



Studie naar technologie voor energieopslag

Studie uitgevoerd in opdracht van: Vlaams Agentschap
Innoveren en Ondernemen
Referentie: 2022/ETE/2210623
Mei 2023



Vision on technology
for a better world

vito.be

Studie naar technologie voor energieopslag

VITO
Boeretang 200
2400 MOL
Belgium
BTW No: BE0244.195.916
vito@vito.be – www.vito.be
IBAN BE34 3751 1173 5490 BBRUBEBB

Jan Diriken
014 33 58 65
jan.diriken@vito.be

Grietus Mulder
014 33 58 59
grietus.mulder@vito.be



Vision on technology
for a better world

vito.be

AUTEURS

Naam, voornaam, organisatie
Diriken, Jan, VITO
Capron, Odile, VITO
Mulder, Grietus, VITO

VERSPREIDINGSLIJST

Voornaam, naam, bedrijf

Joachim Castelain, Agentschap Innoveren en Ondernemen

Distributie: beperkt

II

Ref: 2022/ETE/2210623

Dit rapport is de weerslag van een onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek op basis van de stand van de kennis van wetenschap en techniek beschikbaar bij VITO op het moment van het onderzoek. Alle intellectuele eigendomsrechten, waaronder het auteursrecht, op dit rapport berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. Dit rapport kan zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO niet geheel of gedeeltelijk worden gereproduceerd of worden gebruikt voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin. Tenzij uitdrukkelijk anders bepaald is de informatie zoals verstrekt in dit rapport van vertrouwelijk aard en kan dit rapport, of delen ervan, niet worden verspreid aan derden. In het geval dat reproductie of verspreiding wel is toegestaan, vb. door de vermelding "algemene verspreiding", is bronvermelding verplicht.

SAMENVATTING

Het Vlaams Agentschap voor Innoveren en Ondernemen, VLAIO, past de huidige steunmaatregelen aan in het kader van de ecologiepremie+ en de Strategische Ecologiesteun. Deze operatie kadert in de actie “vergroening energiedragers” waarbij het de bedoeling is dat de Vlaamse niet-ETS industrie tegen 2030 10% van de energiedragers een vergroening ondergaan heeft.

Technologieën met betrekking tot energieopslag zijn specifiek, op maat van een bedrijf en de daarbij horende processen. Ook zijn deze wat betreft doeltreffendheid en rendabiliteit sterk afhankelijk van de manier waarop ze worden ingezet.

VLAIO heeft daarom een oriënterende studie met betrekking tot energieopslag in een industriële context besteld die meer inzicht moet bieden in de mogelijkheden die deze hebben op vlak van vergroening. Deze studie is gericht op zowel thermische als elektrische energieopslag. Ze geeft antwoord op:

- Welke technologieën voor energieopslag, zowel thermisch als elektrisch, zijn er momenteel beschikbaar op de markt? Waarvoor kunnen ze worden ingezet? Op welke tijdschalen kan de energie opgeslagen worden?
- Welke zijn momenteel in ontwikkeling en zullen op korte termijn commercieel beschikbaar zijn?
- Welke zijn reeds voldoende matuur?
- Wat is de mate van generieke inzetbaarheid?
- In welke mate zijn de technologieën innovatief?
- Wat zijn de randvoorwaarden bij de inzet ervan om ze als duurzaam en efficiënt te kunnen beschouwen?
- Wie zijn de leveranciers ervan?
- Hoe groot is de investering (per MWh bv)?
- Wat is de terugverdientijd in functie van drie scenario's voor de evolutie van de energieprijzen?

Dit is omgezet in een overzicht dat VLAIO in staat moet stellen om verdere technologieën te selecteren voor een verdere studie.

Het eerste deel van dit eindverslag beschrijft de methodiek welke werd toegepast om de evaluatie van de verschillende opslagtechnologieën te doen. Dit deel werd al eerder aan VLAIO overgemaakt. In het eindverslag wordt in hoofdstukken 3 en 4 de eerder voorgestelde methodologie toegepast op respectievelijk thermische en elektrische opslag.

INHOUDSTAFEL

Auteurs	I
Verspreidingslijst.....	II
Samenvatting	III
Inhoudstafel	IV
Lijst van Figuren.....	VII
Lijst van tabellen	IX
Lijst van grafieken	XI
Lijst van afkortingen	XII
1 Inleiding.....	1
1.1 Achtergrond	1
1.1.1 Doel	1
1.1.2 Aanpak	1
1.1.3 Fase 1 Evaluatiecriteria	2
1.1.4 Fase 2 Opslag van thermische energie.....	2
1.1.5 Fase 3 Opslag van elektrische energie	2
1.1.6 Fase 4 Terugkoppeling	2
2 Evaluatiecriteria.....	3
2.1 Verbeterde lijst aan evaluatiecriteria	4
2.1.1 Technisch	4
2.1.2 Economisch	5
2.1.3 Ecologisch	5
2.2 Scenario's evolutie energieprijzen.....	5
2.2.1 Elektriciteitsprijs	5
2.2.2 Aardgasprijs.....	6
2.3 Zes mogelijke toepassingen.....	6
2.3.1 Voorstel toepassingen van opslag van thermische energie.....	6
2.3.2 Voorstel toepassingen van opslag van elektrische energie	7
2.4 Wijze van rapportering	7
3 opslagsystemen voor thermische energie.....	8
3.1 Uitgangspunt.....	8
3.2 Voelbare warmte.....	8
3.2.1 Watertanks	9
3.2.2 Thermische olie	11
3.2.3 Vaste stoffen.....	12
3.2.4 Gesmolten zouten.....	14

Distributie: beperkt

IV

Ref: 2022/ETE/2210623

Dit rapport is de weerslag van een onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek op basis van de stand van de kennis van wetenschap en techniek beschikbaar bij VITO op het moment van het onderzoek. Alle intellectuele eigendomsrechten, waaronder het auteursrecht, op dit rapport berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. Dit rapport kan zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO niet geheel of gedeeltelijk worden gereproduceerd of worden gebruikt voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin. Tenzij uitdrukkelijk anders bepaald is de informatie zoals verstrekt in dit rapport van vertrouwelijk aard en kan dit rapport, of delen ervan, niet worden verspreid aan derden. In het geval dat reproductie of verspreiding wel is toegestaan, vb. door de vermelding "algemene verspreiding", is bronvermelding verplicht.

3.2.5	Gesmolten metalen.....	15
3.2.6	Ondergrond	17
3.3	Latente warmte	18
3.3.1	IJs.....	19
3.3.2	Lage-temperatuur PCM	20
3.3.3	Medium-temperatuur PCM.....	21
3.3.4	Hoge-temperatuur PCM.....	21
3.4	Thermochemische & sorptietechnieken	22
3.4.1	Chemische reacties	23
3.4.2	Adsorptie in vaste stoffen.....	24
3.4.3	Composietmaterialen	25
3.4.4	Absorptie in vloeistoffen.....	25
3.5	Beschrijving casestudies.....	25
3.5.1	Case 1: Assemblagehal van aannemer/meubelmakerij.....	25
4	Opslagsystemen voor elektrische energie	32
4.1	Uitgangspunt.....	32
4.2	Opslagsystemen van elektrische energie.....	33
4.2.1	Spanningsvorm en topologie.....	33
4.2.2	Koppeling in een AC-net	35
4.3	Opslag van elektrische energie via interne opslag	36
4.3.1	Lithium-ion	37
4.3.2	Nikkelmetaalhydride.....	40
4.3.3	Loodzuur.....	41
4.3.4	Lithium-zwavel	43
4.3.5	Natrium-ion	45
4.3.6	Andere bestaande batterijtypes	47
4.3.7	Nieuwe batterijtypes.....	50
4.4	Andere interne opslagtypes	51
4.4.1	Supercapaciteiten (elektrochemische dubbellaagcondensatoren).....	51
4.4.2	Hybrid lithium ion capacitors of Li-ioncondensator	52
4.4.3	Vliegwielen	54
4.5	Opslag van elektrische energie via externe opslag	56
4.5.1	Redoxflow batterijen	56
4.5.2	Waterstof brandstofcellen	57
4.5.3	Energieopslag met gecompriemde lucht	59
4.5.4	Energieopslag met vloeibare lucht	61

5	Besluit	64
	Overzicht Thermische Opslag	64
	5.1.1 Voelbare warmte.....	64
	5.1.1 Latente warmte	66
	5.1.2 Thermochemisch & Sorptietechnieken.....	67
5.2	Overzicht Elektrische Opslag	69

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Overzicht van investeringskosten van grootschalige voelbare warmteopslagsystemen uitgedrukt in m ³ water equivalent. Bron: [2].	9
Figuur 2: Opsplitsing van de kosten voor een 5 700 m ³ TTES.	10
Figuur 3: Twee tankopstelling voor gesmolten zouten. Bron: [9].	14
Figuur 4: Latente warmtecapaciteit (y-as) versus overgangstemperatuur (x-as) voor verschillende categorieën van PCM. Bron: ZAE Bayern.	19
Figuur 5: Vraagprofiel van de verschillende kringen (lage en hoge temperatuur) in Case 1.	26
Figuur 6: Duurcurve van de thermische energie voor Case Studie 1.	27
Figuur 7: Conceptvoorstelling waarbij thermische opslag gebruikt wordt om het energievoorzieningssysteem kleiner te dimensioneren.	27
Figuur 8: Maandelijkse thermische energievraag (hoge en lage temperatuur cumulatief) ...	28
Figuur 9: Vier soorten opslagtopologieën en varianten (bron: VITO).	34
Figuur 10: Mogelijke manieren van netkoppeling (bron: VITO).	34
Figuur 11 Overzicht van de soorten van interne elektrische energieopslag (bron: VITO)	36
Figuur 12: Verschillende vormen van Li-ioncellen. Het is duidelijk dat er op celniveau een grote variatie is aan vorm en grootte. Bron: VITO.	39
Figuur 13 Beoordeling van rendementen in opslagtoepassingen voor het elektriciteitsnet. Het is duidelijk dat niet alleen het batterijrendement (conversierendement) maar ook het systeemrendement moet worden beschouwd. [28]	39
Figuur 14: Twee voorbeelden van moderne bipolaire NiMH-batterij: links van Nilar voor stationaire toepassingen, rechts een Toyota-batterij voor hybride voertuigen (bronnen: website Nilar en Toyota).	41
Figuur 15: Voorbeelden van een loodzuurbatterijlokaal voor het leveren van noodstroom (bron: serverroomenvironments.co.uk).	43
Figuur 16: Voorbeeld van lithium-zwavelbatterij van Oxis (bron: Oxis Energy)	45
Figuur 17: Voorbeeld van Na-ion-batterij van Faradion (bron: Faradion)	46
Figuur 18: Voorbeeld van nikkel-ijzerbatterij (bron: google)	47
Figuur 19: De natriumnikkelchloridebatterij van FZSonick (bron: FZSonick).	47
Figuur 20: De natriumzwavelbatterij van NGK (bron: NGK).	48
Figuur 21: Zoutwaterbatterij (bron: Aquion, enkele jaren geleden)	48
Figuur 22: Batterijmodules van Blue Solutions (bron: Blue Solutions)	49
Figuur 23: Batterijmodule en -container van EOS Energy (bron: Eose.com)	49
Figuur 24: De Calcium-antimoonbatterij van Ambri (bron: Ambri).	50
Figuur 25: Oplevering ultracapaciteitsmodules (op voorgrond) door VITO (bron: VITO).	52
Figuur 26: Losse hybride lithium ion capacitors, hun serie/parallelschakeling en de uiteindelijke module (bron: Kurt.energy)	54
Figuur 27 links: Vliegwielen energieopslagsysteem (bron : OXTO Energy); rechts: hybride systeem met vliegwielen op de voorgrond en gecontaineriseerde batterijopslagsystemen erachter (bron: Leclanché).	55
Figuur 28 links: vliegwielen; rechts: generator op waterstof met een vliegwielsysteem (bron: Punchflybrid).	55
Figuur 29: Van links naar rechts verschillende types redoxflowbatterijen: vanadium van EverFlow, zinkbromide van RedFlow, waterstofbromide van Elestor en hun ontwikkeling naar grootschalige opslag (artist impression)	57
Figuur 31 Stacks en PEM Fuel Cell Power System bedoeld voor industriële toepassingen (bron : Nedstack)	59
Figuur 32 Installatie voor energieopslag met gecomprimeerde lucht (bron: alacaes)	60

Figuur 32 Installatie voor energieopslag met vloeibare lucht in Manchester (bron : Highview Power) 62

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: TRL niveaus volgens EU-schaal.....	4
Tabel 2: Verschillende soorten thermische olie en de maximum toelaatbare procestemperatuur. Bron [7]:.....	12
Tabel 3: Thermische eigenschappen van de meest voorkomende vaste stoffen met potentieel voor warmteopslag.....	13
Tabel 4: Smeltpunten van verschillende metalen. Verscheidene bronnen.....	16
Tabel 5: Case Studie 1: jaarlijkse kosten voor gas in referentiecasse.....	29
Tabel 6: Case Studie 1: jaarlijkse kosten voor gas in het geval van een kleinschalige waterbuffer.....	29
Tabel 7: Case Studie 1: jaarlijkse kosten voor gas in het geval van een grootschalige waterbuffer.....	30
Tabel 8 Technische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van voelbare warmte.....	64
Tabel 9 Economische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van voelbare warmte.....	65
Tabel 10 Ecologische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van voelbare warmte.....	65
Tabel 11 Technische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van latente warmte.....	66
Tabel 12 Economische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van latente warmte.....	66
Tabel 13 Ecologische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van latente warmte.....	66
Tabel 14 Technische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van thermochemische processen.....	67
Tabel 15 Economische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van thermochemische processen.....	67
Tabel 16 Ecologische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van thermochemische processen.....	68
Tabel 17 Technische eigenschappen samengevat voor Lithium-ion, Nikkelmetaalhydride, Loodzuur, Lithium-zwavel, Natrium-ion batterijen.....	69
Tabel 18 Economische eigenschappen samengevat voor Lithium-ion, Nikkelmetaalhydride, Loodzuur, Lithium-zwavel, Natrium-ion batterijen.....	69
Tabel 19 Ecologische eigenschappen samengevat voor Lithium-ion, Nikkelmetaalhydride, Loodzuur, Lithium-zwavel, Natrium-ion batterijen.....	70
Tabel 20 Technische eigenschappen samengevat voor Supercapaciteiten, Hybrid lithium-ion capacitors/Li-condensatoren, vliegwielen.....	1
Tabel 21 Economische eigenschappen samengevat voor Supercapaciteiten, Hybrid lithium-ion capacitors/Li-condensatoren, vliegwielen.....	1
Tabel 22 Ecologische eigenschappen samengevat voor Supercapaciteiten, Hybrid lithium-ion capacitors/Li-condensatoren, vliegwielen.....	1
Tabel 23 Technische eigenschappen samengevat voor Redoxflow batterijen, waterstofbrandstofcellen, gecompriemde lucht, vloeibare lucht.....	1
Tabel 24 Economische eigenschappen samengevat voor Redoxflow batterijen, waterstofbrandstofcellen, gecompriemde lucht, vloeibare lucht.....	2
Tabel 25 Ecologische eigenschappen samengevat voor Redoxflow batterijen, waterstofbrandstofcellen, gecompriemde lucht, vloeibare lucht.....	2

Distributie: beperkt

IX

Ref: 2022/ETE/2210623

Dit rapport is de weerslag van een onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek op basis van de stand van de kennis van wetenschap en techniek beschikbaar bij VITO op het moment van het onderzoek. Alle intellectuele eigendomsrechten, waaronder het auteursrecht, op dit rapport berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. Dit rapport kan zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO niet geheel of gedeeltelijk worden gereproduceerd of worden gebruikt voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin. Tenzij uitdrukkelijk anders bepaald is de informatie zoals verstrekt in dit rapport van vertrouwelijk aard en kan dit rapport, of delen ervan, niet worden verspreid aan derden. In het geval dat reproductie of verspreiding wel is toegestaan, vb. door de vermelding "algemene verspreiding", is bronvermelding verplicht.

Distributie: beperkt

X

Ref: 2022/ETE/2210623

Dit rapport is de weerslag van een onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek op basis van de stand van de kennis van wetenschap en techniek beschikbaar bij VITO op het moment van het onderzoek. Alle intellectuele eigendomsrechten, waaronder het auteursrecht, op dit rapport berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. Dit rapport kan zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO niet geheel of gedeeltelijk worden gereproduceerd of worden gebruikt voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin. Tenzij uitdrukkelijk anders bepaald is de informatie zoals verstrekt in dit rapport van vertrouwelijk aard en kan dit rapport, of delen ervan, niet worden verspreid aan derden. In het geval dat reproductie of verspreiding wel is toegestaan, vb. door de vermelding "algemene verspreiding", is bronvermelding verplicht.

LIJST VAN GRAFIEKEN

No table of figures entries found.

LIJST VAN AFKORTINGEN

AC	Alternating Current
ATES	Aquifer Thermische Opslag
BTES	Boorgat Thermische Opslag
CAPEX	Investeringskosten (Capital Expenditure)
CSP	Concentrated Solar Power
CST	Concentrated Solar Thermal
DC	Direct Current
EDLC	Elektrochemische Dubbellaagcondensatoren
HTF	Heat Transfer Fluid
OPEX	Operationele kosten (Operational Expenditure)
ORC	Organic Rankine Cycle
PBTS	Packed-Bed Thermal (Energy) Storage
PCM	Phase-Change Material
PTES	Pit Thermal Energy Storage
PV	Photovoltaïsch
SIB	Natrium-ionbatterij (Sodium Ion Battery)
TES	Thermische Energie Opslag (Thermal Energy Storage)
TTES	Tank Thermal Energy Storage
UPS	Uninterrupted Power Supply

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

Het Vlaams Agentschap voor Innoveren en Ondernemen, VLAIO, past de huidige steunmaatregelen aan in het kader van de ecologiepremie+ en de Strategische Ecologiesteun. Deze operatie kadert in de actie “vergroening energiedragers” waarbij het de bedoeling is dat de Vlaamse niet-ETS industrie tegen 2030 10% van de energiedragers een vergroening ondergaan heeft.

Bepaalde technologie die voor deze vergroening kan ingezet worden, is tamelijk algemeen toepasbaar en staat al op de limitatieve lijst van ecologiepremie+, of zal daar binnenkort worden opgezet. Technologieën met betrekking tot energieopslag zijn specifiek, op maat van een bedrijf en de daarbij horende processen. Ook zijn deze wat betreft doeltreffendheid en rendabiliteit sterk afhankelijk van de manier waarop ze worden ingezet.

1.1.1 Doel

VLAIO heeft daarom een oriënterende studie met betrekking tot energieopslag in een industriële context besteld die meer inzicht moet bieden in de mogelijkheden die deze hebben op vlak van vergroening. Deze studie is gericht op zowel thermische als elektrische energieopslag. Ze geeft antwoord op:

- Welke technologieën voor energieopslag, zowel thermisch als elektrisch, zijn er momenteel beschikbaar op de markt? Waarvoor kunnen ze worden ingezet? Op welke tijdschalen kan de energie opgeslagen worden?
- Welke zijn momenteel in ontwikkeling en zullen op korte termijn commercieel beschikbaar zijn?
- Welke zijn reeds voldoende rijp?
- Wat is de mate van generieke inzetbaarheid?
- In welke mate zijn de technologieën innovatief?
- Wat zijn de randvoorwaarden bij de inzet ervan om ze als duurzaam en efficiënt te kunnen beschouwen?
- Wie zijn de leveranciers ervan?
- Hoe groot is de investering (per MWh bv)?
- Wat is de terugverdientijd in functie van drie scenario's voor de evolutie van de energieprijzen?

Dit wordt omgezet in een overzicht dat VLAIO in staat moet stellen om verdere technologieën te selecteren voor een verdere studie.

1.1.2 Aanpak

Vanuit de kennis beschikbaar binnen VITO/EnergyVille, aangevuld met informatie beschikbaar in de literatuur, zal een brede waaier aan energieopslagstechnologie besproken worden. Voor elke technologie zullen de eerder vernoemde vragen beantwoord worden op

kwalitatieve en, indien relevant, kwantitatieve wijze. Er wordt hierbij een onderscheid gemaakt tussen technologie voor de opslag van thermische en elektrische energie. De aanpak onderscheidt drie fases.

1.1.3 Fase 1 Evaluatiecriteria

VITO/EnergyVille stelt een lijst met evaluatiecriteria op, alsook een korte beschrijving van de wijze waarop de verschillende punt geëvalueerd zullen worden (kwalitatief en/of kwantitatief). VLAIO definieert in samenspraak met VITO zes verschillende toepassingen waarvoor de terugverdientijd berekend dient te worden. Voorwaarde is dat een jaarlijks energievraagprofiel beschikbaar is.

Bovendien doet VITO/EnergyVille een voorstel voor de drie prijsevolutiescenario's voor het berekenen van de terugverdientijd op basis van verschillende toekomstige evoluties van de energieprijzen. Enkel voor technologie welke voldoende rijp is, zal de terugverdientijd berekend worden.

1.1.4 Fase 2 Opslag van thermische energie

VITO/EnergyVille evalueert de verschillende technologieën voor opslag van thermische energie op basis van de evaluatiecriteria opgesteld in Fase 1. De technologieën zijn opgedeeld op basis van het onderliggende fysisch proces dat wordt benut om thermische energie op te slaan.

1.1.5 Fase 3 Opslag van elektrische energie

VITO/EnergyVille evalueert de verschillende technologieën voor opslag van elektrische energie op basis van de evaluatiecriteria opgesteld in Fase 1. Hierbij zijn de technologieën opgedeeld op basis van de aansluitkarakteristieken en het opslagproces. Dit zijn onafhankelijke eigenschappen van elkaar.

1.1.6 Fase 4 Terugkoppeling

Door middel van een online vergadering hebben de experts van VITO meer duiding gegeven bij hun bevindingen beschreven in dit eindrapport en antwoord gegeven op de vragen.

2 EVALUATIECRITERIA

In dit hoofdstuk worden de evaluatiecriteria en methodologie vastgelegd, welke gebruikt zullen worden in de hierop volgende werkpakketen. De criteria zijn opgedeeld in verschillende categorieën gerelateerd aan technische, economische en ecologische aspecten. Onderstaande lijst geeft een overzicht van deze opdeling welke als startpunt gebruikt wordt.

1. Technisch
 - a. Beschikbaarheid
 - b. Toepasbaarheid
 - c. Ontwikkelingsstatus
 - d. Mate van genericiteit
 - e. Efficiëntie
 - f. Innovativiteit
 - g. Leveranciers
2. Economisch
 - a. Investeringskost
 - b. Operationele kost
 - c. Terugverdientijd
3. Ecologisch
 - a. Duurzaamheid materialen

Betreffende punt 2.c, de terugverdientijd van een specifieke technologie, dient te worden opgemerkt dat deze niet enkel beïnvloed wordt door de evolutie van de energieprijzen. Andere factoren die een cruciale rol spelen in deze zijn o.a. de dimensionering, toepassing, aantal cycli, ... Het is bijgevolg niet mogelijk om een eenduidige indicatie van de terugverdientijd te bepalen voor een bepaalde technologie op zich. Dit geldt zowel voor elektrische als voor thermische opslagsystemen. Bijgevolg zal VITO in samenspraak met VLAIO zes (drie elektrisch en drie thermisch) mogelijke toepassingen definiëren waarvoor de terugverdientijd van opslagtechnologieën bepaald zal worden. Een belangrijke randvoorwaarde hierbij is dat verbruiksprofielen over een jaar bekend zijn voor deze toepassingen. De opslag ontvangt natuurlijk eerst energie en de bron hiervan is afhankelijk van de toepassing van de opslag. Voor elektrische opslag kan dit een verhoging van eigenverbruik van PV-energie zijn, het terugwinnen van energie tijdens processen of bijvoorbeeld het verhogen van de stroomcapaciteit voor parkings met elektrische voertuigen. Voor thermische opslag kan een hernieuwbare bron zoals concentrated solar thermal (CST) overwogen worden alsook het recupereren van restwarmte. De combinatie van opslag grootte, en energieprofielen bepalen met name of er sprake kan zijn van een terugverdientijd. Bovendien zal enkel technologie geëvalueerd worden waarvan de maturiteit voldoende hoog geacht wordt.

Aangaande de evolutie van de energieprijzen zelf zal worden uitgegaan van constante, dalende/normaliserende en stijgende patronen. Gedurende de studie zal voor elke technologie de terugverdientijd berekend worden op basis van de scenario's vooropgesteld in deze Fase.

De opslag van elektrische energie loopt in omvang vele ordes uiteen afhankelijk van de precieze toepassing: van 10 Wh in een telefoon, 10 kWh voor thuisopslag, 100 kWh in een industrieel gebouw tot 100 MWh in zonneparken. In deze studie wordt beperkt tot een grootte tussen 1 kWh en 1MWh. Het vermogen wordt beperkt tussen 1 kW en 100 kW.

Op basis van de finale lijst van evaluatiecriteria moet VLAIO de eerdergenoemde vragen kunnen beantwoorden.

2.1 Verbeterde lijst aan evaluatiecriteria

De evaluatiecriteria zullen als volgt beoordeeld worden:

2.1.1 Technisch

Beschikbaarheid

Een kwalitatieve beschrijving wordt gegeven in volgende termen: “onderzoeksfase”, “beperkt”, “opkomend”, “groot”. Deze laatste beslaat technologie welke breed commercieel beschikbaar is, terwijl “beperkt” en “opkomend” duiden op een nichemarkt.

Toepasbaarheid

Dit criterium wordt tweeledig beschreven. Enerzijds wordt per technologie een (niet-uitputtende) opsomming gegeven van mogelijke toepassingsdomeinen. Anderzijds wordt in de overzichtstabel dit criterium samengevat via een schaal: “(erg) beperkt”, “breed” en “universeel”.

Ontwikkelingsstatus

Voor de rapportering van de ontwikkelingsstatus worden de Technology Readiness Levels (TRL) niveaus gebruikt volgens de EU-standaarden:

TRL-niveau	Beschrijving
1	Basisprincipes waargenomen
2	Technologieconcept geformuleerd
3	Experimenteel proof-of-concept
4	Technologie gevalideerd in lab omgeving
5	Technologie gevalideerd in relevante omgeving
6	Technologie gedemonstreerd in relevante omgeving
7	Systeem prototype gedemonstreerd in operationele omgeving
8	Systeem volledig en gecertificeerd
9	Systeem commercieel uitgerold

Tabel 1: TRL niveaus volgens EU-schaal

Mate van genericiteit

Dit evaluatiecriterium is nauw verbonden met “toepasbaarheid”. Hier wordt specifiek gerapporteerd in welke mate het opslagsysteem specifiek ontworpen dient te worden voor een bepaalde toepassing. Dit wordt kwalitatief omschreven als “laag”, “matig” of “hoog”.

Efficiëntie

De efficiëntie van het opslagsysteem zal indien mogelijk gekwantificeerd worden. Afhankelijk van het systeem zal hier een bereik, onder- of bovengrens, of referentiewaarde gegeven worden.

Innovativiteit

Specifiek voor al commercieel beschikbare systemen wordt hier kwaliteit geïndiceerd welke de mate van innovativiteit is: “laag”, “matig” of “hoog”. Voor technologie met een lager TRL-niveau, is de mate van innovativiteit automatisch “hoog”.

Leveranciers/producenten

In tegenstelling tot de voorgestelde lijst met evaluatiecriteria zal, indien beschikbaar, een lijst met producenten in plaats van leveranciers gegeven worden. Onder producenten worden entiteiten verstaan die het opslagsysteem vervaardigen. Leveranciers plaatsen of leveren het product.

2.1.2 Economisch**Investeringskost**

De investeringskost omvat veel componenten en zijn vaak afhankelijk van de dimensies, locatie en specifieke eisen van het systeem. Een indicatief bereik van de te verwachten leveringskost zal gerapporteerd worden.

Operationele kost

Net zoals voorgaande criterium is de operationele kost afhankelijk van de wijze waarop de opslag gebruikt wordt. Een indicatieve range is opgenomen in het verslag, als deze informatie beschikbaar is in de literatuur.

Terugverdientijd

Voor de terugverdientijd wordt enkel technologie met voldoende hoge maturiteit overwogen, voor maximum 3 scenario's beschreven in Sectie 2.2.

2.1.3 Ecologisch**Duurzaamheid materialen**

Vanuit dit oogpunt zullen specifiek “rode vlaggen” gerapporteerd worden. Als bepaalde stoffen of materialen een grote ecologische impact hebben zoals langdurig, niet-recyclebaar afval, zal dit in het verslag vermeld worden.

2.2 Scenario's evolutie energieprijis

Voor zowel de elektriciteits- als gasprijis wordt uitgegaan van de situatie op 1 november 2022 zoals gerapporteerd door de CREG [1].

2.2.1 Elektriciteitsprijis

Als referentie wordt een elektriciteitsprijis (facturatieprijis excl. BTW) van € 500 per MWh gebruikt. Dit is de gemiddelde prijs voor professionele klanten met een jaarlijks verbruik van 50.000 kWh.

Als evolutie worden volgende scenario's beschouwd:

- Constante prijs (referentieprijs eerder vernoemd);

- Normaliserende prijs naar niveau van € 160 per MWh (situatie November 2021) tegen eind 2024;
- Prijsstijging naar € 700 per MWh tegen eind 2024.

2.2.2 Aardgasprijs

Aardgas is de voornaamste energievector voor de productie van thermische energie. Als basisprijs (facturatieprijs excl. BTW) wordt uitgegaan van € 160 per MWh bij een verbruik van 100.000 kWh.

Voor de evolutie van de aardgasprijzen worden volgende scenario's vooropgesteld:

- Constante prijs met referentieprijs zoals eerder vernoemd;
- Normaliserende prijs naar niveau € 90 per MWh (situatie November 2021);
- Prijsstijging naar € 270 per MWh tegen eind 2024.

2.3 Zes mogelijke toepassingen

VITO definieert met VLAIO zes mogelijke toepassingen (drie elektrische en drie thermische) waarvoor de terugverdientijd van opslagtechnologieën bepaald zal worden. Een belangrijke randvoorwaarde hierbij is dat verbruiksprofielen over een jaar bekend zijn voor deze toepassingen. De opslag ontvangt natuurlijk eerst energie en de bron hiervan is afhankelijk van de toepassing van de opslag. Voor elektrische opslag kan dit een verhoging van eigenverbruik van PV-energie zijn, het terugwinnen van energie tijdens processen of bijvoorbeeld het verhogen van de stroomcapaciteit voor parkings met elektrische voertuigen. Voor thermische opslag kan een hernieuwbare bron zoals concentrated solar thermal (CST) overwogen worden alsook het recupereren van restwarmte. De combinatie van opslag grootte, en energieprofielen bepalen met name of er sprake kan zijn van een terugverdientijd. Bovendien zal enkel technologie geëvalueerd worden welke voldoende matuur geacht wordt.

2.3.1 Voorstel toepassingen van opslag van thermische energie

2.3.1.1 Eerste ronde

1. Gebruik thermische opslag in meubelmakerij (droog en spuitkabinen)*;
2. Batch processen in
 - a. Voedselindustrie;
 - b. Gietijzerverwerking*;
 - c. Chemische industrie;
 - d. Droogprocessen baksteenproductie;
 - e. Pharmaceutische sector;
3. Thermische opslag voor gebouwverwarming (kantoren, tertiair);
4. Thermische opslag in combinatie met concentrated solar power/thermal plants/biomassacentrale;
5. Regeneratieve thermische naverbranding chemische processen.

Voor de toepassingen met een * is VITO al in bezit van data welke gebruikt kunnen worden voor de analyse van de terugverdientijd.

2.3.1.2 Weerhouden toepassingen

- Gebruik van thermische opslag in een meubelmakerij
- Voedselindustrie. Een geanonimiseerd gebruiksprofiel werd opgevraagd bij Encon en werd gebruikt als basis voor de aannames in deze tweede toepassing.

2.3.1.3 Meetdata over een jaar

De meetdata over een volledig jaren worden verder besproken in de relevante secties in hoofdstuk 4.

2.3.2 Voorstel toepassingen van opslag van elektrische energie

2.3.2.1 Eerste ronde

1. Versterking elektrisch vermogen van clusters van elektrische laadpalen
2. Verlagen piekcapaciteit van netkoppeling en optimalisatie eigenverbruik in een aardappelverwerkende fabriek
3. Verlagen van piekcapaciteit en levering van basislast in een zonnepark
4. Rioolzuiveringstations: compressoren voor beluchtingsstations
5. Verplaatsbare generatoren voor bouwerven
6. Verplaatsbare, elektrisch aangedreven luchtcompressoren
7. Lokale distributienetcongestie

2.3.2.2 Weerhouden toepassingen

VLAIO heeft zelf geen geschikte gebruiksprofielen ter beschikking. Een gedetailleerde uitwerking is bijgevolg niet mogelijk.

2.3.2.3 Meetdata over een jaar

Zie voorgaande.

2.4 Wijze van rapportering

De verschillende criteria worden bonding toegelicht per technologie. Overzichtstabellen vatten de criteria kort samen.

3 OPSLAGSYSTEMEN VOOR THERMISCHE ENERGIE

3.1 Uitgangspunt

De evaluatiecriteria uit hoofdstuk 2 worden toegepast op technologie met betrekking tot opslag van thermische energie. Hierbij zijn de technologieën opgedeeld op basis van het onderliggende fysisch proces dat wordt benut om thermische energie op te slaan:

1. Voelbare warmte
 - a. Water
 - b. Thermische olie
 - c. Vaste stoffen
 - d. Gesmolten zouten
 - e. Gesmolten metalen
 - f. Ondergrond
 - g. ...
2. Faseovergangen
 - a. IJs
 - b. Negatieve temperatuur PCM
 - c. Lage temperatuur PCM
 - d. Hoge temperatuur PCM
 - e. ...
3. Thermochemisch en sorptie
 - a. Chemical looping
 - b. Zouthydraten
 - c. Absorptiesystemen
 - d. ...

Bovenstaande lijst is niet uitputtend en geeft een voorbeeld van technologieën die besproken zullen worden. Er zal niet enkel aandacht gegeven worden aan de opslag van warmte, maar ook aan koude (lagere/negatieve temperaturen). Om de vragen te beantwoorden zal beroep worden gedaan op kennis vergaard uit eigen projectwerk, alsook recente wetenschappelijke literatuur.

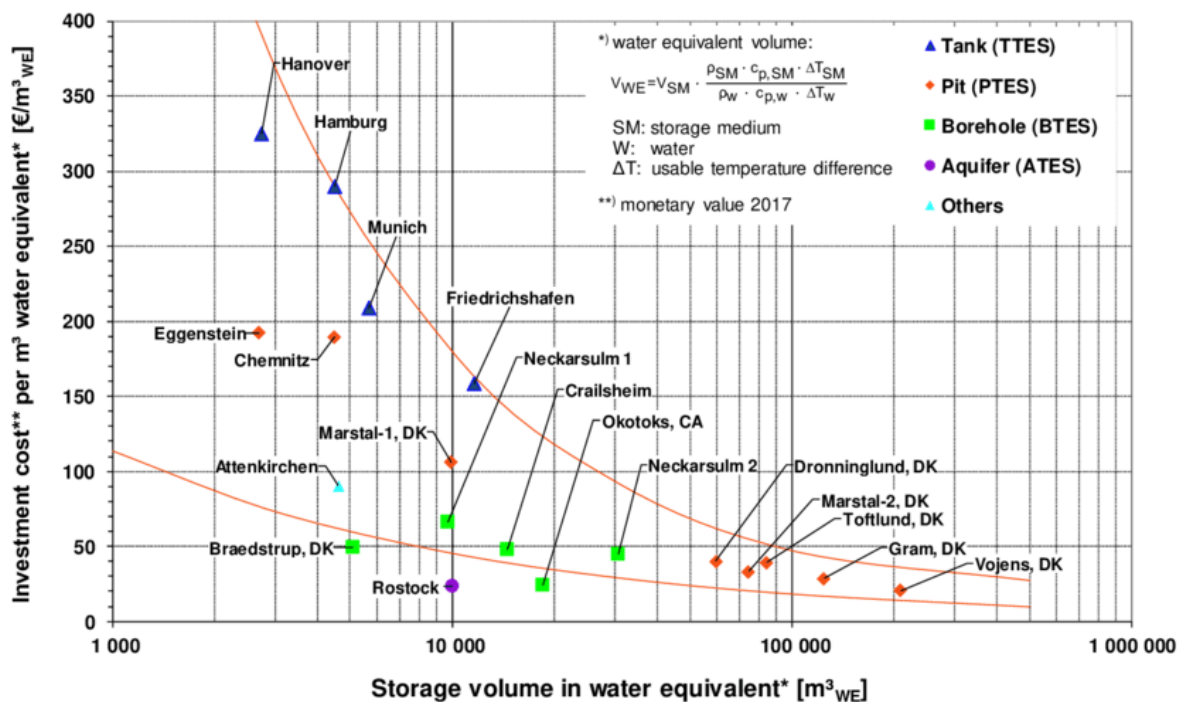
3.2 Voelbare warmte

Thermische opslag door middel van voelbare warmte is gebaseerd op het principe waarbij het toevoegen of verwijderen van thermische energie resulteert in een verandering van de temperatuur van het opslagmedium. De mate van verandering van de temperatuur is afhankelijk van de grootte van het opslagsysteem en de eigenschappen van het gebruikte materiaal, met name de specifieke warmtecapaciteit en de massadichtheid:

$$E = \int_{T_i}^{T_f} m c(T) dT$$

Merk op dat de specifieke warmtecapaciteit $c(T)$ temperatuurafhankelijk kan zijn. In onderstaande secties worden verschillende invullingen van opslag door middel van voelbare warmte individueel verder besproken.

Figuur 1 geeft voor een beknopt overzicht van de investeringskosten voor grootschalige opslagsystemen op basis van voelbare warmte. Het overzicht en de vergelijking tussen ATES, BTES, PTES¹ en TTES wordt gedaan per m³ waterequivalent² [2]. Deze data werken ondersteunend om een inzicht te krijgen in de mogelijke investeringskosten van een opslagsysteem in functie van de dimensies. Data voor opslagsystemen met een capaciteit kleiner dan 1 000 m³ waterequivalent is slechts beperkt beschikbaar.



Figuur 1: Overzicht van investeringskosten van grootschalige voelbare warmteopslagsystemen uitgedrukt in m³ water equivalent. Bron: [2].

3.2.1 Watertanks

Opslag in de vorm van warm water is de meest gangbare methode om aan thermische energieopslag te doen en is nadrukkelijk aanwezig in de residentiële sector. Ook in een industriële context is thermische opslag d.m.v. warm water in een tank (TTES) een optie, ook bij temperaturen hoger dan 100 °C, het kookpunt van water onder atmosferische druk. Door het water onder hogere druk op te slaan, verhoogt ook het kookpunt. Bij een druk van 10 bar, bedraagt het kookpunt immers 180 °C.

Bij hogere temperaturen (en afhankelijk van het proces) kan ook stoomopslag overwogen worden.

¹ Pit Thermal Energy Storage is een techniek van thermische opslag in grootschalige bassins. Momenteel wordt deze technologie enkel toegepast in het kader van warmtenetten in het kader van seizoensopslag. Veelal worden grootschalige zonnecollectorvelden gebruikt om gedurende de zomermaanden de opslag te laden, voor hergebruik in de winter. Deze techniek is bijgevolg niet relevant voor industriële toepassingen en wordt in het huidige rapport niet besproken.

² Deze term wordt gebruikt om thermische opslagsystemen op basis van voelbare warmte op basis van opslagcapaciteit met elkaar te vergelijken. Hierbij wordt rekening gehouden met het opslagmedium en de temperatuurniveaus.

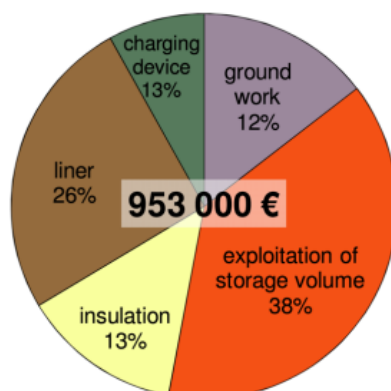
➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid:** Groot, commercieel beschikbare technologie
- **Toepasbaarheid:** Beperkt tot lage-temperatuur toepassingen. 200 °C kan als een uiterste limiet gezien worden. Bij hogere temperaturen neemt de kostprijs sterk toe door grotere eisen m.b.t. drukbestendigheid en bijgevolg dikkere wanddikte van het vat. Ook dient er modulair gewerkt te worden indien opslag onder hogere druk wordt toegepast;
- **Tijdsschaal:** Kort: intra- tot inter-dag;
- **Ontwikkelingsstatus:** Commercieel;
- **Mate van genericiteit:** Laag: Opslagsystemen worden typisch ontworpen en gebouwd in functie van de case-specifieke eisen en beschikbare ruimte;
- **Efficientie:** 70-95% afhankelijk van opslagtijd, grootte en isolerend materiaal [3];
- **Innovativiteit:** Laag;
- **Leveranciers:** Via studiebureaus (Bertin, Fabricom, Sweco, Tractebel, Arcadis, ...) en vervolgens via lasbedrijven voor constructie (Welding Company, Rojawelding, Welders, ...).

➤ **Economisch**

- **Investeringskost:** Afhankelijk van grootte en operationele temperatuur. Indicatief ~15 €/kWh voor oplossingen < 100 °C. Voor opslag onder hogere druk: 25-50€/kWh (indicatie 16 bar, met en zonder additionele kosten). 1.3 €/kWh (120-150 €/m³) is potentieel mogelijk voor grootschalige systemen [4]. De specifieke kostprijs per m³ neemt ook af voor grotere systemen (zie ook Figuur 1). Zie Figuur 2 voor een overzicht en gewicht van de verschillende componenten in de CAPEX;
- **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Afhankelijk van de inbedding zijn er additionele kosten voor pompen (en pompverbruik) en monitoring van de installatie. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5];
- **Terugverdiëntijd:** Zie Sectie 3.5.1.4 en 3.5.1.5 voor twee verschillende scenario's.

5,700 m³ TTES in Munich, 2007



Figuur 2: Opsplitsing van de kosten voor een 5 700 m³ TTES

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen:** Bepaalde types van isolerend materiaal kunnen niet gerecycleerd worden (bvb. cellulose en geëxpandeerd polystyreenschuim (EPS)). Anderzijds is cellulose een van de meest milieuvriendelijke materialen. De meest voorkomende isolatiematerialen zijn doorgaans toxisch.

3.2.2 Thermische olie

Het principe van opslag via thermische olie is erg gelijkaardig aan dat van opslag via warm water. Echter, de gebruikte opslagmedia, thermische oliën, hebben een hoger kookpunt en dienen bijgevolg niet onder druk opgeslagen te worden. Het wordt bijgevolg gebruikt als alternatief voor stoom. De specifieke warmtecapaciteit van thermische olie is lager dan die van water: 1.5 tot 2.5 kJ/kgK in vergelijking tot 4.186 kJ/kgK voor water. Bovendien is de massadichtheid van thermische olie lager dan dat van water, waardoor het volume ook toeneemt.

Er worden drie categorieën van thermische olie onderscheiden: minerale, synthetische en siliconenolie. De eerste twee types zijn beiden derivaten van aardolie, met dat verschil dat synthetische olie gemaakt wordt volgens meer geavanceerde raffinageprocessen en bijgevolg zuiverder en thermisch stabiel is dan conventionele minerale olie. Thermische olie op basis van siliconen wordt gebruikt wanneer bij een lek potentieel (explosie)gevaar bestaat.

De stabiliteit van thermische olie hangt af van product tot product. Wanneer gebruikt onder de toegelaten gebruikscondities en in de afwezigheid van restgassen zijn er doorgaans geen problemen en blijft het materiaal stabiel. Boven de toegelaten maximumtemperatuur kan er kraken van de olie optreden [6].

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid:** Groot, commercieel beschikbare technologie;
- **Toepasbaarheid:** Beperkt tot lage en vooral midden-temperatuur toepassingen. 400 °C kan als een limiet gezien worden voor synthetische olie. Voor minerale olie is dit 315 °C;
- **Ontwikkelingsstatus:** Commercieel;
- **Mate van genericiteit:** Opslagsystemen worden typisch ontworpen en gebouwd in functie van de case-specifieke eisen en beschikbare ruimte. Keuze van olie in functie van het proces en mogelijke risico's bij lekken;
- **Efficiëntie:** 70-95% afhankelijk van opslagtijd, grootte en isolerend materiaal [3];
- **Innovativiteit:** Laag;
- **Leveranciers:** Via studiebureaus (Bertin, Fabricom, Sweco, Tractebel, Arcadis, ...) voor opslagsysteem. Constructie van opslagtank via lasbedrijven (Welding Company, Rojawelding, Welders, ...). Thermische olie: Therminol, Single, BP, Chem Werke Hüls, Houghton, Mobil, Esso, ... (zie onderstaande tabel);
- **Tijdsschaal:** Kort: Intra- en inter-dag.

➤ **Economisch**

- **Investeringskost:** Afhangelijk van grootte, operationele temperatuur en gebruikte thermische olie. Voor opslagsysteem op zich zijn de kosten gelijkaardig aan die voor

warmwaterbuffers. Voor thermische olie: minerale olie: 4 €/kWh, synthetische olie: 40 €/kWh, silicone olie: 80 € / kWh.

- **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Afhankelijk van de inbedding zijn er additionele kosten voor pompen (en pompverbruik) en monitoring van de installatie. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5];
- **Terugverdiëntijd:** Thermische olie is geen geschikte kandidaat als opslagtechnologie voor de beschouwde case studies aangezien de opslagtemperatuur te laag is.

➤ Ecologisch

- **Duurzaamheid materialen:** Thermische oliën zijn derivaten van aardolie en heeft een impact op de duurzaamheid.

Tabel 2: Verschillende soorten thermische olie en de maximum toelaatbare procestemperatuur. Bron [7]:

LEVERANCIER	TYPE	MAX. TOEL. PROCESTEMP. °C
SINGLE	„S“	350
BP	Olex WF 0801	350
CHEM. WERKE HÜLS	Marlotherm SH	350
HOUGHTON	Transtherm 617	350
ARAL	Farolin U	320
MOBIL	Mobiltherm 603	285
FRAGOL	Therminol 66	355
DURATHERM EXTENDED LIFE FLUIDS	Duratherm FG	330
SINGLE	„M“	320
BP	Transcal 65	320
ESSO	Thermaöl T	320
FINO	Caloran 32	320
TEXACO	Texatherm HT	320
SHELL	Thermia B	310
FRAGOL	Therminol 59	310
ARAL	Farolin S	300
ESSO	Thermaöl T	300
ARAL	Farolin T	270
FRAGOL	Ucotherm S-20-A	220
HOUGHTON	Transtherm 7	200
PETRO-CANADA/FRAGOL	Calflo AF	300
PETRO-CANADA/FRAGOL	Calflo FG	325
SHELL	Cassida Fluid HT 32	280
SHELL	FM HEAT TRANSFER FLUID 32	325
DURATHERM EXTENDED LIFE FLUIDS	Duratherm 450	230

3.2.3 Vaste stoffen

Opslag in vaste stoffen gebeurt typisch via een packed-bed principe (PBTS) waarbij het heat-transfer fluïdum (HTF) warmte uitwisselt met de vaste stof. Deze technologie vormt een valabele optie voor opslag bij hogere temperatuur waar thermische olie een (duurder)

alternatief vormt. Aangezien er warmte uitgewisseld wordt met het opslagmedium, is deze vorm van opslag vanuit exergetisch standpunt minder efficiënt. De warmte kan aan beperkte vermogens opgeslagen en ontladen worden en een de temperatuur waarop de warmte wordt teruggewonnen is niet constant en lager dan tijdens het laadproces.

Tabel 3: Thermische eigenschappen van de meest voorkomende vaste stoffen met potentieel voor warmteopslag

Medium	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)	Heat capacity $\rho c \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	Thermal conductivity (W/m K)	Thermal diffusivity $\alpha = k/\rho c \times 10^6$ (m ² /s)
Aluminum	2707	896	2.4255	204 at 20 °C	84.100
Aluminum oxide	3900	840	3.2760	-	-
Aluminum sulfate	2710	750	2.0325	-	-
Brick	1698	840	1.4263	0.69 at 29 °C	0.484
Brick magnesia	3000	1130	3.3900	5.07	1.496
Concrete	2240	1130	2.5310	0.9-1.3	0.356-0.514
Cast iron	7900	837	6.6123	29.3	4.431
Pure iron	7897	452	3.5694	73.0 at 20 °C	20.450
Calcium chloride	2510	670	1.6817	-	-
Copper	8954	383	3.4294	385 at 20 °C	112.300
Earth (wet)	1700	2093	3.5581	2.51	0.705
Earth (dry)	1260	795	1.0017	0.25	0.250
Potassium chloride	1980	670	1.3266	-	-
Potassium sulfate	2660	920	2.4472	-	-
Sodium carbonate	2510	1090	2.7359	-	-
Stone, granite	2640	820	2.1648	1.73-3.98	0.799-1.840
Stone, limestone	2500	900	2.2500	1.26-1.33	0.560-0.591
Stone, marble	2600	800	2.0800	2.07-2.94	0.995-1.413
Stone, sandstone	2200	710	1.5620	1.83	1.172

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid:** Opkomend, onderzoeksfase voor hogere temperaturen;
- **Toepasbaarheid:** Breed, met name industriën met processen op temperatuur hoger dan 100 °C;
- **Ontwikkelingsstatus:** Afhankelijk van temperatuurniveau (lager bij hogere temperaturen): TRL 6-8;
- **Mate van genericiteit:** Opslagssystemen worden typisch ontworpen en gebouwd in functie van de case-specifieke eisen en beschikbare ruimte;
- **Efficientie:** 65-85% afhankelijk van opslagtijd, ontwerp, grootte en isolerend materiaal [3]. Bij gebruik van natuurlijk packingmateriaal met niet uniforme vormen, bestaat de mogelijkheid dat er geprefereerde paden van het HTF doorheen de opslageenheid ontstaan: de weg van de minste weerstand. Hierdoor wordt niet het volledige opslagpotentieel van de opstap gebruikt en daalt de efficientie;
- **Innovativiteit:** Laag tot medium voor hogere temperaturen;
- **Leveranciers:** Via studie bureaus (Bertin, Fabricom, Sweco, Tractebel, Arcadis, ...). Onderzoeksinstituten en universiteiten voor hogere temperaturen;
- **Tijdsschalen:** Kort: intra- tot interdag.

➤ Economisch

- **Investeringskost:** Afhankelijk van grootte, operationele temperatuur en gebruikte materiaal en HTF: 15-25€/kWh.
- **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Afhankelijk van de inbedding zijn er additionele kosten voor pompen (en pompverbruik) en monitoring van de installatie. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5]. Doordat een packing material wordt gebruikt, is de drukval over de opslageenheid groter dan

wanneer er een homogeen opslag materiaal wordt gebruikt zoals bij TTES. Hierdoor wordt het benodigde pompvermogen groter dan bij bvb. TTES en thermische olie;

- **Terugverdiertijd:**

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen:** Als opslagmedium kunnen afvalproducten zoals slak bijproducten uit metallurgie gebruikt worden. Daarnaast vormen natuurlijk materialen zoals grint, rotsdeeltjes een potentieel om als packing material gebruikt te worden.

3.2.4 Gesmolten zouten

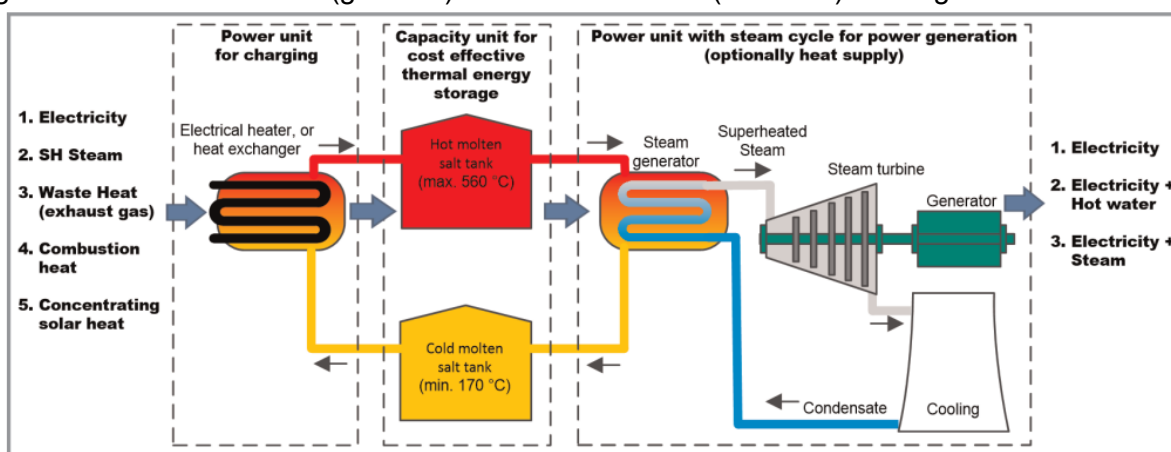
Veel industriële processen hebben een werkingstemperatuur welke hoger ligt dan 400 °C. Thermische olie is hier bijgevolg geen optie meer. Het gebruik van gesmolten zouten is in dit geval wel een optie, welke ook al aangewend wordt in bv. Concentrated Solar Power & Thermal installaties (CSP/CST) op zeer zonnrijke locaties zoals Marokko, UAE, Chili [8], [9].

Een belangrijk nadeel van zouten is de hoge stollingstemperatuur. Deze varieert, afhankelijk van de samenstelling van het zout, tussen 120 °C en 220 °C. Het is dan ook belangrijk om de opslageenheid steeds op een temperatuur te houden boven het stolpunt van het gebruikte zout.

Hitec is een voorbeeld van een commercieel beschikbaar zout dat gebruikt wordt voor het opslaan en transporteren van thermische energie bij zeer hoge temperaturen. Het is verkrijgbaar in een witte korrelvormige substantie en verkleurt geel in vloeistoffase. Hitec is een eutectische samenstelling van anorganische zouten namelijk: kaliumnitraat, natriumnitraat en natriumnitriet. Het kan gebruikt worden voor koel – en verwarmingstoepassingen in het temperatuurbereik 149 °C – 535 °C [10].

Nitrieten worden veelvuldig gebruikt als zout in dergelijke opslagsysteem zoals natriumnitriet en kaliumnitraat.

Vanuit systeemooipunt wordt bij gesmolten zouten veelal met een twee tankopstelling gewerkt: een warme tank (geladen) en een koude tank (ontladen). Zie Figuur 3.



Figuur 3: Twee tankopstelling voor gesmolten zouten. Bron: [9].

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid:** Beperkt. Testopstellingen bij voornamelijk CSP;
- **Toepasbaarheid:** Beperkt tot hoge temperatuurstoepassingen: non-ferrometaal, (petro)chemisch, staalindustrie;
- **Ontwikkelingsstatus:** TRL 4-7;
- **Mate van genericiteit:** Opslagsystemen worden typisch ontworpen en gebouwd in functie van de case-specifieke eisen en beschikbare ruimte;
- **Efficiëntie:** 90-99% [11];
- **Innovativiteit:** Medium-hoog;
- **Leveranciers:** Via studie bureaus (Bertin, Fabricom, Sweco, Tractebel, Arcadis, ...). Coastal Chemical Co (HITEC), MAN MOSAS;
- **Tijdsspanne:** Kort: intra- en interdag.

➤ **Economisch**

- **Investeringskost:** Afhankelijk van grootte, operationele temperatuur en gebruikte materiaal: 25-70€/kWh [11]. Kosten voor thermisch zout: 1 € - 5 € / kg.
- **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Afhankelijk van de inbedding zijn er additionele kosten voor pompen (en pompverbruik) en monitoring van de installatie. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5];
- **Terugverdiëntijd:** Thermische olie is geen geschikte kandidaat als opslagtechnologie voor de beschouwde case studies aangezien de opslagtemperatuur te laag is.

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen:** Afhankelijk van gekozen zout.

3.2.5 Gesmolten metalen

Wanneer de opslag op extreem hoge temperatuur nodig is, kunnen gesmolten metalen overwogen worden. Een overzicht van de meest gangbare metalen wordt gegeven in Tabel 4, samen met het smeltpunt (en bijgevolg de temperatuur waarop de opslag minimaal gehouden moet worden) en een indicatie van de materiaalprijs per metrische ton. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de materiaalprijs sterk onderhevig is aan fluctuaties op de internationale markt. Molybdenum steeg bijvoorbeeld sinds begin 2023 op zeer korte tijd met meer dan 95% in prijs: van ongeveer \$ 46 per tot \$ 90 per kg.

Omdat gesmolten metalen doorgaans erg hoge smeltpunten hebben en niet triviaal verpompt kunnen worden, wordt doorgaans een warmtewisselaar gebruikt om het materiaal te laden en ontladen. Vaak worden de metalen dan ook als fase-overgangsmateriaal (PCM) gebruikt. Een voorbeeld hiervan is het commercieel product van Azelio op basis van gesmolten aluminium [12]. Hierop wordt teruggekomen in Sectie 3.3. Zuiver gebruik van metalen als voelbare warmte opslagmateriaal blijft, voor zover de kennis van de auteurs reikt, beperkt tot conceptuele en theoretische studies [13].

Tabel 4: Smeltpunten van verschillende metalen. Verscheidene bronnen.

Metaal	Smeltpunt [°C]	Kostprijs [€/ton]
Aluminium	660	2 800
Aluminiummessing	1027-1038	-
Carbonstaal	1425-1540	500
Chroom	1860	2 800
Goud	1063	55 000 000
Inconel	1390-1425	91 200 – 126 760
Koper	1084	8 700
Lood	328	2 000
Messing	930	2 000 – 3 500
Molybdenum	2620	50 000 – 90 000
Nikkel	1453	25 500
Platinum	1770	27 800 000
Roestvrij staal	1375-1530	1 250 – 1 300
Titanium	1670	8 000 – 9 000
Wolfraam	3400	270 - 300
Zilver	961	700 000 – 800 000
Zink	420	3 000

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid:** Onderzoeksfase;
- **Toepasbaarheid:** Beperkt tot hoge temperatuurstoepassingen: non-ferro metalen, (petro)chemisch, staalindustrie;
- **Ontwikkelingsstatus:** TRL 4-5;
- **Mate van genericiteit:** Opslagsystemen worden typisch ontworpen en gebouwd in functie van de case-specifieke eisen en beschikbare ruimte;
- **Efficientie:** Onbekend;
- **Innovativiteit:** Hoog;
- **Leveranciers:** Nog niet commercieel, conceptueel of beperkte mate van experimenteel onderzoek;
- **Tijdsschaal:** Onbekend, doch wellicht kort: intra- en interdag.

➤ **Economisch**

- **Investeringskost:** Ongekend. Huidige materialprijzen variëren sterk. Een overzicht kan gevonden worden in Tabel 4;
- **Operationele kost:** Onbekend. De schatting van Yang et al. voor een OPEX variërende tussen 1 en 3 % van de initiële investeringskost kan wellicht als een ondergrens beschouwd worden [5];
- **Terugverdientijd:** Ongekend.

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen:** Afhangelijk van gekozen metaal.

3.2.6 Ondergrond

De twee voornaamste systemen zijn Aquifer Thermal Storage (ATES) en Borehole Thermal Storage (BTES). Deze twee technologieën onderscheiden zich doordat in het geval van ATES er rechtstreeks grondwater onttrokken en opnieuw geïnjecteerd wordt in de ondergrond, terwijl bij BTES er een uitwisseling van warmte is. ATES is bijgevolg enkel toepasbaar als er voldoende watervoerende lagen in de ondergrond aanwezig zijn, de zogenoemde aquifers. Bij de constructie van een ATES dient ook rekening gehouden te worden met activiteiten op percelen in de buurt. Indien meerdere gebruikers éénzelfde watervoerende laag aanboren, kan interferentie ontstaan, welke ongunstig is voor de efficiëntie van het opslagsysteem.

BTES is in principe overal inzetbaar, al is een goede warmtegeleiding in de ondergrond wenselijk. Doordat meerdere boringen nodig zijn bij de toepassing van BTES, is de investeringskost ook hoger om tot vergelijkbaar vermogen en opslagcapaciteit als een ATES systeem te komen. Deze technologie wordt uitsluitend gebruikt voor seizoensopslag waarbij warmteoverschotten tijdens de zomermaanden gebruikt worden om de ondergrond te regenereren. Tijdens de wintermaanden kan de warmte terug onttrokken worden voor gebruik, eventueel na opwaardering via een warmtepomp.

Hogetemperatuur-toepassingen zijn in Vlaanderen niet mogelijk aangezien de injectietemperatuur beperkt is tot 25 °C (VLAREM II Artikel 5.53.6.2.9. *De temperatuur van grondwater dat opnieuw wordt geïnjecteerd, bedraagt maximaal 25°C [..]*). Dit in tegenstelling tot het buitenland, zoals bijvoorbeeld in Finland, waar water tot een temperatuur van 90 °C geïnjecteerd wordt bij een verduurzamingsproject op een campus [14].

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid:** Breed, commercieel;
- **Toepasbaarheid:** Beperkt tot erg lage temperatuurtoepassingen: gebouwverwarming;
- **Ontwikkelingsstatus:** Commercieel;
- **Mate van genericiteit:** Dimensionering gebeurt in functie van vraag en aanbod en lokale geologische eigenschappen;
- **Efficiëntie:** Tot 50%;
- **Innovativiteit:** Laag
- **Leveranciers:** Geothermische studiebureaus (Terra Energy, Geofys, Stubeco, Boydens, Ingenium, Iftech, ...)
- **Tijdsschaal:** Seizoensopslag

➤ Economisch

- **Investeringskost:** 10-50 €/m³ water equivalent. BTES is duurder dan ATES doordat een groter aantal boringen dat nodig is;
- **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. BTES is relatief onderhoudsarm. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5]. 3 tot 10 € / MWh wordt vermeld door Anttila [15].
- **Terugverdientijd:** Voor projecten waar louter aan gebouwverwarming en -koeling gedaan wordt bedraagt de terugverdientijd tussen de 7 en 13 jaar.

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen:** In het geval van BTES wordt een glycolmengsel gebruikt. Glycollekkers kan nefaste invloeden hebben op het leven in de bodem. De productie van glycol kan tegenwoordig wel op een duurzame wijze gebeuren [16].

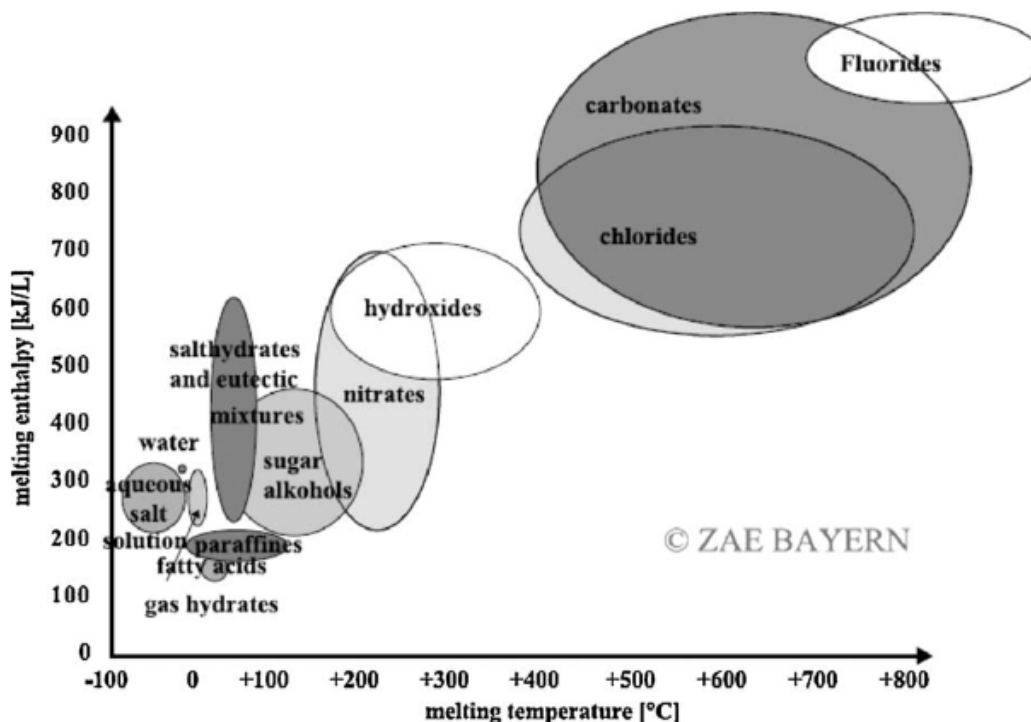
3.3 Latente warmte

Thermische opslag door middel van latente warmte is gebaseerd op het principe waarbij het toevoegen of verwijderen van thermische energie resulteert in een verandering van de fase van het opslagmedium (gas, vloeibaar of vast). De hoeveelheid warmte welke in een faseverandering opgeslagen of onttrokken kan worden, is afhankelijk van de grootte van het opslagsysteem en de eigenschappen van het gebruikte materiaal, met name de latente warmtecapaciteit. Naast latente warmte, blijft ook voelbare warmte een bijdrage hebben:

$$E = \int_{T_i}^{T_f} m c(T) dT + m C_L$$

Ook hier geldt dat de specifieke warmtecapaciteit $c(T)$ temperatuurafhankelijk kan zijn. C_L is de latente warmtecapaciteit en wordt uitgedrukt in J/kg. Materialen waarbij een faseovergang gebruikt wordt om aan energieopslag te doen worden Phase Change Materials of PCM genoemd. Om praktische redenen, met name het beperkte verschil in massadichtheid, worden bijna uitsluitende faseovergangen tussen de vaste en vloeibare fase aangewend om thermische energie op te slaan. De overgang tussen vloeibaar en gasvormig heeft echter een hogere latente warmtecapaciteit, maar is in de praktijk moeilijker te realiseren door het grote verschil in massadichtheid tussen deze twee fasen. In elk geval geldt dat voor het smelten van een materiaal, een thermische bron (of restwarmte) beschikbaar moet zijn op een temperatuur hoger dan het fase-overgangspunt. Bij het stollen geldt dan weer dat de aangevoerde warmte op een temperatuur onder het stolpunt moet liggen.

Er bestaan verschillende classificaties voor PCM, welke worden weergegeven in Figuur 4. In onderstaande secties worden verschillende invullingen van opslag door middel van PCM individueel verder besproken als functie van het temperatuurbereik.



Figuur 4: Latente warmtecapaciteit (y-as) versus overgangstemperatuur (x-as) voor verschillende categorieën van PCM. Bron: ZAE Bayern

3.3.1 IJs

De faseovergang tussen vast (ijs) en vloeibaar water is wellicht de gekendste vorm van PCM. De latente warmtecapaciteit van ijs bedraagt 334 kJ/kg. Het smelten van 1 kg ijs vereist bijgevolg evenveel energie als het verhogen van de temperatuur van dezelfde massa water met 80 °C. Opslag door middel van ijs is typisch duurder (per kWh) dan opslag via gekoeld water, maar kan op een kleinere oppervlakte.

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid:** Breed;
- **Toepasbaarheid:** Beperkt: Koelprocessen, koeling van (kantoor-) gebouwen, bewaren bederfbare producten;
- **Ontwikkelingsstatus:** Commercieel;
- **Mate van genericiteit:** Hoog;
- **Efficientie:** <95%;
- **Innovativiteit:** Laag;
- **Leveranciers:** Baltimore Aircoil, IceBear, Calmac ICE banks, ...;
- **Tijdsspanne:** Kort tot Middellang: dagen tot weken

➤ Economisch

- **Investeringskost:** ~ 7000 €/m³ (Calmac)

- **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5];
 - **Terugverdientijd:** De case study vereist geen koudeopslag. Deze technologie wordt bijgevolg niet geeavuleerd. Op basis van voorbeelden uit de literatuur is voor toepassing op gebouwniveau een terugverdientijd van 6 a 8 jaar realistisch.
- **Ecologisch**
- **Duurzaamheid materialen:** Als HTF wordt doorgaans Glycol gebruikt. Dezelfde bemerkingen zoals geformuleerd in Sectie 3.2.6 zijn van toepassing.

3.3.2 Lage-temperatuur PCM

Lage-temperatuur wordt gedefinieerd tussen 0 °C en 100 °C. De belangrijkste categorieën van PCM zijn paraffine en zouthydraten (zie Figuur 4). Deze twee klassen hebben elk hun eigen voor- en nadelen, waarbij vanuit zowel ecologisch als economisch oogpunt zouthydraten een voorkeur genieten. Nadeel is echter de stabiliteit van zouthydraten waardoor de performantie en levensduur van opslagsysteem snel en sterk kan afnemen [17].

- **Technisch**
- **Beschikbaarheid:** Als opslagsysteem: beperkt, materialen: breed;
 - **Toepasbaarheid:** Beperkt tot lage temperatuur toepassingen zoals: ruimteverwarming (kantoor)gebouwen, voedsel- en drankindustrie (drogen en voorverwarmen) [18];
 - **Ontwikkelingsstatus:** TRL 8-9 [3];
 - **Mate van genericiteit:** Beperkt: de principes zijn universeel maar het PCM materiaal dient gekozen te worden in functie van het proces en/of beschikbare restwarmte;
 - **Efficiëntie:** >90% [3];
 - **Innovativiteit:** Medium;
 - **Leveranciers:** PCM Materials, Paraffin Wax CO, Rubitherm, PureTemp, PLUSS, Microtek, Croda, ...
 - **Tijdsspanne:** Kort tot Middellang: dagen tot weken
- **Economisch**
- **Investeringskost:** 50 € - 250 € / kWh [3]
 - **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5].
 - **Terugverdientijd:** Zie Sectie 3.5.1.6.
- **Ecologisch**
- **Duurzaamheid materialen:**
 - **Paraffine:** Ontvlambaar (kaarsenvet), olie-gebaseerd product
 - **Zouthydraten:** Corrosiviteit (afhankelijk van materiaal)

3.3.3 Medium-temperatuur PCM

Lage-temperatuur wordt gedefinieerd tussen 100 °C en 500 °C. De belangrijkste categorieën van PCM zijn suikeralcoholen, nitraten en hydroxiden (zie Figuur 4). Uit deze drie categorieën hebben suikeralcoholen een groot potentieel, ondanks het feit dat de kwaliteit en stabiliteit van deze materialen degradeert bij verwarming boven het smeltpunt [19].

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid:** Opslagsysteem: beperkt, materialen: breed;
- **Toepasbaarheid:** Breed: non-ferrometaal, chemische industrie, voedselindustrie, papierverwerking, metaalverwerking, ...;
- **Ontwikkelingsstatus:** TRL 7-8;
- **Mate van genericiteit:** Beperkt: de principes zijn universeel maar het PCM materiaal dient gekozen te worden in functie van het proces en/of beschikbare restwarmte;
- **Efficiëntie:** >85% [3];
- **Innovativiteit:** Medium tot hoog;
- **Leveranciers:** Divers op het vlak van materiaal;
- **Tijdsspanne:** Kort tot middellang: dag tot weekbasis.

➤ Economisch

- **Investeringskost:** 50 € - 250 € / kWh [3];
- **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5];
- **Terugverdientijd:** De geselecteerde case study vereist geen toepassing van medium-temperatuur opslag. Deze technologie wordt bijgevolg niet geëvalueerd.

➤ Ecologisch

- **Duurzaamheid materialen:** Suikeralcoholen kunnen gewonnen worden als bijproduct uit biologische materialen. Ze zijn niet-toxisch, niet-corrosief en milieuvriendelijk. Nitraten hebben schadelijke effecten op het ecologisch systeem en zijn bijgevolg niet duurzaam.

3.3.4 Hoge-temperatuur PCM

Hoge-temperatuur wordt gedefinieerd als hoger dan 500 °C. De belangrijkste categorieën van PCM zijn chlorides, fluoriden, metalen en carbonaten (zie Figuur 4). In het geval van metalen bestaat een nauwe link met de categorie “gesmolten metalen” onder voelbare warmte, Sectie 3.2.5. Zoals eerder vermeld is het niet louter de ambitie om in het geval van gesmolten metalen enkel de voelbare warmte te gebruiken voor thermische energieopslag.

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid:** Opslagsysteem: beperkt, materialen: breed;
- **Toepasbaarheid:** Beperkt tot hoge temperatuurstoepassingen: non-ferro metalen, (petro)chemisch, staalindustrie;
- **Ontwikkelingsstatus:** TRL 4-6 [3];

- **Mate van genericiteit:** Beperkt: de principes zijn universeel maar het PCM materiaal dient gekozen te worden in functie van het proces en/of beschikbare restwarmte;
 - **Efficientie:** 75-90% [3];
 - **Innovativiteit:** Hoog;
 - **Leveranciers:** Niet gekend;
 - **Tijdsschaal:** Verwacht kort tot middellang: dag tot week.
- **Economisch**
- **Investeringskost:** 50 € - 250 € / kWh [3];
 - **Operationele kost:** Weinig informatie beschikbaar. TTES is relatief onderhoudsarm. Yang et al. Schatten de jaarlijkse OPEX op 1 tot 3 % van de initiële investeringskost [5];
 - **Terugverdientijd:** De geselecteerde case study vereist geen toepassing van medium-temperatuur opslag. Deze technologie wordt bijgevolg niet geëvalueerd.
- **Ecologisch**
- **Duurzaamheid materialen:** Hoge concentraties aan chlorides hebben een negatieve impact op het ecosysteem via het grondwatercontaminatie. Hetzelfde geldt voor fluorides. Met carbonaten zijn doorgaans geen problemen. Een voorbeeld hiervan is natriumcarbonaat, welke een natuurlijk product is met een smeltpunt van 851 °C.

3.4 Thermochemische & sorptietechnieken

In tegenstelling tot voorgaande categorieën welke op thermofysische fenomenen berusten, worden bij thermische opslag door middel van thermochemie en sorptie chemische reacties gebruikt. Warmte wordt toegevoegd aan een chemische verbinding waarna er een reversibele endotherme reactie optreedt. De warmte wordt bijgevolg gebruikt om de verbinding te breken. Nadien kunnen beide componenten individueel opgeslagen worden. Wanneer er opnieuw warmte nodig is, worden beide componenten met elkaar in verbinding gebracht, waarna warmte wordt vrijgegeven na de exotherme verbinding.

Standaard wordt onder thermochemische (TCM) en sorptietechnieken volgende opsplitsing gehanteerd [20]:

- Adsorptie in vaste stoffen
- Chemische reacties
- Composietmaterialen
- Absorptie in vloeistoffen

Absorptie wordt gedefinieerd als het proces waarbij een materiaal (absorptief) wordt opgeslorpt in een ander materiaal (absorbens). De reactieprocessen voltrekken zich op moleculair niveau en hebben een verandering in de structuur en morfologie van het absorbens tot gevolg. De absorbens kan een vaste of vloeibare stof zijn, het absorptief is vloeibaar of gasvormig.

Bij adsorptie zijn ook (minstens) twee verschillende materialen betrokken maar voltrekt het proces zich aan het grensooppervlak. Hierdoor wordt de structuur van de absorbens niet gewijzigd.

Bovendien worden twee soorten systemen onderscheiden: open en gesloten systemen. Het verschil is dat een gesloten systeem onder lage druk functioneert en een hogere opslagdichtheid kent. Het is bijgevolg ook onderhoud intensiever dan een open systeem. Bovendien kan een open systeem enkel gebruikt worden voor sorptieprocessen waarbij het absorptief water(damp) is.

Voor alle bovenstaande categorieën geldt dat deze technologie een relatief laag TRL-niveau heeft en, afhankelijk van het type, hoogstens als prototype gedemonstreerd is geworden. De nadruk bij sorptieopslag is lange-termijn en bijgevolg minder relevant voor toepassingen in een industriële context. Tot slot is de temperatuur waarop de warmte kan worden teruggewonnen (veel) lager dan de temperatuur waarbij de opslag geladen dient te worden. Als meest gangbare toepassingen wordt gefocust op warmte van zonnecollectoren om sorptieopslag te laden in de zomer en de warmte terug te winnen in de winter met een temperatuur van ongeveer 50 C. Deze drie categorieën worden bijgevolg beknopt besproken.

Operationele kosten zijn niet gekend voor deze systemen.

3.4.1 Chemische reacties

Op het vlak van chemische reacties worden nog drie subcategorieën onderscheiden op basis van het type absorbens: zouthydraten, hydroxiden en ammonia. Van deze drie hebben zouthydraten het gros van de wetenschappelijke aandacht ontvangen omwille van de theoretisch hoge opslagdichtheid en (ont)laadtemperatuur. Het absorptief is water. De bindingsenergie neemt toe naarmate er meer water verdampt wordt uit het zouthydraat:



Om veiligheidsredenen wordt het zout nooit volledig uitgedampt omdat dit in vervloeiing van de absorbens kan leiden. Voorbeelden van zouthydraten waarop onderzoek is gebeurd zijn MgSO_4 , Na_2S , MgCl_2 , CuSO_4 en SrBr_2 .

Pardo et al. maken volgende opdeling, met enkele voorbeelden:

- Metaalhydriden: MgH_2 , CaH_2
- Carbonaten: PbCO_3 , CaCO_3
- Hydroxiden: Mg(OH)_2 , Ca(OH)_2
- Redoxsystemen: BaO_2 , Co_3O_4
- Ammoniasystemen: NH_3 , NH_4HSO_4
- Organische systemen: $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$, CH_4/CO_2 , C_6H_{12} , SO_3

De operationele omstandigheden hangen sterk af van het gebruikte actieve materiaal. De temperaturen waarbij geladen wordt, variëren tussen ongeveer 300 en meer dan 1000 °C.

Onderzoek naar het gebruik van ammoniak staat nog in de kinderschoenen en ook hier zijn verschillende nadelen geïdentificeerd welke bijkomend onderzoek vereisen [20]. Bovendien kent ammoniak ook nadelige milieueffecten.

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid:** Prototypen;
- **Toepasbaarheid:** Langetermijnopslag & verscheidene temperatuurniveaus (in functie van actief materiaal);
- **Ontwikkelingsstatus:** TRL 3-5;
- **Mate van genericiteit:** Ongekend maar waarschijnlijk laag. Actief materiaal bepaalt de temperatuur waarop geladen en ontladen kan worden;
- **Efficientie:** >90%;
- **Innovativiteit:** Hoog
- **Leveranciers:** Geen, nog in onderzoeksfase
- **Tijdsschaal:** Seizoensopslag

➤ **Economisch**

- **Investeringskost:** Materiaalkost varieert van € 70 tot € 2400 per ton. Kosten voor volledige systeem ongekend. Door corrosiviteit van absorbens zijn dure coatings voor de warmtewisselaar vaak noodzakelijk.
- **Operationele kost:** Ongekend;

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen:** Afhankelijk van het gekozen materiaal al zijn corrosiviteit & giftigheid veel terugkerende fenomenen.

3.4.2 Adsorptie in vaste stoffen

De energieopslagdichtheid van adsorptiematerialen is lager dan de chemische reacties besproken in voorgaande sectie. Dit komt doordat de reactie enkel aan het grensooppervlak plaatsvindt en omdat de reactie op zich ook minder sterk is. Dit kan deels worden opgelost door het gebruik van erg poreuze materialen om het contactoppervlak te vergroten.

Een gekend adsorptiemateriaal is zeoliet. Dit zijn poreuze kristallijne aluminosilicaten in combinatie met alkali-elementen zoals natrium, kalium en calcium. Daarnaast wordt ook onderzoek gedaan naar aluminofosfaten (AIPs) en silico-aluminofosfaten (SAPOs).

Het probleem met zeoliet is dat het zich onder systeemomstandigheden onstabiel gedraagt. Bovendien is het een duur product.

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid:** Prototype/demonstratie voor zeoliet;
- **Toepasbaarheid:** Lage temperatuur toepassingen en langetermijnopslag;
- **Ontwikkelingsstatus:** TRL 3-6;
- **Mate van genericiteit:** Ongekend;
- **Efficientie:** >90%;
- **Innovativiteit:** Hoog;
- **Leveranciers:** Geen, onderzoeksfase

➤ **Economisch**

- **Investeringskost:** Materiaalkost varieert van € 70 tot € 2400 per ton. Kosten voor volledige systeem ongekend. Door corrosiviteit van absorbens zijn dure coatings voor de warmtewisselaar vaak noodzakelijk.
- **Operationele kost:** Ongekend;

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen:** Afhankelijk van gekozen materialen.

3.4.3 Compositmaterialen

Deze relatief nieuwe klasse van materialen combineert de twee voorgaande. Er wordt gekozen om een relatief inerte draagstructuur te verrijken met een actief materiaal, doorgaans een zouthydraat. Hierdoor kunnen stabiliteitsproblemen worden tegengegaan, aan een aanvaardbare prijs. De opslagdichtheid van het uiteindelijke materiaal is wel lager dan van het pure zouthydraat. Het domein van compositmaterialen is een onderzoeksgebied op zich en gezien het lage TRL, wordt deze hier enkel voor de volledige vermeld.

3.4.4 Absorptie in vloeistoffen

Het onderliggende principe in deze laatste categorie is zeer gelijkaardig aan deze beschreven in 3.4.1. Het verschil is dat doorgaans water wordt verdampt uit een zoutoplossing zoals bijvoorbeeld LiBr. Deze is een gekende stof in koeltoepassingen. Het verdampte water wordt afgevoerd, gecondenseerd en opgeslagen. Op een later tijdstip wordt het opnieuw verdampt, om na adsorptie in het zout terug warmte af te geven. De beschikbare literatuur is eerder beperkt en gerapporteerde resultaten betreffen kleinschalige labo-experimenten.

3.5 Beschrijving casestudies

3.5.1 Case 1: Assemblagehal van aannemer/meubelmakerij

3.5.1.1 Overzicht Case Studie

Voor de eerste case wordt data gemeten in de assemblagehal en bijhorende kantoorgebouwen van een aannemer. De data werden opgemeten in het jaar 2019 met een resolutie van 1 uur. Het volledige thermische energiesysteem bestaat uit twee primaire kringen: één op hoge temperatuur (90 °C) en één op lage temperatuur (40 °C). De lage temperatuurkring voorziet warmte aan de processen (spuit- en droogkamers) alsook verwarming voor de nieuwe kantoorgebouwen. Warmte uit de hoge temperatuurkring wordt voor specifieke processen in de assemblagehal gebruikt en ook geleverd aan twee naburige bedrijven³.

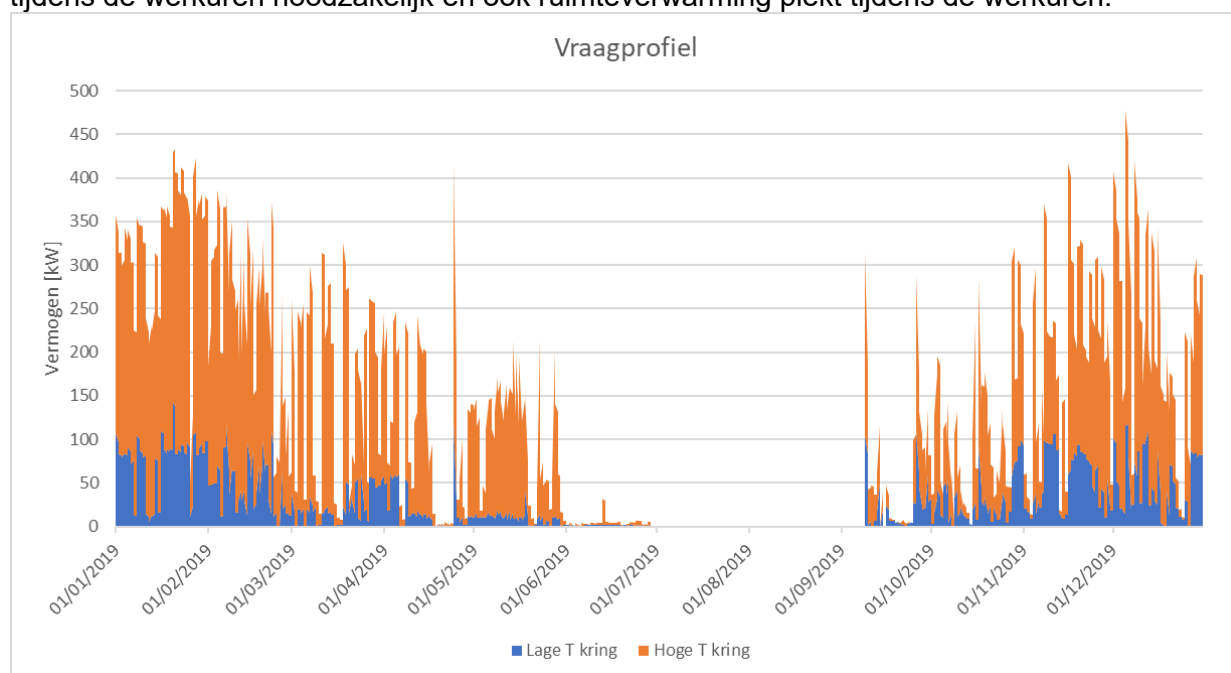
Het bedrijf produceert warmte door de verbranding van lokaal afvalhout. Bovendien is er ook een ORC (Organic Rankine Cycle) aanwezig welke laagwaardige warmte omzet in elektriciteit. De restwarmte van deze ORC voedt bovendien de lage temperatuurkring. Voor

³ Het is uit de verkregen data niet duidelijk of er tijdens de gemeten campagne effectief warmte aan de naburige bedrijven geleverd werd.

de huidige studie wordt echter aangenomen dat er een gasboiler ter beschikking is om warmte te produceren. Thermische opslag kan hier een rol spelen om de gasboiler kleiner te dimensioneren en zo meer uren aan vollast te laten produceren, wat de levensduur en efficiëntie ten goede komt.

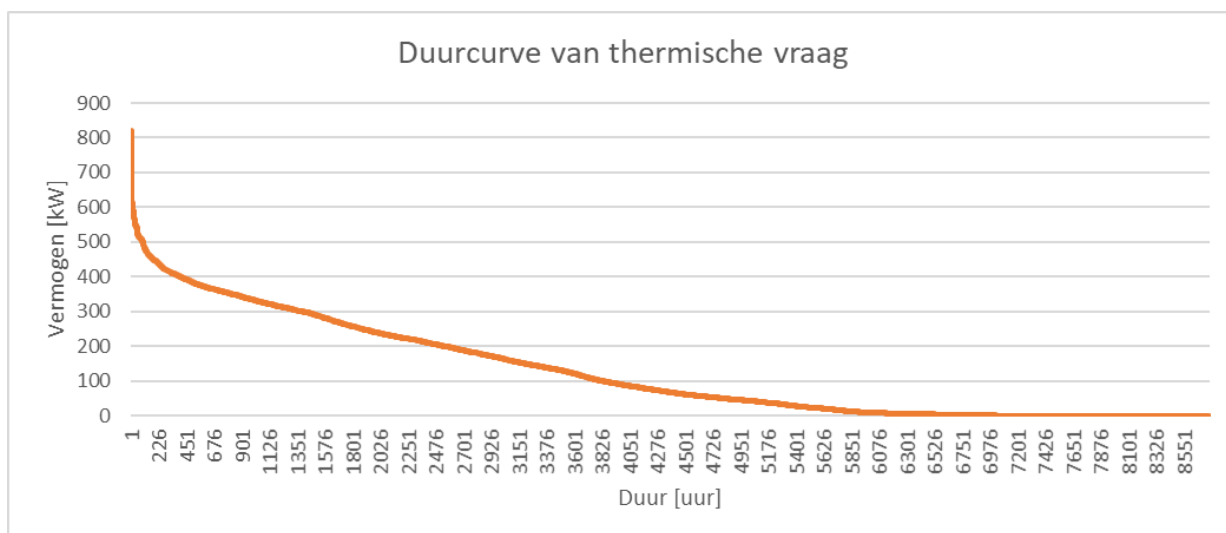
Het gebruikte jaarprofiel⁴ wordt weergegeven in Figuur 5. Deze is uitgesplitst in de lage temperatuurkring (blauw) en hoge temperatuurkring (oranje). Figuur 6 geeft de duurlastcurve van de cumulatieve thermische vraag. Uit beide figuren blijkt duidelijk dat er een seizoensgebonden factor in het vraagprofiel aanwezig is. Tijdens de zomermaanden is er nauwelijks tot geen warmtevraag daar er geen nood is aan ruimteverwarming. Ook is er geen proceswarmte nodig tijdens het bouwverlof.

Ook op kortere tijdschalen is er een variatie in de warmtevraag. Proceswarmte is enkel tijdens de werkuren noodzakelijk en ook ruimteverwarming piekt tijdens de werkuren.



Figuur 5: Vraagprofiel van de verschillende kringen (lage en hoge temperatuur) in Case 1.

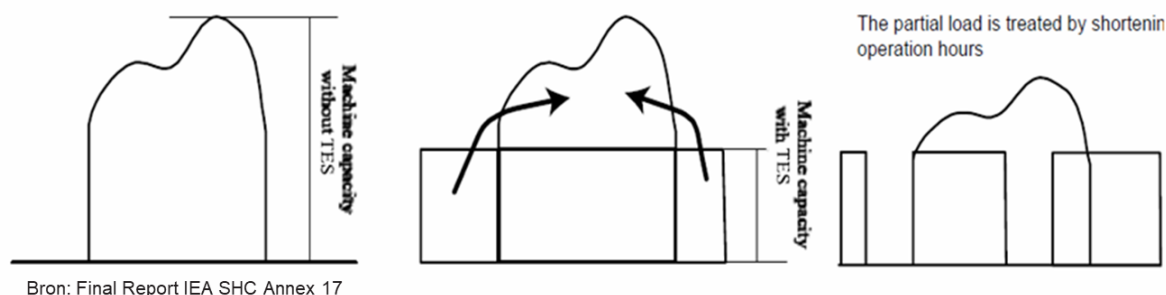
⁴ Gedurende drie dagen is er een hiaat in de gemeten data. Voor twee van de drie dagen was deze beperkt tot 2 uur en werden de data geïnterpoleerd. Voor de derde dag besloeg de ontbrekende data de volledige werkdag. Aangezien het hier om een werkdag ging, werd dit hiaat opgevuld met data van een vergelijkbare werkdag in termen van buitentemperatuur.



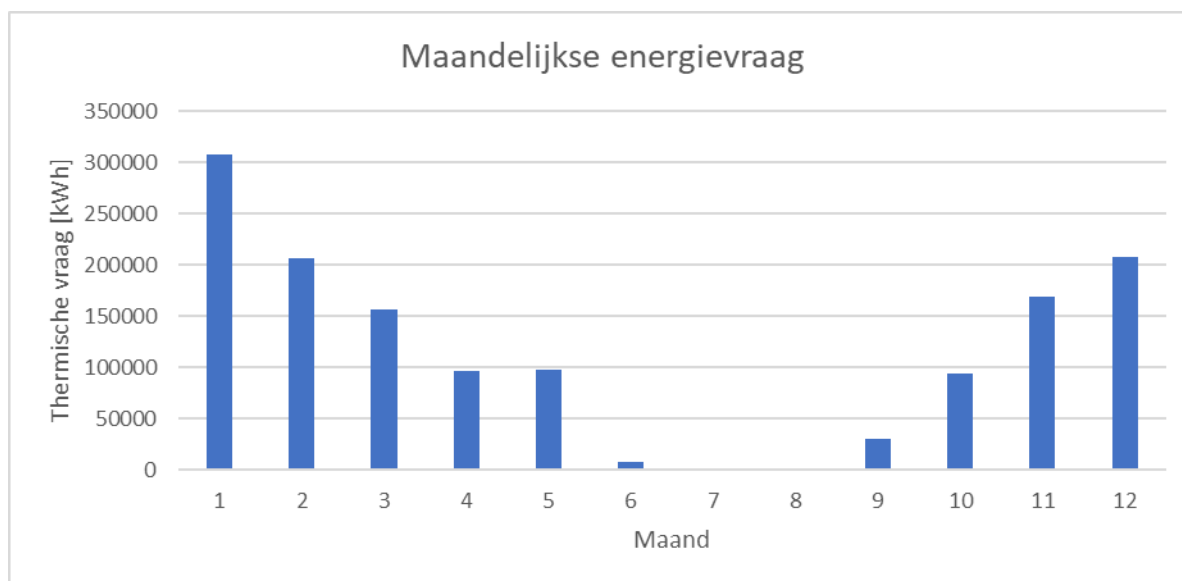
Figuur 6: Duurcurve van de thermische energie voor Case Studie 1

3.5.1.2 Aannames voor berekeningen

Zoals eerder vermeld wordt onderzocht hoe een opslagtechniek gebruikt kan worden om het energievoorzieningssysteem kleiner te dimensioneren. Het principe hiervoor is weergegeven in Figuur 7. Indien geen buffer in het systeem is opgenomen, dient het energievoorzieningssysteem op elk moment in de tijd in staat te zijn de gevraagde hoeveelheid warmte te leveren. Dit heeft pendelgedrag (wisselen tussen aan en uit), meerdere draaiuren in deellast (en bijgevolg lagere efficiëntie) en een kortere levensduur tot gevolg. Als er een thermisch opslagsysteem ter beschikking is, zal er reeds thermische energie geproduceerd worden voor er vraag naar is. Deze wordt opgeslagen in de buffer en wordt op een later tijdstip gebruikt.



Figuur 7: Conceptvoorstelling waarbij thermische opslag gebruikt wordt om het energievoorzieningssysteem kleiner te dimensioneren.



Figuur 8: Maandelijks thermische energievraag (hoge en lage temperatuur cumulatief)

Belangrijke factoren in de bepaling van terugverdientijd zijn de investeringskosten van het energieopwekkingssysteem. In de huidige studie wordt uitgegaan van een gasboiler. Een uitgebreide prijslijst werd gebruikt om de investeringskosten van industriële gasboilers te schatten [21].

De efficiëntie van de modulerende gasboiler wordt verondersteld op 85% aan vollast en 80% wanneer de modulatiegraad 30% bedraagt [22]. Er is geen minimale modulatiegraad. Als een opslagsysteem voorzien is, worden verliezen in rekening gebracht. Hierbij wordt gerekend met een U-waarde van $0.25 \text{ W/m}^2\text{C}$. Dit komt overeen met een ongeveer 10 cm isolerende laag van het type rotswol of gelijkaardig. De omgevingstemperatuur wordt constant op $20 \text{ }^\circ\text{C}$ gesteld. Tenzij anders vermeld worden geen verdere verliezen door beschouwd. De gemiddelde temperatuur van de opslag wordt bepaald op basis van de hoeveelheid energie opgeslagen in de eenheid.

Qua inplanting van de thermische buffer zijn er vier mogelijkheden:

1. De buffer wordt ingezet tussen de warmtebron (de gasboiler in dit geval) en de twee distributiekringen;
2. De buffer wordt ingezet in de hoge temperatuurkring;
3. De buffer wordt ingezet in de lage temperatuurkring;
4. De lage temperatuurkring staat in serie met de hoge temperatuurkring en wordt deel gevoed door de restwarmte uit de hoge temperatuur kring. Een thermische buffer kan hier ook ingezet worden.

In de huidige studie wordt enkel de eerste mogelijkheid onderzocht. Case 4 is potentieel interessant maar kan niet verder worden uitgewerkt op basis van de beschikbare data.

Tot slot dient te worden opgemerkt dat de berekeningen zoals hier gepresenteerd een indicatie zijn. De precieze inbedding van verschillende soorten opslagtechnologie zullen verschillende gevolgen hebben op de werking van het systeem. Het is van belang een

gedetailleerde studie te doen om de exacte effecten van een bepaalde technologie, en bijgevolg de terugverdientijd, met een grotere nauwkeurigheid te kunnen bepalen.

3.5.1.3 Referentiescenario

In het referentiescenario wordt geen opslag beschouwd en dient de geïnstalleerde boiler op elk moment de behoefte aan thermische energie leveren. Er wordt geopteerd voor een boiler met een maximaal vermogen van 1000 kW. De investeringskost hiervoor wordt geschat op € 35 000. Het gasverbruik op jaarbasis is 135 773 m³.

De kosten voor het gebruik van gas worden in Tabel 1 voor de verschillende prijsevolutie scenario's weergegeven.

Tabel 5: Case Studie 1: jaarlijkse kosten voor gas in referentiecasse

Prijsevolutie scenario	2023	2024	2025+
Stabiel	€ 222 886		
Stijgend	€ 261 501	€ 332 241	€ 376 120
Dalend	€ 198 313	€ 153 296	€ 125 373

3.5.1.4 Kleinschalige waterbuffer

In dit scenario wordt een boiler met een maximaal vermogen van 500 kW geïnstalleerd. De investeringskost hiervoor bedraagt € 20 000. De berekeningen tonen aan dat een thermische buffer met een volume van 10 m³ volstaat. De geschatte investeringskosten hiervoor is eveneens € 20 000. Het verschil in totale investeringskost is bijgevolg slechts € 5 000. De hoeveelheid gas die verbruikt wordt is op jaarbasis 132 936 m³ (-2 %).

De kosten op jaarbasis voor het verbruik van gas worden gegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Case Studie 1: jaarlijkse kosten voor gas in het geval van een kleinschalige waterbuffer

Prijsevolutie scenario	2023	2024	2025+
Stabiel	€ 218 228		
Stijgend	€ 256 112	€ 325 374	€ 368 259
Dalend	€ 194 119	€ 150 043	€ 122 753

Het minimale verschil in investeringskost wordt bijgevolg in elk geval binnen de 2 jaar terugverdiend. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat deze terugverdientijd sterk afhangt van de aannames m.b.t. het efficiëntieverloop van de gasboiler. In het geval van een 82% efficiëntie bij 30% modulatie, loopt het verschil in gasverbruik terug naar een reductie van 1.1%. De terugverdientijd loopt bijgevolg op tot 2 à 3 jaar afhankelijk van het gekozen scenario voor de prijsevolutie (3 jaar voor dalende energieprijzen).

3.5.1.5 Grootschalige waterbuffer

Verdere combinaties van gasboiler en wateropslag warden ook onderzocht. Door de specifieke duurcurve, dienen echter grotere opslagsystemen te worden gebruikt bij kleiner

gedimensioneerde warmteproductie-eenheden. In het geval van een 400 kW gasboiler, dient een opslagvat van 100 m³ geïnstalleerd te worden om de jaarlijkse vraag te kunnen dekken. Aangezien er meer verliezen gedekt moeten worden, is het voordeel in gasverbruik lager dan voor een kleinschalige buffer: 133 010 m³ gasverbruik betekent een winst van 2% in vergelijking met het referentiescenario.

De investeringskost van een buffer van 100 m³ wordt geschat op € 80 000. Dit, in combinatie met een investeringskost voor de gasboiler van € 18 000, resulteert in een meerprijs van € 63 000 die terugverdiend dient te worden.

Tabel 7: Case Studie 1: jaarlijkse kosten voor gas in het geval van een grootschalige waterbuffer

Prijsevolutie scenario	2023	2024	2025+
Stabiel	€ 218 349		
Stijgend	€ 256 344	€ 325 645	€ 368 464
Dalend	€ 194 171	€ 150 070	€ 122 821

Vanaf 2025 bedraagt de jaarlijkse winst door efficiëntere gasverbranding voor stabiele, stijgende en dalende gasprijzen respectievelijk: € 4536, € 7654 en € 2551 per jaar. De bijhorende terugverdientijden bedragen 13.9, 9 en 23.9 jaar voor deze scenario's.

3.5.1.6 PCM buffer

Een latente warmteopslag voorzien van een PCM met een transitietemperatuur tussen 80 en 90 °C, kan in principe gebruikt worden in deze case. Aangezien de meeste gasboilers warmte kunnen leveren op een temperatuur van 90 °C, kan de latente warmtebuffer geladen worden d.m.v. een gasboiler. Bij het ontladen dient warmte van 80 °C geleverd te worden voor de hoge temperatuurkring. Zoals vermeld onder sectie 3.5.1.2, kan het opslagsysteem in verschillende configuraties ingebed worden. In de huidige studie bekijken we enkel de inbedding waarbij de buffer vraag en aanbod balanceert, zoals besproken in secties 3.5.1.4 en 3.5.1.5. Hierbij dient opgemerkt te worden dat een PCM-buffer meer geschikt is voor toepassingen waarbij het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur beperkt is. Het gebruik van een PCM-buffer in hetzij de hoge of lage temperatuurkring, zal bijgevolg een meer rendabele toepassing zijn.

Een mogelijk geschikte kandidaat is RubiTherm⁵ RT 90 HC, met een smeltwarmte van 170 kJ/kg [23]. Buiten dit smeltbereik bedraagt de voelbare warmte 2 kJ/kgC. Op basis van de beschikbare informatie is circa 8 700 kg aan PCM nodig om een 10 m³ waterbuffer te vervangen. De prijs van RubiTherm PCM producten varieert tussen \$ 6 en \$ 11 per kg. De investeringskost voor het PCM-materiaal op zich bedraagt bijgevolg \$ 52 000 tot \$ 95 000. Hiernaast is er nog de kost voor het opslagsysteem en warmtewisselaar, welke ook geschat worden op \$ 50 000. De totale prijs van het opslagsysteem⁶ wordt daarom geraamd op € 100 000 tot € 150 000, of ongeveer € 250 per kWh.

⁵ De faseovergang van deze PCM bedraagt 90-92 °C welke zich situeert rond de maximale aanvoertemperatuur van de meeste gasboilers waardoor dit PCM wellicht niet volledig benut kan worden.

⁶ \$ 1 wordt gelijk gesteld aan € 1.

Dezelfde resultaten qua besparing op de gasfactuur zoals gepresenteerd in sectie 3.5.1.4 worden aangenomen. Op basis hiervan bedraagt de terugverdientijd voor stabiele, stijgende en dalende gasprijzen respectievelijk 18.2-29.0, 11.2-15.6 en 31.6-50.7 jaar, waarbij de ondergrens in terugverdientijd correspondeert met een PCM materiaalkost van € 6 per kg. De bovengrens wordt bereikt als de materiaalkost \$ 11 per kg bedraagt.

3.5.1.7 Overige technologieën

Gelet op de temperatuurniveaus waarop warmte nodig is in de huidige case studie, is de toepassing van overige technologie niet aan de orde. Deze systemen richten zich op opslag bij hogere temperatuur, met uitzondering van ATES en BTES.

4 OPSLAGSYSTEMEN VOOR ELEKTRISCHE ENERGIE

4.1 Uitgangspunt

De evaluatiecriteria uit hoofdstuk 2 worden toegepast op technologie met betrekking tot opslag van elektrische energie. De technologieën zijn opgedeeld worden op basis van de aansluitkarakteristieken en het opslagproces. Dit zijn onafhankelijke eigenschappen van elkaar.

1. Opslagsystemen van elektrische energie
 - a. Koppeling met decentrale energie-opwekking
 - b. Indeling naar losstaande inverter of geïntegreerd
 - c. Indeling topologieën (AC-gekoppeld, DC-gekoppeld of beide)
 - d. Indeling naar aanwezigheid noodstroom en UPS
 - e. Aanwezigheid actieve vraagsturing (relaisuitgangen, ondersteuning slimmenetwerkprotocollen)
 - f. Reactiesnelheid op vraagverandering

2. Interne opslag
 - a. Batterijen op omgevingstemperatuur
 - i. Lithium-ion
 - ii. Nikkelmetaalhydride
 - iii. Loodzuur
 - iv. Lithium-zwavel
 - v. Nikkel-ijzer
 - vi. Natrium-ion
 - b. Hogetemperatuurbatterijen
 - i. Natriumnikkelchloride
 - ii. Natrium-zwavel
 - c. Ultracapaciteiten (elektrochemische dubbelaagcapaciteiten)
 - i. Gewone
 - ii. Hybride Li-ioncapaciteiten
 - d. Vliegwielen
 - e. In ontwikkeling zijnde batterijtechnologieën

3. Externe opslag
 - a. Redoxflow
 - i. Vanadium
 - ii. Nikkel-bromide
 - iii. Waterstof-bromide
 - b. Waterstof
 - i. Geïntegreerd systeem van elektrolyse en brandstofcel
 - ii. Elektrolyse, brandstofcel en opslag als aparte componenten
 - c. Andere vormen
 - i. Gecomprimeerde lucht
 - ii. 'vloeibare lucht'
 - d. In ontwikkeling zijnde technologieën met externe opslag

4.2 Opslagssystemen van elektrische energie

Het belangrijkste element bij opslag van elektriciteit is de omvormer. Deze bepaalt de interactie met de apparaten en het elektriciteitsnet. Het opslagmedium zelf is pas van secundair belang. Deze bepaalt het rendement en de verhouding tussen vermogen en opslagcapaciteit en heeft een belangrijk aandeel in de kosten van het opslagsysteem. Echter of een opslagsysteem bruikbaar is, wordt ten eerste door de omvormer bepaald.

4.2.1 Spanningsvorm en topologie

De opslagzijde van de elektrische energie geeft meestal gelijkspanning (DC) af. Voor elektrochemische opslag kan dit niet anders. Bij mechanische vormen zoals vliegwielen worden normaliter ook DC-motoren gebruikt wegens hun uitstekende rendement.

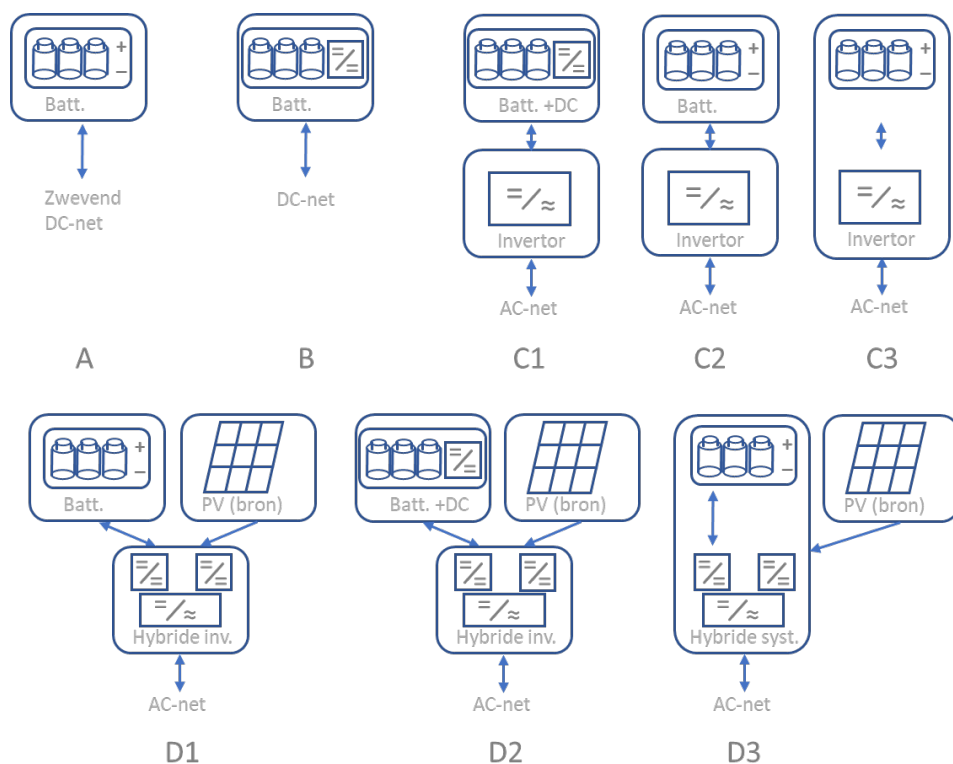
Aan de toepassingszijde zijn er meerdere mogelijkheden en de combinatie. Het reguliere elektriciteitsnet werkt met wisselspanning (AC) op 50 Hz. Veelal zal een opslagsysteem hieraan zijn energie afgeven en waarschijnlijk ook opnemen. Echter in de industrie is ook gelijkspanning aanwezig. Dit kan enerzijds verbruikers betreffen zoals een data-centrum met rekenservers die DC gevoed worden en anderzijds energie-opwekkers zoals een PV-installatie die DC-spanning afgeeft. Op deze wijze zijn vele combinaties mogelijk die al dan niet in één of meerdere omvormers worden opgenomen. Dat wordt hier besproken.

In Figuur 9 staan de mogelijke topologieën uitgewerkt en varianten erop. In A is een batterij aangeduid zonder omvormer. Doordat de batterijspanning afhankelijk is van de laadtoestand en de stroomsterkte, is de spanning niet constant ofwel zwevend genaamd. Gekoppelde toestellen zoals een elektromotor moeten een breed ingangsspanningsbereik aankunnen. Bronnen zoals een PV-installatie kunnen alleen aankoppelen als die een eigen DC-DC-omvormer bezitten. Een klassiek voorbeeld is een 12 V loodzuurbatterij dat een klein elektriciteitsnetwerk vormt zoals in personenwagens en in Afrikaanse woningen.

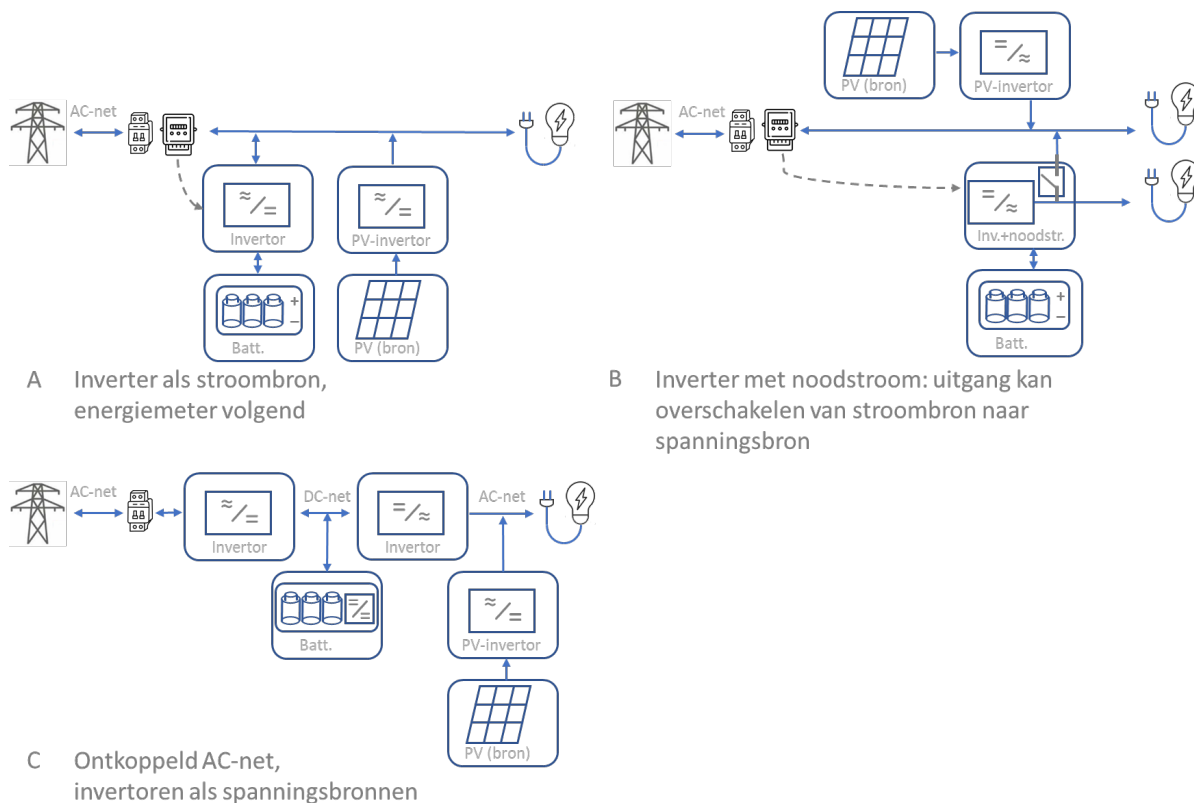
In situatie B is er een DC-DC-omvormer in de elektrische opslag opgenomen. Dit is veelvuldig het geval. Het maakt het mogelijk batterijmodules in parallel te schakelen die hun eigen ladingstoestand en dus interne spanning kunnen hebben. Het koppelen van apparaten is makkelijker doordat er een vaste of weinig variërende DC-spanning is in het elektriciteitsnet.

In situatie C wordt de energie omgezet via een inverter naar een AC-net. Doordat de meeste netten AC-netten zijn, is dit de meest normale opstelling. Er zijn drie varianten, namelijk koppeling met pure opslag (zonder interne omvormer, koppeling met een opslagsysteem met interne omvormer, en een geïntegreerd systeem waarbij alle componenten zich in één installatie bevinden. Eventuele koppeling met bronnen zoals PV-panelen of windturbine vindt plaats via het AC-net.

In situatie D geschiedt de koppeling met bronnen zoals een PV-installatie via een DC-ingang. Doordat er zowel DC-ingangen zijn als een AC-koppeling, is er sprake van een hybride omvormer. Hier zijn dezelfde varianten mogelijk als in de vorige topologie. In situaties waar eigenverbruik van hernieuwbare energie van eerste belang is, is dit een veelvoorkomende topologie.



Figuur 9: Vier soorten opslagtopologieën en varianten (bron: VITO)



Figuur 10: Mogelijke manieren van netkoppeling (bron: VITO)

4.2.2 Koppeling in een AC-net

Ondanks dat in de vorige sectie de koppeling met een AC-net eenduidig leek, is dit niet het geval. Er zijn verschillende mogelijkheden die toepassingen mogelijk maken maar ook uitsluiten. Ze zijn allen evenwaardig en in synergie met de aanwending. Deze opties zijn schematisch weergegeven in Figuur 10. Een technisch onderscheid is of de inverter als stroombron of als spanningsbron optreedt. In het eerste geval moet er een netspanning aanwezig zijn, in het tweede geval creëert de inverter zelf een AC-net.

De eerste wijze, Figuur 10.A, is normaal in het geval van optimalisatie van eigenverbruik. Dit is daarom de gebruikelijke opzet voor thuisbatterijen. Het woningverbruik wordt bij de netkoppeling gemeten. De batterij-inverter probeert dit naar nul te sturen. Deze sturing ijlt 5 tot 20 s na op de verandering van het gebruik. Omdat er al een elektriciteitsnet is en de batterij-inverter alleen stroom moet injecteren is het een stroombron (net zoals de PV-inverter ook altijd een stroombron is). Als het elektriciteitsnet uitvalt, dan vallen beide invertoren uit. In plaats van de batterij-inverter en de PV-inverter die in Figuur 10.A beiden direct met het AC-net gekoppeld zijn, kunnen ook hybride invertoren gebruikt worden zoals in Figuur 9 D uitgebeeld waren.

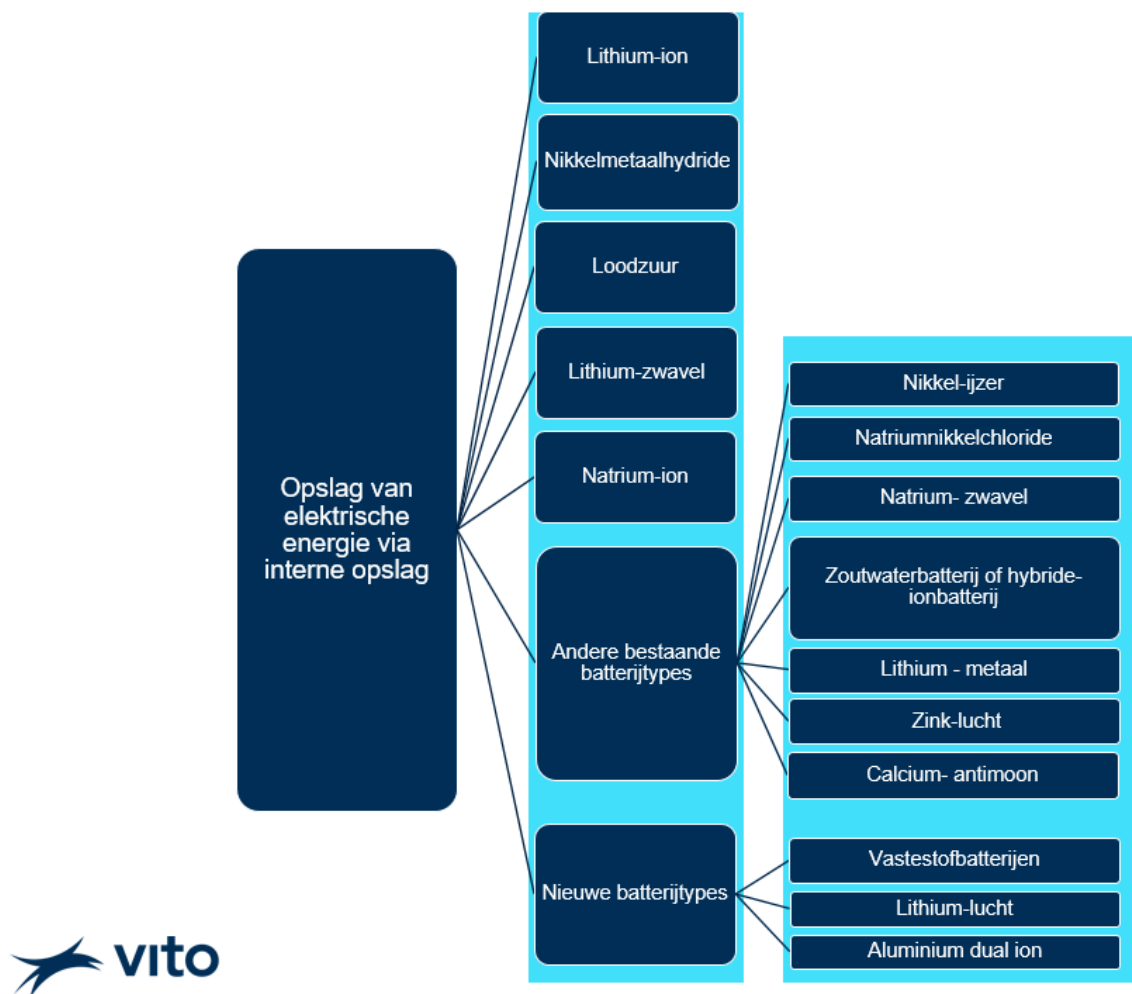
Als men zich wil beschermen tegen de gevolgen van een netuitval dan is noodstroom nodig, wat situatie B en C geeft in Figuur 10. De inverter moet dan (ook) als spanningsbron optreden om een elektriciteitsnet op te zetten. In situatie B koppelt de batterij-inverter zich los van de binnenhuisinstallatie via een relais van zodra het elektriciteitsnet uitvalt. De batterij-inverter schakelt om van stroombron naar spanningsbron. De groepen die aan de noodstroomuitgang verbonden zijn worden nu opnieuw van energie voorzien. Indien de omschakeling binnen 100 ms (5 stroomomwentelingen) plaats kan vinden, dan heet dit Uninterrupted Power Supply (UPS). Dan passeert de omschakeling zowat onopgemerkt. In situatie B werkt de PV-installatie niet tijdens het leveren van noodstroom, want die is aangesloten op de normale elektriciteitsvoorziening.

Situatie C heeft als voordeel dat de PV-installatie altijd kan werken. Door de PV-installatie kan het vermogen in het lokale netwerk groter zijn dan de zekering met het distributienet toelaat. Dit is geen probleem zolang het verbruik maar kleiner is dan de netkoppeling toelaat. Door de injectie van PV-vermogen daalt het verbruik aan de netkoppeling. Er kan echter ook geanticipeerd worden op de mogelijkheid een groter verbruik toe te laten door bijvoorbeeld meer elektrische auto's te laden dan de netkoppeling toelaat. Als de zonnesterkte dan vermindert, al is het maar een fractie van een seconde, schakelt de hoofdzekering uit wegens overbelasting. Een batterij die is gekoppeld zoals in situatie A zal met een vertraging van 5 à 20 s niet op tijd kunnen reageren om de overbelasting tegen te gaan. Om dit toch te voorkomen moet het distributienet van het lokale net worden gescheiden via een tussenliggende DC-bus. Een batterij die aan de DC-bus verbonden is kan het gebrek aan benodigd vermogen opvangen. Deze volgt niet op langzame wijze de verbruiksmeter bij de netkoppeling maar de actuele spanning van de DC-bus. Indien nodig springt de batterij onmiddellijk bij. Dit is situatie C. In deze opstelling zijn er dus twee invertoren nodig om de tussenliggende DC-bus te creëren. Om in te spelen op de beperkte capaciteit van batterijen is het belangrijk ook actieve vraagsturing toe te voegen. Hierdoor kan het aantal wagens dat laadt worden verminderd. Actieve vraagsturing is een langzaam proces. Voor laadpalen duurt dit 10 tot 30 s. Vraagsturing is dus geen oplossing om plotselinge dips in PV-activiteit op te vangen. Het kan wel snel via relaisuitgangen. Voor elektrisch gevoede warmwaterbuffers is dit een mogelijkheid. Voor de meeste processen is zo'n brute ingreep ongewenst.

In de beschreven situaties van deze sectie 4.2 is de batterij ongedefinieerd. Het is een generieke opslag en hoeft niet per se een batterij (met interne opslag) te zijn maar kan ook een redox flow batterij betreffen of ultracapaciteiten. De topologieën zijn niet afhankelijk van het batterijtype. De topologieën zijn juist wel van belang hoe de opslag ingezet kan worden.

4.3 Opslag van elektrische energie via interne opslag

In deze sectie worden de verschillende soorten van interne elektrische energieopslag zelf besproken, zoals samengevat in Figuur 11.



Figuur 11 Overzicht van de soorten van interne elektrische energieopslag (bron: VITO)

4.3.1 Lithium-ion

Lithium-ion- of Li-ionbatterijen zijn een vrij recente uitvinding. Hun impact is dermate hoog dat in 2019 de nobelprijs is toegekend aan John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham en Akira Yoshino omdat ze de herlaadbare wereld hebben gecreëerd, aldus het Nobelcomité. Het is het enige batterijtype waarvoor een nobelprijs is uitgereikt. Dit batterijtype is gebaseerd op lithiumionen die 'glijden' vanuit grafiet naar positieve elektrode en daar 'al glijdend' worden opgenomen in het kristalrooster. Dit wordt intercalatie genoemd. Er vinden geen chemische omzettingen plaats anders dan opname in kristalroosters. Doordat het een eenvoudig mechanisme is, kan dit vaak herhaald worden zonder veel storende zijreacties en zijn grote stroomsterktes mogelijk per volume batterijmateriaal. Daarnaast is de troef van dit batterijtype de uitzonderlijk hoge batterijspanning van 3 tot 4 V. Ondanks dat er batterijtypes zijn met dezelfde hoge ladingsdichtheid, wint de Li-ionbatterij meestal in energiedichtheid door die bijzondere spanning.

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : Breed, wereldwijd met productie in Azië (Japan, Korea, China) , VS (Tesla) , Europa (NorthVolt in Zweden, Leclanché in Duitsland, Tesla in Duitsland) [1] . Veruit de meeste batterijen worden momenteel (nog) in Azië geproduceerd.
- **Toepasbaarheid** : universeel: in smartphones, elektrisch gereedschap, elektrische auto's en stationaire batterijen [24] ruimtevoertuigen, laptops [25] en medische implantaten. Er lijkt geen beperking in toepassingsgebied. De batterijen zijn wel gevoelig aan temperatuur en juiste spanningsvenster. Er is daardoor altijd bewakingselektronica nodig (battery management system) en vaak temperatuurregeling in het geval van industriële en voertuigtoepassingen.
- **Ontwikkelingsstatus**: Ontwikkelingen op celniveau (Samsung, Panasonic, LG Electronics), thermisch beheer en integratiegerelateerde technologieën (batterijpakketten) (Bosch, Toyota, Foxconn), cell manufacturing (Samsung, Panasonic, LG Electronics, Toyota) [24]. Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 9 de ontwikkelingstatus van Lithium-ion batterijen. Op celniveau neemt de energiedichtheid nog steeds toe door andere materialen – momenteel met name door veranderingen aan de negatieve elektrode met behulp van silicium–, door een grotere dichtheid aan actief materiaal en door grotere cellen. Grotere cellen laten compactere batterijmodules toe. De manieren van warmteoverdracht in modules worden ook steeds verfijnder om de batterijen in het juiste temperatuurbereik te houden met weinig onderlinge verschillen.
- **Mate van genericiteit** : Li-ionbatterijen zijn algemeen inzetbaar, zoals genoemd onder 'toepasbaarheid'. Er hoeft weinig op maat gemaakte randapparatuur bij. Er moet wel randapparatuur bij zoals elektrische omvormer, temperatuurconditionering, brandbeveiliging en behuizing maar dat betreft standaardproducten in de handel. Er is veel keus aan batterijen en randapparatuur wat generieke inzet mogelijk maakt. Het gamma neemt bovendien met rasse schreden toe. Tevens is er nauwelijks onderhoud aan de batterijsystemen.
- **Efficiëntie** : 90 % op vanuit de celchemie beschouwd [26] [27]. De batterijmodules zelf leiden tot weinig verlies. De randapparatuur daarentegen zorgen voor verliezen, zoals de onvertoren en de temperatuurregeling. Voor stationaire toepassingen ligt het systeemrendement uiteindelijk tussen 20 en 70%. [28]

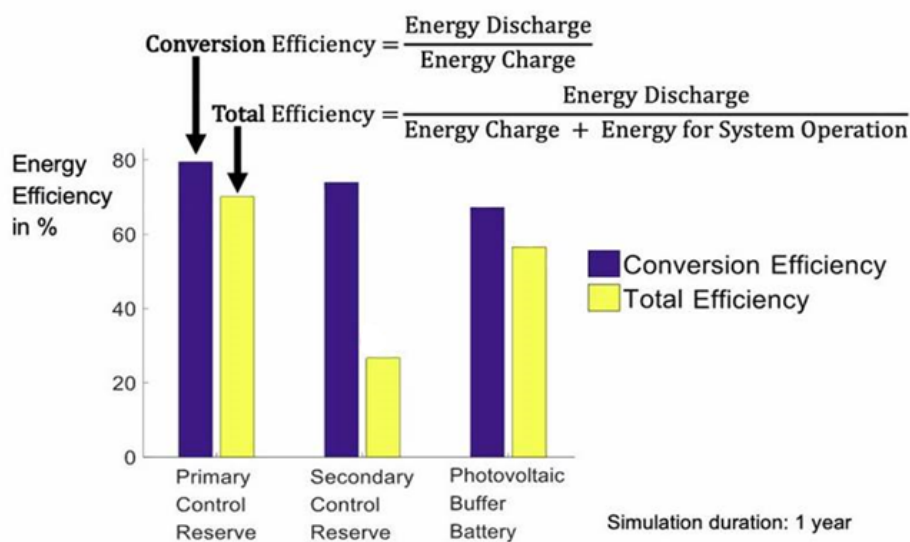
- **Innovativiteit** : Hoog. De elektrificatie in de transportsector bijvoorbeeld is vooral afhankelijk van voortdurende innovatie in batterijtechnologie. Er bestaan verschillende types positieve elektroden (NMC, LFP, LCO,..), negatieve elektroden (grafiet, silicium,..), separators, elektrolyten (vloeistof, polymeer, solid state).... Ontwikkelingen zijn onder andere gericht op celniveau om de capaciteit te verbeteren en materiaalkost en produktiekost te verlagen (Samsung, Panasonic, LG Electronics). De batterijpakketten worden ook steeds performanter met dezelfde verbeteringen, terwijl ook het thermisch beheer verbetert wordt, wat nog betere prestaties geeft en een langere levensduur (Bosch, Toyota, Foxconn). [24]. In Europa worden veel zogenaamde giga factories gebouwd voor batterijen.
 - **Leveranciers** : De markt voor batterijen en onder andere Li-ion batterijen groeit nog steeds [24], met meer dan honderd batterijfabrikanten. CATL, Samsung, Panasonic, BYD, Toshiba, LG Electronics, Saft, Leclanché, NorthVolt, ...
- **Economisch**
- **Investeringskost** : Gemiddeld [25]. Voortdurende vooruitgang is nodig om de kosten te verlagen en de prestaties van batterijen op zowel cel- als batterijniveau te verbeteren. De eenheidskosten van batterijen voor elektrische voertuigen zijn sinds 2010 al met 85% gedaald, waarbij marktonderzoeken vanaf 2019 een verkoopgewogen gemiddelde kostprijs van USD 156/kWh laten zien. [24] Voor andere toepassingen blijkt de prijs veelvoud hiervan te zijn. Dit hangt sterk samen met schaalgrootte en de hoeveelheid geïntegreerde randapparatuur.
 - **Operationele kost** : vereiste onderhoud is matig [25]
 - **Terugverdiëntijd** : de geschatte levensduur is lang [25] (afhankelijk van het gebruik en de omgevingsomstandigheden)
- **Ecologisch**
- **Duurzaamheid materialen** : beperkte bronnen van materialen zoals lithium en kobalt. Recycleerbaar [29] [24]. Recyclagefaciliteiten nemen toe. De Europese wetgeving gaat veel strenger worden rond recyclage. [30]



Figuur 12: Verschillende vormen van Li-ioncellen. Het is duidelijk dat er op celniveau een grote variatie is aan vorm en grootte. Bron: VITO.



Application evaluation: Energy Efficiency



Michael Schimpe

11

Figuur 13 Beoordeling van rendementen in opslagtoepassingen voor het elektriciteitsnet. Het is duidelijk dat niet alleen het batterijrendement (conversierendement) maar ook het systeemrendement moet worden beschouwd. [28]

4.3.2 Nikkelmetaalhydride

De doorbraak van dit type batterijen stamt uit de jaren negentig van de vorige eeuw. Toen onderzoekers in het begin aan nikkel-metaalhydridebatterijen begonnen te werken, vonden ze deze niet geschikt vanwege de instabiliteit van metaalhydride. Na de ontdekking van nieuwe hydridelegeringen die voor een betere stabiliteit zorgden, werd NiMH ontwikkeld en deze boden een aanzienlijk hogere specifieke energie dan voorheen. De nikkelmetaalhydride (NiMH)-batterij wordt beschouwd als een geavanceerde versie van de nikkel-cadmium-batterij vanwege het gebruik van waterstof in metaallegeringen in plaats van cadmium aan de negatieve elektrode. Cadmium is giftig met nefaste milieuvervuiling en diende uitgerangeerd te worden als batterijtype. De nikkel-metaalhydridebatterij is volledig afgedicht om te voorkomen dat waterstof lekt. Het verving nikkel-cadmium in de toepassing van elektrische voertuigen, vanwege de aanzienlijke verbetering van de energiedichtheid van de nikkel-metaalhydridebatterij [25] [31] [32]. Het is met name bekend als oplaadbare batterij voor consumentenelektronica met de maten 'AA' en 'AAA'. In de industrie en treinen worden grote batterijen ingezet als alternatief voor loodzuurbatterijen. De celspanning is 1,2 V.

Dit batterijtype mag overladen worden. Water in de alkalische elektrolyt wordt dan gesplitst in waterstof en zuurstof welke in de batterij weer tot water combineert. Het resultaat is dat het overladen veel warmte oplevert. De levensduur hangt af van het gebruik. Hybride voertuigen waarbij de NiMH-batterij nooit volledig vol- noch ontladen wordt, is de levensduur makkelijk twintig jaar met 100.000 cycli. In huishoudelijke toepassingen is de levensduur enkele honderden cycli en afhankelijk van het exacte type NiMH-chemie.

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : universeel.
- **Toepasbaarheid** : Vliegtuigtoepassingen, noodverlichting [25]. Sinds 1997 worden nikkel-metaalhydride (Ni-MH)-batterijen gebruikt voor hybride voertuigen. Vergeleken met loodzuurbatterijen waren Ni-MH-batterijen relatief krachtiger in termen van specifieke energie (60-120 Wh/kg) en energiedichtheid (140-300 Wh/L) [31] gecombineerd met een levenslange levensduur voor de hybride wagens. Het is het belangrijkste type oplaadbare batterij in consumentenelektronica voor huishoudens.
- **Ontwikkelingsstatus** : Hoewel zijn voordelen toen qua specifieke energie en energiedichtheid in vergelijking met loodzuurbatterijen, verloor Ni-MH ook de race met de opkomst van op Li gebaseerde batterijen [31]. Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 9 de ontwikkelingstatus van Nikkelmetaalhydride batterijen.
- **Mate van genericiteit** : Dit batterijtype wordt verkocht als cellen met een capaciteitsbereik dat meerdere ordegrottes omvat. De cellen worden eenvoudig samengevoegd tot modules. Dit maakt het een generiek product. Het wordt op dezelfde plaatsen gebruikt als loodzuurbatterijen. Er is minder randapparatuur (elektronica, temperatuurregeling) nodig dan bij Li-ionbatterijen.
- **Efficiëntie** : Nikkelmetaalhydride batterijen kunnen een efficiëntie van 70-75% [33] tot 85 % [27] [26] bereiken.
- **Innovativiteit** : Er lijkt weinig ontwikkeling meer te zijn. Hun toepassing wordt ingehaald door de Li-ionbatterij. Er is wel een concept ontwikkeld met de bipolaire batterij. Hierbij zijn de cellen dun en rechtstreeks op elkaar gestapeld.

Externe stroombruggen tussen de cellen zijn daardoor niet nodig. Nilar verkoopt de bipolaire batterijversie voor stationaire toepassingen. Dit is een uniek type en ze kunnen zelfs de afname in batterijcapaciteit meermaals ongedaan maken. Toyota gebruikt de bipolaire batterij in hun recente hybride voertuigen.

- **Leveranciers** : Panasonic, Varta, Saft, Energizer,... [34], Nilar

➤ Economisch

- **Investeringskost** : Duur [25]
- **Operationele kost** : vereiste onderhoud is laag [25]
- **Terugverdientijd** : de geschatte levensduur is langer dan die van de loodzuurbatterijen [25]

➤ Ecologisch

- **Duurzaamheid materialen** : De basismetalen zijn tin en nikkel. Vaak worden ook zeldzaam aarden zoals lanthaan toegevoegd en eventueel ook kobalt. [35] Het is milieuvriendelijk zonder giftige metalen te bevatten [25]



Figuur 14: Twee voorbeelden van moderne bipolaire NiMH-batterij: links van Nilar voor stationaire toepassingen, rechts een Toyota-batterij voor hybride voertuigen (bronnen: website Nilar en Toyota).

4.3.3 Loodzuur

De loodzuurbatterij behoort tot de oudste batterijtypes, uitgevonden door Gaston Planté. Zijn methode van elektrodeopbouw wordt nog steeds gebruikt in de duurste types. Er bestaan twee hoofdsoorten loodzuuraccu's: enerzijds natte loodzuuraccu's met vloeibaar elektrolyt, anderzijds gesloten loodzuurbatterijen met vast elektrolyt (VRLA). De laatste vergen geen onderhoud. De kwaliteit en levensduur wordt bepaald door de opbouw van de elektrodes. Er bestaan platen, staven en de zogenaamde Planté-vorm. Die laatste levert de beste batterijen op, die tot 20 jaar mee kunnen gaan. Er worden metalen toegevoegd (Sb, Ca, Ag) om de levensduur te vergroten in specifieke toepassingen. [36] Het gewicht is noodzakelijkerwijs heel hoog. Voor vele toepassingen is dit geen probleem behalve voor mobiliteitstoepassingen.

De celspanning is 2 V. Het laden en ontladen verloopt via elektrochemische reacties waarbij loodsulfaat in oplossing gaat en daarna neerslaat als lood aan de negatieve elektrode en loodoxide aan de positieve elektrode tijdens het laden. De batterij moet regelmatig volgeladen worden om een goede levensduur te behouden. In gedeeltelijk ontladen toestand

recombineert het loodsulfaat zich namelijk in grote kristallen die niet meer aan de batterijreactie meedoen. Een belangrijke veroudering van loodzuurbatterijen is corrosie van de stroomgeleiders waarin het actief materiaal zich bevindt. Hoe dikker de stroomgeleiders des te langer de levensduur. Bij starterbatterijen zijn die uitermate dun.

Dit batterijtype mag overladen worden. Water in de zure elektrolyt (zwavelzuur) wordt dan gesplitst in waterstof en zuurstof. In het geval van natte batterijen verdampt dit en moet regelmatig gedemineraliseerd water worden toegevoegd. Bij gesloten batterijen reageert de gassen weer terug tot water, waardoor geen onderhoud nodig is.

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : universeel.
- **Toepasbaarheid** : Breed, in transport zoals heftrucks, auto-industrie (starterbatterij) [31] [37], aandrijfkracht, noodstroom en opslag van zonne-energie [25]. Door het hoge gewicht zijn mobiliteitstoepassingen uitgesloten tenzij dat voor contra-gewicht kan zorgen zoals bij de vermelde heftrucks.
- **Ontwikkelingsstatus** : Loodzuur (LA) -batterij werd in 1859 uitgevonden door Gaston Planté en Camille Alphonse Faure heeft in 1881 de capaciteit en productieprocessen van loodzuuraccu's gewijzigd. Loodzuurbatterijen blijven de meest populaire oplaadbare batterij ter wereld die vooral in de auto-industrie commercieel worden gebruikt [31] [37]. Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 9 de ontwikkelingstatus van Loodzuur batterijen.
- **Mate van genericiteit** : Dit batterijtype wordt verkocht als cellen met grote capaciteiten voor industriële toepassingen. De cellen worden eenvoudig samengevoegd tot grote batterijen. Voor alle mobiliteitstoepassingen en noodstroomvoorzieningen worden modules van 12 en 24 V gemaakt. Er is een grote verscheidenheid aan modulevormen en -capaciteiten. Dit maakt het een generiek product. Er is minder randapparatuur (elektronica, temperatuurregeling) nodig dan bij Li-ionbatterijen.
- **Efficiëntie** : In het algemeen heeft deze batterij een hoge efficiëntie (80-90%) [38] / 85 % [27] en hoge betrouwbaarheid. Natte batterijen hebben een lager rendement omdat ze regelmatig overladen moeten worden om de levensduur te verbeteren.
- **Innovativiteit** : de loodzuurbatterij was de eerste oplaadbare batterij die commercieel toegankelijk was. [39] Er zijn maar beperkte ontwikkelingen. De opvallendste is de lood-grafietbatterij, waarbij de negatieve elktrode door grafiet is vervangen. Dit type kan beter tegen misbruik en heeft een groter temperatuurbereik.
- **Leveranciers** : Hoppecke, GS Yuasa, Exide, EnerSys [40], Leadcrystal (lood-grafiet).

➤ Economisch

- **Investeringskost** : Goedkoop [25] tot duur, evenredig met de levensduur.
- **Operationele kost** : vereiste onderhoud is hoog in geval van natte batterijen [25] en laag bij gesloten batterijen.
- **Terugverdiëntijd** : de geschatte levensduur is kort [25] tot lang, maar dat vermindert de terugverdiëntijd maar nauwelijks door de toenemende kost.

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen** : bevat onder andere lood als giftig, milieuvervuilend materiaal. De batterijen zijn uitstekend te recycleren.



Figuur 15: Voorbeelden van een loodzuurbatterijlokaal voor het leveren van noodstroom (bron: serverroomenvironments.co.uk)

4.3.4 Lithium-zwavel

Lithium-zwavel is een nieuw batterijtype. Het is nog nauwelijks in de handel. Het heeft twee beloftes: een veel grotere energiedichtheid dan Li-ion en het gebruik van zwavel, wat algemeen beschikbaar is in tegenstelling tot bijvoorbeeld kobalt in Li-ion. De celspanning is ongeveer 2 V.

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid** : Beperkt
- **Toepasbaarheid** : Beperkt, b.v. voor drones [41]. Ondertussen blijkt de technologie de moeite waard te zijn in toepassingen waar volume niet zo kritisch is als massa. Lithium-zwavelcellen worden al gebruikt in apparaten die lichtgewicht batterijen nodig hebben en lange tijd op één lading kunnen werken, zoals drones of satellieten. [41]
- **Ontwikkelingsstatus** : Met de toegenomen acceptatie van elektrische voertuigen wereldwijd en recente ontwikkelingen in de internationale politiek, zijn de prijzen van kathode-grondstoffen voor lithium-ionbatterijen, zoals nikkel en kobalt, blijven stijgen. Deze hoge grondstofprijzen dreigen de implementatie van schonere energiestrategieën te ontsporen of te vertragen. Met het oog hierop wordt er actief onderzoek gedaan naar en ontwikkeling naar de commercialisering van lithium-zwavelbatterijen, die geen zeldzame metalen als

actief materiaal voor de kathode gebruiken en een hoge energiedichtheid hebben; bovendien zijn lithium en zwavel van nature overvloedig aanwezig. [42]

Het oplossen van intermediaire polysulfiden in de elektrolyt, wat een fataal nadeel is van lithium-zwavelbatterijen, is opgelost met behulp van verschillende methoden, zoals composieten met koolstofmaterialen, polymeercoating en gel / polymeerelektrolyten. [42]. Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft een TRL tussen 4 en 7 de ontwikkelingstatus van Lithium-zwavel batterijen. De levensduur ligt momenteel op honderd cycli.

- **Mate van genericiteit** : De genericiteit is slecht doordat lithiumzwavelbatterijen nauwelijks beschikbaar zijn. Ook is de levensduur sterk beperkt, wat veel toepassingen uitsluit. Er is nog geen randapparatuur beschikbaar om een batterijsysteem te maken.
- **Efficiëntie** : Zwavel (als positieve elektrode materiaal) is in al zijn vormen slecht geleidend en daardoor wordt de stroom van elektronen in de kathode belemmerd. De geleidbaarheidsbeperking van zwavel houdt de reactiesnelheid laag, wat resulteert in minder efficiënte en langzamere ladingen en ontladingen. Omdat het tijdens zijn cyclus door een opgeloste toestand gaat, deconstrueert en reconstrueert de elektrode zichzelf gedeeltelijk na elke laad-/ontlaadcyclus. Bovendien zal de kathode uitzetten en krimpen naarmate deze leeg raakt en weer wordt opgeladen. Bijgevolg de oorspronkelijke structuur erodeert, barst. Dat leidt tot een versnelde achteruitgang van de batterijprestaties, wat betekent dat deze een kortere levensduur heeft. [43]
- **Innovativiteit** : Hoog. Lithium-zwavel (Li-S) -batterijen bestaan sinds de jaren zestig, maar de technologie is op grote schaal moeilijk te produceren gebleken vanwege de veiligheidsproblemen van de batterij en de korte levensduur [44]. De belangrijkste attractie is dat ze veel meer energie kunnen opslaan dan een vergelijkbare batterij met behulp van de huidige lithium-ion (Li-ion) -technologie. Dat betekent dat ze aanzienlijk langer kunnen meegaan op een enkele lading. [41] Verder, All-solid-state lithium-zwavelbatterijen die verbeterde veiligheid en energiedichtheid bieden, kunnen naar verwachting futuristische batterijen zijn. [42]
- **Leveranciers** : geen, onderzoeksfase. De volgende bedrijven zijn wel actief op prototype niveau: OXIS Energy (overgenomen door Johnson Matthey), Morrow Batteries, Li-S Energy, NexTech Batteries, LG Chem [45]

➤ Economisch

- **Investeringskost** : Geen info
- **Operationele kost** : Geen info
- **Terugverdientijd** : Geen info

➤ Ecologisch

- **Duurzaamheid materialen** : Lithium is beperkt voorhanden terwijl zwavel zeer wijdverspreid is. Over benodigde extra stoffen om een werkende batterij te krijgen is weinig bekend.



Figuur 16: Voorbeeld van lithium-zwavelbatterij van Oxis (bron: Oxis Energy)

4.3.5 Natrium-ion

De natrium-ion of Na-ionbatterij is op hetzelfde moment uitgevonden als de Li-ionbatterij. Het wordt ook wel aangeduid als SIB van sodium ion battery. De spanning was een beetje lager en er werd geen geschikt anodemateriaal gevonden, waardoor dit batterijtype in de vergetelheid raakte. Dankzij het gebruik van harde kool is er nu wel een bruikbare negatieve elektrode en zijn er met vanadiumgebaseerde oxides celspanningen mogelijk zoals bij Li-ion. Het batterijtype staat daardoor in de belangstelling van batterijfabrikanten. Het biedt een mogelijkheid om andere, algemener voorkomende materialen te gebruiken dan voor Li-ion. [46]

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : Beperkt. Fabrieken wel in aanbouw.
- **Toepasbaarheid** : Ruim. Dit batterijtype kan de Li-ionbatterij 1 op 1 vervangen. Door de lagere energiedichtheid (natrium weegt meer dan lithium en harde kool meer dan grafiet) is het minder logisch voor elektrische personenwagens.
- **Ontwikkelingsstatus** : Natrium-ionbatterijen worden beschouwd als een aantrekkelijk alternatief voor lithiumionbatterijen vanwege vergelijkbare prestatiekenmerken en uitgebreide beschikbaarheid van natrium en andere benodigde materialen tegen aanzienlijk lagere kosten [47]. Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 6 de ontwikkelingstatus van Natrium-batterijen.
- **Mate van genericiteit** : Er bestaan verschillende types positieve elektrode materialen (NVPF polyanionic, NVPF layered oxide ...) en negatieve elektrodemateriaal (Hard Carbon vervaardigd uit biomassa) [48] [47]
- **Efficiëntie** : De ontwikkeling van batterijtechnologie voor SIB's opmerkelijk snel gegaan vanwege de gelijkenis met LIB's. SIB's lijden echter aan inferieure cyclusbaarheid, slechte vermogenscapaciteit en lagere energiedichtheid, wat de maatstaf is voor wijdverbreide commercialisering die verder onderzoek noodzakelijk maakt. De afgelopen twee decennia zijn enorme inspanningen geleverd om hun prestaties te verbeteren door nieuwe materialen (elektrode/elektrolyt) te introduceren en hun samenstelling te optimaliseren. [47]
- **Innovativiteit** : Hoog.
- **Leveranciers** : CATL, Faradion, Natron Energy, HiNa Battery, Ronbay Technology, Zoolnash, Natrium, Kishida Chemical, Panasonic, Mitsubishi Chemical [49], Tiamat.

➤ **Economisch**

- **Investeringskost** : de investeringskost voor natriumioncellen zijn ten hoogste van 223.4 €/kWh [50]. Dit zegt weinig over de kosten van batterijmodules. Die zijn momenteel nog niet in de vrije handel.
- **Operationele kost** : Geen onderhoudskosten aan de batterijen, waarschijnlijk wel aan randapparatuur voor elektronica en temperatuurbewaking.
- **Terugverdiëntijd** : Geen info.

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen** : Er worden algemener voorkomende materialen gebruikt dan in Li-ionbatterijen. De recycleerbaarheid zal waarschijnlijk gelijkaardig zijn en daarmee goed. De productie van harde kool uit biomassa gaat gepaard met veel energie terwijl grafiet een delfstof is. Dat maakt de LCA slechter van Na-ion ten opzichte van Li-ion. [51]



Figuur 17: Voorbeeld van Na-ion-batterij van Faradion (bron: Faradion)

4.3.6 Andere bestaande batterijtypes

4.3.6.1 Nikkelijzer

De nikkelijzerbatterij is nog ouder dan de loodzuurbatterij en uitgevonden door Edison. Het batterijtype wordt nog altijd verkocht, ook in België. Het marktaandeel is echter miniem en er zijn slechts enkele fabrikanten. De levensduur is lang (boven 20 jaar) maar het rendement is laag (70%). Het wordt alleen in industriële, stationaire toepassing gebruikt. Er is geen innovativiteit te herkennen.

TRL: 9



Figuur 18: Voorbeeld van nikkel-ijzerbatterij (bron: google)

4.3.6.2 Natriumnikkelchloride (Zebra)

De natriumnikkelchloridebatterij is een hoge-temperatuurbatterij, die werkt op 300°C. Oorspronkelijk is die ontwikkeld onder de naam Zebra. De energiedichtheid is hetzelfde als Li-ionbatterijen van het ijzerfosfaattype. In de jaren negentig van de vorige eeuw is het kortstondig ingezet als EV-batterij in proefprojecten. Ondanks goede eigenschappen [51] lijkt dit type het toch af te leggen van Li-ionbatterijen. Zijn technisch nadeel is een continue behoefte aan energie om warm te blijven, hoewel dit de batterijprestaties ook onafhankelijk maakt van de omgevingstemperatuur. Er lijken maar twee fabrikanten te zijn met een beperkte productie: FZSonick en Chilwee

TRL: 9



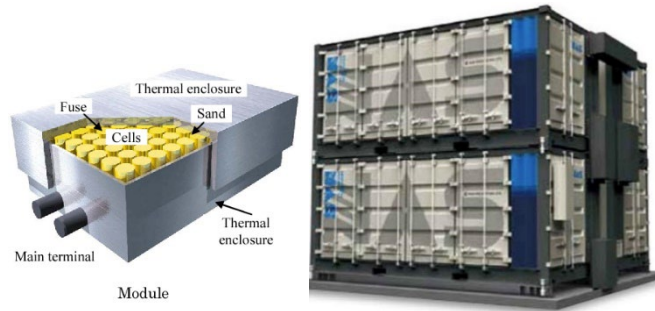
Figuur 19: De natriumnikkelchloridebatterij van FZSonick (bron: FZSonick)

4.3.6.3 Natriumzwavel (NaS)

De natriumzwavelbatterij is ook een hoge-temperatuurbatterij, die eveneens werkt op 300°C. De samenstelling is heel eenvoudig met zuivere natrium en zwavel. Desondanks was het moeilijk om een geschikte en veilige separator tussen beide materialen te vinden. Alleen het Japanse NGK is hierin geslaagd. Ze maken grote batterijsystemen ermee van 500 kWh en meer. De toepassing is in de industrie als stabiele elektriciteitsvoorziening. Ondanks dat het een nichebatterij is, gaat het goed met de productie en is dit type zeker niet verdrongen. Ondanks de hoge temperatuur is er geen energie nodig om de batterij op temperatuur te

houden als die maar dagelijks een laad/ontlaad-cyclus uitvoert. Volgens de fabrikant NGK gaat de batterij 15 jaar mee of 4500 cycli.

TRL: 9



Figuur 20: De natriumzwavelbatterij van NGK (bron: NGK)

4.3.6.4 Zoutwaterbatterij of hybride-ionbatterij

De zoutwaterbatterij of hybride-ionbatterij werkt op basis van Li-ionen en Na-ionen in een watergebaseerde elektrolyt. Het werd verkocht onder de naam Greenrock of Aquion. De enige fabrikant (BlueSky Energy) is in 2022 failliet gegaan. De energiedichtheid is laag: enkele malen lager dan Li-ion. De capaciteit is sterk afhankelijk van de stroomsterkte en daarmee alleen geschikt voor dagelijkse ladingen. De batterij werd alleen in stationaire toepassing gebruikt. Het heeft kortstondig de cradle-to-cradle-certificering gehad. De gebruikte stoffen zijn dus milieuvriendelijk en volledig her te gebruiken.

TRL: 9



Figuur 21: Zoutwaterbatterij (bron: Aquion, enkele jaren geleden)

4.3.6.5 Lithium-metaal

Er is één fabrikant dat in meerdere fabrieken al jaren lithiummetaalbatterijen maakt, aangeduid met LMP, namelijk Blue Solutions, onderdeel van Bolloré Groupe. Om goed te werken wordt de batterij continu op 60°C gehouden. Het is een vaste stof-technologie. De batterijen worden in mobiliteitstoepassingen gebruikt zoals elektrische personenwagens, bussen en boten. Er vindt veel onderzoek plaats om voorop te blijven in de solidstatebatterijtechnologie.

TRL: 9



Figuur 22: Batterijmodules van Blue Solutions (bron: Blue Solutions)

4.3.6.6 Zink-lucht

Klassiek is de zink-lucht batterij een primaire batterij en uitgevonden door Leclanché. Het heeft de hoogste energiedichtheid van alle soorten en wordt daarom gebruikt in gehoorapparaten maar ook in torpedo's (Varta, Saft, Phinenergy). Er wordt al decennia lang gewerkt aan een herlaadbare versie. De belofte van hoge energiedichtheid gecombineerd met veelvoorkomend materiaal doet hopen. Er is één fabrikant die batterijsystemen levert en dat voor stationaire toepassingen: Eos Energy Enterprises. Engie heeft hiervan in 2017 een batterij geplaatst in Brazilië. De fabrikant noemt zijn batterij Znyth en belooft 6000 cycli of 20 jaar. Dat is onvoorstelbaar. Het rendement is wel beperkt en maximaal 75%. De terugverdiendtijd zou laag moeten kunnen liggen door weinig materiaalgebruik en de kost van elektriciteit laag door de lange, beloofde, levensduur, hoewel het beperkte rendement een negatieve invloed hierop heeft. [52]

TRL: 8



Figuur 23: Batterijmodule en -container van EOS Energy (bron: Eose.com)

4.3.6.7 Calcium-antimoon

De uitvinder van de calcium-antimoonbatterij, Professor Donald Sadoway, heeft in 2022 de Europese uitvindingsprijs voor zijn batterij gekregen. De batterijcellen zijn gebaseerd op een calciumlegering en antimoon (Sb). De calciumlegering wordt vloeibaar gehouden door een temperatuur van maar liefst 500°C. Desondanks hoeft er geen energie worden toegevoerd om de batterij op temperatuur te houden. Een dagelijks laad/ontlaadcyclus is voldoende, net zoals bij een natrium-zwavelbatterij. Dit batterijtype is op weg naar commercialisatie en wordt geproduceerd door Ambri. Dit bedrijf belooft tienduizenden cycli en nauwelijks capaciteitsafname gedurende 20 jaar. Het celrendement zou rond 80% liggen. [53] Door de lange levensduur, de goed beschikbare materialen en goed rendement kan de

elektriciteitskost laag liggen. De batterij wordt aangeboden in zeecontainers met MWh-schaal. De doelgroepen zijn industrie en elektriciteitsbedrijven.

TRL: 6



Figuur 24: De Calcium-antimoonbatterij van Ambri (bron: Ambri)

4.3.7 Nieuwe batterijtypes

4.3.7.1 Vastestofbatterijen

De directe opvolger van de Li-iontechnologie kan de zogenaamde vastestofbatterij worden of anodeloze batterij. Li-ionfabrikanten en de auto-industrie stoppen veel geld in de ontwikkeling. De vloeibare elektrolyt in de Li-ionbatterij wordt vervangen door een vaste stof wat de batterijen veiliger maakt. De belangrijkste verandering is het gebruik van lithiummetaal als negatieve elektrode. Dit is dunner dan grafiet voor dezelfde hoeveelheid lading en daardoor wordt de energiedichtheid groter. Het gevolg is wel dat de celdikte flink varieert. Het verschil met de eerder besproken lithium-metaalbatterij is dat de werkingstemperatuur nu gelijk is aan de omgevingstemperatuur. De ontwikkeling is vooral niet eenvoudig en commercialisatie is nog niet dichtbij maar eerder richting 2030. Startups worden sterk door de auto-industrie gesteund. Een speciale klasse is de anodeloze batterij. Dat is een Li-ionbatterij die zonder anodemateriaal (lithium) wordt geproduceerd. Tijdens het laden slaat het lithium neer op de stroomgeleider van de anode. Doordat er geen lithiummetaal is toegevoerd bij de productie, is er geen lithiumoverschot en is het aantal cycli momenteel beperkt tot 100.

TRL: 4

TRL anodeloze batterij: 2

4.3.7.2 Lithium-lucht

In navolging van de zink-luchtbatterij is een lithium-luchtbatterij in principe ook mogelijk. De praktische problemen zijn echter nog hoger. Toyota en IBM hebben er hard in geloofd en aan gewerkt. Er is geen doorbraak bereikt en IBM lijkt dit pad te hebben verlaten.

TRL: 2

4.3.7.3 Aluminium dual ion

Een speciaal soort batterijprincipe is de aluminium dual ion battery. Dit werkt op basis van aluminiumfolie en aluminiumchloride opgelost in een ionische vloeistof en gebruikt koolstofgebaseerd materiaal als tegenelektrode. De energiedichtheid is theoretisch enkele malen hoger dan van Li-ionbatterijen. [54] Belgische onderzoeksinstellingen en ook industrie houden zich met dit batterijtype bezig.

In 2022 is een artikel verschenen van prof. Sadoway (die even eerder ook al aan bod kwam) met een alternatieve dual ion batterij. Hierbij is de koolstof vervangen door zwavel. In plaats van het aluminiumzout op te lossen in een ionische vloeistof is de temperatuur verhoogt tot net boven 100°C zodat er een gesmolten zout ontstaat. Hij noemt dit een aluminium-chalcogen batterij of ook wel aluminium-zwavelbatterij. [55] In het labo zijn al honderden cycli bereikt. Hij heeft een nieuw bedrijf, Avanti, opgericht om dit batterijtype tot een rijp product om te zetten.

TRL van beide aluminiumbatterijen: 2

4.4 Andere interne opslagtypes

4.4.1 Supercapaciteiten (elektrochemische dubbellaagcondensatoren)

Condensatoren werken op basis van lading en elektrische velden. Door koolstofmaterialen te gebruiken met een enorm oppervlak per volume, zijn enorme capaciteiten mogelijk geworden. Dit wordt aangeduid met super-capaciteiten of ultra-capaciteiten. De officiële benaming is elektrochemische dubbellaagcondensatoren (EDLC). Ondanks de hoge capaciteit voor een condensator, is de capaciteit nog geen honderdste van bijvoorbeeld Li-ionbatterijen. Daarentegen kunnen ze overweg met zeer grote stromen en meer dan een miljoen cycli aan. Dat maakt hen geschikt in een zeer dynamische omgeving waar energie kan worden gerecupereerd en weer snel moet worden afgegeven. Voorbeelden zijn remenergie van bussen en van weefgetouwen.

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : Universeel.
- **Toepasbaarheid** : Elektrochemische dubbellaagcondensatoren zijn bijzonder aantrekkelijk voor transport en toepassingen voor het opwekken van hernieuwbare energie [56]. Ze worden op grote schaal ingezet om stroom te leveren en stroomkloven te overbruggen. [57]
- **Ontwikkelingsstatus** : De ontwikkeling van elektrochemische condensatoren (d.w.z. supercapaciteiten) heeft de afgelopen jaren veel aandacht getrokken vanwege de toenemende vraag naar efficiënte, krachtige energieopslag [56]. Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 9 de ontwikkelingstatus van ultracapaciteiten.
- **Mate van genericiteit** : matig: de EDLC's hebben een groot spanningsvenster en worden meestal als losse componenten en soms als kleine modules verkocht. Om hen in te zetten is maatwerk nodig om er energiepakketten van te bouwen en te koppelen aan vermogenslektronica. Er is dus geen standaardisatie of breed gamma zoals bij batterijen.
- **Efficiëntie** : Het rendement is nauwelijks onder de 100% door de minieme weerstand. Het rendement wordt met name bepaald door leidingverliezen en de vermogenslektronica (DC/DC convertoren).
- **Innovativiteit** : Hoog. Een condensator die een enorme hoeveelheid energie opslaat, staat bekend als een supercondensator. Het is ook bekend als een ultracondensator of dubbellaagse elektrolytische condensator. Supercondensatoren hebben bijna alle overeenkomsten met condensatoren, behalve hun platen met een groter oppervlak en de kleinere afstand tussen

deze platen. Deze platen zijn van metaal en hebben ook een onbeperkte levensduur. [57]

- **Leveranciers** : TDK, KEMET, Kyocera AVX, Eaton, Cornell Dubilier (CDE), Maxwell Technologies, Elna. [57] Skeleton.

➤ **Economisch**

- **Investeringskost** : voor 1 Wh is de prijs rond \$20. [58] De kost van de maataanpak kan aanzienlijk zijn.
- **Operationele kost** : Nauwelijks: er is geen onderhoud nodig. De temperatuurregeling is eenvoudig en kan met ventilatoren worden opgelost, die een beperkt verbruik hebben.
- **Terugverdiendtijd** : Kort als er enorm veel opslagcycli mogelijk zijn en de ontwikkelkost over vele toestellen verdeeld kan worden.

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen** : De materialen zijn goed beschikbaar. Het elektrolyt is giftig.



Figuur 25: Oplevering ultracapaciteitsmodules (op voorgrond) door VITO (bron: VITO)

4.4.2 Hybrid lithium ion capacitors of Li-ioncondensator

Dit is een mengvorm van een Li-ionbatterij en een elektrochemische dubbellaagcondensator. De anode is de lithiumtitanaatoxide (LTO) zoals in de LTO-Li-ionbatterij terwijl de kathode de geactiveerde koolstof van de super capacitor is. De energiedichtheid is ongeveer 5 maal groter

dan van EDLC's, maar zeker 10x kleiner dan van Li-ionbatterijen. Het voordeel is dat ze meer cycli aankunnen dan batterijen. De stroomsterkte is een factor lager dan bij EDLC's. Dit maakt hen beperkt onderscheidend van Li-ionbatterijen.

➤ Technisch

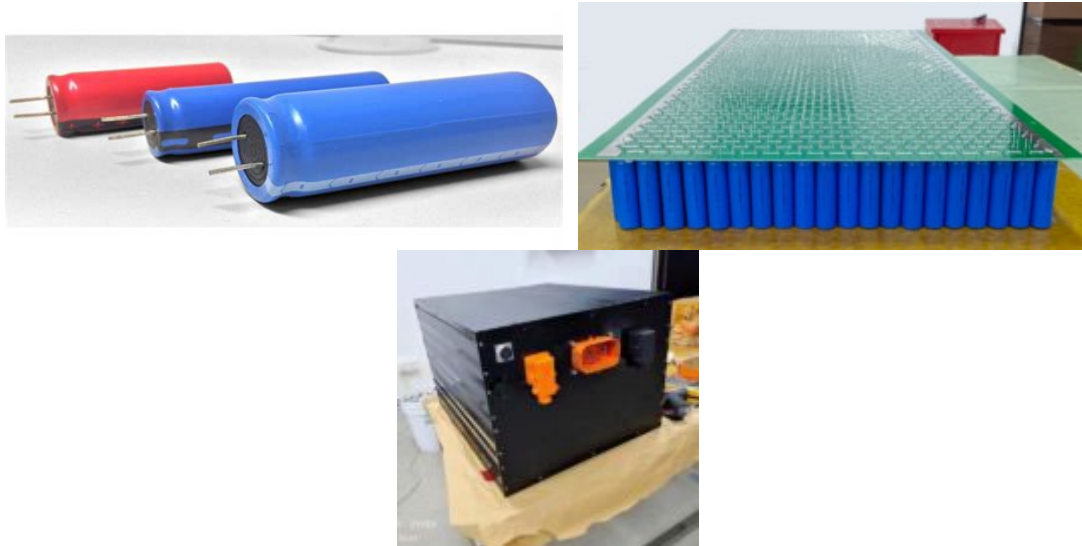
- **Beschikbaarheid** : Universeel.
- **Toepasbaarheid** : Beperkt: daar waar meer cycli nodig zijn dan Li-ionbatterijen kunnen leveren maar met een veel lagere capaciteit. Dit geeft gelijkaardige toepassingen als de EDLC maar dan waar de capaciteit van de EDLC te kort komt terwijl de stroomsterkte lager moet zijn.
- **Ontwikkelingsstatus** : Ook al is dit type condensator pas in 2010 uitgevonden, is er een professionele productie van. Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 9 de ontwikkelingstatus van hybride Li-ioncondensatoren.
- **Mate van genericiteit** : Dezelfde opmerking als bij de super capacitors gelden hier, ofwel beperkt generiek. Maatwerk is nodig om tot toepassingen te komen.
- **Efficiëntie** : Heel hoog. Waarschijnlijk zijn ook hier, zoals bij de EDLC's, de verliezen van bekabeling en omvormers groter.
- **Innovativiteit** : Hoog. Het concept bestaat nog maar ruim 10 jaar. Nieuwe condensatoren komen op de markt.
- **Leveranciers** : JSR Micro, FDK, Vinatech, Ioxus en vele anderen. In België is Kurt Energy gespecialiseerd in het maken van modules ermee.

➤ Economisch

- **Investeringskost** : Vrij hoog door maatwerkoplossing. Indien kleine series mogelijk zijn dan zijn de kosten lager dan van Li-ionbatterijen.
- **Operationele kost** : beperkt door weinig koelbehoefte, hoog rendement en lange levensduur.
- **Terugverdientijd** : Redelijk kort bij voldoende aantallen modules die tegelijk kunnen worden gemaakt.

➤ Ecologisch

- **Duurzaamheid materialen** : Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn. Uitbundig voorkomende materialen.



Figuur 26: Losse hybride lithium ion capacitors, hun serie/parallelschakeling en de uiteindelijke module (bron: Kurt.energy)

4.4.3 Vliegwielen

Vliegwielen energieopslagsystemen kunnen in twee groepen worden ingedeeld: met lage of met hoge snelheid. Een modern vliegwiel-systeem bestaat uit vijf hoofdcomponenten: een vliegwiel, een groep lagers, een omkeerbare elektromotor/generator, een vermogenselektronische eenheid en een vacuümkamer [59]. Vliegwielen-systemen gebruiken elektriciteit om het vliegwiel te versnellen of te vertragen. De opgeslagen energie wordt via een geïntegreerde motor/generator van of naar het vliegwiel overgebracht [60].

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : Universeel
- **Toepasbaarheid** : vliegwielen-systemen met lage snelheid worden meestal gebruikt voor toepassingen op korte termijn en voor toepassingen met gemiddeld/hog vermogen [60]. De toepassingsgebieden van vliegwielen-systemen met hoge snelheid breiden zich voortdurend uit, voornamelijk in hoge vermogenskwaliteit en “ride-through power-service” in tractie en de lucht- en ruimtevaartindustrie [61] [62]. Het eerste type is gebaseerd op stalen wielen en het tweede op koolstofvezel-wielen.
- **Ontwikkelingsstatus** : Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 8 de ontwikkelingstatus van vliegwielen energieopslagsystemen.
- **Mate van genericiteit** : Vliegwielen hebben een kleine opslagcapaciteit maar sterk reactief. Dat geeft dat ze zich enigszins in een niche bevinden, waar ze heel sterk zijn. Dit is met name voor onmiddellijke noodstroom (UPS) en frequentie-ondersteuning van het elektriciteitsnet. De systemen zelf hebben weinig maatwerk nodig. Ze worden als systeem opgeleverd.
- **Efficiëntie** : vliegwielen hebben een hoge cyclusefficiëntie, tot 95% bij nominaal vermogen en een relatief hoge vermogensdichtheid [59] [63].
- **Innovativiteit** : hoog, vrij recente marktontwikkeling

- **Leveranciers** : Punch Flybrid, Stornetic, Energiestro, S4 Energy, OXTO Energy, Revterra, Amber Kinetics

➤ **Economisch**

- **Investeringskost** : 1000 [64] tot 14000 (\$/kWh) [65]
- **Operationele kost** : Operationele kosten zijn rond 0.004 \$/kWh [66] en 5.6 \$/kW/year [64] . Vliegwielen tonen geen ontladingsdiepte-effecten en vereisen maar eenvoudig onderhoud [59].
- **Terugverdientijd** : de levensduur van vliegwielen gelijk aan 15 jaren en zelf langer, of 20 000 en zelf meer in termen van aantal cycli [64] [67]

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen** : Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn.



Figuur 27 links: Vlieg wiel energieopslagsysteem (bron : OXTO Energy); rechts: hybride systeem met vliegwielen op de voorgrond en gecontaineriseerde batterijopslagsystemen erachter (bron: Leclanché).



Figuur 28 links: vlieg wiel; rechts: generator op waterstof met een vliegwielsysteem (bron: Punchflybrid)

4.5 Opslag van elektrische energie via externe opslag

4.5.1 Redoxflow batterijen

Hoewel redoxflow-batterijen binnen de categorie elektrochemische opslagtechnologieën vallen, verschillen ze op verschillende manieren van gewone batterijen. In plaats van te vertrouwen op elektroden die in een vaste of geïmmobiliseerde vorm zijn gemaakt, gebruiken redoxstroombatterijen poreuze elektroden, waarbij de actieve materialen worden gevlogen in de vorm van positieve en negatieve vloeibare oplossingen die redox-actieve soorten bevatten. Deze oplossingen worden opgeslagen in twee tanks, die elk naar een van de elektroden worden gecirculeerd. Tijdens de ontlading migreren ionen van de negatieve elektrode naar de positieve elektrode via een ionenuitwisselingsmembraan, terwijl elektronen van de negatieve oplossing naar de negatieve elektrode stromen en vervolgens via een extern circuit (bijvoorbeeld een extern apparaat) naar de positieve elektrode, en uiteindelijk naar de positieve oplossing. Aangezien de vloeibare oplossingen in tanks worden opgeslagen en in de cel kunnen worden gepompt om energie op te wekken, kunnen stroombatterijen worden gebruikt als brandstofcellen (waar de verbruikte splijstof wordt onttrokken en nieuwe brandstof aan het systeem wordt toegevoegd) of als oplaadbare batterijen (waarbij een elektrische krachtbron wordt gebruikt om de brandstof te regenereren). [24] Er bestaan verschillende types redoxflow batterijen zoals vanadium, nikkel-bromide, waterstof-bromide.

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : Breed.
- **Toepasbaarheid** : Ze zijn bijzonder interessant voor residentiële en grootschalige stationaire toepassingen (bijv. opslag van energie uit hernieuwbare bronnen en load balancing) en voor elektrische voertuigen. Vanadium redox-flowbatterijen zijn bijvoorbeeld zeer geschikt voor PV-toepassingen voor zonne-energie vanwege hun hoge capaciteit, minder gevoeligheid voor de diepte van ontlading, lage zelfontlading en hun vermogen om onafhankelijke energie en kracht te bieden. Redoxflow-batterijen kunnen een veiliger, duurzamer en beter schaalbaar alternatief bieden naar Li-ion batterijen voor sommige toepassingen. [24]
- **Ontwikkelingsstatus** : Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 9 de ontwikkelingstatus van Redoxflow batterijen.
- **Mate van genericiteit** : Hoog: er worden kant-en-klaaroplossingen aangeboden. De opslag grootte kan gemakkelijk aangepast worden door grotere tanks te plaatsen. Opslag grootte en vermogen zijn ontkoppeld in dit concept, terwijl dat bij batterijen gekoppeld is.
- **Efficiëntie** : De efficiëntie (roundtrip efficiency) van vanadium redox - flowbatterijen is ongeveer 75% - 85% [68]. Vergeleken met Li-ion batterijen tonen redoxflow-batterijen een lagere degradatie, kunnen een verbeterde veiligheid bereiken en kunnen met name een bijna onbeperkte levensduur creëren. [24]
- **Innovativiteit** : Voor vanadiumredoxbatterijen is de huidige innovativiteit beperkt . Voor andere types is de innovativiteit hoog.

TRL Vanadium: 9

TRL Zink-bromide: 9

TRL Waterstofbromide: 5

▪ **Leveranciers :**

Vanadium: CellCube, VoltStorage GmbH, Sumitomo Electric Industries, Lockheed Martin , United Technologies , Acal Energy, LG Electronics [24]

Zinkbromide: Redflow

Waterstofbromide: Elestor

➤ **Economisch**

- **Investeringskost :** Vanadium is een duur metaal, dus de kosten vooraf van de elektrolyt en de batterij -eenheid voor een redoxflow batterij is relatief hoog in vergelijking met andere types batterijen. De gemiddelde kost per kWh van vanadium redox flowbatterijen zijn \$ 300-\$ 1000. Dit lijkt op dit moment misschien hoog, maar een daling in deze kost is in de nabije toekomst verwacht [68].
- **Operationele kost :** Beperkt. Er zijn pompen nodig. Er is weinig onderhoud. Het beperkte rendement heeft wel een weerslag op de operationele kost.
- **Terugverdiëntijd :** Goed. De lange levensduur brengt zekerheid ten opzichte van het terugverdienen van de investeringskost bij aankoop van redoxflow batterijen [68].

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen :** geen bijzonderheden voor vanadium. Bromide is een giftig materiaal.



Figuur 29: Van links naar rechts verschillende types redoxflowbatterijen: vanadium van EverFlow, zinkbromide van RedFlow, waterstofbromide van Elestor en hun ontwikkeling naar grootschalige opslag (artist impression)

4.5.2 Waterstof brandstofcellen

Er bestaan verschillende types brandstofcellen zoals: Polymeer elektrolytmembraan (PEM and HT-PEM), Alkaline (AFC), Fosforzuur (PAFC), Gesmolten carbonaat (MCFC), Vast oxide (SOFC). HT-PEMFC's worden meestal gebruikt voor mini- en micro-WKK-systemen [69].

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid** : Beperkt. Er zijn internationaal bedrijven actief. Die bevinden zich echter in een precommerciële fase met kleine oplages.
- **Toepasbaarheid** : mobiliteit, stroomopwekking, militair wegens stil en licht.
- **Ontwikkelingsstatus** : Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 8 de ontwikkelingstatus van Waterstof brandstofcellen.
- **Mate van genericiteit** : Beperkt.
- **Efficiëntie** : Polymeer elektrolytmembraan (PEM) : 60% bij gebruik van directe H₂ en 40% bij gebruik van gereformeerde brandstof, Alkaline (AFC) : 60%, Fosforzuur (PAFC) : 40%, Gesmolten carbonaat (MCFC) : 50%, Vast oxide (SOFC) : 60%. [70].
- **Innovativiteit** : Een brandstofcel is een energieconversie-apparaat dat continu chemische energie in een brandstof omzet in elektrische energie, zolang zowel de brandstof als het oxidatiemiddel beschikbaar zijn. Het vertoont voordelige eigenschappen die de conventionele op verbranding gebaseerde technologieën overtreffen die momenteel worden toegepast op bepaalde kritieke gebieden, zoals elektronica, stroomvoorziening in huizen, krachtcentrales, personenauto's en militaire toepassingen. Brandstofcellen werken met een hogere efficiëntie dan verbrandingsmotoren en vertonen een conversie-efficiëntie van elektrische energie van 60% of meer, met lagere emissies. Water is het enige product van het stroomopwekkingsproces in waterstofbrandstofcellen, en er zijn dus geen kooldioxide-emissies of luchtverontreinigende stoffen die smog veroorzaken en gezondheidsproblemen veroorzaken tijdens het gebruik. Bovendien maken brandstofcellen weinig geluid tijdens het gebruik, omdat ze minder bewegende delen bevatten. Brandstofcellen zijn er in vele varianten, maar ze werken allemaal op dezelfde manier. [71]
- **Leveranciers** : HyMove, Nedstack, PowerCell, Intelligent Energy, Hydrogenics, Air Liquide, Nuvera, Ballard Power Systems Inc, Horizon Fuel Cell, Doosan Fuel Cell America, Inc., Hyundai Motor. [72]

➤ **Economisch**

- **Investeringskost** : PEMFC- en SOFC -systemen worden geïdentificeerd als de meest volwassen technologieën die in de toekomst een prominente rol zullen vinden, met een drastische verlaging van de kosten van kapitaaluitgaven en een belangrijke toename van de nominale efficiëntie. Micro- en miniSOFC's hebben een hogere capex dan brandstofcelsystemen voor lage temperatuur, maar hebben ook een hogere efficiëntiewaarde, tot 55% in plaats van 52% van de PEMFC-verwachte nominale efficiëntie. De efficiëntiewaarden worden gerapporteerd door de nominale operatie aan het begin van het leven (BOL) te overwegen. HT-PEMFC's, rekening houdend met de stand van de kunst, presenteren de hoogste kapitaalinvestering per kW_{el}, maar met het oog op 2030, dankzij de bijbehorende onderzoeksacties die gericht zijn op het verbeteren van de systeemefficiëntie, wordt het dan verwacht dat HT-PEMFC's de hoogste elektrische efficiëntie bereiken. Micro-WKK-systemen, tot 5 kW,

zullen in de toekomst hun investeringskosten zien verlaagd worden, door te dalen tot 3500 EUR/kW in 2030. [69]

- **Operationele kost** : Mini-WKK (5 kW_{el} en 4 kW_{th}) en commerciële WKK (50 kW_{el} en 40 kW_{th}) die meestal met een SOFC-systeem werken, zullen in de toekomst geassocieerd worden met CAPEX-kosten van 18,4 en 16,5 kEUR/kW. [69]
- **Terugverdientijd** : levensduur van micro-WKK-systemen zal in de toekomst verlengd worden, van 12 tot 15 in termen van jaren van operatie. [69]

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen** : Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn.



Figuur 30 Stacks en PEM Fuel Cell Power System bedoeld voor industriële toepassingen (bron : Nedstack)

4.5.3 Energieopslag met gecomprieeerde lucht

Energieopslag met gecomprieeerde lucht is een energieopslagsysteem dat lucht comprimeert en opslaat in een geologische ondergrondse leegte, onder een druk van ongeveer 100 bar. Om de opgeslagen energie in de vorm van elektrische energie te bekomen, wordt de vrijgekomen lucht verwarmd door middel van een verbrandingsproces met behulp van aardgas en wordt het geëxpandeerd om een gasturbine aan te drijven om elektriciteit op te wekken. [73]

➤ **Technisch**

- **Beschikbaarheid** : beperkt
- **Toepasbaarheid** : energieopslag installaties met gecomprieeerde lucht worden gebruikt voor peak shaving, load leveling in netbeheersystemen, opslag van energie tijdens daluren en voor frequentieregeling. [73]
- **Ontwikkelingsstatus** : Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft een TRL tussen 8 en 9 de ontwikkelingstatus van energieopslag met gecomprieeerde lucht. [73]
- **Mate van genericiteit** : Er bestaan verschillende soorten energieopslagtechnologieën die verschillende thermodynamische processen gebruiken.

Diabatische energieopslag met gecomprimeerde lucht: deze technologie verwijdt de opgeslagen lucht door verbranding van een aanvullende brandstof (meestal aardgas) om de turbine aan te drijven en elektriciteit op te wekken. [73]

- **Isotherme energieopslag met gecomprimeerde lucht:** bij deze technologie wordt de warmte van luchtcompressie opgevangen en opgeslagen in water. Dit proces begrenst de nood voor de verbranding en verhoogt de efficiëntie van het systeem tot 70-90% [74] [75] [73].
- **Adiabatische energieopslag met gecomprimeerde lucht:** deze technologie vangt thermische energie op en slaat deze op, die wordt gegenereerd tijdens de compressie van lucht in een centrum. De warmte wordt hergebruikt om de lucht bij expansie te verwarmen. Daarom is er tijdens de opwekking geen aardgas nodig om de lucht opnieuw op te warmen. Dit proces verhoogt de kapitaalkosten van de technologie, maar verhoogt de efficiëntie tot ongeveer 70% [75] [73]. Het is waarschijnlijk dat deze technologie tegen het jaar 2020 op commerciële schaal beschikbaar komt [76] [73].
 - **Efficiëntie :** Diabatisch: 55% ; Isotherm: 70-75%; Adiabatisch: 70% [73]
 - **Innovativiteit :** hoog, verder onderzoek en ontwikkeling nodig enerzijds wat betreft de herwinning van warmteverliezen bij het laden met behulp van thermische opslag om het gebruik van brandstof te verlichten of te minimaliseren, alsook anderzijds voor het verhogen van de exergiewinst van recuperatie door voorverwarmen en verhogen van de temperatuur van de lucht tijdens de laadmodus [77] [73].
 - **Leveranciers :** MAN Energy Solutions SE, Alacaes, Storelectric, Augwind, Highview Power .

➤ **Economisch**

- **Investeringskost :** 200-250€/kWh (afhankelijk van type van energieopslag met gecomprimeerde lucht en maatvoering) [73].
- **Operationele kost :** voorlopig geen inschatting te vinden.
- **Terugverdientijd :** een levensduur tussen 20 en 40 jaren kan verwacht worden [78] [60] [64].

➤ **Ecologisch**

- **Duurzaamheid materialen :** de werking van energieopslag met gecomprimeerde lucht vereist weinig land, maar uitgebreide waterbronnen en stoot broeikasgassen uit. [73].



Figuur 31 Installatie voor energieopslag met gecomprimeerde lucht (bron: alacaes)

4.5.4 Energieopslag met vloeibare lucht

Een energieopslag met vloeibare lucht bestaat uit een laadsysteem, een energieopslag en een ontladingsysteem. Het laadsysteem is een industriële luchtvervloeingsinstallatie waar elektrische energie wordt gebruikt om warmte uit omgevingslucht die uit de omgeving wordt gehaald, af te voeren, waardoor vloeibare lucht ("cryogeen") wordt gegenereerd. De vloeibare lucht wordt onder lage druk opgeslagen in een geïsoleerde tank die als energieopslag werkt. Wanneer er stroom nodig is, wordt vloeibare lucht uit de tank getrokken, onder hoge druk gepompt en verdampt. Dit produceert gasvormige lucht die kan worden gebruikt om een zuigermotor of turbine aan te drijven om nuttig werk te doen dat kan worden gebruikt om elektriciteit op te wekken [79].

➤ Technisch

- **Beschikbaarheid** : Beperkt
- **Toepasbaarheid** : Integratie van hernieuwbare energiebronnen, uitstel van netwerkversterking, dagelijkse/wekelijkse balancering, Leveringszekerheid (Capaciteitsvoorziening) [79]
- **Ontwikkelingsstatus** : Volgens de EU-schaal van TRL (Technology Readiness Levels) niveaus, beschrijft de TRL 7 – 8 de ontwikkelingstatus van energieopslag met vloeibare lucht [78].
- **Mate van genericiteit** : matig, er zijn verschillende categorieën van energieopslag met vloeibare lucht-technologieën die worden onderscheiden door het gebruikte thermodynamische proces. De volgende uitvoeringsvarianten zijn mogelijk met:
 - Gasturbine: vloeibare lucht wordt verdampt en vervolgens verbrand met de brandstof (meestal aardgas) en geëxpandeerd door een gasturbine om elektriciteit op te wekken.
 - Luchtexpander: vloeibare lucht wordt verdampt en geëxpandeerd met behulp van warmte die wordt gegenereerd tijdens luchtcompressie of van een aangrenzend industrieel proces in een luchtexpander [79].
 - Opslagmedium: lucht, stikstof of andere cryogenen.
- **Efficiëntie** : kan variëren tussen 45 – 70% [78]
- **Innovativiteit** : hoog, energieopslag met vloeibare lucht is steeds onder ontwikkeling/demofase [78]
- **Leveranciers** : MAN Energy Solutions SE, Huga Energy, Highview Power, Sumitomo Heavy Industries

➤ Economisch

- **Investeringskost** : tussen 60 - 600 €/kWh [79]
- **Operationele kost** : voorlopig geen inschatting te vinden
- **Terugverdientijd** : een levenscyclus tussen 22000 en 30000 cycli [79] of een levensduur tussen 20 en 40 jaren kunnen verwacht worden [79] [78] [64] [60].

➤ Ecologisch

- **Duurzaamheid materialen** : Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn.



Figuur 32 Installatie voor energieopslag met vloeibare lucht in Manchester (bron : Highview Power)

5 BESLUIT

Tot slot van dit document wordt in onderstaande secties de verzamelde informatie bondig samengevat in tabelvorm.

Overzicht Thermische Opslag

5.1.1 Voelbare warmte

Tabel 8 Technische eigenschappen samengevat voor thermische opslagstechnologieën op basis van voelbare warmte

	Beschikbaarheid	Toepasbaarheid	Ontwikkelingsstatus	Mate van genericiteit	Efficiëntie	Innovativiteit	Leveranciers
Warm watertanks (TTES)	Groot	Beperkt: Lage-temperatuurtoepassingen (max 200 °C onder hoge druk)	Commercieel	Laag, oplossing op maat noodzakelijk Laag, oplossing op maat noodzakelijk	70-95%	Laag	Via studie bureaus voor ontwerp en dimensionering, assemblage door lasbedrijven
Thermische olie	Groot	Beperkt: Voornamelijk midden-temperatuur toepassingen van max. 400 °C	Commercieel		70-95%	Laag	Via studie bureaus voor ontwerp en dimensionering, assemblage door lasbedrijven. Thermische olie: Therminol, Single, BP, Chem Werke Hüls, Houghton, Mobil, Esso, ...
Vaste stoffen (PBTS)	Opkomend	Breed: voornamelijk voor processen met temperatuur boven 100 °C	Afhankelijk van temperaturniveau: TRL 6-8. TRL is lager voor hogere temperatuur		65-85%	Laag tot medium (voor hogere temperatuur)	Via studie bureaus (Bertin, Fabricom, Sweco, Tractebel, Arcadis, ...). Onderzoeksinstituten en universiteiten voor hogere temperaturen
Gesmolten zouten	Beperkt, voornamelijk onderzoeksfase	Beperkt tot hoge-temperatuurtoepassingen	TRL 4-7		90-99%	Medium-hoog	Via studie bureaus (Bertin, Fabricom, Sweco, Tractebel, Arcadis, ...). Coastal Chemical Co (HITEC), MAN MOSAS
Gesmolten metalen	Onderzoeksstadium	Beperkt tot hoge-temperatuurtoepassingen	TR 4-5		Onbekend	Hoog	Nog niet commercieel, conceptueel of beperkte mate van experimenteel onderzoek
Ondergrond	Groot	Commercieel	Commercieel	Afhankelijk van ondergrond	Tot 50%	Laag	Geothermische studie bureaus (Terra Energy, Geofys, Stubeco, Boydens, Ingenium, Iftech, ...)

Tabel 9 Economische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van voelbare warmte

	Investeringskost	Operationele kost	Terugverdientijd
Warm watertanks (TTES)	Tot 15 €/kWh voor lage-temperatuur. 25-50 €/kWh voor systemen onder hoge druk. Specifieke kostprijs neemt sterk af met volume	1 tot 3% van CAPEX	3 tot 5 jaar
Thermische olie	Richtprijs minerale olie: 4 €/kWh, synthetische olie: 40 €/kWh, silicone olie: 80 €/kWh	1 tot 3% van CAPEX	Sterk afhankelijk van type olie
Vaste stoffen (PBTS)	15-25 €/kWh	1 tot 3% van CAPEX	Ongekend
Gesmolten zouten	25-70 €/kWh. Kost thermische zouten 1-5 €/kg	Ongekend	Ongekend
Gesmolten metalen	Ongekend, grote variatie in grondstofkost metalen	Ongekend	Ongekend
Ondergrond	10-50 €/m ³ water equivalent. BTES duurder dan ATES door groter aantal boringen	1 tot 3% van CAPEX. Voor moderne BTES installaties: 3 tot 10 €/MWh	7 a 13 jaar

Tabel 10 Ecologische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van voelbare warmte

	Duurzaamheid materialen
Warm watertanks (TTES)	Bepaalde types van isolerend materiaal kunnen niet gerecycleerd worden (bvb. cellulose en geëxpandeerd polystyreenschuim (EPS)). Anderzijds is cellulose een van de meest milieuvriendelijke materialen. De meest voorkomende isolatiematerialen zijn doorgaans toxisch.
Thermische olie	Thermische oliën zijn derivaten van aardolie en heeft een impact op de duurzaamheid.
Vaste stoffen (PBTS)	Als opslagmedium kunnen afvalproducten zoals slak bijproducten uit metallurgie gebruikt worden. Daarnaast vormen natuurlijk materialen zoals grint, rotsdeeltjes een potentieel om als packing material gebruikt te worden.
Gesmolten zouten	Afhankelijk van gekozen zout.
Gesmolten metalen	Afhankelijk van gekozen metaal.
Ondergrond	In het geval van BTES wordt een glycolmengsel gebruikt. Glycollekken kan nefaste invloeden hebben op het leven in de bodem. De productie van glycol kan tegenwoordig wel op een duurzame wijze gebeuren.

5.1.1 Latente warmte

Tabel 11 Technische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van latente warmte

	Beschikbaarheid	Toepasbaarheid	Ontwikkelingsstatus	Mate van genericiteit	Efficiëntie	Innovativiteit	Leveranciers
Ijs	Breed	Beperkt tot koelprocessen	Commercieel	Hoog	< 95%	Laag	Baltimore Aircoil, IceBear, Calmac ICE banks, ...
Lage-temperatuur PCM	Als opslagsysteem: beperkt, materialen: breed	Beperkt tot lage-temperatuurtoepassingen	TRL 8-9	Beperkt, materiaal gekozen in functie van toepassing	> 90%	Medium	PCM Materials, Paraffin Wax CO, Rubitherm, PureTemp, PLUSS, Microtek, Croda, ...
Midden-temperatuur PCM		Beperkt tot midden-temperatuurtoepassingen	TRL 7-8		> 85%	Medium tot hoog	Divers op het vlak van materiaal
Hoge-temperatuur PCM		Beperkt tot hoge-temperatuurtoepassingen	TRL 4-6		75-90%	Hoog	Niet gekend

Tabel 12 Economische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van latente warmte

	Investeringskost	Operationele kost	Terugverdientijd
Ijs	~ 7000 €/m ³	1 tot 3% van CAPEX	6 a 8 jaar voor toepassingen in gebouwen
Lage-temperatuur PCM	50 € - 250 € / kWh		Ongekend
Midden-temperatuur PCM			Ongekend
Hoge-temperatuur PCM			Ongekend

Tabel 13 Ecologische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van latente warmte

	Duurzaamheid materialen

Ijs	Als HTF wordt doorgaans een glycolmengsel gebruikt. Glycollekken kunnen nefaste invloeden hebben op het leven in de bodem. De productie van glycol kan tegenwoordig wel op een duurzame wijze gebeuren.
Lage-temperatuur PCM	Paraffine: Ontvlambaar (kaarsenvet), olie-gebaseerd product Zouhydraten: Corrosiviteit (afhankelijk van materiaal)
Midden-temperatuur PCM	Suikeralcoholen kunnen gewonnen worden als bijproduct uit biologische materialen. Ze zijn niet-toxisch, niet-corrosief en milieuvriendelijk. Nitraten hebben schadelijke effecten op het ecologisch systeem en zijn bijgevolg niet duurzaam.
Hoge-temperatuur PCM	Hoge concentraties aan chlorides hebben een negatieve impact op het ecosysteem via het grondwatercontaminatie. Hetzelfde geldt voor fluorides. Met carbonaten zijn doorgaans geen problemen. Een voorbeeld hiervan is natriumcarbonaat, welke een natuurlijk product is met een smeltpunt van 851 °C.

5.1.2 Thermochemisch & Sorptietechnieken

Tabel 14 Technische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van thermochemische processen

	Beschikbaarheid	Toepasbaarheid	Ontwikkelingsstatus	Mate van genericiteit	Efficiëntie	Innovativiteit	Leveranciers
Chemische reacties	Prototype	Breed, temperatuur waarop geladen wordt is afhankelijk van actief materiaal	TRL 3-5	Waarschijnlijk laag	Verwacht > 90%	Hoog	Geen
Adsorptie in vaste stoffen	Prototype. Demonstratie voor zeoliet	Lage temperatuur toepassingen en langetermijnopslag	TRL 3-6	Ongekend, waarschijnlijk laag	Verwacht > 90%	Hoog	Geen

Tabel 15 Economische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van thermochemische processen

	Investeringskost	Operationele kost	Terugverdientijd
Chemische reacties	Materiaalkost varieert van € 70 tot € 2400 per ton. Kosten voor volledige systeem ongekend.	Ongekend	Ongekend
Adsorptie in vaste stoffen			

Tabel 16 Ecologische eigenschappen samengevat voor thermische opslagtechnologieën op basis van thermochemische processen

	Duurzaamheid materialen
Chemische reacties	Materiaalkost varieert van € 70 tot € 2400 per ton. Kosten voor volledige systeem ongekend.
Adsorptie in vaste stoffen	Afhankelijk van gekozen materialen.

5.2 Overzicht Elektrische Opslag

Tabel 17 Technische eigenschappen samengevat voor Lithium-ion, Nikkelmetaalhydride, Loodzuur, Lithium-zwavel, Natrium-ion batterijen

	Beschikbaarheid	Toepasbaarheid	Ontwikkelings status (TRL niveau)	Mate genericiteit van	Efficiëntie	Innovativiteit	Leveranciers
Lithium-ion	breed	smartphones, elektrisch gereedschap, elektrische auto's, stationaire batterijen, ruimtevoertuigen, laptops, medische implantaten	TRL 9	algemeen inzetbaar	20-70% (stationaire toepassingen)	hoog	CATL, Samsung, Panasonic, BYD, Toshiba, LG Electronics, Saft, Leclanché, NorthVolt
Nikkelmetaalhydride	universeel	vliegtuigtoepassingen, noodverlichting, belangrijkste type oplaadbare batterij in consumentenelektronica	TRL 9	generiek product	70-75% tot zelfs 85 %	weinig ontwikkeling meer	Panasonic, Varta, Saft, Energizer, Nilar
Loodzuur	universeel	heftrucks, auto-industrie (starterbatterij), aandrijfkracht, noodstroom, opslag van zonne-energie	TRL 9	generiek product	80-90%	hedendaags beperkte ontwikkelingen	Hoppecke, GS Yuasa, Exide, EnerSys, Leadcrystal (lood-grafiet).
Lithium-zwavel	beperkt	apparaten die lichtgewicht batterijen nodig hebben en lange tijd op één lading kunnen werken, zoals drones of satellieten	TRL 4 - 7	genericiteit is slecht	voorlopig laag	hoog	Voor prototypes; OXIS Energy Morrow Batteries, Li-S Energy, NexTech Batteries, LG Chem
Natrium-ion	beperkt (fabrieken in aanbouw)	ruim, kan de Li-ionbatterij 1 op 1 vervangen	TRL 6	laag	voorlopig lager dan Lithium-ion	hoog	CATL, Faradion, Natron Energy, HiNa Battery, Ronbay Technology, Zoolnash, Natrium, Kishida Chemical, Panasonic, Mitsubishi Chemical, Tiamat

Tabel 18 Economische eigenschappen samengevat voor Lithium-ion, Nikkelmetaalhydride, Loodzuur, Lithium-zwavel, Natrium-ion batterijen

	Investeringskost	Operationele kost	Terugverdientijd
Lithium-ion	gemiddeld, ~156\$/kWh	vereiste onderhoud is matig	geschatte levensduur is lang [25] (afhankelijk van het gebruik en de omgevingsomstandigheden)
Nikkelmetaalhydride	duur	vereiste onderhoud is laag	geschatte levensduur is langer dan die van de loodzuurbatterijen

Loodzuur	Goedkoop tot duur, evenredig met de levensduur	vereiste onderhoud is hoog in geval van natte batterijen en laag bij gesloten batterijen	geschatte levensduur is kort tot lang
Lithium-zwavel	Geen info	Geen info	Geen info
Natrium-ion	voor natriumioncellen ten hoogte van 223.4 €/kWh. Batterijmodules momenteel nog niet in de vrije handel.	Geen onderhoudskosten aan de batterijen, waarschijnlijk wel aan randapparatuur voor elektronica en temperatuurbewaking	Geen info

Tabel 19 Ecologische eigenschappen samengevat voor Lithium-ion, Nikkelmetaalhydride, Loodzuur, Lithium-zwavel, Natrium-ion batterijen

	Duurzaamheid materialen
Lithium-ion	Beperkte bronnen van materialen zoals lithium en kobalt. Recycleerbaar. Recyclagefaciliteiten nemen toe. Strengere Europese wetgeving rond recyclage verwacht.
Nikkelmetaalhydride	De basismetalen zijn tin en nikkel. Het is milieuvriendelijk zonder giftige metalen te bevatten. Vaak worden ook zeldzaam aarden zoals lanthaan toegevoegd en eventueel ook kobalt.
Loodzuur	Bevat onder andere lood als giftig, milieuvervuilend materiaal. De batterijen zijn uitstekend te recycleren.
Lithium-zwavel	Lithium is beperkt voorhanden terwijl zwavel zeer wijdverspreid is. Over benodigde extra stoffen om een werkende batterij te krijgen is weinig bekend.
Natrium-ion	Er worden algemener voorkomende materialen gebruikt dan in Li-ionbatterijen. De recycleerbaarheid zal waarschijnlijk gelijkaardig zijn en daarmee goed. De productie van harde kool uit biomassa gaat gepaard met veel energie terwijl grafiet een delfstof is. Dat maakt de LCA slechter van Na-ion ten opzichte van Li-ion.

Tabel 20 Technische eigenschappen samengevat voor Supercapaciteiten, Hybrid lithium-ion capacitors/Li-condensatoren, vliegwheels

Technisch / Batterij	Beschikbaarheid	Toepasbaarheid	Ontwikkelings status	Mate genericiteit van	Efficiëntie	Innovativiteit	Leveranciers
Supercapaciteiten (elektrochemische dubbellaagcondensatoren)	universeel	transport en toepassingen voor het opwekken van hernieuwbare energie	TRL 9	matig	nauwelijks onder de 100%	hoog	TDK, KEMET, Kyocera AVX, Eaton, Cornell Dubilier (CDE), Maxwell Technologies, Elna, Skeleton
Hybrid lithium-ion capacitors of Li-ioncondensatoren	universeel	beperkt, wanneer meer cycli nodig zijn dan Li-ionbatterijen, maar met een veel lagere capaciteit	TRL 9	matig/ beperkt generiek	heel hoog.	hoog	JSR Micro, FDK, Vinatex, Ioxus, Kurt Energy (voor modules)
Vliegwheels	universeel	toepassingen met gemiddeld/hoog vermogen, tractie en de lucht- en ruimtevaartindustrie	TRL 8	matig	tot 95%	matig	Stometric, Energiestro, S4 Energy, OXTO Energy, Revterra, Amber Kinetics

Tabel 21 Economische eigenschappen samengevat voor Supercapaciteiten, Hybrid lithium-ion capacitors/Li-condensatoren, vliegwheels

	Investeringskost	Operationele kost	Terugverdientijd
Supercapaciteiten (elektrochemische dubbellaagcondensatoren)	voor 1 Wh is de prijs rond \$20. De kost van de maataanpak kan aanzienlijk zijn.	nauwelijks, geen onderhoud nodig.	kort als er enorm veel opslagcycli mogelijk zijn en de ontwikkelkost over vele toestellen verdeeld kan worden.
Hybrid lithium-ion capacitors of Li-ioncondensatoren	vrij hoog door maatwerkoplossing. Indien kleine series mogelijk zijn dan zijn de kosten lager dan van Li-ion batterijen.	beperkt door weinig koelbehoefte, hoog rendement en lange levensduur	redelijk kort bij voldoende aantallen modules die tegelijk kunnen worden gemaakt.
Vliegwheels	1000 tot 14000 (\$/kWh)	Operationele kosten zijn rond 0.004 \$/kWh en 5.6 \$/kW/jaar. Vliegwheels tonen geen ontladingsdiepte-effecten en vereisen maar eenvoudig onderhoud.	levensduur van vliegwheels gelijk aan 15 jaren en zelf langer, of 20000 en zelf meer in termen van aantal cycli.

Tabel 22 Ecologische eigenschappen samengevat voor Supercapaciteiten, Hybrid lithium-ion capacitors/Li-condensatoren, vliegwheels

	Duurzaamheid materialen
Supercapaciteiten (elektrochemische dubbellaagcondensatoren)	De materialen zijn goed beschikbaar. Het elektrolyt is giftig.
Hybrid lithium-ion capacitors of Li-ioncondensatoren	Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn. Uitbundig voorkomende materialen.
Vliegwheels	Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn.

Tabel 23 Technische eigenschappen samengevat voor Redoxflow batterijen, waterstofbrandstofcellen, gecomprimeerde lucht, vloeibare lucht

	Beschikbaarheid	Toepasbaarheid	Ontwikkelingsstatus	Mate van genericiteit	Efficiëntie	Innovativiteit	Leveranciers
Redoxflow batterijen	breed	residentiële en grootschalige stationaire toepassingen (bijv. opslag van energie uit hernieuwbare bronnen en load balancing), elektrische voertuigen	Vanadium: TRL 9 Zink-bromide: TRL 9 Waterstofbromide: TRL 5	hoog	75% - 85% (vanadium redoxflow)	hoog	<i>Vandium</i> : CellCube, VoltStorage GmbH, Sumitomo Electric Industries, Lockheed Martin, United Technologies, Acal Energy, LG Electronics <i>Zinkbromide</i> : Redflow <i>Waterstofbromide</i> : Elestor
Waterstof brandstofcellen	beperkt	mobiliteit, stroomopwekking, militair wegens stil en licht.	TRL 8	beperkt	PEM: 60% met directe H2 en 40% met van gereformeerde brandstof. AFC : 60% PAFC : 40% MCFC : 50% SOFC : 60%.	hoog	HyMove, Nedstack, PowerCell, Intelligent Energy, Hydrogenics, Air Liquide, Nuvera, Ballard Power Systems Inc, Horizon Fuel Cell, Doosan Fuel Cell America, Inc., Hyundai Motor
Energieopslag met gecomprimeerde lucht	beperkt	energieopslag installaties met gecomprimeerde lucht worden gebruikt voor peak shaving, load leveling in netbeheersystemen, opslag van energie tijdens daluren en voor frequentieregeling	TRL 8 - 9	matig	Diabatisch: 55% ; Isotherm: 70-75%; Adiabatisch: 70%	hoog	MAN Energy Solutions SE, Alacaes, Storelectric, Augwind, Highview Power
Energieopslag met vloeibare lucht	beperkt	Integratie van hernieuwbare energiebronnen, uitstel van netwerkversterking, dagelijkse/wekelijkse balancering, Leveringszekerheid (Capaciteitsvoorziening)	TRL 7 - 8	matig	45 – 70%	hoog	MAN Energy Solutions SE, Hugel Energy, Highview Power, Sumitomo Heavy Industries

Tabel 24 Economische eigenschappen samengevat voor Redoxflow batterijen, waterstofbrandstofcellen, gecomprimeerde lucht, vloeibare lucht

	Investeringskost	Operationele kost	Terugverdientijd
Redoxflow batterijen	Vanadium is een duur metaal, dus de kosten vooraf van de elektrolyt en de batterij -eenheid voor en redoxflow batterij is relatief hoog in vergelijking met andere types batterijen. De gemiddelde kost per kWh van vanadium redox flowbatterijen zijn \$ 300-\$ 1000. Dit lijkt op dit moment misschien hoog, maar een daling in deze kost is in de nabije toekomst verwacht.	Beperkt. Er zijn pompen nodig. Er is weinig onderhoud. Het beperkte rendement heeft wel een weerslag op de operationele kost.	Goed. De lange levensduur brengt zekerheid ten opzichte van het terugverdienen van de investeringskost bij aankoop van redoxflow batterijen.
Waterstof brandstofcellen	Voor Micro-WKK toepassingen, tot 5 kW, zullen in de toekomst investeringskosten verlaagd worden, door te dalen tot 3500 EUR/kW in 2030.	voor Mini-WKK toepassingen (5 kW _{el} en 4 kW _{th}) en commerciële WKK (50 kW _{el} en 40 kW _{th}) die meestal met een SOFC-systeem werken, CAPEX-kosten zijn in de toekomst ten hoogste van 18,4 en 16,5 kEUR/kW verwacht.	De levensduur van waterstof brandstofcellen in micro-WKK toepassingen zal in de toekomst verlengd worden, van 12 tot 15 in termen van jaren van operatie.
Energieopslag met gecomprimeerde lucht	200-250€/kWh (afhankelijk van type van energieopslag met gecomprimeerde lucht en maatvoering)	voorlopig geen inschatting te vinden.	een levensduur tussen 20 en 40 jaren kan verwacht worden
Energieopslag met vloeibare lucht	tussen 60 - 600 €/kWh	voorlopig geen inschatting te vinden.	een levenscyclus tussen 22000 en 30000 cycli of een levensduur tussen 20 en 40 jaren kunnen verwacht worden

Tabel 25 Ecologische eigenschappen samengevat voor Redoxflow batterijen, waterstofbrandstofcellen, gecomprimeerde lucht, vloeibare lucht

	Duurzaamheid materialen
Redoxflow batterijen	geen bijzonderheden voor vanadium. Bromide is een giftig materiaal.
Waterstof brandstofcellen	Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn.
Energieopslag met gecomprimeerde lucht	de werking van energieopslag met gecomprimeerde lucht vereist weinig land, maar uitgebreide waterbronnen en stoot broeikasgassen uit
Energieopslag met vloeibare lucht	Er lijken geen specifieke milieuproblemen met de materialen te zijn.

**vision on technology
for a better world**

