - eerste keuze: ATES (heeft grootste reductie LCOE);
      - tweede keuze: PTES (daar waar ATES niet kan i.v.m. ondergrond).
    - Restwarmte (MT/HT):
      - eerste keuze: ATES;
      - tweede keuze: PTES.
    - Restwarmte (LT):
      - eerste keuze: ATES;
      - tweede keuze: PTES.
    - wko:
      - LN-strategie van Startanalyse, waarin wko als optie met laagste nationale kosten naar voren komt.

Hierbij wordt tevens de volgende toedeling aangehouden.

Bron	Temperatuurniveau van de opslag
Geothermie	HTO
Restwarmte MT/HT - strategie	HTO
Restwarmte MT/HT - bestaand net	HTO
LT-bron	MTO
Aquathermie	LTO
Wko	LTO

## Concurrentie met andere opties

Door gebruik te maken van de LN-strategie van de Startanalyse wordt automatisch rekening gehouden met de concurrentie van de andere mogelijkheden in de warmtetransitie. In deze strategie worden de optie gepresenteerd die de laagste nationale kosten hebben, van alle bekeken opties (individuele warmtepompen, collectieve opties en duurzaam gas). Indien een bepaalde (sub)strategie in de LN-strategie als beste scoort, scoort deze dus beter dan alle anderen, gegeven de aannames. Een overzicht van alle doorgerekende opties is terug te vinden op de website van het Expertise Centrum Warmte<sup>52</sup>.

## Bepaling aandeel opslag

In de detailgegevens van de Startanalyse wordt aangegeven welk deel van de warmtevraag uit de gebouwde omgeving ingevuld wordt door MT- of LT-bronnen en welk deel door piekinstallaties of warmtepompen komt. In het geval van MT-netten komt circa 20% van de totale warmtevraag uit piekinstallaties op aardgas. In het geval van LT-netten komt circa 50% van de totale warmtevraag uit elektrische warmtepompen. Aan de hand van de analyses op basis van de leveringscurves, is bepaald wat welk percentage van de bron-warmte uiteindelijk aanvullend nuttig geleverd kan worden via het opslagsysteem. In de onderstaande tabel wordt dit weergegeven. Hierin staat bijvoorbeeld dat wanneer een geothermieput wordt voorzien van een opslagsysteem middels ATES, de hoofdbron (geothermie) via het opslagsysteem 12,5% van de warmtevraag levert. De rest wordt rechtstreeks geleverd of komt uit de piekinstallatie. In het geval van aquathermie gaat 50% van de warmtelevering via de opslag, de rest komt van de warmtepomp.

Bron	ATES	PTES
Geothermie	12,50%	16,70%
Restwarmte MT/HT - strategie	21,70%	24,80%
Restwarmte MT/HT - bestaand	21,70%	24,80%
LT-bron	23,80%	24,80%
Aquathermie	50,00%	
Wko	50,00%	

<sup>52</sup> <https://www.expertisecentrumwarmte.nl>

# E Concurrerende technieken

De volgende technieken zijn individuele technieken die zelfstandig voldoende flexibiliteit kunnen leveren om zonder collectieve opslag te functioneren. Wel presteren sommigen beter, wanneer zij voorzien van individuele opslag of buffering<sup>53</sup>.

Door gebruik te maken van de Startanalyse van het PBL wordt automatisch rekening gehouden met deze concurrerende technieken bij het bepalen van het marktpotentieel. In de Startanalyse wordt een economische afweging gemaakt voor wat de optimale technisch-economische invulling van de warmtevoorziening is. Hierbij worden alle verschillende technieken tegen elkaar afgewogen.

## 6.8.1 Hr-ketel

Het merendeel van de woningen wordt momenteel verwarmd met een hoogrendementsketel op aardgas. Door aardgas te vervangen met groengas kan de hr-ketel CO<sub>2</sub>-neutraal worden gebruikt.

De combiketel is een warmtetechniek voor de productie van ruimteverwarming en warm tapwater. De ketel verwarmt water door gas te verbranden. De pomp bij de ketel verplaatst het verwarmde water naar het afgiftesysteem in de woning. Nadat het water door het afgiftesysteem is gestroomd, komt het afgekoelde water weer terug naar de ketel en wordt het opnieuw verwarmd. Voor het maken van warmtapwater wordt koud water uit de waterleiding verwarmd. Dit warme water wordt naar de tappunten vervoerd.

Hr-combiketels zijn relatief energiezuinig, omdat ze de condensatiewarmte uit de rookgassen kunnen benutten. Hoewel een hr-ketel water verwarmt door middel van de verbranding van gas, is naast een aansluiting op het gasnet en het waternet een aansluiting op het rioleringsnet (tem behoeve van condenswaterafvoer) en het elektriciteitsnet benodigd.

### Voor- en nadelen:

- Geen aanvullende ingrepen vereist. De verandering van energiedrager (van aardgas naar groengas) vereist geen veranderingen aan de installatie of de infrastructuur.
- Bewezen en goedkope techniek.
- Groengas is zeer beperkt beschikbaar.

### Effect op het bestaande netwerk

Bij overgang van aardgas naar groengas zal er in veel gebieden moeten worden overgeschakeld naar een andere energie-infrastructuur voor de warmtevoorziening, doordat groengas maar zeer beperkt beschikbaar is. Bij gebruik van waterstof zal de huidige gasinfrastructuur moeten worden aangepast en zijn er ook aanpassingen nodig aan de cv-installatie.

<sup>53</sup> Op dit moment heeft bijvoorbeeld ook al het leeuwendeel van de hr-ketels een (zeer) kleine buffer binnen de installatie zitten, om een hoog comfortniveau te faciliteren: snel warm water. Deze buffers zijn meestal maar enkele liters groot.

## 6.8.2 Hybride warmtepomp

De hybride warmtepomp combineert een elektrische warmtepomp met de hr-ketel op groengas. De elektrische warmtepomp kan ongeveer voor de helft van de warmtevraag zorgen. Dit gaat zeer efficiënt, omdat de warmtepomp energie haalt uit de buitenlucht of ventilatielucht. De energie wordt gebruikt voor ruimteverwarming en/of warmtapwaterbereiding. Ongeveer een vijfde van de tijd springt de hr-ketel bij op momenten dat de warmtepomp niet voldoende warmte kan leveren, zoals in het geval het buiten koud is en/of er (veel) warmtapwater nodig is.

### Voor- en nadelen:

- Geen aanvullende ingrepen vereist. De verandering van energiedrager (van aardgas naar groengas) vereist geen veranderingen aan de installatie of de infrastructuur. Netverzwaring is niet noodzakelijk omdat de piekbelasting wordt opgevangen door de hr-ketel.
- Groengas is zeer beperkt beschikbaar.

### Effect op het bestaande netwerk

Bij overgang van aardgas naar groengas zal er in veel gebieden moeten worden overgeschakeld naar een andere energie-infrastructuur voor de warmtevoorziening, doordat groengas maar zeer beperkt beschikbaar is.

## 6.8.3 Elektrische warmtepomp

Een elektrische warmtepomp gebruikt energie uit de lucht of de bodem, die met behulp van elektriciteit wordt opgewaardeerd voor het verwarmen van de woning en eventueel het tapwater.

De luchtwarmtepomp is een systeem met een buitenunit waar een koudemiddel doorheen stroomt dat energie opneemt uit de lucht. De bodemwarmtepomp neemt warmte op uit de bodem door middel van verticale of horizontale buizen waar een koudemiddel doorheen stroomt. De warmtepomp zet deze energie om in bruikbare warmte voor de woning. Doordat de warmtepomp grotendeels duurzame energie uit de lucht of bodem gebruikt en maar een beperkte hoeveelheid elektriciteit, heeft het een hoog rendement. Om het rendement zo hoog mogelijk te krijgen is het noodzakelijk dat een woning goed geïsoleerd is.

### Voor- en nadelen:

- zeer hoog rendement;
- mogelijkheid tot koelen;
- mogelijk zwaardere elektriciteitsaansluiting nodig (minimaal 3x25A);
- goede schilisolatie nodig (minimaal Energielabel B);
- vereist een lagetemperatuurafgiftesysteem, zoals wand- of vloerverwarming;
- luchtwarmtepompen produceren geluid en kunnen trillingen veroorzaken;
- er is niet altijd voldoende ruimte voor de bodembron.

### Effect op het bestaande netwerk:

Bij grootschalig gebruik is verzwaring van het elektriciteitsnet noodzakelijk. Het gasnet wordt niet meer gebruikt.

#### 6.8.4 Cv-ketel op vaste biomassa (pelletkachel)

Een cv-ketel op houtpellets (pelletketel cv) is een hernieuwbaar alternatief voor de cv-ketel op aardgas. De pelletketel verbrandt houtpellets met een hoog rendement. Houtpellets worden gemaakt van houtvezels van kap- en snijafval die onder hoge temperatuur worden samengeperst. De pellets worden door de gebruiker opgeslagen in een opslagtank en worden automatisch naar de ketel gevoerd als deze aangaat.

De pelletketel cv is een gesloten toestel, waarbij geen vlammen zichtbaar zijn. Hij is niet bedoeld als sfeerverwarming in de woonkamer, maar echt als vervanging van de hr-ketel.

De duurzaamheid van de houtpellets wordt sterk bepaald door de herkomst van de biomassa, de productiemethode en de transportbewegingen die er voor nodig zijn.

##### **Voor- en nadelen:**

- Enkel een aansluiting op het elektriciteitsnet nodig.
- Vaste biomassa is beperkt beschikbaar.
- Pelletopslag neemt veel plek in of veel vervoersbewegingen zijn noodzakelijk om in de aanvoer te voorzien.
- De pelletketel is niet geluidloos.
- De ketel stoot fijnstof uit. In het rookgaskanaal kan een fijnstoffilter ervoor zorgen dat er minder fijnstof wordt uitgestoten.

##### **Effect op het bestaande netwerk**

Enkel nog een aansluiting op het elektriciteitsnet nodig.

Het elektriciteitsnet hoeft daarbij niet te worden verzwaard.

#### 6.8.5 Hre-ketel

Een hre-ketel (ofwel micro-wkk, warmtekrachtkoppeling) is een hoogrendementsketel op gas (aardgas, groengas of waterstof) die naast warmte ook elektriciteit produceert (vandaar de 'e' in hre).

De elektriciteit wordt door een motor in de ketel geproduceerd en de warmte die daarbij vrijkomt, wordt ingezet voor het verwarmen van de woning. De elektriciteit wordt net als bij zonnepanelen gelijktijdig gebruikt of bij een overschot teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. De hre-ketel is op dezelfde manier als een gewone hr-ketel onderdeel van een centraal verwarmingssysteem.

##### **Voor- en nadelen:**

- besparing op de elektriciteitsrekening;
- groengas is zeer beperkt beschikbaar;
- enkel bij een hoge elektriciteitsvraag is het gebruik van een hre-ketel voordeliger dan een conventionele hr-ketel. (Om deze reden is deze techniek niet meegerekend als buurtoplossing).

##### **Effect op het bestaande netwerk**

Bij overgang van aardgas naar groengas zal er in veel gebieden moeten worden overgeschakeld naar een andere energie-infrastructuur voor de warmtevoorziening, doordat groengas maar zeer beperkt beschikbaar is. Bij gebruik van waterstof zal de huidige gasinfrastructuur moeten worden aangepast.