

# Businesscase kleinschalige warmteopslag

## Reductie aansluitvermogen door kleinschalige warmteopslag

Dit rapport is opgesteld in opdracht van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) voor de Topsector Energie op verzoek van TKI Urban Energy

# Businesscase kleinschalige warmteopslag

---

## Kenmerken

---

<b>Projectnummer</b>	18470	<b>Datum</b>	20-5-2020
<b>Auteur</b>	Ir. Dick van 't Slot	<b>Co-lezer</b>	drs J. van der Heide
<b>Onderwerp</b>	Businesscase kleinschalige warmteopslag	<b>Status</b>	Definitief
<b>Opdrachtgever</b>	RVO.nl in opdracht van TKI Urban Energy	<b>Uitgevoerd door</b>	DWA B.V.

---

# Inhoudsopgave

---

<b>1</b>	<b>Management summary</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
2.1	Referentie	7
<b>3</b>	<b>Vraagprofielen</b>	<b>8</b>
3.1	Woningvoorraad	8
3.2	Energievraag ruimteverwarming	2
3.3	Energievraag tapwater	2
3.4	Selectie profielen	2
<b>4</b>	<b>Analyse opslagtechnieken</b>	<b>2</b>
4.1	Kaders	2
4.2	Opslagtechnieken	3
4.2.1	Voelbare warmte	3
4.2.2	PCM's	3
4.2.3	TCM's	4
4.2.4	Overige opslagtechnieken	4
4.3	Beoordeling technieken	5
4.3.1	Voelbare warmte	5
4.3.2	PCM's	5
4.3.3	TCM's	2
4.3.4	Conclusies	2
<b>5</b>	<b>Usecase</b>	<b>3</b>
5.1	Relevante thema's	3
5.2	Enquête	4
5.3	Conclusie usecase	6
<b>6</b>	<b>Businesscase</b>	<b>7</b>
6.1	Parameters businesscase	7
6.1.1	Investering	7
6.1.2	Minderinvestering warmtepomp	8
6.1.3	Levensduur	8
6.1.4	Onderhoudskosten	8
6.1.5	Energieverlies	8
6.1.6	Warmtelevering via buffer	9
6.1.7	Kostprijs te laden warmte en opbrengst warmte	9
6.1.8	Reductie vermogensvraag en vergoeding	10
6.1.9	Indexatie en rendementseis	10

---

<b>6.2</b>	<b>Analyse parameters</b>	<b>11</b>
6.2.1	Buffergrootte	11
6.2.2	Energieverlies	12
6.2.3	Reductie vermogensvraag	12
<b>6.3</b>	<b>Resultaten businesscase</b>	<b>12</b>
6.3.1	Gemiddeld profiel	12
6.3.2	Overige profielen	15
<b>6.4</b>	<b>Conclusies businesscase</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Alternatieven</b>	<b>18</b>
<b>7.1</b>	<b>Individuele alternatieven</b>	<b>18</b>
<b>7.2</b>	<b>Collectief alternatief</b>	<b>18</b>
7.2.1	Peakshaving centraal	19
7.2.2	Onrendabel project	19
7.2.3	Use-case collectief	19
<b>7.3</b>	<b>Conclusies alternatieven</b>	<b>19</b>
<b>8</b>	<b>Eindoordeel technieken</b>	<b>20</b>
<b>8.1</b>	<b>Algemeen</b>	<b>20</b>
<b>8.2</b>	<b>Voelbare warmte</b>	<b>20</b>
<b>8.3</b>	<b>PCM's</b>	<b>21</b>
<b>8.4</b>	<b>TCM's</b>	<b>21</b>
<b>8.5</b>	<b>Vervolgstappen</b>	<b>21</b>
<b>I</b>	<b>Bijlage Technische analyse opslagtechnieken thermische energie</b>	<b>22</b>
<b>I.1</b>	<b>Voelbare warmte</b>	<b>22</b>
<b>I.2</b>	<b>PCM's</b>	<b>3</b>
<b>I.3</b>	<b>Thermochemische warmteopslag</b>	<b>9</b>
<b>II</b>	<b>Bijlage Enquête</b>	<b>13</b>
<b>II.1</b>	<b>Enquête</b>	<b>49</b>
<b>II.2</b>	<b>Resultaten</b>	<b>15</b>
<b>III</b>	<b>Bijlage Interviews</b>	<b>22</b>
<b>IV</b>	<b>Bijlage Bronnen</b>	<b>28</b>

# 1 Management summary

---

## Inleiding

De Nederlandse overheid streeft naar een CO<sub>2</sub>-arme energievoorziening in 2050. Daarbij komt de doelstelling om het aardgasgebruik te minimaliseren. Dit leidt tot een sterke elektrificatie van de warmtevoorziening door het gebruik van warmtepompen. Een aandachtspunt hierbij is dat zowel de vraag naar elektriciteit voor invulling van de warmtevraag als het aanbod van elektriciteit uit duurzame bronnen sterk fluctueren. Dit levert twee knelpunten op:

- De beschikbaarheid van (duurzame) elektriciteit in relatie tot de vraag
- De beschikbaarheid van voldoende transportcapaciteit voor elektriciteit

Een mogelijke maatregel om deze knelpunten te verminderen is de kleinschalige opslag van warmte in of bij woningen. Hierdoor kan er warmte worden geproduceerd wanneer elektriciteit en capaciteit in het net beschikbaar zijn, en worden gebruikt wanneer er warmtevraag is.

## Woningtypen

In deze studie zijn vier type vraagprofielen gebruikt om de businesscase door te rekenen:

- Een gemiddeld profiel, dat is gebaseerd op een rijwoning met 3 personen;
- Een royaal profiel, gebaseerd op een vrijstaande woning met 5 personen;
- Een zuinig profiel, gebaseerd op een appartement met 1 persoon;
- En een collectief profiel gebaseerd op een appartementencomplex van 24 woningen met elk 2 personen.

## Opslagmethoden

Voor de opslag van warmte op een temperatuurniveau dat direct bruikbaar is (40 °C voor verwarming en 60 °C voor tapwater) zijn in basis drie verschillende technieken meegenomen in de analyse:

- Opslag voelbare warmteopslag in water.
- Opslag in faseovergangsmaterialen (PCM's). Deze kunnen meer warmte opslaan in een kleiner temperatuurtraject
- Opslag in thermochemische materialen (TCM's). Hierbij kan er warmte gedurende lange tijd

worden opgeslagen, zonder dat er sprake is van verliezen in de tijd.

## Stand der techniek

Het gebruik van waterbuffers is een volledig beschikbare techniek. Hiermee is het mogelijk om warmte tot enkele dagen op te slaan. De benodigde buffergrootte neemt al wel snel toe tot meer dan 1 m<sup>3</sup>, waarmee plaatsing in een woning minder realistisch wordt.

Op gebied van PCM's zijn de eerste systemen op de markt. Het belangrijkste voordeel is dat de buffersystemen tot de helft kleiner kunnen zijn dan systemen met warmteopslag in water. Qua opslagduur bieden deze systemen een vergelijkbare prestatie als de waterbuffers.

TCM's zijn een product in ontwikkeling. Er vindt nog veel onderzoek en ontwikkeling plaats naar geschikte materialen en marktrijpe toepassingen. Commercieel zijn er nog geen systemen beschikbaar voor deze toepassing.

## Usecase

Op basis van een enquête onder ruim 100 personen zijn een aantal belangrijke conclusies te trekken over de impact op de gebruiker.

- Bewoners staan, mits goed voorgelicht, positief tegenover de techniek van warmteopslag in de woning;
- Bij een realistische grootte (1 m<sup>3</sup> en groter) is de bereidheid voor plaatsing binnenshuis klein. De voorkeur is plaatsing ondergronds of in de kruipruimte;
- Bewoners zijn in het algemeen niet bereid om beperkingen te accepteren in de beschikbaarheid van warmte;
- De bereidheid om zelf te investeren in de techniek is groot, op voorwaarde dat er een gezonde terugverdientijd (maximaal 10 jaar) is voor de bewoner.

## Businesscase

De verschillende technieken zijn doorgerekend om te zien in hoeverre een haalbare businesscase mogelijk is. Een belangrijke conclusie is dat in de huidige situatie er geen positieve businesscase bestaat. Er is

namelijk zowel sprake van een investering als stijgende exploitatielasten. De stijgende exploitatiekosten worden veroorzaakt door het feit dat het te behalen prijsvoordeel (dag/nacht tarief) niet opweegt tegen de optredende energieverliezen en de slechtere prestatie van de warmtepomp voor warmteopwekking op een hoger temperatuurniveau. Daarbij is er nu geen sprake van hogere kosten voor transportcapaciteit en/of elektriciteit wanneer dit beperkt beschikbaar is. De enige uitzondering waarbij er wel sprake is van een exploitatievoordeel is het geval van seizoensopslag, waarbij 'gratis' zonnewarmte uit de zomer wordt gebufferd voor de winterperiode. In dat geval is er wel een exploitatievoordeel, hoewel dit niet in verhouding staat tot de investering (terugverdientijd meer dan de levensduur).

Verder blijkt uit de doorrekening het volgende:

- De businesscase wordt beter bij een grotere warmtevraag. De beste businesscase wordt behaald voor appartementsgebouwen.
- Voor opslagperioden van 1 of enkele dagen is een waterbuffer financieel gezien de meest aantrekkelijke. De hogere systeemkosten van PCM's en TCM's wegen niet op tegen hun (financieel) voordeel.
- Voor langere perioden (meer dan 1 week) zijn alleen TCM-buffers een reële optie, omdat de energieverliezen voor andere systemen erg hoog (>50%) worden.
- Om de businesscase sluitend te krijgen is in het gunstigste geval een vergoeding nodig van circa € 90 per jaar per kW gereduceerd elektrisch piekvermogen. Dit komt ruwweg overeen met de extra kosten voor een verzwaring van een 3x25A naar een 3x35A aansluiting.
- In alle andere cases zijn de kosten fors hoger (€ 700-1.400/kW/jaar voor een gemiddelde woning). Voor seizoensopslag liggen deze kosten nog hoger (€ 4.000-7.000/kW/jaar)

### Aanbevelingen

Om de techniek van kleinschalige warmteopslag in woningen technisch en financieel haalbaar te maken zijn de volgende ontwikkelingen aanbevolen:

#### Technisch

- Ontwikkeling van beter geïsoleerde buffers om de energieverliezen verder te reduceren;
- Onderzoek en ontwikkeling van TCM's specifiek voor deze toepassing. De verwachting is namelijk

dat er meer en betere TCM's voor deze toepassing zullen zijn, dan momenteel bekend.

#### Financieel

- De belangrijkste aanpassing is het laten variëren naar tijd en plaats van zowel de prijs voor elektrische energie als die van de transportcapaciteit voor elektriciteit. Het komt daarmee een incentive om gebruik van elektriciteit te verminderen in geval van een laag aanbod en/of optredende pieken.
- Het beschikbaar stellen van een investerings- of exploitatievergoeding vanuit de overheid dan wel de netbeheerder voor de toepassing van kleinschalige warmtebuffers.

#### Kansen voor toepassing

Wanneer deze aanpassingen worden doorgevoerd zijn er een aantal toepassingen waar de businesscase sluitend zal zijn:

- Locaties waar de kosten voor verzwaring van het net erg hoog zijn, en waar verzwaring vermeden kan worden door de toepassing van kleinschalige warmteopslag. Het gaat daarbij om de locaties waarbij verzwaring wel noodzakelijk is, maar het tekort aan transportcapaciteit niet heel groot is.
- Locaties met veel opwekking van duurzame energie, waardoor er regelmatig knelpunten ontstaan in de beschikbare transportcapaciteit. Kleinschalige warmteopslag kan hierop inspringen en de pieken reduceren.
- Locaties met een relatief grote warmtevraag (zoals grote en oudere woningen) zullen eerder een positieve businesscase hebben dan locaties met een kleine warmtevraag (kleine, goed geïsoleerde woningen).



## 2 Inleiding

---

**De Nederlandse overheid streeft naar een CO<sub>2</sub>-arme energievoorziening in 2050. Daarbij komt de doelstelling om het aardgasgebruik te minimaliseren. Dit leidt tot een sterke elektrificatie van de energievoorziening. Een aandachtspunt hierbij is dat zowel de vraag naar elektriciteit voor invulling van de warmtevraag als het aanbod van elektriciteit uit duurzame bronnen sterk fluctueren. Om de fluctuaties in vraag en aanbod van elektrische energie op te kunnen vangen, zijn forse aanpassingen noodzakelijk in het elektriciteitsnet. Deze maatregelen zijn niet overal financieel en praktisch haalbaar.**

Een mogelijke maatregel die deze benodigde aanpassingen sterk kan reduceren, is de kleinschalige opslag van warmte in of bij woningen. Hierdoor kan er warmte worden geproduceerd op momenten dat er capaciteit beschikbaar is, terwijl er op momenten dat de capaciteit beperkt is er warmte kan worden onttrokken uit de opslag. In dit onderzoek worden de mogelijkheden onderzocht van de haalbaarheid van kleinschalige warmteopslag in de woning.

Het onderzoek is opgedeeld in verschillende fasen.

- 1 Inventarisatie van warmtevraagprofielen.
- 2 Inventarisatie en evaluatie van warmteopslagtechnieken.
- 3 Bepalen use-case voor de verschillende opslagtechnieken.
- 4 Opstellen businesscases voor de relevante combinaties van opslagtechniek en toepassing.
- 5 Vergelijk van kleinschalige opslagtechnieken met grootschalige alternatieven.
- 6 Eindoordeel per opslagmethode

Deze verschillende onderdelen zijn in opeenvolgende hoofdstukken behandeld.

### 2.1 Referentie

Voor verwarming maken de meeste woningen in Nederland op dit moment gebruik van een Cv-ketel. Bij deze woningen speelt de beperkte capaciteit van het elektriciteitsnet echter nauwelijks. Bij de transitie naar een aardgasvrije samenleving zijn er verschillende

opties. Een waarschijnlijk veel toegepaste oplossing is die van een warmtepomp.

Het gebruik van een elektrische warmtepomp zorgt voor meer gebruik van elektriciteit, vooral in de winter. Juist dan speelt het probleem van de beperkte netcapaciteit.

Daarom wordt in deze studie verwarming met behulp van een elektrische warmtepomp als basis genomen voor de berekeningen.

## 3 Vraagprofielen

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van de vraagprofielen van verschillende woningtypen. Hieruit is een selectie gemaakt voor een aantal belangrijke typen op basis waarvan in de komende hoofdstukken een businesscase mee doorgerekend wordt.

### 3.1 Woningvoorraad

De Nederlandse woningvoorraad bestaat uit veel verschillende woningtypen. RVO<sup>1</sup> heeft de bestaande woningvoorraad gecategoriseerd in 30 verschillende type woningen. Hierbij is de indeling gemaakt op basis van woningtype en bouwjaar.

Tabel 3.1 Voorbeeldwoningen RVO

	<1945	1945-1964	1965-1974	1975-1991	1992-2018
Vrijstaand		1	2	3	4
2 <sup>^</sup> 1		5	6	7	8
Rij	9	10	11	12	13
Maisonnette		14	15	16	17
Galerij		18	19	20	21
Portiek	22	23	24	25	26
Overig flat		27	28	29	30

Het aantal woningen in elke categorie is per eind 2018 als volgt verdeeld.

Tabel 3.2: Aantal woningen per categorie (stand eind 2018)

	<1945	1945-1964	1965-1974	1975-1991	1992-2018	totaal
Vrijstaand	242.793	218.922	110.633	214.440	338.815	1.125.603
2 <sup>^</sup> 1	157.366	141.083	132.016	217.351	329.550	977.367
Rij	587.873	465.088	563.394	852.909	671.012	3.140.276
Maisonnette	127.017	109.948	20.453	91.210	75.439	424.066
Galerij	5.620	62.271	161.766	105.765	214.406	549.829
Portiek	287.754	259.788	104.126	137.785	133.673	923.126
Overig flat	55.078	48.649	116.212	121.290	259.405	600.634
	1.463.500	1.305.750	1.208.600	1.740.750	2.022.300	7.740.900

Duidelijk blijkt dat de rijwoningen in Nederland de grootste categorie woningen uitmaken. Ook

vrijstaande woningen, twee-onder-één-kapwoningen en flatgebouwen zijn echter goed vertegenwoordigd.

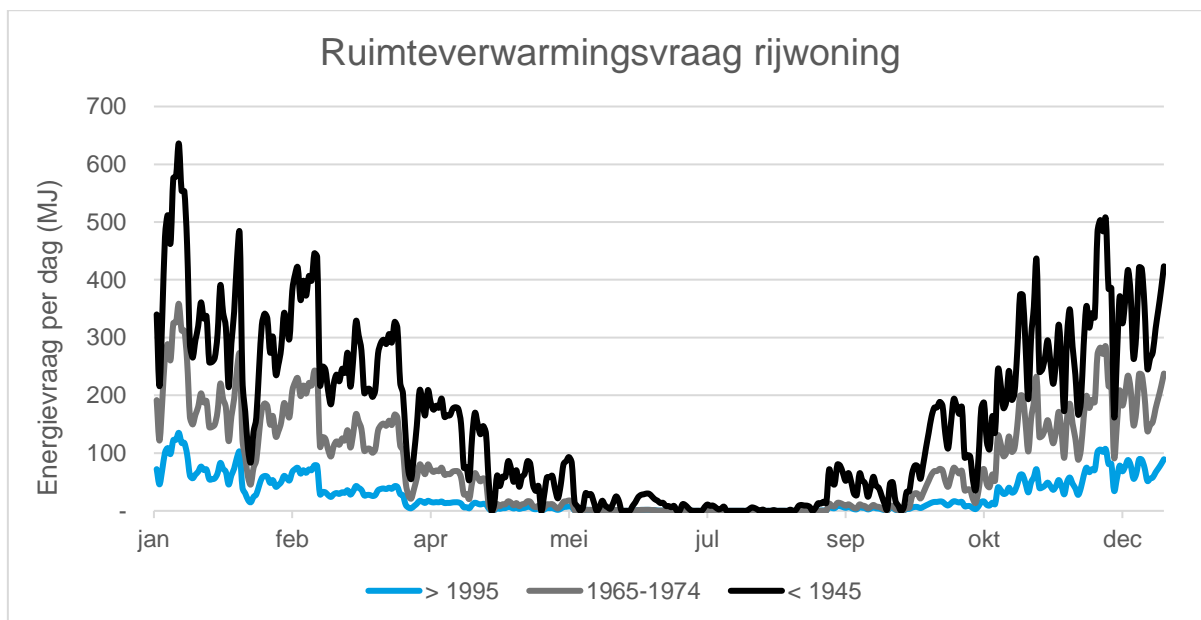
<sup>1</sup> <https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/4.%20Brochure%20Voorbeeldwoningen%202011%20bestaande%20bouw.pdf>



### 3.2 Energievraag ruimteverwarming

Van al deze woningen zijn de bouwfysische kenmerken vastgelegd door RVO. Op basis van deze bouwfysische eigenschappen is van de meest voorkomende woningen de energievraag voor

ruimteverwarming doorgerekend. In onderstaande figuur is als eerste inzicht gegeven in hoe het vraagpatroon van een woning varieert met de leeftijd van de woning.



Figuur 3.1 Vraagpatroon rijwoning afhankelijk van leeftijd van de woning

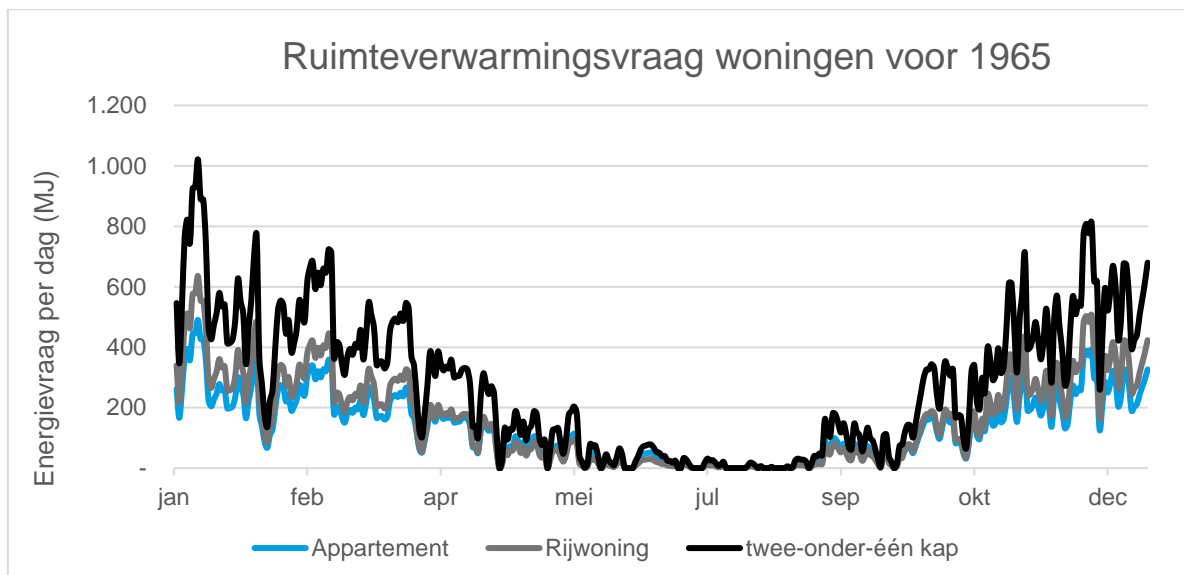
Uit de figuur blijken duidelijk een aantal effecten van het bouwjaar van de woning op het vraagprofiel:

- Als eerste is direct duidelijk dat oudere woningen (en daarmee slechter geïsoleerde woningen) een veel hogere warmtevraag hebben. De piek in de warmtevraag ligt aanzienlijk hoger.
- Daarnaast is het stookseizoen ook aanmerkelijk langer. Bij de nieuwste woningen valt circa twee derde deel van de jaarvraag in de maanden december tot februari. Voor de oudste

woningen valt bijna de helft van de jaarvraag buiten deze wintermaanden.

- Het laatste effect dat zichtbaar is, is dat het profiel wel redelijk gelijkvormig is. Dit is ook logisch, omdat het voor alle woningen tegelijk buiten koud is, en de buitentemperatuur de belangrijkste bepalende factor is in de warmtevraag.

Vervolgens is inzichtelijk gemaakt wat het effect is van het soort woning op de warmtevraag. Dit is weer gegeven in de volgende figuur.



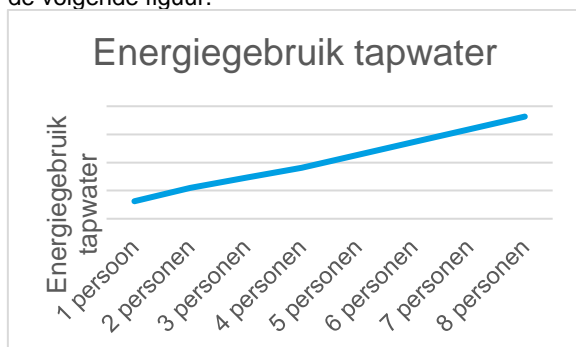
Figuur 3.2: Energievraag oude woningen

Uit deze analyse blijkt dat de variatie in het soort woning met name impact heeft op de hoogte van de warmtevraag; veel minder op de lengte van het stookseizoen.

Vrijstaande woningen zijn niet doorgerekend, maar in de praktijk komt het erop neer dat deze min of meer gelijk zijn aan 2 twee-onder-één-kapwoningen.

### 3.3 Energievraag tapwater

De energievrage voor het gebruik van warm tapwater is in de praktijk min of meer gelijkmatig verdeeld over het jaar. Er blijkt sprake te zijn van een basisgebruik, en aanvullend een min of meer gelijke toename voor extra personen in een woning. Dit is weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 3.3 Energiegebruik tapwater

### 3.4 Selectie profielen

Om te bepalen in hoeverre de toepassing van warmteopslag in woningen haalbaar is, is het van belang een goed beeld te vormen van de verschillende situaties. Tegelijk is voor het overzicht er ook voor gekozen het aantal verschillende vraagprofielen beperkt te

houden. Bij de keuze voor de selectie van de profielen zijn de volgende varianten gemaakt:

- Een veel voorkomend profiel met een gemiddelde energievrage
- Een royaal profiel met een hoge warmtevraag
- Een zuinig profiel met een lage warmtevraag
- Een profiel voor collectieve warmtelevering in appartementen.

#### Gemiddeld profiel

De keuze voor een veel voorkomend profiel is gebaseerd op een rijwoning van circa 1970-1980. Dit betreft de periode waarin woningen heel beperkt werden geïsoleerd. Deze woning wordt bewoond met gemiddeld 2,7 personen. Dit profiel is gebaseerd op 3 personen.

#### Royaal profiel

Dit profiel betreft een woning met een relatief forse warmtevraag, verdeeld over een breed stookseizoen. Dit betreft een oude (<1965) vrijstaande woning. Ook de aanwezigheid van een relatief groot gezin is hier gunstig, omdat dit de warmtevraag verder vergroot. In dit profiel is uitgegaan van een bezetting met 5 personen.

#### Zuinig profiel

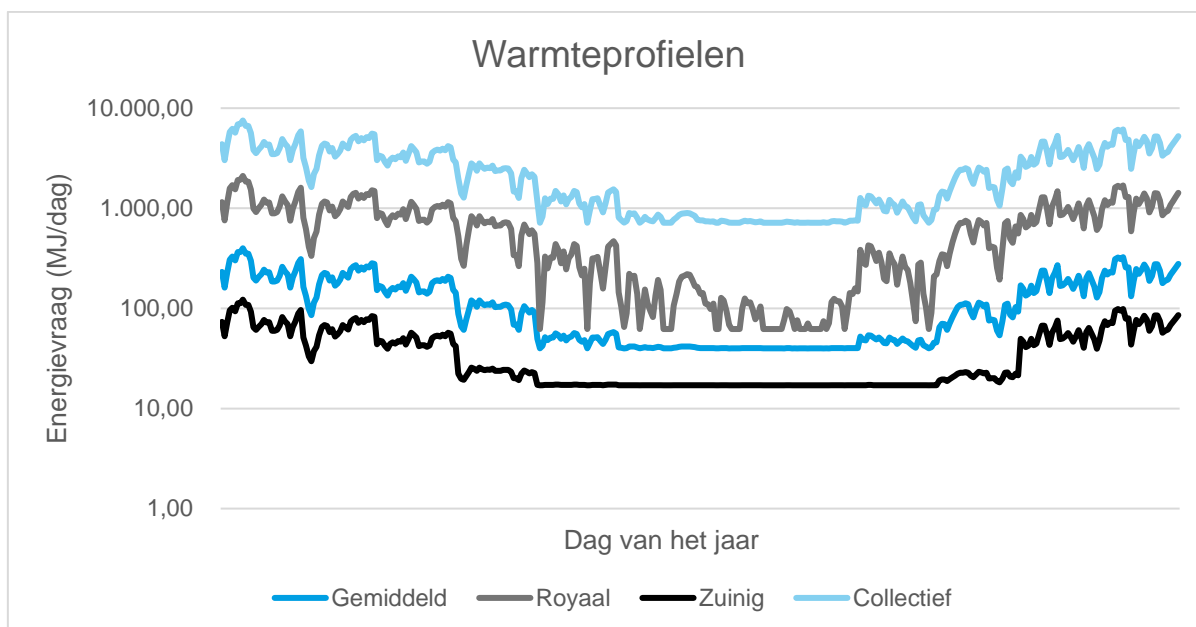
Dit profiel betreft een woning met een relatief lage warmtevraag, verdeeld over een smal stookseizoen. Dit betreft een nieuw (>1995) appartement. Ook de aanwezigheid van weinig personen is hier gunstig, omdat dit de warmtevraag laag houdt. In dit profiel is uitgegaan van een bezetting met 1 persoon.

### Collectief profiel

Hierbij is uitgegaan van een veel voorkomend appartementsgebouw met 24 wooneenheden. De

bouwperiode is 1965-1975 en de gemiddelde bezetting bedraagt 2 personen.

De vier warmteprofielen zijn hieronder weergegeven.



Figuur 3.4 Overzicht vier warmteprofielen (let op: logaritmische schaalverdeling voor zichtbaarheid)

## 4 Analyse opslagtechnieken

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van de verschillende technieken voor de opslag van warmte. Als eerste zijn de technische kaders voor de verschillende technieken opgenomen. Vervolgens is een inventarisatie gemaakt van de verschillende technieken en wat daarin het beschikbare aanbod is in de markt. Uit de beschikbare technieken en het potentieel zijn vervolgens kansrijke opties geselecteerd voor toepassing in woningen.

### 4.1 Kaders

Er bestaan verschillende technieken om warmte op te slaan. Deze technieken zijn hieronder geanalyseerd. Vooraf zijn er echter de belangrijkste kaders om geschikt te zijn voor de beoogde toepassing opgesteld.

#### Temperatuur

Het eerste kader wordt gevormd door de temperatuur van de opslag. Hierbij geldt bij voorkeur een ondergrens van 60 °C. Dit omdat dit de minimale bereidingstemperatuur is voor warm tapwater. Er zijn op dit moment ontwikkelingen in de markt om deze grens wat naar beneden bij te stellen. Daarom is voor dit onderzoek een minimale opslagtemperatuur van 55 °C verondersteld.

Het is ook mogelijk de warmteopslag alleen in te zetten voor ruimteverwarming. In dat geval zijn temperaturen van 40 °C ook nog acceptabel. Voor dit onderzoek geldt daarom een temperatuur van 55 °C als voorkeurswaarde. Wanneer dit niet mogelijk is, worden ook lagere temperaturen meegenomen.

Tegelijk ligt er ook een grens aan de maximale opslagtemperatuur. Hoewel opslag op een hogere temperatuur voor het ontladen geen probleem vormt (de temperatuur kan immers door bijmenging altijd terug worden gebracht), vormt dit wel een knelpunt voor het laden. De warmte wordt namelijk opgewekt met behulp van een warmtepomp. Hiervoor geldt dat het rendement terugloopt bij de opwekking van hogere temperaturen. Daarnaast zijn warmtepompen doorgaans technisch niet in staat om temperaturen te maken die hoger zijn dan 70 °C. Ook op dit vlak zijn er echter ontwikkelingen. Daarom is de bovenkant van

het zoekgebied qua opslagtemperatuur gezet op circa 80 °C.

#### Opslagcapaciteit

Een tweede belangrijk item is de opslagcapaciteit. De bodem van de opslagcapaciteit wordt bepaald door een minimale opslagperiode van 1 etmaal. Kleinere opslagperioden zijn niet direct zinvol, omdat warmtepompen in woningen al voorzien zijn van een buffer voor warm tapwater. Met dit buffer is het al mogelijk om enkele uren te schuiven in de warmtevraag. Als minimale opslagcapaciteit wordt dan ook 1 etmaal aangehouden. Voor de verschillende vraagprofielen resulteert dat in de volgende minimale opslagcapaciteit.

Tabel 4.1 Minimale opslagcapaciteit (1 etmaal)

Vraagprofiel	Benodigde capaciteit (MJ)
Gemiddeld	398
Royaal	2.105
Zuinig	122
Collectief	7.531

#### Technische kaders

Er zijn veel verschillende materialen die gebruikt kunnen worden voor warmteopslag, echter is de keuze voor een materiaal afhankelijk van de uiteindelijke toepassing. De eigenschappen van deze materialen bepalen grotendeels de prestaties van het systeem. Het is belangrijk om rekening te houden met de volgende eigenschappen:

- Een hoog thermisch geleidingsvermogen zorgt ervoor dat de laad en ontlad snelheid van het systeem verhoogd wordt.
- Hoge thermische stabiliteit kan mogelijk leiden tot een hogere opslagcapaciteit en een groter aantal opslagcycli.
- Hoge chemische stabiliteit zorgt voor een langere levensduur van de opslagsystemen.
- Materialen moeten niet corrosief zijn, corrosie van het systeem heeft erg nadelige effecten voor de levensduur.
- De materialen moeten niet giftig en niet brandbaar zijn.

- Ook is het belangrijk dat de materialen voldoende beschikbaar zijn
- Tot slot hebben de materialen bij voorkeur een lage prijs.

## 4.2 Opslagtechnieken

In bijlage I is een uitgebreide analyse van de opslagssystemen opgenomen. Daarnaast hebben diverse marktpartijen gesproken over dit onderwerp. De resultaten hieruit zijn opgenomen in bijlage III. De belangrijkste resultaten uit de literatuurstudie en de interviews zijn hieronder opgenomen.

Voor de opslag van warmte kan gebruik gemaakt worden van een aantal verschillende basisprincipes:

- Opslag voelbare warmte
- Opslag in faseovergangsmaterialen (PCM's)
- Opslag in chemische verbindingen (TCM's)
- Overige

### 4.2.1 Voelbare warmte

De oudste voorbeelden van opslag van voelbare warmte zijn een pan met heet water die in een stoof werd gezet en zo nog een tijd lang nagaarde. Ook het strijkijzer dat vroeger op de kachel werd gezet en zo opwarmde, berustte op dit principe. In de huidige installatietechnische wereld wordt deze techniek vooral ingezet in de vorm van waterbuffers. Hierbij worden kleine (in woningen) of grote (in de glastuinbouw) waterbuffers gebruikt om warmte op te slaan. Vrijwel elk zonneboilersysteem maakt gebruik van opslag in een watervat omdat warmteaanbod en -vraag niet parallel lopen.

Voor de opslag van voelbare warmte is het belangrijk dat het materiaal:

- Een hoge soortelijke warmte heeft;
- Een hoge dichtheid heeft;
- Beschikbaar is tegen een laag tarief;

Er kunnen twee hoofdgroepen van materialen voor de opslag van voelbare warmte onderscheiden worden: vaste en vloeibare opslagmaterialen.

Enkele voorbeelden van vaste opslagmaterialen zijn steen, beton en ijzer. Een voordeel van deze vaste materialen is dat ze geen lekkage problemen hebben. De relatief lage specifieke warmtecapaciteit is echter een groot nadeel en in vergelijking met water zijn de kosten ook relatief hoog. Met een temperatuur

verschil van 25 °C hebben deze materialen dan een volume opslag capaciteit van ongeveer 50 MJ/m<sup>3</sup>. Vloeibare opslagmaterialen worden voornamelijk gecategoriseerd als water en oliën, waarvan water het meest geschikte materiaal is. Dit komt voornamelijk door de relatief hoge specifieke warmte capaciteit, de lage kosten en de grote beschikbaarheid van water. In vergelijking met de eerder benoemde opslagcapaciteit van vaste materialen heeft water een volume opslagcapaciteit van 105 MJ/m<sup>3</sup> bij een temperatuurverschil van 25 °C. De energie opslagcapaciteit van water is dus ongeveer twee keer zo groot als dat van vaste opslagmaterialen bij opslag onder 100 °C.

### 4.2.2 PCM's

Bij faseovergangsmaterialen wordt thermische energie opgeslagen of vrij gegeven doordat een opslagmateriaal van fase veranderd; vast naar vloeibaar, vloeibaar naar gas en andersom. Deze materialen worden PCM's (phase change materials) genoemd. Dit is een erg efficiënte techniek met een hoge opslag capaciteit. In vergelijking met voelbare warmte, kunnen PCM's meer warmte opslaan met een veel kleiner temperatuurverschil tussen het opslaan en vrijgeven van warmte. Waar de temperatuur van de opslagmaterialen bij de opslag van voelbare warmte toeneemt bij het opslaan van energie, absorberen PCM's het grootste deel van de opgeslagen energie juist op een bijna constante temperatuur gedurende de faseovergang.

#### Classificatie van PCM's

Er is een grote hoeveelheid PCM's beschikbaar welke allemaal een verschillend faseovergangstemperatuur hebben. De belangrijkste voor de beoogde toepassing zijn paraffine en zouthydraten.

#### Paraffine

Paraffine zijn stoffen met een smeltemperatuur variërend tussen de 0 en 120 °C. Naast de algemene voordelen van organische PCM's is een voordeel van paraffine dat deze een goede opslagdichtheid heeft. Paraffine heeft een opslagcapaciteit van ongeveer 180 kJ/kg.

Er zijn ook enkele nadelen verbonden aan paraffine materialen. Zo heeft paraffine een lage thermische geleidbaarheid van ongeveer 0,2 W/mK. Omdat pure paraffine erg duur is en hoge raffinage nodig heeft worden er goedkopere alternatieven gebruikt; paraffine wax. Dit is een mengsel van verschillende paraffine soorten.

### Zouthydraten

De smelttemperatuur van zouthydraten ligt tussen de 5 en 130 °C. Wanneer ze worden vergeleken met paraffine, dan is de dichtheid van zouthydraten ongeveer twee keer zo groot (1700 kg/m<sup>3</sup>). Wanneer dit gecombineerd wordt met de faseovergang enthalpie die gelijkwaardig is (200 J/g), zorgt dit ervoor dat er een hogere opslag capaciteit behaald wordt, namelijk 350 MJ/m<sup>3</sup>. Hiernaast is ook de thermische geleidbaarheid significant hoger met een waarde van 0,5 W/mK.

De voornaamste nadelen van zout hydraten zijn fase-scheiding en corrosie.

### 4.2.3 TCM's

TCM's zijn materialen waarbij de energie ligt opgeslagen in een chemische verbinding. Wanneer 2 chemische stoffen bij elkaar worden gebracht treedt een proces op, waarbij warmte vrijkomt. Door het toevoegen van warmte wordt het proces omgekeerd, en splitsen de twee stoffen weer. Deze twee stoffen kunnen uit elkaar worden gehaald en gescheiden worden opgeslagen.

Doordat er sprake is van gescheiden opslag van de beide stoffen, kan warmte in principe onbeperkt en zonder energieverlies worden opgeslagen. Dit is dan ook een groot voordeel van TCM's. Daarbij kan de energiedichtheid oplopen tot meer dan 2.000 MJ/m<sup>3</sup>. Overigens is de toepassing van TCM's niet helemaal zonder energieverlies. Doordat het product na het opladen wel afkoelt, is er wel verlies van voelbare warmte. Dit warmteverlies is circa 10% van de opgeslagen energie. Dit verlies wordt niet groter bij een langere opslagduur.

Aan de toepassing van TCM's kleven echter twee belangrijke nadelen. Als eerste is er altijd sprake van een belangrijk temperatuurverschil tussen de laad- en ontladtemperatuur. Een verschil van 20 °C is laag. Dit belemmert de toepassing voor het beoogde doel. Het tweede nadeel is dat voor de meeste bekende TCM's de temperaturen fors hoger liggen dan de kaders in deze studie. Dit wordt veroorzaakt doordat het onderzoek naar TCM's voorgericht is op industriële processen. Nader onderzoek hiernaar is dan ook aanbevolen.

### 4.2.4 Overige opslagtechnieken

Naast deze drie genoemde opslagtechnieken zijn er andere opslagsystemen die geschikt zijn om warmte op te slaan. Deze voldoen echter om één of meerdere redenen niet aan de gestelde kaders.

- WKO. Dit betreft warmte- en koudeopslag in de bodem. Deze techniek is in staat om grote hoeveelheden warmte op te slaan. Qua temperatuurtraject wijkt deze opslag echter af van het kader. De opslagtemperatuur is normaal gesproken maximaal 25 °C. Om de warmte te benutten, is dus op moment van de warmtevraag alsnog een warmtepomp benodigd. Hiermee kan dit systeem niet gebruikt worden om de elektriciteitsvraag te reduceren.
- Gesloten bodemwarmtewisselaars. Hoewel de uitvoering anders is dan bij WKO, is het doel hetzelfde: namelijk het opslaan van laagwaardige warmte (max 25 °C). Om bovengenoemde reden is dit systeem dus eveneens niet geschikt voor het reduceren van de elektriciteitsvraag tijdens piekmomenten.
- Geothermie: Dit betreft een systeem waarbij er warmte aan de bodem wordt onttrokken op grotere dieptes (enkele kilometers). Deze warmte is op het juiste temperatuurniveau, waardoor deze zonder de inzet van een warmtepomp bruikbaar is. Hoewel dit systeem ingezet zou kunnen worden voor de opslag van warmte, worden dergelijke systemen doorgaans alleen ingezet voor de onttrekking van warmte. Het eventueel terugbrengen van warmte zou alleen gedaan worden om de productieperiode te verlengen; niet om hogere piekcapaciteiten te leveren. De normale productieperiode van dergelijke systemen bedraagt al snel 30 jaar, waardoor de horizon van deze systemen afwijkt van het beoogde doel in deze studie.

Waterstofopslag. Hierbij wordt er elektriciteit gebruikt wanneer dit voldoende beschikbaar is om waterstof te produceren. Wanneer er dan tekorten dreigen te ontstaan, kan het geproduceerde waterstof worden ingezet om elektriciteit te produceren of direct warmte op te wekken. Hiermee voldoet dit systeem aan hetzelfde doel als beoogd in deze studie, maar is er geen sprake van opslag van thermische energie. Dit geldt ook voor systemen waarbij de



verbrandingsreactie in 2 stappen wordt uitgevoerd, zodat lucht en brandstof niet direct met elkaar in contact komen.

- Levensduur
- Milieu-impact
- Prijs (huidig en potentie)
- Onderhoud

### 4.3 Beoordeling technieken

De verschillende technieken zijn vergeleken op verschillende relevante aspecten.

- Stand der techniek
- Range opslaginhoud (GJ)
- Specifieke opslagcapaciteit (GJ/m<sup>3</sup>)
- Verwachte ontwikkelingen
- Specifieke opslagtemperaturen
- Energieverliezen

#### 4.3.1 Voelbare warmte

Als eerste zijn de meest realistische vormen van de opslag van voelbare warmte bekeken. Hierbij is de opslag in water eigenlijk de enige realistische variant. Op gebied van opslagdichtheid (GJ/m<sup>3</sup>) is gietijzer iets beter dan water, maar op alle andere aspecten heeft water veruit de voorkeur. De prestatie op de belangrijkste aspecten is als volgt.

Tabel 4.2 Belangrijkste eigenschappen water als opslagmedium

Materiaal	Water
Stand der techniek	Uitontwikkeld
Range opslaginhoud	0-25.000 GJ (bij 30K ca. 200 m <sup>3</sup> )
Opslagtemperatuur	maximaal 100 °C
Specifieke opslagcapaciteit	125 MJ/m <sup>3</sup> (bij delta T van 30 K)
Energieverliezen	Afhankelijk van isolatie opslagvat
Levensduur	Onbeperkt (opslagmedium), 30 jaar voor buffer
Milieu-impact	Nihil
Prijs	Water: € 1,50/m <sup>3</sup> Opslagvat: afhankelijk van grootte
Onderhoud	Geen veroudering van opslagmedium

#### 4.3.2 PCM's

De tweede categorie betreft die van de PCM's. Zoals toegelicht zijn hier twee potentiële categorieën die gebruikt kunnen worden: de paraffines en zouthydraten. In de volgende tabel zijn de verschillende materialen naast elkaar gezet.

Zoals blijkt uit het overzicht in bijlage I zijn er bij elke categorie diverse PCM's te verkrijgen die qua specificaties vrij dicht bij elkaar liggen. Er is daarom voor beide categorieën een soort genomen met gunstige prestaties.

Tabel 4.3 Belangrijkste eigenschappen PCM's als opslagmedium

Materiaal	Paraffine	Zouthydraat
Stand der techniek	PCM Commercieel beschikbaar	PCM commercieel beschikbaar
Range opslaginhoud	Toepassing nog niet commercieel beschikbaar	Momenteel beperkt beschikbaar; capaciteit tot 38 MJ
Opslagtemperatuur	Circa 70 °C	68-78°C
Specifieke opslagcapaciteit	229 MJ/m <sup>3</sup> (productwaarde) 177 MJ/m <sup>3</sup> (effectief bij 50% PCM/50% water)	414 MJ/m <sup>3</sup> (productwaarde) 270 MJ/m <sup>3</sup> (effectief bij 50% PCM/50% water)
Energieverliezen	Afhankelijk van isolatie opslagvat	Afhankelijk van isolatie opslagvat
Levensduur	Onbekend, theoretisch lang	Veroudering door zoutneerslag et cetera. 15 jaar moet haalbaar zijn.
Milieu-impact	Olie-gebaseerd product. Vervuilend bij lekkage Brandbaar	Agressief product; vervuilend bij lekkage

Prijs	Vergelijkbaar met zouthydraten	€ 3.500 voor systeem van 38 MJ
Onderhoud	Mogelijk vervangen van medium na 15 jaar	Vervanging van medium en opslagvat na 15 jaar

Het verschil tussen beide vormen van PCM's is dat zouthydraten een hogere energiedichtheid hebben, maar lastiger toepasbaar zijn. Dit maakt dat de commerciële toepassing van paraffines dichterbij is dan die van zouthydraten.

Het belangrijkste voordeel van een systeem met PCM's boven wateropslag is dat het benodigde volume tot 50% kleiner is.

De investeringen in de PCM's op basis van zouthydraten zijn gebaseerd op marktprijzen voor beschikbare systemen. De verwachting is dat systemen op basis van paraffines niet significant hiervan zullen afwijken.

Vanwege de wat complexere bouw dan een waterbuffer is gerekend met een vaste meerprijs van € 2.500. De prijs voor het opslagmedium is op basis van de beschikbare systemen geraamd op € 1.000 per m<sup>3</sup>

#### 4.3.3 TCM's

Voor de TCM's geldt dat de techniek nog sterk in ontwikkeling is. Dit geldt zeker voor de toepassing van warmteopslag in de gebouwde omgeving. Om deze techniek toch mee te nemen in de businesscases is hieronder de beoordeling zo goed mogelijk gemaakt.

Uit het materiaaloverzicht uit de literatuur (zie bijlage I) blijkt dat de composiet CaCl<sub>2</sub>-(30%wt)-silicagel het meest geschikt is. De andere materialen hebben of een erg hoge laadtemperatuur (>90 °C), wat voor een woningbouwwarmtepomp erg hoog is, of een erg lage ontladtemperatuur, of een lage energiedichtheid. De belangrijkste parameters van dit materiaal zijn in de volgende tabel opgenomen.

Overigens blijkt uit interviews met kennisinstellingen dat deze ook andere materialen onderzoeken met potentieel betere specificaties.

Tabel 4.4 Belangrijkste eigenschappen CaCl<sub>2</sub>-(30%wt)-silicagel als opslagmedium

Materiaal	Composiet, CaCl <sub>2</sub> -(30%wt)-silicagel
Stand der techniek	Sterk in ontwikkeling; niet marktrijp. Verwachting eerste marktrijpe producten over circa 10 jaar.
Range opslaginhoud	Nog geen marktrijpe producten
Opslagtemperatuur	90 °C (laden) en 60 °C (ontladen)
Specifieke opslagcapaciteit	822 MJ/m <sup>3</sup> (alleen materiaal) Ca 450 MJ/m <sup>3</sup> bij 50% effectieve benutting
Energieverliezen	Circa 10%, ongeacht opslagduur
Levensduur	Onbekend; uitgangspunt is 15 jaar
Milieu-impact	Afhankelijk van gebruikt medium; giftigheid en /of brandbaarheid zijn waarschijnlijk.
Prijs	Onbekend
Onderhoud	Uitgangspunt is vervanging van medium en opslagsysteem na 15 jaar

De investering in een TCM systeem is nu nog niet goed vast te stellen, omdat dit product nog sterk in ontwikkeling is. Vanuit ontwikkelaars wordt aangegeven dat het doel is om een basisvat te ontwikkelen van een paar honderd liter voor een prijs van maximaal € 5.000. Vanwege de veel complexere bouw (met opslagmateriaal in 2 toestanden) is een vaste opslag voor TCM's is gerekend van € 5.000 bovenop de prijs van een waterbuffer. Voor de kosten voor het medium zelf is gerekend met € 2.000 per m<sup>3</sup> op basis

van indicaties vanuit interviews. Deze post is echter nog onzeker. Het is niet uitgesloten dat een lagere prijs haalbaar blijkt te zijn.

#### 4.3.4 Conclusies

Op basis van de genoemde beoordeling blijken de volgende conclusies:

- Voor opslag van voelbare warmte is het gebruik van water de meest aantrekkelijke, gezien de opslagcapaciteit, gewicht, beschikbaarheid en prijs.

- Voor opslag in PCM's zijn meerdere materialen beschikbaar. De verschillen tussen deze systemen zijn echter beperkt. Als basis voor de businesscase is het systeem met zouthydraten genomen, dat momenteel commercieel beschikbaar is.
- De opslag in TCM's is dermate nieuw dat hier nog geen sprake is van een duidelijk beeld welke optie de meest geschikte is. Voor de businesscase is uitgegaan van de specificaties van het materiaal dat nu de meest gunstige eigenschappen lijkt te hebben.

## 5 Usecase

---

Een warmteopslag in een woning heeft impact op de ervaring van de gebruiker. Deze ervaring van de gebruiker is essentieel voor het succesvol toepassen van een dergelijke techniek. Daarom wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de relevante aspecten voor de bewoner van de toepassing van een warmteopslagsysteem.

### 5.1 Relevante thema's

De toepassing van een warmteopslagsysteem in de woning heeft op diverse punten impact op de woning. Deze verschillende invloeden zijn hieronder benoemd en uitgewerkt.

#### *Geluid*

Een belangrijk item voor bewoners is de mate waarin een dergelijke oplossing geluid produceert. Diverse nieuwe technieken zijn op dit vlak gestruikelde. Dit geldt bijvoorbeeld voor de eerste projecten met warmteterugwinning uit ventilatielucht en met de toepassing van warmtepompen. Wanneer het geluidsniveau te hoog is, leidt dit tot onvrede van de bewoners.

Het probleem van geluidsoverlast door installaties is voor nieuwbouw inmiddels grotendeels opgelost vanwege de geluidseis die is opgenomen in het Bouwbesluit. Hierbij wordt de eis gesteld dat installaties ten hoogte mogen leiden tot een geluidsniveau van 30 dB in verblijfsruimtes. Voor officiële verbouwingen is deze eis 40 dB. Bij toepassing van deze techniek in bestaande gebouwen is er echter geen formele eis van toepassing. Het is dan toch van belang dat dit onderdeel voldoende aandacht krijgt.

Het onderwerp geluid hoeft geen groot probleem te zijn voor de techniek van warmteopslag. De enige geluidsbron die aanwezig is in het proces is namelijk mogelijk stromingsgeluid. Opslagsystemen zelf produceren geen noemenswaardig geluid. Dit geldt zowel voor opslag in voelbare warmte als in PCM's of TCM's.

#### *Ruimtebeslag*

Een volgend belangrijk thema is het ruimtebeslag van de warmteopslag. Hierbij is zowel de plaats in de woning, als de grootte van het ruimtebeslag relevant.

Wat betreft de plaats in de woning is het technisch gezien wenselijk dat de opslag wordt opgesteld in de buurt van de warmteopwekker (warmtepomp). In dat geval is de regeling het eenvoudigst, is er sprake van een minimum aan leidingwerk en blijven energieverliezen beperkt. Aan de andere kant is plaatsing bij de warmteopwekker niet strikt noodzakelijk.

Voor de gebruiker is er waarschijnlijk wel een significant verschil in de plaats waar deze geplaatst wordt. Warmtepompen die gekoppeld zijn aan een bodemopslag, worden doorgaans op de begane grond geplaatst. In het algemeen is de vrij beschikbare ruimte op de begane grond beperkt. Naar verwachting is de bereidheid van de consument om daar ruimte in te leveren beperkt. Andere mogelijke locaties zijn het plaatsen van de opslag buiten de woning (al dan niet ondergronds), in de kruipruimte (is zeker bij een warmtepomp op de begane grond dicht bij de opwekker) of op de zolderverdieping (alleen van toepassing bij grondgebonden woningen).

#### *Comfort*

Wellicht het belangrijkste item voor de gebruikers is de mate van impact op het comfort van de woningen. Hierbij zijn 2 extremen denkbaar.

Aan de ene kant is het een optie dat als randvoorwaarde wordt gesteld dat de aanwezigheid van een warmteopslag er nooit toe mag leiden dat er negatieve impact is op het comfort. Dit kan door de warmtepomp nooit te blokkeren wanneer de opslag onvoldoende gevuld is. In dat geval kan het voorkomen dat er beperkt elektriciteit beschikbaar is, terwijl de warmtepomp dan toch inschakelt. Dit zal echter bij juist opslagmanagement zelden voorkomen en zeker niet bij veel woningen tegelijk.

Het tweede uiterste is dat een bewoner accepteert dat er (regelmatig) sprake is van beperkte

beschikbaarheid van warmte, omdat bijvoorbeeld de schaarste qua beschikbaarheid van elektriciteit langer duurt dan verwacht. Wanneer dit optreedt kan de warmteopslag al leeg zijn, terwijl de capaciteit van het elektriciteitsnet nog steeds beperkt is, waardoor de warmtepomp nog niet kan inschakelen. In dat geval ervaart de bewoner tijdelijk een verminderde beschikbaarheid van warmte.

De verwachting is dat de gebruikers op dit moment zullen kiezen voor de eerste variant. Gezien het gemiddelde welvaartsniveau in Nederland, zullen de meest mensen niet bereid zijn in te leveren op comfort tegen een (kleine) financiële vergoeding.

#### Onderhoud

Een volgend punt betreft de 'hinder' die de gebruiker mag ervaren bij het aanbrengen van het systeem en bij periodiek onderhoud.

De verwachting is dat de installatie niet bijzonder veel tijd hoeft te vragen. Het betreft namelijk alleen het plaatsen van de opslag; het aansluiten van de opslag en het vullen van de opslag. De plaatsing en aansluiting zullen sterk overeenkomen met die van een boiler. Hiermee is binnen de branche ruime ervaring om dit met beperkte overlast te doen. Het vullen van het systeem is afhankelijk van het type opslag. Wanneer het een watergevuld systeem is, betreft dit proces eveneens een soortgelijk proces als het vullen van een boiler. Bij toepassing van PCM's of TCM's is het vullen echter wel een extra activiteit. Dit materiaal dient namelijk apart te worden meegenomen en aangebracht.

Het periodiek onderhoud van een dergelijk systeem zal naar verwachting klein zijn. Dit zou goed meegenomen kunnen worden in het regulier onderhoud van bijvoorbeeld de warmtepomp. Bij gebruik van PCM's en TCM's kan er mogelijk sprake zijn van veroudering, waardoor het vervangen van de inhoud periodiek noodzakelijk is.

#### Eigenaarschap

Een laatste aspect dat niet direct invloed heeft op de beleving van de consument, maar wellicht wel een significante invloed heeft betreft het eigenaarschap van de opslagvoorziening. Ook hierbij zijn meerdere sporen denkbaar.

Een eerste spoor is dat de installatie wordt geplaatst, beheerd en aangestuurd door de netbeheerder. Deze is eigenaar van de installatie en plaatst deze om niet in een woning. Het voordeel voor de netbeheerder is het vermijden van (extra) netverzwaring.

Een alternatief is dat de consument zelf investeert in de warmteopslag. Hoewel een enkele consument geen bezwaar zal hebben tegen een niet rendabele investering, geldt in het algemeen dat tegenover de investering een vergoeding dient te staan om de investering terug te kunnen verdienen. Deze vergoeding kan een vaste vergoeding zijn vanuit de netbeheerder, maar dit kan ook komen vanuit een flexibilisering van de energietarieven, waarbij er betaald wordt naar dat er capaciteit dan wel energie beschikbaar is.

## 5.2 Enquête

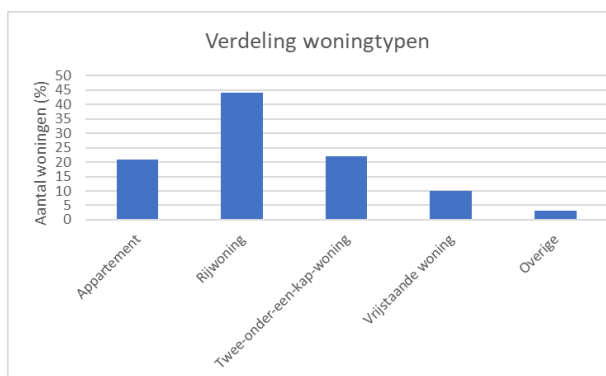
De hiervoor genoemde thema's betreffen punten die kunnen verschillen per consument. Om toch een goed beeld te krijgen van de mening van consumenten is een korte enquête uitgezet<sup>2</sup> op deze punten. Deze is verspreid onder zowel vakspecialisten als consumenten zonder technische achtergrond. In de volgende paragrafen zijn de resultaten uit deze enquête weergegeven. Deze resultaten zijn gebaseerd op 100 ingevulde enquêtes, waarbij er 86 volledig zijn ingevuld.

#### Soort woning

Als eerste is gevraagd naar het soort woning dat mensen hebben. Op deze manier kan nagegaan worden of de antwoorden gerelateerd zijn aan het soort (en daarmee de grootte van de) woning.

De verdeling is als volgt:

<sup>2</sup> De vragenlijst en toelichting bij deze enquête zijn opgenomen in bijlage I. De uitgebreide resultaten zijn hier eveneens opgenomen.



Figuur 5.1 Verdeling woningtypen

Deze verdeling komt redelijk overeen met de verdeling van de totale woningvoorraad in Nederland.

Tabel 5.1 Verdeling woningtypen

Soort woning	Aandeel steekproef	Aandeel Nederland
Vrijstaand	10%	15%
Rijwoning	44%	41%
2 <sup>1</sup> kap	22%	13%
Appartement	21%	27%
Overig	3%	5%

#### Locatie voor opslag

Vervolgens is gevraagd naar de locatie waar bewoners de plaatsing van een warmteopslagsysteem acceptabel zouden vinden. Hieruit blijkt dat de voorkeur uitgaat naar plaatsing

- In de kruipruimte (54%)
- Buiten, ondergronds (43%)
- In de schuur (33%)
- Op zolder (29%)
- In de tuin bovengronds (22%)
- Trapkast (15%)

Overige locaties die worden genoemd als acceptabel zijn in de kelder of op het dak. Duidelijk blijkt dat plaatsing met name acceptabel is in ruimtes waar gebruikers minder hinder ervaren.

Daarnaast blijkt de locatie die acceptabel wordt gevonden afhankelijk te zijn van het type woning. Zo is de acceptatie voor plaatsing in de kruipruimte opvallend laag bij de vrijstaande woning (22%). Plaatsing in de schuur is bij deze doelgroep juist wel acceptabel

(56%). Opvallend bij de appartementen is de relatief hoge acceptatiegraad in de bergingen (44%).

#### Formaat opslag

Het derde onderzochte aspect betreft het formaat dat bewoners acceptabel zouden vinden. Hieruit blijkt dat het formaat van een schoenendoos vrijwel overal acceptabel wordt gevonden. Alleen bij plaatsing ondergronds is het formaat schoenendoos niet realistisch. Bij een groter formaat (60x60x90) zijn alle locaties min of meer gelijkwaardig (40-60%), behalve de trapkast. Plaatsing in de trapkast wordt dan door circa 20% van de mensen acceptabel gevonden. Dit wordt nog vertekend, doordat met name de groep appartementen hier positief over is. Dit komt omdat de trap daar buiten de woning valt.

Bij een nog groter formaat (5 m<sup>3</sup>) zijn alleen ondergrondse oplossingen nog acceptabel.

#### Geluid

Qua geluidsproductie is het beeld dat gegeven wordt vanuit de bewoners homogeen: 21% van de mensen geeft aan helemaal geen geluid te willen ervaren; de meeste mensen (74%) zouden een maximaal geluidsniveau van 35 dB (stille koelkast) acceptabel vinden. Hogere geluidsproducties zijn zelden acceptabel. Hierbij is er geen wezenlijk onderscheid tussen de verschillende woningtypen.

#### Comfort

Het grootste deel van de bewoners (66%) geeft aan nooit hinder te willen ervaren door toepassing van een warmteopslag. Een derde van de mensen is bereid wel incidenteel overlast te ervaren, mits hier een financiële vergoeding tegenover staat. Ook hier is geen wezenlijk verschil tussen de woningtypen.

#### Onderhoud

Op gebied van plaatsing vind de overgrote meerderheid van bewoners (78%) dat plaatsing binnen 1 dag acceptabel is. Een installatieduur tot 3 dagen wordt door nog eend 15% acceptabel gevonden. Bewoners van vrijstaande woningen zijn hierin het coulantst.

Ook qua onderhoud is het beeld uniform: 72% van de bewoners geeft aan dat jaarlijks onderhoud acceptabel is; 17% vindt dat dit maximaal 2-jaarlijks mag zijn.



### *Eigenaarschap*

De laatste vraag die gesteld is betreft het gewenste eigenaarschap. De meerderheid van de mensen (69%) geeft aan dit graag zelf te hebben. Deze mensen zijn bereid hier zelf in te investeren, mits hier een vergoeding tegenover staat. De bedragen die bewoners bereid zijn te betalen variëren van € 1.000 tot onbegrensd, op voorwaarde dat de investering wel wordt terug verdiend.

Ook hier geldt dat het onderscheid naar woningtype opvallend klein is.

### **5.3 Conclusie usecase**

Uit de gehouden enquêtes kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Onder de bewoners is een vrij grote acceptatie voor toepassing van de techniek
- Afhankelijk van de benodigde grootte van het systeem zijn verschillende locaties acceptabel.
- Het formaat 'schoenendoos' kan overal geplaatst worden. Voor grotere afmetingen neemt de plaatsingsbereidheid binnenshuis snel af.
- Bij grotere systemen is er duidelijk de voorkeur voor toepassing ondergronds (binnen of buiten)
- Qua geluid is een beperkte geluidsproductie geen probleem;
- Overlast door het systeem in de vorm van een tijdelijke beperking van de beschikbare warmte is in het algemeen niet gewenst;
- Bewoners hebben een hoge bereidheid zelf te investeren in een opslag, op voorwaarde dat deze investering wel wordt terug verdiend.

## 6 Businesscase

Op basis van de resultaten in voorgaande hoofdstukken is er een businesscase opgesteld voor de toepassing van een kleinschalige warmteopslag. Als eerste zijn de relevante onderdelen van de businesscase besproken. Daarna zijn de resultaten van de businesscase weergegeven. Tot slot is de gevoeligheid bepaald van de verschillende inputparameters.

### 6.1 Parameters businesscase

De businesscase wordt bepaald door een aantal belangrijke parameters. De belangrijkste zijn:

- Investering
- Minderinvestering warmtepomp
- Levensduur
- Onderhoudskosten
- Energieverlies
- Warmtelevering via buffer
- Kostprijs te laden warmte
- 'Opbrengst' warmtelevering
- Reductie vermogensvraag
- Vergoeding vermogen
- Rendementseis en indexatie

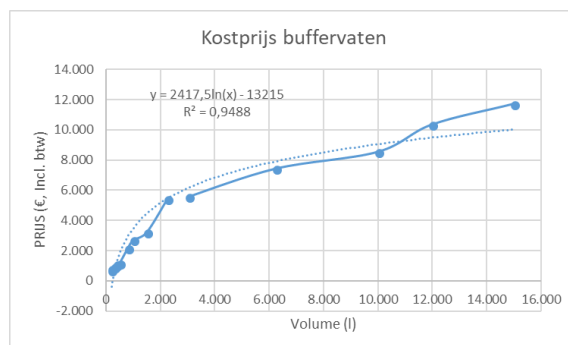
Deze parameters zijn hieronder verder uitgewerkt.

#### 6.1.1 Investering

De investering bestaat in hoofdzaak uit de opslagvoorziening (buffervaten), het opslagmedium, aansluitvoorzieningen, installatie en regeltechniek.

##### Opslagvat

Voor zowel een buffersysteem met water als opslagmedium, als met PCM's geldt dat er een geïsoleerd buffervat is, waarin het opslagmedium zich bevindt. Voor volumes tot circa 500 liter zijn er standaard geïsoleerde boilerkasten te koop. Voor grotere volumes zijn er wel ongeïsoleerde watertanks beschikbaar. Deze kunnen goed aftermarket worden voorzien van isolatie. In de volgende grafiek zijn de kosten voor deze beide systemen opgenomen.



Figuur 6.1 Kostprijs geïsoleerde buffervaten, inclusief trendlijn

De trendlijn door deze waarden is aangehouden als kostprijs voor buffers.

##### TCM's

De kostprijs voor opslag van TCM's is wezenlijk anders, omdat hier gewerkt wordt met 2 verschillende stoffen (of dezelfde stof in 2 toestanden) die gescheiden worden opgeslagen. De kostprijs voor dit systeem is nu nog lastig te maken. In de businesscase is uitgegaan van een prijs van € 5.000 bovenop de prijs van een waterbuffer (zie hoofdstuk 4).

##### Opslagmedium

Het opslagmedium in geval van opslag in waterbuffers is water. De prijs hiervan is in relatie tot de totale investering nihil.

Bij gebruik van PCM's en TCM's zijn de kosten van het opslagmedium niet verwaarloosbaar. Hierbij is gerekend met de volgende prijzen:

- Voor paraffines: € 1.000/m<sup>3</sup>
- Voor zouthydraten: € 1.000/m<sup>3</sup>
- TCM's € 2.000/m<sup>3</sup>

##### Aansluitvoorzieningen

De opslagvoorziening zal moeten worden aangesloten op de warmtepompinstallatie in de woning. De kosten hiervoor bestaan uit het maken van een fysieke koppeling tussen de warmtepomp en de opslagvoorziening. De werkelijke kosten zullen afhangen van de afstand van de opslag tot de warmtepomp. Bij een opslagvoorziening van maximaal 500 liter, wordt ervan uitgegaan dat deze naast de opwekker wordt geplaatst. De kosten voor aansluitmateriaal bedragen dan € 500. Bij grotere opslagvoorzieningen wordt

ervan uitgegaan dat deze geplaatst worden in de kruipruimte, schuur of kelder. De kosten van het aansluitmateriaal worden dan geraamd op € 1.000.

#### *Installatiekosten*

Naast de materialen is er ook arbeid om de warmteopslag aan te plaatsen en aan sluiten. Hierbij zullen de kosten ook sterk variëren met de grootte van het opslagsysteem en de plaats ervan. Bij de raming van deze kosten wordt verondersteld dat bij een maximale grootte van de opslag van 0,5 m<sup>3</sup>, de opslag naast de warmtepomp wordt geplaatst. Hierbij bedragen de installatiekosten € 350 (4 ploeguren). Bij een grootte tot 2 m<sup>3</sup> wordt plaatsing bovengronds verondersteld. De kosten voor installatie bedragen dan € 700 (8 ploeguren). Bij een grootte boven de 2 m<sup>3</sup> wordt plaatsing ondergronds verondersteld. Dit betekent extra kosten voor graafwerkzaamheden. De kosten bedragen dan € 1.500 (2 ploegdagen).

#### *Regeltechniek*

De laatste post in de investeringen betreft de regeltechniek. Hiervoor is een post van € 500 opgenomen.

#### *Onvoorzien*

Over het totaal is een post van 20% onvoorzien opgenomen.

### **6.1.2 Minderinvestering warmtepomp**

Wanneer er een kleinschalige warmteopslag wordt toegepast in de woning, kan deze ingezet worden om de piekvraag te reduceren. In dat geval wordt de vermogensvraag voor verwarming afgevlakt gedurende de bufferperiode. Hiermee is het mogelijk om een kleinere warmtepomp toe te passen, wat leidt tot een lagere investering voor de warmtepompinstallatie.

Dit voordeel zal in de praktijk echter zeer beperkt zijn. Wanneer er gekozen wordt voor een kleinere warmtepomp, is daarmee de flexibiliteit in de warmteopwekking weg. Juist bij het kiezen voor een kleinere warmtepomp, zal deze juist deze hele bufferperiode moeten draaien om te voorkomen dat de woning zonder warmte komt. De flexibiliteit om gedurende enkele uren helemaal uit te schakelen zou daarmee verdwenen zijn.

Om maximaal voordeel te kunnen bereiken van de buffering, zou er zelfs een grotere warmtepomp gekozen moeten worden. Dan kan namelijk in hele korte tijd (wanneer er veel elektriciteit beschikbaar is) de

buffer worden geladen, zodat er een langere periode overbrugd kan worden waarin de warmtepomp helemaal is uitgeschakeld. In de businesscase zijn we uitgegaan van handhaving van dezelfde capaciteit warmtepomp als dat er nodig zou zijn zonder kleinschalige warmteopslag.

### **6.1.3 Levensduur**

De levensduur van de installatie dient ten minste 15 jaar te bedragen. Dit is namelijk de verwachte levensduur van de warmteopwekker. Een kortere levensduur is daarmee niet wenselijk.

Tegelijk is er technisch gezien geen reden waarom de levensduur korter zou zijn. In het algemeen geldt dat voor bewegende delen en elektronica een levensduur van 15 jaar reëel is; voor statische delen zelfs langer (30 jaar).

Daarom wordt verondersteld dat de levensduur van regeltechniek en aansluitmateriaal (kleppen en pompen) 15 jaar bedraagt en de levensduur van de rest van de installatie 30 jaar.

Hierbij komt dat de levensduur van het opslagmedium in geval van water eveneens onbeperkt is (rekenwaarde 30 jaar). Bij PCM's en TCM's is dit echter niet het geval. Hierbij is er sprake van veroudering door gebruik. Hierbij wordt de levensduur op 15 jaar gesteld.

### **6.1.4 Onderhoudskosten**

Het benodigde onderhoud aan een opslagsysteem is in basis erg laag. Vrijwel alle materialen zijn statisch (niet bewegend) en slijten dus niet significant. Behoudens de vervangingskosten aan het einde van de levensduur worden de onderhoudskosten gesteld op € 50 per jaar.

### **6.1.5 Energieverlies**

Een belangrijke post in de businesscase betreft die van het energieverlies in de opslag. Bij opslag in water en PCM's is dit energieverlies direct gekoppeld aan de tijd dat er warmte wordt opgeslagen.

#### *TCM's*

Bij TCM's is die niet het geval. Hier is echter wel sprake van energieverlies, doordat de warmte die nodig is voor het scheiden van de materialen nooit 100% weer effectief benut kan worden. Daarnaast is er ook bij TCM's sprake van het feit dat een deel van de warmte aanwezig is als voelbare warmte. Dit deel

van de warmte zal bij langduriger opslag ook verloren gaan.

Voor TCM's wordt daarom een vast verlies van 10% van de opgeslagen warmte verondersteld, ongeacht de opslagduur.

#### Voelbare warmte en PCM's

Voor het energieverlies in buffervaten met water en/of PCM's is het energieverlies als volgt bepaald.

- Op basis van de benodigde opslaghoeveelheid aan energie en de specifieke opslagparameters van het opslagmedium wordt het benodigde volume bepaald.
- Qua vormgeving van een buffer is een bol de meest gunstige vorm als het gaat om verhouding tussen inhoud en verliesoppervlak. Vanwege praktische aspecten wordt in de praktijk vrijwel altijd gebruik gemaakt van een cilinder als vorm. Deze vorm is in de businesscase ook aangehouden. Hierbij is een verhouding aangehouden van een bufferhoogte die 1,5 maal zo groot is als de diameter.
- Bij de isolatiewaarde is uitgegaan van een goed geïsoleerd buffer. Dit betekent dat er een Rc-waarde van 3 m<sup>2</sup>K/W bereikt wordt. Het optredende energieverlies komt daarmee min of meer overeen met een A-label boilervat.
- Vervolgens is bepaald hoe vaak de opslag in gebruik is. Dit is afhankelijk van het aantal dagen dat de warmtevraag groter is dan de beschikbare energie. Dit onderdeel is hierna verder uitgewerkt;
- Het berekende energieverlies is vervolgens bepaald door uit te gaan van een maximale buffertemperatuur van 70 °C, een retourtemperatuur van 40 °C en een omgevingstemperatuur van 20 °C bij binnen opstelling (maximaal 0,5 m<sup>3</sup>) en 10 °C bij buitenopstelling. De buffer is in de gebruikperiode gemiddeld genomen voor 50% gevuld met warmte.

#### 6.1.6 Warmtelevering via buffer

De hoeveelheid warmte die geleverd wordt via de buffer is afhankelijk van de volgende factoren:

- Het aantal dagen dat er geen of onvoldoende warmte beschikbaar is en die dus overbrugd moeten worden;
- De hoeveelheid warmte die gedurende deze tijd wel beschikbaar is. Het is namelijk niet realistisch om te veronderstellen dat er bijvoorbeeld een

week overbrugd moet worden, terwijl er in die periode helemaal geen warmte beschikbaar is. Er wordt in de basis verondersteld dat er tijdens de opslagperiode gemiddeld genomen 50% van het maximale vermogen beschikbaar is.

- Het deel van de warmte die niet direct geleverd kan worden vanuit warmteopwekking, wordt geleverd via de warmteopslag

#### 6.1.7 Kostprijs te laden warmte en opbrengst warmte

De warmte die geladen wordt in de buffer dient ook te worden opgewekt. Wanneer er geen sprake is van buffering, dient elektriciteit te worden gebruikt tegen het dan geldende tarief. Wanneer er sprake is van buffering, kan er elektriciteit worden gebruikt op momenten dat het tarief binnen de opslagperiode het laagst is. Dit levert een potentieel lagere prijs voor het laden van de warmte op.

Dit voordeel is potentieel, omdat in de kleinverbruikersmarkt er momenteel nog niet met variabele tarieven wordt gewerkt in die zin dat ze van uur op uur kunnen verschillen. De enige variatie die momenteel bestaat is de variatie tussen dag- en nachttarief.

In de volgende figuur is het verloop van de EPX-prijs voor elektriciteit weergegeven. Dit is voor de energieleveranciers de marktprijs voor elektriciteit.



Figuur 6.2 Verloop APX-prijs elektriciteit

Wanneer de energieleveranciers dit voordeel teruggeven aan de gebruikers van een warmteopslag, ontstaat hierdoor een voordeel voor de gebruikers. Tegelijk blijft de variatie in de elektriciteitsprijs beperkt, omdat de prijs voor het grootste deel vast is vanwege belastingen.

Een vertaling van het voordeel voor inkoop levert de volgende voordelen op:

Tabel 6.1 Voordeel elektriciteitsprijs

Opslagduur (dagen)	Electriciteitsprijs (€/kWh)	Reductie (%)
0	0,210	0,0%
1	0,200	4,8%
3	0,198	5,7%
7	0,192	8,6%
14	0,190	9,5%
21	0,189	10,0%
30	0,188	10,5%
180	0	100%

De grote stappen in deze tabel zitten bij 1 dag en bij 7 dagen. De stap tussen 0 dagen en 1 dag zit in het gebruik kunnen maken van het dag-nachtpatroon van de elektriciteitsprijs. De stap tussen 3 en 7 dagen zit in het gebruik kunnen maken van het week-weekendpatroon. De laatste categorie betreft het overbruggen van het zomer-winter seizoen. Hierbij kan er gebruik gemaakt worden van 'gratis' zomerwarmte om in de winter te benutten voor verwarming.

Een ander punt dat effect kan hebben op de elektriciteitsprijs, betreft het afschaffen van de saldering van zonnestroom. Het effect hiervan is echter heel beperkt op de businesscase voor warmteopslag. De problemen op het net treden namelijk vooral op tijdens de perioden van Dunkelflaute; perioden met een laag aanbod van zowel zonne-energie als windenergie. Zonnepanelen zullen in deze periode dus nauwelijks bijdragen aan de energievoorziening, en daarom zal het afschaffen van de saldering ook geen significante invloed hebben.

Een laatste aspect dat speelt bij de warmteprijs voor laden en ontladen is het feit dat de temperatuur die nodig is voor het laden van de opslag altijd wat hoger ligt dan de benodigde temperatuur voor afgifte. Dit leidt er bij het gebruik van een warmtepomp toe, dat het rendement (COP) van de warmtepomp lager ligt. Het energiegebruik bij het laden, ligt dus altijd hoger dan bij direct benutten. Er is gerekend met de volgende waarden als gemiddelden voor de opwekking:

- COP bij directe benutting van warmte: 4,0

- COP bij laden warmteopslag: 3,5

### 6.1.8 Reductie vermogensvraag en vergoeding

Een reden voor het inzetten van warmteopslag is niet alleen de beschikbaarheid van elektriciteit, maar ook de beschikbaarheid van transportcapaciteit voor elektriciteit. De buffer kan gebruikt worden om de piekvraag te reduceren. Dit kan doordat de buffer gebruikt kan worden om de warmtevraag in de bufferperiode uit te smeren. Hierdoor neemt de maximale warmtevraag af tot de gemiddelde warmtevraag in die periode. Dit voordeel is gebruikt als basis voor de berekeningen. Een tweede mogelijkheid is om in geval van maximale belasting van het net, de warmtevoorziening geheel uit te schakelen en volledig over te stappen op gebruik van de buffer voor de warmtelevering. In dat geval moet er wel weer voldoende tijd zijn om de buffer te regenereren.

Op dit moment staat er voor een consument nog geen vergoeding (of andere incentive) tegenover het afnemen van meer of minder vermogen. De vergoeding die wordt betaald is een vast tarief, ongeacht het werkelijk gebruik hiervan. Om toch een inschatting te doen van dit voordeel is gekeken naar het verschil in vastrecht voor een standaard aansluiting en een wat zwaardere aansluiting.

Voor een 3x 25A aansluiting zijn de gemiddelde kosten (over de drie grote netbeheerders) € 240 per jaar. Voor een 3 x 35 A aansluiting bedragen deze kosten € 899. Het verschil in maximale belasting bedraagt 6,9 kW. Dit geeft een schatting van de kosten voor vermogen van € 95,60/kW per jaar.

Dit is de vergoeding voor het vermogen dat een heel jaar beschikbaar wordt gesteld. Voor het kortstondig ontlasten van het elektriciteitsnet gelden wellicht andere tarieven. Dit voordeel is nog niet meegerekend in de businesscase, omdat deze nu niet beschikbaar is.

### 6.1.9 Indexatie en rendementseis

Voor de doorrekening van de businesscase kunnen twee sporen worden gevolgd. Het ene spoor is de formele doorrekening met indexatie van tarieven, rendement op geïnvesteerd vermogen restwaarde van installaties et cetera. Het andere spoor is al deze zaken achterwege te laten en alleen te rekenen met de eenvoudige terugverdientijd. Hoewel het laatste spoor

meer aansluit bij de rekenwijze van consumenten, is in deze studie gerekend met de formele business-case. Hierbij zijn de volgende waarden gebruikt:

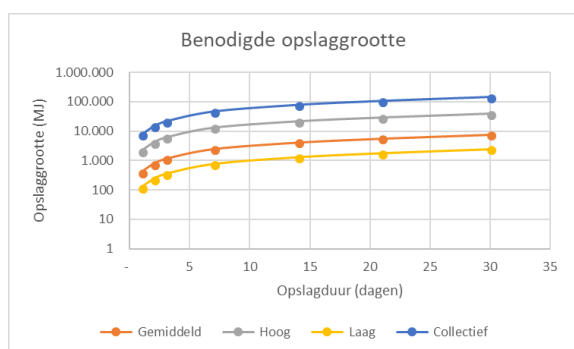
- Looptijd: 30 jaar, met een herinvestering na 15 jaar
- Inflatie: 2% per jaar
- Stijging elektriciteitsprijs: 2% per jaar
- Rendementseis op vermogen 4% per jaar

## 6.2 Analyse parameters

Op basis van de uitgangspunten zoals gedefinieerd in de vorige paragraaf, is in deze paragraaf voor de belangrijkste parameters bepaald welke waarden zullen optreden.

### 6.2.1 Buffergrootte

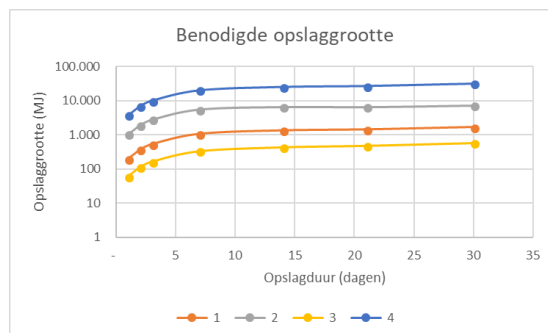
Als eerste is gekeken naar de benodigde buffergrootte. Hierbij is zijn de woningtype en de opslagduur gevarieerd. Het resultaat is als volgt:



Figuur 6.3 Opslaggrootte afhankelijk van vraagtype en opslagduur bij volledige overbrugging (0% beschikbare capaciteit in de opslagperiode)

Duidelijk blijkt dat hoe langer de opslagperiode is, hoe groter de benodigde buffer is. Daarbij volgen de verschillende profielen hetzelfde patroon. De absolute grootte is in dit scenario hoog.

Omdat een 0% beschikbare capaciteit tijdens de opslagperiode niet realistisch is, is dezelfde figuur opgesteld bij een gemiddelde beschikbaarheid van 50% van de piekcapaciteit.



Figuur 6.4 Opslaggrootte afhankelijk van vraagtype en opslagduur bij een gemiddelde beschikbare capaciteit van 50%

Het verschil tussen de figuren 5.3 en 5.4 is enerzijds dat bij een gemiddeld beschikbare capaciteit van 50% van de maximale capaciteit de buffer bij een opslagperiode van 1 dag ook 50% kleiner kan zijn. Bij langere opslagperioden kan de buffer relatief nog kleiner zijn. Het komt namelijk nooit voor dat er meerdere gelijke piekdagen achter elkaar voorkomen. Omdat het niet realistisch is dat er totaal geen capaciteit is tijdens de bufferperiode, is in de businesscase uitgegaan van een gemiddeld beschikbare capaciteit van 50%.

Vervolgens is gekeken naar de benodigde buffergrootte, afhankelijk van welk opslagmedium wordt toegepast. In geval van een waterbuffer varieert de benodigde grootte van 0,5 m<sup>3</sup> voor een zuinig patroon in combinatie met 50% beschikbare capaciteit en 1 dag opslagcapaciteit, tot 1.150 m<sup>3</sup> voor een collectieve variant (appartement) voor een volledige overbrugging van 30 dagen.

Voor de gemiddelde warmtevraag varieert de grootte tussen de 1,6 tot 13,4 m<sup>3</sup> bij een opslagduur van 1 respectievelijk 30 dagen en 50% beschikbare capaciteit.

Een opslag met PCM's zit in dezelfde orde van grootte. Weliswaar zit er veel energie in de faseovergang, maar een PCM vat is doorgaans slechts voor circa de helft gevuld met PCM's en de rest met water. Daarbij komt dat de voelbare opslag van PCM's kleiner is dan die van water. Dit levert een winst op van maximaal 25-40% op het buffervolume.

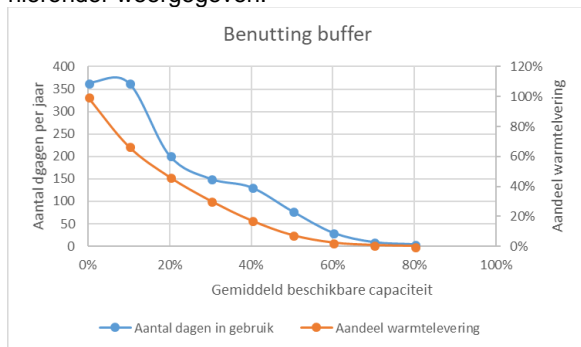
Het voordeel van het gebruik van TCM's lijkt in eerste instantie groter. Het verschil in energiedichtheid is namelijk al snel een factor 10 beter dan die van water. Tegelijk geldt ook hier dat er een medium nodig is voor de warmteoverdracht, en dat de installatie complexer en daarmee volumineuzer is. De uiteindelijke



winst is dan nog circa een factor 5 ten opzichte van een waterbuffer.

### 6.2.2 Energieverlies

Om het energieverlies van de buffer (bij water en PCM's) te bepalen, is als eerste gekeken naar het aantal dagen per jaar dat deze in gebruik is. Dit is hieronder weergegeven.



Figuur 6.5 Benutting buffer bij een gemiddeld vraagtype en opslagduur van 7 dagen

Duidelijk is te zien dat wanneer de gemiddeld beschikbare capaciteit 0 is, alle warmte geleverd moet worden via de buffer, en dit buffer dan ook het hele jaar in gebruik is. Wanneer er gemiddeld genomen meer capaciteit is, daalt het aantal dagen dat het buffer in gebruik is, maar ook het aandeel van de warmte die via de buffer geleverd wordt.

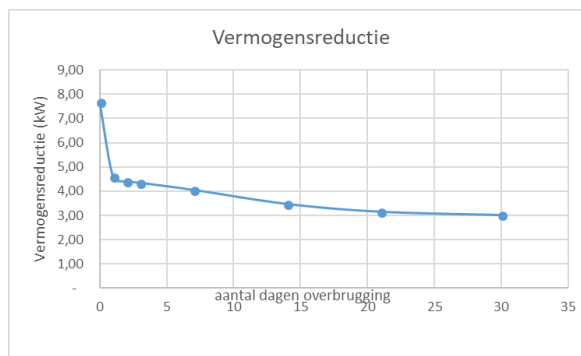
Het blijkt dat bij gebruik van een waterbuffer en een opslagtermijn van 7 dagen, de energieverliezen als percentage van de hoeveelheid warmte die via de buffer wordt geleverd tussen de 45 en 70% ligt.

Bij een opslagduur van 1 dag liggen de verliezen nog steeds rond de 15%.

Bij een grotere warmtevraag (en dus een groter buffer) nemen de verliezen af. Voor het collectieve profiel liggen de verliezen rond de 5% bij een opslagduur van 1 dag. Dit zal terug te zijn in de businesscases in een verbeterde haalbaarheid van grotere systemen.

### 6.2.3 Reductie vermogensvraag

De reductie van het gemiddeld benodigd vermogen is afhankelijk van de periode die wordt overbrugd. Het resultaat is hieronder weergegeven.



Figuur 6.6 Vermogensreductie van een gemiddeld vraagprofiel

Duidelijk is te zien dat de grootste winst zit in de dagbuffering. Dit is logisch, omdat normaal gesproken de verwarmingsvraag het patroon van de buitentemperatuur volgt. Bij dagbuffering kan dit worden uitgemiddeld. Verdere reductie van het vermogen is wel mogelijk, maar gaat minder snel. Dit komt omdat koude dagen meestal niet solitair voorkomen, maar in een koudere periode. Het middelen van meerdere dagen leidt dan nog steeds tot een koud gemiddelde.

## 6.3 Resultaten businesscase

### 6.3.1 Gemiddeld profiel

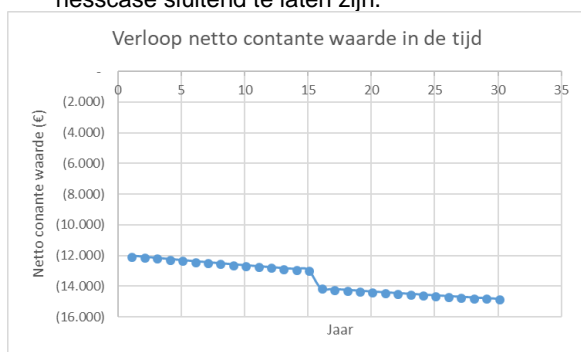
Als eerste is de businesscase voor een gemiddeld profiel en een opslagperiode van 3 dagen uitgewerkt. De belangrijkste resultaten hiervan zijn opgenomen in de volgende tabel. Varianten hierop zijn verderop weergegeven.

Tabel 6.2 Businesscase warmteopslag met waterbuffer, gemiddeld profiel 3 dagen overbrugging, 50% beschikbaar vermogen van elektriciteit

Omschrijving	Grootte
Buffergrootte	4,23 m <sup>3</sup>
Investering	11.918 €
Energiekosten zonder opslag	640 €/jaar
Energiekosten	668 €/jaar
Voordeel	-28 €/jaar
Onderhoud	50 €/jaar
ETVT	Nvt jaar
Vermogensreductie	0,95 kW <sub>e</sub>
Onrendabele top (30 jaar)	14.797 €
- Naar vermogensreductie	900 €/kW <sub>e</sub> /jaar

De betekenis van getallen in de tabel is als volgt:

- **Buffergrootte.** Dit betreft de benodigde grootte van de buffer om invulling te kunnen geven aan de opslagbehoefte.
- **Investing:** De totale initiële investering in het systeem.
- **Energiekosten zonder opslag:** De huidige jaarlijkse energiekosten om invulling te geven aan de warmtevraag.
- **Energiekosten:** Energiekosten bij toepassing van een warmtebuffer, rekening houdend met het genoemde voordeel op de energie-inkoop, energieverliezen in de buffer en een verminderde COP voor de warmteopwekking.
- **Voordeel:** Voordeel op de energiekosten bij toepassing van een buffer.
- **Onderhoud:** Jaarlijkse onderhoudskosten van het buffersysteem, regeling et cetera.
- **ETVT:** eenvoudige terugverdientijd. Deze is bepaald door de investering te delen door het jaarlijks voordeel op de energierekening en het onderhoud. Wanneer het exploitatievoordeel negatief is, is er geen sprake van een terugverdientijd. De investering wordt dan nooit terug verdiend.
- **Vermogensreductie:** De vermindering van het benodigde elektrische vermogen voor de warmtepomp, uitgaande van een uitsmeren van de warmtevraag gedurende de opslagperiode.
- **Onrendabele top:** Dit is de contante waarde van de totale kosten minus de totale baten. Het verloop hiervan is weergegeven in de volgende figuur.
- **Naar vermogensreductie:** Hier is bepaald wat de jaarlijkse vergoeding zou moeten zijn voor de reductie van het elektrisch vermogen om de businesscase sluitend te laten zijn.



Figuur 6.7 Verloop netto contante waarde

Uit de businesscase blijken een aantal belangrijke zaken:

- De opslag is al snel dermate groot (> 0,5 m<sup>3</sup>) dat plaatsing binnenshuis niet realistisch is.
- De energiekosten zullen stijgen door gebruik van de warmteopslag. De energieverliezen in combinatie met de minder gunstige COP van de warmtepomp zijn namelijk groter dan het voordeel van gebruik te kunnen maken van goedkopere elektriciteit.
- In deze case zijn de exploitatievoordelen en nadelen min of meer in evenwicht en zelfs licht negatief. Hierdoor is er geen sprake van een terugverdientijd voor consumenten.
- De onrendabele top is in dit geval nog groter dan de totale investering. Dit wordt veroorzaakt doordat ook de exploitatie en herinvesteringen niet rendabel zijn.
- Om de onrendabele top weg te krijgen is een vergoeding nodig van € 900 per kW vermeden aansluitcapaciteit per jaar.

Deze conclusies veranderen niet significant bij een kortere of langere opslagperiode.

#### PCM's

Vervolgens is dezelfde case doorgerekend met de toepassing van PCM's in plaats van een waterbuffer. Het resultaat hiervan is als volgt.

Tabel 6.3 Businesscase warmteopslag met PCM-buffer, gemiddeld profiel 3 dagen overbrugging, 50% beschikbaar vermogen van elektriciteit

Omschrijving	Grootte
Buffergrootte	1,97 m <sup>3</sup>
Investing	14.185 €
Energiekosten zonder opslag	640 €/jaar
Energiekosten	659 €/jaar
Voordeel	-18 €/jaar
Onderhoud	50 €/jaar
ETVT	nvt jaar
Vermogensreductie	0,95 kW <sub>e</sub>
Onrendabele top (30 jaar)	18.319 €
- Naar vermogensreductie	1.114 €/kW <sub>e</sub> /jaar

Uit het vergelijk van beide businesscases volgen de volgende conclusies:

- Een opslag gebaseerd op PCM's is kleiner dan met een waterbuffer. Tegelijk is het verschil niet zodanig dat de toepassing echt verandert. De benodigde grootte is nog steeds zodanig dat toepassing binnenshuis niet realistisch is.
- De investering in een PCM-buffer is hoger dan in een waterbuffer van gelijke opslagcapaciteit;
- Doordat de buffer compacter is, is het energieverlies kleiner. Dit voorkomt echter niet dat de energiekosten nog steeds licht zullen stijgen;
- De onrendabele top ligt, bij gelijke prestaties, wat hoger dan bij toepassing van een waterbuffer.

Ook hier zijn er geen significante veranderingen bij het aanpassen van de opslagtermijn.

#### TCM's

Tot slot is nogmaals dezelfde case doorgerekend met de toepassing van TCM's. Het resultaat hiervan is als volgt.

Tabel 6.4 Businesscase warmteopslag met TCM-buffer, gemiddeld profiel 3 dagen overbrugging, 50% beschikbaar vermogen van elektriciteit

Omschrijving	Grootte
Buffergrootte	0,87 m <sup>3</sup>
Investering	14.520 €
Energiekosten zonder opslag	640 €/jaar
Energiekosten	650 €/jaar
Voordeel	-10 €/jaar
Onderhoud	50 €/jaar
ETVT	nvt jaar
Vermogensreductie	0,95 kWe
Onrendabele top (30 jaar)	18.287 €
- Naar vermogensreductie	1.112 €/kW <sub>e</sub> /jaar

Uit het vergelijk van deze resultaten met de voorgaande blijken een aantal resultaten:

- Het benodigde opslagvolume is (nog) kleiner. Plaatsing binnenshuis lijkt echter nog niet haalbaar te zijn;

- Het verschil in investering is beperkt. Kanttekening hierbij is wel dat de investering in de TCM techniek nog lang niet marktrijp is, en de gehanteerde investeringen een doelscenario vormen.
- Het voordeel van een beperkter energieverlies is bij deze opslagtermijn nog niet echt doorslaggevend.

De grote meerwaarde van de toepassing van TCM's zit hem met name in het energieverliesvrij kunnen opslaan van warmte. Daarom is ook de businesscase voor seizoensopslag doorgerekend met deze techniek. Hierbij is verondersteld dat er in de winterperiode volledig gebruik gemaakt wordt van 'gratis' zonne-energie.

Tabel 6.5 Businesscase warmteopslag met TCM-buffer, gemiddeld profiel 180 dagen overbrugging, 0% beschikbaar vermogen van elektriciteit

Omschrijving	Grootte
Buffergrootte	56,16 m <sup>3</sup>
Investering	160.201 €
Energiekosten zonder opslag	640 €/jaar
Energiekosten	- €/jaar
Voordeel	640 €/jaar
Onderhoud	50 €/jaar
ETVT	271 jaar
Vermogensreductie	2,20 kWe
Onrendabele top	231.972 €
- Naar vermogensreductie	6.110 €/kW <sub>e</sub> /jaar

Uit deze businesscase blijken een aantal zaken:

- Het benodigde volume is fors, maar wel kleiner dan de footprint van de woning. Dit betekent dat een opslag met de footprint van de woning en 1 meter hoogte volstaat;
- De case kent een positieve besparing op de energiekosten. Omdat er sprake is van het gebruik van 'gratis' warmte, is het voordeel hiervan dus fors groter dan het extra energiegebruik;
- De businesscase blijft zwaar negatief. Dit wordt ook veroorzaakt doordat de hele buffer maar iets meer dan eenmaal per jaar wordt gevuld en geleegd.

### 6.3.2 Overige profielen

De hiervoor benoemde businesscases zijn ook uitgewerkt voor de andere profielen. Om de resultaten overzichtelijk te houden, zijn in de volgende tabel alleen de onrendabele top afgezet tegen de behaalde reductie in vermogen weergegeven.

Tabel 6.6 Totaaloverzicht resultaten businesscases (over 30 jaar)

		Opslag duur									
Profiel	Opslag	1 dag		3 dagen		7 dagen		30 dagen		180 dagen	
		Onrendabele top	per kW	Onrendabele top	per kW	Onrendabele top	per kW	Onrendabele top	per kW	Onrendabele top	per kW
Gemiddeld	Water	10.832	713	14.797	900	17.080	957	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	PCM	12.939	852	18.319	1.114	25.219	1.413	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	TCM	11.962	788	18.287	1.112	23.661	1.326	31.347	1.364	231.972	6.110
Royaal	Water	17.499	218	20.936	240	23.424	245	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	PCM	25.547	318	41.135	471	62.989	660	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	TCM	24.628	307	39.047	447	58.027	608	77.050	619	1.101.149	5.489
Zuinig	Water	5.729	1.230	10.150	2.019	13.170	2.421	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	PCM	6.914	1.484	12.014	2.390	15.328	2.818	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	TCM	7.470	1.604	10.976	2.183	15.483	2.846	19.062	2.732	84.713	7.274
Collectief	Water	24.435	85	28.630	92	32.212	95	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	PCM	51.464	179	100.114	322	175.608	520	Niet haalbaar ivm energieverlies			
	TCM	50.503	176	92.254	297	157.181	465	228.179	516	2.974.139	4.144

## 6.4 Conclusies businesscase

Uit de tabel met de resultaten blijken de volgende conclusies:

- Hoe groter de warmtevraag, hoe beter de businesscase. Dit is logisch, omdat bij een grotere warmtevraag de investering relatief lager is, en de energieverliezen ook relatief kleiner zijn.
- In alle gevallen blijkt dat een waterbuffer de meest rendabele optie is. Opslag met PCM's en TCM's is duurder, terwijl deze meerinvestering niet wordt terugbetaald vanuit lagere energieverliezen;
- TCM's zijn in de tabel concurrerend met PCM's. Dit komt omdat de gehanteerde prijs voor TCM's een doelprijs is vanuit de sector; geen prijs die op dit moment haalbaar is.
- Een opslag van 30 dagen of langer is niet haalbaar bij gebruik van waterbuffers en PCM's. De energieverliezen worden dan meer dan 100% van de opgeslagen energie. Voor TCM's is een langere opslagduur geen probleem.
- Een langere opslagduur verslechtert de businesscase. Dit komt omdat bij een langere opslagduur, de buffer groter wordt, terwijl deze minder cycli per jaar zal doorlopen.
- De onrendabele top voor toepassing van een waterbuffer bij collectieve woningbouw ligt in dezelfde range als de geldende vergoeding voor het verzwaren van een elektriciteitsaansluiting (€ 95/kW/jaar voor verzwaring van 3x25A naar 3x35A). Dit geeft aan dat deze toepassing min of meer rendabel zou zijn, wanneer deze vergoeding inderdaad als variabele vergoeding zou gelden.

## 7 Alternatieven

In dit hoofdstuk is de techniek van kleinschalige warmteopslag vergeleken met een aantal concurrerende alternatieven die ook kunnen bijdragen aan een lagere belasting van het elektriciteitsnet.

### 7.1 Individuele alternatieven

Op individueel niveau is er eigenlijk maar één echte alternatief voor kleinschalige warmteopslag en dat betreft de opslag van elektriciteit in thuisbatterijen. Om dezelfde effecten te bereiken als met een warmteopslag zijn de volgende batterij-groottes noodzakelijk:

Tabel 7.1 Benodigde opslagcapaciteit thuisbatterij bij opslagduur van 1 dag

Profiel	Grootte (kWh)	Vermogensreductie t.b.v. warmteopwekking (kW <sub>e</sub> )
Gemiddeld	14	0,9
Royaal	73	4,6
Zuinig	4	0,3
Collectief	261	17

Op dit moment biedt o.a. Tesla thuisbatterijen aan met een capaciteit van 14 kWh<sub>e</sub>. De kosten hiervan bedragen € 8.240<sup>3</sup>. Omdat de kosten van de batterijen vooral bepaald worden door de accu's, zijn deze kosten vrij sterk lineair met de opslagcapaciteit.

De thuisbatterij kan breder worden ingezet dan alleen voor peakshaving bij de warmteopwekking. Hij kan gebruikt worden voor dekking of peakshaving bij het totale elektriciteitsgebruik. Wanneer de thuisbatterij echter alleen wordt ingezet voor peakshaving in de warmteopwekking, dan bedraagt de onrendabele top (uitgaande van een levensduur van 10 jaar)

€ 916/kW/jaar. Hiermee vormt dit voor het gemiddelde profiel een serieuze concurrent voor warmteopslag. Voor een royaal of collectief profiel is dit echter niet het geval.

Het is de verwachting dat de ontwikkeling van thuisbatterijen door zal gaan, wat een (verdere) verlaging van de kosten met zich mee zal brengen.

Een belangrijk nadeel van (thuis)batterijen ten opzichte van wateropslag is dat er gebruik gemaakt wordt van lithium batterijen. Dit is een materiaal dat schaars is, en daarnaast ook brandbaar. Dit vormt een potentieel risico voor eventuele gebruikers.

### 7.2 Collectief alternatief

Een belangrijk ander alternatief om de lokale elektriciteitsvraag te verlagen, is door aansluiting van de woning op een collectieve verwarmingsinstallatie (een warmtenet). Hiermee worden meerdere voordelen in een keer behaald:

- De lokale elektriciteitsbehoefte voor verwarming wordt volledig weggenomen. Hiermee wordt bereikt dat het elektriciteitsnet niet verzwaard wordt ten opzichte van de situatie van verwarmen met aardgas.
- De positie van de centrale opwekker kan zodanig worden gekozen dat de netcapaciteit niet of veel minder een probleem vormt;
- Er kan eenvoudig gebruik gemaakt worden van duurzame bronnen, zoals restwarmte, geothermie et cetera. Deze bronnen kennen een veel lagere elektriciteitsvraag dan bij het gebruik van warmtepompen;
- Wanneer er alsnog de behoefte bestaat aan peakshaving, dan kan dit centraal gebeuren met een heel geconcentreerde vraag. Uit de verschillende analyses in het voorgaande hoofdstuk is al gebleken dat dit gunstig is voor de businesscase.

Het is lastig om deze situatie qua kosten te vergelijken met die van individuele opslag. Een warmtenet wordt namelijk normaal gesproken niet aangelegd om de lokale piekvraag te verlagen. De businesscase van een warmtenet moet zelf al positief zijn om deze te realiseren. Voorwaarden hiervoor zijn een hoge bouwdichtheid, voldoende afname en de

<sup>3</sup> Bron: [www.tesla.com/nl\\_NL/powerwall](http://www.tesla.com/nl_NL/powerwall), 24 april 2020



beschikbaarheid van een warmtebron. In dat geval is er dus geen onrendabele top en zijn de kosten dus nihil.

Om toch een vergelijk te kunnen maken tussen kleinschalige warmteopslag en een grootschalig warmtenet zijn er twee vergelijkingen gemaakt:

- Alleen de kosten van lokale buffering ten behoeve van peakshaving;
- De totale onrendabele top van een project bij toepassing van niet haalbare projecten.

### 7.2.1 Peakshaving centraal

In een collectieve installatie worden praktisch altijd buffers opgenomen om de piek in te vullen. Dit is deels om pieken in de elektriciteitsvraag te vermijden, maar ook om de componenten kleiner te kunnen kiezen. Deze buffers kunnen echter ook worden ingezet voor het overbruggen van perioden met weinig aanbod van elektriciteit.

Uitgaande van een project met 1.000 woningen, en exact gelijke toepassing als de kleinschalige opslag, dan is de onrendabele top circa € 115.000, wat neerkomt op € 11/kW/jaar. Dit is zoals verwacht fors lager dan de kosten voor kleinschalige opties.

### 7.2.2 Onrendabel project

Een tweede optie is om een project dat eigenlijk niet rendabel is op basis van de reguliere businesscase, toch toe te passen om daarmee het elektriciteitsnet te ontlasten in een bepaalde wijk. De mate waarin een project onrendabel is, is zeer sterk afhankelijk van de wijk, bouwdichtheid, type woningen et cetera. Indicatief zullen de totale investeringen in een haalbaar project liggen in de orde van € 8.000 – 12.000 per woning.

Stel dat een niet haalbaar project een onrendabele top heeft van € 5.000 per woning. In dat geval draagt de reductie van het lokaal benodigde vermogen circa 2 kW<sub>elektrisch</sub>. De onrendabele top is dan, uitgaande van een periode van 15 jaar, € 167/kW/jaar.

### 7.2.3 Use-case collectief

Bij toepassing van een collectief net zijn er een aantal zaken wezenlijk anders voor de gebruiker dan bij een individuele oplossing. De belangrijkste zijn:

- Kleiner ruimtebeslag. Doordat de opwekinstallatie in de woning niet meer nodig is, is er alleen sprake van een afleverunit voor de warmte. Deze is kleiner dan een huidige CV-ketel. Ook de ruimte voor buffering in de woning is niet meer nodig;
- Keuzevrijheid. Afnemers van warmte uit een warmtenet hebben geen keuzevrijheid qua warmteleverancier. Afnemers van warmte uit het net is verplicht. Sommige bewoners zullen hier weerstand tegen hebben;
- Dit laatste wordt versterkt door het feit dat de tarieven voor warmtelevering worden geregeld door de warmtewet. Deze tarieven zijn gebaseerd op een full-service contract voor onderhoud van de ketel. Veel mensen accepteren op dit vlak wat meer hinder in geval van een storing en bezuinigen hier wat op. Dit leidt er toe dat er discussie is of de warmtewettarieven niet leiden tot hogere lasten voor de bewoners.

## 7.3 Conclusies alternatieven

Op basis van de resultaten uit dit hoofdstuk kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Kleinschalige opslag van elektriciteit kan, zeker voor woningen met een beperkte energievraag, een concurrerend alternatief zijn. Belangrijkste nadeel is de schaarste van materiaal en brandbaarheid van batterijen.
- Bij collectieve projecten is opslag goedkoper te realiseren, omdat er sprake is van schaalvoordelen qua investering, en de energieverliezen relatief veel lager zijn.
- Het realiseren van warmtenetprojecten met een beperkte onrendabele top kan een concurrerend alternatief zijn voor kleinschalige warmteopslag. Een onrendabele top van € 5.000 per woning komt namelijk overeen met € 132/kW/jaar (o.b.v. een looptijd van 30 jaar), wat concurreert met de kosten voor kleinschalige opslag van warmte in woning.

## 8 Eindoordeel technieken

In dit hoofdstuk is voor de techniek van kleinschalige warmteopslag in het algemeen en voor de specifieke opslagtechnieken in het bijzonder een eindoordeel gegeven.

### 8.1 Algemeen

Ongeacht welke techniek er wordt gebruikt voor kleinschalige warmteopslag, kunnen er op basis van dit onderzoek een aantal belangrijke conclusies worden getrokken:

- De businesscase van kleinschalige warmteopslag is nu in alle gevallen niet haalbaar. Een belangrijke reden hiervoor is dat het verlagen van de elektriciteitsvraag op bepaalde momenten, dan wel het verlagen van het gemiddeld vermogen niet betaald wordt.
- De businesscase wordt haalbaarder bij een grotere warmtevraag. Toepassing bij matig geïsoleerde woningen en/of appartementsgebouwen zijn de meest rendabele opties.
- Bij een korte opslagperiode van één dag of enkele dagen zijn de energieverliezen bij opslag in een water- of PCM-buffer nog acceptabel. Bij opslagperioden die langer zijn, lopen de verliezen al snel op tot 50% of zelfs meer dan 100%. Dit laatste betekent dat er meer warmte verloren gaat, dan er nuttig weer uit de buffer wordt onttrokken.

De volgende aanbevelingen gelden om de businesscase beter te maken:

- De vergoeding voor de netaansluiting zou bij voorkeur niet in een vaste staffel moeten verlopen, zoals dit nu het geval is, maar bij voorkeur variabel. Met behulp van de slimme meter wordt dit al continu gemeten, waardoor deze stap technisch gezien eenvoudig uitvoerbaar is. Met deze stap wordt het verlagen van de pieken lonend;
- De vergoeding voor zowel vermogen als energie zou nog veel sterker variabel gemaakt kunnen worden. Door de prijs te laten variëren met de beschikbaarheid van zowel energie als transportcapaciteit wordt schaarste belast. Dit heeft een positief effect op de businesscase, omdat er geladen kan worden als energie en/of transportcapaciteit duur zijn.

- De variatie in de tarieven zal zowel tijdafhankelijk, als ook plaatsafhankelijk zijn. Op plaatsen waar het elektriciteitsnet tegen haar grenzen aanloopt, is capaciteit veel duurder dan bij een net met veel overcapaciteit.
- Tot de tijd dat bovengenoemde punten gerealiseerd zijn, kan de netbeheerder de aansturing voor zijn rekening nemen en een vaste vergoeding geven voor het gebruik van een kleinschalig warmteopslagsysteem. Deze tol voor de netbeheerder is des te logischer, omdat de onrendabele top niet voor alle locaties in verhouding zal staan tot de vermindering van de belasting van het elektriciteitsnet.
- Een alternatief voor deze rol vanuit de netbeheerder is het beschikbaar stellen van investeringssubsidies voor woningen. Dit zou kunnen door bijvoorbeeld deze techniek op te nemen in de ISDE-subsidie. Hierbij geldt dan wel dat de subsidie min of meer gelijk moet zijn aan het totale bedrag van de investering.

### 8.2 Voelbare warmte

Specifiek voor wateropslagsystemen gelden de volgende conclusies:

- De techniek van wateropslag is ver ontwikkeld. Zowel voor kleinschalige systemen (o.a. zonneboilers) als grootschaliger systemen zijn er veel producten op de markt.
- De benodigde volumes bedragen al snel meer dan 1 m<sup>3</sup>. Hiervoor zijn de beschikbare producten echter nog beperkt. Goed geïsoleerde buffervaten met een volume tussen de 1 en 5 m<sup>3</sup> zijn beperkt beschikbaar.

Aanbevelingen:

- Om de businesscase te verbeteren is het verminderen van de energieverliezen een belangrijk aandachtspunt. Met name bij kleine systemen is het energieverlies al snel te hoog om nog een exploitatievoordeel te kunnen behalen. Het verder optimaliseren van de isolatiegraad kan hierbij helpend zijn.

### 8.3 PCM's

Voor de warmteopslagsystemen met PCM's geldt het volgende beeld.

- De toepassing van PCM's biedt weinig voordelen ten opzichte van systemen met waterbuffers:
  - Er is op gelijke wijze sprake van energieverlies in de tijd;
  - De buffergrootte is wat kleiner, maar onvoldoende om plaatsing binnenshuis eenvoudig mogelijk te maken.
  - De materialen zijn schadelijker vanwege giftigheid, corrosiviteit en/of brandbaarheid
  - De investering is fors hoger;
- Omdat de hogere investering in de meeste gevallen niet zal opwegen tegen de beperkte voordelen is de vraag in hoeverre PCM's een meerwaarde vertegenwoordigen bij deze toepassing.

Specifiek voor de PCM-buffers gelden de volgende aanbevelingen:

- Voor isolatie van de buffer geldt hetzelfde als bij de waterbuffers;
- Focus op die markt waarbij het geringere volume van doorslaggevend betekenis kan zijn. Dit betreft bijvoorbeeld de focus op groottes waarbij plaatsing binnen nog net acceptabel is (500 liter).

### 8.4 TCM's

Voor de TCM's geldt het volgende beeld:

- De techniek heeft nog een lange weg te gaan, voordat de eerste commerciële toepassingen voor dit marktsegment er zullen zijn. Fabrikanten spreken zelf over een termijn van 8-10 jaar.
- Bij het realiseren van het beoogde prijsniveau is de prestatie van TCM's min of meer gelijkwaardig met die van PCM's. Dit maakt dat voor de toepassing van korte termijn buffers ook dezelfde conclusies gelden. Wel is de winst in volume hier groter dan bij PCM's. Daar tegenover staat echter een complexere installatie, wat ook leidt tot extra ruimtebeslag.
- De kracht van TCM's zit in de toepassing voor langere termijn buffering. Opslag perioden van een maand of seizoen zijn met TCM's goed haalbaar, zonder significante energieverliezen.
- De businesscase is ook bij het realiseren van het gewenste prijsniveau nog niet gunstig.

Aanbevelingen voor de toepassing van TCM's zijn:

- Stimuleren van verdere ontwikkelingen op het gebied van TCM's. Er is nog slechts beperkt

onderzoek gedaan naar deze specifieke toepassing. Hierom is het de verwachting dat bij verder onderzoek er TCM's gevonden zullen worden met een hoge opslagdichtheid en een geschikt temperatuurniveau.

- Ontwikkelen van compacte buffers. Voor een opslagperiode van 1 dag, is het mogelijk met een beperkt volume (ca 300 liter) een invulling te geven. Hiermee zou het mogelijk moeten zijn om een dergelijk buffer in de woning te plaatsen. Hiermee hebben TCM's een unieke positie.
- Ontwikkelen van grotere systemen (1-30 GJ) voor overbrugging van langere perioden (30-180 dagen). Op dit vlak is de toepassing van TCM's de enige praktisch haalbare toepassing voor opslag van warmte waarbij geen naverwarming noodzakelijk is.
- Focus op het verlagen van de prijs. Juist bij de langere opslagperioden is er sprake van een heel beperkt aantal opslagcycli per jaar, en daarmee een laag terugverdienpotentieel. Een sterke verlaging van de prijs is daarom noodzakelijk voor een succesvolle toepassing.

### 8.5 Vervolgstappen

Om te komen tot de daadwerkelijke toepassing van kleinschalige warmteopslag zijn nog verschillende vervolgstappen nodig. Enkele belangrijke stappen zijn:

- Ontwikkeling van TCM buffers met een geschikt temperatuurtraject voor warmteopslag in woningen. Met name de focus op lange termijn opslag is hier kansrijk.
- Voor de toepassing van korte termijn opslag (1 of enkele dagen) is de techniek van wateropslag voldoende ontwikkeld. Met deze techniek zou een proefproject gedaan kunnen worden. Bij voorkeur is dit een project waar de netcapaciteit beperkt is, en uitbreiding van deze capaciteit kostbaar.
- Om een meer generieke toepassing te stimuleren is het noodzakelijk om de tariefstructuur aan te passen, en zowel energie als capaciteit te bepalen afhankelijk van beschikbaarheid in zowel tijd als plaats.

# I Bijlage Technische analyse opslagtechnieken thermische energie

---

De implementatie van warmteopslag in gebouwen kan plaatsvinden door gebruik te maken van actieve of passieve toepassingen. Actieve toepassingen worden meestal gekarakteriseerd door geforceerde convectie warmteoverdracht (Navarro, de Gracia, Colclough, et al., 2016). Het laden en ontladen van deze toepassingen gebeurt door de 'actieve' hulp van een pomp of ventilator (Heier, Bales & Martin, 2015). In tegenstelling tot actieve toepassingen gebruiken passieve toepassingen geen enkele mechanische input. Ze laden en ontladen door zonnestraling, natuurlijke convectie of temperatuur verschillen. Deze passieve toepassingen zijn voornamelijk gericht op het verminderen van de energiebehoefte van gebouwen (Navarro, de Gracia, Colclough, et al., 2016) en zijn dan ook altijd geïntegreerd in de kern van het gebouw, vaak in componenten zoals muren, plafonds en vloeren (Navarro, de Gracia, Niall, et al., 2016). Waar passieve toepassingen voornamelijk de energie behoefte verminderen, zorgen actieve toepassingen ervoor dat de piekvraag naar elektriciteit verminderd kan worden door gebruik te maken van de opgeslagen energie. Ook kan de bijdrage van duurzame energie vergroot worden door de ongunstige verhouding tussen vraag en aanbod van duurzame energie te overbruggen (Hyman, 2011; International Energy Agency, 2013).

Voor de opslag van warmte kan gebruik gemaakt worden van een aantal verschillende basisprincipes:

- Opslag voelbare warmte
- Opslag in faseovergangsmaterialen (PCM's)
- Opslag in chemische verbindingen (TCM's)
- Overige

## I.1 Voelbare warmte

Van de drie beschikbare methodes is voelbare warmte (sensible heat storage, SHS) de meest eenvoudige (Sarbu & Sebarchievici, 2018) en wordt deze veel gebruikt in toepassingen voor gebouwen (Lizana et al., 2017). De oudste voorbeelden van opslag van voelbare warmte zijn een pan met heet water die in een stoof werd gezet en zo nog een tijd lang nagaarde. Ook het strijkijzer dat vroeger op de kachel werd gezet en zo opwarmde, berustte op dit principe.

In de huidige installatietechnische wereld wordt deze techniek vooral ingezet in de vorm van waterbuffers. Hierbij worden kleine (in woningen) of grote (in de glastuinbouw) waterbuffers gebruikt om warmte op te slaan. Vrijwel elk zonneboilersysteem maakt gebruik van opslag in een watervat omdat warmteaanbod en -vraag niet parallel lopen.

SHS is gebaseerd op de opslag van warmte door het verwarmen of koelen van een opslagmateriaal (Sarbu & Sebarchievici, 2018). Door het toedienen van warmte aan het opslagsysteem wordt de temperatuur van het materiaal significant verhoogd, dit zorgt ervoor dat de interne energie van het materiaal verandert en de toegevoerde energie wordt opgeslagen als voelbare warmte (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). De SHS materialen worden gekenmerkt doordat ze niet van fase veranderen in het temperatuurgebied van de uiteindelijke toepassing (Fernandez, Martínez, Segarra, Martorell & Cabeza, 2010).

Een belangrijke eigenschap van deze SHS materialen is de specifieke warmte capaciteit ( $C_p$ ). Des te hoger deze warmte capaciteit is, des te hoger de energie opslagdichtheid van het systeem (Alva et al., 2017; Fernandez et al., 2010). De hoeveelheid opgeslagen energie per gewicht is proportioneel aan de specifieke warmte capaciteit

en het temperatuurverschil door het opwarmen van het materiaal. Dit wordt uitgedrukt in de volgende vergelijking (Alva et al., 2018; Sarbu & Sebarchievici, 2018):

$$Q_{\text{sensible}} = C_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Hierbij is  $Q_{\text{sensible}}$  de hoeveelheid opgeslagen energie per kilogram [kJ/kg],  $C_p$  is de specifieke warmte capaciteit [kJ/kgK], en  $\Delta T$  is de verandering in temperatuur [K].

Om de opslagcapaciteit per volume te krijgen kan de hoeveelheid opgeslagen energie per gewicht vermenigvuldigt worden met de dichtheid ( $\rho$ ) van het materiaal [kg/m<sup>3</sup>] (Lizana et al., 2017).

Een groot nadeel van SHS is dat materialen over het algemeen een relatief lage energie dichtheid hebben. Dit ervoor dat het systeem veel ruimte in beslag zal nemen door de benodigde grootte terwijl beperkte ruimte in woongebouwen vaak een cruciaal punt is. Hiernaast zijn ook de hoge energieverliezen in de tijd bij het gebruik van SHS, voornamelijk bij langdurige opslag, erg nadelig (Tatsidjodoung, Le Pierrès & Luo, 2013).

Er kunnen twee hoofdgroepen van SHS materialen onderscheiden worden: vaste en vloeibare opslag- materialen. Enkele voorbeelden van vaste opslag- materialen zijn stenen, beton, ijzer en hout. Een voordeel van deze vaste materialen is dat ze geen lekkage problemen hebben (Alva et al., 2017; Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014; Tatsidjodoung et al., 2013). De relatief lage specifieke warmtecapaciteit is echter een groot nadeel en in vergelijking met water zijn de kosten ook relatief hoog (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014; Tatsidjodoung et al., 2013). Sommige vaste materialen zoals stenen en beton kunnen warmte opslaan tot ongeveer 80 °C. Met een temperatuur verschil van 25 °C hebben deze materialen dan een volume opslag capaciteit van ongeveer 50 MJ/m<sup>3</sup> (Lizana et al., 2017).

Vloeibare opslagmaterialen worden voornamelijk gecategoriseerd als water en oliën (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). Uit verschillende onderzoeken naar SHS kan worden opgemaakt dat water het meest geschikte materiaal voor opslag- temperaturen onder 100 °C is. Dit komt voornamelijk door de relatief hoge specifieke warmte capaciteit, de lage kosten en de grote beschikbaarheid van water (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014; Lizana et al., 2017; Sarbu & Sebarchievici, 2018; Tatsidjodoung et al., 2013). In vergelijking met de eerder benoemde opslagcapaciteit van vaste materialen heeft water een volume opslagcapaciteit van 105 MJ/m<sup>3</sup> bij een temperatuur verschil van 25 °C (Lizana et al., 2017). De energie opslagcapaciteit van water is dus ongeveer twee keer zo groot als dat van vaste opslagmaterialen bij opslag onder 100 °C.

In het artikel van Tatsidjodoung et al. (2013) wordt ook gietijzer benoemd in een tabel. Ondanks de lage specifieke warmte capaciteit van gietijzer in vergelijking met water, 0,837 tegen 4,19 kJ/kgK voor water, zorgt de dichtheid van gietijzer (7900 kg/m<sup>3</sup>) er toch voor dat de volume opslag capaciteit bij een temperatuur verschil van 25 °C gelijk is aan 165 MJ/m<sup>3</sup>. Wanneer de prijs van gietijzer vergeleken wordt met water is dit wel in het voordeel van water. De prijs van gietijzer is € 0,19 per kilogram, dit zorgt voor een prijs van €1.500 per m<sup>3</sup>, terwijl de prijs per m<sup>3</sup> water niet hoger wordt dan €1,69.

Wanneer toepassingen een temperatuur nodig hebben die hoger is dan 100 °C dan zullen deze gebruik maken van oliën, vloeibare metalen of gesmolten zout, omdat deze een betere opslagcapaciteit hebben bij hogere temperaturen (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

Tabel I.1 Overzicht materialen voor opslag voelbare warmte

Available SHSMs for building applications.

Reference	Material	Average material cost [33–35]	Type	Properties			
				Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> °C)	Specific heat capacity (kJ/kgK)	Average volumetric specific heat capacity (kJ/m <sup>3</sup> K)
Asan and Sancaktar [32]	Asphalt sheet	56 €/m <sup>3</sup>	Solid	2300	1.2	1.7	3910
Tatsidjodoung et al. [6]	Oil	6560 €/m <sup>3</sup>	Liquid	888	0.14	1.88	1669
Tudela [31]	Ceramic brick	36–64 €/m <sup>3</sup>	Solid	1800	0.73	0.92	1656
ISO 10456:2007 [15]	Wood	404 €/m <sup>3</sup>	Solid	450	0.12	1.6	720
	Plywood boards	1114 €/m <sup>3</sup>	Solid	500	0.13	1.6	800
	Gypsum (plasterboard)	385 €/m <sup>3</sup>	Solid	900	0.25	1	900
	Gypsum (coating)	78 €/m <sup>3</sup>	Solid	1000	0.4	1	1000
	Oriented strand board	328 €/m <sup>3</sup>	Solid	600	0.14	1.7	1020
	Wood	404 €/m <sup>3</sup>	Solid	700	0.18	1.6	1120
	Oriented strand board	328 €/m <sup>3</sup>	Solid	900	0.18	1.7	1530
	Ceramic tile	1600–3500 €/m <sup>3</sup>	Solid	2000	1	0.8	1600
	Lime mortar	123 €/m <sup>3</sup>	Solid	1600	0.8	1	1600
	Plywood boards	1114 €/m <sup>3</sup>	Solid	1000	0.24	1.6	1600
	Cement bonded particleboard	1309 €/m <sup>3</sup>	Solid	1200	0.23	1.5	1800
	Cement mortar	115 €/m <sup>3</sup>	Solid	1800	1	1	1800
	Concrete	76 €/m <sup>3</sup>	Solid	2000	1.35	1	2000
	Sand and gravel	6–8 €/m <sup>3</sup>	Solid	1700–2200	2	0.910–1.180	2072
	Limestone	70–819 €/m <sup>3</sup>	Solid	1600–2600	0.85–2.3	1	2100
	Rock	64–742 €/m <sup>3</sup>	Solid	2800–1500	3.5–0.85	1	2150
	Concrete (high density)	100 €/m <sup>3</sup>	Solid	2400	2	1	2400
	Reinforced concrete (2%)	121 €/m <sup>3</sup>	Solid	2400	2.5	1	2400
	Clay or silt	–	Solid	1200–1800	1.5	1.670–2.500	3252
	Water (80 °C)	1.6 €/m <sup>3</sup>	Liquid	970	0.67	4.19	4064
	Water (40 °C)	1.6 €/m <sup>3</sup>	Liquid	990	0.63	4.19	4148
	Water (10 °C)	1.6 €/m <sup>3</sup>	Liquid	1000	0.6	4.19	4190

List of selected solid and liquid materials for sensible heat storage in building applications.

Material	Type	Temperature range (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/(kg K))	$k$ (W/(m K)) (at 20 °C)	$e$ (W s <sup>1/2</sup> /(m <sup>2</sup> K))
Water	Liquid	0–100	1000	4.19	0.58	49.30
Caloria HT43	Liquid	12–260	867	2.2	–	–
Ethanol	Liquid	Up to 78	790	2.4	0.171	18.01
Propanol	Liquid	Up to 97	800	2.5	0.161	17.94
Butanol	Liquid	Up to 118	809	2.4	0.167	18.01
Isobutanol	Liquid	Up to 100	808	3	0.133	17.96
Isopentanol	Liquid	Up to 148	831	2.2	0.141	16.06
Octane	Liquid	Up to 126	704	2.4	0.134	15.05
Engine Oil	Liquid	Up to 160	888	1.88	–	–
Brick	Solid	20–70	1600	0.84	1.20	1270
Concrete	Solid	20–70	2240	1.13	0.9–1.3	47.73–57.36
Cement sheet	Solid	20–70	700	1.050	0.36	514
Gypsum plastering	Solid	–	1200	0.837	0.42	649
Granite	Solid	20–70	2650	0.900	2.90	2967
Marble	Solid	20–70	2500	0.880	2.00	2285
Sandstone	Solid	20–70	2200	0.712	1.83	1710
Clay sheet	Solid	–	1900	0.837	0.85	1163
Asphalt sheet	Solid	–	2300	1.700	1.20	2166
Steel slab	Solid	20–70	7800	0.502	50	13,992
Cork board	Solid	–	160	1.888	0.04	110
Wood	Solid	–	800	2.093	0.16	324
Plastic board	Solid	–	1050	0.837	0.50	663
Rubber board	Solid	–	1600	0.200	0.30	310
PVC board	Solid	–	1379	1.004	0.16	410
Asbestos sheet	Solid	–	2500	1.050	0.16	648
Formaldehyde board	Solid	–	30	1.674	0.03	39
Thermalite board	Solid	–	753	0.837	0.19	346
Fiber board	Solid	–	300	1	0.06	134
Siporex board	Solid	–	550	1.004	0.12	257
Polyurethane board	Solid	–	30	0.837	0.03	27
Light plaster	Solid	–	600	1	0.16	712
Dense plaster	Solid	–	1300	1	0.50	806
Aluminum	Solid	Up to 160	2707	0.896	204	703.42
Aluminum oxide	Solid	Up to 160	3900	0.84	30	313.50
Aluminumsulfate	Solid	Up to 160	2710	0.75	–	–
Cast iron	Solid	Up to 160	7900	0.837	29.3	440.16
Pure iron	Solid	Up to 160	7897	0.452	73	510.46
Calcium chloride	Solid	Up to 160	2510	0.67	–	–
Copper	Solid	Up to 160	8954	0.383	385	1149.05
Stone, granite	Solid	Up to 160	2640	0.82	1.7–3.98	61.20–92.82
Stone, sandstone	Solid	Up to 160	2200	0.71	1.83	53.46

## I.2 PCM's

Bij faseovergangsmaterialen (latent heat storage, LHS) wordt thermische energie opgeslagen of vrij gegeven doordat een opslag- materiaal van fase verandert; vast naar vast, vast naar vloeibaar, vloeibaar naar gas of andersom. Deze materialen worden PCM's (phase change materials) genoemd. LHS is een erg efficiënte techniek met een hoge opslag capaciteit (Cárdenas & León, 2013). In vergelijking met SHS materialen, kunnen PCMs meer warmte opslaan met een veel kleiner temperatuurverschil tussen het opslaan en vrijgeven van warmte (Lizana et al., 2017).



Wanneer PCMs worden verwarmd absorberen ze thermische energie terwijl de temperatuur toeneemt. Op het moment dat het materiaal bij de specifieke faseovergangstemperatuur komt beginnen de verbindingen in het materiaal te breken. Dit zorgt ervoor dat een endotherm proces op gang wordt gebracht waarbij warmte wordt geabsorbeerd en het materiaal van fase verandert. Wanneer de temperatuur weer afneemt wordt een exotherm proces gestart, waardoor het materiaal energie afgeeft en weer terug verandert naar de eerdere fase (Kalnæs & Jelle, 2015). In andere woorden, wanneer het materiaal wordt verwarmd laadt het systeem op en wanneer de temperatuur afneemt dan ontleedt het systeem door energie af te geven.

Waar de temperatuur van SHS materialen toeneemt bij het opslaan van energie, absorberen PCMs het grootste deel van de opgeslagen energie juist op een bijna constante temperatuur gedurende de faseovergang (Delgado et al., 2019). Echter is het wel belangrijk om te onthouden dat PCMs voor en na de faseverandering op dezelfde manier warmte opslaan of vrijgeven als SHS materialen (Cabeza, 2019).

Ondanks het feit dat faseveranderingen van vloeibaar naar gas zorgen voor de grootste hoeveelheid energie, worden de PCMs waarbij de fase verandert van vast naar vloeibaar het meest frequent gebruikt. Bij fase-overgangen van vloeibaar naar gas zorgt de verdamping namelijk dat er grote verschillen in volume ontstaan, hierdoor wordt de opslag erg complex en praktisch onhandig.

Hiernaast hebben overgangen van vast naar vast het voordeel dat ze geen lekkage problemen hebben door het gemis van een vloeibaar materiaal en hebben ze geen inkapseling nodig. Echter is de opslag capaciteit van deze PCMs tien keer zo klein als de PCMs met een fase overgang van vast naar vloeibaar (Cárdenas & León, 2013).

De opslagcapaciteit van PCMs kan berekend worden door gebruik te maken van de volgende vergelijking (Cabeza, 2019):

$$Q_{latent} = \int_{T_1}^{T_{pc}} C_{ps} \cdot dT + \Delta H_{pc} + \int_{T_{pc}}^{T_2} C_{pl} \cdot dT \quad (1.2)$$

Waarbij  $Q_{latent}$  de hoeveelheid opgeslagen energie per kilogram is [kJ/kg],  $C_{ps}$  is de specifieke warmte capaciteit van het vaste materiaal [kJ/kgK],  $C_{pl}$  is de specifieke warmte capaciteit van het vloeibare materiaal [kJ/kgK],  $\Delta H_{pc}$  is de faseverandering enthalpie [kJ/kg] en  $dT$  is het temperatuurverschil tussen de start temperatuur ( $T_1$ ) en de faseverandering temperatuur ( $T_{pc}$ ) of tussen de faseverandering temperatuur en de uiteindelijke temperatuur ( $T_2$ ).

Naast de eerder besproken eigenschappen zijn er een aantal eigenschappen die van groot belang zijn wanneer PCMs gebruikt worden voor warmteopslag (Alva et al., 2017; Segarra et al., 2019; Su et al., 2015):

- Een hoge faseverandering enthalpie zorgt ervoor dat de energieopslag capaciteit hoger is.
- De faseovergangstemperatuur moet vlakbij de gewenste temperatuur van de toepassing liggen.
- De PCM moet congruent smelten
- Een lage thermische expansie coëfficiënt zorgt ervoor dat er geen grote volume verschillen ontstaan tussen de verschillende fases. Door grote verschillen in volume kan er fase segregatie ontstaan.

### Classificatie van PCM's

Er is een grote hoeveelheid PCM's beschikbaar welke allemaal een verschillend faseovergangstemperatuur hebben. Deze kunnen verdeeld worden in drie algemene categorieën: organische, anorganische en mengsels van PCM's (eutectics).

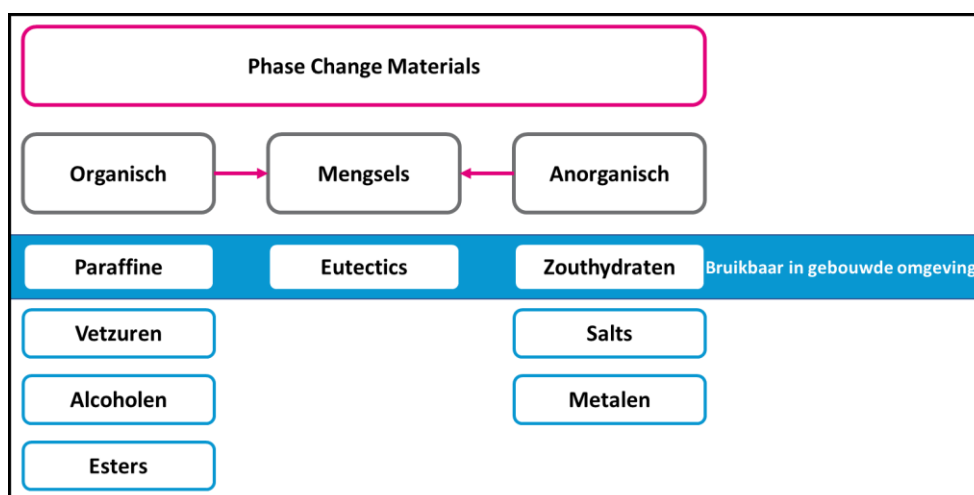
Organische PCMs kunnen onderverdeeld worden in paraffine en niet-paraffine materialen zoals vetzuren, alcoholen en esters. Over het algemeen hebben organische materialen de mogelijkheid om congruent te smelten, wat betekent dat de materialen herhaaldelijk kunnen smelten en kristalliseren zonder fasescheiding. Hiernaast kristalliseren organische materialen zonder of met een klein beetje supercooling en zijn ze niet corrosief (Rathod & Banerjee, 2013; Su, Darkwa & Kokogiannakis, 2015). Echter hebben organische materialen het nadeel dat de thermische geleidbaarheid erg laag is, meestal tussen 0,1 en 0,3 W/mK (Sharma et al., 2015). Hierdoor heeft het TES systeem een grotere oppervlakte nodig om de warmte-overdracht snelheid te verhogen.



Anorganische PCMs kunnen worden onderverdeeld in verschillende types, de meest voorkomende zijn: zout-hydraten, zouten en metalen. In vergelijking met organische materialen hebben anorganische materialen het voordeel van een hoge faseverandering enthalpie, zijn ze niet brandbaar en hebben ze lage kosten voor hetzelfde volume (Lin, Jia, Alva & Fang, 2018). Hiernaast is de thermische geleidbaarheid ongeveer 0,5 W/mK, deze is ook significant hoger dan die van organische materialen. Een andere belangrijke eigenschap is dat anorganische materialen stabiel blijven na een groot aantal oplaad cycli (Alva et al., 2017). Ondanks deze voordelen is er een groot nadeel dat anorganische materialen incongruent smelten en daardoor waarschijnlijk fasescheiding en supercooling problemen zullen hebben (Sharma et al., 2015). Een ander probleem is de corrosie van zout op metalen containers (Alva et al., 2017).

Eutectics zijn mengsels van verschillende oplosbare materialen die eigenschappen hebben om congruent te smelten en kristalliseren zonder dat er scheiding van materialen is (Chandel & Agarwal, 2017). De mengsels kunnen bestaan uit meerdere organische materialen, anorganische materialen of een combinatie hiervan. De grote verscheidenheid aan mengsels geeft de mogelijkheid om specifieke componenten zo te combineren zodat deze de gewenste eigenschappen voor de toepassing krijgen (Kalnæs & Jelle, 2015). Het op maat maken van deze mengsels is echter erg duur, de prijs is dan ook twee of drie keer hoger dan de prijs van losse organische of anorganische materialen (Rathod & Banerjee, 2013).

Ook al is er een grote verscheidenheid aan type PCMs, ze zijn niet allemaal bruikbaar in de gebouwde omgeving door de temperatuur behoefte van de toepassing. De PCMs die bruikbaar zijn in de gebouwde omgeving zijn paraffine, zouthydraten en eutectics (Lizana et al., 2017), zie de volgende figuur.



Figuur 1.0.1 Indeling PCM's

### Paraffine

Paraffines zijn alkanen met verschillende keten- lengtes; des te langer de keten, des te hoger de smelttemperatuur van de paraffine. De smelt- temperatuur varieert tussen de 0 en 120 °C (Cabeza, 2019). Voor de structuur kan de volgende algemene formule gebruikt worden:  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{(n-2)}\text{-CH}_3$ , waarbij n het aantal koolstof atomen in de keten is (Alva et al., 2018). Naast de algemene voordelen van organische PCMs is een voordeel van paraffine dat deze een goede opslagdichtheid in termen van massa heeft (Cabeza, 2019). Over het algemeen ligt de dichtheid rond de 900 kg/m<sup>3</sup> (Delgado et al., 2019) en is de faseovergang enthalpie ongeveer 200 J/g (Gulfam et al., 2019). Dit zorgt ervoor dat paraffine een opslagcapaciteit heeft van ongeveer 180 MJ/kg. Hiernaast heeft paraffine ook nog een lage dampspanning (Delgado et al., 2019; Su et al., 2015).

Er zijn ook enkele nadelen verbonden aan paraffine materialen. Zoals eerder benoemd voor de organische materialen, heeft paraffine een lage thermische geleidbaarheid van ongeveer 0,2 W/mK. Ook laten deze materialen grote veranderingen in volume zien tussen de vaste en vloeibare fasen (Su et al., 2015). Verder zijn paraffine materialen niet geschikt voor opslag in plastic containers en kan de brandbaarheid ook een probleem zijn (Cabeza, 2019; Su et al., 2015). Omdat pure paraffine erg duur is en hoge raffinage nodig heeft worden er goedkopere alternatieven gebruikt; paraffine wax. Dit is een mengsel van verschillende paraffine met een verschillende hoeveelheid koolstof atomen (Alva et al., 2018).

### Zouhydraten

De smelttemperatuur van zouthydraten ligt tussen de 5 en 130 °C (Cabeza, 2019). Zouthydraten kunnen worden beschreven met de volgende algemene formule:  $\text{water\vrij zout} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (Alva et al., 2018). Wanneer ze worden vergeleken met paraffine, dan is de dichtheid van zouthydraten ongeveer twee keer zo groot ( $1700 \text{ kg/m}^3$ ). Wanneer dit gecombineerd wordt met de faseovergang enthalpie die gelijkwaardig is ( $200 \text{ J/g}$ ), zorgt dit ervoor dat er een hogere opslag capaciteit behaald wordt, namelijk  $350 \text{ MJ/m}^3$ . Hiernaast is ook de thermische geleidbaarheid significant hoger met een waarde van  $0,5 \text{ W/mK}$  (Cabeza et al., 2011). Hiernaast zijn de volume- veranderingen door faseovergang niet zo groot (Su et al., 2015).

De voornaamste nadelen van zout hydraten zijn, zoals voor alle anorganische materialen, fase scheiding, supercooling en corrosie (Cabeza, 2019). Supercooling kan worden beschreven als het kristalliseren van het materiaal onder de faseovergang temperatuur. Zouthydraten worden chemisch onstabiel op hogere temperaturen. De oplaad proces waarbij er warmte wordt toegevoegd zorgt voor continue uitdroging van de materialen. Op den duur zorgt dit voor een afname van opslagcapaciteit. De meeste zouthydraten smelten incongruent (Cabeza et al., 2011), echter is dit afhankelijk van hun oplosbaarheid in water van uitdroging op het smelttemperatuur. Wanneer het materiaal volledig oplosbaar is, dan smelt het congruent en wanneer het materiaal niet volledig oplosbaar is dan smelt deze incongruent (ook wel semi-congruent). Bij deze gedeeltelijke uitdroging zijn de vloeibare en vaste fasen in evenwicht en wordt een lagere vorm zouthydraat gevormd die in de vaste toestand zal blijven (Alva et al., 2018; Su et al., 2015). Wanneer dit vaste zouthydraat niet meer beschikbaar is, heeft het incongruente smelten een negatief effect op het laad en ontlad proces voor lange termijn prestaties (Alva et al., 2017).

## Commercieel beschikbare PCMs

Met de paarse kleur worden de beste organisch beschikbare materialen weergegeven en met blauw de best beschikbare anorganische materialen.

Tabel I.2: Overzicht beschikbare PCM's

Type	Bedrijf	Naam	opslag temp.	Dichtheid (vast)	Dichtheid (vloeibaar)	Opslag capaciteit	Opslag capaciteit	Warmte overdracht (vast)	Warmte overdracht (vloeibaar)
			[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MJ/kg]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[W/mK]
Anorganisch	Rubitherm	Rubitherm SP 58	56-59	1400	1300	0,250	350	0,60	-
Anorganisch	Rubitherm	Rubitherm SP 70	67-73	1500	1300	0,150	225	0,60	-
Anorganisch	Rubitherm	Rubitherm SP 90	88-90	1700	1650	0,150	255	0,60	-
Organisch	Rubitherm	Rubitherm RT 60	60	880	770	0,160	141	0,20	-
Organisch	Rubitherm	Rubitherm RT 62 HC	62	850	840	0,230	196	0,20	-
Organisch	Rubitherm	Rubitherm RT 64 HC	64	880	780	0,250	220	0,20	-
Organisch	Rubitherm	Rubitherm RT 65	65	880	780	0,150	132	0,20	-
Organisch	Rubitherm	Rubitherm RT 69 HC	69	940	840	0,230	216	0,20	-
<b>Organisch</b>	<b>Rubitherm</b>	<b>Rubitherm RT 70 HC</b>	<b>70</b>	<b>880</b>	<b>770</b>	<b>0,260</b>	<b>229</b>	<b>0,20</b>	<b>-</b>
Organisch	Rubitherm	Rubitherm RT 80 HC	78	900	800	0,220	198	0,20	-
Zout hydraat	Climator	ClimSel C58	55-58	1400	-	0,260	364	0,57	0,47
Zout hydraat	Climator	ClimSel C70	70-77	1700	-	0,144	245	0,81	0,81
Zout hydraat	PCMproducts	S58	58	1505	-	0,145	218	0,69	-
Zout hydraat	PCMproducts	S70	70	1680	-	0,100	168	0,57	-
Zout hydraat	PCMproducts	S72	72	1666	-	0,155	258	0,58	-
Organisch	PCMproducts	A58	58	910	-	0,196	215	0,22	-
Organisch	PCMproducts	A58H	58	820	-	0,197	240	0,18	-
Organisch	PCMproducts	A62	62	910	-	0,187	205	0,22	-
<b>Organisch</b>	<b>PCMproducts</b>	<b>A70</b>	<b>70</b>	<b>890</b>	<b>-</b>	<b>0,200</b>	<b>225</b>	<b>0,23</b>	<b>-</b>
Solid-solid	PCMproducts	X55	55	1060	-	0,115	122	0,36	-
Solid-solid	PCMproducts	X70	70	1085	-	0,160	174	0,36	-
Solid-solid	PCMproducts	X80	80	1193	-	0,160	191	0,36	-
Organisch	savEng	PCM-OM65P	65	924	-	0,183	169	0,19	0,33
Organisch	PureTemp	PureTemp 58	58	890	810	0,225	200	0,25	0,15

Type	Bedrijf	Naam	opslag temp.	Dichtheid (vast)	Dichtheid (vloeibaar)	Opslag capaciteit	Opslag capaciteit	Warmte overdracht (vast)	Warmte overdracht (vloeibaar)
			[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MJ/kg]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[W/mK]
Organisch	PureTemp	PureTemp 60	61	960	870	0,220	211	0,25	0,15
Organisch	PureTemp	PureTemp 63	63	920	840	0,206	190	0,25	0,15
Organisch	PureTemp	PureTemp 68	68	960	870	0,213	204	0,25	0,15
Organisch	Croda	CrodaTherm 60	59,8	922	824	0,217	200	0,29	0,17
Anorganisch	Global-e-systems	GAIA HS PCM58	50-62	1450	-	0,226	328	1,02	0,54
Anorganisch	Global-e-systems	GAIA HS PCM64	58-70	1661	-	0,218	362	0,80	0,52
Organisch	Global-e-systems	GAIA HS PCM70	68-73	890	-	0,190	169	0,20	0,20
Anorganisch	Global-e-systems	GAIA HS PCM78	72-84	1900	-	0,260	494	0,98	0,50
Organisch	PLUSS	savE OM65	65-68	924	-	0,183	169	0,19	0,13
Organisch	PLUSS	savE FS65	66-66	842	-	0,159	134	0,25	-
onbekend	Axiotherm	ATP 60	52-67	-	800	0,230	184	0,20	-
onbekend	Axiotherm	ATP 70	63-78	-	800	0,250	200	0,20	-
onbekend	Axiotherm	ATP 78	70-85	-	800	0,225	180	0,20	-
Zout hydraat	Salca BV	Thermusol HD60SAE	60	-	-	0,160	208	-	-
Zout hydraat	Teappcm	Latest 68	68	1800	-	0,220	396	-	-
Zout hydraat	Teappcm	Latest 70	70	1800	-	0,230	414	-	-
Zout hydraat	Teappcm	Latest 78	78	1800	-	0,240	432	-	-

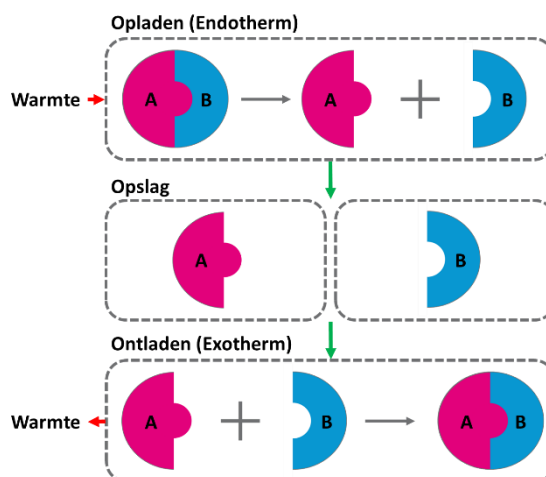
### I.3 Thermochemische warmteopslag

Thermochemische warmteopslag (THS) kan een grote hoeveelheid warmte opslaan door middel van sorptie processen of omkeerbare chemische reacties (Yu, Wang & Wang, 2013). In veel studies wordt er enkel naar sorptie processen verwezen omdat er voor warmteopslag geen duidelijk onderscheid te maken is tussen beide methodes (Krese, Koželj, Butala & Stritih, 2018; Scapino, Van Bael, Zondag, Diriken & Rindt, 2017). Sorptie warmteopslag processen kunnen beschreven worden als het veranderen van fysische of chemische bindingen van de componenten in de chemische reactie (dissociatie en recombinatie), respectievelijk fysische sorptie en chemische sorptie. Er zijn minimaal twee componenten benodigd om deze reactie te laten plaatsvinden, deze bestaan uit een sorptiemiddel (meestal een vloeistof of een vaste stof) en een sorbaat (meestal een gas). De opslag van energie vindt plaats door de toevoer van warmte welke resulteert in een endotherme reactie waar het sorptiemiddel en de sorbaat van elkaar gescheiden worden. Vervolgens kunnen beide stoffen apart opgeslagen worden waardoor energieverliezen beperkt worden. Wanneer de energie benodigd is kan deze weer gecreëerd worden door de twee stoffen bij elkaar te brengen, dit resulteert in een omgekeerde exotherme reactie (Scapino et al., 2017). In sommige gevallen zijn katalysatoren benodigd om ervoor te zorgen dat deze omgekeerde reactie plaatsvindt (Tatsidjodoung et al., 2013). Deze omkeerbare reactie kan worden beschreven als:



De figuur hiernaast geeft een schematische weergave van deze reactie.

Vanwege de potentieel hoge energiedichtheid van thermochemische opslag materialen (TCM's) en de mogelijkheid voor lange-termijnopslag zonder of verwaarloosbare energieverliezen zorgt ervoor dat THS een veelbelovende methode is voor warmteopslag (Tatsidjodoung et al., 2013). In vergelijking met SHS materialen (water) hebben THS materialen een opslagdichtheid die ongeveer acht keer zo groot is. In vergelijking met PCM's is dit ongeveer twee keer zo groot. Echter heeft THS wel te maken met trage kinetiek en moet er een efficiënte warmte en massaoverdracht van en naar het opslagvolume zijn om ervoor te zorgen dat de reactie productief is. Hierdoor is het ontwerp van het opslagstelsel erg complex en vereist het veel materialen. Dit zorgt ervoor dat de algehele energiedichtheid van het systeem sterk verminderd wordt (Aydin et al., 2015). Hiernaast zorgt de complexiteit van het systeem er ook voor dat de investerings- en onderhoudskosten omhoog gaan terwijl TCM's al relatief duur zijn. Verder is de korte thermische stabiliteit van materialen gedurende opslagcycli een veelvoorkomend probleem (Lizana, Chacartegui, Barrios-Padura, Valverde, et al., 2018b).



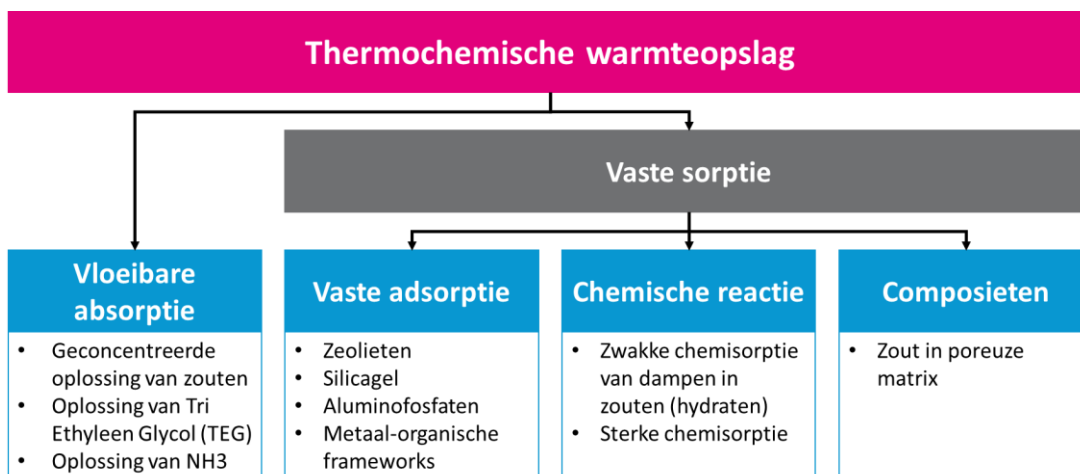
Figuur I.2: Schematische weergave van een omkeerbare thermochemische reactie.

#### Thermochemische warmteopslag mechanismen en materialen

Sorptie energieopslag processen kunnen op basis van twee sorptiemechanismen worden gecategoriseerd: absorptie en adsorptie. Absorptie is een proces dat plaatsvindt op het moleculaire niveau waarbij een vloeibaar materiaal (absorbaat) wordt opgelost door een ander vloeibaar of vast materiaal (absorbent). Adsorptie is een proces dat plaatsvindt op het oppervlakte niveau waarbij atomen, ionen of moleculen een dunne laag op de oppervlakte van het adsorberende materiaal (adsorbent) vormen zonder de structuur aan te passen. Adsorptie heeft geen tot zeer weinig activeringsenergie nodig en zorgt er ook voor dat het materiaal niet groter wordt (Scapino et al., 2017). Een nog verder onderscheid tussen sorptieprocessen kan gemaakt worden door te kijken of het om een fysisch of een chemisch sorptie proces gaat, dit is afhankelijk van de verbindingen die veranderd worden. Fysische sorptieprocessen betreffen lange afstand en zwakke bindingen, dit zijn voornamelijk Van der Waals en waterstof bindingen. In tegenstelling, chemische sorptieprocessen betreffen een korte afstand en sterke bindingen, zoals orbitale overlap

en ladingsoverdracht. Hiernaast hebben chemische sorptieprocessen activatie energie nodig om het proces op gang te brengen, waarbij dit niet het geval is bij fysische sorptieprocessen (Kuznik, Johannes, Obrecht & David, 2018).

Gebaseerd op de verschillende sorptiemechanismen kunnen er vier categorieën van THS worden onderscheiden: vloeibare absorptie, vaste absorptie, chemische reactie en composiet materialen (Yu et al., 2013). Waarbij de laatste drie categorieën gegroepeerd worden onder vaste sorptie (Scapino et al., 2017). Een overzicht van de verschillende mechanismen inclusief gerelateerde materialen wordt weergegeven in Figuur 1.3.



Figuur 1.3: Classificatie van thermochemische warmteopslag gebaseerd op Scapino et al. (2017) en Yu et al. (2013) en bijbehorende voorbeeldmaterialen.

### Materialen

In vergelijking met vaste adsorptie materialen hebben vloeibare absorptie materialen over het algemeen een hogere energiedichtheid. Echter moeten extra opslagvaten gebruikt worden door de vloeibare vorm van de materialen, dit zorgt ervoor dat de algehele opslagcapaciteit van het systeem sterk afneemt (Lizana et al., 2018b).

Chemische reactie materialen hebben de hoogste energiedichtheid van alle TCM's (Lizana et al., 2018b). Donkers, Sögütöglu, Huinink, Fischer & Adan (2017) presenteren een overzicht van meer dan 500 zouthydraten die gebruikt kunnen worden als TCM's in gebouwen. Uit dit overzicht wordt opgemaakt dat er twee materialen zijn die potentie hebben voor de toepassing. Kaliumcarbonaat ( $K_2CO_3$ ) ziet er het meest belovend uit omdat er geen warmteverliezen zijn gedurende opslag, het niet sterk corrosief is en geen gevaarlijke nevenreacties heeft. Magnesiumchloride ( $MgCl_2$ ) is de andere mogelijkheid, echter moet er dan een oplossing gevonden worden voor de waterstofchloride (HCl) ontgassing en delisquentie. Andere zouthydraten hebben nog veel meer problemen die overkomen moeten worden voor een eventuele toepassing. Ondanks de potentie van deze materialen concluderen Donkers et al. (2017) dat de huidige zouthydraten niet beschikken over de ideale eigenschappen voor lange-termijn opslag in gebouwen.

Composieten bieden de kans om de hydrothermische stabiliteit van pure zouthydraten te verbeteren door deze te mengen of impregneren met erg poreuze matrices of poeders. Desondanks dit voordeel kunnen er nog steeds enige problemen voor efficiënte warmte en massatransport voorkomen. Omdat composieten niet dezelfde functionaliteiten als zouthydraten hebben is het erg belangrijk dat er verder onderzoek gedaan wordt naar het behalen van een zo efficiënt mogelijke warmte en massatransport met deze materialen (Scapino et al., 2017).

### Thermochemische warmteopslag toepassing

Warmteopslag kan gebruik maken van zowel open als gesloten systemen. Open opslag systemen zijn open naar de omgeving en opereren dus in atmosferische omstandigheden. De toepassing van deze open systemen is echter wel beperkt tot adsorptieprocessen, waarbij de werkende vloeistof water is. De waterdamp (sorbaat) die gebruikt wordt in deze systemen wordt dan ook direct verkregen vanuit de omgevingslucht (Aydin et al., 2015; Ding & Riffat, 2013). Gesloten systemen zijn daarentegen gesloten voor de omgeving, ze wisselen alleen energie uit met hun eigen omgeving. Zowel adsorptie als absorptieprocessen kunnen gebruikt worden in een gesloten systeem (Ding

& Riffat, 2013). Het grote voordeel van open systemen tegenover gesloten systemen is dat deze een minder complex systeemontwerp nodig hebben en daardoor ook minder apparatuur (geen vacuüm technologie). Hierdoor gebruikt een open systeem dan ook minder ruimte wat leidt tot een hogere energiedichtheid en lagere constructie en onderhoudskosten (Jong et al., 2014). Echter zorgt het dampdrukverschil gecreëerd door de vacuümtechnologie er wel voor dat gesloten systemen een sneller transport mechanisme hebben vergeleken met open systemen die gedreven worden door een traag diffusie transport proces (Jong et al., 2014). Verder zorgen de systeemvereisten er ook voor dat gesloten systemen een hogere ontladtemperatuur kunnen behalen (Yu et al., 2013).

Op dit moment hebben warmteopslagsystemen gebaseerd op zeolieten aangetoond dat temperaturen ten behoeve van warmtapwater behaald kunnen worden. Echter zijn hiervoor wel erg hoge laadtemperaturen (ongeveer 180 °C) benodigd (Gaeini et al., 2017, 2018; Scapino et al., 2017).

Ondanks de hoge potentie van TCM's is er op dit moment nog geen materiaal dat voldoet aan alle vereisten voor commerciële toepassing in gebouwen (Lizana et al., 2018b). Hiernaast is er ook een tekort aan studies die naar de economische haalbaarheid van THS systemen kijken terwijl materiaal kosten, systeemcomplexiteit en systeem aanvullend energieverbruik een goede eerste beoordeling en een toekomstige route over de haalbaarheid van deze systemen kunnen geven voor de wetenschappelijke gemeenschap (Scapino et al., 2017).

### Overzicht materialen

De tabellen 1.3-1.6 geven een overzicht van verschillende thermochemische opslagmaterialen per categorie. De laad- en ontladtemperaturen per materiaal ligt over het algemeen erg ver uit elkaar, waarbij de laadtemperatuur vaak ongeveer twee keer zo hoog is als de ontladtemperatuur. Op het moment dat er een ontladtemperatuur van 60 °C benodigd is, dan zorgt dit dus al snel voor een laadtemperatuur van 120 °C. Op basis van het gegeven dat een warmtepomp niet kan verwarmen tot een hogere temperatuur dan 80 °C en de minimale ontladtemperatuur van 60 °C vallen vrijwel alle materialen af. Echter zijn er enkele materialen die net boven deze grens uitkomen en wellicht geschikt kunnen zijn voor warmteopslag in de gebouwde omgeving. In de tabellen zijn deze materialen aangegeven met een paarse kleur.

Het eerste materiaal in tabel 1, Silica gel 127B/H<sub>2</sub>O, heeft slechts een opslagcapaciteit van 180 MJ/m<sup>3</sup>. Deze opslag capaciteit is niet veel hoger dan dat van water waardoor het geen nut heeft om deze toe te passen aangezien thermochemische opslag een stuk complexer is dan opslag in water.

In tabel 2 en 4 zijn daarentegen twee materialen te vinden die meer mogelijkheden bieden voor thermochemische materialen. De twee materialen, NaOH/H<sub>2</sub>O en CaCl<sub>2</sub> (30%wt)-silica gel, hebben beide een laadtemperatuur rond de 90 °C en laten een geschikte ontladtemperatuur zien van respectievelijk 70 en 60 °C. De opslagcapaciteit van beide materialen is ongeveer twee keer zo hoog als dat van faseveranderingsmaterialen. Echter is er bij NaOH/H<sub>2</sub>O enige onzekerheid doordat verschillende onderzoeken andere waardes laten zien, deze onderzoeken laten een ontladtemperatuur zien van 33/56 °C.

Tabell.3: Vaste fysieke adsorptie materialen

<b>Materiaal</b>	<b>Laad temperatuur</b> [°C]	<b>Ontlaad temperatuur</b> [°C]	<b>Opslag dichtheid</b> [kJ/kg]	<b>Opslag capaciteit</b> [MJ/m <sup>3</sup> ]
<b>Silica gel 127B/H<sub>2</sub>O</b>	88	70-40		180
<b>Silica gel/H<sub>2</sub>O</b>	95	25		151
<b>Zeolite 13X/H<sub>2</sub>O</b>	180 20-120	65-55 50-25		648 641
<b>Zeolite 5A/H<sub>2</sub>O</b>	103	53-36	226,5	170
<b>Zeolite 13XBF/H<sub>2</sub>O</b>	150	75-47	399,6	277
<b>Zeolite 4A/Air</b>	180 180 230	35-10 60-35 60-35		576 346 421

Tabel 1.4: Vloeibare absorptie materialen.

<b>Materiaal</b>	<b>Laad temperatuur</b> [°C]	<b>Ontlaad temperatuur</b> [°C]	<b>Opslag dichtheid</b> [kJ/kg]	<b>Opslag capaciteit</b> [MJ/m <sup>3</sup> ]



<b>LiCl zout/H<sub>2</sub>O</b>	46-87	30-25	737	911
<b>NaOH/H<sub>2</sub>O</b>	95-150 95	70 33/56		900
<b>CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O</b>	117-138 130	165		382-1372 778
<b>LiBr/H<sub>2</sub>O</b>	75-90	40-30		922

Tabel I.5: Chemische reactie materialen.

<b>Materiaal</b>	<b>Laad temperatuur</b>	<b>Ontlaad temperatuur</b>	<b>Opslag dichtheid</b>	<b>Opslag capaciteit</b>
	[°C]	[°C]	[kJ/kg]	[MJ/m <sup>3</sup> ]
<b>MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O</b>	150 275-60	300-25		1512 1800
<b>MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</b>	130	65-50		~2000
<b>CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</b>	165-190	50		1470

Tabel I.6: Composiet materialen

<b>Materiaal</b>	<b>Laad temperatuur</b>	<b>Ontlaad temperatuur</b>	<b>Opslag dichtheid</b>	<b>Opslag capaciteit</b>
	[°C]	[°C]	[kJ/kg]	[MJ/m <sup>3</sup> ]
<b>Na<sub>2</sub>S-grafiet/H<sub>2</sub>O</b>	95-80		8064	
<b>Na<sub>2</sub>S-cellulose/H<sub>2</sub>O</b>	>83	45-35	3960	
<b>SrBr<sub>2</sub>-ENG/H<sub>2</sub>O</b>	80	35	1155	216
<b>Zeolite 4A-CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O</b>	130	25	3600	900
<b>CaCl<sub>2</sub> (30%wt)-silica gel</b>	90	60	1020	822
<b>CaCl<sub>2</sub> (43%wt)-silica gel</b>	80	30		760
<b>CaCl<sub>2</sub> (15%wt)-silica gel</b>			746	

## II Bijlage Enquête

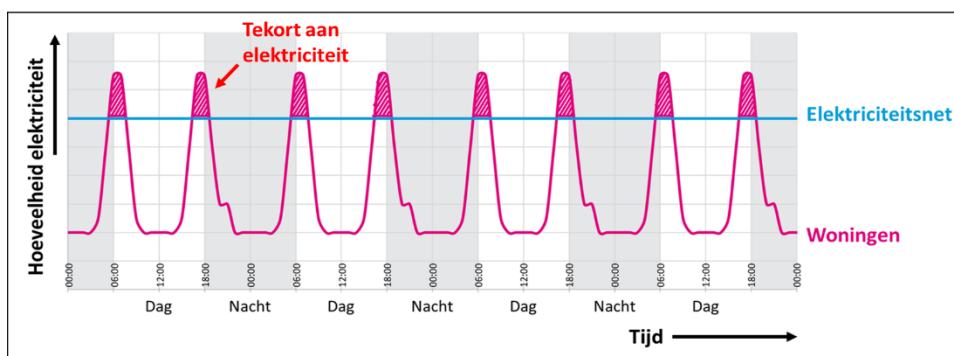
### II.1 Enquête

#### Achtergrondinformatie

Voor verwarming maken de meeste woningen in Nederland gebruik van een Cv-ketel. Deze Cv- ketel verbrandt aardgas om warmte te maken. Bij het verbranden van aardgas komt het broeikasgas CO<sub>2</sub> vrij, één van de grootste oorzaken van klimaatverandering. Ook heeft de winning van Gronings aardgas negatieve lokale gevolgen zoals aardbevingen.

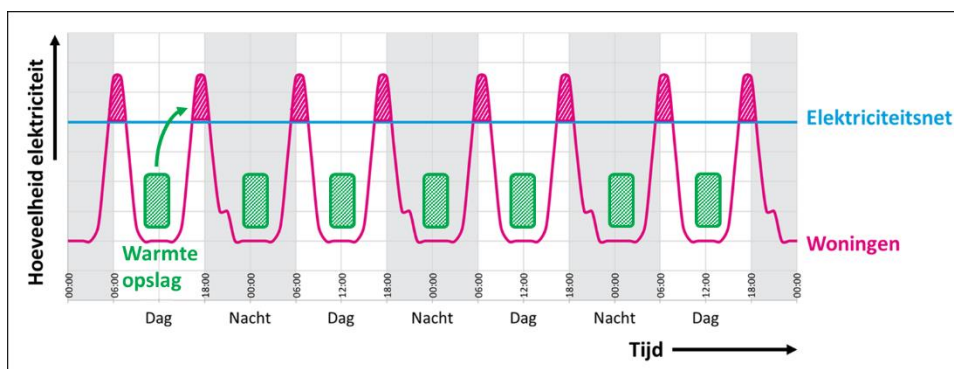
Om deze negatieve gevolgen zo veel mogelijk tegen te gaan wil de Nederlandse regering dat alle woningen in 2050 aardgasvrij zijn. Eén van de betere mogelijkheden is het vervangen van de Cv-ketel door een elektrische warmtepomp. Op deze manier kunnen woningen nog steeds verwarmd worden.

Het gebruik van een elektrische warmtepomp zorgt voor meer gebruik van elektriciteit, vooral in de winter. Dit grotere gebruik van elektriciteit zorgt voor een ander probleem. Veel mensen hebben namelijk op hetzelfde moment van de dag warmte nodig. Er kan echter maar een beperkte hoeveelheid elektriciteit door het elektriciteitsnet vervoerd worden. Het elektriciteitsnet bestaat uit kabels die de elektriciteit van de elektriciteitscentrale naar de woningen vervoeren. Op meerdere plaatsen in Nederland is de hoeveelheid elektriciteit die door deze kabels vervoerd kan worden niet groot genoeg. Op deze manier ontstaat er een tekort aan elektriciteit op bepaalde momenten van de dag (zie figuur II.1).



Figuur II.0.1

Het vervangen van deze kabels door nieuwe kabels die meer elektriciteit kunnen vervoeren is erg duur en op sommige plaatsen niet mogelijk. De kosten voor het vervangen van de kabels zullen op de energierekening van de consument te zien zijn. Dit houdt in dat de maandelijkse kosten voor energie hoger zullen worden. Een oplossing die misschien goedkoper is en zorgt dat deze kabels niet vervangen hoeven worden is warmteopslag in woningen. Warmteopslag is een techniek die warmte die gemaakt wordt met een warmtepomp bewaart in een opslagvat wanneer er voldoende elektriciteit beschikbaar is. Op het moment dat warmte nodig is terwijl er onvoldoende elektriciteit is kan de woning verwarmd worden met warmte uit deze opslag. Op deze manier wordt het tekort aan elektriciteit voorkomen (zie figuur II.2).



Figuur II.0.2

### Vragenlijst

1. In wat voor type woning woont u?
  - a. Appartement/flat
  - b. Rijwoning
  - c. Twee-onder-één-kapwoning
  - d. Vrijstaande woning
  - e. Overige (geef nadere toelichting)
  
2. Op welke locatie in of bij uw woning zou u een warmteopslag willen toestaan? (meerdere antwoorden mogelijk)
  - a. Bovengronds in uw tuin of op uw balkon (indien mogelijk)
  - b. Ondergronds (indien appartement niet mogelijk)
  - c. Kruipruimte
  - d. Trapkast
  - e. Zolder
  - f. Schuur/garage
  - g. Anders, namelijk:
  
3. Welke grootte van de warmteopslag zou acceptabel vinden voor elk van de onderstaande locaties in of bij uw woning?

	Formaat schoenen- doos	Formaat wasma- chine	Formaat toilet- ruimte
Bovengronds in de tuin of op het balkon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ondergronds	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kruipruimte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trapkast	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zolder	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schuur/garage	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Anders (ingevuld bij vorige vraag)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4. Welk geluidsniveau van een warmteopslag zou u acceptabel vinden?
  - a. Geen
  - b. Vergelijkbaar met een koelkast
  - c. Vergelijkbaar met een vaatwasser
  - d. Vergelijkbaar met een stofzuiger

*Eventuele toelichting:*
5. Hoeveel overlast mag de installatie van een warmteopslag in u woning veroorzaken?
  - a. Plaatsing binnen één uur
  - b. Plaatsing binnen één dag
  - c. Plaatsing binnen drie dagen

d. Anders, namelijk...

**6. Wanneer er onderhoud aan de warmteopslag moet plaatsvinden, hoe vaak zou u dit acceptabel vinden?**

- Eens per half jaar
- Eens per jaar
- Eens per twee jaar
- Anders, namelijk...

**7. Zou u op de langere termijn financieel voordeel willen krijgen door zelf te betalen voor de warmteopslag of moet deze betaald worden door een derde partij?**

- Ik wil zelf betalen en hier financieel voordeel uithalen op de langere termijn. U kunt in de toelichting aangeven welk bedrag u maximaal hierin wilt investeren.
- Ik wil dat een derde partij betaald en in het bezit blijft van de warmteopslag (bijvoorbeeld de netbeheerder).

Eventuele toelichting:

**8. Zou u comfort willen inleveren om financieel voordeel te krijgen?**

- **Comfort houdt in dat u op ieder moment uw woning kan verwarmen en over warm water beschikt.**
- **Inleveren van comfort houdt in dat u ongeveer vijf keer per jaar rekening moet houden met beperkt warmwatergebruik, bijvoorbeeld met douchen.**
  - Ja, ik ben bereid om comfort in te leveren om financieel voordeel te krijgen.
  - Nee, ik wil geen comfort in leveren.

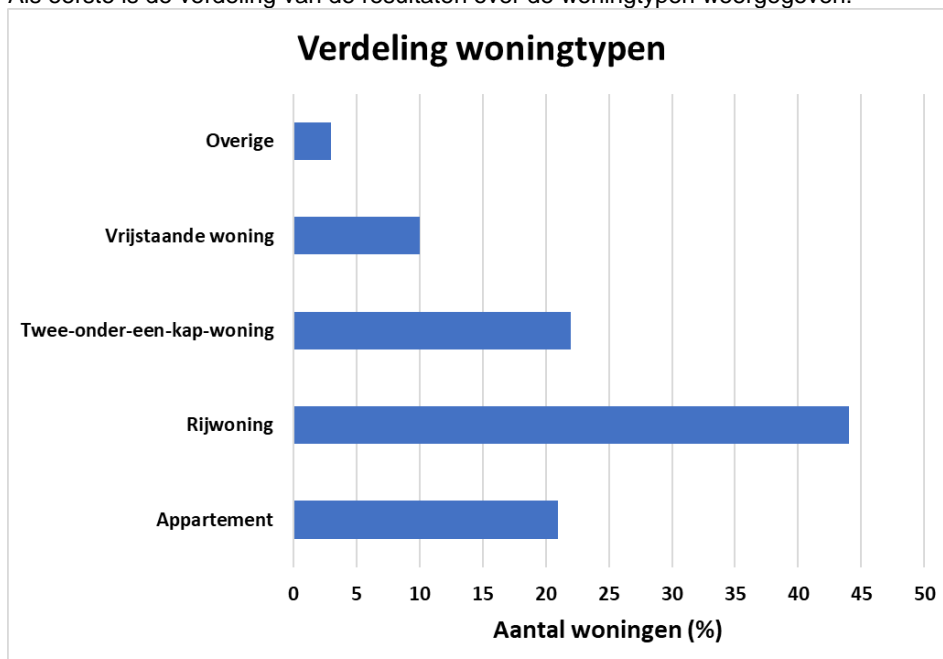
Eventuele toelichting:

## II.2 Resultaten

Hieronder zijn de resultaten van de enquête gevisualiseerd.

### Woningtypen

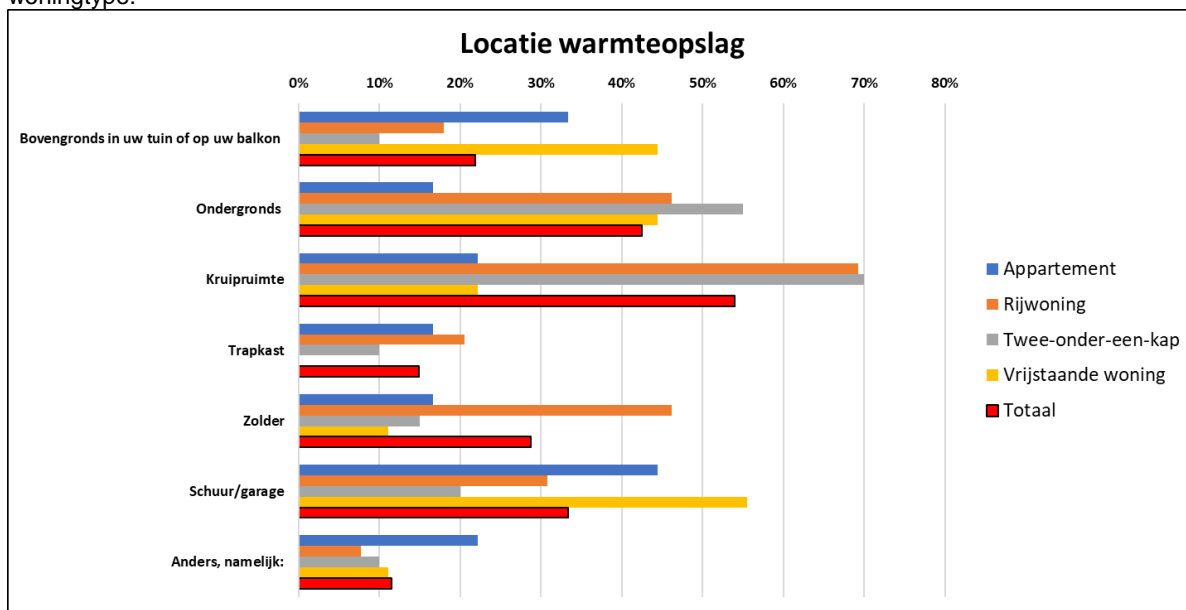
Als eerste is de verdeling van de resultaten over de woningtypen weergegeven.



Figuur II.0.3 Verdeling woningtypen enquêteresultaten

### Locatie warmteopslag

Vervolgens is gevraagd naar de locatie van de warmteopslag. Hierbij zijn de resultaten gevisualiseerd naar het woningtype.



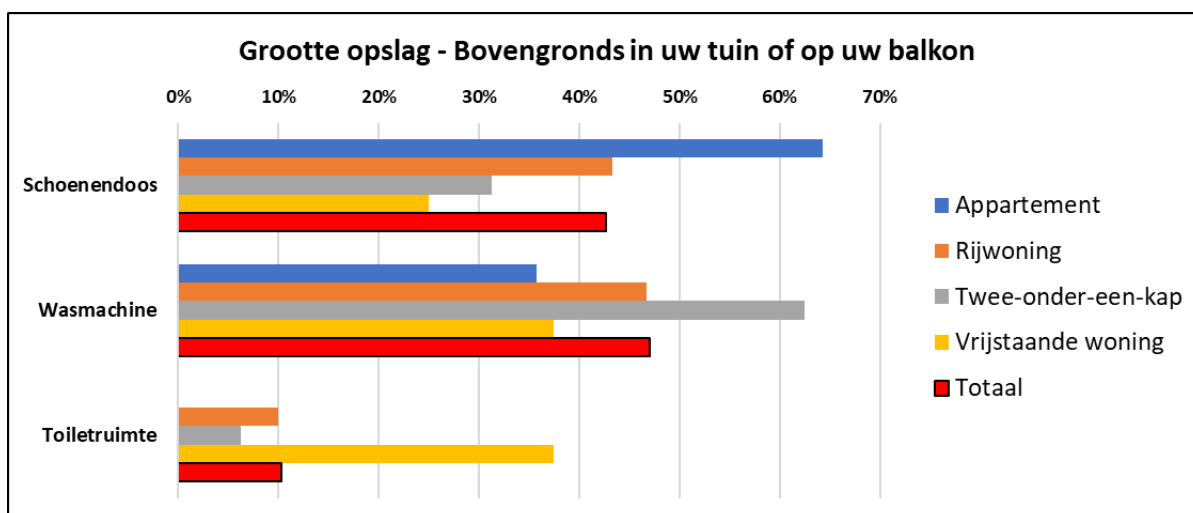
Figuur II.0.4 Acceptabele locaties per woningtype

Bij de categorie 'anders' zijn met name het dak (bij een appartement) de kelder en badkamer genoemd. Een aantal opvallende resultaten zijn:

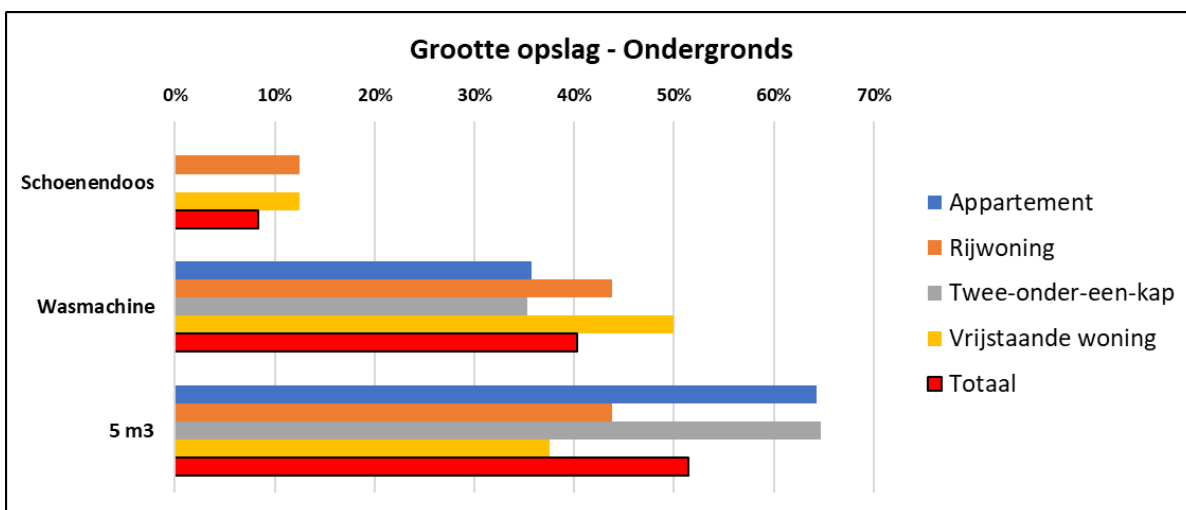
- De lage acceptatie van plaatsing bovengronds buiten of in de schuur/garage bij 2<sup>1</sup> kap woningen in vergelijking tot rijwoningen;
- De lage acceptatie van plaatsing in de kruipruimte in vrijstaande woningen;
- De hoge acceptatie van plaatsing op de zolder van rijwoningen.

### Groote warmteopslag

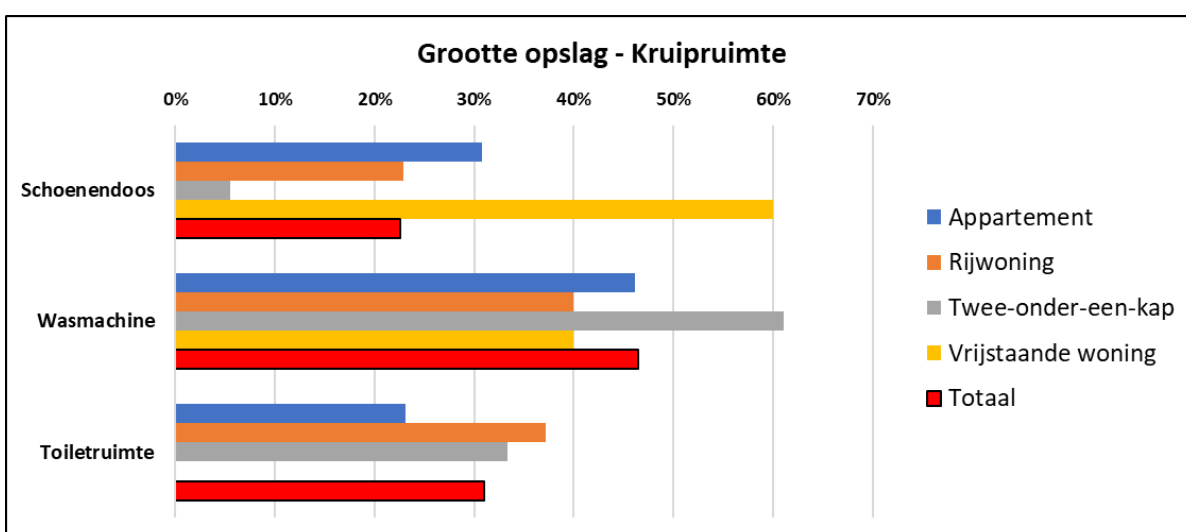
Bij de vraagstelling naar de acceptabele grootte van de opslag is in de volgende figuren onderscheid gemaakt naar woningtype en plaats van de opslag. Als beeld voor de grootte zijn de beelden 'schoenendoos', 'wasmachine' en 'toiletruimte' gebruikt.



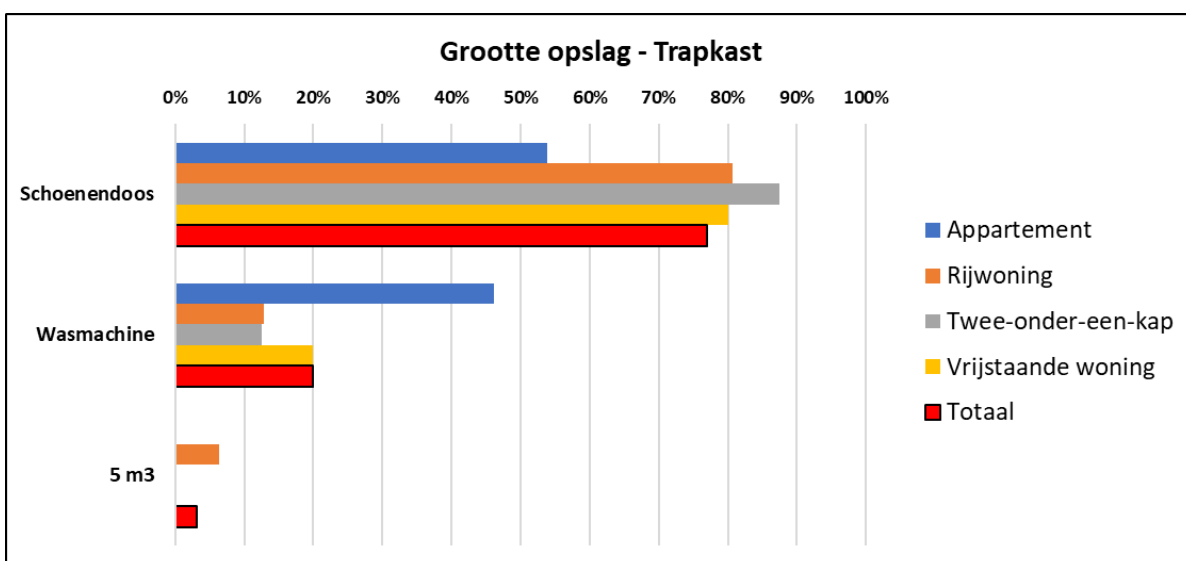
Figuur II.0.5 Acceptatie van verschillende buffergroottes bij plaatsing buiten bovengronds



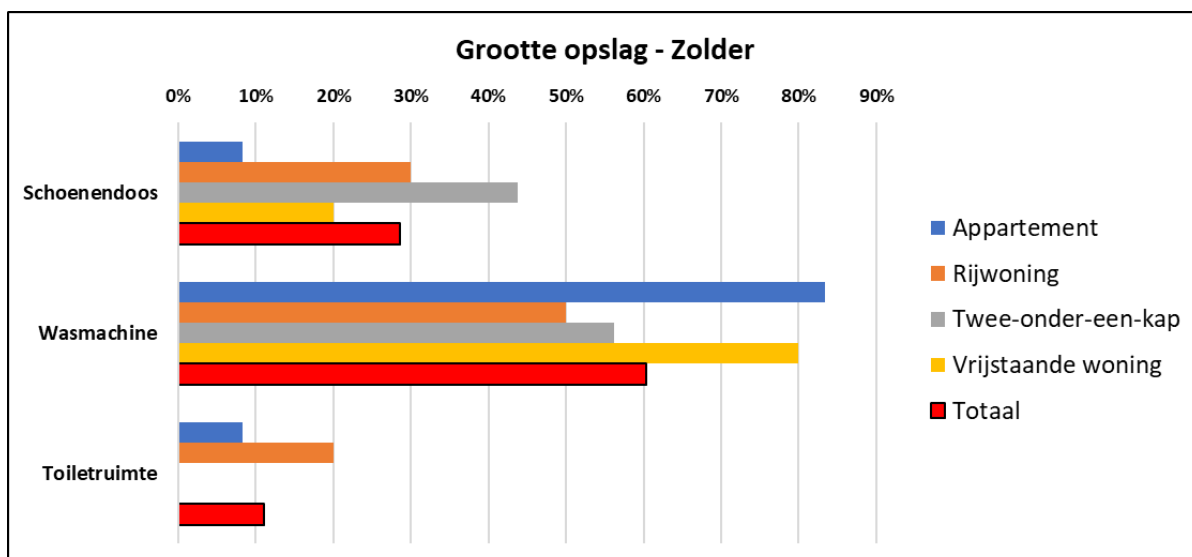
Figuur II.0.6 Acceptatie van verschillende buffergroottes bij plaatsing buiten ondergronds



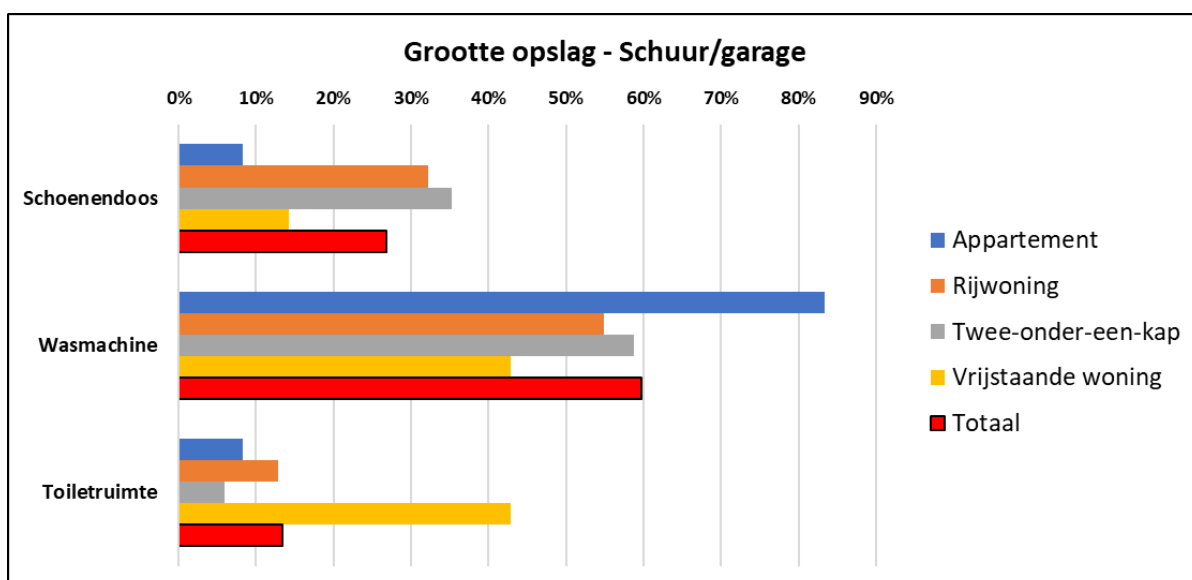
Figuur II.0.7 Acceptatie van verschillende buffergroottes bij plaatsing in de kruipruimte



Figuur II.0.8 Acceptatie van verschillende buffergroottes bij plaatsing in de trapkast of gangkast



Figuur II.0.9 Acceptatie van verschillende buffergroottes bij plaatsing op zolder



Figuur II.0.10 Acceptatie van verschillende buffergroottes bij plaatsing in de schuur of garage

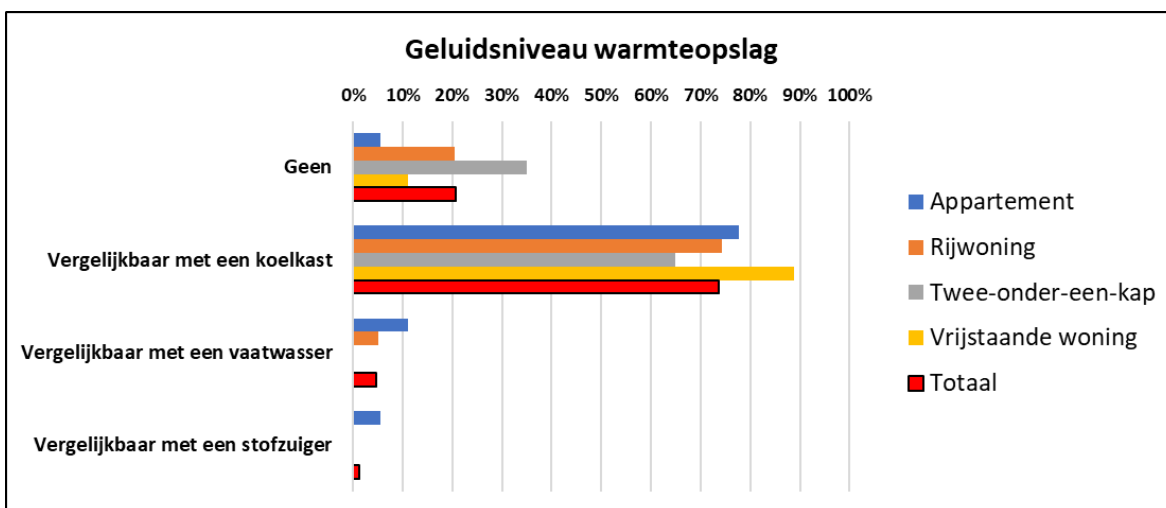
De resultaten zijn niet direct verrassend. Een aantal conclusies en bijzonderheden zijn:

- Bij plaatsing buiten bovengrond is een formaat tot een 'wasmachine' acceptabel; voor vrijstaande woningen is een formaat 'toiletruimte' net zo acceptabel als 'wasmachine';
- Bij plaatsing ondergronds is de voorkeur voor een groter formaat, boven een klein formaat;
- Bij plaatsing in de kruipruimte valt op dat vrijstaande woning een voorkeur hebben voor een zo klein mogelijk formaat; bij andere woningtypen is er de voorkeur voor 'wasmachine' formaat;
- Bij plaatsing in de trapkast of gangkast is het formaat 'schoenendoos' acceptabel; groter eigenlijk niet. Allen bij appartementen is de acceptatie hier hoger, omdat deze mogelijkheden zien voor plaatsing onder de trap, buiten de woning. Hier is inderdaad potentieel voor plaatsing.
- Bij plaatsing op zolder valt ook de hoge acceptatie van een formaat 'wasmachine' bij appartementen op. Deze hebben echter doorgaans echte bergzolders (als er al zolders aanwezig zijn) en geen functionele oppervlaktes op de zolder.

#### Geluidsniveau

Bij het aspect geluidsniveau was er zoals te verwachten geen groot onderscheid meetbaar tussen de verschillende woningtypen.



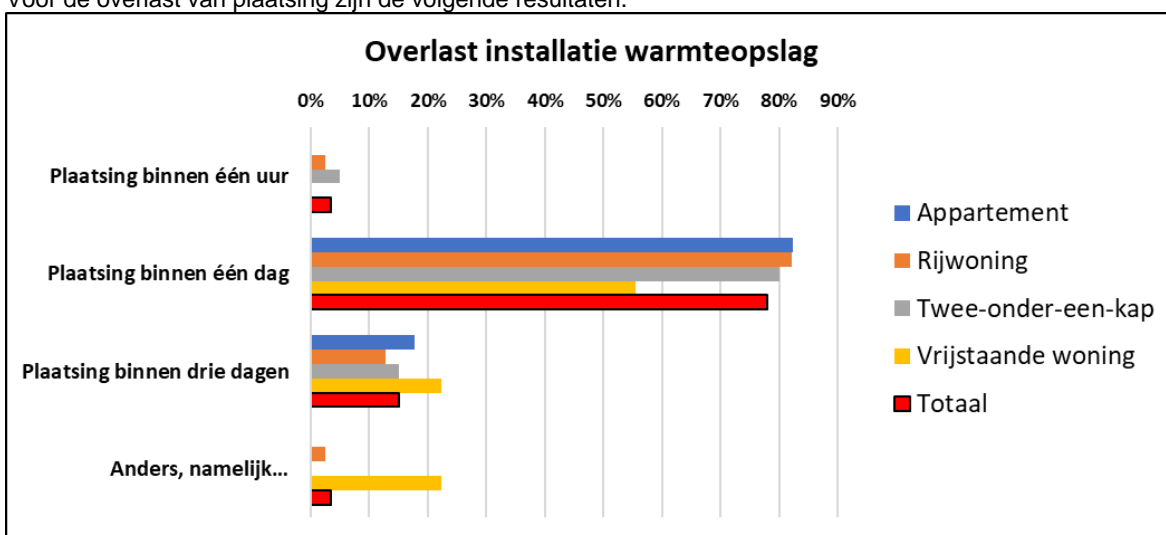


Figuur II.0.11 Acceptatie geluidsniveau

Duidelijk blijkt dat er een voorkeur is voor geen geluidsproductie, maar dat een geluidsniveau tot een stille koelkast acceptabel wordt gevonden.

### Overlast installatie

Voor de overlast van plaatsing zijn de volgende resultaten.

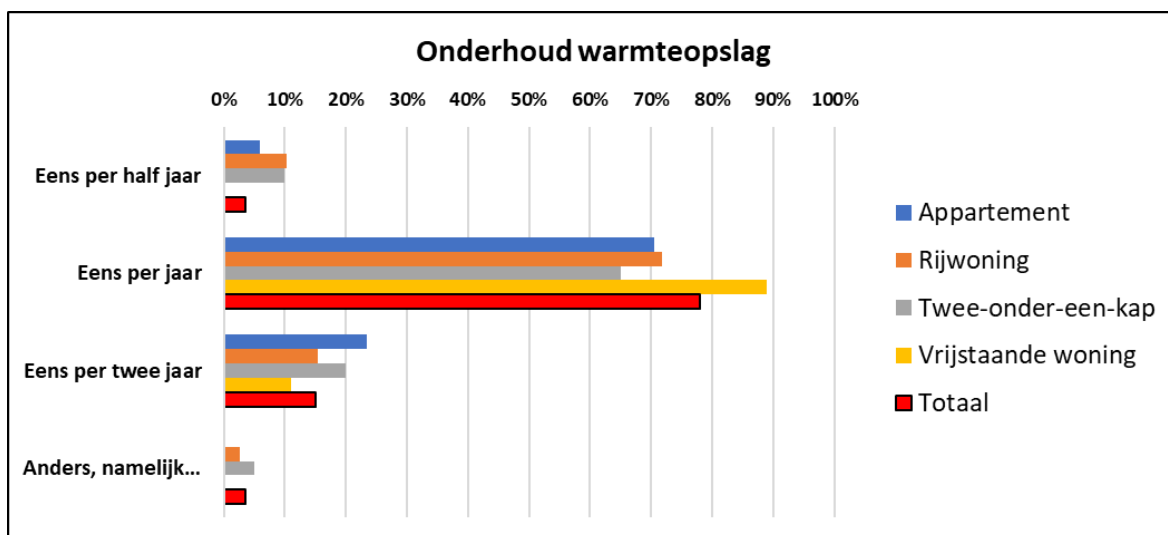


Figuur II.0.12 Acceptatie van overlast voor plaatsing

Het beeld op dit vlak is vrij homogeen: een voorkeur voor plaatsing binnen 1 dag, maar 3 dagen lijken acceptabel te zijn. De uitschieter bij vrijstaande woningen bij 'anders' betreft bewoners die aangeven dat dit voor hen geen relevant item is.

### Onderhoud

Zoals alle technische installaties kan een warmteopslag ook mogelijk onderhoud nodig hebben. De acceptabele frequentie van onderhoud is als volgt.

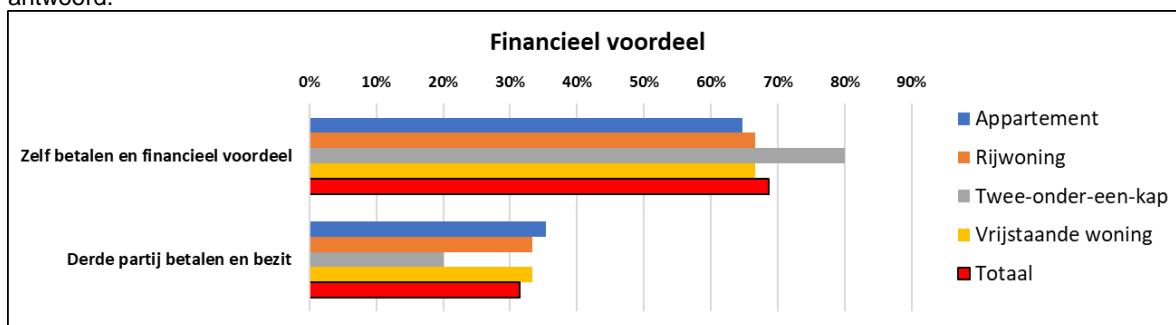


Figuur II.0.13 Acceptatie onderhoudsfrequentie

Uit de grafiek blijkt een duidelijke correlatie met de onderhoudsfrequentie van de CV-ketel. Deze is formeel voor diverse ketels eens per 2 jaar, hoewel de meeste contracten uitgaan van jaarlijks onderhoud. De opmerkingen onder 'anders' betreffen een lagere onderhoudsfrequentie van 'eens per 5 jaar' en 'onderhoudsvrij'.

### Eigendom

De vraag met betrekking tot het voorkeursscenario betreffende eigendom en financieel voordeel is als volgt beantwoord.



Figuur II.0.14 Voorkeur eigendomsverhouding

Het beeld hier is gemengd: circa 2/3 deel is voor het in eigendom hebben van de opslag en circa 1/3 deel wil het eigendom en beheer uit handen geven. Wanneer er gekozen is voor 'eigen beheer en eigendom' kon men aangeven wat de investeringsbereidheid was op dit onderdeel. Dit leverde het volgende resultaat:

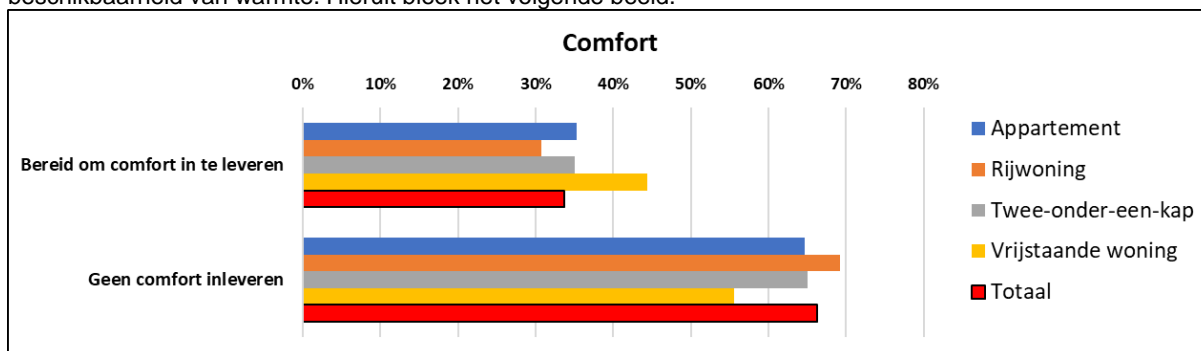
Tabel II.1 Investeringsbereidheid

Investeringsom (€)	Aandeel (%)
500-1.250	8%
1.250-2.250	23%
2.250-4.500	23%
4.500-9.000	31%
> 9.000	15%
Geen maximum, maar maximale tvt	7;8;10 jaar

De belangrijkste conclusie is dat er een redelijke investeringsbereidheid is, maar dat het voor bewoners belangrijk is deze investering terug te kunnen verdienen.

### Comfort

Het laatste aspect betreft de bereidheid om eventueel incidenteel comfort in te leveren vanwege onvoldoende beschikbaarheid van warmte. Hieruit bleek het volgende beeld.



Figuur II.0.15 Bereidheid tot inleveren van comfort

Opvallend is dat circa een derde deel bereid is tijdelijk discomfort te accepteren, mits hier een financiële vergoeding tegenover staat. Nog opvallender is dat, hoewel de verschillen klein zijn, de bereidheid hiervoor het grootst is bij de duurste woningen: de vrijstaande woningen.

## III Bijlage Interviews

---

Om een goed beeld te krijgen bij de actuele status van kleinschalige energieopslag is een interview afgenomen met diverse marktpartijen die bezig zijn met ontwikkeling van de technologie of toepassingen op dit vlak. Deze partijen zijn:

- Ruud Cuypers, TNO, Kennisinstituut
- Herbert Zondag, TU Eindhoven/TNO, Kennisinstituut
- Gerard Oortman, PCM Technology, Producent
- Jacques A. Mathijssen, SolarFreezer, Producent
- Herman Reezigt, Flamco, Producent
- Aart de Geus, ArtEnergy, Adviesbureau

De resultaten uit deze interviews zijn hierna weergegeven. Hierbij zijn de resultaten gesorteerd naar de drie hoofdtechnologieën en onderverdeeld naar de verschillende aspecten. De resultaten zijn niet gekoppeld aan de specifieke personen of partijen.

### Voelbare warmte (wateropslag)

#### Technologisch

*“als je een kopje pakt, een koffiekopje, en daar doe je kokend water in dan kun je een half uur wachten en na een half uur is die terug op omgevingstemperatuur. En hoe komt dat, dat komt omdat warmte bijna niet vast te houden is. ... Dus vandaar dat warmte opslaan, zelfs als je met een thermoskan werkt, dan kun je er kokend water in doen en na een dag is die ook weer op omgevingstemperatuur, die warmte is bijna niet vast te houden. Dus hoe goed je die isolatie ook maakt, je hebt altijd te maken met warmte en met thermisch verlies en dat is bijna niet tegen te houden.”*

De energieverliezen van een watervat zullen te groot zijn om warmte te voorzien voor de lange termijn. Hiernaast nemen de kosten voor een watervat ook toe wanneer deze beter worden geïsoleerd. (*producent*). Hierdoor gelooft deze niet in warmteopslag alleen; hij gelooft eerder in het verlagen van het energieverbruik door verandering in gedrag en betere isolatie.

De hoge energieverliezen met water zijn alleen relevant wanneer je kijkt op woningniveau, want wanneer je een heel groot opslagsysteem gebaseerd op water hebt, bijvoorbeeld Ecovat, dan zijn de verliezen relatief gezien klein. Op deze manier is het mogelijk om warmte in water zelfs voor maanden op te slaan (*kennisinstituut*).

#### Economisch

Geen nieuwe informatie.

#### Milieutechnisch

Geen relevante informatie.

#### Sociaal

Voor een scope van een paar dagen is thermochemische opslag niet interessant, want een goed geïsoleerd watervat verliest dan ook niet zo veel energie. Thermochemische opslag wordt pas interessant wanneer je warmte voor een lange termijn wilt opslaan.

Volgens een producent krijgt elk huis een (elektrische) batterij welke in het bezit is van de netbeheerder en niet van de bewoner. De netbeheerder weet precies hoeveel zonnepanelen elke woning heeft en hoeveel energie er

verbruikt wordt. Op deze manier kan de netbeheerder bepalen wanneer elke batterij wordt opgeladen zodat elke batterij voldoende opgeladen is op de momenten dat dit nodig is en er een betere balans op het elektriciteitsnet ontstaat waardoor de piekmomenten afnemen/verdwijnen.

### Politiek / legaal

Geen relevante items.

## PCM

### Technologisch

#### *Buffer met PCM platen*

##### Gereedheid

Het buffer systeem van een producent is commercieel al beschikbaar en kan dus in woningen toegepast worden. Echter wanneer er voor een PCM met een faseovergangstemperatuur van 80 °C wordt gekozen zijn er nog wel wat knelpunten. 60 °C is geen probleem. Ook wanneer het nodig is om een lange smalle buffer te maken zijn er nog enkele productieproblemen doordat de buffer aan de bovenkant rond gaat staan. Dit kan volgens de producent opgelost worden door er een constructie omheen te bouwen, maar dit moet nog wel goed onderzocht worden.

##### Energieverliezen

Volgens een producent zijn er vrij weinig energieverliezen gedurende de opslagperiode. Wanneer er energieverliezen zijn zou dit voornamelijk moeten komen doordat de buffer niet goed geïsoleerd is. De buffer van deze producent zou ongeveer 3% energieverlies hebben, maar dit is nooit exact gemeten

##### Levensduur

Een producent garandeert dat de PCM's 10.000 cycli meegaan. Met een normaal dag- en nachtritme zou dit systeem dan ongeveer 25 -30 jaar mee moeten gaan.

#### *Buffer met PCM bollen*

PCM buffers op basis van bollen zijn vaak niet stabiel qua sterkte en warmteoverdracht. In het begin werkt het goed, maar wanneer de laagdikte in de bollen dikker wordt dan wordt de overdracht erg langzaam. Voor een seizoensopslag is dit niet heel erg, maar wanneer je het systeem snel wilt kunnen laden en ontladen is dit wel een probleem.

Opslagssystemen gebaseerd op PCM of water zijn veel waarschijnlijker om te gebruiken voor kortere termijn opslag (een dag tot maximaal een week). Wanneer de warmte opgeslagen moet worden voor meer dan een week dan zijn er met PCM- en waterbuffers te veel energieverliezen (*kennisinstituut*).

PCMs en thermochemische materialen hebben beide het nadeel dat er volumeverandering plaatsvindt. Bij de PCMs tijdens de faseovergang en bij de thermochemische materialen tijdens de sorptiereactie.

Hiernaast is het wel zo dat het verschil in opslagcapaciteit tussen PCMs en water beperkt is. Volgens een partij heeft een watervat veel voordelen ten opzichte van het complexere PCM systeem. Hiernaast brengen PCM systemen ook een brandgevaar met zich mee en hebben PCMs een zeer lage warmtegeleiding.

*“De stap van PCMs ten opzichte van water is eigenlijk heel beperkt. Er is maar één voordeel aan PCMs en dat is dat in de faseovergang dat je bijvoorbeeld als je 40 of 50 graden kiest dat je op dat niveau langer warmte kan leveren dan water.”*

### Economisch

Bij een producent kost een PCM buffer met een grootte van één kubieke meter en een opslagcapaciteit van 35 kWh ongeveer 5.000 euro, dit bedrag is inclusief twee pompen en een warmtewisselaar, en exclusief de installatie. Dit systeem is gebaseerd op PCMs met invoegbare platen. De systeemkosten zijn duurder dan de PCM zelf, dit komt doordat het systeem gemaakt moet worden van RVS. Ook een systeem van kunststof is uitgeprobeerd, maar mogelijke hoge temperaturen in de zomer (~90 °C) zorgen ervoor dat het kunststof smelt. De systeemkosten voor

deze buffer zouden eventueel verminderd kunnen worden wanneer er kant-en-klare bakken zouden bestaan. Bij eventuele opschaling zou dit dus al mogelijk zijn. Deze producent verwacht dat de prijs dan kan zakken naar ongeveer 3.000 euro.

Opschalen naar een groter systeem waar meerdere woningen gebruik van maken is eigenlijk altijd wel goedkoper. Dit komt onder andere doordat je maar één warmtewisselaar nodig hebt in plaats van een warmtewisselaar voor elke woning, hetzelfde geldt voor de pompen.

### Milieutechnisch

Producent 1 en 3 geven beide aan dat de buffers die zij gebruiken enkel bestaan uit foodproof producten (Producent 1, persoonlijk interview, 2020; Producent 3, persoonlijk interview, 2020). Dit houdt onder andere in dat er geen giftige stoffen in zitten.

Producent 1 gebruikt calciumchloride als PCM, hiervan is voldoende beschikbaar.

### Sociaal

Eén producent heeft een PCM buffer van één kubieke meter een opslagcapaciteit van 35 kWh. Wanneer de buffer groter gedimensioneerd moet worden is dat geen probleem en zou de capaciteit ook iets groter kunnen worden, bijvoorbeeld wanneer deze drie keer zo groot wordt kan de capaciteit 110 kWh zijn. Verder is de buffer zo goed als onderhoudsvrij, het enige wat er moet gebeuren is een keer een nieuwe pomp.

Verschillende producenten geven aan dat het belangrijk is dat de buffer ergens weggestopt moet kunnen worden door de consument, bijvoorbeeld door middel van een lange smalle buffer.

### Politiek / legaal

Op de PCM's zitten verschillende subsidies, waaronder de EIA en de MIA. Deze subsidies kunnen echter alleen door bedrijven gebruikt worden door belastingaftrek. Voor particulieren zijn er op dit moment nog geen regelingen om in PCMs te investeren. Volgens een producent zou een subsidie voor particulieren een zekere stimulans kunnen zijn voor particulieren om te investeren in een warmtebuffer.

*“Als een particulier ook subsidie zou kunnen krijgen, dan weet ik zeker dat er een heleboel particulieren zullen zijn die ook zeggen: zo'n buffer past mij. Alleen als je het volledige bedrag gewoon in één keer moet betalen op dit moment is dat best veel.” (producent)*

### Thermochemisch

#### Technologisch

Voor kleinschalige energieopslag zijn de compactheid, de energiedichtheid en beperkte energieverliezen erg belangrijk. Doordat thermochemische energieopslag relatief compact is, een hoge energiedichtheid heeft en geen energieverliezen in de tijd heeft, kan het erg interessant zijn voor lange termijn opslag (*kennisinstituut*).

Thermochemische opslag kan energie opslaan in de vorm van zowel warmte als koude. Een thermochemisch systeem gebaseerd op een absorptieproces kan zowel warmtapwater (>60 C) als lage temperatuur verwarming (~40 C) als koeling (~16 C) maken.

Er zijn verschillende systemen die gebruikt kunnen worden voor thermochemische warmteopslag, deze bestaan uit open en gesloten reactoren. Op dit moment is het nog niet duidelijk welk van deze systemen het meest geschikt is voor een woning, beide systemen hebben voor- en nadelen (*kennisinstituut*).

Voor een thermochemisch systeem gebaseerd op zouthydraten zijn er twee belangrijke aspecten waar rekening mee gehouden moet worden. Zouthydraten hebben over het algemeen een slechte warmtegeleiding waardoor het belangrijk is om deze te verhogen. Des te beter de warmtegeleiding van het systeem, des te hoger het vermogen. Hiernaast moet het systeem dampopen zijn om ervoor te zorgen dat de sorptiereactie plaats kan vinden

Een thermochemisch systeem dat momenteel ontwikkeld wordt is een systeem met energypads, Deze pads zijn gebaseerd op het concept van de koffiepads, maar dan van koolstofvezel. Doordat het koolstofvezelomhulsel dampopen is kan de benodigde waterdamp zowel er in als eruit gehaald worden voor de sorptiereactie. Het voordeel

van deze koolstofvezels is dat ze ervoor zorgen dat de slechte warmtegeleiding van de zouten verbeterd wordt en inert zijn, dus vrijwel niet tot nooit reageren met andere chemische stoffen. Een partij geeft echter aan dat ze voor de verdere ontwikkeling deze pads vastgelopen zijn in de stand van de technologie van deze koolstofvezels.

Om te bepalen welke thermochemische materialen het best geschikt zijn is het belangrijk om te definiëren welke laad- en ontladtemperaturen benodigd zijn in het systeem. Wanneer de warmteopslag geschikt moet zijn voor een warmtepomp is het belangrijk om te werken met temperaturen onder de 100 °C (*kennisinstituut*). Niet alle zouthydraten hebben een efficiënte opslag bij relatief lage temperaturen, er zijn drie zouthydraten die voornamelijk geschikt zijn voor warmteopslag met een laadtemperatuur onder de 80 °C en een ontladtemperatuur van 60 °C, dit zijn natriumsulfide, calciumchloride en kaliumcarbonaat (*kennisinstituut*). Het thermochemische materiaal met de grootste dichtheid is natriumsulfide. Dit heeft als nadeel dat er waterstofsulfide en waterstofgas gevormd kunnen worden gedurende het proces, dit zijn beide corrosieve stoffen. Hierdoor moet het systeem voorzien worden van coatings en dergelijke.

- Voor een thermochemisch systeem gebaseerd op een gesloten reactorconcept wordt momenteel gewerkt met natriumsulfide (*kennisinstituut*).
- Voor een thermochemisch systeem gebaseerd op een open reactorconcept wordt momenteel ook gewerkt met kaliumcarbonaat. Dit wordt gedaan omdat dit materiaal vriendelijker is, makkelijker cyclisch is en niet giftig is (*kennisinstituut*).
- Voor de verdere ontwikkeling van een thermochemisch systeem gebaseerd op heatpads wordt op dit moment gebruik gemaakt van kaliumcarbonaat. Voor het uiteindelijke systeem is het nog niet zeker welk van de drie thermochemische materialen (natriumsulfide, kaliumcarbonaat of calciumchloride) gebruikt gaat worden.

Voor het thermochemische systeem gebaseerd op heatpads is de planning dat er in 2021 een prototype gedemonstreerd wordt op basis van kaliumcarbonaat. Wanneer dit goed gaat zou volgend jaar wellicht een TRL van 7 gehaald kunnen worden, maar dit is wel het hoogste wat je zou kunnen halen. Een partij geeft aan dat het thermochemische systeem gebaseerd op heat pads in het meest optimistische scenario in 2024 commercieel gereed kan zijn. In dit scenario wordt er uitgegaan dat de prototypes in 2021 helemaal gereed zijn en dat er daarna minstens anderhalf jaar nodig is om een fabriek te bouwen. Wanneer de fabriek staat moet het systeem na uitrol van de eerste producten weer bijgesteld worden. Uiteindelijk zou het dan in 2024 op z'n vroegst klaar zijn. Volgens een partij is dit erg snel en zou dit waarschijnlijk alleen kunnen wanneer er druk op de ontwikkeling komt te staan vanuit het klimaatakkoord. Aan de andere kant geeft een kennisinstituut aan dat *“op het moment dat we bijvoorbeeld in 2023 een bedrijf zijn en inderdaad deze technologie op de markt zetten dan zal dat nog niet meteen een commercieel product zijn, maar dan zal dat een prototype zijn of dan zullen we daar enkele stuks van produceren. De massaproductie van deze technologie zal nog wel even op zich laten wachten, dat is misschien binnen een jaar of 8 tot 10 pas opstartend.”* (*kennisinstituut*). Op dit moment is de ontwikkeling net voorbij de proof-of-concept en zijn ze ongeveer bij TRL 6. Een stap verder, TRL 7, demonstratie in een echte omgeving, daar is de ontwikkeling van het systeem nog niet, daar is het nu op gericht.

Om daadwerkelijk tot een thermochemisch systeem te komen dat commercieel beschikbaar is zijn er nog verschillende vraagstukken die opgelost moeten worden. Eén van deze ontwikkelvraagstukken gaat om het thermochemische materiaal. Verdere ontwikkeling op het gebied van thermochemische stoffen ziet een partij als belangrijk onderdeel voor deze systemen. Er gebeurt wereldwijd momenteel weinig op het gebied van fundamenteel onderzoek naar deze stoffen, maar er loopt inmiddels wel een onderzoek bij de Radboud Universiteit in Nijmegen. Volgens een kennisinstituut wordt er onderzoek gedaan naar alternatieve materialen waarbij ook de mogelijkheid bestaat om dit temperatuurbereik te halen. Eén van deze materialen is Metal Organic Frameworks (MOFs), deze zijn echter momenteel nog erg lastig te maken en duur vergeleken met de huidige zouthydraten. Hiernaast is een belangrijk vraagstuk voor de gesloten reactor dat de stabiliteit en de cycleerbaarheid van het thermochemische materiaal niet gaat afwijken van de beginsituatie. Dit betekent dat elke cyclus dezelfde lading en ontlading moet kunnen genereren. Dit is erg belangrijk om een systeem commercieel interessant te maken. Voor een open reactor is het belangrijkste vraagstuk op dit moment het materiaaltransport. Om ervoor te zorgen dat de reactor en het opslagvat van deze systemen van elkaar ontkoppeld kunnen worden moet het transportsysteem robuust en goedkoop genoeg



zijn. Als laatst geeft een producent aan dat het huidige systeem voor thermochemische opslag erg complex is en dat voor een daadwerkelijk systeem het van belang dat deze simpeler wordt.

### Economisch

Een partij is betrokken bij de ontwikkeling van een thermochemisch systeem gebaseerd op heat pads. Aan het begin van de commercialisatie van dit systeem wordt een prijs verwacht van ongeveer 11.000 tot 12.000 euro voor een grootte van 1 m<sup>3</sup> en een opslagcapaciteit van 1 GJ. Het thermochemische materiaal is niet de dure stof, maar voornamelijk het systeem is duur. Voor de toekomst is gekeken naar de ontwikkeling van de Cv-ketel die kleiner en lichter werd, daarvoor wordt bij grootschalige productie verwacht dat de kosten kunnen zakken tot ongeveer 7.000 tot 8.000 euro.

Een kennisinstituut geeft aan dat ze bezig zijn een systeem te ontwikkelen met een terugverdientijd van ongeveer 5 tot 10 jaar. Het prototype systeem dat op dit moment gebruikt wordt heeft nog een prijs tussen de 100.000 en de 200.000 euro, echter is deze alleen bedoeld voor R&D waardoor de kosten nog flink kunnen afnemen. Zowel voordelen van schaalgroter als alternatieve materialen zullen deze kosten verlagen. Voornamelijk de warmtewisselaar is duur in die zin in het gesloten systeem, omdat daar uitgegaan wordt van een koperen of aluminium warmtewisselaar die gecoat moet worden. En dat is zowel duur in ruwe materialen als in processing om die coating voor elkaar te krijgen. Voor de uiteindelijke kosten van het systeem wordt als richtlijn een grote Hr-ketel gebruikt, dit zou neer moeten komen op een bedrag tussen de 2.000 en 5.000 euro. Volgens dit kennisinstituut gaan consumenten nooit meer betalen voor een opslagsysteem en zullen ze het voor minder niet voor elkaar krijgen.

Een partij geeft aan dat het belangrijk is dat er een vergelijking getrokken wordt met de kosten voor elektrische opslag. Zo wordt er bijvoorbeeld vergeleken met de Tesla Powerwall en is het belangrijk om daar qua kostprijs veronder te zitten.

### Milieutechnisch

Geen bijzondere opmerkingen.

### Sociaal

Om ze even kort te noemen, een open systeem maakt gebruik van waterdamp die je bijvoorbeeld uit de lucht haalt en waarbij je hoeveelheden lucht door je actieve materiaal blaast die de waterdamp dan kan opnemen waarbij je materiaal opwarmt en waarbij je de warmte nuttig kunt gebruiken en voor het laden van het materiaal doe je het omgekeerde dan blaas je warme droge lucht door het materiaal en die zal dan koud en bevochtigd worden en daarmee heb je je materiaal geladen. Dat maakt het mogelijk dat je bijvoorbeeld de reactor, dus het gebruik van je warmte die je beschikbaar hebt of die je nodig hebt in je toepassing, op een plek kunt neerzetten die onafhankelijk is van de plek waar je je materiaal opslaat, je kunt je materiaal verplaatsen. Dat is een groot voordeel, want dan kun je je opslagtank onafhankelijk maken van je reactor en daarmee kun je je opslagtank bijvoorbeeld in je tuin leggen en je reactor binnen in je meterkast plaatsen. Dat kan met een gesloten reactor niet. Een open systeem kun je vergroten door de opslagtanks te vergroten en daarvoor maakt het dus niet uit waar je ze plaatst. Je kunt ze in je tuin begraven en dan zie je er niets van als dat groter of kleiner is. Een gesloten systeem kun je groter of kleiner maken door het uit te voeren met meer of minder modules en dat zie je wel degelijk in je woning. Dus daar moet je echt op compactheid of opslagdichtheid een stap maken wil je meer warmte kunnen opslaan (*kennisinstituut*).

De energiedichtheid van thermochemische stoffen is best hoog, maar door het complexe systeem voor thermochemische warmteopslag verlies je ongeveer de helft van deze energiedichtheid. Het laatst geteste thermochemische systeem zou een dichtheid hebben van ongeveer 0,5 GJ per m<sup>3</sup>. In de huidige ontwikkeling van het systeem gebaseerd op heat pads wordt gehoopt een dichtheid van 1 GJ per m<sup>3</sup> behaald te worden. Dit is *“een soort kritische ondergrens, als we daar niet boven komen dan moet je chemische opslag niet gaan doen en moet je naar water gaan.”*

Nederland is een klein land met weinig ruimte om te bouwen, de huizen zijn hierdoor niet erg geschikt voor een groot opslagsysteem. Het product moet klein genoeg zijn zodat mensen het kwijt kunnen in hun woning. Met een modulair opslagsysteem op basis van heat pads kan de grootte van het systeem gemakkelijk aangepast worden aan de gebruiker. Aan de andere kant geeft een kennisinstituut aan dat wanneer je een product aantrekkelijk maakt,

mensen het wellicht niet erg vinden om ruimte op te offeren voor deze producten, kijk bijvoorbeeld naar de producten van Apple, Tesla en Dyson. Desondanks geeft het kennisinstituut aan dat het systeem een acceptabele terugverdientijd moet hebben voordat mensen het gaan kopen.

Een kennisinstituut geeft aan dat er al mensen vragen wanneer ze deze warmteopslag kunnen kopen. Daarbij geeft hij aan dat het systeem wel een giftige stof, natriumsulfide, gebruikt en dat de gewone consument wellicht niet wacht op de giftige stof in zijn of haar kelder, maar hij verwacht niet dat dit een showstopper is (*kennisinstituut*).

### **Politiek / legaal**

De overheid in Nederland en Europa is best wel actief geweest op het gebied van onderzoek en ontwikkeling naar warmteopslag in woningen. Een kennisinstituut geeft aan dat van alle projecten die hij heeft uitgevoerd op dit gebied slechts twee projecten business-to-business waren en dat alle andere projecten subsidieprojecten waren. Op dit moment heeft de Europese overheid geen subsidieprojecten meer voor warmteopslag in woningen. De Nederlandse overheid heeft nog wel mogelijkheden om hier subsidieprojecten voor op te zetten via bijvoorbeeld de MOOI regeling.

Voor particulieren is er geen enkel initiatief vanuit de overheid wat betreft warmteopslag en er zijn ook maar weinig particulieren die iets van warmteopslag weten. Volgens het kennisinstituut zou de overheid hier nog wel een stap kunnen maken.

De salderingsregeling voor de eigen gewonnen energie uit zonnepanelen staan de adoptie van energieopslag enigszins in de weg. Op dit moment loont het niet om een energieopslag aan te schaffen, omdat de gewonnen energie een goede prijs oplevert bij levering aan het net (*kennisinstituut*). Een kennisinstituut verwacht echter aan dat maar een heel klein deel van de woningbezitters zulke grote hoeveelheden elektriciteit hebben dat ze dit al om willen zetten in een warmtebuffer.

## IV Bijlage Bronnen

- Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341–378. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>
- Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(October 2016), 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- Arshad, A., Jabbal, M., Yan, Y., & Darkwa, J. (2019). The micro-/nano-PCMs for thermal energy storage systems: A state of art review. *International Journal of Energy Research*, 43(11), 5572–5620. <https://doi.org/10.1002/er.4550>
- Aydin, D., Casey, S. P., & Riffat, S. (2015). The latest advancements on thermochemical heat storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054>
- Cabeza, L. F. (2019). Latent Thermal Energy Storage. In A. Frazzica & L. F. Cabeza (Eds.), *Recent Advancements in Materials and Systems for Thermal Energy Storage — An Introduction to Experimental Characterization Methods* (pp. 9–13). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96640-3>
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 724–737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028>
- Chandel, S. S., & Agarwal, T. (2017). Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 581–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.070>
- Delgado, J. M. P. Q., Martinho, J. C., Vaz Sá, A., Guimarães, A. S., & Abrantes, V. (2019). *Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, A Literature Review of Applications for Buildings Materials*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97499-6>
- Ding, Y., & Riffat, S. B. (2013). Thermochemical energy storage technologies for building applications: a state-of-the-art review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(2), 106–116. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts004>
- Donkers, P. A. J., Sögütoglu, L. C., Huinink, H. P., Fischer, H. R., & Adan, O. C. G. (2017). A review of salt hydrates for seasonal heat storage in domestic applications. *Applied Energy*, 199, 45–68. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.080>
- Fernandez, A. I., Martinez, M., Segarra, M., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2010). Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(10), 1723–1729. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.035>
- Gaeini, M., Javed, M. R., Ouwerkerk, H., Zondag, H. A., & Rindt, C. C. M. (2017). Realization of a 4kW thermochemical segmented reactor in household scale for seasonal heat storage. *Energy Procedia*, 135, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.491>
- Gaeini, M., van Alebeek, R., Scapino, L., Zondag, H. A., & Rindt, C. C. M. (2018). Hot tap water production by a 4 kW sorption segmented reactor in household scale for seasonal heat storage. *Journal of Energy Storage*, 17, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.02.014>
- Gulfam, R., Zhang, P., & Meng, Z. (2019). Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials – A review. *Applied Energy*, 238(October 2018), 582–611. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.114>
- Heier, J., Bales, C., & Martin, V. (2015). Combining thermal energy storage with buildings - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1305–1325. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.031>
- Hyman, L. (2011). Overview. In *Sustainable Thermal Storage Systems Planning Design and Operations* (1 edition, pp. 1–23). McGraw-Hill Education.
- International Energy Agency. (2013). Transition to Sustainable Buildings. In *Transition to Sustainable Buildings*. OECD/IEA. <https://doi.org/10.1787/9789264202955-en>
- Jong, A. De, Trausel, F., Finck, C., Vliet, L. Van, & Cuypers, R. (2014). Thermochemical heat storage – system design issues. *Energy Procedia*, 48, 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.036>
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). Sensible Thermal Energy Storage. *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, 65–81. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-417291-3.00004-9>
- Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-

- the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94(7491), 150–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>
- Krese, G., Koželj, R., Butala, V., & Stritih, U. (2018). Thermochemical seasonal solar energy storage for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 164, 239–253. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.057>
- Kuznik, F., Johannes, K., Obrecht, C., & David, D. (2018). A review on recent developments in physisorption thermal energy storage for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(March 2017), 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.038>
- Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(September 2017), 2730–2742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.002>
- Lizana, J., Chacartegui, R., Barrios-Padura, A., & Valverde, J. M. (2017). Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. *Applied Energy*, 203, 219–239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.008>
- Lizana, J., Chacartegui, R., Barrios-Padura, A., Valverde, J. M., & Ortiz, C. (2018). Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings. *Materiales de Construccion*, 68(331), 1–35. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.10517>
- Navarro, L., de Gracia, A., Colclough, S., Browne, M., McCormack, S. J., Griffiths, P., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. *Renewable Energy*, 88, 526–547. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.040>
- Navarro, L., de Gracia, A., Niall, D., Castell, A., Browne, M., McCormack, S. J., Griffiths, P., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system. *Renewable Energy*, 85, 1334–1356. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.064>
- Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010191>
- Scapino, L., Zondag, H. A., Van Bael, J., Diriken, J., & Rindt, C. C. M. (2017). Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale. *Applied Energy*, 190, 920–948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.148>
- Segarra, M., Barreneche, C., Calderón, A., & Fernández, A. I. (2019). Materials Selection for Thermal Energy Storage Applications—Case Studies. In Andrea Frazzica & L. F. Cabeza (Eds.), *Recent Advancements in Materials and Systems for Thermal Energy Storage — An Introduction to Experimental Characterization Methods* (pp. 55–66). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96640-3>
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., & Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193–228. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.084>
- Su, W., Darkwa, J., & Kokogiannakis, G. (2015). Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.044>
- Tatsidjoudoug, P., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>
- Tatsidjoudoug, P., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>
- Yu, N., Wang, R. Z., & Wang, L. W. (2013). Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(5), 489–514. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.05.004>