



Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat

Routekaart Energieopslag

voorjaar 2023

1. Samenvatting

In het energiesysteem van de toekomst is elektriciteit de belangrijkste energiedrager, vervult waterstof een belangrijke systeemrol en vult decentrale duurzame warmtevoorziening een groot deel van de warmtevraag in. De energieproductie in een duurzaam energiesysteem komt voor het grootste deel uit variabele bronnen als wind en zon. De potentiële verschillen tussen vraag en aanbod zullen daardoor groter zijn dan in het vroegere energiesysteem dat vooral bestond uit regelbare elektriciteitscentrales op basis van kolen en gas en verwarming met aardgas. Dit vergroot het zogenaamde 'flexibiliteitsvraagstuk': om het energiesysteem in balans te houden is flexibiliteit nodig, dat in verschillende (veelal samenhangende) vormen kan worden geboden: (1) flexibele vraagsturing, (2) (CO₂-vrij) regelbaar vermogen, (3) interconnectie (met andere landen), ook wel transport genoemd, (4) conversie en ten slotte (5) energieopslag, het onderwerp van deze routekaart.

De Routekaart Energieopslag brengt in kaart welke acties ondernomen moeten worden om energieopslag te bevorderen, passend bij de verwachte rol ervan in het toekomstige energiesysteem, tot aan 2035 en daarna. In de Routekaart Energieopslag wordt gekeken naar alle vormen van energieopslag, onderverdeeld in elektriciteits-, moleculen- en warmteopslag.

Energieopslag is geen doel op zich, maar kan meerdere doelen dienen, waaronder het balanceren van vraag en aanbod op verschillende tijdschalen, het opvangen van de warmtepiekvraag, het verlichten van netcongestie en het bieden van strategische voorraden. Deze doelen zijn essentieel voor het functioneren van ons huidige energiesysteem, voor het mogelijk maken van de energietransitie en voor de ontwikkeling van het energiesysteem van de toekomst.

Samengevat stelt de Routekaart Energieopslag dat zowel elektriciteits-, moleculen- als warmteopslag nodig (zullen) zijn in ons energiesysteem. Ten eerste omdat ze vraag en aanbod binnen de op zichzelf staande energieketens bij elkaar brengen. Zo kan elektriciteitsopslag zorgen voor meer opwek van wind- en zonne-energie en is warmteopslag cruciaal voor geo- en zonthermie. Ten tweede omdat ze elkaar uitstekend en noodzakelijk aanvullen in termen van vermogen en opslagduur (systeemintegratie c.q. uitwisseling tussen de ketens). Omdat de aard en huidige staat van technische ontwikkelingen tussen elektriciteits-, moleculen- als warmteopslag wezenlijk verschilt, is het van cruciaal belang zo te sturen dat enerzijds de verschillende technieken uiteindelijk op een vergelijkbaar niveau komen en anderzijds conversie tussen technieken (bijvoorbeeld van elektriciteit naar warmte) effectief kan worden benut. Behalve de overheid kunnen ook andere partijen (waaronder netbeheerders en de energieopslagsector) hierin een belangrijke rol spelen.

Daarnaast stelt de Routekaart Energieopslag het volgende:

- Marktwaaarde energieopslag komt niet altijd overeen met maatschappelijke waarde.
- Subsidiesystematiek op basis van CO₂-besparing is onwenselijk voor energieopslag.
- Technische ontwikkelingen zijn nog nodig.
- Er zijn veel kansen voor het Nederlandse verdienvermogen.
- Om doelen te stellen, moeten aanbod en vraag eerst gekwantificeerd worden.

Voor elektriciteitsopslag stelt de Routekaart Energieopslag het volgende:

- De wenselijkheid van thuis- en buurtbatterijen moet verder onderzocht.
- Elektrische auto's bieden enorme kansen voor de maatschappij.
- Grootschalige elektriciteitsopslag heeft veel potentie curtailment te verminderen.
- Batterijen zijn nodig ter ondersteuning van het elektriciteitsnet.
- (Landelijke) Sturing is nodig om wildgroei batterijen te voorkomen.
- Mogelijkheden elektriciteitsopslag nog niet in lijn met de behoeften.

Voor moleculenopslag stelt de Routekaart Energieopslag het volgende:

- Moleculenopslag is nodig, maar kent grote uitdagingen én onzekerheden.
- Voor moleculenopslag moeten keuzes (snel) worden gemaakt.

Voor warmteopslag stelt de Routekaart Energieopslag het volgende:

- Lokale seizoensopslag van warmte (seizoensopslag) is nodig voor duurzame warmtevoorziening.
- Korte-termijn warmteopslag is van invloed op de elektriciteitsvoorziening.
- Conversie van en naar warmteopslag speelt een belangrijke rol.
- Onbekendheid van en met warmteopslag is een knelpunt voor uitrol van warmteopslag.
- Meer kennisdeling en kennisopbouw is nodig m.b.t. duurzaam gebruik van de ondergrond, incl. uitbreiding van het regulerend kader.

1.1 Inhoudsopgave

1.	Samenvatting	2
1.1	Inhoudsopgave	4
1.2	Figuren	5
1.3	Tabellen	5
1.4	Afkortingen en begrippen	6
2.	Introductie	9
2.1	Aanleiding	9
2.2	Achtergrond	9
2.3	Opbouw en aanpak	10
2.4	Kiezen tussen energieopslagtechnieken	11
2.5	Randvoorwaarden voor energieopslag	13
3.	Toepassingen van energieopslag	16
3.1	Aanbod van en vraag naar energie	16
3.2	Energieopslag en samenhang met transport en conversie	18
3.3	Energieopslag (algemeen)	19
3.4	Functies versus Technieken	21
3.5	Marktwerving	24
3.6	Actoren in energieopslag	29
 4.	Elektriciteitsopslag	30
4.1	Analyse van elektriciteitsopslag in Nederland	31
4.2	Analyse van elektriciteitsopslag in omringende landen	37
4.3	Verwachte ontwikkelingen elektriciteitsopslag in Nederland	37
4.4	Benodigde acties en mijlpalen	45
 5.	Moleculenopslag	49
5.1	Analyse van moleculenopslag in Nederland	50
5.2	Analyse van moleculenopslag in omringende landen	54
5.3	Verwachte ontwikkelingen moleculenopslag in Nederland	55
5.4	Benodigde acties en mijlpalen	61
 6.	Warmteopslag	65
6.1	Analyse van warmteopslag in Nederland	66
6.2	Analyse van warmteopslag in omringende landen	72
6.3	Verwachte ontwikkelingen warmteopslag in Nederland	73
6.4	Benodigde acties en mijlpalen	77
7.	Conclusies en aanbevelingen	81
7.1	Energieopslag in het algemeen	81
7.2	Elektriciteitsopslag tot 2035	83
7.3	Moleculenopslag tot 2035	86
7.4	Warmteopslag tot 2035	86
7.5	Aangrijpingspunten voor beleidsontwikkeling	88
7.6	Aanbevelingen voor actoren	91
7.7	Bibliografie	94

8.	Bijlagen	98
8.1	Bijlage 1: Energie efficiëntie heeft een grote impact	98
8.2	Bijlage 2: Matchmaking tabel: Functies versus technologieën	99
8.3	Bijlage 3: Energieopslag in referentielanden	108
8.4	Bijlage 4: Elektriciteitsopslag, overzicht technieken	112
8.5	Bijlage 5: Molecuulopslag, overzicht energiedragers en ontwikkelingen	114
8.6	Bijlage 6: Warmteopslag, overzicht technieken	116
8.7	Bijlage 7: Warmteopslag, case studies	117
8.8	Bijlage 8: Benodigd ruimtebeslag voor 100% hernieuwbare opwek	120

1.2 Figuren

Figuur 1	De vijf (5) mogelijke vormen van flexibiliteit voor het energiesysteem	9
Figuur 2a	Fluctuaties in aardgas- en elektriciteitsverbruik in Nederland	17
Figuur 2b	Fluctuaties van aanbod in wind- en zonne-energie en vraag naar elektriciteit in Nederland	17
Figuur 3	Versimpelde weergave energiesysteem met hernieuwbare energie en flexibiliteit	18
Figuur 4	Mogelijke manieren om Energieopslag te categoriseren	19
Figuur 5	Overzicht van belangrijke conversie technieken	21
Figuur 6	Samenspel van energieopslagstechnieken op verschillende tijd- en grootteschalen (TNO, 2020)	22
Figuur 7	Overzicht energiehandel en balanshandhaving met tijdschalen	25
Figuur 8	Versimpelde weergave energiesysteem met elektriciteitsopslag	31
Figuur 9	Overzicht mijlpalen elektriciteitsopslag tot aan 2035	45
Figuur 10	Versimpelde weergave energiesysteem met molecuulopslag	50
Figuur 11	Overzicht mijlpalen molecuulopslag tot aan 2035	61
Figuur 12	Versimpelde weergave energiesysteem met warmteopslag	66
Figuur 13	Investeringskosten voor diverse warmteopslag technologieën (Schmidt, 2018)	68
Figuur 14	Overzicht mijlpalen warmteopslag tot aan 2035	77
Figuur 15	Vergelijking efficiëntie van batterij en waterstof	98
Figuur 16	Locatie van de HTO installatie van ECW Middenmeer (Hamm, 2021)	117
Figuur 17	E-boiler Ypenburg als onderdeel van het Haagse Stadswarmtenet (Eneco, 2020)	118
Figuur 18	Schematische illustratie vijfde generatie district heating en cooling (5GDHC) netwerk (Boesten, 2019)	119

1.3 Tabellen

Tabel 1	Afkortingen en Begrippen gebruikt in de Routekaart Energieopslag	6
Tabel 2	Randvoorwaarden en specifieke aandachtspunten voor energieopslag	14
Tabel 3	Matchmaking: energieopslag functies en technieken	23
Tabel 4	Actie agenda elektriciteitsopslag	46
Tabel 5	Overzicht van Nederlandse ondergrondse opslagen en kenmerken	51
Tabel 6	Actie agenda molecuulopslag	62
Tabel 7	Actie agenda warmteopslag	78
Tabel 8	Toelichting op functies en termijnen energieopslag volgens het IEA	99
Tabel 9	Technology Readiness Level (TRL) niveaus	99
Tabel 10	Matchmaking tabel met toelichting	100
Tabel 11	Overzicht energieopslag beleid in referentielanden	111
Tabel 12	Overzicht ontwikkeling elektriciteitsopslag batterijen	112
Tabel 13	Overzicht ontwikkeling elektriciteitsopslag kinetische energie	113
Tabel 14	Overzicht ontwikkeling elektriciteitsopslag potentiële energie en conversie waterstof	113
Tabel 15	Overzicht van warmteopslag technieken	116

1.4 Afkortingen en begrippen

Tabel 1 Afkortingen en Begrippen gebruikt in de Routekaart Energieopslag

5GDHC	Vijfde generatie warmte en koudenetten (netwerk), stedelijke netten voor verwarming én koeling
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve (balanceringsproduct TenneT)
Achter-de-meter	Met “achter” wordt bedoeld: gezien vanuit het net. Bij een energiegebruiker is het: aan de gebruikszijde van de meter. Bij een energieopwekker is het: aan de opwekzijde van de meter.
ACM	Autoriteit Consument & Markt (toezichthouder elektriciteit en gas)
AFIR	Alternative Fuel Infrastructure Regulation, EU Verordening voor de uitrol Infrastructuur Alternatieve Energiedragers (BEVs en FCEVs)
ATES	Aquifer Thermal energy storage
ATO	Aansluit- en Transport Overeenkomst
BBL	Bacton en Balgzand lijn, gaspijpleiding tussen Nederland en het VK
BENG	Bijna-energie neutrale gebouwen (wetgeving)
BEV's	Battery Electric Vehicles (volledig elektrische auto's)
BRP	Balance Responsible Party oftewel programmamaverantwoordelijke voor TenneT
BSP	Balancing Service Provider
BTES	Borehole Thermal Energy Storage
BZ	Ministerie van Buitenlandse Zaken
BZK	Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
BVES	Bundesverband Energiespeicher Systeme (Duitsland)
CAES	Compressed Air Energy Storage, in het Nederlands: persluchtinstallaties
CERES	Centrale Registratie van Systeemelementen van netbeheerders
CES	Cryogenic Energy Storage, waartoe LAES (vloeibare luchtopslag) en opslag van vloeibare stikstof worden gerekend
CSP	Congestion Service Provider oftewel congestiemanagementdienstverlener
CSP	Concentrated Solar Power plants, opwek zonnewarmte in zouten
DEI+	Demonstratie Energie- en Klimaatinnovatie
EASE	European Association for Storage of Energy
EB	Energiebelasting
EBN	Energie Beheer Nederland, investeert in opdracht van de Nederlandse Staat investeert EBN in het opsporen, winnen en opslaan van aardgas en aardolie.
EIA	Energie Investeringsaftrek
EPBD	Energy performance of buildings directive III (2010), een richtlijn van de Europese Commissie waarmee zij binnen de EU een verbeterde energieprestatie voor gebouwen wil stimuleren.
EUDP	Energy Technology Development and Demonstration Program
EZK	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Fin	Ministerie van Financiën
FCEV	fuel cell electric vehicle
FCR	Frequency Containment Reserve (balanceringsproduct TenneT)
FTE	Fulltime-equivalent, komt overeen met één werkweek van een persoon
GDS	Gesloten distributie systeem
GOPACS	Online platform van Nederlandse netbeheerders om capaciteitstekorten in het elektriciteitsnet (congestie) te verminderen
GTS	Gasunie Transport Services (beheerder gasnet)

GVO	Garanties van Oorsprong
HER+	Subsidie Hernieuwbare Energietransitie
HT	Hoge temperatuur (warmtenet)
HTSM	Topsector High Tech Systemen en Materialen
IBO	Interdepartementaal beleidsonderzoek
IEA	Internationaal Energie Agentschap
IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
IPCEI	Important Project of Common European Interest
IPO	Interprovinciaal Overleg
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau (Duitsland)
KVA	Kleinverbruikersaansluiting
LAES	Liquid Air Energy Storage, in het Nederlands: vloeibare luchtopslag
LAN	Landelijk Actieprogramma Netcongestie
LDES	Long(er)-duration Energy Storage
Li-ion	Lithium-ion batterij
LNG	Liquefied natural gas, oftewel vloeibaar gemaakt aardgas
LOHC	Liquid organic hydrogen carriers
LT	lage temperatuur (warmtenetten)
MLOEA	Meerdere leveranciers op een aansluiting
MOOI	Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie
MT	midden temperatuur (warmtenet)
NAB	Nationale Actieagenda Batterijsystemen
Na-S	natrium-zwavel (batterij)
NBP	National Balancing Point, de Europese gasmarkt (gelegen in het VK)
NFA	Non-firm Aansluit- en Transport-Overeenkomst
NIS2	Network- and Information Security Directive (EU)
NTA 8800	Nederlandse technische afspraak 8800 (2023), de methode voor de bepaling van de energieprestatie van gebouwen, waarmee onder meer gerekend kan worden om aan te tonen dat men voldoet aan BENG wetgeving.
NWP	Nationaal Waterstof Programma
NPE	Nationaal Plan Energiesysteem
NPLW	Nationaal Programma Lokale Warmtetransitie
O-PAC	Ondergrondse pompaccumulatie
PAW	Programma Aardgasvrije Wijken
PCM	Phase change Materials (faseovergang materialen)
Peakshaving	het verlagen van een energierekening door het verlagen van de hoogste verbruikspiek die de het elektriciteitsstarief bepaalt
PEGA	Parlementaire Enquête aardgaswinning Groningen
PEH	Programma Energiehoofdstructuur
PGS35	Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 35
PHS	Pumped Hydro Storage, in het Nederlands: waterkrachtcentrales
PPP	publiek-privaat partnerschap
PPS-toeslag	Privaat-Publieke Samenwerkingen-toeslag: voor iedere euro die een bedrijf bijdraagt aan research & development (R&D) door een onderzoeksorganisatie, legt EZK er € 0,30 bij. Die PPS-toeslag moet weer worden gebruikt voor R&D.

PTEs	Pit Thermal Energy Storage
P2G	Power-to-Gas
P2H	Power-to-Heat
P2H2	Power-to-Hydrogen (waterstof)
P2X	Power-to-X
RCR	Rijkscoördinatieregeling
RDD	research, development & demonstration
RED	Renewable Energy Directive (EU)
RFNBO	Renewable liquid and gaseous fuels of non-biological origin volgens de EU RED (Art. 2.36)
ROBUST	Rural-Urban Outlooks: Unlocking Synergies (onderzoeksproject)
ROM	Regionale Ontwikkelingsmaatschappij
RVO	Rijksdienst voor Ondernemen, een uitvoeringsorganisatie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
SDE++	Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie
SMCES	Smart Multi Commodity Energy System
SoC	State of Charge, de laadstatus van een batterij van een elektrische auto
SodM	Staatstoezicht op de Mijnen (toezichhouder ondergrond)
TAVT	Transportafhankelijke gebruikerstransporttarief
TCBB	Technische Commissie Bodembeweging
TCM	Thermochemische materialen
TCP	Technology Collaboration Programme (IEA)
TKI	Topconsortia voor Kennis en Innovatie
TOC	Transport & opslag & conversie
TRL	Technology-readiness level
TSE	Topsector Energie
TTES	Tank Thermal Energy Storage
T-4, T-1	vier/één jaar vooruit
UHS	Underground Hydrogen Storage
V2G	Vehicle-to-Grid
Voor-de-meter	Met “voor” wordt bedoeld: gezien vanuit het net. Bij zowel een energieopwekker als een energiegebruiker is het: aan de netzijde van de meter.
VRFB	Vanadium Redox Flow Battery
Wcw	Wet collectieve warmtevoorziening
WKK	Warmte-krachtkoppeling
Wva 2012	Wet voorraadvorming olieproducten (2012)
ZLT	Zeer lage temperatuur

2. Introductie

2.1 Aanleiding

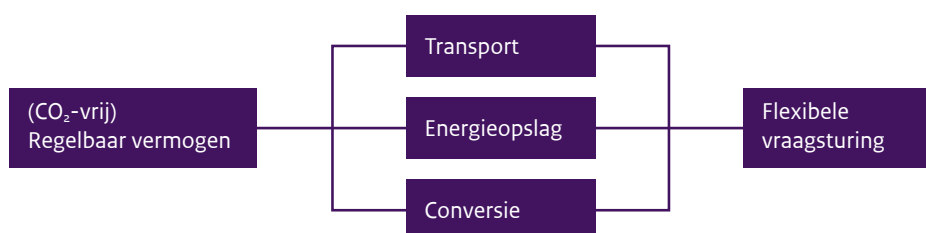
Tijdens het Commissiedebat Elektriciteitsnet, energie-infrastructuur en RES op 28 september 2022, heeft de Minister voor Klimaat en Energie aan de Tweede Kamer een routekaart energieopslag toegezegd.

De Routekaart Energieopslag brengt in kaart welke acties ondernomen moeten worden om energieopslag te bevorderen, passend bij de verwachte rol ervan in het toekomstige energiesysteem, tot aan 2035 en daarna. In de Routekaart Energieopslag wordt gekeken naar alle vormen van energieopslag, onderverdeeld in elektriciteits-, moleculen- en warmteopslag.

2.2 Achtergrond

In het energiesysteem van de toekomst is elektriciteit de belangrijkste energiedrager, vervult waterstof een belangrijke systeemrol en vult decentrale duurzame warmtevoorziening een groot deel van de warmtevraag in. De energieproductie in een duurzaam energiesysteem komt voor het grootste deel uit variabele bronnen als wind en zon. De potentiële verschillen tussen vraag en aanbod zullen daardoor groter zijn dan in het vroegere energiesysteem dat vooral bestond uit regelbare elektriciteitscentrales op basis van kolen en gas en verwarming met aardgas. Dit vergroot het zogenaamde 'flexibiliteitsvraagstuk': om het energiesysteem in balans te houden is flexibiliteit nodig, dat in verschillende (veelal samenhangende) vormen kan worden geboden: (1) flexibele vraagsturing, (2) (CO₂-vrij) regelbaar vermogen, (3) interconnectie (met andere landen), ook wel transport genoemd, (4) conversie en ten slotte (5) energieopslag, het onderwerp van deze routekaart.

Figuur 1 De vijf (5) mogelijke vormen van flexibiliteit voor het energiesysteem



Meer uitleg hierover in paragraaf 3.1, Figuur 2

Energieopslag heeft de afgelopen jaren steeds meer aandacht gekregen. Enerzijds omdat het al geruime tijd een cruciale rol speelt in ons energiesysteem. Dit werd bijvoorbeeld vorig jaar duidelijk toen de vulgraad van de Nederlandse en Europese gasopslagen achterbleef en overheden ingrepen om te zorgen dat er in aanloop naar de winter 2022/2023 voldoende gas in gasopslag werd gedaan. Anderzijds omdat het – terecht – tot onze verbeelding spreekt: de ontwikkelingen gaan snel en de grenzen zijn nog lang niet bereikt. Zo is in oktober 2022 de grootste batterij van Nederland geopend in Lelystad (GIGA Buffalo, 24 MW/48MWh) terwijl er inmiddels voor 2023 twee grotere batterijen zijn aangekondigd in Vlissingen en circa 3 GW op het Aldelterrein in Delfzijl. Deze batterijen spelen een belangrijke rol in het balanceren van vraag en aanbod op het elektriciteitsnet.

Energieopslag is geen doel op zich, maar kan meerdere doelen dienen, waaronder het balanceren van vraag en aanbod op verschillende tijdsschalen, het opvangen van de warmtepiekvraag, het verlichten van netcongestie en het bieden van strategische voorraden. Deze doelen zijn essentieel voor het functioneren van ons huidige energiesysteem, voor het mogelijk maken van de energietransitie en voor de ontwikkeling van het energiesysteem van de toekomst.

2.3 Opbouw en aanpak

De Routekaart Energieopslag bevat drie belangrijke elementen:

1. een analyse van de huidige staat van energieopslag in Nederland en een overzicht van verwachte ontwikkelingen in de toekomst;
2. een inventarisatie van acties voor succesvolle uitrol van energieopslag in Nederland tot 2035, met specifieke actiehouders en beoogde deadlines;
3. een verdiepende analyse ter voorbereiding op beleidskeuzes die gemaakt moeten worden voor de langetermijnvisie van het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) (concept voor de zomer, definitief plan eind 2023).

Methodiek

Om tot de Routekaart Energieopslag te komen zijn de ontwikkelingen op het gebied van energieopslag in NL in kaart gebracht, o.a. op basis van openbare data en CERES-data¹. Voor een internationale (qua ontwikkelingen en beleidskeuzes) zijn Duitsland, België, het Verenigd Koninkrijk en Denemarken gekozen als referentielanden, vanwege hun nabijheid en de vergelijkbare inrichting van hun energiesystemen. Voor deze referentielanden is openbare data verzameld. Ook is informatie gebruikt van het Technology Collaboration Programme (TCP) voor Energy Storage van het Internationaal Energie Agentschap (IEA), waar Nederland aan deelneemt. Een overzicht van de gebruikte bronnen is te vinden in de bibliografie (7.7). Daarnaast is ook gebruik gemaakt van bevindingen van een aantal onderzoeken dat nog loopt:

- “Opties voor flexibiliteit in het elektriciteitssysteem”, TNO, nog te publiceren (2023) (in opdracht van EZK).
- “Fundamentele Keuzevragen”, Ecorys nog te publiceren (2023) (in opdracht van RVO en de Topsector Energie).

In samenwerking met branchevereniging Energy Storage NL zijn op woensdag 8 februari 2023 ophaalsessies georganiseerd met marktpartijen. Voorafgaand aan de ophaalsessie konden deelnemers knelpunten en mogelijke acties aanleveren. Tijdens de ophaalsessies zijn de voorlopige bevindingen en mogelijke acties besproken.

Voor externe validatie van dit document is TNO gevraagd mee te lezen.

De te beleggen acties zijn afgestemd met de genoemde actiehouders.

Relatie Routekaart Energieopslag en Nationaal Plan Energiesysteem (NPE)

In december 2021 hebben de staatsecretaris van Energie en Klimaat en de minister van Economische Zaken en Klimaat bekend gemaakt toe te werken naar een Nationaal plan energiesysteem (NPE)². Het NPE zal een centrale rol vervullen bij het voeren van de regie in de energietransitie. Het behalen van de klimaatdoelen is daarbij het uitgangspunt. Het NPE wordt in 2023 gepubliceerd, eerst in concept en daarna definitief.

Het NPE ziet toe op een meer gecoördineerde ontwikkeling van de energietransitie, waarbij de verschillende schakels in het energiesysteem zo goed mogelijk op elkaar worden afgestemd. Zo wordt in het NPE o.a. uitgewerkt wat de verwachte rol is van de verschillende vormen van flexibiliteit (incl. energieopslag) en wat de inzet van het Rijk is om deze op te schalen.

¹ CERES is de Centrale Registratie van Systeemelementen van netbeheerders.

² Kamerbrief ‘Naar een nationaal plan voor het energiesysteem 2050’, 17 december 2021

Voor energieopslag betekent dat het volgende:

- De Routekaart Energieopslag zet op een rij wat de verschillende rollen van energieopslag zijn en hoe die zich kunnen ontwikkelen.
- Het NPE beschrijft de relatie van energieopslag met andere delen van het energiesysteem (bijv. opwek, gebruikers, etc.) en kwantificeert waar mogelijk.

In juni 2022 heeft de Minister voor Klimaat en Energie een update gegeven over de voortgang van het NPE³. Uit deze update zijn met name de ontwerpprincipes die de Minister voor Klimaat en Energie hanteert bij het registreren van de energietransitie van belang; zie paragraaf 2.4.1.

Doelen voor Energieopslag?

Een cruciale en onzekere factor voor beleidsontwikkeling voor de lange termijn (2035-2050) is de toekomstige vraag naar de verschillende vormen van energie, bijvoorbeeld hoeveel elektriciteit benodigd zal zijn voor de industrie, of hoeveel van welke energiebron de gebouwde omgeving gaat gebruiken voor de warmtevoorziening. Op basis hiervan kan ook een beter beeld ontstaan van hoeveel energieopslag er in welke vorm en voor welke toepassing nodig is. Met het NPE wordt geprobeerd hier een zo scherp mogelijk beeld van te krijgen. Hiermee kan ook beter ingeschat worden of huidige ontwikkelingen in energieopslag kunnen leiden tot de gewenste eindsituatie. Waar dat niet het geval blijkt, kan het stellen van kwantitatieve subdoelen worden overwogen om richting te geven aan marktinvesterings- en beleid. Voorbeelden van mogelijke subdoelen kunnen zijn: het benodigde vermogen elektriciteitsopslag, het aantal benodigde zoutcavernes voor waterstofopslag of het aantal gewenste midden- en hoge-temperatuur seizoensopslagen van warmte. De mogelijk- en wenselijkheden van de andere oplossingen moeten hierbij scherp in de gaten worden gehouden: energieopslag is niet de enige oplossing voor het volledige flexibiliteitsvraagstuk.

2.4 Kiezen tussen energieopslagtechnieken

De Routekaart Energieopslag is technologieneutraal geschreven. In principe spreekt de overheid geen voorkeur uit voor één of enkele energieopslagtechnieken. Dat wil niet zeggen dat de overheid op basis van nationale, regionale of lokale belangen geen keuzes zal maken, bijvoorbeeld door wel of geen vergunning af te geven voor een project. De Routekaart Energieopslag zet op een rij wat de verschillende rollen van energieopslag zijn en hoe verschillende technieken zich tot elkaar verhouden. Waar mogelijk worden richtinggevendende uitspraken gedaan en aangrijpingspunten gegeven voor nieuw beleid, zodat (ruimtelijke) beleidstrajecten hierop kunnen voortborduren. Zo kan het zijn dat op basis van de hierna genoemde publieke belangen, de ene flexibiliteitsoplossing wenselijker is voor een bepaalde toepassing dan de andere. De balans die tussen flexibiliteitsoplossingen tot stand komt op basis van marktmechanismen zal misschien niet deze maatschappelijk gewenste balans reflecteren, bijvoorbeeld vanwege gebrek aan toegang tot de markt of niet in te prijzen effecten (bijv. op veiligheid en leefomgevingskwaliteit). De overheid kan er dan voor kiezen om hier op te sturen (bijv. middels subsidies, of zoals hierboven genoemd het verstrekken van vergunningen). Deze keuzes kunnen landelijk/generiek zijn, maar ook gebied specifiek.

2.4.1 Ontwerpprincipes Nationaal Plan Energiesysteem

In de kamerbrief 'Contouren Nationaal Plan Energiesysteem' benoemt de Minister voor Klimaat en Energie de ontwerpprincipes die hij hanteert bij het registreren van de energietransitie. Deze ontwerpprincipes kunnen helpen bij het maken van keuzes tussen verschillende opslagtechnieken:

- Duurzaamheid
- Leveringszekerheid
- Betaalbaarheid
- Veiligheid
- Leefomgevingskwaliteit
- Maatschappelijke betrokkenheid (vooral van belang bij instrumenteren)

³ Kamerbrief 'Contouren Nationaal Plan Energiesysteem', 10 juni 2022

Daarbij weegt het NPE hierbij ook een rechtvaardige verdeling van lusten en lasten in de energietransitie en de economische ontwikkeling van Nederland mee. Robuustheid is ook een belangrijk uitgangspunt, wat vooral tot uiting komt door diversiteit in het energiesysteem na te streven.

2.4.2 Energie-efficiëntie

Energie-efficiëntie werkt door in alle andere factoren. Als er bruikbare energie verloren gaat, dan moet er meer primaire energie opgewekt worden. Dat betekent meer ruimtelijke impact, grondstoffengebruik, kosten en veiligheidsimpact van zonnepanelen, windturbines en energieopslag. Energie-efficiëntie heeft daarmee een enorme impact op alle aspecten van het energiesysteem. Tegelijkertijd zijn de schaalgrootte, reactievermogen (tijdschaal) en specifieke kosten van belang bij het selecteren van een bepaalde techniek. Zo is een elektriciteitscentrale op basis van waterstof een relatief energie-inefficiënte vorm van flexibiliteit, maar toch zal dit ook in de toekomst een plek moeten krijgen in de flexibiliteitsmix ten behoeve van een geheel functionerend energiesysteem. Het gaat dus om het vinden van een goede balans tussen verschillende flexibiliteitsoplossingen, waarbij energie-efficiëntie voor een groot deel deze balans bepaalt. Voorbeeldberekeningen staan in de bijlage (8.1).

2.4.3 De rol van vergunningen en ruimtelijk beleid in Nederland

Over het algemeen wordt een energieopslag-project geïnitieerd door een marktpartij die hiervoor bij de bevoegde overheidsorganen vergunningen aanvraagt. Indien het project niet past binnen de vigerende bestemming, moet het project worden ingepast middels een ruimtelijk besluit. Voor kleine projecten gaat dit via gemeenten, voor wat grotere projecten via provincies en voor projecten van nationaal belang kan dit de Rijksoverheid zijn.

Indien een lokaal project van nationaal belang is, kan op grond van wetgeving de Rijkscoördinatie Regeling (RCR) van toepassing zijn, of kan de Rijksoverheid deze van toepassing verklaren. Dat wil niet zeggen dat dan de lokale belangen van minder gewicht worden geacht. Besluiten worden in dat geval zorgvuldig afgestemd met de lokale en/of regionale overheden om tot een goede ruimtelijke inpassing te komen waarbij alle relevante belangen worden meegewogen.

Energieopslag is voor veel overheden een relatief nieuwe (ruimtelijke) functie. Bovendien bestaat er voor een aantal opslagtechnieken behoefte aan aanvullend ruimtelijk beleid. Komende tijd zal, op verschillende schaalniveaus, het (ruimtelijk) beleid t.a.v. energieopslag nader moeten worden uitgewerkt. Op nationaal niveau gebeurt dit o.a. via het NPE en het PEH. Hierbij zijn niet alleen de directe leefomgevingseffecten van opslag van belang, maar ook de bredere effecten op het energiesysteem, in de eerste plaats de (ruimtelijke) efficiëntie van het systeem als geheel.

Via de werkwijze 'integraal programmeren' werken Rijk, provincies, gemeenten en netbeheerders samen om tot ruimtelijk structurerende keuzes voor het energiesysteem, waaronder energieopslag, te komen. In de Nationale Omgevingsvisie (NOVI) zijn uitgangspunten vastgelegd die helpen bij het maken van (ruimtelijke) keuzes voor het energiesysteem, zo ook voor energieopslag. Kern vormen de volgende drie afwegingsprincipes: (1) meervoudig ruimtegebruik, (2) kenmerken en identiteit van een gebied staan centraal en (3) afwentelen wordt voorkomen.

Het NOVI-afwegingsprincipe 'Gebiedskenmerken centraal' impliceert gebiedsgericht kijken waar de kansen voor energieopslag liggen, en zo bepalen wat voor een specifiek gebied de beste oplossing is, binnen de gestelde kaders en uitgangspunten. Dit moet op elke schaal gebeuren. Op grond van bekende gebiedskenmerken, in combinatie met de informatie uit deze routekaart, kan reeds een eerste inschatting worden gemaakt welke systemen in welke gebieden en op welke schaal kansrijk zijn of kansen bieden.

Experimenteren is daarbij ook van belang en biedt mogelijkheden voor technieken die nog niet zover ontwikkeld zijn, maar die gezien het onderscheidend vermogen op cruciale kenmerken toch een belangrijke plek in het lokale -, regionale – of nationale energiesysteem in kunnen nemen. Zo kan mede bepaald worden hoe het ‘beleid gericht op innovatie (en versnelde opschaling)’ ingevuld wordt.⁴

Voorbeelden:

- Voor zoutcavernes, die gebruikt kunnen worden voor opslag van waterstof of voor Compressed Air Energy Storage (CAES, in het Nederlands: persluchtinstallaties), is er sprake van beperkt beschikbare ruimte. Het lijkt wenselijk dat de overheid op korte-termijn kiest hoe de beschikbare opslagcapaciteit in zoutcavernes gebruikt zal worden. In hoofdstuk 5 wordt verder ingegaan op dit voorbeeld.
- De meeste opslaginstallaties voor elektriciteit maken gebruik van lithium-ion (Li-ion) batterijen. Vanwege de hoge energiedichtheid van deze vorm van opslag is het ruimtegebruik beperkt. Desalniettemin vraagt iedere opslaginstallatie om een zorgvuldige inpassing met het oog op ruimtelijke kwaliteit en veiligheid voor de omgeving. Veel decentrale overheden hebben nog beperkt ervaring met opslagprojecten. Er ontstaan daardoor verschillen in de eisen die decentrale overheden stellen. Marktpartijen geven aan dat veel decentrale overheden het belang van energieopslag voor het energiesysteem niet altijd voldoende inzien. Ontwikkelaars ondervinden daardoor soms weerstand bij de realisatie van opslagprojecten. Provincies en gemeenten kijken ook naar de Rijksoverheid om met kaders te komen voor hoe het beste om kan worden gegaan met de vele aanvragen voor energieopslag die nu bij hun binnenkomen. Decentrale overheden hebben soms beperkt zicht op het nut van energieopslag. In hoofdstuk 4 wordt verder ingegaan op dit voorbeeld.

2.4.4 EU aanbevelingen voor energieopslag (maart 2023)

Op 14 maart 2023 heeft de Europese Commissie (EC) aanbevelingen aan de EU lidstaten gedaan voor energieopslag (EC, 2023) onder meer dat zij energieopslag opnemen in het nationale energiebeleid. De EC onderstreept hiermee het belang van de rol van energieopslag als een manier om flexibiliteit in het energiesysteem te hanteren. Meer concreet benoemt de EC o.a. de volgende zaken, die in de Routekaart Energieopslag worden opgevolgd:

- De potentie van BEVs voor netondersteuning, Vehicle-to-Grid (V2G), zie hiervoor paragraaf 4.3.1.
- Achter-de-meter oplossingen, zie hiervoor paragraaf 4.3.1.
- De mogelijkheden voor netondersteuning en de aanbeveling dit op te nemen in de plannen van TSOs, zie hiervoor paragraaf 4.3.1.
- Het belang van transparantie en de beschikbaarheid van real-time data over netcongestie, curtailment, marktprijzen, uitstoot van broeikasgassen en ontwikkeling van energieopslag faciliteiten. Zie hiervoor de actie 17 in paragraaf 4.4.2.

2.5 Randvoorwaarden voor energieopslag

Het energiesysteem van de toekomst is nog niet in detail ontworpen en zal dat ook niet kunnen worden. Veel van de uiteindelijke onderdelen, waaronder opslag, zullen zich in de toekomst moeten aandienen en een plekje in het systeem opeisen. Om er voor te zorgen dat de oplossingen zich ook daadwerkelijk aandienen, is het van belang dat de overheid de randvoorwaarden schept waarbinnen energieopslag zich kan ontwikkelen.

Veel van die randvoorwaarden komen overeen met de randvoorwaarden voor de ontwikkeling van technologie en infrastructuur. Omdat energieopslag ook kan leiden tot ondergronds ruimtegebruik worden bij de hantering van de ontwerpprincipes uit het Nationaal Plan Energiesysteem ook de structurerende keuzes uit de Kamerbrief ‘Water & Bodem Sturend’ meegenomen. In de Routekaart Energieopslag gaan we specifiek in op de randvoorwaarden voor energieopslag:

⁴ Zie ook de website: [Het energiesysteem ruimtelijk in beeld \(ruimtevoorenergie.nl\)](https://ruimtevoorenergie.nl)

Tabel 2 Randvoorwaarden en specifieke aandachtspunten voor energieopslag

Randvoorwaarde en omschrijving	Specifieke aandachtspunten energieopslag
Beleidskader: welk beleid en regelgeving is nodig?	- Verschillende obstakels, uitdagingen en acties. - Internationale wetgeving (bijv. EU). - Ruimtelijke beleid: ruimte is schaars, steeds moet een afweging gemaakt worden welke functie het best vervuld kan worden op welke plek, zowel bovengronds als ondergronds, en hoe deze functie het best kan worden vormgegeven.
Veiligheidsaspecten: hoe is de veiligheid gewaarborgd?	- Omgevingsveiligheid van de verschillende energieopslag technologieën (zie onder). - Veiligheid van ondergrondse waarden, zoals grondwaterkwaliteit. - Economische veiligheid.
Innovatie: welke innovaties zijn nodig?	- Energieopslagtechnieken die verkeren in fase vroege opschaling. - Ontbrekende functionaliteiten (versus technologieën). - Beschikbaarheid materialen. - Innovaties in (ruimtelijk) ontwerp van energieopslagtechnieken.
Maatschappelijke acceptatie: hoe worden de belangen van burgers gewaarborgd?	- Duurzaamheid en circulariteit. - Impact op de leefomgeving. - Communicatie over de rol en het belang van energieopslag (en flexibiliteit in brede zin).
Maakindustrie: hoe kan het verdienvermogen van Nederland worden vergroot?	Kansen voor de maakindustrie.
Human capital agenda: wie voert de projecten uit en wat zijn de kansen m.b.t. arbeidskrachten?	Net als bij andere technologie en infrastructuur: er is een tekort aan geschikte arbeidskrachten.

Toelichting op de randvoorwaarde veiligheid

De randvoorwaarden rond veiligheid worden nader bepaald met specifiek risicobeleid voor energieopslag. Het kader voor beleidsvorming, vergunningverlening, toezicht en communicatie wordt gevormd door de interdepartementale 'Uitgangspunten voor verantwoord omgaan met fysieke veiligheids- en gezondheidsrisico's in een voortvarende energietransitie'. Voor situaties waar de verduurzaming van de energievoorziening nog onvoldoende toegespitst beleid of regelgeving heeft, ontwikkelt de Rijksoverheid zogenaamde richtsnoeren, die duidelijkheid bieden voor het omgaan met de veiligheidsrisico's. Er zijn inmiddels richtsnoeren beschikbaar voor waterstof in het algemeen en voor waterstof bij verwarmingsprojecten van woonhuizen.

Bij economische veiligheid gaat het om het ongestoord functioneren van ons land als een effectieve en efficiënte economie. Voor de economische veiligheid van Nederland zijn drie elementen van essentieel belang: (1) de continuïteit van vitale processen, (2) het mitigeren van risicovolle strategische afhankelijkheden, en (3) het voorkomen van de ongewenste overdracht van kennis en technologie (AIVD, MIVD en NCTV, 2022).

De oorlog in Oekraïne en de coronacrisis hebben invloed op onze handelspolitiek en onze buitenlandpolitiek (AIVD en MIVD, 2023). Statelijke actoren zetten zowel legitieme als illegitieme activiteiten in om hun doelen te bereiken. In veel gevallen is sprake van legale economische activiteiten die desondanks een dreiging vormen, zoals overnames en investeringen, het aankopen van bepaalde technologie en het aangaan van internationale samenwerkingsverbanden. In andere gevallen zetten statelijke actoren meer heimelijke methoden in, zoals digitale spionage en het gebruik van insiders om kennis te vergaren. De verschillende legale en illegale middelen worden zowel afzonderlijk als in combinatie door staten ingezet. De gecombineerde, hybride inzet van het instrumentarium verhoogt de kans van slagen om een product of technologie succesvol te bemachtigen of te reproduceren.

Vanwege de digitalisering van het energiesysteem is cybersecurity een belangrijk aandachtspunt. Voor een toekomst bestendige aanpak werkt dit kabinet aan de implementatie van de Europese cybersecurityrichtlijn, Network- and Information Security 2 Directive (NIS2) die in Nederland in oktober 2024 in werking treedt. De NIS2 draagt bij aan een hoger niveau van cybersecurity van bedrijven en organisaties, mede door meer harmonisatie van de cyberwetgeving van de lidstaten. De gasector is een van de essentiële sectoren die onder de reikwijdte van deze richtlijn valt. Behalve de generieke NIS2-richtlijn zijn er nog andere sector-specifieke cybersecurity gedelegeerde handelingen in ontwikkeling. Op dit moment betreft dit de Network Code on Sector-specific Rules for Cybersecurity Aspects of Cross-border Electricity Flows (Netcode) die toeziet op aanvullende cybermaatregelen in de elektriciteitssector. De Netcode voor de elektriciteitssector zal naar verwachting in Q3/Q4-2023 in werking treden.

Toelichting op de randvoorwaarde human capital agenda

De technologische industrie kampt nu al met een structureel tekort aan technisch geschoolde mensen en heeft tot 2030 nog eens 120.000 nieuwe medewerkers nodig. Daarnaast is zaken op orde brengen aan installateurszijde een belangrijke schakel in het groei- en stimuleringsproces. Op de hoogte blijven qua technologische kennis, de veiligheid en de grote consumentenvraag zijn een aantal van de vele uitdagingen voor de beroepsgroep.

In april 2023 heeft de Minister voor Klimaat en Energie de TK geïnformeerd middelen beschikbaar te stellen voor het tekort aan technici voor de uitvoering van de energietransitie⁵. Hiervoor is het van belang om naast reguliere instroom, nieuwe doelgroepen aan te boren via additionele instroom- en opleidingstrajecten, bijvoorbeeld statushouders.

⁵ Kamerbrief 'Voorjaarsbesluitvorming Klimaat' bijlage 2, 26 april 2023

3. Toepassingen van energieopslag

3.1 Aanbod van en vraag naar energie

In het huidige energiesysteem volgt aanbod vrijwel altijd de vraag. Dat kan doordat fossiele brandstoffen als voorraad reeds bestaan en relatief makkelijk opgeslagen en omgezet kunnen worden naar de gevraagde vorm en hoeveelheid. Elektriciteitscentrales op basis van kolen en elektriciteitscentrales en WKK's op basis van gas zijn op dit moment de belangrijkste bron van flexibiliteit voor elektriciteit. Warmteproductie vindt veelal plaats door aardgas te verbranden. Er hoeft door vragers van energie relatief weinig rekening gehouden te worden met beperkingen van het aanbod. De belangrijkste grondstoffen die voor het huidige energiesysteem gebruikt worden zijn aardolie, aardgas, kolen en uranium (voor kernenergie). Eigenschap van deze energiebronnen is dat ze al als voorraad in de aarde aanwezig en daarom (afgezien van enige mate van noodzakelijke, praktische buffering) ingezet kunnen worden op het moment dat er vraag naar is.

In het energiesysteem van de toekomst zullen CO₂-vrije energiebronnen de energievraag vrijwel volledig dekken, zoals wind, zon en (in mindere mate) duurzame warmte (aardwarmte, aquathermie, zonnepanelen). Fossiele energie zal niet meer voorkomen, tenzij in combinatie met CC(U)S. Kernenergie zal hoogstwaarschijnlijk een relatief klein onderdeel van het schone elektriciteitsstelsel vormen, omdat kerncentrales bij een overvloedig aanbod van wind- en zonne-energie niet zonder meer volcontinu kunnen draaien, waardoor ze relatief duur zullen zijn maar wel aan de robuustheid van het energiesysteem bijdragen (ETES2050, 2023). De opwekking van CO₂-vrije energie is voor het grootste deel afhankelijk van het weer en daarmee minder flexibel en meer variabel (in het Engels: *intermittent*). Dit maakt dat er steeds grotere verschillen zullen ontstaan tussen het aanbod van en de vraag naar energie. Aangezien vraag en aanbod van met name elektriciteit altijd in balans moeten zijn, zal de behoefte aan flexibiliteit in ons energiesysteem steeds groter worden. Met – zoals hierboven omschreven – minder regelbaar opwekvermogen vergroot dat de behoefte aan andere vormen van flexibiliteit. Tegelijkertijd zijn nog niet alle vormen even ontwikkeld.

Wind- en zonne-energie hebben de eigenschap zelf sterk variabel te zijn: de ene dag is het zonniger en/of minder zonnig dan de andere dag. Naast deze variaties zijn er duidelijke *patronen* in terug te vinden:

- Zonne-energie heeft een extreem dag/nachtpatroon en een seizoenspatroon.
- Windenergie heeft veel minder een dag/nachtpatroon maar wel een seizoenspatroon dat in enige mate omgekeerd (ook wel genoemd in tegenfase) is t.o.v. zonne-energie.

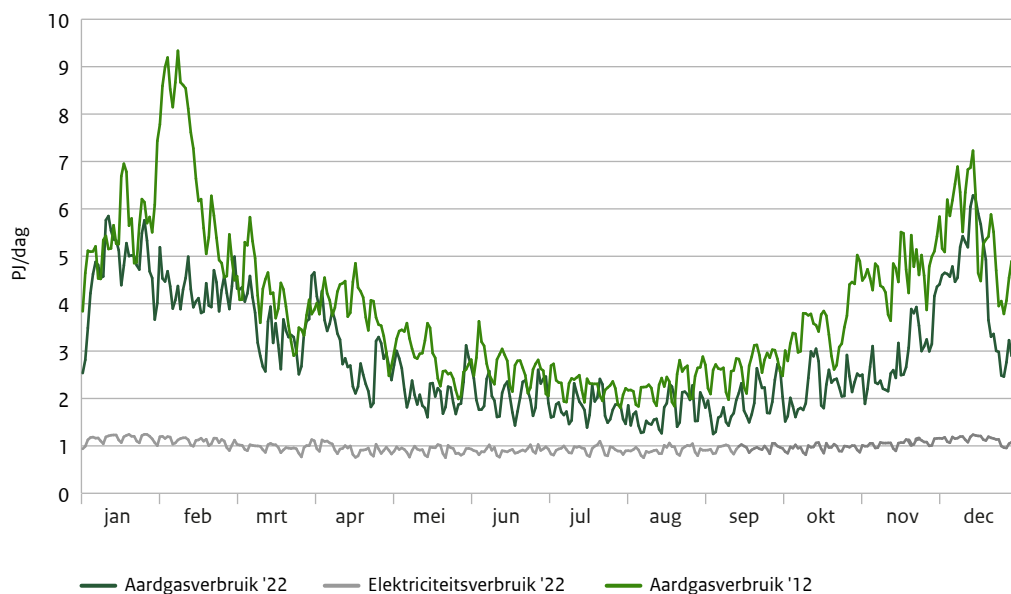
Een worst-case scenario doet zich voor in periodes van donkere, windstille weken, de zogenaamde energieflauwte (vaak aangeduid met de Duitse term 'Dunkelflaute' dat 'donkere stilte' betekent).

Ook de vraag naar energie is variabel en heeft bovendien duidelijke patronen:

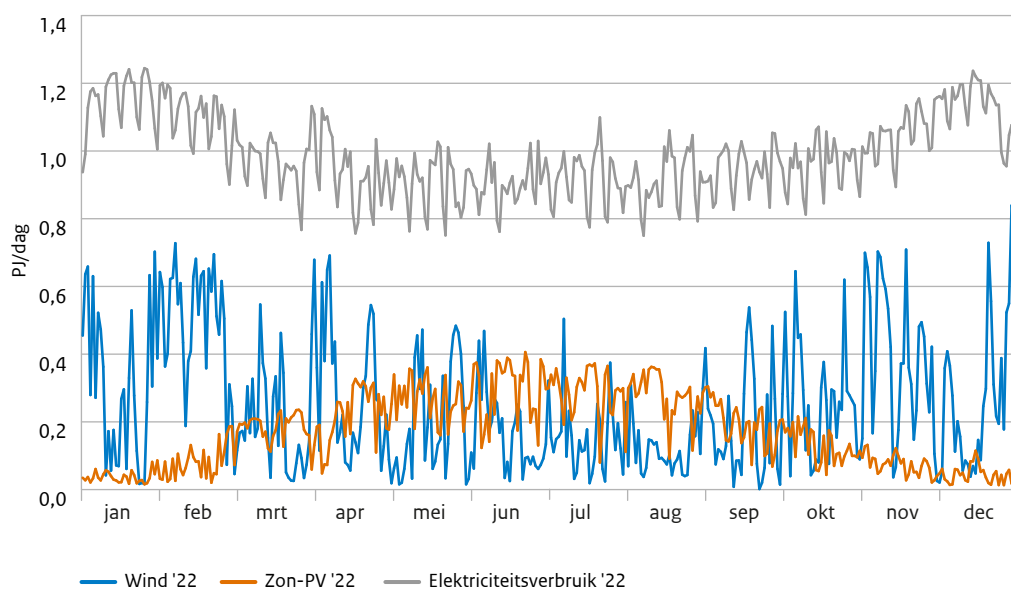
- In de winter wordt meer energie gebruikt dan in de zomer, met name om de warmtevraag te kunnen dekken.
- Overdag wordt meer energie gebruikt dan 's nachts.
- Verschillen op uurbasis, denk bijvoorbeeld aan huishoudens die overdag van huis zijn en 's avonds thuis zijn of aan kantoren waar het energiegebruik juist overdag piekt.
- Verschillen per energiedrager: voor vloeibare brandstoffen is de seizoensvariatie beperkt, voor elektriciteit is deze groter en voor gas is het seizoensverschil het grootst.

Het verschil tussen aanbod van en vraag naar energie op een bepaald moment of gedurende een bepaalde periode noemen we 'mismatch'. Voorbeelden hiervan zijn te zien in Figuur 2a en Figuur 2b. De piekvraag in aardgasverbruik (te zien aan de groene lijn in de wintermaanden) is ongeveer 2 maal zo hoog als de basisvraag in de zomer. In koude winters kan dit oplopen tot een factor 4 (te zien aan de lichtgroene lijn in de maand februari). In deze vraag, met name voor warmte, moet worden voorzien door een combinatie van productie en opslag van aardgas. Hiervoor is ongeveer 500 PJ opslagcapaciteit beschikbaar in Nederland, dat wil zeggen ongeveer 15% van de Nederlandse jaarlijkse energievraag en zo'n 40% van de jaarlijkse aardgasverbruik (EBN, 2023). Door in te zoomen op de opwek van wind- en zonne-energie (te zien in Figuur 2b), blijkt dat het elektriciteitsaanbod van wind sterk varieert per dag en over het algemeen groter is in de wintermaanden. Het elektriciteitsaanbod van zon-PV varieert vooral sterk van seizoen tot seizoen. De opwekking in de zomermaanden kan wel 10 keer hoger zijn dan in de wintermaanden.

Figuur 2a Fluctuaties in aardgas- en elektriciteitsverbruik in Nederland



Figuur 2b Fluctuaties van aanbod in wind- en zonne-energie en vraag naar elektriciteit in Nederland

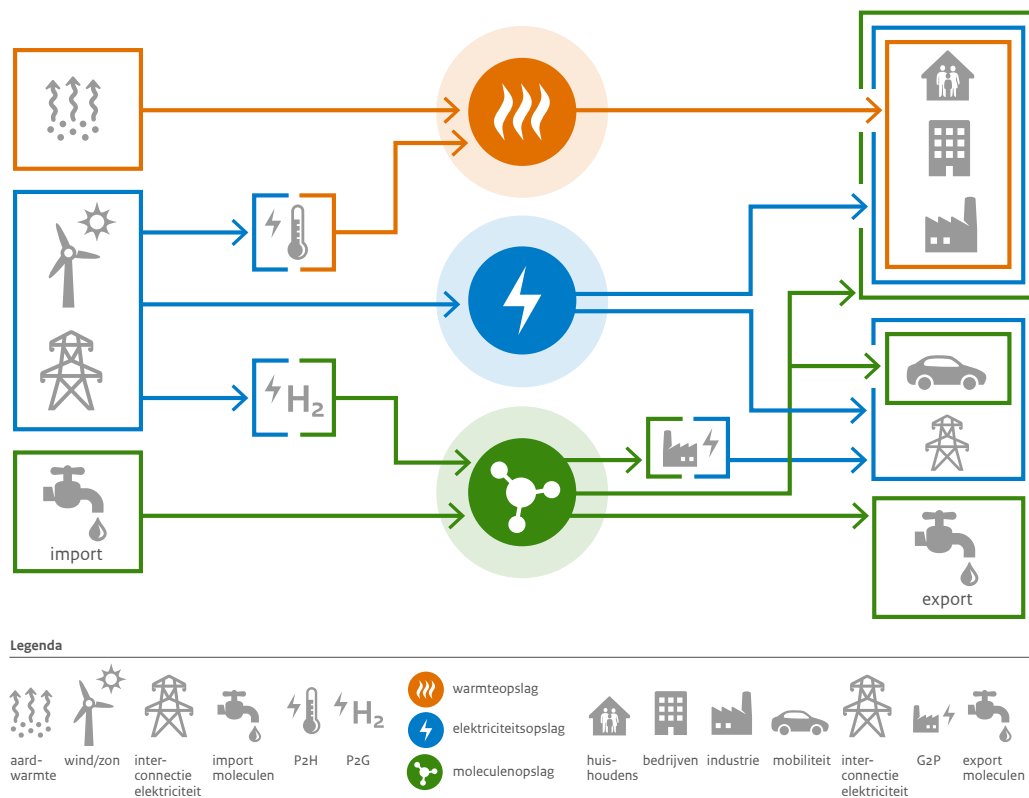


Samengevat stelt dit de energietransitie voor een belangrijke uitdaging: in het oude energiesysteem kon de sterke variatie aan energievraag makkelijk worden opgevangen met variabele inzet van de (fossiele) bronnen, maar in een duurzaam en CO₂-vrij energiesysteem zijn de energiebronnen zelf ook variabel en moet een groter verschil tussen vraag en aanbod worden opgevangen. Anders gesteld: afgezien van de vraag naar warmte die in de winter in absolute zin moeilijk flexibel gemaakt kan worden, zal ons energiesysteem moeten veranderen van vraaggedreven naar meer aanbodgedreven.

3.2 Energieopslag en samenhang met transport en conversie

Omdat het niet praktisch is om al onze activiteiten aan te passen aan de zon en de wind (je wilt je lampen aandoen als het donker is, niet als de zon schijnt) moeten we het grillige energieaanbod ook verplaatsen. Dat verplaatsen kan in de ruimte (transport), in de tijd (energieopslag) of in de aard van de energiedrager (conversie). Zoals genoemd in paragraaf 2.2, zijn transport (of interconnectie) en conversie net als energieopslag oplossingen voor het flexibiliteitsvraagstuk. Ze zijn deels uitwisselbaar: de behoefte aan energieopslag is afhankelijk van wat we ook aan transport en conversie hebben en andersom, en van de mate waarin we er in slagen ons energiegebruik flexibel aan te passen. Opslag, transport en conversie van energie(dragers) zorgen *samen* voor het vereffenen van de mismatch tussen vraag en aanbod. Een simpele weergave hiervan is te zien in Figuur 3.

Figuur 3 Versimpelde weergave energiesysteem met hernieuwbare energie en flexibiliteit



Enkele kanttekeningen bij Figuur 3 die ook in de Routekaart Energieopslag zullen terugkomen:

- Zoals genoemd in paragraaf 2.2, is een andere oplossing voor het flexibiliteitsvraagstuk flexibele vraagsturing, het actief beïnvloeden van de vraagzijde. Voorbeelden hiervan zijn het op- en afregelen van processen in de industrie, het hybridiseren van toepassingen (bijv. power-to-heat en power-to-gas in de industrie en hybride warmtepompen in de gebouwde omgeving) en het flexibel laden van elektrisch vervoer.
- Voorbeelden van (CO₂-vrij) regelbaar vermogen zijn: regelbaar opwekvermogen (zoals elektriciteitscentrales op kolen, aardgas, biomassa of waterstof), opslag (zoals batterijen,), maar ook curtailment, het actief afschakelen van de opwek van wind- of zonne-energie bij teveel aanbod. Ook het hybride aanlanden van wind op zee kan als een vorm van regelbaar vermogen worden gezien, waarbij op het ene moment elektriciteit geproduceerd wordt en op het andere moment waterstof, afhankelijk van de vraag. In feite wordt dan wind op zee gecombineerd met regelbare conversie.
- Het energiesysteem is in steeds grotere mate onderling verbonden, er vindt steeds meer uitwisseling plaats tussen verschillende energiedragers (systeemintegratie) zoals ook zichtbaar is in de hiervoor genoemde voorbeelden van flexibele vraag en regelbaar vermogen. Zo zie je bij deze voorbeelden ook de rol van conversie en opslag hierbij terug. Het kan dan ook lastig zijn om een harde scheiding tussen categorieën van flexibiliteit te maken.
- De rollen van opwekkers en gebruikers lopen steeds vaker door elkaar. Vroeger waren opwekking en opwekker synoniem aan elkaar en hetzelfde gold voor gebruik en gebruiker. Tegenwoordig kunnen gebruikers ook tijdelijk opwekker zijn, denk bijvoorbeeld aan huishoudens met zonnepanelen.
- Flexibiliteit voor balanshandhaving en netcongestie kunnen tegenstrijdig zijn. De elektriciteitsmarkt is zo georganiseerd dat transport ervoor zorgt dat er in het bij elkaar brengen van vraag en aanbod geen rekening gehouden hoeft te worden met de infrastructuur c.q. locatie. De energietransitie gaat echter zo snel dat de vraag naar infrastructuur niet bij te benen is. Bij het bij elkaar brengen van vraag en aanbod moet dan ook steeds meer rekening gehouden worden met de netcapaciteit. Dat betekent dat flexibiliteitstoepassingen voor balanshandhaving (zoals batterijen) binnen de kaders van de beschikbare netcapaciteit moeten opereren. Flexibiliteitstoepassingen kunnen ook een oplossing zijn bij beperkingen in de netcapaciteit, door een vlakker opwek- of vraagprofiel te realiseren.

3.3 Energieopslag (algemeen)

Energieopslag kan op veel manieren voorkomen. Er kan niet worden gezegd dat de ene vorm van opslag beter is dan een andere vorm: iedere vorm van opslag heeft zijn eigen karakteristieken en in de toekomst zal een mix van veel van deze vormen nodig zijn. De belangrijkste mogelijke indelingen staan genoemd in Figuur 4.

Figuur 4 Mogelijke manieren om Energieopslag te categoriseren

Drager of 'stromen'	Tijdschaal	Ruimtelijke schaal	Positie in het net
 Elektriciteitsopslag  Moleculenopslag  Warmteopslag	Seizoensopslag Op weekschaal Op dagschaal	Op landelijk niveau Op wijkniveau Op gebruikersniveau	Combi grote opwek Met eigen aansluiting 'Achter-de-meter'

De Routekaart Energieopslag schenkt aandacht aan alle tijdschalen, groottes en posities in het net van energieopslag. Dit document is gestructureerd a.d.h.v. energiedrager, in dit document 'stromen' genoemd: elektriciteits-, moleculen- en warmteopslag.

3.3.1 Elektriciteitsopslag: definitie en scope

Elektriciteit kan elektrochemisch worden opgeslagen in batterijen of elektrostatisch in condensatoren. Daarnaast kan elektriciteit worden omgezet naar andere vormen van energie om het op te slaan, bijvoorbeeld:

- Omzetting naar potentiële energie in de vorm van stuwmeren of perslucht.
- Omzetting naar kinetische energie in de vorm van vliegwielen.
- Omzetting naar chemische energie in de vorm van batterijen.

Alle vormen van energieopslag waar energie in gaat als elektriciteit en er weer uitkomt als elektriciteit (zoals bovengenoemde voorbeelden) worden hier gerekend tot elektriciteitsopslag.

3.3.2 Moleculenopslag: definitie en scope

Energieopslag in de vorm van moleculen speelt een grote rol in ons huidige energiesysteem dat gebaseerd is op fossiele brandstoffen, zoals aardgas, aardolie en steenkolen. Daarvan afgeleid zijn ook Liquefied natural gas, oftewel vloeibaar gemaakt aardgas (LNG) en (transport)brandstoffen belangrijke energiedragers. Ze worden onder andere ingezet voor energetische toepassingen, d.w.z. om elektriciteit te produceren of (bio) brandstoffen voor transport.

Ook in de toekomst blijft moleculenopslag van groot belang, in de vorm van (duurzame) energiedragers die is goed geschikt zijn voor warmtepieklevering, seizoensopslag en voor strategische voorraden. Hierbij gaat het voornamelijk over waterstof en waterstofderivaten, zoals ammoniak, methanol, ethanol en zo geheten “liquid organic hydrogen carriers” (LOHC) – en in mindere mate over groen gas dat kan worden omgezet naar Bio-LNG.

In de Routekaart Energieopslag ligt de focus op moleculenopslag t.b.v. energetische toepassingen. Dit is de toepassing waarbij het molecuul na opslag wordt omgezet in energie: elektriciteit, warmte of brandstoffen. Non-energetische toepassingen (bijv. aardolie die als grondstof wordt gebruikt in de industrie) worden buiten beschouwing gelaten.

3.3.3 Warmteopslag: definitie en scope

Energieopslag in de vorm van warmte sluit goed aan bij onze energievraag, want ongeveer de helft van onze energievraag is voor warmte. Deze vraag kent een duidelijke seizoenspiek in de winter. Warmteopslag kan ingezet worden voor korte-termijn en voor het overbruggen van de seizoenspiek (winter). Warmte kan onder andere worden opgeslagen in water, zout, lucht of gesteenten. Behalve warmte kan ook koude worden opgeslagen. Warmteopslag is in Nederland bij uitstek lokaal, omdat bij transport veel warmte verloren gaat. Alle vormen van energieopslag waar warmte en/of koude in gaat en daarna wordt onttrokken (of andersom) worden hier gerekend tot warmteopslag.

In de Routekaart Energieopslag wordt de term ‘warmteopslag’ gebruikt als synoniem voor ‘thermische energieopslag’, wat betekent dat het ook de opslag van koude of warmte en koude omvat. De behoefte aan koude zal de komende jaren toenemen, ten gevolge van klimaatverandering en stedelijke hitte effecten.

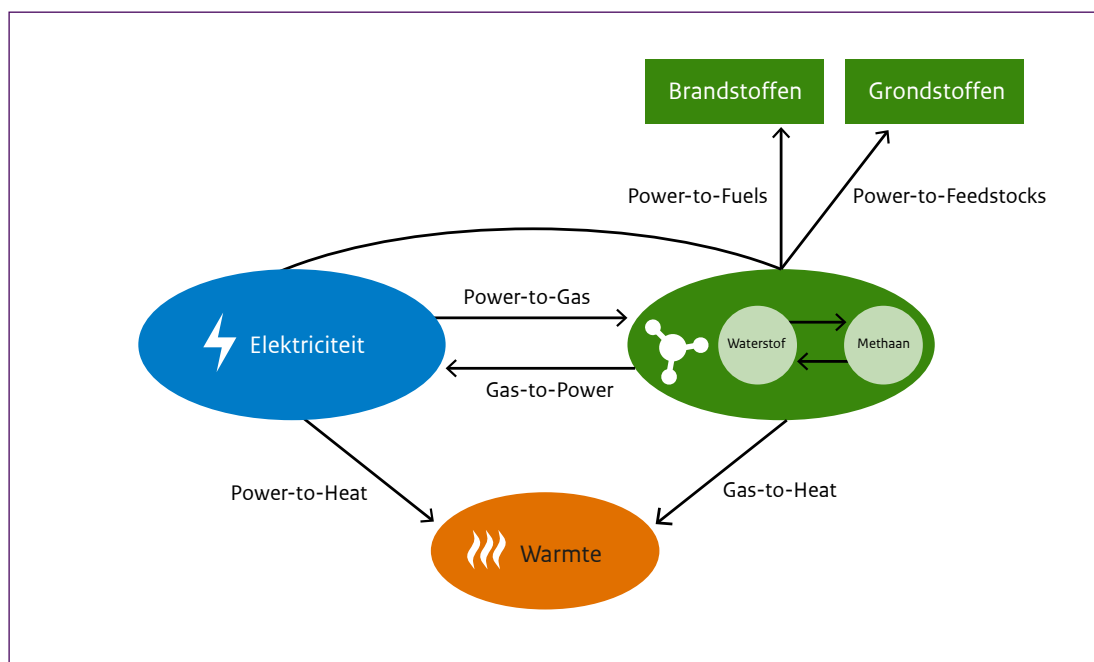
3.3.4 Conversie: definitie

Naast bovengenoemde stromen, besteden we in de routekaart ook aandacht aan conversietechnieken waardoor de verschillende stromen met elkaar kunnen interacteren om zo tezamen grotere flexibiliteit in het energiesysteem te bereiken. Moleculenopslag (bijv. waterstof, methanol, ethanol, bio-LNG, ammoniak en andere energiedragers) is over het algemeen langer op te slaan is dan elektriciteit en een grotere opslagcapaciteit heeft dan warmte. Daarmee kan waterstof forse seizoensfluctuaties uit de andere twee energieketens opvangen. Het gebruik van elektriciteit om waterstof en warmte te produceren kan weer inspelen op het opvangen van overschotten van elektriciteit. Eenmaal omgezet kan warmte niet (efficiënt) meer gebruikt worden om elektriciteit van te maken, opslag van warmte kan echter wel de behoefte aan elektriciteit en waterstof voor warmteproductie verkleinen en daarmee ook de opslagbehoeften in die stromen. Kortom, het samenspel van opslag en conversie is een belangrijk mechanisme om het energie-

systeem te balanceren. Veel voorkomende conversies tussen de warmte-, moleculen-, en elektriciteitsstromen zijn:

- Power-to-Gas (P2G): conversie van water naar waterstof (en zuurstof) met behulp van elektriciteit (dit proces wordt ook wel elektrolyse genoemd, huidige rendementen rond 60%).
- Power-to-Heat (P2H): conversie van elektriciteit naar warmte met behulp van weerstandsverwarming (rendement: 100%) of warmtepompen (huidige 'rendementen' of Coefficients of Performance: 200-400%).
- Power-to-Fuels & Feedstock (P2F): het produceren van synthetische brand- en grondstoffen met hernieuwbare elektriciteit, water(stof) en koolstofdioxide (die wordt opgevangen uit de atmosfeer, biogene bronnen of afval).
- Gas-to-Power: conversie van gas (met name: waterstof) naar elektriciteit. De twee belangrijke te verwachten varianten zijn hierbij: middels gasturbines (hogere vermogens, huidige rendementen rond 50%) middels brandstofcellen (lagere vermogens, huidige rendementen rond 70%). Gas2Power (gasturbines) zal vooral belangrijk zijn om grootschalig seizoenstekorten op te vangen.
- Gas-to-Heat: conversie van gas naar warmte, zoals de CV ketel.

Figuur 5 Overzicht van belangrijke conversie technieken



Het is belangrijk te realiseren dat (met uitzondering van P2H) conversie altijd rendementen heeft die significant onder de 100% liggen en dat bijvoorbeeld de “heen-en-terug”-route Power → Gas → Power een totaalrendement van 30-40% heeft.

3.4 Functies versus Technieken

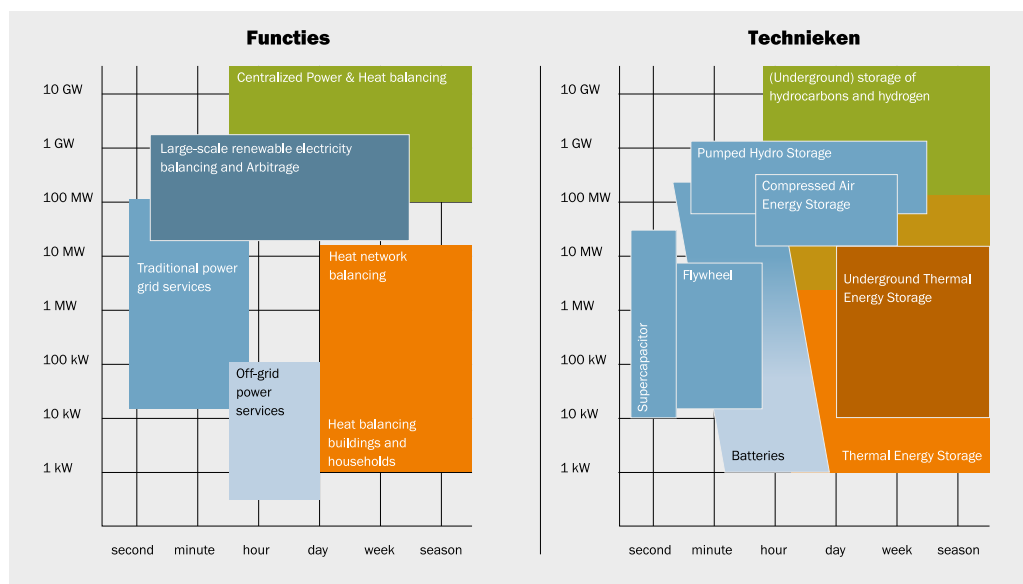
Energieopslag kan meerdere doelen dienen, waaronder het balanceren van vraag en aanbod, het opvangen van de warmtepiekvraag, het verlichten van netcongestie en het bieden van strategische voorraden. Afhankelijk van hun eigenschappen zijn energieopslag technieken meer of minder (on)geschikt voor deze doelen.

Vermogens en opslagduur

Figuur 6 (TNO, 2020) biedt een overzicht van de verschillende energieopslagdiensten (links) en -technieken (rechts), uitgezet naar vermogen (y-as) en tijdschalen voor opslagduur (x-as). Elektriciteitsopslag (in het blauw) bevindt zich links in het diagram, wat wil zeggen dat het vooral diensten biedt met een korte tijdschaal en

vermogens minder dan 1 GW. Belangrijke uitzonderingen daarop zijn CAES (persluchtinstallaties) en Pumped Hydro Storage (PHS, in het Nederlands: waterkrachtcentrales). Waterkrachtcentrales zijn meestal valmeren, maar ze kunnen ook ondergronds of in kunstmatige meren worden toegepast. Warmteopslag (in het oranje) bevindt zich rechtsonder, wat wil zeggen dat het geschikt is voor diensten met langere tijdschaal, inclusief seizoenopslag. Moleculenopslag (in het groen) bevindt zich rechts bovenin, wat betekent dat het zowel hoge vermogens als seizoenopslag kan verzorgen. Samengevat laat Figuur 6 zien dat elektriciteits-, moleculen- als warmteopslag elkaar uitstekend en noodzakelijk aanvullen in termen van vermogen en opslagduur (systeemintegratie c.q. uitwisseling tussen de ketens). Uitstekend omdat er beperkt overlap is tussen de stromen qua vermogen en opslagduur; noodzakelijk omdat er verschillende diensten zijn met elk andere eisen in termen van vermogen en opslagduur. De verschillende opslagopties op de verschillende tijd- en grootte-schalen kunnen samenspielen om te voorzien in de toekomstige behoefte aan energieopslag in Nederland.

Figuur 6 Samenspel van energieopslagstechnieken op verschillende tijd- en grootteschalen (TNO, 2020)



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

Matchmaking: Functies versus Technieken

Elke vorm van energieopslag heeft zijn eigen voor- en nadelen. Naarmate de techniek verder ontwikkelt, zullen deze voor- en nadelen iets veranderen. Toch kunnen we nu al een inschatting maken van welke opslagvormen geschikt zijn voor welke uitdagingen.

In Tabel 3 wordt per stroom een aantal technieken vergeleken voor geschiktheid voor het vervullen van de doelen of functies van energieopslag, waaronder het balanceren van vraag en aanbod, het voorzien van de warmtepiekvraag, het ondersteunen van het elektriciteits- of gasnet, het verlichten van netcongestie en het bieden van strategische voorraden. De geschiktheid is bepaald op basis van kosten per kWh opslagcapaciteit, de efficiëntie, het ruimtegebruik en het zogeheten Technology Readiness Level (TRL) waarmee de rijpheid van een techniek wordt aangeduid. De termijnen kort, middellang en lang zijn in de tabel gedefinieerd als 1 seconde tot 1 dag, 1 dag tot 1 week en 1 week tot 1 jaar respectievelijk. De kleuren in de figuur geven aan hoe goed een functie door een techniek vervuld kan worden: groen betekent goed geschikt, geel betekent minder goed geschikt, oranje betekent niet goed geschikt. Rood met een 'x' betekent dat de techniek ongeschikt is voor het vervullen van de betreffende functie. Niet alle denkbare vormen van energieopslag zijn opgenomen in de tabel. Alle fossiele vormen van energieopslag (zoals kolen, aardolieproducten en aardgas) zijn niet opgenomen, omdat we deze uit willen faseren. Het is goed denkbaar dat met de ontwikkeling van technieken de geschiktheid in de toekomst zal verbeteren. In de bijlage (8.2) is hetzelfde overzicht te vinden met onderbouwing en toelichtingen.

Tabel 3 Matchmaking: energieopslag functies en technieken

Legenda Goed geschikt ●●● Minder goed geschikt ●● Niet goed geschikt ○ Ongeslacht X							
Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-ondersteuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Elektriciteitsopslag							
Pumped Hydro Storage (waterkracht-centrales)	TRL: 11	●●●	●●●	●●	●●●	●●	○
Vliegwielen	TRL: 9	●●●	○	X	●●	○	X
LAES (vloeibare lucht opslag)	TRL: 9	●●	●●●	●●	●●	●●	○
CAES (persluchtinstallaties)	TRL: 8	●●	●●●	●●	●●	●●	○
Ondergrondse pomp accumulatie-centrale (OPAC)	TRL: ?	●●●	●●●	●●	●●●	●●	○
Zwaartekracht-gebaseerde opslag	TRL: ?	●●●	●●●	●●	●●●	●●	○
Lithium-ion batterijen (stationair)	TRL: 9	●●●	○	○	●●●	●●	X
Lithium-ion batterijen (EVs)	TRL: 9	●●●	○	○	●●●	●●	X
Flowbatterijen	TRL: 8	●●●	●●●	○	●●●	●●●	○
Liquid CO ₂	TRL: ?	●●	●●●	●●	●●	●●	○
 Moleculenopslag							
Biobrandstoffen voor transport (bio-ethanol, kerosine etc.)	TRL: 11	○	●●	●●●	X	X	●●●
Groen gas of synthetisch methaan in gasvelden	TRL: 11	○	●●	●●●	●●	○	●●
Groen gas of synthetisch methaan in zoutcavernes	TRL: 6	●●	●●	●●●	●●	○	●●
Waterstofderivaten (ammoniak, methanol en LOHCs)	TRL: 9 - 11	○	●●	●●●	●●	○	●●●
Waterstofgas in zoutcavernes	TRL: 5 - 6	●●	●●	●●●	●●	○	●●
Waterstofgas in gasvelden	TRL: 3 - 4	○	●●	●●●	●●	○	●●
Waterstof in vaste stoffen	TRL: 3 - 5	○	●●	●●●	●●	○	●●●
 Warmteopslag							
Lage temperatuur bodemenergie (open, gesloten)	TRL: 9 - 11	○	●●	●●●	●●	●●	●●
Midden- en hoge temperatuursopslag bodem (aquifers, ATES)	TRL: 7 - 8	○	●●	●●●	●●	●●	●●
Hoge temperatuur gesloten bodem-energie (boreholes, BTES)	TRL: 7 - 8	○	●●	●●●	●●	●●	●●
Warmteopslag in mijnen	TRL: 7 - 8	○	●●	●●●	●●	●●	●●
Kuil thermische opslag (PTES)	TRL: 7 - 8	○	●●	●●●	●●	●●	●●
Grote warmwater tank (lange-termijn, lager vermogen)(TTES)	TRL: 6 - 7	○	●●	●●●	●●	●●	●●
Grote warmwater tank (korte-termijn, groot vermogen)(TTES)	TRL: 9 - 11	●●●	●●●	○	●●●	●●●	○
Kleine warmwater tank (woning)(TTES)	TRL: 9 - 11	●●●	●●●	○	●●●	●●●	○
Faseovergang (PCM)	TRL: 6 - 9	●●●	●●●	○	●●	●●	○
Vaste stof (beton, steen e.d.)	TRL: 6 - 7	●●●	●●●	●●	●●	●●	●●
Thermochemische materialen (TCM)	TRL: 4 - 6	●●	●●●	●●●	●●	●●	●●

Op basis van Tabel 3 wordt een aantal dingen duidelijk:

- Elektriciteitsopslag is goed geschikt voor korte-termijn functies omdat de omzetting weinig energieverliezen kent, maar is niet geschikt voor strategische voorraden vanwege de beperkte opslagcapaciteit en opslagduur.
- Elektriciteitsopslag is vooralsnog niet geschikt voor het balanceren van vraag en aanbod op middellange en lange termijn. Pumped Hydro Storage (waterkracht), CAES (persluchtinstallaties) en Liquid Air Energy Storage (LAES, in het Nederlands: vloeibare lucht en soms ook gerefereerd als Cryogenic Energy Storage⁶) zijn wel geschikt voor de middellange termijn, maar worden nog niet in Nederland toegepast (zie paragraaf 4.3.1).
- Moleculenopslag speelt geen rol bij netcongestieverlichting. Voor het balanceren van vraag en aanbod op korte-termijn kunnen moleculen worden omgezet naar elektriciteit, maar dit gaat gepaard met grotere verliezen dan bij elektriciteitsopslag, vooral wanneer de energie initieel als elektriciteit is opgewekt (zoals bij zon-PV en windenergie).
- Moleculenopslag is wel geschikt voor het balanceren van vraag en aanbod op middellange en lange termijn en als strategische voorraad. Daarbij kan gedacht worden aan ethanol, methanol, ammonia of Bio-LNG. Ook gasopslag is geschikt om fluctuaties binnen een seizoen op te vangen.
- Warmteopslag kan door middel van energieconversie (power to heat) congestieverlichting en balanceringsdiensten bieden. Warmteopslag kent een scherp onderscheid tussen technieken die voor het balanceren van vraag en aanbod juist geschikt zijn op de korte en middellange termijn en middellange en lange termijn.

Energieopslag in verschillende gebieden

Welke functies door energieopslag kunnen worden vervuld hangt af van de schaal en de locatie van het opslagmedium, de energieopwekking en het energieverbruik. Het is dan ook van belang om op verschillende schaalniveaus naar het vraagstuk van energieopslag te kijken, bijv. vanuit een nationaal perspectief de ontwikkeling van grote (bijv. meer dan 100 MW) stand-alone batterijen en opslag in zoutcavernes en vanuit een lokaal perspectief de ontwikkeling van warmtebuffers en batterijen bij bedrijventerreinen. Dit pleit ook voor een gebiedsperspectief op het vraagstuk van energieopslag. In een gebied komen verschillende stromen van energiedragers namelijk samen en kunnen er ook slimme integraties van stromen bedacht worden. Daarnaast heeft een gebied bepaalde specifieke kenmerken, zoals bodemgesteldheid of duurzame beschikbaarheid van (industriële) restwarmte, die kansen bieden voor specifieke elementen uit het energiesysteem. Ook zijn sommige onderdelen van het energiesysteem beter dan andere te combineren met de overige opgaven in een gebied.

Op die manier kunnen ook de meest optimale oplossingen voor energieopslag in kaart gebracht worden voor een specifiek gebied. Met de werkwijze 'integraal programmeren' werken Rijk, provincies, gemeenten en netbeheerders samen om (op regionaal niveau) tot een efficiënt energiesysteem te komen. Hierbij worden alle energiestromen en schaalniveaus bekeken. Voor de andere overheden en regionale organisaties is daartoe wel meer inzicht nodig in de voor- en nadelen van de verschillende opslagtechnieken en de mate waarin deze aansluiten op specifieke kenmerken van het betreffende gebied.

3.5 Marktwerving

3.5.1 Markten voor elektriciteitsopslag

Voor elektriciteitsopslag bestaan markten en diensten die de volgende functies dienen:

- Het balanceren van vraag en aanbod (op korte, middellange en lange termijn) ten behoeve van de energiebalans.
- Balanshandhaving, het real-time balanceren van vraag en aanbod op landelijk niveau, om problemen op het elektriciteitsnet te voorkomen.
- Het verlichten van netcongestie.

⁶ Cryogenic Energy Storage (CES) is een bredere benaming voor LAES (vloeibare luchtopslag), waartoe ook de opslag van vloeibare stikstof wordt gerekend.

Figuur 7 Overzicht energiehandel en balanshandhaving met tijdschalen**Energiehandel (en het balanceren van vraag en aanbod)**

Via energiehandel komen vraag en aanbod bij elkaar in de handelsperioden van enkele jaren tot een dag voorafgaand aan realisaties. Deze handel leidt dus ook tot afstemming van invoeding en afname van elektriciteit op het net. Daarvoor wordt een dagelijks een planning aangeleverd aan de landelijke net-beheerder dat het energieprogramma of e-programma wordt genoemd, waarin voor elke partij die elektriciteit invoedt op, of elektriciteit afneemt van het elektriciteitsnet de dagplanning wordt vastgelegd. Deze dagplanning dient op kwartierbasis in balans te zijn. Elke partij met één of meer aansluitingen draagt daarvoor “programmaverantwoordelijkheid”, of besteedt deze uit.

De energiehandel voor levering en balanceren van vraag en aanbod vindt met name plaats op de volgende markten:

- De termijnmarkt, waar tot enkele jaren voor realisatie producten met een leveringsperiode van een jaar, kwartaal, maand of week worden verhandeld.
- Day-ahead markt, waar vandaag wordt gehandeld en morgen geleverd. Deze markt werkt met blokken van een uur en heeft dus uurprijzen. De meeste handel vindt plaats op de day-aheadmarkt. Wanneer men spreekt over ‘de elektriciteitsprijs’ gaat het vaak over de prijs op de day-aheadmarkt.
- Intraday markt, waar op dezelfde dag wordt gehandeld en geleverd. De intraday markt werkt met blokken van minimaal een kwartier en kan daarom kwartier, halfuur én uurprijzen hebben. Er vindt aanzienlijk minder handel plaats op de intradaymarkt dan op de day-aheadmarkt.

De huidige marktindeling voor elektriciteit stimuleert de inzet van flexibiliteit zowel aan de vraagzijde als aan de aanbodzijde, omdat prijzen op de day-ahead- en intradaymarkten variëren gedurende de dag. Dat stimuleert afnemers van elektriciteit om elektriciteit af te nemen op momenten met lage prijzen en het stimuleert aanbieders van elektriciteit om aan te bieden op momenten met hoge prijzen. Veel afnemers van elektriciteit hebben echter nog geen contract waarbij ze blootgesteld worden aan de variërende prijzen op de day-aheadmarkt, omdat dat onzekerheid met zich meebrengt. Toch komen er steeds meer aanbieders van dynamische elektriciteitscontracten die het ook voor kleine bedrijven en particulieren mogelijk maken om in te spelen op de variërende prijzen op de day-aheadmarkt.

Energieopslag kan zowel op de vraag- als aanbodzijde ingezet worden om op prijsprikkels te reageren door middel van het zogenaamde arbitrage: een vorm van energiehandel waarbij energie wordt ingekocht voor een lage (of negatieve) prijs en later verkocht voor een hoge prijs. Voor arbitrage op de day-aheadmarkt is een minimale laad/ontlaadduur van 1 uur nodig en een opslagduur van 1-24 uur.

Voor particulieren met zonnepanelen bestaat nu nog de salderingsregeling. De salderingsregeling is een belastingvrijstelling waardoor huishoudens hetzelfde tarief krijgen voor geleverde zonnestroom als ze betalen voor de afname van stroom. Als de salderingsregeling wordt opgeheven dan ontstaat er een prijsprikkel om zonnestroom zelf te verbruiken (door flexibele vraag of energieopslag). Het terugleveren van zonnestroom levert immers minder geld op dan het voorkomen van inkoop van stroom. Huishoudens met een dynamisch contract en zonnepanelen worden bovendien gestimuleerd om zonnestroom direct zelf te verbruiken of op een later moment terug te leveren, omdat zonnige uren vaak de uren met de laagste day-aheadprijzen zijn.

Balanshandhaving

Balanshandhaving is het op landelijk niveau en in real-time in balans houden van het aanbod van en de vraag naar elektriciteit. Afwijkingen van de energieprogramma's door afwijkingen van de voorspellingen (in vraag, maar ook elektriciteitsproductie uit wind en zon), onverwachte uitval van productie eenheden of uitval van netcomponenten leiden tot onbalans. Onbalans kan leiden tot frequentieafwijking en uiteindelijk tot lokale of zelfs landelijke black-outs. De landelijke hoogspanningsnetbeheerder TenneT heeft de taak om de balans te handhaven. Daarvoor gebruikt het de volgende producten / markten:

- Frequentiehandhaving (FCR) (voorheen ook primaire reserve genoemd)
- Regelvermogen (aFRR)
- Noodvermogen (mFRR)
- Onbalansmarkt (onbalansprijsystematiek).

Balanceringsproducten van TenneT stimuleren flexibele vraag en flexibel aanbod van elektriciteit door op- en afregelen (via FCR, aFRR, mFRR en onbalansprijsystematiek) te belonen en door het veroorzaken van onbalans te beboeten (via de onbalansprijsystematiek). Elektriciteitsopslag kan gebruikt worden voor flexibele vraag en flexibel aanbod op alle vier van de TenneT-diensten. Daarnaast vraagt TenneT aanvullende diensten ter ondersteuning van het hoogspanningsnet (o.a. blindvermogen en black-start) waar elektriciteitsopslag ook een rol kan spelen (TenneT, 2023).

Netcongestie

Netcongestie ontstaat als er meer elektriciteit wordt gevraagd of aangeboden dan het elektriciteitsnet op die locatie aankan. Netcongestie kan voorkomen op elke plek in het laag-, midden- en hoogspanningsnetwerk. Het is de taak van de elektriciteitsnetbeheerders om netcongestie te reduceren. Dit gebeurt o.a. door het uitbouwen van het elektriciteitsnetwerk door meer kabels te leggen en transformatoren te plaatsen. Daarnaast kunnen netbeheerders vragen aan grootzakelijke klanten of zij tegen een marktconforme vergoeding tijdelijk minder elektriciteit kunnen verbruiken of opwekken als de elektriciteitsvraag of -aanbod op het net op een bepaald tijdstip te groot is. De ruimte die daarmee vrijkomt op het net, wordt verdeeld onder andere gebruikers van het elektriciteitsnet. Dit proces verloopt via GOPACS, een platform waar netbeheerders de vraag naar flexibiliteit uitzetten om netcongestie te verminderen. (GOPACS, 2023). Op het GOPACS platform zullen capaciteitsbeperkingscontracten (CBCs) en redispatch in het intraday domein worden ondergebracht. TenneT kan middels redispatch (het verschuiven van invoeding en afname uit het net) netcongestie op het hoogspanningsnet tegengaan. Door op de ene plek minder vermogen en op een andere plek (evenveel) meer vermogen in het net te voeden, worden transporten beïnvloed en kunnen transportproblemen worden opgelost. (TenneT, Ondersteunende diensten (Nederland), 2023)

Elektriciteitsopslag kan o.a. een rol spelen bij netcongestieverlichting door actief te zijn op GOPACS of redispatch. Het is op dit moment echter niet rendabel om een batterij alleen voor netcongestieverlichting in te zetten (CE Delft, 2023). Daarnaast kan elektriciteitsopslag achter de meter gebruikt worden om de bestaande netaansluiting van bedrijven beter te gebruiken, waardoor een netverzwaring kan worden uitgesteld of zelfs kan worden voorkomen. Dit is op dit moment vooral aantrekkelijk voor bedrijven die (lang) moeten wachten op meer transportcapaciteit, bijvoorbeeld vanwege een bedrijfsuitbreiding en/of verduurzaming.

Elektriciteitsmarkt in de toekomst

Hoe de dynamiek op de elektriciteitsmarkt van de toekomst er precies uit zal zien weet niemand. Het is waarschijnlijk dat de prijsfluctuaties op de energiehandelsmarkten groter worden, omdat het aanbod van zonne- en windenergie een groter deel van het totale energie-aanbod wordt. Flexibele elektriciteitsvraag en energieopslag kunnen profiteren van die prijsfluctuaties en zorgen daarmee voor de benodigde balans tussen vraag en aanbod. De onlangs gepubliceerde Adequacy Outlook van Tennenet laat zien dat de huidige opzet van de elektriciteitsmarkt (in theorie) werkt in een toekomstig CO₂-vrij energiesysteem (TenneT, Leveringszekerheid van elektriciteit in een volledig duurzaam elektriciteitsstelsel, 2023). TenneT waarschuwt wel dat het risico bestaat dat de investeringen die nodig zijn om de energietransitie te ondersteunen niet op tijd gerealiseerd worden zonder aanvullende maatregelen. Op de weg naar een volledig CO₂-vrij energiesysteem moet daarom zorgvuldig worden gekeken of aanvullende (tijdelijke) maatregelen nodig zijn.

3.5.2 Markten voor moleculenopslag

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

- Het balanceren van vraag en aanbod (op middellange en lange termijn).
- Het ondersteunen van het gassysteem.
- Het bieden van strategische voorraden.

Oliemarkten (voor balanceren aanbod en vraag en strategische voorraden)

De oliemarkt is een wereldwijde markt waar wordt verhandeld via New York Mercantile Exchange (VS) en Intercontinental Exchange (ICE) in Londen (VK). Er zijn verschillende aardolie soorten die dienen als benchmark voor olieprijsontwikkeling; bekende voorbeelden zijn: Brent, Arabian Light en West Texas Intermediate (WTI).

Gasmarkten (voor balanceren aanbod en vraag en ondersteunen gassysteem)

De belangrijkste Europese gasmarkten zijn:

- Title Transfer Facility (TTF), de Nederlandse gasmarkt; dit is een virtuele locatie waar GTS partijen de gelegenheid geeft in het Nederlandse systeem het eigendom van gas over te dragen van de verkoper op de koper. Het is de grootste virtuele gasmarkt van Europa en er wordt meer dan veertien keer het Nederlandse gasverbruik verhandeld. De TTF kent zowel een spotmarkt als een futures-/forwardmarkt
- National Balancing Point (NBP), na de TTF de grootste Europese gasmarkt, gelegen in het Verenigd Koninkrijk. De TTF en de NBP zijn fysiek met elkaar verbonden via de BBL-pijplijn (Bacton Balgzand Line). Deze verbinding loopt van de kop van Noord-Holland naar Engeland.

Daarnaast zijn er vergelijkbare gasmarkten elders ter wereld, waarvan de meest relevante (toonaangevende) de Henry Hub (in de VS) en de Japan Korea Marker (JKM; een gecombineerde index voor LNG prijzen van Aziatische landen).

De huidige marktindeling voor gas stimuleert de inzet van flexibiliteit aan zowel de vraagzijde als de aanbodzijde. Door in de zomer grootschalig gas in te kopen en op te slaan in (ondergrondse) gasopslagen kan in de winter tegen betaalbare prijzen worden voorzien in de dan (veel) hogere vraag naar gas. N.a.v. de inval van Rusland in Oekraïne in 2022 steeg de gasprijs enorm omdat veel partijen tegelijkertijd hun wintervoorraad probeerden in te kopen. In 2023 is er binnen de EU een afspraak gemaakt over de mogelijkheid tot gezamenlijke inkoop, dit mede om enorme prijsstijgingen te voorkomen.

Handel in waterstof (voor balanceren aanbod en vraag)

Er is nog geen internationale markt en marktordening voor waterstof. Europese regels zijn in ontwikkeling, zie bijvoorbeeld het EU Decarbonisatie Pakket. Deze zullen ook nationaal moeten worden toegepast. Er is nog veel onduidelijk omtrent welke partijen welke verantwoordelijkheid dragen bij grootschalige moleculenopslag en wat de regels zullen zijn voor het handelen op de markt.

Handel in ethanol, methanol en Bio-LNG (voor balanceren aanbod en vraag)

Ethanol, methanol en Bio-LNG zijn wereldwijd beschikbare energiedragers, die ook goed op te slaan zijn in de bestaande infrastructuur en vandaar ook ingezet kunnen worden. Bijvoorbeeld als brandstof voor luchtvaart, marine en mogelijk de industrie. Concurrerend met de synthetische brandstoffen, zullen ethanol, methanol en Bio-LNG nog vele decennia een rol.

In de EU wordt – middels de Renewable Energy Directive (RED) – onderscheid gemaakt tussen:

1. Hernieuwbare waterstof, oftewel waterstof geproduceerd uit hernieuwbare energie. Onder hernieuwbare energie valt ook biomassa. Certificering hiervan verloopt via Garanties van Oorsprong (GvO's).
2. Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO), oftewel brandstoffen die gemaakt worden uit bronnen anders dan biomassa. De derde revisie van de RED, RED-III, bevat subtargets voor RFNBO voor zowel transport (art. 25) als voor de industrie (art 22a). Certificering verloopt via vrijwillige RFNBO schema's, de erkenningsprocedure van deze schema's start na 14 juni 2023 (met het definitief worden van de delegated acts).

Waterstof geproduceerd uit biomassa is geen RFNBO en kan dus niet meetellen voor de RED-III RFNBO subtargets voor transport en industrie.⁷

Balanshandhaving (van het gassysteem)

Net als bij elektriciteit, moeten op het gasnet aanbod en vraag altijd gelijk aan elkaar oftewel in balans zijn. Op het gasnet houdt dat in dat de pijpleidingen onder de juiste druk blijven en er per saldo niet meer gas aan het net wordt onttrokken dan wordt ingevoerd of andersom. In Nederland ligt de regie hiervoor bij de landelijke netbeheerder Gasunie Transport Services (GTS). Via hogedrukpijpleidingen en ongeveer duizend gasontvangststations komt het gas terecht bij de regionale netbeheerders.

Marktpartijen die handelen op de gasmarkt zijn zelf verantwoordelijk voor de hoeveelheid gas die zij onttrekken of invoeden en daarmee ook medeverantwoordelijk voor het handhaven van de balans van het transportnet. Partijen hebben continu inzicht in hun eigen positie en kunnen daarmee zelf bijdragen aan het in balans houden van het transportnet. Daarnaast is de balanssituatie van het totale landelijke net, ofwel de som van de posities van alle partijen 24/7 voor iedereen te volgen. Indien dit onvoldoende gebeurt en de onbalans te ver oploopt, komt een marktgericht correctiemechanisme in werking en koopt of verkoopt GTS gas. De marktpartijen die de onbalans veroorzaken, betalen voor de kosten van het gas dat nodig is om de onbalans op te heffen (GTS, 2023).

3.5.3 Markten voor warmteopslag

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

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

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

Er zijn verschillende soorten marktmodellen voor warmtelevering die uiteenlopen van traditionele warmtebedrijven die verantwoordelijk zijn voor de hele keten (van opwek naar eindgebruiker) en (open) warmtenetten waar andere partijen verantwoordelijk zijn voor de transport- en distributie infrastructuur en levering aan de eindgebruiker. Hierbij kunnen de verschillende onderdelen van de keten in handen zijn van zowel private als publieke partijen (met name gemeentes) of combinaties daarvan. Op 25 oktober 2022 heeft MKE een voorstel ingediend voor collectieve warmtesystemen, waarbij warmte-infrastructuur in de toekomst voor meer dan 50% in handen is van een publieke partij en private partijen als minderheidsaandeelhouders kunnen deelnemen (Kamerstuk 30196-799). De maximale tarieven voor warmtelevering aan kleinverbruikers (bijv. huishoudens) worden bepaald door de ACM. Er zijn geen maximale tarieven voor warmtelevering aan grootverbruikers.

Het balanceren van vraag en aanbod binnen het elektriciteitssysteem en het verlichten van netcongestie door warmteopslag kan via Power-to-Heat (P2H). Dat gebeurt nu met name met grote en kleine warmwater tanks, maar zou ook moeten kunnen met andere warmteopslag technieken.

Waar het gaat om de warmtepiekvraag, wordt deze momenteel voornamelijk bediend door gas. In de toekomst dient deze te worden vervangen door de combinatie van duurzame warmtebronnen, seizoensopslag en korte-termijn opslag.

⁷ Dit was overigens ook al zo met levering van RFNBO's onder de huidige RED-II.

3.6 Actoren in energieopslag

M.b.t. energieopslag spelen verschillende partijen een rol. Onderstaand overzicht beoogt deze partijen, die mogelijk ook een rol spelen in het bevorderen van energieopslag, in kaart te brengen.

Overheid

Van overheidswege zijn de belangrijkste actoren:

- De Rijksoverheid.
- Alle decentrale overheden (provincies, gemeentes).
- De Autoriteit Consument & Markt (ACM) oftewel de toezichthouder voor de levering van elektriciteit, gas en warmte aan eindgebruikers.
- Het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) oftewel de toezichthouder op de ondergrond.
- De verschillende Omgevingsdiensten (provincies, gemeenten, waterschappen).

Netbeheerders

In Nederland is sprake van verschillende netbeheerders, namelijk:

- TenneT (TSO), de landelijke netbeheerder van het hoogspanningsnet.
- Gasunie Transport Services (GTS) de landelijke netbeheerder van aardgas.
- Regionale netbeheerders (DSOs) voor elektriciteit en gas (waarvoor de gebieden soms afwijkend zijn): Coteq, Enexis, Liander, Rendo, Stedin en Westland Infra Netbeheer.
- Verschillende warmtenet beheerders, variërend van traditionele warmtebedrijven tot (combinaties van) private en publieke partijen die transport- en distributie infrastructuur bezitten.

Partijen die energieopslag ontwikkelen

De volgende partijen spelen een rol bij de ontwikkeling van energieopslag:

- Marktpartijen die betrokken zijn bij de ontwikkeling energieopslag, waaronder eigenaren van de opgeslagen energie, eigenaren van de opslag, beheerders van de opslag en handelaren in energie.
- Brancheverenigingen die groepen bedrijven representeren.
- Energie Beheer Nederland (EBN), in opdracht van de Nederlandse Staat investeert EBN in het opsporen, winnen en opslaan van aardgas en aardolie. Daarnaast draagt EBN bij aan de inzet van geothermie door kennis te ontwikkelen en geld te investeren in projecten.
- Topconsortia Kennis en Innovatie (TKIs), samenwerkingsverbanden tussen overheid, ondernemers, onderzoekers en maatschappelijke organisaties.
- Kennisinstituten, zoals de academische wereld en hogescholen.

Eindgebruikers van energieopslag

En ten slotte, gebruikers van de mogelijkheden van energieopslag:

- Huishoudens.
- Publieke en maatschappelijke utiliteit.
- Bedrijven en bedrijventerreinen (MKB).
- Industrie.

4. Elektricitetsopslag



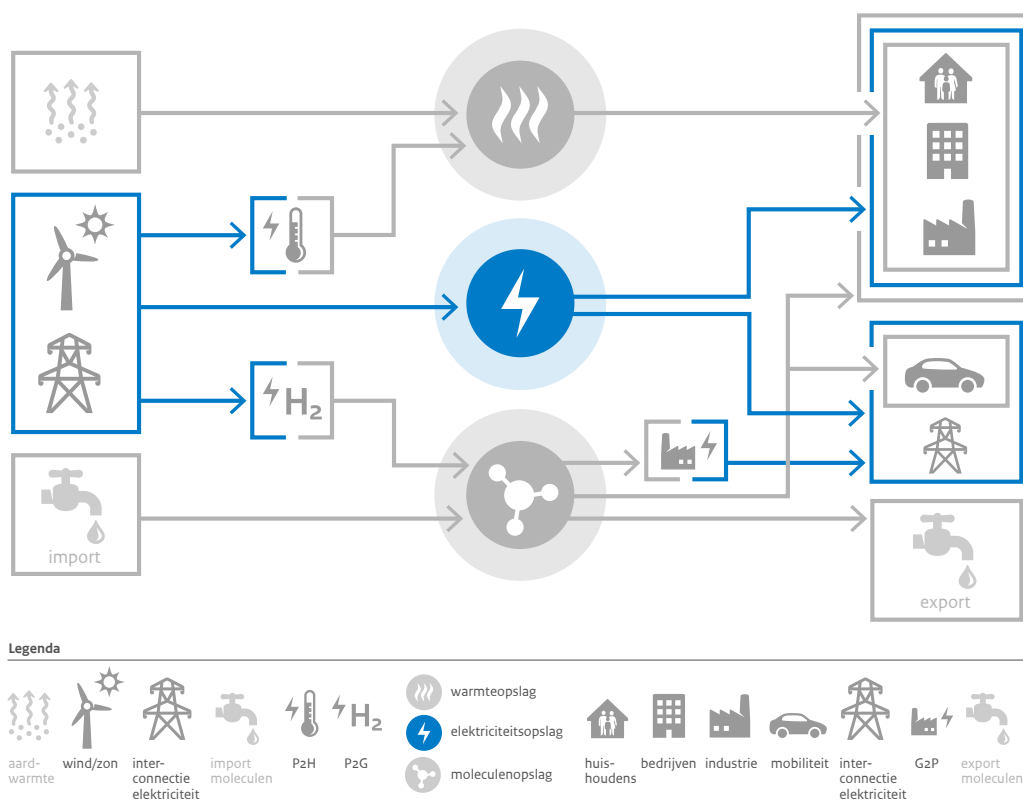


4.1 Analyse van elektriciteitsopslag in Nederland

4.1.1 Elektriciteitsopslag: technieken en gebruikconcepten

Technieken voor elektriciteitsopslag komen voor in veel verschillende vormen, waaronder elektrisch, elektrochemisch en mechanisch. Binnen die vormen zijn er meerdere varianten met elk unieke combinaties van eigenschappen, zoals vermogen (MW) en capaciteit (MWh), maximale ontlad- en oplaadtijd, zelfontlading, toepasbaarheid, fase van innovatie, investeringskosten, efficiëntie, doorlooptijd, ruimtelijke impact en veiligheidsaspecten. In de bijlage (8.4) worden deze aspecten per techniek naast elkaar gezet.

Figuur 8 Versimpelde weergave energiesysteem met elektriciteitsopslag



Welk type opslagsysteem het beste geschikt is voor een bepaalde functie is gebaseerd op de combinatie van de hierboven genoemde eigenschappen van de opslag en de vereisten van de functie. Elektriciteitsopslag is van belang omdat het kan zorgen voor het balanceren van vraag en aanbod (op korte, middellange en lange termijn), het ondersteunen van het elektriciteitsnet en het verlichten van netcongestie. In paragraaf 3.5.1 zijn de belangrijkste markten beschreven waar de functies van elektriciteitsopslag worden uitgevoerd. Balanshandhaving (ter ondersteuning elektriciteitsnet) vindt bijvoorbeeld op korte-termijn plaats en daarvoor worden opslagsystemen toegepast die op vol vermogen hoogstens een paar uur elektriciteit kunnen leveren. Voor het verlichten van netcongestie is vaak een langere ontlad- en oplaadtijd nodig, waarvoor andere technieken nodig zijn. Aanvullend kan elektriciteitsopslag ook zorgen voor back-upvermogen (voor gebruikers die zich willen verzekeren van stroom in geval van stroomuitval) en peakshaving (het verlagen van een energierekening door het verlagen van de hoogste verbruikspiek die de het elektriciteitsstarief bepaalt).

Technieken kunnen afzonderlijk (individueel) worden ingezet, maar het is ook mogelijk meerdere kleine opslagsystemen virtueel te koppelen tot één groter opslagsysteem. Via een geaggregeerde constructie kan het makkelijker zijn toegang te krijgen tot afzetmarkten en in aanmerking te komen voor financiering.



Voor elektriciteitsopslag kunnen de volgende gebruikskoncepten worden onderscheiden. Deze worden toegelicht in de volgende paragrafen:

- Thuisbatterij.
- Collectieve batterij, zoals een buurtbatterij.
- Grootschalige elektriciteitsopslag bij opwekker of verbruiker.
- Stand-alone elektriciteitsopslag met eigen aansluiting (ook wel grid- of systeembatterij genoemd).

Thuisbatterijen

Bij thuisbatterijen gaat het om een klein opslagsysteem (~ 2–10 kWh) dat achter de elektriciteitsmeter wordt geplaatst bij huishoudens. Bijna altijd gaat het hier om lithium-ion (Li-ion) batterijen. De batterij heeft voldoende capaciteit om een paar uur per dag te overbruggen. De gebruiker kan hiermee het eigen verbruik van zelfopgewekte zonne-energie vergroten of met een dynamisch energiecontract elektriciteit inkopen tegen gunstige tarieven. In het eerste geval kan dat congestie door overmatige invoeding van eigen opwekking uit zon-PV tijdens zomerse dagen beperken. Nu wordt die overmatige invoeding overigens vaak al beperkt door (automatische) afschakeling van de PV-installatie.

Met de beoogde afbouw van de salderingsregeling wordt een prikkel gecreëerd om elektriciteit zelf te gebruiken en/of op te slaan. Uit onderzoek van CE Delft in opdracht van Netbeheer Nederland (CE Delft, 2022) blijkt dat de toegevoegde waarde van thuisbatterijen voor het ontlasten van het elektriciteitsnet onzeker is: alleen de specifieke inzet van batterijen voor uitgesteld verbruik van eigen opwek uit zon-PV draagt bij aan het ontlasten van het elektriciteitsnet. Inzet voor uitgesteld gebruik van goedkope elektriciteit – bijvoorbeeld als er veel windenergie beschikbaar is – kan netcongestie op de wijktransformator juist versterken. Dat komt door de toenemende gelijktijdigheid van elektriciteitsverbruik voor het laden van de batterij. Energiehoogleraar Martien Visser (Visser, 2023) voorziet dan ook dat thuisbatterijen in de zomer al vol zitten voor de middagpiek en in de winter juist extra netwerkbelasting kunnen veroorzaken als geladen wordt wanneer er veel wind op zee is. Thuisbatterijen zijn daarnaast vaak niet voldoende groot om elke piek af te vangen; als het inname- en afgiftevermogen wordt geschaald op de zon-PV installatie (en de eigen vraag), schiet de opslagcapaciteit vaak tekort om de pieklevering van de eigen installatie volledig op te slaan. Milieu Centraal raadt thuisbatterijen af en wijst op andere manieren om slim om te gaan met zonnestroom (Milieu Centraal, 2022). Bijvoorbeeld door de vaatwasser of wasmachine aan te zetten als zonnepanelen stroom leveren of een elektrische auto op te laden.

De bijdrage die thuisbatterijen kunnen leveren aan het verlichten van spanningsproblematiek is slechts beperkt. Zonnepanelen zorgen voor een grote gelijktijdige piek in het laagspanningsnet, juist op momenten dat er vaak weinig vraag is thuis. Hierdoor kunnen er spanningsklachten en capaciteitsproblemen ontstaan. Wanneer het lokale laagspanningsnet teveel zonnestroom moet afvoeren, schakelen omvormers van zonnepanelen automatisch uit om te hoge spanning te voorkomen. Dit gebeurt vooralsnog maximaal tientallen uren per jaar, maar kan afhankelijk van de netconfiguratie en zonvermogen in een wijk oplopen. Wel is het zo dat altijd dezelfde zonnepanelen als eerste afgeschakeld worden. Door het gebruik van een thuisbatterij kan voorkomen worden dat zich een spanningsprobleem voordoet op het net. Hiervoor moet de batterij wel op het juiste moment ingezet worden en capaciteit beschikbaar hebben.

Collectieve batterij (of buurtbatterij)

Een collectieve batterij is een energieopslagsysteem dat op het laag- of middenspanningsnet wordt geplaatst met als doel lokale problemen (zoals een overbelasting van het elektriciteitsnetwerk, oftewel netcongestie) op te lossen en/of voor lokale partijen baten te creëren (zoals een lagere energierekening). De meest bekende vorm is een buurtbatterij.

In tegenstelling tot een thuisbatterij die achter de elektriciteitsmeter in een woning zit, en in principe alleen in die woning elektriciteit levert, heeft een buurtbatterij een eigen aansluiting op het elektriciteitsnet. Een buurtbatterij is dus een onafhankelijk functionerende (stand-alone) toepassing, met bijbehorende nettarieven en energiebelastingen. Buurtbatterijen zijn momenteel bijna altijd Li-ion batterijen en hebben een orde van grootte van <1,5 MW.



Witteveen+Bos heeft in opdracht van de Provincie Noord-Holland onderzoek gedaan naar buurtbatterijen en concludeerde het volgende (Witteveen+Bos, 2023):

1. Een buurtbatterij leidt niet tot een lagere energierekening voor huishoudens.
2. Een buurtbatterij is geen efficiënte oplossing om de uitrol van zon op dak te vergroten.
3. Een buurtbatterij is geen voorkeursoplossing voor netcongestie.

Het laagspanningsnet, waar woningen op zijn aangesloten, is vooralsnog uitgesloten voor congestiemanagement. Hierdoor mogen buurtbatterijen of andere flexibiliteitsoplossingen op laagspanningsniveau (nog) geen rol spelen in congestiemanagement waardoor ze (nog) geen bijdrage kunnen leveren aan het verminderen van lokale netcongestieproblematiek.

Dit neemt niet weg dat er wel andere toepassingen te overwegen zijn voor collectieve batterijen. Bijvoorbeeld in combinatie met laadpleinen voor elektrische auto's, of op plekken waar een buurtbatterij achter-de-meter van één partij (of in een energiegemeenschap⁸) gezet kan worden. In de nieuwe Energiewet wordt de mogelijkheid gecreëerd om buurtbatterijen ook in de nieuwe samenwerkingsvorm als energiegemeenschap te exploiteren. Leden van een energiegemeenschap zouden hun overvloedige energieproductie kunnen opslaan of leveren aan andere leden zonder tussenkomst van een traditionele leverancier met een leveringsvergunning.

De Minister voor Klimaat en Energie heeft – in antwoord op de motie Erkens⁹ – toegezegd om een onderzoek te doen naar de wenselijkheid van thuis- en buurtbatterijen en mogelijk beleid om knelpunten op te lossen. De resultaten van dat onderzoek worden verwacht in Q3-2023.

Grootschalige elektriciteitsopslag bij opwekker of verbruiker

Bij grootschalige opslag gaat het om batterijen geplaatst bij een zonne-PV-installatie, windpark of grote afnemer. Grootschalige elektriciteitsopslag wordt momenteel bijna altijd gerealiseerd met Li-ion batterijen.

De businesscase van grootschalige batterijen is beter dan die van thuis- en buurtbatterijen omdat:

- Grote batterijen goedkoper zijn per kWh opslagcapaciteit door schaalvoordelen.
- Grootverbruikers geen gebruik kunnen maken van de salderingsregeling.
- Een batterij netkosten kan besparen bij grote afnemers door de piekvraag te reduceren. Dat komt doordat de transportkosten bij grootverbruikersaansluitingen afhankelijk zijn van de grootste piekvraag in het jaar.
- Een batterij kan netkosten besparen bij zonneparken door de pieklevering te reduceren.
- Grotere batterijen ingezet kunnen worden voor balanshandhaving van TenneT. Kleinere batterijen zouden dat in theorie ook kunnen, maar alleen als er veel kleine batterijen virtueel aan elkaar gekoppeld worden tot één grote batterij en ze in het portfolio van een Balancing Service Provider (BSP zitten).

De komende jaren wordt, gedreven door netcongestie, een sterke groei van grootschalige batterijen achter-de-meter verwacht. De hoeveelheid batterijen die bedrijven achter-de-meter realiseren is nu niet in te schatten, maar kan een veelvoud worden van de hoeveelheid batterijen die handelen op de energiemarkten. Grootschalige batterijen achter-de-meter worden op verschillende manieren ingezet:

- Batterijen bij een individuele onderneming met verbruik en eventueel eigen opwek. Bedrijven zullen zelf 'achter-de-meter'-batterijen in gebruik nemen. Dit doen bedrijven vanwege oplopende wachttijden voor een grotere netaansluiting of omdat extra transportcapaciteit niet mogelijk is, terwijl het bedrijf wel wil uitbreiden of elektrificeren. De businesscase voor batterijopslag achter-de-meter is dat de kosten van niet elektrificeren of uitbreiden (opportunity costs) groter zijn dan de kosten van een batterij. Bij appartementencomplexen kunnen batterijen een vergelijkbare functie vervullen door het energieverbruik van bijvoorbeeld liften te verlagen en de opwekking van zonne-energie te verhogen.
- Batterijen bij zon- of windparken worden op dit moment door marktpartijen onderzocht en beperkt ontwikkeld. Voor batterijsystemen is het vaak rendabeler om te handelen op energiemarkten dan

⁸ In een energiegemeenschap wordt lokaal door burgers en/of bedrijven samengewerkt.

⁹ Kamerstuk 35594-38, vergaderjaar 2022–2023



zonne-energie op te slaan en later in te voeren. Curtailment, het actief afschakelen van de opwek van wind- of zonne-energie bij teveel aanbod, is mogelijk met beperkte maatschappelijke kosten. Er wordt dan wel minder duurzame energie geleverd.

- Naast de toepassing van batterijen achter-de-meter door individuele partijen kunnen batterijen zorgen voor buffercapaciteit binnen zogenaamde energy hubs. Dit zijn slimme, lokale energiesystemen waar opwek, opslag en verbruik (en eventueel ook conversie naar andere energiedragers) op lokaal niveau afgestemd worden tussen verschillende partijen. Een energy hub kan onder meer het elektriciteitsnetwerk ontlasten en wordt dan ook als oplossing gezien voor netcongestie. Energy hubs worden momenteel nog ontwikkeld als pilots. In het Landelijk Actieprogramma Netcongestie (LAN) zijn acties opgenomen om energy hubs meer te faciliteren en op te schalen.

Stand-alone elektriciteitsopslag

Stand-alone elektriciteitsopslag is (grote) batterij met een eigen aansluiting op het elektriciteitsnet en wordt ook wel grid- of systeembatterij genoemd. Stand-alone batterijen zijn nu vaak 1- of 2-uursbatterijen, maar nieuwe projecten krijgen steeds vaker een langere op- en ontladduur. De grootte van standalone batterijen varieert van enkele MWh tot enkele honderden MWh. Stand-alone elektriciteitsopslag wordt momenteel bijna altijd gerealiseerd met Li-ion batterijen.

Het grote verschil met een collectieve batterij is dat er bij de stand-alone batterijen geen andere energieverbruikers of energie-opwekkers zijn aangesloten. De grootschalige stand-alone batterij wordt doorgaans vanuit een commercieel oogpunt gerealiseerd om in te spelen op de verschillende elektriciteitsmarkten. Op dit moment worden dit soort batterijen het meest ingezet voor balanceringsdiensten en handel op intraday- en day-ahead-markten.

4.1.2 Hoe wordt elektriciteitsopslag gestimuleerd in NL?

In Nederland wordt elektriciteitsopslag op verschillende manieren gestimuleerd.

Regeling Energie-Investeringsaftrek voor ondernemers (EIA)

De regeling Energie-Investeringsaftrek (EIA) is voor ondernemers die onder de inkomstenbelasting of vennootschapsbelasting vallen. De investeringskosten voor een batterijsysteem kunnen worden vermindert door gebruik te maken van de EIA. In de periode 2020 t/m 2022 werd hier 82 keer gebruik van gemaakt. Eén van de voorwaarden is dat de batterij geladen wordt uit een duurzame bron van energie.

Energie-innovatie instrumentarium

De Topsector Energie (TSE) is een van de topsectoren – gebieden waar het Nederlandse bedrijfsleven en onderzoekscentra wereldwijd in uitblinken – waarin overheid, ondernemers, onderzoekers en maatschappelijke organisaties samenwerken aan de opgaven voor Nederland. Onder het TSE instrumentarium vallen verschillende regelingen die richten zich op het ondersteunen van onderzoek naar en het ontwikkelen van technologieën, producten of diensten die kosteneffectief CO₂-emissies kunnen reduceren in 2030. Een groot deel hiervan is in 2021 gebundeld in één subsidiemodule onder de naam Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie (MOOI). Daarnaast bestaat de regeling Demonstratie energie- en klimaatinnovatie (DEI+, voor het ondersteunen van innovatieve pilot- en demonstratieprojecten), de subsidieregeling Hernieuwbare Energietransitie (HER+, specifiek voor het verlagen van de kosten van CO₂-reducerende technologieën) en vergelijkbaar de Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++). Meer toelichting is te vinden in de Kabinetsaanpak Klimaatbeleid Innovatiebeleid.¹⁰

Deze regelingen ondersteunen een grote diversiteit aan innovatieprojecten met betrekking tot energieopslag. Begin 2023 waren er 43 innovatieprojecten actief op dit onderwerp, ter waarde van €81M subsidie. Het betreft hier elektriciteits-, moleculen- en warmteopslag, verspreid over verschillende toepassingsgebieden. De ondersteuning beslaat de gehele innovatieketen, van onderzoeks-/ontwikkelingsprojecten in met name Privaat-Publieke Samenwerkingen (PPS)-toeslag en MOOI, tot aan demonstratieprojecten in DEI+ en HER+. Een goed voorbeeld van de inzet van het energie-innovatie instrumentarium in het kader van opslag is de

¹⁰ Kamerstuk 32813-661, Vergaderjaar 2020–2021



MOOI Systeemoplossingen inpassing grootschalige opwekking hernieuwbare elektriciteit (SIGOHE) van 2021. Deze regeling van 13 miljoen euro ondersteunde oplossingen voor grootschalige opwekking van hernieuwbare elektriciteit die expliciete aandacht hadden voor inpassing in het grotere energiesysteem. Opslag en conversie vormen hierin een belangrijke pijler.

Nationaal Groeifonds

Het Nationaal Groeifonds is een initiatief van de ministeries van Economische Zaken en Klimaat en Financiën. Met het dit fonds trekt het kabinet tussen 2021 en 2025 € 20 miljard uit voor kennis en innovatie investeringen, op terreinen waar de meeste kansen aanwezig zijn voor structurele en duurzame economische groei. In de tweede ronde van het Nationaal Groeifonds zijn middelen toegekend aan het voorstel NXTGEN HIGHTECH, waarin het ontwikkelen van productieapparatuur voor batterijen één van de zes technologiedomeinen vormen. In de derde ronde van het Nationaal Groeifonds heeft het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat het voorstel 'Material Independence & Circular Batteries' ingediend waarin een programma wordt uitgewerkt voor de uitbouw van activiteiten rondom batterijen langs de lijnen van de kansen die beschreven zijn in de Actieagenda Batterijsystemen. Hierbij zijn meer dan 70 bedrijven en kennisinstellingen betrokken. Het programma zoals voorgesteld in het Groeifondsvoorstel moet een positieve bijdrage realiseren aan het Nederlandse verdienvermogen, de maatschappelijke uitdagingen rondom de energietransitie en strategische autonomie.

Ondersteuning via investeringen

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat financiert samen met andere overheden op diverse manieren het bedrijfsleven in de sector voor elektriciteitsopslag. Bijvoorbeeld door deelname in Invest-NL, een private onderneming die ondernemingen financiert die Nederland duurzamer en innovatiever maken. Zo investeerde Invest-NL in 2021 22 miljoen euro in LeydenJar uit Eindhoven – dat silicium batterij anodes produceert – voor opschaling van hun batterijfabriek en technologie ontwikkeling. (Invest-NL, 2021)

Daarnaast neemt EZK deel in Regionale Ontwikkelingsmaatschappijen (ROMs), ondernemingen met publieke aandeelhouders, gericht op het versterken van de economie en werkgelegenheid in een specifieke regio (Regionale ontwikkelingsmaatschappijen, 2022). De Brabantse Ontwikkelingsmaatschappij investeerde bijvoorbeeld 4 miljoen euro in LionVolt uit Eindhoven, dat een efficiënte en duurzame Li-ion vastestofbatterij ontwikkelt. (LionVolt, 2023)

Nationaal Actieplan Batterijsystemen

Dit Actieplan is geschreven door een expertgroep uit het veld, in consultatie met de topsectoren Topsector High Tech Systemen en Materialen (HTSM), Energie en Chemie. Het Actieplan schetst kansen voor Nederland langs de waardeketen van batterijen. Die liggen bijvoorbeeld op nieuwe materialen en concepten, stationaire opslag ten behoeve van netondersteuning en end-of-life. Om deze kansen te realiseren en de betrokken bedrijven en kennisinstellingen te ondersteunen, worden actielijnen geschetst, waaronder Human Capital en het realiseren van een platform om het veld te verbinden. Het Actieplan wordt momenteel afgerond. In februari 2023 is een Nationaal Groeifondsvoorstel ingediend voor circulaire batterijen in Nederland. Voor de zomer van 2023 wordt besloten welke voorstellen worden toegekend.

Battery Competence Cluster

Ook wordt ingezet op het creëren en organiseren van een batterijecosysteem. Onder andere Brainport Development, de ROM OostNL en de branchevereniging RAI Automotive zijn de aanjagers geweest van de oprichting van het Battery Competence Cluster, dat als doel heeft om de krachten en kennis op het gebied van batterijen in Nederland te bundelen en op te bouwen¹¹. Hierdoor worden samenwerkingen tussen bedrijven en kennisinstellingen aangejaagd.

Interdepartementale strategische aanpak batterijen

IenW trekt de interdepartementale aanpak batterijen, waarmee door diverse departementen (EZK, BZ, BZK en FIN) wordt samengewerkt om de toename van het gebruik van batterijen in de samenleving – in

¹¹ Zie ook de website: [Battery Competence Cluster - NL](#)



transport, energieopslag en consumentenproducten – verantwoord te laten verlopen en de kansen ervan slim te benutten. In de interdepartementale aanpak worden diverse lijnen beschreven, zowel met betrekking tot leveringszekerheid van grondstoffen, als het gebruik in het net, als uitvoering van de producentenverantwoordelijkheid (recycling van batterijen). De aanpak dient op dit moment vooral om synergie tussen reeds genomen acties te bevorderen. E.e.a. staat toegelicht in de Kamerbrief ‘Voortgang strategische aanpak batterijen 2022’.¹²

4.1.3 Hoeveel opslagcapaciteit is er gerealiseerd?

Volgens het smart storage rapport van DNE Research (DNE Research, 2022) waren er eind 2021 in totaal 2.117 batterijsystemen aangesloten in Nederland met een totale capaciteit van ongeveer 185 MWh. Thuisbatterijen kwamen het meest voor, ongeveer 64% van het totaal aantal systemen terwijl dit maar ongeveer 3% uitmaakt van de totale capaciteit. De rest bestaat met name uit grotere systemen die ingezet worden voor energiebalanceren en peakshaving. Dit onderzoek was gebaseerd op een uitvraag onder marktpartijen. De netbeheerders hebben aangeven op dit moment de registratie van gerealiseerde opslag systemen nog niet allemaal gereed te hebben. Kleinschalige thuisbatterijen worden achteraf gemeld bij een netbeheerder, waardoor de netbeheerder geen zicht heeft op geplande installaties.

Onlangs heeft Strategy (Strategy, 2023) onderzocht dat er 34 GW aan grootschalige batterijen in de pijplijn zit bij de netbeheerders. Dit betreft projecten uit verschillende fases in de pijplijn, van verkennend gesprek tot een concrete aanvraag voor een netaansluiting. Ongeveer 28 GW van de pijplijn betreft initiatieven die zijn aangevraagd zijn bij TenneT en ongeveer 6 GW zijn initiatieven aangevraagd bij de regionale netbeheerders. Uit een businesscase-analyse van CE Delft (CE Delft, 2023) volgt dat slechts 0,5 tot 2 GW daadwerkelijk rendabel kan opereren op de verschillende energiemarkten, voornamelijk voor balanceringsdiensten.

Hoe concreet deze aanvragen zijn is moeilijk te zeggen. Het proces voor het aanvragen van een aansluiting bestaat uit de volgende fases:

- Informatiefase, in deze fase vinden gesprekken plaats met de aanvrager en op basis daarvan wordt een quickscan gemaakt, hierin staat op welk station de aanvrager wordt aangesloten, de globale tijdlijn en een inschatting van de kosten. Bij TenneT is de quickscan ondertussen onderdeel van de offerte voor het basisontwerp.
- Basisontwerp, in deze fase wordt het aansluitverzoek uitgewerkt in een projectomschrijving, planologische aspecten, vergunningen en technische inhoud. Deze fase wordt afgesloten met het ondertekenen van de realisatieovereenkomst. Na het tekenen van de offerte basisontwerp staat de aanvrager pas officieel in de wachtrij en dient een netbeheerder ‘first-come-first-serve’ toe te passen.
- Realisatiefase, na ondertekening van de realisatieovereenkomst start deze fase en duurt totdat aansluiting is gerealiseerd en de aansluit- en transportovereenkomst is gesloten.

Veel van deze aanvragen blijven nu vasthangen tussen quickscan en offerteaanvraag voor basisontwerp. Bij het basisontwerp worden de nodige werkzaamheden in planning gezet die rekening houdt met de aanwezige capaciteit bij de netbeheerders en andere stakeholders om alle stappen te kunnen doorlopen. Het maken van het basisontwerp voor de grote aantallen aanvragen ingediend bij TenneT kost ook de nodige capaciteit en het komt voor dat aanvragers een jaar moeten wachten tot dat een basisontwerp wordt gemaakt. Een basisontwerp kan aangeven dat de aansluiting over 5 jaar gereed zal zijn.

Uit de laatste monitoring leveringszekerheid (TenneT, 2023) blijkt dat TenneT verwacht ongeveer 10GW aan batterijen nodig te hebben in 2030 voor een acceptabele Loss of Load Expectation (LOLE), waarvan 9GW stand-alone op basis van het huidige kabinetsbeleid waarin in 2030 centrales geen kolen meer mogen verstoken. Onder de aanname dat flexibele vraagsturing nog geen toevlucht heeft genomen omdat de industrie de afgelopen tientallen jaren op base-load is ingericht en waterstof in 2030 nog niet voldoende ‘online’ is.

¹² Kamerbrief ‘Voortgang strategische aanpak batterijen 2022’, 23 december 2022



4.2 Analyse van elektriciteitsopslag in omliggende landen

Elektriciteitsopslag staat internationaal hoog op de beleidsagenda's, mede gedreven door het wenkend economisch (export)perspectief. Met name de sectorontwikkeling rondom batterijtechnologie krijgt in Europa veel aandacht, vaak gekoppeld aan de elektrificatie van mobiliteit. Meer vanuit klimaatdoelstellingen gedacht zijn er in onze buurlanden verschillende (complementaire) speerpunten te ontdekken. Deze worden hieronder beschreven, meer informatie is te vinden in de bijlage (8.3). Deze landen hebben – net als Nederland – (nog) geen kwantitatieve doelen voor energieopslag opgesteld.

Verenigd Koninkrijk

Het Verenigd Koninkrijk is sinds 2017 bezig met het aanpassen van de marktordening om flexibiliteit beter te kunnen accommoderen, en lanceerde in 2022 een tender voor demonstraties van Longer-Duration Energy Storage (LDES)-projecten waarin inzichten in barrières voor dit type opslag worden verzameld. Nederland kan leren van de gecoördineerde flexibiliteitsaanpak waarin aanpassingen van wet- en regelgeving centraal staan, en van de manier waarop de LDES-regeling is opgezet.

Duitsland

Duitsland is nationaal en internationaal actief in diverse onderzoekstrajecten rond elektriciteitsopslag, houdt de implementatie van technieken nauwgezet bij en profileert zich daar mee met hulp van sectororganisatie BVES. Nederland kan leren van de gedegen data-verzameling over de stand van de sector, de aandacht voor internationale samenwerking en de ervaringen met de gedeeltelijke vrijstelling van nettarieven.

In Huntorf, nabij Bremen, is in 1978 de eerste CAES (perslucht)installatie ooit gebouwd. Deze installatie, van het type D-CAES, gebruikt 0.8kWh elektriciteit en 1.6kWh gas om 1kWh aan elektriciteit te genereren. (Loughborough University, VK, 2023)

België

Vlaanderen zet in haar Flexibiliteitsplan 2025 de strategische lijnen uit voor beleidsontwikkeling. Hierin definieert zij acties over het in kaart brengen van de flexibiliteitsbehoefte, het creëren van draagvlak en bewustzijn, aanpassingen in wet- en regelgeving en de behoefte aan data en indicatoren. Ook heeft Vlaanderen enige tijd thuisbatterijen gesubsidieerd, maar is daarmee gestopt om warmtepompboilers te subsidiëren. Nederland kan leren van de systemische aanpak van het flexibiliteitsvraagstuk en de ervaringen t.a.v. de toegevoegde waarde van de subsidie op thuisbatterijen.

Europese Unie

Op Europees niveau zijn er diverse uitvragen en samenwerkingsverbanden om innovatie in elektriciteitsopslag te stimuleren. Nederlandse partijen kunnen hier aan deelnemen en de overheid kan de gesteunde projecten actief volgen om scherper zicht te krijgen op de randvoorwaarden die nodig zijn voor opschaling. Een mooi voorbeeld is de lancering van de Energy Storage Coalition in mei 2023, waar verschillende organisaties vertegenwoordigd zijn, waaronder SolarPower Europe, de European Association for Storage of Energy (EASE), Wind Europe en Breakthrough Energy. Deze coalitie wil decarbonisatie van het Europese energiesysteem versnellen door meer energieopslagoplossingen in te zetten ter ondersteuning van hernieuwbare-energiebronnen. (Solarmagazine.nl, 2023)

4.3 Verwachte ontwikkelingen elektriciteitsopslag in Nederland

4.3.1 Ontwikkelingen in Nederland

Grootschalige elektriciteitsopslag zal de komende jaren een belangrijke rol spelen om de fluctuerende vraag én het fluctuerende aanbod (elektriciteit uit zon en wind) op elk moment met elkaar in balans te brengen. Er is veel flexibiliteit – waaronder elektriciteitsopslag – nodig om het toekomstige duurzame energiesysteem in balans te houden. Elektriciteitsopslag heeft dus een belangrijke rol in een duurzaam, CO₂-vrij, betaalbaar en betrouwbaar energiesysteem.



Potentie van batterijen om curtailment te verminderen

Curtailment, het actief afschakelen van de opwek van wind- of zonne-energie bij extreem aanbod is een goedkope manier om overbelasting van het elektriciteitsnet te voorkomen. Toch wordt het over het algemeen als zonde ervaren, omdat er juist op de momenten dat er veel hernieuwbare energie beschikbaar is geen gebruik van wordt gemaakt. CE Delft heeft in januari 2022 een studie gepubliceerd waaruit blijkt dat met gerichte stimulering voor 5,5 GW batterijopslag bij zonneparken 7,5 GW_p extra zonnepanelen aangesloten kunnen worden op het elektriciteitsnet, zonder netverzwaring. (CE Delft, 2021) Dat biedt kansen voor de energietransitie ondanks de problemen rondom netcongestie. Batterijen bij zonneparken kunnen ervoor zorgen dat er meer zonnepanelen geplaatst kunnen worden op dezelfde netaansluiting, dat er minder elektriciteit verloren gaat door curtailment en dat de elektriciteit geleverd kan worden op momenten dat anders gas- of kolencentrales moeten worden ingezet. Batterijen bij zonneparken kunnen dus CO₂-reductie bewerkstelligen door uitgesteld elektriciteit in te voeren die anders gecurtaild was. Het achterliggende idee is om (een deel van) de piekproductie van een zon-PV installatie pas in te voeren op de momenten waarop het aanbod van hernieuwbare elektriciteit laag is en de vraag substantieel hoger dan het aanbod. Echter is er wel een grote onrendabele top voor uitgestelde invoeding met batterijen, naar schatting 85.000 euro per MW batterij per jaar. Uitgestelde levering in SDE++ is twee keer negatief geadviseerd door PBL (Solar Magazine, 2022), met als voornaamste argument dat de maximale toegestane kosten van 300 euro per ton CO₂ ruim wordt overschreden. De voorgestelde maatregel kost naar verwachting rond de € 2.500 per ton CO₂ vermeden reductie. Om de CO₂-reductiedoelstelling voor 2030 in zicht te houden is in maart 2023 het interdepartementaal beleidsonderzoek (IBO) rapport “Scherpe doelen, scherpe keuzes” gepresenteerd¹³ gelanceerd met mogelijke aanvullende maatregelen. Daar is een maatregel opgenomen om een eventuele verplichting van batterijen voor uitgestelde levering bij zonneparken verder te verkennen i.c.m. een subsidie. Het is belangrijk om bij een eventuele normering/subsidiering van batterijen te borgen dat ze ook daadwerkelijk ingezet worden voor uitgestelde levering gezien er meer geld valt te verdienen met energiebalanceren.

Elektriciteitsopslag in mobiliteit en V2G

Kijkend naar de potentie van elektriciteitsopslag is ook de rol van elektrisch vervoer belangrijk. In het Smart Storage Trendrapport (DNE Research, 2022) uit 2022 wordt berekend dat er in 2021 8-10 GWh aan batterijcapaciteit rondreed in het personenvervoer (auto en bus) in Nederland – een veelvoud van de gerealiseerde stationaire opslag. De verwachting is dat dit de komende jaren snel zal toenemen. In hoeverre deze accu's ook buiten de mobiliteitstoepassing van waarde gaan zijn als opslagsysteem moet echter nog blijken. In diverse innovatieprojecten wordt onderzoek gedaan naar de potentie van 'Vehicle-to-Grid' (V2G), het aansluiten van elektrische auto's (in het Engels: Battery Electric Vehicles, BEV's) op het elektriciteitsnet waarbij de accu zowel kan laden als terugleveren. Eén voorbeeld hiervan is ROBUST, een project (met steun van de MOOI-regeling) waarin wordt onderzocht hoe stadsmobiliteit (deelauto's, OV) in combinatie met andere bronnen van flexibiliteit kan bijdragen aan het beperken van netcongestie.

In opdracht van het ministerie van IenW heeft PwC/Strategy& (Strategy&, 2021) in kaart gebracht wat de potentie van V2G op nationaal niveau zou kunnen zijn. De conclusies zijn in november 2021 gedeeld met de Kamerbrief 'Dubbele heffing energiebelasting bi-directioneel laden'¹⁴. V2G levert in potentie baten voor betrokken actoren, zoals elektriciteitsproducenten, netbeheerders, autobezitters, elektriciteitsgebruikers, maar ook de maatschappij als geheel. De verwachting is dat deze baten richting 2030, maar ook daarna richting 2035 blijven toenemen. Een BEV-eigenaar kan besparen op de energierekening en inkomsten genereren via het verhandelen van batterijcapaciteit. Daarnaast zijn er immateriële baten gerelateerd aan verduurzaming en onafhankelijkheid, bijvoorbeeld:

- Lagere investeringen in het elektriciteitsnet door het voorkomen van regionale congestie en het reduceren van de piekvraag;
- Lagere kosten van energie door goedkope back-up levering van elektriciteit en het optimaliseren van inkoop aan goedkope duurzame energie;
- Lagere CO₂-uitstoot door het reduceren van curtailment van hernieuwbare energie en het voorkomen van de inzet van grijze back-up productie.

¹³ Kamerbrief 'Aanbieding "Scherpe doelen, scherpe keuzes: IBO aanvullend normerend en beprijzend nationaal klimaatbeleid voor 2030 en 2050"', 13 maart 2023

¹⁴ Kamerbrief 'Dubbele heffing energiebelasting bi-directioneel laden', 2 november 2021



Tussen 2027 en 2030 zullen autofabrikanten nieuwe BEV-modelintroducties naar verwachting geschikt maken voor V2G. Het theoretisch batterijvolume van BEV's dat in 2030 beschikbaar is voor V2G wordt geschat op tussen 14 – 63 GWh gemiddeld per dag. Het kunnen benutten van dit potentieel is echter afhankelijk van een divers spectrum aan knelpunten. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om de beperkte beschikbaarheid van publieke V2G laadpalen, het gebrek aan transparantie over de prijzen bij het laden en opbrengsten bij het ontladen, de onduidelijkheid over de impact van V2G op de levensduur van de batterij, de salderingsregeling en de dubbele energiebelasting die afgedragen moet worden bij het leveren van V2G-diensten aan het elektriciteitsnet. Een andere belangrijke belemmering is de beperkte capaciteit van het laagspanningsnet, waar in 2025 al congestie wordt voorzien in 3.000 van de in totaal 14.000 CBS-buurtten. (TNO, 2022)

Ten aanzien van dit laatste knelpunt zal door de ministeries van Financiën en IenW in het eerste kwartaal van 2023 een rapport met oplossingsrichtingen worden gepresenteerd. Voor het (slim) aansluiten van elektrische auto's op het net is met de Voorjaarsnota 2023 € 403,8 mln. gereserveerd¹⁵.

Netcongestie

Netcongestie betekent dat er lokaal te weinig capaciteit op het elektriciteitsnetwerk is om in alle elektriciteitsvraag of -aanbod te voorzien. De problemen met netcongestie zijn de afgelopen jaren enorm toegenomen, zowel voor opwekking als voor afname van elektriciteit. Met name de congestie voor afname heeft grote nadelige maatschappelijke consequenties, zoals het niet kunnen realiseren van elektrificatie of groei bij bedrijven – en mogelijk in de toekomst ook het realiseren van woningen. Of batterijsystemen congestie voor afname zullen verminderen of juist verergeren, hangt af van de (ont)laadstrategie en beschikbare capaciteit op momenten van hoge netbelasting. CE Delft heeft een studie uitgevoerd naar de impact van huidige generatie grootschalige batterijsystemen (Li-ion met maximaal 4 uren energiec capaciteit) die gerealiseerd worden tot 2030 op afname netcongestie. De belangrijkste conclusies zijn als volgt (CE Delft, 2023):

- Congestieneutraal: voorkomen van extra netcongestie door batterijen is wenselijk en goed mogelijk met additioneel beleid. Congestieneutraal betekent dat de batterijen netcongestie niet verergeren, maar het ook niet oplossen. CE Delft heeft opties voor beleid van het Rijk, de ACM en netbeheerders in kaart gebracht waarmee batterijen congestieneutraal kunnen acteren. Het beleid omvat aanpassingen aan congestiemanagement, ruimtelijke sturing en nieuwe contractvormen tussen de netbeheerder en batterijexploitanten. Batterijen kunnen dan wel bijdragen aan een duurzaam energiesysteem zonder bij te dragen aan additionele netcongestie.
- Bij bedrijven: Bedrijven kunnen batterijen inzetten als er netcongestie is op hun eigen terrein (achter-de-meter). Daarmee kunnen bedrijven wel elektrificeren of groeien ondanks afname netcongestie.
- Bijdragen aan netcongestie: Met het huidige beleid verwacht CE Delft dat een groot gedeelte van de nieuwe batterijprojecten door energiebalancering de piekbelasting zullen verhogen en daarmee bijdragen aan netcongestie. Het huidige beleid rond congestie is congestiemanagement. Met congestiemanagement verdelen netbeheerders de beperkte ruimte op het elektriciteitsnet op momenten dat de vraag naar transport van elektriciteit hoger is dan wat het elektriciteitsnet aankan. Is deze vraag op een bepaald tijdstip te groot? Dan verbruiken of leveren klanten tijdelijk minder elektriciteit. Binnen de gestelde financiële grenzen in de regelgeving is er te weinig budget om batterijen te incentivieren om niet actief te zijn met balanceringsdiensten als ze daarmee congestie zouden veroorzaken. Daardoor zullen ze niet congestieneutraal acteren (de piek niet verhogen) maar juist bijdragen aan congestie. Batterijen leveren dan wel een nuttige rol aan een duurzaam en betrouwbare energiesysteem door energiebalancering, maar dragen (net zoals aangesloten bedrijven en woningen) wel bij aan de netbelasting en daarmee netcongestie.
- Afname netcongestie oplossen: Uit deze studie blijkt dat huidige grootschalige batterijen geen betrouwbare, betaalbare, schaalbare en uitvoerbare oplossing zijn om netcongestie voor de afname van elektriciteit op te lossen en daarmee extra afnemende klanten aan te sluiten. De huidige batterijprojecten kunnen dit technisch niet en de maatschappelijke kosten van het elektriciteitsnet verzwaren zijn lager.

¹⁵ Kamerbrief 'Voorjaarsbesluitvorming Klimaat' bijlage 2, 26 april 2023



De conclusies voor de mogelijke rol van huidige generatie batterijen bij opweknetcongestie zullen verschillen. Een vervolgstudie hierover wordt momenteel uitgevoerd, met verwachte oplevering in september 2023. Uit eerder onderzoek van CE Delft (CE Delft, 2021) blijkt wel dat batterijen tot 2030 niet rendabel ingezet kunnen worden met alleen het opslaan en later leveren van overschotten elektriciteit van zon of wind die nu weggegooid (via curtailment) worden.

Alternatieven voor (middel)lange-termijn elektriciteitsopslag

Zoals beschreven in paragraaf 4.1.1, worden momenteel voornamelijk Li-ion batterijen voor de gebruiksvormen van elektriciteitsopslag (thuis-, buurt-, grootschalig en stand-alone) gebruikt. Voor alle gebruiksvormen geldt dat er ook andere elektriciteitsopslag technieken zijn die (in de toekomst) gebruikt kunnen in plaats van Li-ion. Voorbeelden hiervan staan in Tabel 3 (paragraaf 3.5).

Flowbatterijen¹⁶ en LAES (vloeibare luchttopslag) zijn behoorlijk ver in ontwikkeling (respectievelijk TRL 8 en 9), maar het is wachten op de eerste commerciële toepassing in Nederland.

PHS (waterkrachtcentrales) en CAES¹⁷ (persluchtinstallaties) zijn qua ontwikkelingsniveau ook ver, maar kennen belangrijke uitdagingen m.b.t. de nodige ruimte. CAES (TRL 8) maakt gebruik van ondergrondse zoutcavernes, die geschikt worden gemaakt voor het opslaan van perslucht. Deze zoutcavernes zijn in theorie ook geschikt voor ondergrondse waterstofopslag.

PHS (TRL 11) wordt wereldwijd zeer veel toegepast, maar maakt in eerste instantie gebruik van stuwmuren waar op (aanzienlijke) hoogte water wordt opgepompt in geval van energieoverschot. In Nederland is PHS technisch mogelijk in de vorm van Ondergrondse Pomp Accumulatie Centrale (O-PAC), waarbij gebruik gemaakt wordt van voormalige mijnen. Het TKI Systeemintegratie heeft Berenschot in 2019 gevraagd een validatie uit te voeren van de businesscase van O-PAC in Limburg met een vermogen van 1.4GW, waaruit bleek dat de businesscase in 2030 (nagenoeg) kostendekkend zou zijn en dat het aanzienlijk efficiënter zou zijn dan de productie van groene waterstof (Berenschot, 2019). Afgezien van de investeringskosten, is dit plan o.a. vanwege maatschappelijke zorgen over de ondergrond niet ten uitvoer gebracht.

Een ander plan voor PHS in Nederland bouwt voort op het plan Lieveense dat een grote waterbuffer in het Markermeer beoogde te realiseren. Het nieuwe plan, Delta21 genaamd, beoogt een nieuwe waterbuffer tussen de Tweede Maasvlakte en het eiland Goeree Overflakkee. Het gaat om een opslagbekken van 20 km² in de vorm van een duinenrij, een gemaal én een afsluitbare kering, dat in eerste instantie dient voor de Nederlandse waterveiligheid: de pompen kunnen in geval van wateroverlast overtollig rivierwater wegpompen. Daarnaast beoogt Delta21 het zoute getij terug te laten keren in het Haringvliet ten behoeve van de natuur en kan het dienen als een PHS valmeer met een opslagduur van 12 uur en turbines die een vermogen van 1.85GW kunnen leveren. Een dergelijke oplossing vraagt – behalve om de uitwerking van meerdere technische vraagstukken die o.a. door de TU Delft worden onderzocht – zeer nauwkeurige uitwerking met het oog op inpassing, ecologie en maatschappelijke acceptatie.

Nieuwe(re) batterij technologieën

Niet opgenomen in Tabel 3 (paragraaf 3.5) zijn nieuwe(re) batterij technologieën die nog in ontwikkeling zijn, maar in de toekomst beschikbaar komen voor demonstratie, zoals:

- Vastestofbatterijen (in het Engels: Solid state batterijen, Si/Li)
- “Hybride” batterij (NiFe)
- IJzerpoeder (strikt genomen een waterstofderivaat)

¹⁶ Flowbatterijen zijn met kleine pilots al bewezen. Ontwikkelaar Elestor heeft een overeenkomst getekend met Vopak om de technologie verder op te schalen (ESNL, 2021).

¹⁷ Er bestaan twee varianten van persluchtinstallaties, namelijk ‘diabatisch’ (D-CAES) en ‘adiabatisch’ (A-CAES). Bij A-CAES is er geen sprake van warmte uitwisseling met de omgeving. Er zijn wereldwijd twee bestaande projecten op commerciële schaal, beide van het type D-CAES: in Huntorf (Duitsland) en McIntosh (Alabama, VS). (Loughborough University, VK, 2023)

**De vraag naar batterijen blijft groeien**

De eerder genoemde ontwikkelingen op het gebied van elektriciteitsopslag (o.a. in mobiliteit) maken dat de wereldwijde markt voor batterijcellen explosief aan het stijgen is. Met de Actieagenda Batterijsystemen is het potentieel dat Nederland heeft op het gebied van batterijen in meer detail uitgewerkt door PwC Strategy& (Strategy&, 2021).¹⁸ In opdracht van EZK heeft PwC Strategy& een compound annual growth rate van ongeveer 30% voor de batterijenmarkt (exclusief overige types van elektriciteitsopslag) becijferd, meer dan de 13% van de halfgeleidermarkt – ook onderschreven door McKinsey (McKinsey, 2022). Veruit het grootste deel van deze groei is gedreven door mobiliteitsapplicaties: zowel McKinsey als PwC Strategy& schrijven hier ongeveer 90% aan toe.

Economische kansen voor Nederland: zwaar vervoer en nieuwe technologie

PwC becijfert het totale potentieel voor het Nederlandse verdienvermogen op meer dan 3 miljard USD en verwacht dat het meeste verdiend kan worden met:

- productie van zware elektrische voertuigen (~\$1.950 M),
- productie van e-drive trains voor zware elektrische voertuigen (~\$1.000 M),
- productie van vastestofbatterijen (~\$250 M),
- productie van hardware voor batterij management systemen (~\$180 M),
- integratie van batterijen in het elektriciteitsnet (~\$150 M).

In Nederland is momenteel geen grootschalige bedrijvigheid op het gebied van batterijen, maar wel in de toepassing daarvan. In Nederland zijn enkele bedrijven actief in de sector voor zwaar vervoer, zoals DAF, Damen Shipyards Group en VDL; deze bedrijven realiseren een aanzienlijk deel van het Europese marktaandeel in die sector en passen batterijen toe in hun producten.

In Nederland liggen groeikansen op het gebied van batterijen dan ook deels in de implementatie daarvan in het zware vervoer. Deze sector is weliswaar meer divers dan die van personenauto's, maar kent nog geen grootschalige uitrol van elektrisch aangedreven voertuigen. Nederlandse bedrijven die nu al actief zijn in deze sector zetten momenteel in op elektrificatie, waarmee zij een voorsprong kunnen nemen.

Daarnaast kent Nederland veel expertise binnen de dunne-film technologie, die van oudsher toegepast wordt in de halfgeleidersector. Het gebruik van deze technologie zal een sleutelrol spelen bij de ontwikkeling van de nieuwe generatie batterijcellen. Groeikansen zijn dan ook aanwezig voor producenten van productieapparatuur voor nieuwe batterijcellen, alsmede voor de ontwikkeling van nieuwe chemische samenstellingen voor de volgende generatie batterijcellen. Voorbeelden hiervan zijn de siliciumanode en de vastestofbatterij.

Naast nieuwe batterijcellen zet Nederland ook in op nieuwe batterijen voor stationaire opslag, die gemaakt kunnen worden van materialen die veel minder schaars zijn dan de materialen waar batterijcellen – met een hoge energiedichtheid – van geproduceerd worden. Deze stationaire batterijen dragen bij aan een betere verdeling van groene energie over het elektriciteitsnet.

Economische kansen voor Nederland: recycling van batterijen

Het is voor Nederland belangrijk om in te zetten op goede recycling, zodat schaarse materialen uit batterijen hergebruikt kunnen worden. Hoewel activiteiten op dit gebied in Nederland nog niet grootschalig worden beoefend, is dit wel een onderdeel van de batterijwaardeketen dat nog onderontwikkeld is en waar Nederland een rol in kan gaan spelen.

Economische kansen voor Nederland: investeringen van de EU

Important Projects of Common European Interest (IPCEI) zijn strategische instrumenten voor de implementatie van de EU Industrial Strategy. Mede vanwege de afhankelijkheid van buitenlandse partijen heeft Europa recentelijk ingezet op twee grote IPCEI opschalingsprogramma's voor batterijen. Hiermee wordt 6,1 miljard euro aan publieke investeringen in de batterijwaardeketen ingezet, met een veelvoud aan verwachte private investeringen.

¹⁸ Kamerbrief 'Actieagenda Batterijsystemen', 23 september 2022



4.3.2 Financiële/economische obstakels en uitdagingen elektriciteitsopslag

De businesscase voor een batterij wordt bepaald door de investering, de operationele kosten en de opbrengst van de geleverde elektriciteit. De operationele kosten zijn de kosten voor onderhoud, gebruik van het elektriciteitsnetwerk en de aansturing van het opslagsysteem. Een onderdeel van de investeringskosten is de netwerkaansluiting. De uitdaging voor de exploitant is om de potentiële waarde zo veel mogelijk te benutten door inkomsten te genereren op meerdere markten.

Grootschalige stand-alone batterijen vooralsnog alleen rendabel op balanceringsmarkten

De stand-alone batterij kan worden ingezet op meerdere markten: de congestiemarkt, de day-ahead markt, de intradaymarkt en voor balanceringsdiensten. De opbrengsten zijn het hoogste voor de gestapelde businesscase met de day-ahead-, balanceringsdiensten (FCR, aFRR en onbalans) en congestiemarkt. De inkomsten op de day-aheadmarkt en de congestiemarkt zijn beduidend lager. BSP's komen alleen in aanmerking voor een capaciteitsvergoeding voor aFRR als ze minimaal 24 uur elektriciteit kunnen leveren. Dat betekent dat batterijsystemen met de huidige opslagcapaciteit (max. 4 uur) alleen geaggregeerd kunnen meedoen, d.w.z. door meerdere batterijen te combineren. Als de periode voor capaciteitsvergoeding kleiner wordt en/of de leverduur van batterijen verbetert, wordt de inzet van batterijsystemen aantrekkelijker. Het actief zijn op meerdere markten kan niet onbeperkt. Als een (deel van de) batterij wordt ingezet voor balanceringsdiensten, dan kan dat deel niet ingezet worden voor andere diensten omdat er boetes verbonden zijn aan niet reageren op de oproep van TenneT. Voor de termijnmarkten zijn de huidige generatie Li-ion batterijen niet geschikt, vanwege de beperkte opslagcapaciteit (max. 4 uur). Een beperking voor de inzet van een stand-alone batterij op de congestiemarkt is dat de opbrengsten te laag zijn en de opslagcapaciteit onvoldoende groot is om tijdens de gehele duur congestie op te lossen. Met de huidige prijzen en volumes zijn batterijen niet rendabel met enkel een functie voor de congestiemarkt (zie paragraaf 3.5.1 voor een uitgebreide toelichting).

Thuisbatterijen voorlopig niet rendabel, buurtbatterij moeilijk rendabel te maken

Buurtbatterijen zouden een belangrijke rol kunnen spelen in het lokaal afstemmen van vraag en aanbod. Witteveen+Bos (Witteveen+Bos, 2023) heeft echter aangetoond dat een buurtbatterij niet leidt tot een lagere energierekening voor huishoudens. De voornaamste verdienmodellen voor (buurt)batterijen zijn gericht op energiebalanceringsdiensten. Grotere batterijopslagprojecten hebben gemakkelijker toegang tot deze markten en zijn door schaalvoordelen meer rendabel dan kleine (buurt)batterijen. Er is geen verdienmodel voor een buurtbatterij om lokale overschotten zonne-energie op te slaan en op een later moment terug te leveren aan het net. Dit komt met name door verschuldigde energiebelasting en netbeheerkosten wanneer zonnestroom van en naar de buurtbatterij getransporteerd wordt. Door deze kosten is opslag van overschotten aan zonne-energie alleen zinvol met een batterij die is aangesloten op dezelfde aansluiting als de zonnepanelen. Want, alleen als de batterij zich achter dezelfde aansluiting bevindt als de zonnepanelen zijn geen energiebelasting en netbeheerkosten verschuldigd over de energie die wordt ontladen met de batterij.

Op dit moment is er voor consumenten geen financiële prikkel voor het aanschaffen van een thuisbatterij. Consumenten krijgen namelijk door de salderingsregeling een hoge vergoeding voor hun ingevoede stroom (CE Delft, 2021). Met het voorgestelde afbouwpad van de salderingsregeling zal thuisopslag na 2028 rendabel kunnen worden (Alliander, 2021).

Investerings in (middel)lange-termijnopslag komen moeizaam tot stand

Zoals beschreven in paragraaf 4.3.1, zijn er verschillende alternatieven voor (middel)lange-termijn elektriciteitsopslag. Omdat deze alternatieven nog slechts beperkt toepast zijn op commerciële schaal, is er sprake van hoge initiële projectkosten. Projectinvesteerders vragen daarnaast een premie ter dekking van het hogere risico bij projecten die nog niet in grote schaal zijn toegepast. (LDES Council, 2022)

De afwezigheid van financiële ondersteuning op demonstratieniveau (TRL7 en hoger) vormt momenteel de belangrijkste barrière om daadwerkelijk tot opschaling te komen. Demonstratie is tot op heden nog niet mogelijk in het Nederlandse innovatie-instrumentarium vanwege de Europese kaders voor staatssteun. Volgens deze kaders moet onderbouwd worden waarom het ondersteunen van een specifieke technologie gerechtvaardigd is, iets dat bij algemeen beleid voor batterijen lastig is, omdat batterijen niet per se tot CO₂-reductie leiden.



Binnen de DEI+ regeling zijn reeds meerdere pilotprojecten (testfase) ondersteund. Om financiële ondersteuning op demonstratieniveau mogelijk te maken kan deze regeling verbreed worden door een apart budgetschot te creëren voor deze thematiek.

4.3.3 Obstakels en uitdagingen m.b.t. wet- en regelgeving elektriciteitsopslag

Op dit moment is er geen definitie van opslag opgenomen in de Elektriciteitswet. Doordat deze definitie ontbreekt wordt in de regelgeving geen rekening gehouden met de eigenschappen van opslagsystemen. Hierdoor ontstaat een aantal knelpunten.

Tariefstructuur ongunstig voor businesscase opslag

De transporttarieven vastgelegd in de Tarievenscode zijn voor grootverbruikers gebaseerd op het gecontracteerde transportvermogen en het hoogst gemeten transportvermogen. Verbruikers van elektriciteit betalen transporttarieven voor het ontvangen van energie. Tijdens de oplaadfase van een batterij neemt de opslag energie op uit het net, wordt de opslagfaciliteit gezien daardoor gezien als afnemer en betaalt deze het verbruikerstarief. Batterijopslag levert kortstondige hoge vermogens. Het hoogst gemeten transportvermogen bepaalt de piekbelastingscomponent van het transportafhankelijke verbruikerstarief (TAVT). Hierdoor vormt de piekbelastingscomponent een grote kostenpost in verhouding tot de inkomsten. Bovendien is de verwachting dat dat netbeheerders de transporttarieven substantieel blijven verhogen. Voor kleinverbruikers elektriciteit met een aansluiting tot 3*80 Ampère geldt het uniforme capaciteitstarief. Het uniforme capaciteitstarief is geen prikkel om het netwerk efficiënt te gebruiken door bijvoorbeeld door batterijopslag of 'slim laden'.

Non-firm ATO formeel niet toegestaan

In gebieden waar afname- of teruglevercongestie is of dreigt, willen netbeheerders met initiatiefnemers voor batterij-opslag een overeenkomst sluiten. De batterij-initiatiefnemer kan een financiële compensatie ontvangen in ruil voor het beperken van de batterij zodra transportschaarste dreigt. Dit type overeenkomst, een non-firm Aansluit- en Transport Overeenkomst (of non-firm ATO) is nu formeel niet toegestaan. De wetgeving schrijft voor dat alle netgebruikers recht hebben op gegarandeerde capaciteit, maar het afsluiten van een non-firm ATO voor een batterij wordt door de ACM wel gedoogd wanneer dit op vrijwillige basis gebeurt.

Belemmeringen voor opslag in regelgeving cable pooling

De Elektriciteitswet staat Cable Pooling alleen toe voor zonne- en windenergie. Een amendement van lid Boucke om cable pooling mogelijk te maken voor opslag- en conversie-installaties in combinatie met een zon- of windpark is aangenomen in de Tweede Kamer.¹⁹

Mogelijk ongewenste effecten bij stimulering grootschalige opslag

Algemeen beleid om batterijopslag te stimuleren stimuleert ook batterijen die een kleinere bijdrage leveren aan maatschappelijke doelen, zoals CO₂-reductie en congestievermindering, en stimuleert batterijen die zonder stimulering al rendabel waren. Bij de stimulering van batterijopslag bij grootschalige zon-PV projecten door subsidiering is een probleem dat een batterijsysteem niet alleen gebruikt kan worden voor het uitgesteld leveren van elektriciteit, maar ook voor andere diensten. Dat kan leiden tot oversubsidiëring. (CE Delft, 2021)

Geen uniforme regels voor elektriciteitsopslag op decentraal niveau

Projecten op het gebied van elektriciteitsopslag vallen onder de algemene regelgeving op het gebied van ruimtelijke ordening, milieu en (brand)veiligheid. Dit kan problemen opleveren wanneer regels niet eenduidig zijn of wanneer regels niet passend zijn voor elektriciteitsopslag. Decentrale overheden zijn bevoegd om de veiligheidsvoorschriften voor opslagprojecten nader in te vullen. Dit leidt tot verschillende voorschriften op verschillende locaties. Dit bemoeilijkt de uitrol van opslagprojecten. Beperkte ervaring met opslagprojecten maakt de beoordeling van dergelijke projecten ook bewerkelijk voor decentrale overheden.

¹⁹ Kamerstuk 35594-24, Vergaderjaar 2022–2023



4.3.4 Technische en organisatorische obstakels en uitdagingen elektriciteitsopslag

De opslag van elektriciteit kent verschillende (milieu-)technische en organisatorische uitdagingen:

Hoge CO₂ uitstoot in productieproces Li-ion (Li-NMC)

Zoals beschreven in paragraaf 4.1.1, worden momenteel voornamelijk Li-ion batterijen voor de gebruiksvormen van elektriciteitsopslag (thuis-, buurt-, grootschalig en stand-alone) gebruikt. Om preciezer te zijn, wordt met name gebruik gemaakt van Lithium-Nickel-Manganees-Cobalt-Oxide (Li-NMC). Tijdens de productie van Li-ion (NMC) batterijen wordt veel CO₂ uitgestoten. Met name het drogen van de elektroden is een energie-intensief proces; de productie van een kWh batterij kost ca. 250 kg CO₂.

Risico's in de keten

Zowel voor de productie van technologieën als voor de gebruikte grondstoffen zijn er risico's in de keten. Voor batterijen en elektrolyzers zijn de drie grootste producerende landen goed voor ten minste 70% van de productiecapaciteit waarbij China het meest dominant is. Ook de winning van kritieke delfstoffen is zeer geconcentreerd. Voor batterijen gaat het om lithium, grafiet, fosfor en titanium. Daarnaast valt te denken aan koper voor kabels en infrastructuur. Zo zijn bijvoorbeeld slechts drie landen goed voor meer dan 90% van de wereldwijde lithiumproductie. Slechts 4% van de wereldwijde levering van kritieke grondstoffen die nodig zijn voor de energietransitie bevindt zich momenteel binnen de EU. Concentratie op elk punt in de keten maakt de gehele toeleveringsketen kwetsbaar voor incidenten. (IEA, 2023)

De waardeketen van batterijen van grondstof tot uiteindelijke applicatie is voor een groot deel buiten Europa gelokaliseerd. Meer dan de helft van alle lithium, momenteel de belangrijkste grondstof voor batterijen, wordt in Australië gewonnen, met Chili en China op nummer 2 en 3 (Visual Capitalist, 2022), door bedrijven uit diezelfde landen en de V.S. (InvestingNews.com, 2023). De raffinage van lithium vindt voornamelijk plaats in China (56%) en Chile (32%) (EC, 2023), maar er wordt volop in raffinage geïnvesteerd in o.a. Australië (WSJ Pro, 2023) en de V.S. (Federal Reserve Bank of Dallas, 2023). De productie van batterijcellen vindt voor het grootste deel plaats in China (ongeveer 80%), en voor een klein deel door de V.S. en enkele Europese landen zoals Hongarije en Polen (Visual Capitalist, 2022); bijna uitsluitend bedrijven uit Japan, Korea en China zijn hier verantwoordelijk voor (Green Car Congress, 2022). Het beeld bij de applicatie is een stuk meer divers: denk aan autofabrikanten gevestigd in Europa (Volkswagen en Tesla), de VS (Tesla) en China (Tesla, BYD).

Veiligheidsrisico's bij gebruik batterijen

Batterijen bevatten chemische stoffen die bij onjuist gebruik (bijvoorbeeld thermische en mechanische schokken) kunnen zorgen voor beschadigingen of ontbranding.

Ontbrekende standaarden en protocollen voor aansturing opslagsystemen

Op dit moment zijn er in de markt nog maar weinig aanbieders die batterijen leveren die via open protocollen zijn aan te sturen. Doordat er beperkt gebruik wordt gemaakt van eenduidige standaarden en protocollen bij de aansturing van batterijsystemen, is het moeilijk om rollen en verantwoordelijkheden te scheiden.

Efficiënte sluiting kringloop nodig

Om de circulaire economie zo goed mogelijk te organiseren voor batterijen, is het nodig om zo efficiënt mogelijk gebruik te maken van batterijen die voor hun primaire toepassing niet meer inzetbaar zijn. Hoe minder aanpassing aan het product gemaakt hoeft te worden in de vorm van refurbishment (reparatie) of repurposing (herbestemming van gebruiksdoel), hoe beter. Uitdagingen voor business cases liggen rondom eigenaarschap, veiligheidsissues en de effectieve organisatie van een keten. Door hoge kosten voor het geschikt maken van een nieuwe toepassing is een sluitende businesscase nog lastig te maken.

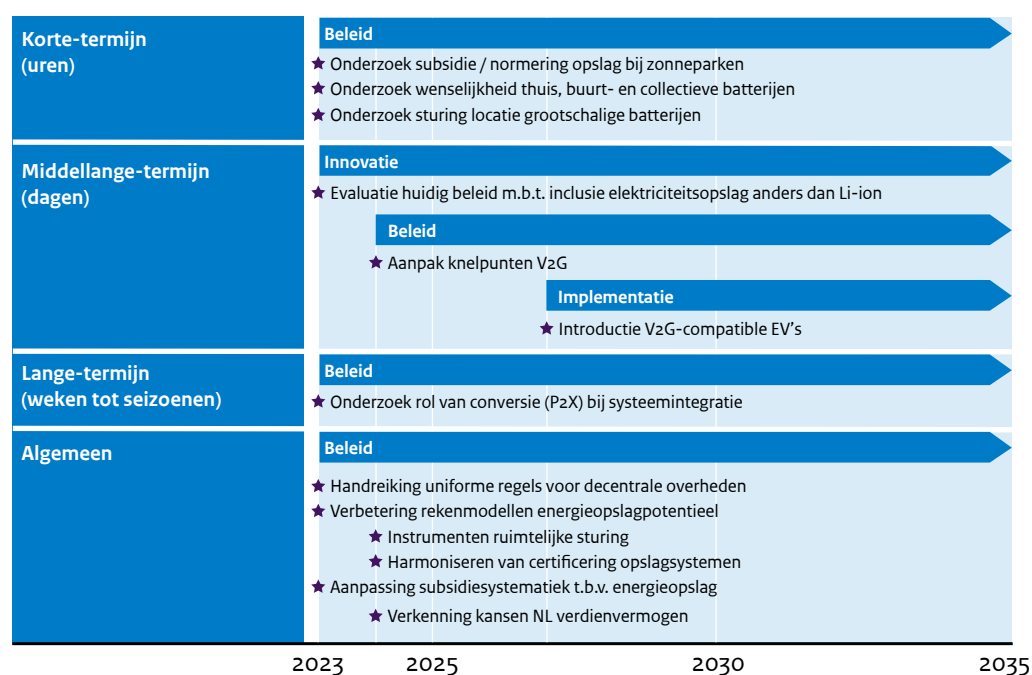


4.4 Benodigde acties en mijlpalen

4.4.1 Mijlpalen elektriciteitsopslag

De mijlpalen hebben betrekking op acties van EZK, en de pijlen geven aan wanneer marktimplementatie verwacht wordt. Langetermijn opslag zal niet vanuit sec elektriciteitsopslag komen, maar een conversiestap naar warmte of moleculen vergen.

Figuur 9 Overzicht mijlpalen elektriciteitsopslag tot aan 2035



4.4.2 Benodigde acties tot 2035 elektriciteitsopslag

In onderstaande tabel zijn de acties omschreven die nodig zijn voor het bevorderen van elektriciteitsopslag en voor 2035 moeten worden uitgevoerd. Toelichting bij de actietabel:

- Overlap met Landelijk Actieprogramma Netcongestie is gemarkeerd met: *LAN
- Overlap met de Nationale Actieagenda Batterijsystemen is gemarkeerd met #NAB
- De acties zijn geclusterd op basis van de randvoorwaarden zoals omschreven in paragraaf 3.5.



Tabel 4 Actie agenda elektriciteitsopslag

Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
Beleidskader: welk beleid en regelgeving is nodig?		
1. Visie ontwikkelen op en beleid voor flexibiliteit (*LAN 3.2.1.1)	Visievorming op nationaal, regionaal en lokaal niveau (zoals rol batterijen in samenhang met andere vormen van flexibiliteit/opslag) in Nationaal Plan Energiesysteem 2050	EZK i.o.m. netbeheerders, netgebruikers en IPO, Q2-2023
2. Koppelen Routekaart Energieopslag met batterijenstrategie	Met de 'strategische aanpak batterijen' wordt de toename van het gebruik van batterijen in de samenleving geschetst om veilig, verantwoord en duurzaam te verlopen en kansen slim benut. Dit is een Rijksbreed traject onder leiding van IenW, waarvan eind 2023 een voortgangsupdate gepland staat. IenW en EZK stemmen af over de samenhang tussen acties in de Routekaart Energieopslag en de strategische aanpak batterijen.	IenW, Q4-2023
3. Inventariseren wenselijkheid van thuis- en buurtbatterijen	In navolging van de Motie Erkens (Kamerstuk 35594-38), onderzoek doen naar de wenselijkheid van thuis- en buurtbatterijen.	EZK, Q3-2023
4. Onderzoeken of sturing van batterij locaties op basis van netwerkanalyses en uitvoerbaarheid mogelijk is	Sturing van batterij locaties zou wildgroei van batterijen kunnen voorkomen. Hierbij moet o.a. worden gekeken naar netwerkanalyse, uitvoeringsbeperkingen en vergunningen. Daarbij kan ook onderscheid gemaakt worden tussen type en schaalgrootte van batterijen.	EZK, TenneT en IPO, Q3-2023 (resultaten verkenning) en Q1-2024 (sturingskader in concept gereed)
5. Onderzoeken wat een gewenste verantwoordelijkheidsverdeling is (met bijbehorend instrumentarium) ten aanzien van de sturing op locaties	Zowel Rijk als decentrale overheden kunnen onder de Omgevingswet instrumenten inzetten om op locaties te sturen. Met decentrale overheden moet worden afgestemd wie welke verantwoordelijkheid neemt, ook in ruimtelijke zin. Ook hiervoor geldt dat onderscheid in type en schaalgrootte van batterijen relevant is.	EZK, Q4-2023
6. Onderzoeken wat de maatschappelijke kosten van netcongestie zijn	Onderzoek naar de hoogte van de opportunity costs in de businesscase voor bedrijven bij omgaan met netcongestie inclusief batterijopslag. De resultaten van dit onderzoek kunnen ook gebruikt worden bij de evaluatie van de financiële grens die nu bij congestie-management wordt gehanteerd.	EZK/RVO, Q4-2023
7. Herijken van de maximale vergoeding op de congestiemarkt	De financiële grens van €1,02 per MWh voor congestiemanagement wordt geëvalueerd conform hetgeen in het besluit is opgeschreven.	ACM, Q3-2024 en Q3-2025
8. Uitwerken maatregel Invoering batterijverplichting voor zonneparken (volgens de Voorjaarsnota 2023)	Deze maatregel betreft het voortzetten van bestaande subsidie-regelingen waarbij de verplichting wordt ingevoerd om batterijen te plaatsen bij zonneparken. Hierdoor kan meer hernieuwbare energie worden ingevoerd in het net. Voor deze maatregelen is een reservering van € 416,6 mln. opgenomen in MJP 2025. Voorwaarde: samenhang met het vastleggen en committeren aan het streefdoel klimaatneutrale elektriciteitssector in 2035.	EZK, Q3-2023
9. Creëren van een aparte categorie voor energieopslag en conversie en onderzoeken van de tariefstelling *LAN 2.1.6	Indienen van een voorstel om energieopslag en conversie anders te behandelen binnen de huidige kaders. Hierbij onderzoeken of deze systemen tariefmatig anders behandeld dienen te worden en welke tariefstelling een efficiënter gebruik van het net bevordert.	NBNL i.o.m. ACM en netgebruikers, Q2-2023
10. Aanpassen van de Energiewet om daarin energieopslag een zelfstandige rol te geven	De Europese Elektriciteitsrichtlijn (Richtlijn 2019/944) bevat een definitie voor energieopslag, met daarin een aparte rol. De definitie van energieopslag wordt geïmplementeerd in de nieuwe Energiewet.	EZK Resultaat: Q2-2023
11. Onderzoeken hoe elektriciteit minder te belasten is dan aardgas	Het verbruik van elektriciteit in termen van energie-inhoud kan aantrekkelijker worden gemaakt ten opzichte van het verbruik van aardgas. In het ontwerp-beleidsprogramma Klimaat is opgenomen dat de energiebelasting stapsgewijs wordt aangepast.	EZK en Fin, Q4-2023
12. Stimuleren van het harmoniseren van certificering voor opslag-systemen	Een omgeving creëren waarin Europese harmonisering plaatsvindt (EN norm) en Europese geharmoniseerde normen worden gebruikt. Eerste verkenning wat er mogelijk en nodig is.	EZK, Q4-2023



Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
13. Onderzoeken hoe behoud van garanties van oorsprong (GVOs) bij elektriciteitsopslag geregeld kan worden	In navolging van de toezegging aan het lid Boucke, die heeft verzocht om te onderzoeken hoe garanties van oorsprong behouden kunnen blijven bij opslag (Kamerstuk 29023-353). Op dit moment is dit ingewikkeld doordat bijvoorbeeld batterijen zowel via een direct aangesloten productie-installatie als via het elektriciteitsnet kunnen worden opgeladen. Doordat het opladen en ontladen van batterijen zich op dag basis veelvuldig kan afwisselen, is het met het huidige systeem van garanties van oorsprong op maandbasis niet mogelijk om de mate van hernieuwbaarheid van de in de batterij aanwezige energie te onderbouwen. Bij de herziening van de EU Richtlijn hernieuwbare energie (REDIII) worden aanpassingen voorgesteld, die het mogelijk maken om garanties van oorsprong in kleinere tijdseenheden uit te geven en in fracties van 1 MWh. Dit maakt het systeem van garanties van oorsprong fijnmaziger, waardoor het ook realistischer is om de mate van hernieuwbaarheid van energie bij opslag te kunnen vaststellen. De herziening van de Richtlijn hernieuwbare energie betekent daarmee een kick-start voor het onderzoek naar de uitgifte van garanties van oorsprong op uur- of kwartierbasis.	EZK, Q4-2023
14. Onderzoeken of er bij MLOEA een andere eigenaar batterij-opslag mogelijk is	In MLOEA (meerdere leveranciers op één aansluiting) is er geen mogelijkheid om een andere eigenaar van batterijen te hebben dan de eigenaar van de aansluiting. Gevolg is dat er een net ontstaat. Een GDS is dan de enige oplossing. Hiervoor moet een melding bij de ACM gedaan worden wat 7 à 8 maanden kost. TenneT heeft een voorkeur voor groeps-ATO boven GDS.	EZK, Q3-2023
15. Mogelijk maken van non-firm ATO's (of NFA's) *LAN 2.1.5	Non-firm Aansluit- en Transport Overeenkomst (of non-firm ATO's, of NFA's) zijn transportcontracten waarbij de gecontracteerde transportcapaciteit niet of deels gegarandeerd is, daartegenover staan mogelijk lagere nettarieven. Dit kan op verschillende manieren worden ingevuld. ACM heeft een paar mogelijkheden geconsulteerd en sommige partijen hebben nog kritische vragen.	ACM i.o.m. NBNL en netgebruikers, Q3-2023
16. Mogelijk maken van Cable Pooling voor energieopslag	Wijzing van de Elektriciteitswet is nodig om ervoor te zorgen dat opslag- en conversie-installaties ook een aansluiting kunnen delen met een wind- of zonnepark. Op 7 februari 2023 nam de Tweede Kamer een amendement aan om opslag- en conversie-installaties bij wind- en zonneparken toe te staan. Eerste Kamer oordeel moet nog volgen.	EZK (in afwachting Eerste Kamer), Q3-2023
17. Vergroten van transparantie over frequentie en locatie netcongestie *LAN 2.3.1 en *LAN 3.1.2	Rol netbeheerders is om transparanter te worden zonder prijsvorming. Meer inzicht is nodig in de mogelijke opbrengsten (prijzen/volume).	Netbeheerders en ACM, Q4-2023
18. Verbeteren van scenariomodellen voor marktpotentie opslag	Huidige rekenmodellen lijken niet goed geschikt voor het laten zien van de daadwerkelijke technisch-economische potentie van opslag. De meeste scenariostudies rekenen enkel met prijsverschillen, en niet met andere inkomstenstromen zoals balanceringsdiensten of congestieverlichting. De overheid verkent hoe dit punt verbeterd kan worden, ook in internationaal verband.	EZK/RVO in samenwerking met scenariobouwers, Q4-2023 (verkenning)

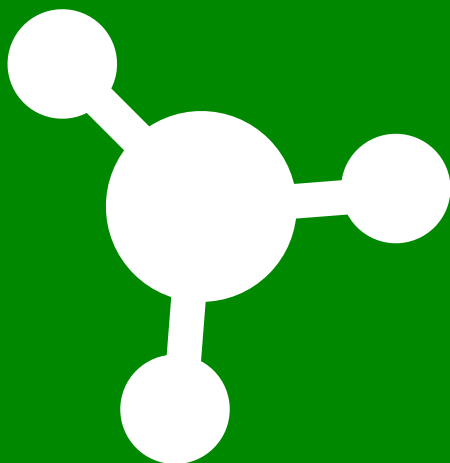
Veiligheidsaspecten: hoe is de veiligheid gewaarborgd?

19. Handreiking opstellen voor de vergunningverlening van andere vormen van elektriciteitsopslag dan Li-ion batterijen	Uniforme uitleg van regels zouden zowel aan ontwikkelaars als aan decentrale overheden meer duidelijkheid kunnen geven en procedures makkelijker en sneller kunnen laten verlopen. Voorkomen wordt dat veiligheidsaspecten onvoldoende worden meegewogen. Uniforme uitleg van regels kunnen ook helpen bij de standaardisatie van opslagfaciliteiten. In de voorschriften zou onderscheid kunnen worden gemaakt tussen verschillende soorten elektriciteitsopslag (op basis van gebruikte techniek en omvang).	IenW, Q2-2024
20. Verminderen van veiligheidsrisico's door verbeterde testfaciliteiten voor batterijen #3.5 NAB	Het uitbreiden en verbeteren van testfaciliteiten. Reeds opgenomen in de Nationale Actieagenda Batterijsystemen. Ook afhankelijk van eventuele toekenning Nationaal Groeifondsvoorstel Circular Batteries, ingediend in de derde ronde.	IenW en EZK, Q2-2024



Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
Innovatie: welke innovaties zijn nodig?		
21. Onderzoeken hoe alternatieve technieken voor (middel)lange-termijn elektriciteitsopslag ontwikkeld kunnen worden	Technieken voor (middel)lange-termijn elektriciteitsopslag zijn minder ontwikkeld, terwijl er wel behoefte aan is. Het energie-innovatie instrumentarium biedt mogelijkheden om nieuwe elektriciteitsopslag technieken te testen. Er moet worden geëvalueerd of ook (middel)lange-termijn elektriciteitsopslag goed is geborgd binnen het huidige instrumentarium en welke vervolgstappen nodig zijn.	EZK, Q3-2023
22. Kennis delen en ophalen via IEA TCP ES over lange-termijn elektriciteitsopslag	Internationaal discussie voeren over Large-scale, medium-duration energy storage: Binnen het IEA TCP Energy storage is een nieuwe taak gedefinieerd voor het bespreken van Large-scale, medium-duration energy storage. Doel is om te inventariseren welke opties er zijn om langeretermijn elektriciteitsopslag in het energiesysteem te krijgen, qua tijdsduur tussen standaard elektrochemische batterijen en gasopslag in. Thema's worden definiëring/afbakening, technologieën, regio-specifieke potentie-inschatting, kostenmodellen, beleid en financiering.	EZK, Q3-2023
Maakindustrie: hoe kan het verdienvermogen van Nederland worden vergroot?		
23. Verkennen aanpassing huidige subsidiesystematiek voor energieopslag gebaseerd op CO ₂ -reductie.	De grondslag voor subsidies is de besparing van CO ₂ . Wanneer je een nieuw systeem/functie introduceert, vervang je geen bestaand systeem met CO ₂ -uitstoot en is er geen subsidiemogelijkheid. Als startpunt is dit minder gunstig voor opslag.	EZK/RVO, 2024
24. Stimuleren van het gebruik van open standaarden en protocollen.	Doordat er beperkt gebruik wordt gemaakt van eenduidige standaarden en protocollen bij de aansturing van batterijsystemen, is het moeilijk om rollen en verantwoordelijkheden te scheiden.	ESNL, 2024
Maatschappelijke acceptatie: hoe worden de belangen van burgers gewaarborgd?		
25. Ondersteuning decentrale overheden bij ruimtelijke inpassing	Beperkte ervaring met opslagprojecten bij decentrale overheden maakt de beoordeling van dergelijke projecten bewerkelijk voor decentrale overheden. De Rijksoverheid kan kaders meegeven aan provincies en gemeenten over de ruimtelijke inpassing en verguningsprocedures.	EZK/RVO, Q4-2023
26. Het ontwikkelen en markt gereed maken van andere type batterijcellen #3.1 NAB	Oplossingsrichtingen worden in de Nationale Actieagenda Batterijsystemen benoemd. Ook afhankelijk van eventuele toekenning Nationaal Groeifondsvoorstel Circular Batteries, ingediend in de derde ronde.	IenW en EZK Voortgangresultaat: Q3-2023
27. Bevorderen circulariteit batterijen door implementatie batterijverordening.	In de Europese verordening die in 2022 van kracht is gegaan, worden aanscherpingen voorzien met betrekking tot gehele levenscyclus van de batterij (van grondstof tot aan einde levensduur batterij), en voor 2030 komt er strenge wetgeving ten aanzien van recycling eisen alsmede eisen van teruggewonnen materialen in nieuwe accu's.	IenW Resultaat: Q3-2023
28. Onderzoek naar materialen, recycling, milieu en veiligheid.	Via het programma "Battery 2030+" investeert de Europese commissie in onderzoek naar o.a. materialen en recycling, milieu en veiligheid. Ook afhankelijk van eventuele toekenning Nationaal Groeifondsvoorstel Circular Batteries, ingediend in de derde ronde.	IenW en EZK Resultaat: Q3-2023
29. Onderzoeken van de noodzaak en risico's van het verbeteren registratie en informatie van geïnstalleerde opslag systemen.	Registratie van opslagsystemen is wenselijk om beter inzicht te krijgen in de ontwikkelingen. Op dit moment wordt dit echter niet gedaan.	NBNL en CERES, 2025 (met tussenresultaat in Q3-2023).
Human capital agenda: wie voert de projecten uit en wat zijn de kansen m.b.t. arbeidskrachten?		
30. Voldoende vakmensen #4.3 NAB	Net als bij andere technologie en infrastructuur zijn er (te) weinig vakmensen om projecten uit te voeren. In de Human Capital Agenda 2020-2023 van de Topsectoren zijn acties benoemd en trekkers aangewezen. In de nationale actieagenda batterijsystemen is als actie opgenomen dat er een human capital interventie op batterijsystemen ontwikkeld wordt. Zie ook paragraaf 2.5.	IenW, Q4-2023

5. Moleculenopslag



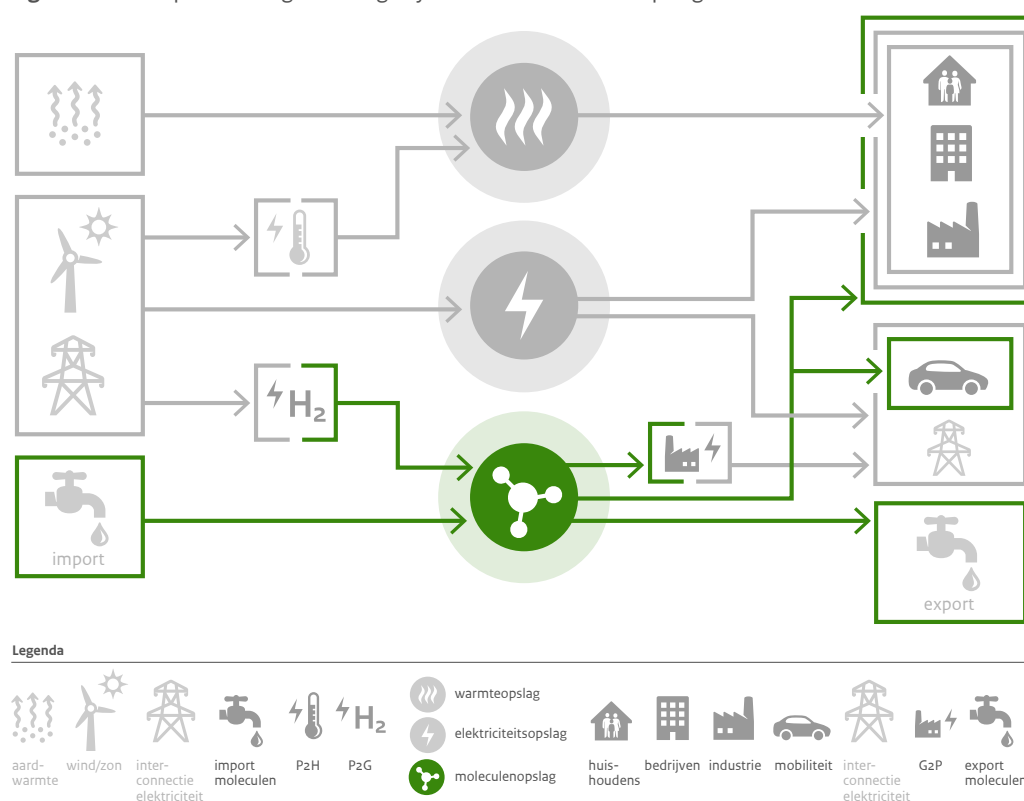


5.1 Analyse van moleculenopslag in Nederland

5.1.1 Moleculenopslag: dragers en technieken

Moleculenopslag is van belang omdat het kan zorgen voor het balanceren van vraag en aanbod (op middellange en lange termijn), het ondersteunen van het gasnet en het bieden van strategische voorraden. Een belangrijke eigenschap van moleculenopslag is dat de energiedragers kunnen worden vervoerd in vaste, vloeibare- of gasvorm. Zo kunnen aardgas, LNG²⁰, aardolie, steenkolen en (transport) brandstoffen voor de binnenlandse consumptie worden gebruikt, of (na verwerking) geëxporteerd naar het buitenland. Dat geldt ook voor hun duurzame equivalenten, zoals waterstof(dragers), groen gas, bio-LNG, bio-ethanol, bio-methanol, etc.

Figuur 10 Versimpelde weergave energiesysteem met moleculenopslag



De vorm van de energiedragers is bepalend voor welke technieken geschikt zijn voor opslag. Grofweg kan onderscheid worden gemaakt tussen:

- Bovengrondse opslag, met name tanks voor vaste- en vloeistoffen;
- Ondergrondse opslag, voor gas en vloeistoffen.

Ondergrondse moleculenopslag: gas, stikstof en diesel

De (diepe) ondergrond biedt de mogelijkheid om opslagvolumes te realiseren die vele malen groter zijn dan bovengronds. Ondergrondse energieopslag in de vorm van moleculen wordt al enkele decennia in Nederland toegepast. Sinds 1997 wordt aardgas (molecuul: methaan of CH_4) opgeslagen in gasvelden en sinds 2011 ook in zoutcavernes (gasopslag Zuidwending). Daarnaast is er sprake van de ondergrondse opslag van stikstof, N_2 , (zoutcavernes in Heiligerlee) die gebruikt wordt voor de productie van laagcalorisch gas (L-gas) en ondergrondse opslag van strategische voorraden van vloeibare diesel (zoutcavernes in Marssteden). Tabel 5 laat een overzicht zien van de bestaande ondergrondse opslagen en de belangrijkste kenmerken.

²⁰ In het geval van LNG is er dan sprake van doorvoer (overslag). In Nederland wordt geen LNG geproduceerd.

**Tabel 5** Overzicht van Nederlandse ondergrondse opslagen en kenmerken²¹

Locatie	Type formatie	Type gas/ vloeistof	Start	Werkvolume (miljard Nm ³)	Prod./Inj. (mln m ³ /dag)
Gasopslag Norg	Gasveld	L-gas	1997	5,9	76 / 36
Gasopslag Grijpskerk	Gasveld	L-gas	1997	2,4	50 / 12
(Piek-) Gasopslag Alkmaar	Gasveld	L-gas	1997	0,5	36 / 3,6
Gasopslag Bergermeer	Gasveld	H-gas	2015	4,9	57 / 42
Gasopslag Zuidwending	Zoutcavernes (6 stuks)	L-gas	2011	0,37	43,2 / 26,4
Stikstofbuffer Heiligerlee	Zoutcaverne (1 stuk)	Stikstof	2020	0,045	4,6/0,38
Dieselopslag Marssteden	Zoutcaverne (2 stuks)	Diesel (vloeistof)	2010	0,00025	0,19/0,19

Er zijn momenteel vijf ondergrondse aardgasopslagen in bedrijf, waarvan er vier aangelegd in gasvelden in Norg, Grijpskerk, Alkmaar en Bergermeer, en één in een cluster van zes zoutcavernes in Zuidwending. De totale ondergrondse operationele opslagcapaciteit (werkvolume) in Nederland bedraagt momenteel 13,9 miljard m³ aardgas. Dit is equivalent aan ca. 40% van het jaarlijks Nederlandse gasverbruik. (EBN, 2023)

Bovengrondse moleculenopslag in tanks

(Grootschalige) tankopslag is de belangrijkste vorm van opslag voor bovengrondse moleculenopslag.

De tankopslagsector faciliteert grofweg de volgende taken in de Europese economie:

- binnenlandse consumptie van producten zoals transportbrandstoffen en plantaardige oliën;
- ondersteunen van de Europese industrie;
- versterken van de Europese handels hub en de internationale prijszetting functie;
- beschermen van nood- en militaire voorraden.

In Nederland is er een totaal van ca. 27 miljoen m³ aan tankopslagcapaciteit voor (petro-)chemische producten en eetbare oliën (HCSS, 2022). Er zijn grote aardolie(producten)voorraden in bovengrondse tanks in de omgeving van de havens te vinden. De grootste terminals van ruwe aardolie zijn te vinden op de tweede Maasvlakte bij de Maasvlakte Olie Terminal. Conventionele fossiele brandstoffen zoals diesel, benzine, kerosine, LPG en stookolie worden ook bovengronds opgeslagen in tanks. Het Rotterdamse havenbedrijf is de grootste bunkerhaven van Europa en hier worden grote hoeveelheden transportbrandstoffen opgeslagen. Naast conventionele fossiele transportbrandstoffen, wordt er in Nederland ook gebruik gemaakt van biobrandstoffen als bio-ethanol en bio-methanol. Deze hoeveelheden zijn veel meer beperkt en dus zijn er ook nog geen grote opslagen voor deze bio-transportbrandstoffen. In de toekomst zou, afhankelijk van de vraag, ook de vraag naar opslag voor bio-brandstoffen kunnen groeien.

Aardgas wordt ook in vloeibare vorm, LNG, in uiterst beperkte mate in Nederland opgeslagen in bovengrondse opslagtanks. Dat is echter met als hoofddoel om een goede doorvoer van LNG (naar het GTS hogedruknetwerk) te garanderen. De bij de LNG-terminals behorende opslagtanks, zoals in de Gate terminal in Rotterdam, zijn onderdeel van het waarborgen van een hoge efficiëntie van het invoedings-systeem. Hun businessmodellen zijn gebaseerd op een snelle omzetting van het LNG naar gas, waarna het via het transportnet wordt afgevoerd. LNG biedt dan ook geen alternatief voor ondergrondse opslag.

²¹ Bronnen: (CIE AGSI, 2023), (TNO & EBN, 2018) en (SodM, 2023).



Nederland heeft momenteel drie LNG opslagtanks op de Maasvlakte (Gate terminal, 2023) met ieder een inhoud van ca. 180.000 m³. Deze hoeveelheid representeert een werkvolume van ca. 320 miljoen m³ aardgas (vergelijkbaar met het werkvolume van de gasopslag in Zuidwending). De terminal heeft een jaarlijkse doorvoer capaciteit van 16 miljard m³ die alleen kan worden behaald bij een snelle doorvoer van het LNG naar het transportnet van GTS. Momenteel heeft GATE plannen om haar capaciteit in 2026 verder uit te breiden met 4 miljard m³ extra import capaciteit. Daarvoor wordt een vierde LNG opslagtank ontwikkeld.

Daarnaast heeft Gasunie sinds september 2022 een drijvende LNG terminal geopend bij de Eemshaven, genaamd de EemsEnergy Terminal (EemsEnergyTerminal, 2023). Deze terminal heeft een doorvoercapaciteit van 8 miljard m³ en breidt momenteel stapsgewijs uit naar 10 miljard m³ in 2023/2024. Fysieke opslagcapaciteit van LNG is ook hier niet aanwezig, het is een doorvoerterminal. Deze terminals zijn bedoeld om verdere onafhankelijkheid van Russisch gas te creëren, niet om LNG op te slaan (langer dan uren of een enkele dag). De EemsEnergy Terminal heeft daarnaast een beoogde inzettermijn van 5 jaar (2022-2027).

In de 'Peakshaver'-installatie in Rotterdam (Gasunie, 2023) vindt wel (zeer beperkte) opslag van LNG plaats dat kan worden ingezet op momenten van hoge vraag ('piek'), m.n. in/op koude winterdagen, of in de ochtenduren. Deze LNG wordt bij piekvragen gasvormig gemaakt en daarna via het gastransportnet van GTS aan de kleinverbruikers geleverd. De installatie kan ongeveer 78 miljoen m³ in de tanks opslaan en heeft een maximum productiecapaciteit van 1,3 miljoen m³ per uur. Bij volle inzet is deze dus in 2,5^e dag uitgeproduceerd, en moet daarna weer worden gevuld (duurt meestal langer dan het 'leeglopen'). De 'Peakshaver' levert dus voornamelijk (zeer tijdelijke) capaciteit).

Gecomprimeerde waterstof wordt op dit moment opgeslagen in hogedruk tanks met drukken van 200 tot ruim 700 bar. In vergelijking met tankopslag van bijvoorbeeld olieproducten, zijn de volumes van deze tanks minder groot. Deze tanks worden voornamelijk gebruikt op productielocaties van waterstof, voor het transport van waterstof en bij waterstoftankstations. In voertuigen worden kleinere tanks met hoge druk toegepast.

Bij lokale productie, opslag en gebruik van waterstofgas moet rekening worden gehouden met risico's van het afblazen en aanstraling van waterstoftanks door branden en met lekkages van waterstof in afgesloten ruimtes. Deze risico's zijn bekend en beheersbaar. Voor het tanken en opslaan van waterstof gelden veiligheidsvoorschriften van het Besluit activiteiten leefomgeving. Het gaat onder meer om het voldoen aan Publicatierijks Gevaarlijke Stoffen 35 (PGS 35).

Bovengrondse moleculenopslag van kolen

Momenteel wordt er in Nederland ook nog een grote hoeveelheid kolen opgeslagen. In de Rotterdamse haven zijn meerdere bedrijven die kolen opslaan. Momenteel worden deze kolen nog ingezet in elektriciteitscentrales. Daarnaast worden kolen gebruikt in de staalindustrie en worden de opslagen ingezet als hubs voor doorvoer naar onder andere Duitsland. Ook bij deze elektriciteitscentrales is sprake van opslag van kolen. Opslag van kolen kan in de open lucht, maar wanneer noodzakelijk kan het ook in afgedekte locaties opgeslagen worden.

5.1.2 Hoe wordt moleculenopslag gestimuleerd in Nederland?

Het Nederlandse beleid en de wet- en regelgeving omtrent energieopslag is vooral gericht op het in balans brengen van vraag en aanbod van energie en ziet toe op het veilig toepassen van deze activiteiten. Ook voldoet het Nederlandse beleid aan internationale verplichtingen.

Opslag van strategische voorraden olie(producten)

In opdracht van de minister voor Klimaat en Energie houdt Nederland een strategische olievoorraad aan. (Algemene Rekenkamer, 2022) De opslag van de strategische voorraad aardolie en aardolieproducten is vastgelegd in de Wet voorraadvoorzorg aardolieproducten (Wva 2012)²². Deze wet is gebaseerd op EU-regelgeving en afspraken in het kader van het Internationaal Energie Agentschap (IEA) en het op

²² Wet voorraadvoorzorg aardolieproducten 2012, geldend van 23-07-2021 t/m heden



18 november 1974 te Parijs overeengekomen Internationaal Energieprogramma (of IEP-verdrag). Dit verdrag kent drie typen noodmaatregelen: het aanhouden van noodvoorraden, het verlagen van de consumptie, en het herverdelen van de beschikbare olie. In het geval van een noodsituatie hebben de deelnemers de mogelijkheid om gezamenlijk één of meer van deze maatregelen te effectueren. De gecoördineerde en tijdige inzet van deze maatregelen zal leiden tot extra aanbod uit de aangehouden oliereserves en een lagere vraag waardoor olieprijsstijgingen en schade voor de economie worden beperkt.

In de Wva 2012 is o.a. vastgelegd:

- De minimale omvang van de strategische olievoorraad wordt berekend aan de hand van internationale methoden van de EU en het IEA. De hoogste uitkomst is bepalend. Het IEA hanteert 90 dagen netto import per kwartaal. De EU richtlijn is iets strikter dan het IEA: 90 dagen import of 61 dagen binnenlandse consumptie.
- Ook oliebedrijven zijn verplicht voorraden aan te houden. Die tellen mee in de wettelijke verplichte nationale voorraad. In de praktijk wordt circa 80% van de strategische voorraad beheerd door het Rijk en circa 20% door marktpartijen.
- De totale voorraad bestaat voor ten minste een derde uit benzine, diesel/gasolie en kerosine en het overige deel uit ruwe olie.
- De voorraad kerosine is vastgesteld op 15 dagen binnenlands verbruik.
- De samenstelling van de strategische olievoorraden in Nederland is gericht op het wegtransport en luchtverkeer. De voorraden zijn expliciet niet bedoeld voor de (chemische) industrie en de zeevaart.

Verantwoordelijk voor het beheer van de strategische olievoorraad is de stichting Centraal Orgaan Voorraadvorming Aardolieproducten (COVA), een uitvoeringsorganisatie van EZK. COVA zorgt voor de aankoop, verkoop en opslag van ruwe olie en olieproducten. Bovendien heeft COVA voor transportbrandstoffen (kerosine, benzine en diesel) een wettelijke opslagplicht.

Langdurige strategische gasolieopslag is dan ook van nationaal belang. De huidige strategische/langdurige gasolieopslagen zijn vooral gesitueerd in tanks nabij zeehavens en (om risico's te beheersen) in ondergrondse voorraden in het achterland van Nederland en Duitsland.

Wet- en regelgeving m.b.t. ondergrondse opslag

De aardgasopslagen in de diepe ondergrond vallen onder de Mijnbouwwet²³ die van toepassing is op activiteiten in de bodem op doorgaans 100 meter en dieper. De staatssecretaris Mijnbouw (ministerie van Economische Zaken en Klimaat) is bevoegd gezag voor mijnbouwactiviteiten. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is de toezichthouder en adviseert het ministerie over vergunningaanvragen en valt onder de verantwoordelijkheid van de staatssecretaris Mijnbouw. Verder zijn TNO, de Technische Commissie Bodembeweging (TCBB) en Mijnraad vaste adviseurs bij vergunningaanvragen. Aardgasopslag valt onder “het opslaan van stoffen in de ondergrond” in de Mijnbouwwet, en is een activiteit van nationaal belang. De Gaswet²⁴ bevat eveneens bepalingen met betrekking tot gasopslaginstallaties zoals in die wet gedefinieerd en gasopslagbedrijven (beheerders van gasopslaginstallaties). Deze bepalingen zien onder meer op derdentoegang tot de gasopslaginstallatie, beheer van de gasopslaginstallatie, eisen die aan de gasopslagbedrijven worden gesteld en verplichtingen die gasopslagbedrijven hebben. De Minister voor Klimaat en Energie is bevoegd gezag aan wie de aanwijzing van de beheerder van de gasopslaginstallatie (het gasopslagbedrijf) moet worden gemeld. De Autoriteit Consument en Markt houdt toezicht op de naleving van de Gaswet.

De Structuurvisie Ondergrond van de Rijksoverheid bevat een visie op duurzaam, veilig en efficiënt gebruik van de ondergrond, waarbij beschermen en benutten met elkaar in balans zijn. De Structuurvisie Ondergrond geeft het strategische nationale ruimtelijke beleid voor toekomstig gebruik van de ondergrond. In deze structuurvisie zijn de beleidsopgaven uitgewerkt die betrekking hebben op de nationale belangen ‘drinkwatervoorziening’ en ‘mijnbouwactiviteiten’ zoals de winning van aardgas, olie,

²³ Mijnbouwwet, geldend van 04-04-2023 t/m heden

²⁴ Gaswet, geldend van 01-10-2022 t/m heden



geothermie, zout en opslag van stoffen in de ondergrond. Nieuwe nog niet toegepast ondergrondse vormen van energieopslag, zoals waterstof- en perslucht opslag vallen ook onder de Mijnbouwwet. Voor de opslag van stoffen moeten de benodigde vergunningen worden aangevraagd. Voorwaarden waaraan diepe ondergrondse opslag moet voldoen staan beschreven in de Mijnbouwwet, het Mijnbouwbesluit en de Mijnbouwregeling. De Mijnbouwwet regelt o.a. dat de vergunning bepaalt welke stof er voor welke tijdsduur wordt opgeslagen en wanneer de stof weer wordt teruggehaald of dat de stof definitief in de ondergrond gelaten moet worden. Daarnaast kunnen er nog andere voorschriften worden verbonden aan de opslag. Deze voorschriften kunnen slechts worden opgelegd wanneer ze gerechtvaardigd kunnen worden door het belang van veiligheid voor omwonende, het voorkomen van schade aan gebouwen en infrastructuur, natuur, drinkwater en andere bronnen zoals aardwarmte. Het eerste waterstofopslag project in Nederland (Hystock in Zuidwending) is aangemerkt als project van nationaal belang en daarbij is een Rijkscoördinatieregeling (RCR) van toepassing, waarbij o.a. vergunningen worden gecoördineerd.

Het kabinet heeft in mei 2023 aangekondigd om een Rijksprogramma Duurzaam Gebruik van de Diepe Ondergrond op te stellen, waarin wordt beschreven in welke gebieden welke activiteiten wel, niet of onder voorwaarden mogen plaatsvinden.²⁵ Voor de vormgeving van het Rijksprogramma zal een maatschappelijke dialoog worden gevoerd. Om doorwerking te kunnen geven aan het Rijksprogramma en het nieuwe beleid dat is aangekondigd in de contourennota zal de Mijnbouwwet en onderliggende regelgeving worden gewijzigd.

Vuldoelen gas volgens EU verordening 2022/1032

In de Nederlandse bodem liggen vijf 'operationele' gasopslagen. Het gas in deze opslagen is voor het overgrote deel eigendom van marktpartijen. Nederland heeft momenteel geen strategische gasvoorraad. In juni 2022 heeft de Europese Raad de verordening over gasopslag²⁶ aangenomen. Deze verordening stelt een vuldoel voor lidstaten van 90% voor de winters van 2023 en verder (t/m 2025) vast, inclusief een jaarlijks te bepalen vultraject dat aangeeft langs welk tijdspad dit doel moet worden behaald. De verordening bepaalt tevens dat het vuldoel voor een individuele lidstaat wordt verlaagd met het volume dat tijdens de referentieperiode 2016 tot en met 2021 aan derde landen is geleverd. Voor Nederland betekent dit een verlaging van het vuldoel tot 73% vanwege gasexport naar het VK via de pijpleiding tussen Bacton en Balgzand (BBL) gedurende voornoemde referentieperiode.

Hiermee ligt er ook voor Nederland een verplichting. In 2022 heeft het kabinet vulmaatregelen genomen om te stimuleren dat gasopslag Bergermeer voldoende gevuld werd, conform deze EU-verordening. Het kabinet heeft een subsidiemaatregel ingesteld die marktpartijen een stimulans gaf om Bergermeer te vullen. Daarnaast heeft het kabinet EBN een subsidie verleend om het deel van Bergermeer te vullen dat niet door marktpartijen wordt gevuld. Gasopslag Norg werd uiteindelijk door de markt gevuld als gevolg van gunstige marktomstandigheden.²⁷

5.2 Analyse van moleculenopslag in omringende landen

Duitsland, België, Denemarken en Verenigd Koninkrijk

De ontwikkeling van grootschalige duurzame moleculenopslag is ook in de ons omringende landen in de voorbereidende fase. In Duitsland is relatief veel aandacht voor ondergrondse waterstofopslag (o.a. via IPCEI), en men beschikt over cavernes waarin helium en perslucht worden opgeslagen. België schenkt ook veel aandacht aan waterstofinfrastructuur, maar heeft een minder geschikte ondergrond en legt meer nadruk op de opslag van derivaten als ammoniak en methanol. In Denemarken en het Verenigd Koninkrijk lijkt sec moleculenopslag een minder prominent onderwerp, en wordt het vooral meegenomen in de innovatieprogramma's en plannen voor infrastructuur. Met name Duitsland en het Verenigd Koninkrijk hebben veel ervaring met ondergrondse aardgasopslag.

²⁵ Kamerbrief 'Contourennota voor een herziening van het mijnbouwstelsel', 10 mei 2023

²⁶ Verordening (EU) 2022/1032 inzake gasopslag, 29 juni 2022

²⁷ Kamerbrief 'Voorzienings- en leveringszekerheid energie', 9 december 2012



Omdat de nadruk bij duurzame moleculaire energiedragers internationaal vooralsnog meer bij productie en transport ligt, zijn er op dit moment geen duidelijke lessen te trekken voor Nederland als het puur om moleculenopslag gaat. Verder wordt opgemerkt dat omringende landen net als Nederland geen kwantitatieve doelen voor energieopslag hebben opgesteld.

IEA Hydrogen TCP

Het is van groot belang de ontwikkeling van infrastructuur voor moleculaire energiedragers in een internationaal daglicht te bezien en hier ook kennis over uit te wisselen. In dat kader zijn Nederlandse organisaties en bedrijven bijvoorbeeld actief deelnemers aan het kennisnetwerk van de IEA Technology Collaboration Program (TCP) over waterstof, waarin o.a. kennis wordt gedeeld over de technische, economische en juridische aspecten van ondergrondse waterstofopslag onder leiding van TNO.

5.3 Verwachte ontwikkelingen moleculenopslag in Nederland

5.3.1 Ontwikkelingen in Nederland

Energieopslag in de vorm van moleculen speelt een grote rol in ons huidige energiesysteem dat gebaseerd is op fossiele brandstoffen, zoals aardgas, aardolie en steenkolen. Daarvan afgeleid zijn ook (transport) brandstoffen belangrijke energiedragers. Ze worden ingezet voor energetische toepassingen, d.w.z. om elektriciteit te produceren of (bio)brandstoffen voor transport.

Ook in de toekomst blijft moleculenopslag van groot belang, in de vorm van (duurzame) energiedragers die goed geschikt zijn voor seizoensopslag en voor strategische voorraden. Hierbij gaat het voornamelijk over waterstof en waterstofdragers, zoals ammoniak, methanol, synthetische methaan, en zo geheten “liquid organic hydrogen carriers” (LOHC). Ook duurzame biograndstoffen, zoals bio-ethanol, bio-methanol, groen gas, of bio-LNG zullen hier een belangrijke rol spelen.

Meer duurzame energiedragers

Momenteel is moleculenopslag in Nederland voornamelijk fossiele van karakter. Enkele uitzondering vormen biobrandstoffen die momenteel in kleine hoeveelheden in de havens worden gebunkerd. De verwachting is dat deze situatie snel zal veranderen. In de transitie naar een duurzamer energiesysteem is het te verwachten dat nieuwe vormen van energieopslag, zoals geavanceerde biobrandstoffen, waterstof en waterstofdragers een meer prominente rol zullen spelen. Op de lange termijn zullen ze grotendeels fossiele energiedragers gaan vervangen. Zo is er besloten dat er vanaf 2030 geen steenkool meer ingezet mag worden in elektriciteitscentrales²⁸ en heeft grote staalproducent Tata Steel recent aangekondigd vanaf 2030 te stoppen met het gebruik van steenkool en over te gaan naar aardgas en op den duur waterstof. De opslag van fossiele steenkool zal hiermee dus ook afnemen, hoewel dit nog afhankelijk is van export van steenkool naar omringende landen. De afbouw van het gebruik en opslag van aardolie is momenteel nog onvoldoende inzichtelijk. Gezien de uitfasering van fossiele, vloeibare energiedragers op lang termijn lijkt de huidige ontwikkeling rond opslag zich te richten op retro-fitting of conversie van dit soort faciliteiten om ze geschikt te maken voor opslag van waterstofdragers of biobrandstoffen zoals bio-ethanol en bio-methanol. Ook gasverbruik wordt verminderd en veel infrastructuur zal mogelijk worden hergebruikt voor waterstof of groen gas. In 2030 moet er een hoog druk waterstof transportnet klaar liggen van circa 1000 km die voor 80% de bestaande gaspijpleidingen gebruikt. Met de afbouw van het gebruik van aardgas, zal op langere termijn de afbouw van de opslag van aardgas gepaard gaan. Echter, gasopslagen spelen waarschijnlijk nog de komende jaren een belangrijke rol in de energietransitie als bron van flexibiliteit en back-up als andere bronnen van energie niet voldoende leveren (bijvoorbeeld bij te weinig zon of wind). Afhankelijk van de groei van het gebruik van groen gas of synthetische aardgas kan mogelijk een deel van de ondergrondse gasopslagen blijven bestaan maar dan in duurzame vorm. De enige fossiele bron waar we in de komende jaren meer van gaan gebruiken en opslaan is LNG. Dit in verband met de ambitie om onafhankelijk te worden van het Russisch gas.

²⁸ Wet verbod op kolen bij elektriciteitsproductie, geldend van 01-01-2022 t/m heden



In de bijlage (8.5) staat een beschrijving van veelbelovende energiedragers en de verwachte technologische ontwikkeling.

Gebruik van fossiele brandstoffen loopt terug

Het ligt in de lijn der verwachting dat gebruik van fossiele (transport)brandstoffen in de komende jaren zal teruglopen en hiermee ook de opslag van deze fossiele brandstoffen. Een gedeelte van deze brandstoffen zal vervangen worden, omdat er in de transportwereld veel voertuigen geëlektrificeerd worden. Daar waar verbrandingsmotoren nog van toepassing zijn, zullen transportbrandstoffen verduurzaamd moeten worden via verschillende wegen. Deze brandstoffen kunnen ofwel uit biomassa ofwel uit biogene CO₂ en hernieuwbare waterstof geproduceerd worden. Laatstgenoemde staat bekend als e-fuel. Een voordeel hiervan is dat de bestaande infrastructuur kan ingezet worden, aangezien de stoffen fysisch gezien niet afwijken van de brandstoffen gemaakt uit fossiele grondstoffen. De verwachte kostendaling volgt dus ook niet uit het verbeteren van de opslag technieken, maar uit het verbeteren van de productiemethoden. Binnen de brandstoffen wordt onder andere een groter rol voorzien voor hernieuwbare methanol in de scheepvaart, omdat deze relatief eenvoudig geproduceerd kan worden, zowel uit biogrondstof als uit hernieuwbare waterstof en biogene CO₂. Een uitdaging hierbij is de benodigde ruimte om methanol op te slaan. Methanol heeft een relatief lage energiedichtheid (20 MJ/kg) in vergelijking met conventionele brandstoffen, wat betekent dat er ongeveer twee keer zo veel opslagvolume nodig is. Daarnaast wordt gekeken naar e-ammoniak, synthetische kerosine en synthetische diesel. Groot voordeel van hoogwaardige biobrandstoffen als hydrotreated vegetable oil (HVO) en deze e-fuels is dat deze brandstoffen veel zuiverder zijn dan de huidige diesel wat de bewaarbaarheid ten goede komt. Aan de ander kant stelt de opslag van toxische stoffen als methanol en ammoniak eisen aan de installaties.

Vraag naar moleculenopslag kent grote onzekerheden

De toekomstige vraag naar moleculenopslag zal door veel factoren worden bepaald, o.a.:

- de samenstelling van het energieaanbod (primaire energiebronnen, import en weersafhankelijke opwek);
- de samenstelling van het eindverbruik (vraag naar finale energiedragers per sector, stuurbaarheid van de vraag, afhankelijkheid tussen sectoren);
- beschikbare infrastructuur om vraag en aanbod te verbinden;
- technologieontwikkeling;
- mondiale energiemarkt ontwikkelingen; en
- externe invloeden, zoals het weer, geopolitiek ontwikkelingen en maatschappelijke voorkeuren.

Een (exacte) inschatting over de hoeveelheid opslagcapaciteit per energiedrager en het gewenste groeipad is momenteel heel moeilijk te maken.

Er zijn ook verschillende scenario's studies gemaakt door o.a. netbeheerders (IIZo50), TNO en Kalavasta die bandbreedtes laten zien van de benodigde opslagcapaciteit. Hier is te zien dat ondergrondse opslag van aardgas richting 2050 nog nodig is, maar wel in mindere mate dan op dit moment. De bestaande ondergrondse gasopslagen kunnen in de toekomst ook worden ingezet voor opslag van groen gas geproduceerd uit biomassa of synthetisch geproduceerd methaan uit waterstof. Hiervoor zijn in principe geen bijzondere aanpassingen nodig. Afhankelijk van de rol die aardgas en/of groen gas zullen innemen binnen de energievoorziening lopen de indicatieve schattingen van de totale opslagcapaciteit op tot maximaal de huidige geïnstalleerde opslagcapaciteit.

Waterstof blijft noodzakelijk

Waterstofopslag komt in alle energiescenario's naar voren als een belangrijke en noodzakelijke technologie die met name tussen 2030 en 2050 zal opschalen in Nederland. Veel van de waterstof zal in Nederland worden geproduceerd met windenergie opgewekt op de Noordzee, maar ook veel zal worden geïmporteerd in de vorm van vloeibare waterstof en waterstofderivaten en -dragers, zoals ammoniak, methanol en LOHC's. De havens in Nederland zullen een belangrijke rol spelen in het opslaan van deze stoffen voor het gebruik in Nederland en om door te voeren naar andere (buur)landen. De nieuwe scenario studie van de netbeheerders schat de bandbreedte in van benodigde waterstofopslagcapaciteit in 2050 rond 14 tot 29 TWh te zijn,



wat neer komt op 60 tot 120 waterstofcavernes als alles in zoutcavernes wordt opgeslagen (NBNL, 2023), afhankelijk van hoe de waterstofmarkt zich ontwikkelt. Een toename van de opslagcapaciteit van waterstof zal hoogstwaarschijnlijk leiden tot een vermindering van behoefte aan (groen) gas. Daarnaast is ook capaciteit voor warmteopslag een invloed op de behoefte aan waterstof- en aardgasopslag. Bezien moet worden of er strategische reserves nodig zijn of opslagen voor het ondersteunen van handel in waterstof. In dit geval zal de benodigde opslagcapaciteit nog groter zijn. De vraag is hoe deze opslagen zoveel efficiënt mogelijk qua ruimte en kosten kunnen worden aangelegd en wat de juiste verhouding tussen ondergrondse waterstofopslag en bovengrondse waterstof(derivaten)opslag zal zijn.

Leveringszekerheid en gas

Door de oorlog in Oekraïne en de impact daarvan op de Europese gasleveringszekerheid was er afgelopen jaar en zal er de komende jaren veel aandacht zijn voor de rol van gasopslag in de gasleveringszekerheid. Op EU-niveau zijn daarom vuldoelen vastgesteld²⁹ en al eerder is in het regeerakkoord opgenomen dat er verplichte vullingspercentages komen voor de gasvoorraden. Afgelopen december heeft het kabinet aangekondigd dat het de ambitie heeft om de winter van 2023-2024 met goed gevulde opslagen (gemiddelde minimale vulgraad van 90%) in te gaan. Hiervoor heeft het kabinet twee vulmaatregelen aangekondigd in de Kamerbrief gasleveringszekerheid en gasopslagen van december 2022³⁰ en de Kamerbrief met de contouren van de subsidiemaatregel voor Bergermeer³¹.

Daarnaast komt het kabinet in de loop van 2023 met een langetermijnvisie over de inzet van de Nederlandse gasopslagen, conform de motie Erkens-Kröger³². Daarbij wordt ook de coalitieafspraken om tot verplichte vullingspercentages te komen betrokken.

Strategische olievoorraden blijven relevant

Vanwege internationale verplichtingen die Nederland heeft (zoals het IEP-verdrag), is het niet waarschijnlijk dat de noodzaak tot het opslaan van olie snel zal verdwijnen. Mocht de consumptie van olie in de toekomst afnemen, dan hoeft Nederland ook minder voorraad aan te houden.

Waterstof kan een rol spelen in mobiliteit

Waterstofdragers spelen een belangrijke rol in de verduurzaming van wegvervoer, scheepvaart, luchtvaart en spoor. Waterstof kan worden ingezet in brandstofcel-gedreven voertuigen, schepen, treinen en vliegtuigen. In wegvervoer kan het worden toegepast in personenauto's en zware voertuigen. In dat geval wordt gesproken over een fuel cell electric vehicle (FCEV). De Rijksoverheid (bij monde van IenW) hanteert een technologie neutrale aanpak en spreekt daarbij geen voorkeur uit voor elektrische voertuigen aangedreven op batterijen (BEVs of FCEVs). Er worden technologieën ontwikkeld om direct waterstof toe te passen in schepen en vliegtuigen, maar ook wordt ingezet om synthetische brandstoffen te gebruiken (gemaakt uit waterstof en CO₂).

Nauwelijks kostendaling te verwachten bij grootschalige moleculenopslag

Moleculaire energieopslag vindt al decennia lang plaats. Veel van de kennis en infrastructuur die al bestaat voor de fossiele varianten kan worden ingezet voor duurzame moleculen. Bijvoorbeeld, de bovengrondse opslagtanks die tegenwoordig worden gebruikt voor olie en LNG kunnen in de toekomst worden (her) gebruikt voor waterstof derivaten en biobrandstoffen. Daarom is er bij bulk bovengrondse opslag van moleculaire energiedragers in het algemeen weinig technologische ontwikkeling en kostendaling verwacht. De (grote) technologische en kostendaling ontwikkelingen zijn vooral te verwachten in andere onderdelen van de moleculen ketens (bij productie, transport en/of toepassing).

Verder onderzoek naar waterstofdragers met hogere energiedichtheid

Waterstofopslag is een sleuteltechnologie voor het gebruik van waterstof in het energiesysteem. Waterstof heeft de hoogste energiedichtheid per massa-eenheid van alle brandstoffen, maar heeft een lage energie per volume-eenheid. Er wordt veel onderzoek wereldwijd gedaan om geavanceerde waterstofopslag-

²⁹ Verordening (EU) 2022/1032 inzake gasopslag, 29 juni 2022

³⁰ Kamerbrief 'Gasleveringszekerheid en gasopslagen', 9 december 2022

³¹ Kamerbrief 'Contouren subsidiemaatregel Bergermeer', 24 februari 2023

³² Kamerstuk 36200XIII-38, vergaderjaar 2022–2023



methoden te ontwikkelen met hogere energiedichtheid. Waterstof kan fysiek worden opgeslagen, als gas of als vloeistof, en het kan ook worden opgeslagen in andere stoffen door chemische verbindingen of adsorptie (zoals ammoniak, LOHC's, hydrides, metaalpoeders en meer).

Opslag van waterstof in zoutcavernes is technisch mogelijk

De mijnbouwtechnieken die voor ondergrondse waterstofopslag gebruikt worden, bestaan al decennia voor gas maar nergens in Nederland wordt (nog) ondergrondse waterstofopslag toegepast. De technologie moet verder worden ontwikkeld en toegepast in Nederland om waterstofopslag in zowel zoutcavernes als gasvelden mogelijk te maken.

Opslag van waterstof in zoutcavernes is al technisch bewezen in projecten in Engeland en de VS. Waterstof wordt hierbij onder ongeveer 180 bar opgeslagen. In 2021 en 2022 is in Zuidwending (gemeente Veendam, provincie Groningen) een demonstratieproject '[Demonstratie Waterstofopslag A8](#)' uitgevoerd om te onderzoeken of waterstofopslag in zoutcavernes veilig kan. De effecten van waterstof zijn getest op apparatuur, materialen, cement en de zoutwand. Ook zijn er verschillende onderzoeken gedaan naar de microbiologische activiteit in het boorgat. In internationaal verband wordt onderzoek gedaan naar ondergrondse waterstofopslag in zoutcavernes en gasvelden binnen het IEA Hydrogen TCP. Het eerste Technology Monitoring Report is in april 2023 gepubliceerd. Tot 2030 kan in Nederland de verwachte behoefte aan waterstofopslag waarschijnlijk volledig gedekt worden met de huidige plannen voor (bestaande en nieuw aan te leggen) zoutcavernes op de locatie Zuidwending.

De technische haalbaarheid van waterstofopslag in leeg-geproduceerde gasvelden moet nog definitief worden vastgesteld. Op basis van een pilot kan worden besloten of en op welke manier waterstofopslag in gasvelden kan worden geïmplementeerd in Nederland. Een aandachtspunt is de vermenging van waterstof en methaan of andere gassen en chemische stoffen die in het gasveld zijn, wat kan lijden tot minder zuiver waterstof. Voorafgaand moeten randvoorwaarden voor een eventuele pilot worden ontwikkeld, m.b.t. bijvoorbeeld financiering, reguleringskader, marktordening, ruimtelijke ordening, etc.

Opslag van waterstof in tanks komt langzaam van de grond

Opslag van gasvormige en vloeibare waterstof geschied momenteel in het algemeen nog op erg kleine schaal. Voor lokale toepassingen wordt waterstof in gasvormige vorm al in tanks opgeslagen; dit is een toepassing die zeer waarschijnlijk zal toenemen. Deze optie is echter niet geschikt voor grootschalige opslag. Vloeibare waterstofopslag in tanks is een veelbelovende technologie die nog in ontwikkeling is, en een deel van de opslagbehoefte kan dekken.

Het eerste plan voor vloeibare waterstof in Nederland is het H₂Sines project, waarbij vloeibare waterstof van Portugal naar de haven van Rotterdam vervoerd wordt over zee. Vopak, Shell en Engie nemen deel aan dit project voor de import en opslag van de vloeibare waterstof in de haven. In 2027 zou de eerste scheepslading moeten arriveren. (H₂Platform, 2022)

Opslag van waterstof op zee

Afhankelijk van de ontwikkelingen in het energiesysteem zal de noodzaak voor waterstofopslag op zee in de toekomst kunnen groeien. Waterstofopslag op zee blijkt technisch gezien haalbaar te zijn, maar bij de ontwikkeling van locaties op zee zijn er wel aanvullende technische, economische, ruimtelijke en juridische uitdagingen en zullen de impact voor de omgeving anders van aard zijn (TNO & EBN, 2022).

Economische kansen voor Nederland: ontwikkeling waterstofopslag

Als Nederland erin slaagt om groene waterstof in het systeem op te schalen, kan dat bijdragen aan een sterke groene economie en voor werkgelegenheid in Nederland zorgen. De arbeidsvraag naar groene waterstof in Nederland wordt geschat tussen de 6.000 en 17.300 FTE in 2030 en tussen de 16.400 en 92.400 FTE in 2050 (CE Delft, 2021). Ook kunnen in de toekomst kennis en expertise op dit gebied geëxporteerd worden.



5.3.2 Financiële/economische obstakels en uitdagingen moleculenopslag

Investerings- en onderzoekklimaat

Om ondergronds grootschalig energie op te slaan zijn grote investeringen nodig en zijn er financiële risico's aan verbonden, waardoor de businesscase nog niet aantrekkelijk is voor bedrijven. Een gunstig investeringsklimaat voor de aanleg van opslagcavernes en bijbehorende infrastructuur kan een belangrijke voorwaarde zijn voor het opschalen van opslagcapaciteit. Om grootschalig bovengronds moleculaire energiedragers op te slaan, is vooral een kostendaling van deze energiedragers van groot belang. Ook hier is een gunstig investerings- en onderzoekklimaat noodzakelijk om deze ontwikkeling te versnellen. Hierbij speelt ook de vraag of bij het nieuw op te zetten waterstofmarkt strategische voorraden (in geval van calamiteiten) nodig zullen zijn. Strategische voorraden zijn relatief duur en nemen veel ruimte in beslag, maar in de (verre) toekomst zouden zij misschien nodig kunnen zijn. De grootste uitdaging ligt in het bepalen vanaf wanneer strategische voorraden nodig zullen zijn en hoe dit te organiseren. Dit is een breder vraagstuk dat in Europese verband moet worden geadresseerd.

Marktordening

Zoals beschreven in paragraaf 3.5.2 is er nog veel onduidelijk omtrent welke partijen welke verantwoordelijkheid dragen bij grootschalige opslag van waterstof en wat de regels zullen zijn voor het handelen op de markt.

5.3.3 Obstakels en uitdagingen m.b.t. wet- en regelgeving moleculenopslag

Juridische complicaties

Aanvullend onderzoek is nodig naar de mogelijke juridische complicaties. Procedures zoals beschreven in de regelgeving voor ondergrondse opslag van stoffen zorgen voor lange doorlooptijden (Mijnbouwwet, Mijnbouwregeling en Mijnbouwbesluit). De procedures zijn soms ook een bron van vertraging in projecten. Vergunningsprocedures dienen secuur en transparant te worden uitgevoerd. Door vergunningen te coördineren en termijnen te bewaken kan vertraging en onzekerheid in de planning worden gereduceerd. Daarnaast zijn er duidelijke beleidskader nodig voor hoe om te gaan met ondergrondse moleculenopslag.

5.3.4 Technische en organisatorische obstakels en uitdagingen moleculenopslag

Lange aanlooptijd grootschalige ondergrondse waterstofopslag projecten

De ontwikkeling van zoutcavernes t.b.v. waterstofopslag vergt een lange aanlooptijd in verband met de vergunningen die hiervoor nodig zijn en de project ontwikkeltijden in de orde van 2-3 jaar. Het is daarom belangrijk om tijdig te beginnen met de aanleg van deze cavernes. Bij de ontwikkeling van nieuwe zoutwinninglocaties, als onderdeel van het reguliere proces om zout te winnen, is het goed om de cavernes geschikt te maken voor waterstofopslag in de toekomst.

Veiligheidseisen nodig voor opslag van waterstof(dragers)

Specifieke veiligheidseisen zijn nodig voor verschillende toepassingen van waterstof(derivaten)opslag, zoals (vloeibare) waterstof en ammoniak. Verder is er bij ondergrondse opslag in cavernes sprake van bodemdaling. Bodemdaling is onlosmakelijk verbonden met dieper gelegen zoutcavernes. Zout kruipt langzaam naar een caveerne door een verschil in druk, van de pekel of gas in de caveerne, met de gesteentespanning in het omliggende zout. Grote clusters opslagcavernes kunnen potentieel ook in Nederland tot bodemdaling leiden. Een van de maatregelen om bodemdaling te beperken is een ondergrens te stellen aan de druk van de vloeistof of gas in de caveerne. Hierdoor wordt het verschil met de gesteentespanning in het zout kleiner en daarmee de bodemdaling. Er dient ook rekening gehouden te worden met in de (verre) toekomst de afsluiting van deze cavernes. Van tevoren dient nagedacht te worden over waar de pekel vandaan komt om de cavernes weer mee te vullen en of de cavernes veilig op hoge druk kunnen worden afgesloten. Een opslagcaveerne begint en eindigt zijn levenscyclus immers gevuld met pekel. Los van wat ondergronds te regelen is, dient te worden gekeken wat bovengronds technisch en maatschappelijk acceptabel is.

**Bescherming van grondwater**

Een ander aandachtspunt is dat bij de aanleg en exploitatie van mijnbouwwerken beperkte risico's ontstaan voor de kwaliteit van het in hogere lagen gelegen grondwater. Er dient rekening gehouden te worden met de bescherming van de kwaliteit van het grondwater in deze lagen. Daarnaast wordt uit grondwater zo'n 60% van het Nederlandse drinkwater gewonnen. In de gebieden waar grondwater beschermd wordt voor het drinkwater is het risico van mijnbouwactiviteiten, hoe klein ook, niet acceptabel.

Zie ook "Toelichting op de randvoorwaarde veiligheid" (paragraaf 2.5).

Opslag van waterstof in tanks is technisch mogelijk, maar niet ideaal

Opslag van waterstof als vloeistof vereist cryogene temperaturen omdat het kookpunt van waterstof bij een druk van één atmosfeer $-252,8^{\circ}\text{C}$ bedraagt. De opslag van waterstof als gas vereist tanks onder hoge druk (350-700 bar). Dat maakt opslag in tanks relatief duur. Een andere technisch knelpunt is 'boil-off': ondanks zo goed mogelijke isolatie, komt warmte uit de omgeving de opslagtank binnen, waardoor een gedeelte van de vloeibare waterstof verdampt. De verdampte waterstof moet ontsnappen om te voorkomen dat de druk in de opslagtank stijgt. Dit gebeurt niet alleen bij opslag, maar ook bij de overdracht van vloeibare waterstof van het ene naar het andere opslagmedium. (Petitpas, 2018))

Maatschappelijk draagvlak

Maatschappelijk draagvlak is een belangrijke component voor alle mijnbouwactiviteiten in Nederland, zowel de activiteiten die in de ondergrond daadwerkelijk plaatsvinden, als de gekoppelde bovengrondse activiteiten die impact hebben op het landelijke landschap. Voor ondergrondse opslag in gasvelden of zoutcavernes is dat niet anders. Ook het grootschalig opslaan (en vervoeren) van ammoniak kan door veiligheidsissues leiden tot maatschappelijke kritiek. Draagvlak en acceptatie kan gerealiseerd worden door het eerlijk verdelen van lusten en lasten en vroegtijdig overheden en burgers betrekken in een participatietraject. De Staatssecretaris van EZK schrijft hierover: "Voor het verkrijgen van draagvlak moeten mijnbouwbedrijven meer in verbinding komen met de regio. Dat betekent niet dat iedereen tevreden moet zijn, maar wel dat bestuurders en bewoners voldoende betrokken worden bij de vergunningverlening en dat de (proces)stappen helder zijn." ³³

Gebrek aan ruimte

Voor bovengrondse hernieuwbare moleculaire energiedragers geldt veelal dat er meer ruimte nodig is ten opzichte van fossiele energiedragers. Momenteel worden het gros van deze fossiele energiedragers opgeslagen in havens, waar ruimte schaars is. In de transitieperiode zullen fossiele en non-fossiel dragers moeten tegelijkertijd worden opgeslagen, waardoor een dubbele infrastructuur nodig zal zijn. Hierbij kan er een ruimtelijk probleem ontstaan en daarom moet rekening worden gehouden met meervoudig efficiënt ruimtegebruik. Dit geldt eveneens voor ondergrondse energieopslag. De ruimte in de ondergrond is schaars en bij eventuele toewijzing van ondergrondse ruimte voor energieopslag moet een evenwichtige afweging worden gemaakt tussen huidige en toekomstige ondergrondse claims.

Zie ook "Toelichting op de ruimtelijke ordening" (paragraaf 2.5).

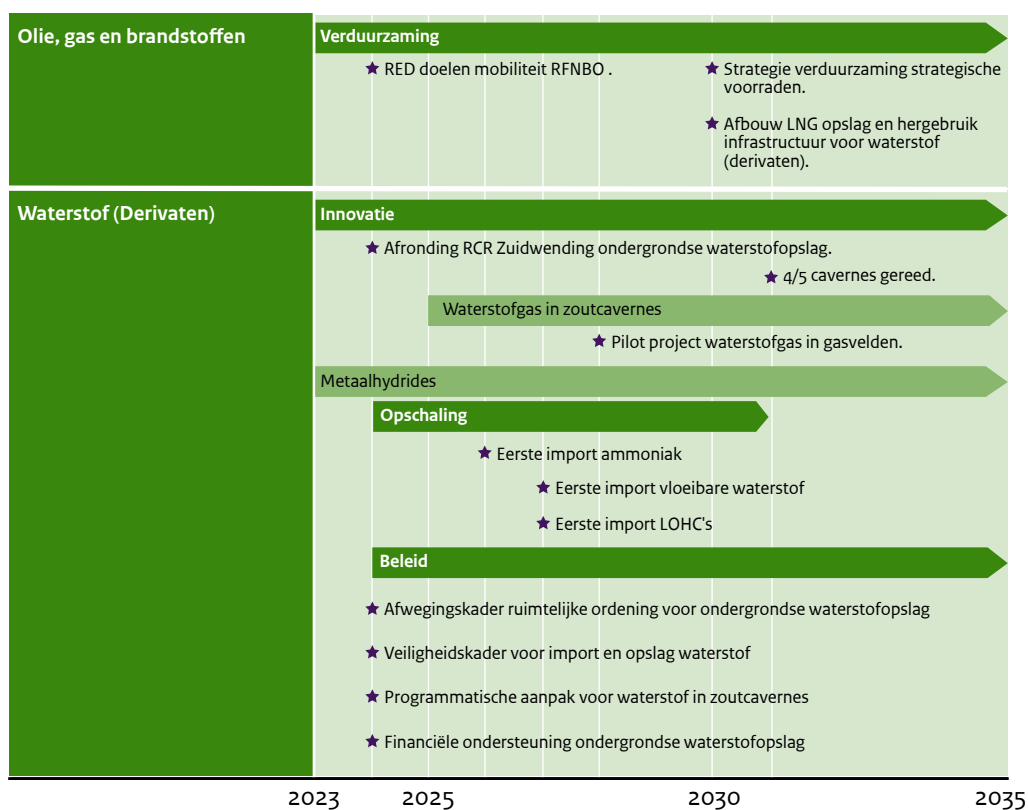
³³ Kamerbrief 'Contourennota voor een herziening van het mijnbouwstelsel', 10 mei 2023



5.4 Benodigde acties en mijlpalen

5.4.1 Mijlpalen moleculenopslag

Figuur 11 Overzicht mijlpalen moleculenopslag tot aan 2035



Het is belangrijk om een gunstig investeringsklimaat te creëren voor moleculenopslag. In verband met de lange doorlooptijden van grote infrastructuurprojecten voor energieopslag zijn enkele acties van de overheid nodig om zekerheid te creëren voor marktpartijen. Marktpartijen zelf moeten ook bepaalde acties uitvoeren om te zorgen dat de projecten op tijd worden uitgevoerd. Figuur 11 laat een schematische weergave zien van de benodigde acties en mijlpalen omtrent moleculenopslag. In de volgende paragrafen worden deze acties verder beschreven en actiehouders genoemd.



5.4.2 Benodigde acties tot 2035 moleculenopslag

In onderstaande tabel zijn de acties omschreven die nodig zijn voor het bevorderen van moleculenopslag en voor 2035 moeten worden uitgevoerd.

Tabel 6 Actie agenda moleculenopslag

Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
Beleidskader: welk beleid en regelgeving is nodig?		
31. Langetermijnvisie gasopslag opstellen	N.a.v. regeerakkoord 2022 en motie Erkens-Kröger ³⁴	EZK, Q3-2023
32. Ontwikkelen van strategie en/of beleid voor de verduurzaming van de huidige strategische opslagen van olie(producten) en verkennen of strategische opslagen van waterstof nodig zullen zijn.	De vraag naar olie neemt af. Belangrijk is om te bezien hoe om te gaan met de resterende olievraag en welke gevolgen de afname voor de strategische voorraden heeft. Zo nodig moet die in nationale wet- en regelgeving verwerkt worden en moeten internationale afspraken hierover gemaakt worden. In de periode 2025-2030 als de waterstofmarkt meer volwassen is, moet er worden verkend of maatschappelijk verantwoord is om strategische opslagen van waterstof aan te leggen (voor eventuele tekorten vanwege jaren van misoogst van duurzame energie, gedeeltelijke niet beschikbaar import en andere calamiteiten).	EZK, 2025-2030
33. Ontwikkelen van strategie en/of beleid voor de afbouw van LNG import en het hergebruik van infrastructuur	Op de lange termijn is het nodig om beleid te ontwikkelen voor het afbouwtraject in relatie tot LNG-infrastructuur.	EZK, 2025-2030
34. Ruimtelijke ordening nieuwe vormen van energieopslag in de ondergrond	In het kader van het Programma Energie Hoofdstructuur (PEH), dat ruimte reserveert voor vitale energie infrastructuur, zullen inrichtingsprincipes worden gedefinieerd specifiek voor ondergrondse waterstofopslag. Een screening van mogelijke opslaggebieden is onderdeel van dit programma. Met deze inrichtingsprincipes voor waterstofopslag wordt vooruit gelopen op het Rijksprogramma voor duurzaam gebruik van de ondergrond, omdat de waterstofmarkt snel groeit en duidelijkheid nodig is voor alle stakeholders over de ruimtelijke ordening hiervan. Deze principes zullen worden meegenomen in de uitvoering van het Rijksprogramma voor duurzaam gebruik van de ondergrond. Hierbij zal de relatie tussen andere maatschappelijke belangen in de ondergrond meer gedetailleerd worden uitgewerkt. Ook zal in context worden geplaatst in welke gebieden welke activiteiten wel, niet of onder bepaalde voorwaarden mogen plaatsvinden.	EZK en IenW, 2023-2024
35. Creëren van een programmatische aanpak voor opschaling grootschalige ondergrondse waterstofopslag	Voor de verdere opschaling van grootschalige ondergrondse waterstofopslag is een programmatische aanpak nodig die de ruimtelijk, financieel, maatschappelijk en marktordening aspecten samenbrengt. Om lokaal draagvlak hiervoor te verkrijgen is het van belang dat de lokale stakeholders kunnen meeprofiteren van de ondergrondse activiteiten. Een model waarbij de baten ten gunste komen van de regio moet worden toegepast. Tot 2030 zal het vooral over opslag op land in zoutcavernes gaan. Hiervoor zijn €250 mln euro gereserveerd in het Klimaatfonds tot 2030 (april 2023) die verder in een instrument moeten worden uitgewerkt.	EZK 2023-2024
36. Verkennen of herziening van de Structuurvisie Ondergrond nodig is	Naast het afwegen van vormen van energieopslag tegen elkaar moet energieopslag ook gewogen worden tegen andere (huidige en toekomstige) functies in de ondergrond. Doel is om een efficiënt ingerichte ondergrond te bereiken, waarbij bodem- en grondwaterkwaliteit effectief beschermd worden. Er moet worden bezien of het huidige afwegingskader voor de ondergrond, de Structuurvisie Ondergrond, nog volstaat om dit doel te bereiken of dat er een update moet komen.	EZK en IenW, 2023

³⁴ Kamerstuk 36200XIII-38, vergaderjaar 2022–2023



Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
37. Optimaliseren van vergunning-procedures voor ondergrondse energieopslag	Verkennen of bestaande procedures voor nieuwe ondergrondse energieopslag projecten niet geoptimaliseerd kunnen worden om ze versneld te kunnen doen (i.v.m. urgentie om voldoende opslag in het systeem in te bouwen).	EZK, 2023
38. Verbeteren van scenariomodellen voor marktpotentie moleculenopslag	Huidige rekenmodellen lijken niet goed geschikt voor het laten zien van de daadwerkelijke technisch-economische potentie van opslag. De meeste scenariostudies rekenen enkel met prijsverschillen, en niet met andere inkomstenstromen zoals balanceringsdiensten of congestieverlichting. Voor moleculenopslag zijn met name de fluctuaties in productie ten behoeve van de invoeding in de opslag belangrijk om nauwkeurig te modelleren. De overheid verkent hoe dit punt verbeterd kan worden, ook in internationaal verband.	EZK/RVO in samenwerking met scenariobouwers, Q4-2023 (verkenning)

Veiligheidsaspecten: hoe is de veiligheid gewaarborgd?

39. Herijken van richtlijnen voor veilige opslag van nieuwe moleculaire energiedragers, zowel boven- als ondergronds	Voor veel ondergrondse en bovengrondse opslag activiteiten van moleculaire energiedragers bestaan er kaders voor het veilige opslaan (aardgas, ammoniak en transportbrandstoffen). Er zal gekeken moeten worden of deze kaders voldoende geschikt zijn voor waterstof en andere nieuwe moleculaire energiedragers.	IenW en EZK, 2023
40. Plan maken voor het veilig afsluiten van ondergrondse opslag cavernes als onderdeel van vergunningen	Wanneer er grote hoeveelheden cavernes beschikbaar gemaakt worden voor energieopslag, moet er gekeken worden naar het veilig afsluiten van deze cavernes (en de mogelijke gevolgen daarvan). Dit moet worden meegenomen in opslagplannen van operators. Dit wordt meegenomen in Nobian's Cavern Closure Consortium voor de huidige operationele perimeter van Zuidwending met de geplande waterstof, CAES (persluchtinstallaties) en vervangingscavernes en kan als voorbeeld dienen voor toekomstige projecten.	Nobian, Gasunie, SodM en EZK, 2023
41. Verkennen hoe financiële zekerheid voor opslag in zoutcavernes kan worden gegarandeerd	Het is belangrijk om aan de voorkant van energieopslag in zoutcavernes te denken aan het opruimen en veilig afsluiten van de cavernes na de operationele tijd. Hiervoor dient financiële zekerheid worden geregeld.	EZK/RVO, 2023-2024
42. Ontwikkelen nieuwe veiligheids-normen en risicobeheersing strategieën voor nieuwe vormen van bovengrondse en ondergrondse energieopslag	Met de bevindingen van de vorige acties gerelateerd aan veiligheidsaspecten kan er behoefte ontstaan om nieuwe normen en risicobeheersing strategieën te ontwikkelen.	EZK en IenW, 2023-2025
43. Verbeteren kennisdeling over veiligheidsaspecten energiedragers	Voor nieuwe vormen van opslag is dit essentieel. Voornamelijk over waterstof en ammoniak zijn er veel vragen over veiligheidsaspecten. Kennisdeling vindt plaats via verschillende platforms.	NWP, Ammoniak Platform ISPT, WVIP (Waterstof Veiligheid Innovatie Programma), IEA TCP, en meer. Lopende activiteit in de periode 2023-2035

Innovatie: welke innovaties zijn nodig?

44. Pilot- en demonstratieprojecten ontwikkelen voor duurzame brandstoffen en waterstofderivaten	Doel: om hiermee technologische voortuitgang te stimuleren en kostprijdsdaling in gang te zetten. Via verschillende nationale en Europese subsidies is het mogelijk om innovatieve projecten te ondersteunen (DEI+, Groenvermogen, Clean Hydrogen Partnership, etc). RVO zorgt voor informatieverstrekking aan geïnteresseerde partijen.	RVO en bedrijven die participeren. Lopende activiteit 2023-2035
45. Randvoorwaarden ontwikkelen voor een eerste pilot voor waterstof opslag in gasvelden	Op basis van een pilot kan worden besloten of en op welke manier waterstofopslag in gasvelden kan worden geïmplementeerd in Nederland. Voorafgaand moet nagedacht worden over randvoorwaarden voor deze pilot, bijv. financiering, reguleringskader, marktordening, ruimtelijke ordening, etc.	EZK, 2024
46. Verder onderzoek doen naar waterstofopslag op zee (in zowel zoutcavernes als gasvelden)	Nader onderzoek is nodig om het TRL niveau van deze alternatieven te verhogen. Er zijn verschillende Nederlandse kennisinstellingen en bedrijven actief op dit gebied.	IEA H2 TCP, TNO, EBN, TU Delft en veel private bedrijven, lopende activiteit



Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
Maatschappelijke acceptatie: hoe worden de belangen van burgers gewaarborgd?		
47. Afronden en evalueren van RCR-UHS Zuidwending	In deze RCR procedure wordt voor het eerst een ondergrondse waterstofopslag (in het Engels: Underground Hydrogen Storage, UHS) project gerealiseerd met een belangrijk participatietraject.	Decentrale overheden, burgers, EZK, Gasunie en Nobian, 2023-2024
48. Verkenning voorkeurs-alternatieven voor doorgroei ondergrondse waterstofopslag in zoutcavernes	Samen met decentrale overheden en bewoners bepalen waar de volgende opslag locaties op land zullen worden geaccommodeerd. Dit wordt onderdeel van het Rijksprogramma voor duurzaam gebruik van de ondergrond.	Decentrale overheden, burgers en (onder coördinatie van) EZK, 2023-2024
Maakindustrie: hoe kan het verdienvermogen van Nederland worden vergroot?		
49. Creëren gunstig investeringsklimaat voor ondergrondse waterstofopslagen	Het is nog onduidelijk hoeveel vraag er naar wateropslag zal zijn, maar het is zeker dat er behoefte aan ondergrondse waterstofopslag is. Financiële ondersteuning is nodig voor de eerste projecten in deze nieuwe markt. Via IPCEI en Rijksbegrotingen zijn er middelen gereserveerd voor waterstofopslag. Deze moeten worden uitbesteed. Daarnaast is er met de Voorjaarsnota 2023 € 125 miljoen gereserveerd om de financiële risico's van grootschalige waterstofopslag te dekken. Dit bedrag kan verdubbeld worden voor extra cavernes indien nodig.	EZK, 2023
Human capital agenda: wie voert de projecten uit en wat zijn de kansen m.b.t. arbeidskrachten?		
50. Niet van toepassing	Zie paragraaf 2.5.	

6. Warmteopslag





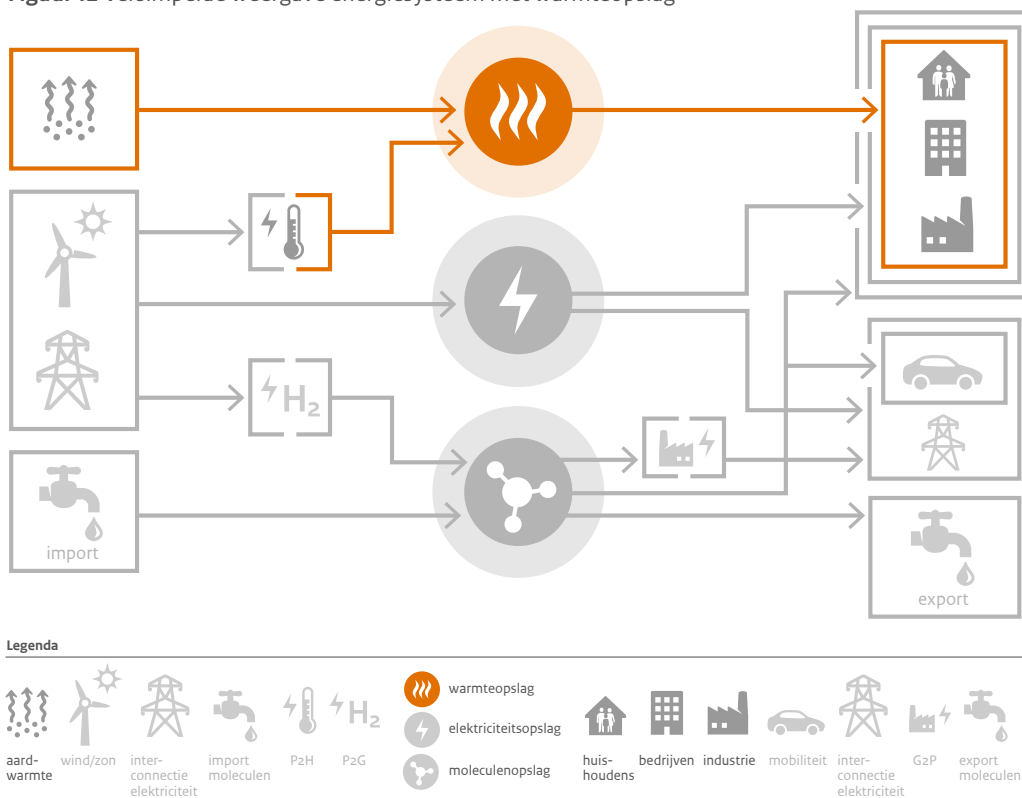
6.1 Analyse van warmteopslag in Nederland

6.1.1 Warmteopslag: toepassing en technieken

Energieopslag in de vorm van warmte sluit goed aan bij onze energievraag, want ongeveer de helft van onze energievraag is voor warmte. Deze vraag kent een duidelijke seizoenspiek in de winter. Warmteopslag kan ingezet worden voor korte-termijn en voor het overbruggen van deze seizoenspiek (winter). Warmte kan onder andere worden opgeslagen in water, zout, lucht of gesteenten. Behalve warmte kan ook koude worden opgeslagen. Warmteopslag is in Nederland bij uitstek lokaal, omdat bij transport veel warmte verloren gaat. Alle vormen van energieopslag waar warmte en/of koude in gaat en daarna wordt onttrokken (of andersom) zullen we behandelen als warmteopslag.

Circa 50% van het totale energieverbruik in Nederland wordt bepaald door de warmtevoorziening (EBN, 2023). Door de transitie van gas naar alternatieve warmtebronnen zal het in het toekomstige energiesysteem vaker nodig zijn om vraag en aanbod af te stemmen in een soepel samenspel op verschillende tijdschalen. Hier zal warmteopslag een belangrijke rol spelen. Naast de tijdschaal is het vermogen van de opslag uiteraard van belang.

Figuur 12 Versimpelde weergave energiesysteem met warmteopslag



Warmteopslag omvat een breed spectrum aan technieken. Er kan grofweg een tweedeling worden gemaakt aan de hand van de termijn waarop warmte kan worden opgeslagen:

- *Seizoensopslag* van warmte vanwege de vraag naar ruimteverwarming in de winter of koeling in de zomer.
- *Korte-termijnsopslag* van elektriciteit of zonnewarmte als warmte of koude, om pieken in de productie op te vangen en in te zetten op het moment dat er wel vraag is naar warmte of koude.

Toepassing van seizoensopslag met warmte

In Figuur 2b is te zien hoe de vraag naar aardgas de jaarlijkse energievraag domineert. Om leveringszekerheid te bieden gedurende het winterseizoen is lokale opslag van warmte in de toekomst noodzakelijk. Veel duurzame bronnen leveren ook in de zomer warmte (bijvoorbeeld: geothermie, restwarmte), of zelfs met



name in de zomer (bijvoorbeeld: zonthermie), wanneer de vraag naar warmte veel geringer is. Zonder seizoenopslag van warmte kan deze zomerwarmte niet gebruikt worden en zal deze verloren gaan. Seizoenopslag van warmte benut duurzame bronnen beter, biedt een oplossing voor de piekvraag, en maakt duurzame bronnen daarmee rendabeler.

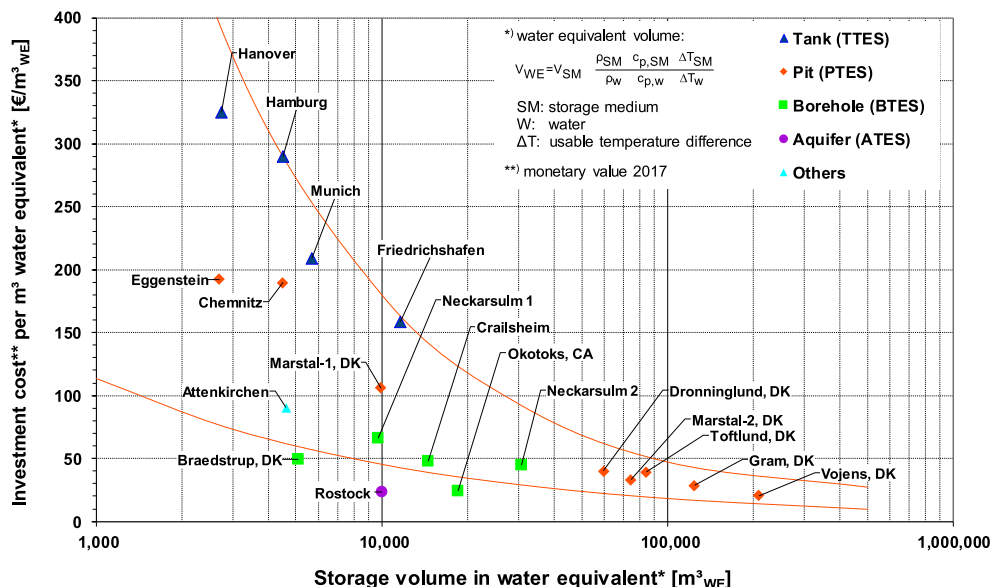
Voor seizoenopslag van warmte ligt de focus op collectieve systemen voor de gebouwde omgeving. Het gaat om warmteopslagen die een groot of klein warmtenet van (additionele) warmte voorzien. Warmtenetten hebben de potentie om in Nederland een derde van de benodigde warmte in de gebouwde omgeving te leveren (PBL, 2020). Het gaat vooral om gebieden met hoge bebouwingsdichtheid waar de warmtevraag per km² hoog is. Warmtenetten zullen verder interessant zijn in de glastuinbouw vanwege de hoge warmtevraag, en voor benutting van industriële en andere restwarmte. Modellen van het toekomstig energiesysteem nemen de potentie van warmtenetten en warmteopslag vaak onvoldoende mee. Het is van belang om energiemodellen uit te breiden met warmte en warmteopslag, zodat scenario's voor ons toekomstig energiesysteem ook voldoende recht doen aan de rol die warmtenetten en warmteopslag kunnen vervullen.

Het temperatuurniveau van de opslag is belangrijk voor warmteopslag. Hoe lager het temperatuurniveau van de warmtevraag, hoe meer potentiële geschikte duurzame warmtebronnen. Hoe hoger de temperatuur, des te meer toepassingen. Verder is belangrijk dat warmte typisch lokaal wordt geproduceerd, gebruikt en opgeslagen omdat transport van warmte met name bij hoge temperaturen gepaard gaat met aanzienlijke verliezen.

De lokale warmtevraag en beschikbare bronnen bepalen het meest geschikte temperatuurregime van een warmtenet. Daarbij wordt een integraal optimum gezocht tussen de kosten van isolatie en warmteafgifte in de woningen en de exploitatie van de warmtebron en eventuele opwaardering tot het gewenste temperatuurniveau.

Een lager temperatuurniveau in het warmtesysteem vergroot de flexibiliteit en beschikbaarheid van bronnen. Zeer lage temperatuur (ZLT) systemen kunnen bovendien koeling leveren. Daar staat tegenover dat woningen en gebouwen voldoende geïsoleerd moeten zijn. Een exploitant kan de best passende vorm, omvang en temperatuur van warmteopslag bepalen om de duurzaamheidsprestaties en business case van het warmtesysteem te optimaliseren.

Seizoenopslag van warmte is een relatief goedkope vorm van energieopslag. Naar gelang opslagen kleiner worden, wordt de prijs per m³ opgeslagen water equivalent hoger, maar kleinere opslagen kunnen mogelijk intensiever gebruikt worden (meerdere laad- en ontladcycli per jaar). Zie Figuur 13 voor een globale vergelijking.

Figuur 13 Investeringskosten voor diverse warmteopslag technologieën³⁵ (Schmidt, 2018)

Toepassing van korte-termijn warmteopslag

Korte-termijnopslag van elektriciteit of zonnewarmte als warmte of koude kan pieken in de beschikbaarheid opvangen en de energie omzetten in de vorm waarin ze in veel situaties ook gevraagd wordt. Bij korte-termijnopslag gaat het daarbij om ruimteverwarming voor de gebouwde omgeving en voor procesverwarming voor de industrie. De 'korte-termijn' (uren, dagen, weken) moet worden gelezen als complementair aan de lange termijn (maanden) van seizoensopslag.

Korte-termijnopslag kan worden toegepast bij industriële processen op temperatuurniveaus die kunnen oplopen tot honderden graden Celsius, in de glastuinbouw als voelbare warmte in tanks, bij warmtenetten als (voelbare) warmteopslag in een wijk (naast bijvoorbeeld warmteoverdrachtstations) en bij huishoudens in boilers of buffervaten. Met name in de industrie kan het opslaan van (dag)pieken in het elektriciteitsaanbod goedkope warmte en koude opleveren voor andere uren van de dag of week. Datzelfde geldt ook voor de glastuinbouw, waar uiteraard ook sprake is van een winterpiek in warmtevraag. Industriële bedrijven en glastuinders hebben ook te maken met tarieven die energiemanager rechtvaardigen. Korte-termijnopslag kan ook worden toegepast in de gebouwde omgeving voor piekvraag van warmte op een dag (voor bijvoorbeeld douchen) of hele koude dagen/weeken. Ook hier kan energie worden opgeslagen in water of andere opslagmedia.

Er is een verkenning gedaan naar de potentie van omzetting van elektriciteit in warmte (Power-to-Heat of P2H) en warmteopslag technieken (P2H+S) om warmtenetten te verduurzamen voor toepassing in de gebouwde omgeving (CE Delft, 2023). Er is gekeken naar diverse configuraties met warmtepompen en elektrische boilers gecombineerd met opslag. Hoofconclusies zijn dat P2H voldoende potentieel heeft voor een merkbare impact op de verduurzaming van warmtenetten.

Technieken voor seizoensopslag met warmte

Zowel de ondergrondse als de bovengrondse systemen worden in een collectief systeem (warmtenet) gebruikt. Onder deze vorm van opslag vallen onder andere bodemenergie systemen waaronder warmte-koudeopslag (WKO) en gesloten bodemplussen, midden- en hoge temperatuur ondergrondse warmteopslag (ofwel MTO of HTO) in diepe aquifers of in mijnstructuren, borehole warmteopslag en kuil- en tank

³⁵ Investeringskosten per m³ waterequivalent (€/m³ we), uitgezet tegen de grootte van de opslag (m³ waterequivalent) voor vormen van warmteopslag



warmteopslag. De marktpenetratie van deze technieken loopt uiteen van ‘beperkt toegepast in Nederland’ voor kuil warmteopslag, enkele installaties voor zowel MTO of HTO in diepe aquifers, als tank warmteopslag, warmteopslag in mijnstructuren en borehole warmteopslag, tot enkele duizenden open systemen voor bodemenergie. Het Technology Readiness Level (TRL) van deze systemen is dusdanig hoog dat uitrol naar de markt mogelijk is, maar nog niet voor elke techniek is er sprake van grootschalige toepassing.

Warmte-koudeopslag (WKO) in ondiepe bodemlagen is inmiddels breed uitgerold in de Nederlandse gebouwde omgeving. Dit is mede te danken aan de opbouw van de Nederlandse ondergrond waarin zich veel aquifers bevinden, en het feit dat de rijksoverheid in de jaren '90 van de vorige eeuw de opschaling van WKO actief heeft gestimuleerd door middel van een succesvol marktimplementatie programma. Momenteel zijn ruim 3.000 WKO systemen geïnstalleerd (ECW, 2022).

Bodemenergie systemen berusten op de toevoeging en onttrekking van warmte in uitwisseling met de ondergrond. Deze bodemenergiesystemen, waarbij warmte tot enkele tientallen meters onder de grond wordt opgeslagen, worden in Nederland veel toegepast om woningen, kantoren en andere gebouwen jaarrond van warmte en koude te voorzien. Op het gebied van open systemen, waarbij de warmte en koude in ondiepe aquifers wordt opgeslagen (WKO-systemen), loopt Nederland internationaal voorop met enkele duizenden installaties. Daarnaast worden de gesloten bodemlussen (gesloten bodemenergiesysteem) ook veelvuldig toegepast (circa 80.000 bodemlussen geïnstalleerd), maar zijn we hier globaal gezien geen koploper in.

Een doorontwikkeling op WKO-systemen zijn de ondergrondse warmteopslagsystemen in diepe aquifers waarbij warmte, met een hogere opslagtemperatuur van 25-60 voor midden temperatuur opslag (ook wel bekend als MTO) en 60-90 voor hoge temperatuur opslag (ook wel bekend als HTO), wordt opgeslagen in aquifers tot een diepte van circa 500 meter waardoor er minder of geen opwaardering van energie (middels warmtepompen) nodig is. Daarnaast is de grootte, het vermogen en de hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen vele malen groter dan voor WKO-systemen. Daardoor zijn minder putten nodig en kunnen ook warmtenetten worden aangesloten die op hogere temperaturen bedreven worden. In Nederland is er een grootschalig demonstratie project op het gebied van HTO bij Middenmeer (verder toegelicht in Case Study: Hoge Temperatuur Opslag Middenmeer). Daarnaast zitten er ook nog een aantal demonstratie projecten in de pijplijn, die worden uitgerold binnen het Nieuwe Warmte Nu! Initiatief (Nationaal Groeifonds), of in andere innovatiekaders. Een andere vorm van ondergrondse warmteopslag is opslag in mijnstructuren. Deze mijnstructuren zijn gevuld met (formatie)water waardoor er warmte kan worden toegevoegd en onttrokken. Een project waarbij dit wordt toegepast is Mijnwater in Heerlen.

Naast ondergrondse opslag is er ook bovengrondse of (deels) ingegraven seizoensopslag mogelijk, in de vorm van kuil- en tank warmteopslag. Bij beide vormen wordt er warmte opgeslagen in water in een goed geïsoleerde kuil of tank. In Nederland zijn enkele toepassingen van grote seizoensopslag tanks die ingezet worden in een collectief systeem (zie hiervoor onder meer de case studies in deze tekst en de bijlagen). Daarentegen wordt kuil warmteopslag nog niet toegepast in Nederland, maar zijn diverse voorbeelden te vinden in Denemarken.

Case Study: Hoge Temperatuur Opslag Middenmeer

Hoge temperatuur opslag (HTO) richt zich op warmte opslag en heeft een temperatuurbereik dat kan oplopen tot 90°C. Dit is een belangrijk verschil met een WKO systeem. Door het dieptebereik van deze systemen is het energieverlies bij opslag beperkt en valt HTO buiten het bereik van de als drinkwater gedefinieerde aquifers. Deze systemen gebruiken geen of minder warmtepompen en hebben een hoge COP (Coëfficiënt of Performance). Dit betekent lagere OPEX kosten (Operational Expenditures) en een lage CO₂ emissie. Een pilotsysteem van ondergrondse warmteopslag is gerealiseerd in Middenmeer (zie ook de bijlage, 8.7).

Een overzicht van de warmteopslag technieken is te vinden in de bijlage (8.6).



Technieken voor korte-termijn warmteopslag

Ook voor korte-termijn warmteopslag kan een onderverdeling gemaakt worden op basis van verschillende technologieën, namelijk grote warmwatertanks of warmwatervaten, zogenaamde 'phase change materials' (PCM ofwel faseovergang materialen), thermochemische materialen (TCM) of voelbare warmteopslag in een stof anders dan water (zoals olie, metaal, beton). Deze technologieën worden voornamelijk toegepast op een individueel niveau in de gebouwde omgeving of door de industrie. Er zijn ook partijen die deze technologieën voor collectieve warmteopslag in wijken ontwikkelen en toepassen. Het TRL-niveau loopt bij de korte-termijnopslag technieken uiteen van 5 tot 9. Hierbij zijn technieken zoals de warmwatertanks of -vaten en E-boilers al veelvuldig in Nederland toegepast, terwijl de sorptie, faseovergang materialen, gesmolten zout of warmteopslag in andere materialen nog in ontwikkeling zijn. Deze ontwikkeling wordt ondersteund in diverse lopende innovatie- en demonstratieprojecten.

Tanks van enkele honderden tot een paar duizend liter zijn in Nederland een welbekende techniek. Deze worden vaak ingezet als buffervat, al dan niet in combinatie met een warmtepomp. Op grotere schaal worden deze warmwatervaten of buffertanks vaak gebruikt naast WKK's in de glastuinbouw. Ook is er recent een opmars gaande van elektrische boilers (E-boilers), met meer dan 20 SDE++ subsidieaanvragen gehonoreerd en een enkele installatie gerealiseerd (verder toegelicht in Case study: E-Boiler Ypenburg). Zoals eerder gesteld, zijn er ook warmteopslag technologieën die nog doorontwikkeld moeten worden. Sommige daarvan worden in het buitenland in specifieke toepassingsgebieden reeds ingezet, zoals gesmolten zoutopslag bij CSP-plants (Concentrated Solar Power) in Spanje. Daarnaast wordt er onderzoek gedaan naar technologieën die warmte efficiënt op hogere temperatuur kunnen opslaan in vaste stoffen (in bijvoorbeeld beton of steen), technologieën die heel compact zijn en gebaseerd op faseovergangen (PCM), en technologieën die zowel compact zijn alsook hun warmte theoretisch oneindig kunnen vasthouden met behulp van chemische reacties (TCM).

Een overzicht van de warmteopslag technieken is te vinden in de bijlage (8.6).

6.1.2 Integratie warmteopslag technieken in het energiesysteem

In de gebouwde omgeving en voor de glastuinbouw is seizoensopslag altijd gekoppeld aan warmtenetten. Om warmteopslag zinvol in een warmtenet te integreren moet het temperatuurniveau kloppen. Er is sprake van verschillende oplossingen en verschillende temperatuurniveaus. De lokale situatie is bepalend voor de inrichting van het systeem.

Case Study: E-boiler in Nederland

Bovengronds kan warmte opgeslagen worden in verschillende soorten tanks. Het voordeel hiervan is dat deze systemen goed controleerbaar en herhaalbaar zijn, maar daar staat tegenover dat de opslagcapaciteit en het energieverlies over de tijd heen beperkend kunnen zijn. Een voorbeeld hiervan is de E-boiler of elektrische boiler, een bewezen techniek om op basis van elektriciteit, warmte tot circa 100°C te produceren en op te slaan in de vorm van heet water. In de Haagse wijk Ypenburg is er een E-boiler met een vermogen van 12 MW_{th} gerealiseerd als één van de bronnen van de stadswarmtevoorziening (zie de bijlage (8.7)).



Warmtenetten kunnen worden ingedeeld op temperatuur, namelijk (zeer) lage temperatuur (ZLT of LT-), midden temperatuur (MT-), en hoge temperatuur (HT-)warmtenetten. Met respectievelijke aanvoer-temperaturen van 10-30, 30-55, 55-75 en >75 graden Celsius. Naarmate de temperatuur van het warmtenet lager wordt, groeit het aantal potentiële warmtebronnen die warmte kunnen leveren aan het warmtenet. Hetzij voor direct gebruik, hetzij om de opslag te voeden. In een zogenaamd 5^e generatie warmtenet worden lokale restwarmte en -koude producenten via een modulair netwerk met warmteopslag technieken en warmtepompen op verschillende niveaus van warmte en koude voorzien, zie de Case Study Systeemaanpak vijfde generatie warmte- en koudenet.

Case Study: Systeemaanpak vijfde generatie warmte- en koudenet

Vijfde generatie warmte en koudenetten (5GDHC-netwerk) zijn stedelijke netten voor verwarming én koeling. De warmte of koude wordt lokaal verkregen en bestaat uit meerdere voedingspunten, die van een laag temperatuurniveau kunnen zijn. Duurzame warmtebronnen, warmtepompen en warmteopslag worden gekoppeld aan een verbindend netwerk, dat zorgt voor energie uitwisseling tussen gebouwen op straat, wijk, of het wijk overstijgend niveau (zie ook bijlage (8.7)).

6.1.3 Hoe wordt warmteopslag gestimuleerd in Nederland?

In Nederland wordt warmteopslag op verschillende manieren gestimuleerd.

SDE++

In Nederland wordt warmteopslag met name gestimuleerd vanuit diverse innovatieregelingen. Vanuit staand beleid is er een beperkte directe stimulans tot warmteopslag in wet en regelgeving. Wat betreft financieringsinstrumenten wordt op het moment de e-boiler gesubsidieerd in de SDE++. Ook komen diverse vormen van warmteopslag in aanmerking voor een fiscale stimulering middels de EIA.

NTA 8800

De NTA 8800 (Nederlandse technische afspraak) is de methode voor de bepaling van de energieprestatie van gebouwen, waarmee onder meer gerekend kan worden om aan te tonen dat men voldoet aan de Bijna-energie neutrale gebouwen (BENG) wetgeving. Binnen de NTA 8800 zijn de randvoorwaarden voor de duurzame inzet van e-boilers opgenomen middels het zogenaamde 'price-cap mechanisme'. Voor de duurzaamheidsrapportage warmtenetten gelden voor e-boilers dezelfde randvoorwaarden.

TKI Urban Energy

Binnen de TKI Urban Energy zijn diverse projecten op het gebied van warmteopslag verzameld die met ondersteuning van verschillende regelingen van de topsector energie (TSE regelingen) zijn uitgevoerd³⁶. Ook is er voorzien in een kennisdossier.

WarmingUp initiatief

Binnen het WarmingUp initiatief is ondergrondse warmteopslag een van de thema's die is opgepakt.³⁷

WKO-bodemenergietool

De WKO-bodemenergietool geeft een eerste inzicht op quickscan-niveau of op een locatie open- of gesloten bodemenergiesystemen kunnen worden toegepast of dat er verboden, restricties of aandachtspunten zijn.³⁸

³⁶ Zie ook de website: [Projecten – Topsector Energie](#)

³⁷ Zie ook de website: [Ondergrondse warmteopslag – WarmingUp](#)

³⁸ Zie ook de website: [WKO-bodemenergietool. Ontdek de mogelijkheden van bodemenergie. \(wkotool.nl\)](#)

**NPLW**

Binnen het Nationaal Programma Lokale Warmtetransitie (NPLW) kunnen gemeenten zich aan de hand van de factsheet warmteopslag oriënteren op de diverse mogelijkheden. Ook zijn er binnen de proeftuinen aardgasvrije wijken diverse voorbeelden met warmteopslag. Voorbeelden zijn te vinden bij de proeftuinen Nagele en Vlieland.³⁹

6.2 Analyse van warmteopslag in omliggende landen

De ontwikkeling van warmteopslag gaat in de ons omliggende landen redelijk gelijk op, en er wordt veel internationaal samengewerkt om van elkaar te leren. Net als Nederland hebben deze landen geen kwantitatieve doelen voor energieopslag.

Voor meer informatie zie de uitgebreide tabel in de bijlage (8.3).

Denemarken

Denemarken heeft ervaring met de realisatie van grootschalige warmteopslag, en daardoor inzicht in de condities die specifieke cases haalbaar maken. Nederland zou die kennis kunnen gebruiken om demonstratieprojecten een grotere slaagkans te geven. Ook houdt het Deense energieagentschap een technologie-catalogus bij met als doel om een uniforme informatiebasis te bieden voor het maken van energiebeleid (ruimtelijke ordening, leveringszekerheid, innovatie), en heeft Denemarken sinds 2021 een publiek-privaat samenwerkingsverband om de ontwikkeling van energieopslag te coördineren en focussen.

Duitsland

Duitsland stelt investeringssteun beschikbaar voor het realiseren van grote waterbuffers bij WKK-installaties, en heeft daardoor inzicht in de toegevoegde waarde van CAPEX-steun voor deze systemen.

België

Vlaanderen heeft recent besloten de investeringssteun voor thuisbatterijen per 2023 in te trekken, en de vrijgekomen middelen in te zetten voor warmtepompboilers. De redenatie is dat dit ten goede komt aan de vervanging van elektrische boilers, welke minder efficiënt zijn dan warmtepompboilers.

Verenigd Koninkrijk

In het Verenigd Koninkrijk is toenemende aandacht voor residentiële warmteopslag, en wordt vanuit het Longer Duration Energy Storage (LDES)-programma geïnvesteerd in een grootschalige demonstratie van systemen gebaseerd op PCM's.

Europese Unie

De Europese Commissie heeft in het Horizon-werkprogramma voor 2023-2024 30 miljoen euro beschikbaar gesteld voor een drietal demonstratieprojecten op het gebied van grootschalige warmteopslag. Nederlandse partijen kunnen hier aan deelnemen en de overheid kan de gesteunde projecten actief volgen om scherper zicht te krijgen op de randvoorwaarden die nodig zijn voor opschaling. Diverse Nederlandse partijen nemen deel aan projecten op het gebied van thermochemische opslag.

GEO THERMICA

Samenwerking op het gebied van grootschalige ondergrondse warmteopslag vindt op dit moment reeds plaats binnen het GEOTHERMICA netwerk van overheden, waarin de RVO namens Nederland partner is. Grootschalige ondergrondse warmteopslag is een van de vier speerpunten van dit netwerk. Er is een speciale werkgroep Heat Storage, die zich bezig houdt met uitwisseling van toekomstbeelden, financieel/economische kennis, wet- en regelgevingskennis, alsook technische en beleidskennis.

³⁹ Zie ook de website: [Proeftuinen op de kaart | Programma Aardgasvrije Wijken](#)



Daarnaast organiseert GEOTHERMICA ook gezamenlijke calls voor innovatie projecten (met een hoog TRL-niveau). Het kort geleden afgeronde HEATSTORE project was een van de “flagship projecten” uit de eerste GEOTHERMICA call. In dit grootschalige, door de verschillende partnerlanden gesubsidieerde project (met partners uit o.a. Denemarken, Duitsland, Frankrijk, Vlaanderen en Zwitserland), is kennis gegenereerd over diverse warmteopslag concepten, maar is ook een Roadmap voor grootschalige warmteopslag in Europa ontwikkeld. Daarnaast zijn ook daadwerkelijke demonstratieprojecten gerealiseerd. Een daarvan is de eerder beschreven Hoge Temperatuur Opslag Middenmeer.

Internationaal Energie Agentschap (IEA)

Vanuit het IEA is er internationale samenwerking binnen het IEA Energy Storage TCP (Technology Collaboration Programme). Dit netwerk was oorspronkelijk sterk georiënteerd op warmteopslag in de gebouwde omgeving, maar verbreedt zich intussen meer naar sectorkoppeling en systeemintegratie. Anno 2023 wordt hier kennis gedeeld over de ontwikkeling en integratie van verschillende opslagtechnieken, met zowel aandacht voor de techniek van de opslag zelf (hardware en software) als voor de voorwaarden die implementatie bespoedigen (maatschappelijke en commerciële waarde proposities, rekenmodellen over het nationale energiesysteem). Ook in andere TCP's speelt energieopslag in samenhang met flexibele sturing een rol.

6.3 Verwachte ontwikkelingen warmteopslag in Nederland

6.3.1 Ontwikkelingen in Nederland

Meer korte-termijn warmteopslag naast elektrificatie

Warmte is 50% van het Nederlandse energiesysteem. Voor een deel zal dit naar verwachting ingevuld worden door middel van elektrificatie waardoor ruimtebeslag door bijvoorbeeld zon en windenergie zal toenemen en netcongestie een belangrijke belemmerende factor kan worden (op zowel het hoogspannings- als het laagspanningsnet).

Er zijn verschillende energiescenario studies uitgevoerd, veelal vanuit elektriciteitsperspectief (Berenschot en Kalavasta, 2020), (TNO, 2020). Zon en wind energie zal blijven groeien richting 2050. Voor elektriciteit wordt de afstemming tussen vraag en aanbod belangrijker vanwege de stabiliteit van het net en de marktordening. Hierbij zullen alle vormen van energieopslag belangrijker worden.

Elektrificatie zal een belangrijke rol spelen in gebieden waar alleen individuele, duurzame oplossingen mogelijk zijn, maar ook in gebieden waar de elektrificatie van de industrie grootschalig zal worden uitgerold. Hierdoor zal het mitigeren van netcongestie belangrijker worden. De variatie in beschikbare duurzame elektriciteit en de netcongestie kan in deze gebieden opgevangen worden door korte-termijn opslag van warmte. Dit kan mogelijk de benodigde investeringen in netverzwaring reduceren en kan prijsschommelingen van elektriciteit tegengaan.

In gebieden waar duurzame warmte wordt geproduceerd met collectieve warmtebronnen vangt integratie van seizoensopslag in het warmtenet het overschot van de warmte geproduceerd in de zomer op om het te kunnen gebruiken bij het tekort van het winterseizoen. Collectieve warmtebronnen zijn o.a. geothermie, restwarmte uit de industrie (bijvoorbeeld van waterstofproductie), zonthermie, aquathermie en elektriciteit in de vorm van power-to-heat.

Warmtevoorziening uit fossiele bronnen wordt vervangen

Rest- en omgevingswarmte, geothermie, zomerwarmte uit zonthermie, aquathermie en duurzame warmte uit duurzame elektriciteit zullen geleidelijk de warmtevoorziening uit fossiele bronnen vervangen. Om vraag en aanbod te balanceren kan warmte en koude uit deze bronnen opgeslagen worden en op die manier voorzien in de verwarmings- en koelingsbehoefte van Nederland.

**Warmteopslag wordt standaard in de industrie, tuinbouw en gebouwde omgeving**

In de toekomst wordt warmteopslag onderdeel van het duurzame energiesysteem. Het eindbeeld voor warmteopslag is dat korte-termijnopslag en seizoensopslag een standaard worden in de gebouwde omgeving, tuinbouw en industrie. Deze vormen van opslag zijn aangesloten op de lokale warmtesystemen en/of warmtenetten, en worden van warmte voorzien uit een brede waaier aan duurzame warmtebronnen. Zowel korte-termijn opslag als seizoensopslag biedt leveringszekerheid, een lokaal verdienmodel, ontlast het net en draagt mede bij aan een betaalbaar en duurzaam warmtesysteem.

De ontwikkelingen gaan snel. Een aantal korte-termijn oplossingen, bijvoorbeeld de E-boiler, wordt al uitgerold. De werking van andere technieken, bijvoorbeeld thermochemische opslag, wordt nog gevalideerd en gedemonstreerd. Tank opslag wordt uitgerold en een aantal HTO demonstratieprojecten worden uitgevoerd. Bij seizoensopslag is dit mede te danken aan de aanleg van warmtenetten en de groei van het aantal duurzame, collectieve warmtebronnen.

Koude wordt relevanter

Koude zal in de toekomst in toenemende mate nodig zijn door klimaatopwarming. WKO en warmteopslagssystemen kunnen, in slimme concepten met warmtepompen, koude- en warmteopslag koppelen.

Economische kansen voor Nederland: WKO-systemen

De technische en economische kennis en ervaring die is opgedaan in Nederland ten aanzien van seizoens- en korte-termijn warmteopslag bieden kansen voor het Nederlandse verdienvermogen van zowel maak-industrie als bedrijfsleven. Nederland is wereldwijd koploper met WKO-systemen en kan deze positie in de toekomst versterken naarmate meer kennis en ervaring wordt opgedaan.

6.3.2 Financiële/economische obstakels en uitdagingen warmteopslag

Economische knelpunten zijn met name gerelateerd aan prijsstructuur en beschikbaarheid van ondersteuning. De prijsstructuur voor elektriciteit en warmte stamt deels nog uit de tijd dat fossiele brandstoffen de productie verzorgden. Gedurende de transitie naar 100% duurzaam zullen financieel/economische randvoorwaarden moeten veranderen, zodat de warmtetransitie beter gefaciliteerd wordt en opschaling naar 100% duurzaam makkelijker wordt gemaakt:

Kostprijs van warmte

Warmte gedurende de warmtepiekvraag in de winter maanden waarin warmte schaars is, heeft dezelfde prijs als warmte gedurende de zomermaanden, terwijl er dan een overschot is. Dit geeft geen stimulans voor opslag.

Gas is relatief goedkoop

Er is onvoldoende stimulans voor warmteopslag vanuit de huidige beprijzing en subsidies. Het inzetten van aardgas biedt binnen de huidige marktsituatie veelal de meeste flexibiliteit tegen de laagste kosten.

Subsidieregelingen

De stap van innovatie naar implementatie van warmteopslag is groot en er treedt vertraging op in de opschaling van warmteopslag. Beperkend voor de markt zijn ook de cofinancieringseisen (ESNL, 2023), omdat de investering in de miljoenen kan lopen. De ontwikkeling van warmteopslagssystemen wordt onvoldoende financieel gestimuleerd.

Salderingsregeling

De salderingsregeling belemmert grootschalige uitrol van warmteopslag op woningniveau. Momenteel is het goedkoper te investeren in elektrische oplossingen dan in duurzame warmteopslag voorzieningen.

Business cases

De kosten van verschillende vormen van seizoensopslag en korte-termijnopslag moeten nog worden geoptimaliseerd. Voor technieken die nog geen renderende businesscase hebben zullen meer demonstraties inzicht geven in hoe deze businesscases geoptimaliseerd kunnen worden.

**EIA regeling beperkt tot buffervat**

Bij de EIA is alleen warmteopslag in vorm van een buffervat meegenomen en geen andere vormen van (seizoens)opslag van warmte.

6.3.3 Obstaten en uitdagingen m.b.t. wet- en regelgeving warmteopslag

Een knelpunt voor warmteopslag dat genoemd wordt door de sector is het gebrek aan eenduidige regelgeving. Ook is er beperkt zicht op oplossingen en toekomstige ontwikkelingen bij meerdere soorten partijen waardoor investeringen worden belemmerd. Het is van belang dat de Rijksoverheid (EZK, IenW en BZK gezamenlijk) aandacht besteedt aan het scheppen van kaders en de maatschappelijke bewustwording bij gemeenten, omgevingsdiensten en provincies. Onderwerpen voor deze kaders zijn:

Landelijke coördinatie rondom warmteopslag

Een grote hoeveelheid partijen beoordeelt de vergunningaanvraag bij warmteopslag (gemeenten, veiligheidsdiensten, Staatsbosbeheer, etc.). Door de uiteenlopende beoordelingsprocedures bij deze partijen lopen aanvragen vertraging op. Heldere en bindende afspraken over voorwaarden bij vergunningverlening rondom warmteopslag kan vertraging tegengaan, waarbij wel altijd moet worden ingegaan op de lokale situatie van de ondergrond. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door het instellen van een landelijke Normcommissie Warmteopslag. Ook kan warmteopslag als standaard criterium bij de aanleg van nieuwe warmtenetten stimulerend werken. De centrale overheid speelt hier een belangrijke voortrekkersrol.

Juridisch kader voor hoge en midden temperatuuropslag

Warmteopslag in ondiepe aquifers (tot 500 meter) met een temperatuur hoger dan 25 graden Celsius is op grond van de Waterwet op het moment alleen toegestaan voor pilotprojecten, zoals het HTO project bij Middenmeer. Voor projecten in dieper gelegen aquifers geldt nu de Mijnbouwwet, met andere vergunnings-eisen dan de Waterwet. Om warmteopslag verantwoord op te schalen zal er een solide regelgevend en beleidskader moeten komen.

Overigens geldt ook voor WKO en gesloten systemen voor WKO dat het kader verbetering behoeft. Daar gaat het vooral over het beschermen van drinkwatervoorraden, in combinatie met kansen voor het gebruik van de bodem voor WKO.

Bewustwording en ruimtelijke ordening

Ondergrondse ruimte is schaars. Om te zorgen dat de opschaling van warmteopslag niet vastloopt op een gebrek aan ondergrondse ruimte is een ondergrondse ruimtelijke planning nodig. Daarin moeten huidige en toekomstige ruimteclaims van verschillende belangen (warmteopslag maar bijvoorbeeld ook drinkwater, of verschillende percelen met warmte- en koudeopslag) tegen elkaar afgewogen worden.

Warmteopslag is nog onvoldoende bekend bij gemeentes. Het heeft daarmee een beperkte tot geen plaats in de transitievisies warmte en de ruimtelijke ordening. Hierdoor behandelt iedere gemeente een aanvraag voor warmteopslag op haar eigen manier en is het tijdspad voor een wijziging van het bestemmingsplan erg lang. Ondersteuning van ambtenaren (en andere stakeholders) creëert bewustwording en zet warmteopslag op de agenda. Belangrijk onderdeel van die ondersteuning is een handreiking hoe de regionale overheden om kunnen gaan met seizoensopslag van warmte.

Naast bewustwording bij gemeentes is maatschappelijke acceptie van belang. Door de maatschappij bewust te maken van de kansen, de in acht te nemen veiligheidsaspecten en bekend te worden met de reeds aanwezige projecten, kan er meer maatschappelijke acceptie ontstaan.

Beleidskader financiering warmteopslag

Voor warmteopslag is in Nederland beperkt subsidie beschikbaar, het verkrijgen van EU subsidies is een tijdrovend proces en nationale subsidies worden soms door Europese staatssteunregels geblokkeerd. Daarom is het wenselijk om een beleidskader uit te werken om warmteopslag te stimuleren. Dit kan bijvoorbeeld in de vorm van een investeringssubsidie voor kleinschalige warmtebuffers of het bundelen van individuele subsidies zodat een collectieve aanvraag voor warmteopslag mogelijk wordt. Ook kan onder-



zocht worden of een garantie-instrument voor het geologisch risico voor seizoensopslag in de ondergrond interessant is.

Warmteopslag in de energieprestatienormering van gebouwen

De huidige energieprestatieberekening voor gebouwen (de NTA 8800) waardeert warmteopslag niet, omdat op jaarbasis productie en gebruik van energie verrekend worden. Dit geldt zowel voor elektrische opslag als warmteopslag. Voor warmtenetten die leveren aan een gebouw is er wel een waardering van warmteopslag, omdat met warmteopslag de inzet van piekketels beperkt kan worden, of er meer duurzame energie ingezet kan worden.

6.3.4 Technische en organisatorische obstakels en uitdagingen warmteopslag

Prioriteiten voor technische verbeteringen en het oplossen van technische knelpunten omvatten onder andere de volgende punten:

Innovatie is nog (voor veel warmteopslag technieken) nodig

Grootschalige warmteopslag bij warmtenetten (seizoensopslag) is een techniek die nog weinig in de praktijk wordt toegepast. De techniek is de pilot fase voorbij (bijv. HEATSTORE, WarmingUP), maar mist nog opschaling en toepassing. Innovaties zullen bij deze relatief jonge technologie waarschijnlijk leiden tot kostenreducties en verbreding van toepassingsmogelijkheden.

Voor ondergrondse seizoensopslag zijn nog verbeteringen wenselijk op de thema's: betere en goedkopere methoden om de opbouw en doorlatendheid van de ondergrond in te schatten, methoden om de heterogeniteit van het reservoir in te schatten en ermee om te gaan, productietechnieken die minder last hebben van 'fines', aankorsting en verstopping, veiligheid omstortingsmaterialen, efficiënt boren etc.

In Denemarken zijn er al meerdere kuil warmteopslag demonstraties gerealiseerd. Deze zullen echter aangepast moeten worden voor Nederlands gebruik. Zo zijn er een designs met minder ruimtebeslag nodig en moeten er innovaties plaatsvinden voor de afdichting en het voorkomen van regenaccumulatie op de afdekking.

Industriële warmteopslagsystemen zijn nodig voor een brede temperatuurrange voor verschillende capaciteiten. Stimuleren van innovatie op dit gebied is zinvol. (EERA, 2023)

Verschuiven van korte-termijn warmteopslag technieken kunnen nog worden doorontwikkeld, zoals TCM (TRL 5-7), vaste stoffen zoals beton, steen (TRL 6-7) en PCMs (TRL 6-9).

Meer kennis nodig over de integratie van warmteopslag in diverse sectoren

Innovaties zijn gewenst, gericht op het ontwikkelen van concepten om optimaal te kunnen inspelen op dit toekomstig energiesysteem met de integratie van warmteopslag in diverse sectoren (gebouwde omgeving, industrie, glastuinbouw).

Opschaling is nodig voor de uitrol van meer warmteopslag installaties. Dit leidt tot kostprijzdaling en leereffecten die een verbeterde businesscase opleveren en zorgt ervoor dat er meer maatschappelijk draagvlak gecreëerd wordt.

Kennis over de ondergrond moet breder gedeeld worden

De Nederlandse ondergrond is zeer geschikt voor ondergrondse warmteopslag. Er zijn nog 'witte vlekken' waar kennis van de ondergrond tussen de 200 en 500 meter diepte nog ontwikkeld moet worden en beter worden gedeeld met de relevante partijen.

Het is de vraag of de beschikbare kennis voldoende toegankelijk is voor alle partijen. Kennisuitwisseling van nieuwe technologieën of verbeteringen van bestaande technologieën brengt versnelling in de toepassing van de techniek.



Integratie in warmtenetten

Algoritmes om op het optimale moment aan en uit te schakelen, o.b.v. veel input (weersverwachting, energievraagverwachting, tariefverwachting, congestie) moeten worden ontwikkeld. Er zijn veel partijen mee bezig, maar koppeling en data-uitwisseling is kritisch om een schaal en impact te bereiken om dit echt rendabel en relevant te maken.

Bestaande bouw

Afhankelijk van lokale randvoorwaarden en de temperatuurniveaus van beschikbare duurzame bronnen, is het mogelijk nodig om de afgiftetemperatuur van verwarmingssystemen in bestaande woningen en gebouwen omlaag te brengen, door bijvoorbeeld isolatie of een laag-temperatuur afgiftesysteem.

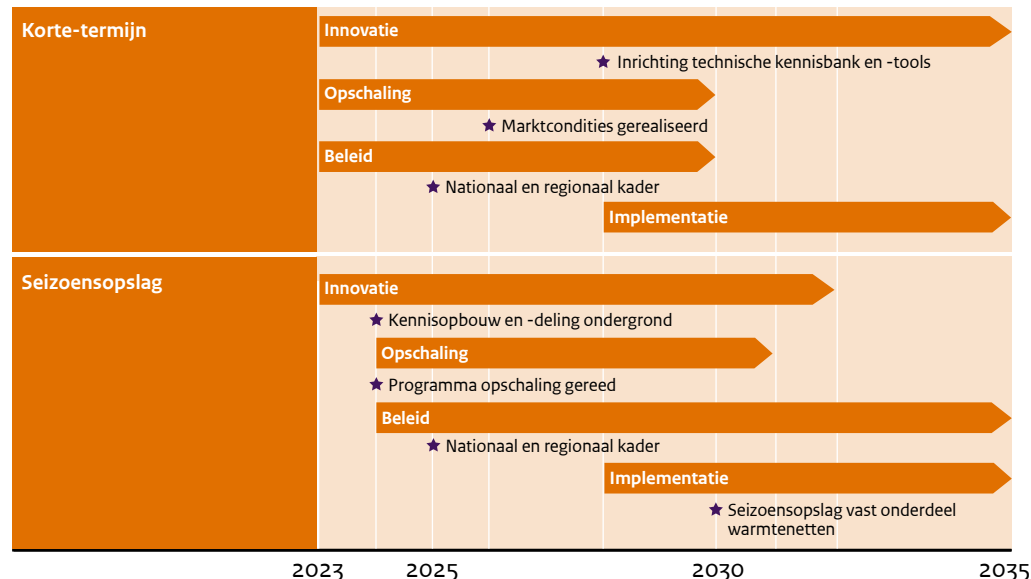
Stedelijke inpassing

Ruimtebeslag is een uitdaging binnen hoog stedelijke gebieden (CE Delft, 2023). In of nabij de gebouwde omgeving zijn grote opslagsystemen (voornamelijk kuil- en tank warmteopslag) soms moeilijk in te passen, maar ook ondergronds neemt de drukte toe voor aquifer systemen en gesloten bodemlussen. Duurzaam gebruik van de ondergrond is een belangrijke voorwaarde voor seizoensopslag.

6.4 Benodigde acties en mijlpalen

6.4.1 Mijlpalen warmteopslag

Figuur 14 Overzicht mijlpalen warmteopslag tot aan 2035



Algemeen wensbeeld: Een integraal energiesysteem waarbij verschillende duurzame bronnen, warmtenet, afnemers en opslagmogelijkheden op een slimme manier gecombineerd worden, en waarbij bronnen van restwarmte en bronnen van duurzame (zomer)warmte kunnen worden aangewend om de winterpiek in warmtevraag te voorzien. Waarbij daarnaast ook elektriciteitsaanbod waar nuttig wordt omgezet in warmte voor de warmtevraag nu of straks. Zoek de passende opslag bij de passende situatie ongeacht of dit warmte, moleculen of elektriciteit opslag is.

Het wensbeeld voor seizoensopslag en korte-termijn-opslag is verschillend. Zo is het wensbeeld bij seizoensopslag dat deze techniek standaard geïntegreerd wordt in alle warmtenetten. Voor korte-termijnopslag geldt dat deze een steeds belangrijkere rol gaat spelen voor het leveren van flexibiliteit via Power-to-Heat. Zeker voor de geëlektrificeerde industrie, maar ook voor de andere sectoren zoals de gebouwde omgeving en glastuinbouw.



6.4.2 Benodigde acties tot 2035 warmteopslag

In onderstaande tabel zijn de acties omschreven die nodig zijn voor het bevorderen van warmteopslag en voor 2035 moeten worden uitgevoerd.

Tabel 7 Actie agenda warmteopslag

Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
Beleidskader: welk beleid en regelgeving is nodig?		
51. Visie ontwikkelen voor warmteopslag in het energiesysteem	Een beeld bij het potentieel en rol van warmteopslag in het toekomstige energiesysteem ontbreekt. Meer inzicht warmteopslag businesscases, potentieel, ook in relatie tot elektriciteit en moleculen. Businesscase opdracht loopt (TNO) om de businesscases te vergelijken tussen alle drie (3) de stromen.	EZK, middels het nationaal plan energiesysteem (NPE), Q2-2023
52. Visie ontwikkelen voor warmteopslag (seizoensopslag) in het ruimtelijke systeem	Inzicht in het potentieel en rol van seizoensopslag in de warmte-transitie in relatie tot de ondergrondse gebruiksmogelijkheden; (meervoudig ruimtegebruik; andere gebruikers van de ruimte in de ondergrond en de fysieke kenmerken van de ondergrond (risico's van aantasting van bodem en grondwaterkwaliteit)). Dit in relatie tot het Nationaal Programma Bodem en ondergrond (IenW) en andere Rijksprogramma's die betrekking hebben op bodem en ondergrond.	IenW/RWS en EZK/RVO, 2024
53. Opstellen handreiking voor gemeenten seizoensopslag	De handreiking seizoensopslag voor gemeenten wordt gericht op het voorzien in de behoefte aan technische kennis over seizoensopslag en aan ondersteunende informatie voor de rol van de gemeente. De handreiking zal worden opgesteld in de vorm van een website die actueel wordt gehouden. De handreiking wordt gericht op technische kennis over seizoensopslag en zal ondersteunende informatie voor de rol van de gemeente bieden.	RVO, 2024
54. Opstellen handreiking voor de industrie voor korte-termijnsopslag warmte	Legt de relatie met restwarmte en het ophaalrecht onder de nieuwe Wet collectieve warmtevoorziening (Wcw).	RVO en EZK, Q4-2023
55. Onderzoek naar mogelijke aanpassing energieprestatienormering van gebouwen (NTA 8800)	De berekeningsmethode voor de energieprestatie (NTA 8800) kent nu geen waardering toe aan opslag, onderzoek moet wenselijkheid en uitvoerbaarheid aangeven.	BZK, EZK en RVO, Onderzoek in 2023, voorstel in 2024, implementatie tegelijk met de update van de EPBD
56. Onderzoeken hoe de SDE++ verduurzaming midden- en pieklast warmtenetten kan stimuleren	Het onderzoeken van het diversifiëren van de SDE++ naar vollast-uren.	EZK/RVO, 2024
57. Verkennen of huidige 'price-cap mechanisme' ten behoeve van duurzaamheid e-boiler aangepast moet worden	Het huidige 'price-cap mechanisme' bepaalt de mate van duurzaamheid van e-boilers. Emissies van elektriciteit op kwartier- of uurbasis, sluiten vermoedelijk beter aan bij de werkelijke verduurzaming	EZK/RVO, 2024
58. Evalueren van mogelijkheden tot financiering voor seizoensopslag warmte	Voor warmteopslag is in Nederland beperkt subsidie beschikbaar, het verkrijgen van EU subsidies is een tijdrovend proces en nationale subsidies worden soms door Europese staatssteunregels geblokkeerd. Daarom is het wenselijk om een beleidskader uit te werken om warmteopslag te stimuleren. Een evaluatie van bestaande en instrumenten is de eerste stap.	EZK/RVO, 2024
59. Verkennen noodzaak van subsidies en/of mogelijkheden tot financiering van korte-termijn warmteopslag	E-boiler wordt al gesubsidieerd uit SDE++. Bekeken moet worden of hier aanvullingen bij nodig zijn en of er nog andere instrumenten mogelijk zijn.	EZK/RVO, 2024
60. Stimuleren van het slim aansturen van (hybride) warmtepompen	Maatregelen verkennen en uitwerken. Bijv. flexibele prijs elektriciteit, normen voor aansturing, promotie, etc.	EZK, BZK en RVO, 2024



Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
61. Verbeteren van kennisdeling over systeemtechnieken en/of innovaties met actoren	Diverse (integrale) initiatieven voor het afstemmen van kennis-overdracht, zodat een zo breed mogelijke doelgroep wordt bereikt, waaronder decentrale overheden, industrie, warmtebedrijven en toeleveranciers.	De sector zelf, RVO en TKI Urban Energy – Doorlopende actie
62. Maken van een plan van aanpak voor het professionaliseren en organiseren van de sector	Voor het opschalen van de toepassing van warmteopslag heeft ESNL de werkgroep warmteopslag geïnitieerd, die minimaal 4 keer per jaar bijeenkomt. De werkgroep bestaat uit ontwikkelaars van warmte-opslagsystemen, financiers, netbeheerders en kennisinstellingen. De eerste stap is het definiëren van de gewenste professionalisering en het maken van een plan van aanpak. EZK zal betrokken worden bij deze eerste stap.	ESNL, Q4-2023
63. Gezamenlijk inzetten op Europees niveau m.b.t. innovatieve projecten en kennisdeling in Nederland	Het maken van een gezamenlijk plan van aanpak om in te zetten op innovaties, calls en de resultaten van innovatieve projecten in Europa / internationaal (bijv. de TCP's onder het IEA en het CETP) en het delen van deze kennis in Nederland waardoor meer wordt bereikt in minder tijd	RVO i.s.m. TKI Urban Energy; 2024
64. Uitbreiden energiemodellen met warmte en warmteopslag	Scenario's van het toekomstig energiesysteem leggen vaak de nadruk op elektriciteit en moleculen, maar doen nog onvoldoende recht aan de mogelijke rol van (conversie naar) warmte en warmteopslag. De rekenmodellen die gebruikt worden voor beleidsvorming dienen tijdsafhankelijkheid op alle niveaus meenemen (van uren tot seizoenen) zodat warmteopslag daarin een betere plek krijgt. Er wordt een verkenning gestart om de probleemstelling scherper te krijgen en (inter)nationale vervolgacties en noodzakelijke aanpassingen van het modelinstrumentarium te kunnen opstarten.	EZK/RVO, 2024
Veiligheidsaspecten: hoe is de veiligheid gewaarborgd?		
65. Kader beleid- en regelgeving voor opschaling seizoensopslag om opschaling voor verantwoord gebruik mogelijk te maken (incl afwegingskader)	Kader schetsen voor opschaling van seizoensopslag (HTO/MTO) binnen een set randvoorwaarden voor de ondergrondse ruimte. Dit kader maakt onderdeel uit van een breed kader voor afweging van het ondergronds ruimtegebruik. Dit in het kader van het Programma Bodem en Ondergrond van IenW. Aandachtspunten voor seizoensopslag zijn de ruimtelijke ordening (boven- en ondergrond); meervoudig ruimtegebruik; de aansluiting van de Waterwet op de Mijnbouwwet en het inrichten van een solide toezicht regime op decentraal niveau.	IenW/RWS en EZK/RVO, 2025
Innovatie: welke innovaties zijn nodig?		
66. Analyseren innovatie-instrumentarium voor seizoensopslag warmte	Analyseren of er voldoende instrumenten zijn voor seizoensopslag warmtetechnieken op alle TRL-niveaus, welke ruimte de steunkaders bieden, en aan de hand daarvan aanpassingen in het innovatie-instrumentarium voorstellen.	RVO en EZK, Q4-2023
67. Innovatie-instrumentarium inzetten en specifiek maken voor seizoensopslag warmte	Inzet van onder andere de DEI / HER, WarmingUP GOO en het Vroege Fase Opschalings-instrumentarium. Dit ter ondersteuning van het toekomstbeeld van 50 midden- en hoge-temperatuur seizoensopslagen in 2030.	RVO en EZK, doorlopend (te evalueren in 2030)
68. Analyseren innovatie-instrumentarium voor korte-termijn warmteopslag	Analyseren of er voldoende instrumenten zijn voor korte-termijn warmteopslagstechnieken op alle TRL-niveaus, welke ruimte de steunkaders bieden, en aan de hand daarvan aanpassingen in het innovatie-instrumentarium doen.	RVO en EZK, Q4-2023 (analyse) en Q2-2025 (aanpassingen)
69. Verbeteren van kennisdeling van en vergroten kennis over de ondergrond voor dieptes tot 500m	Maken van een plan van aanpak om de verschillende bronnen van kennis over de ondergrond tot de 500 meter bij elkaar te brengen; die kennis beter te ontsluiten voor belanghebbenden en daar waar nodig deze kennis te vergroten. Dit mede in het kader van het Nationaal Programma Bodem en Ondergrond en andere Rijksprogramma's die betrekking hebben op bodem en ondergrond.	IenW/RWS en EZK/RVO, 2024



Actie	Omschrijving	Actiehouder en deadline
70. Kennis vergroten over de ruimtevraag t.b.v. ruimtelijke inpassing WKO's, HTO en MTO	De ruimtelijke inpassing van WKO's en HTO en MTO (seizoensopslag) heeft impact op bodemkwaliteit, grondwaterkwaliteit, andere ondergrondse functies en schaarse ondergrondse ruimte. Met de aanbevelingen van de ambtelijke Studiegroep Grondwater aan de minister van Infrastructuur en Waterstaat is een start en deze wordt onder andere voortgezet in het Nationaal Programma Bodem en Ondergrond (IenW).	IenW/RWS en EZK/RVO, doorlopend (te evalueren in 2030)
Maatschappelijke acceptatie: hoe worden de belangen van burgers gewaarborgd?		
71. Niet van toepassing	Geen acties gedefinieerd	
Maakindustrie: hoe kan het verdienvermogen van Nederland worden vergroot?		
72. Niet van toepassing	Geen acties gedefinieerd	
Human capital agenda: wie voert de projecten uit en wat zijn de kansen m.b.t. arbeidskrachten?		
73. Niet van toepassing	Zie paragraaf 2.5.	

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1 Energieopslag in het algemeen

Energieopslag (in verschillende vormen) zal cruciaal zijn

Energieopslag speelt al geruime tijd een cruciale rol in ons energiesysteem en zal dat ook in de toekomst blijven doen. De Routekaart Energieopslag stelt dat zowel elektriciteits-, moleculen- als warmteopslag nodig (zullen) zijn in ons energiesysteem. Ten eerste omdat ze vraag en aanbod binnen de op zichzelf staande energieketens bij elkaar brengen. Zo kan elektriciteitsopslag zorgen voor meer opwek van wind- en zonne-energie en is warmteopslag cruciaal om gebruik te maken het aanbod van geo- en zonthermie. Ten tweede omdat elektriciteits-, moleculen- als warmteopslag elkaar uitstekend en noodzakelijk aanvullen in termen van vermogen en opslagduur (systeemintegratie c.q. uitwisseling tussen de ketens). Voor korte-termijn opslag zijn met name verschillende vormen van elektriciteitsopslag geschikt, zoals batterijen, CAES (persluchtinstallaties), LAES (vloeibare luchttopslag) of valmeren. Warmteopslag, bijvoorbeeld in buffer-vaten of ondergronds, is goed geschikt om energie voor de middellange en lange termijn op te slaan. Ten slotte is moleculenopslag, bijvoorbeeld in de vorm van waterstof en waterstofderivaten of biograndstoffen (groen gas, bio-ethanol), goed geschikt om grote hoeveelheden energie voor de lange termijn op te slaan.

Behalve dat elektriciteits-, moleculen- als warmteopslag elkaar moeten aanvullen, zal er ook sprake van (systeem)integratie moeten zijn, om optimaal gebruik te maken van aanvullende conversietechnieken, zoals Power-to-Heat en Power-to-Gas.

Marktwaaarde energieopslag komt niet altijd overeen met maatschappelijke waarde

Er valt op verschillende manieren geld te verdienen met het leveren van energieopslag (diensten). In de Routekaart Energieopslag staan verschillende voorbeelden omschreven van markten waarop bedrijven dit kunnen doen. In sommige gevallen komt de marktwaaarde van energieopslag echter niet overeen met de maatschappelijke waarde, wat resulteert in onwenselijke situaties. Een voorbeeld hiervan is de huidige maximale vergoeding op de congestiemarkt (van €1,02 per MWh). Deze vergoeding is een compensatie voor gemiste inkomsten en dusdanig laag dat er voor bedrijven geen verdienmodel is, terwijl congestiemanagement wel een belangrijk (en duur) maatschappelijk probleem kan oplossen. Een andere functie die financieel niet aantrekkelijk genoeg is voor marktpartijen is het uitgesteld invoeden van door zonneparken opgewekte elektriciteit. Op de huidige markt is er voor batterijen bij zonneparken veel meer te verdienen door te handelen op balanceringsmarkten en is arbitrage niet rendabel. In de Voorjaarsnota 2023 is een reservering van € 416,6 mln. gemaakt om de functie van uitgesteld invoeden te stimuleren zodat er extra hernieuwbare projecten kunnen worden aangesloten, curtailment wordt verminderd en daarmee CO₂ wordt gereduceerd om de doelstellingen voor 2030 in zicht te houden.

Onderzoeken moeten de (grootste) gaten tussen markt- en maatschappelijke waarde kwantificeren, zodat energieopslag in alle functies kan renderen waar overige flexibiliteitsopties minder geschikt zijn. Voor congestiemanagement betekent bijvoorbeeld dit dat moet worden berekend wat de opportunity costs zijn voor bedrijven die geen nieuwe of grotere netaansluiting kunnen krijgen.

Ruimtelijke inpassing van energieopslag vraagt om actie

Alle vormen van energieopslag hebben ruimte nodig, die in Nederland niet altijd (ruim) voorradig is. In sommige gevallen concurreren energieopslag oplossingen met elkaar of met andere activiteiten om schaarse ruimte. Dit geldt voor bovengrondse faciliteiten en in toenemende mate ook voor ondergrondse

faciliteiten. Sturing is noodzakelijk t.a.v. de meest wenselijke locaties voor energieopslag, in boven- en ondergrond. Voorbeelden hiervan zijn: ondergrondse waterstofopslag versus CAES (persluchtinstallaties), ruimte benodigd voor ondergrondse warmteopslag versus andere actoren die dezelfde ondergrond willen benutten en ruimtelijke inpassing van (bovengrondse) grootschalige stand-alone batterijen.

Subsidiesystematiek op basis van CO₂ besparing is onwenselijk voor energieopslag

De grondslag voor subsidies in de energietransitie is de besparing van CO₂. Bij de inpassing van energieopslag gaat het vaak om de introductie van een nieuw systeem/functie, waarbij niet direct sprake is van verlaagde CO₂-uitstoot. Dit sluit het verkrijgen van subsidie vaak uit. Als startpunt is dit minder gunstig voor energieopslag, terwijl energieopslag wel maatschappelijke waarde heeft. Om hier recht aan te doen kan nieuwe subsidiesystematiek voor flexibiliteit worden overwogen gebaseerd op leveringszekerheid i.p.v. op CO₂-besparing.

Technische ontwikkelingen zijn nog nodig

Omdat de aard en huidige staat van technische ontwikkelingen tussen elektriciteits-, moleculen- en warmteopslag wezenlijk verschilt, is het van cruciaal belang zo te sturen dat enerzijds de verschillende technieken uiteindelijk op een vergelijkbaar niveau komen en anderzijds conversie tussen technieken (bijvoorbeeld van elektriciteit naar warmte) effectief kan worden benut.

Bij elektriciteitsopslag bestaat vooral vraag naar technieken voor langere termijn energieopslag en naar technieken met minder maatschappelijke nadelen dan de momenteel meest gebruikte Li-ion batterijen.

Voor moleculenopslag is innovatie nodig om de productiekosten van de energiedragers (voor bovengrondse moleculenopslag) omlaag te brengen. Op lange termijn zal innovatie nodig zijn om technieken en methoden te ontwikkelen die moleculen kunnen opslaan met een hogere energiedichtheid per volume.

Voor warmteopslag is innovatie gevraagd voor thermochemische opslag en seizoensopslag van warmte: naar technologieën die warmte efficiënt op hogere temperatuur kunnen opslaan in vaste stoffen (in bijvoorbeeld beton of steen), technologieën die heel compact zijn en gebaseerd op faseovergangen (PCM), en technologieën die zowel compact zijn alsook hun warmte theoretisch oneindig kunnen vasthouden met behulp van chemische reacties (TCM).

Er zijn veel kansen voor het Nederlandse verdienvermogen

De ontwikkeling van energieopslag technieken biedt een groot potentieel voor het Nederlandse verdienvermogen. Alleen al voor elektriciteitsopslag meer dan 3 miljard USD in 2030, onder meer in de sector van zware elektrische voertuigen en in de ontwikkeling van vastestofbatterijen. Daarnaast is Nederland wereldwijd koploper met WKO-systemen en kan deze positie in de toekomst versterken naarmate meer kennis en ervaring wordt opgedaan. De verwachting is dat de groene waterstofsector tienduizenden banen kan opleveren richting 2050 en dat in de toekomst kennis en expertise op dit gebied geëxporteerd kunnen worden.

Het is voor Nederland belangrijk om in te zetten op goede recycling, zodat schaarse materialen uit bijv. batterijen, elektrolyzers en brandstofcellen hergebruikt kunnen worden. Ook is het van belang gebruik te maken van investeringen van de EU, zoals Innovation Fund, PCI-status en Connecting Energy Facility (CEF) omdat daar in potentie grote subsidies mee op te halen zijn.

Om doelen te stellen, moeten aanbod en vraag eerst gekwantificeerd worden

Een cruciale en onzekere factor voor beleidsontwikkeling voor de lange termijn (2035-2050) is de toekomstige vraag naar de verschillende vormen van energie, bijvoorbeeld hoeveel elektriciteit benodigd zal zijn voor de industrie, of hoeveel van welke energiebron de gebouwde omgeving gaat gebruiken voor de warmtevoorziening. Op basis hiervan kan ook een beter beeld ontstaan van hoeveel energieopslag er in welke vorm en voor welke toepassing er nodig is. Met het NPE wordt geprobeerd hier een zo scherp mogelijk beeld van te krijgen. Hiermee kan ook beter ingeschat worden of huidige ontwikkelingen in energieopslag kunnen leiden tot de gewenste eindsituatie. Waar dat niet het geval blijkt, kan het stellen van

kwantitatieve subdoelen worden overwogen om richting te geven aan marktinvesteringen en beleid. Voorbeelden van mogelijke subdoelen kunnen zijn: het benodigde vermogen elektriciteitsopslag, het aantal benodigde zoutcavernes voor waterstofopslag of het aantal gewenste midden- en hoge-temperatuur seizoensopslagen van warmte. De mogelijk- en wenselijkheden van de andere oplossingen moeten hierbij scherp in de gaten worden gehouden: energieopslag is niet de enige oplossing voor het volledige flexibiliteitsvraagstuk.

In de referentielanden wordt momenteel geen gebruik gemaakt van kwantitatieve doelen.

Energiemodellen moeten worden uitgebreid

Huidige scenariomodellen zijn niet goed geschikt om de verwachte marktpotentie van opslag te laten zien. De meeste scenariostudies rekenen enkel met prijsverschillen, en niet met andere inkomstenstromen zoals balanceringsdiensten of congestieverlichting. Dit is het meest knellend voor elektriciteitsopslag, maar ook relevant voor warmteopslag. De Rijksoverheid moet verkennen hoe dit aandachtspunt verbeterd kan worden, bij voorkeur ook in internationaal verband zodat er kan worden geprofiteerd van kennisdeling. Huidige modellen faciliteren geen goede voorspelling van ontwikkeling in opslag: De huidige modellen zijn niet geschikt om een betrouwbaar antwoord te geven op de vraag waar het vermogen van 4 of 5GW van om en nabij 5000 per jaar vandaan moet komen.

Scenario's van het toekomstig energiesysteem leggen vaak nadruk op elektriciteit en moleculen, maar doen nog onvoldoende doen recht aan de mogelijke rol van (conversie naar) warmte en warmteopslag. De rekenmodellen die gebruikt worden voor beleidsvorming dienen tijdsafhankelijkheid op alle niveaus meenemen (van uren tot seizoenen) zodat warmteopslag daarin een betere plek krijgt. Modellen van het toekomstig energiesysteem nemen de potentie van warmtenetten en warmteopslag vaak onvoldoende mee. Het is van belang om energiemodellen uit te breiden met warmte en warmteopslag, zodat scenario's voor ons toekomstig energiesysteem ook voldoende recht doen aan de rol die warmtenetten en warmteopslag kunnen vervullen.

Meer communicatie en maatschappelijke dialoog over energieopslag is nodig

De Routekaart Energieopslag is een middel om het belang van (flexibiliteit en) opslag in het energiesysteem (van de toekomst) duidelijk te maken en inzichtelijk te maken waar nog meer actie nodig is. Gezien de veelheid aan actoren in energieopslag en de noodzaak van breed draagvlak, is het van belang een goede communicatie en dialoog te hanteren met verschillende actor(groep)en. De Routekaart Energieopslag beoogt geen punt, maar een komma te zijn met uitgangspunten voor de maatschappelijke dialoog. Grootschalige energieopslag projecten, zoals Giga-batterijen en ondergrondse opslagprojecten verdienen extra aandacht i.v.m. de impact die ze in de omgeving kunnen hebben.

7.2 Elektriciteitsopslag tot 2035

Alle acties voor elektriciteitsopslag zijn te vinden in paragraaf 4.4.2. Hieronder zijn een aantal acties uitgelicht.

De wenselijkheid van thuis- en buurtbatterijen moet verder worden onderzocht

Minister Jetten heeft – n.a.v. de motie Erkens⁴⁰ – toegezegd om een onderzoek te doen naar de wenselijkheid van thuis- en buurtbatterijen en mogelijk beleid om knelpunten op te lossen. De resultaten van dat onderzoek worden verwacht in Q3 2023.

Vooralsnog lijkt de inzet van thuis- en buurtbatterijen slechts wenselijk onder voorwaarden.

⁴⁰ Kamerstuk 35594-38, vergaderjaar 2022–2023

Thuisbatterijen zijn in Nederland op dit moment geen rendabele investering voor huishoudens met zonnepanelen. Er is nog geen prijsprikkel om eigen zonnestroom direct te gebruiken of op te slaan voor uitgestelde levering, omdat met de salderingsregeling op elk moment terug geleverd kan worden voor hetzelfde tarief als waarvoor wordt ingekocht. Met de beoogde afbouw van de salderingsregeling (100% in 2024, 64% in 2025 naar 0% in 2031) komt die prijsprikkel er wel. Of thuisbatterijen zonder de salderingsregeling wel rendabel worden, hangt af van de hoogte van de elektriciteitsprijs, de volatiliteit van elektriciteitsprijzen gedurende de dag en de kostenontwikkeling van thuisbatterijen. Met de huidige technieken hebben thuisbatterijen momenteel te weinig capaciteit om in de zomer alle elektriciteit van eigen zonnepanelen op te slaan. Alhoewel dat nu nog nauwelijks mogelijk is, lijkt het inzetten van de accu's van elektrische auto's (EV's) in de toekomst kansrijker, omdat deze meer capaciteit hebben en omdat dan meer gebruik gemaakt wordt van de batterij (en daarmee de relatief dure grondstoffen die nodig zijn). Alleen als thuisbatterijen worden ingezet om zelf opgewekte zonnestroom niet (of later) aan het net terug te leveren zullen ze opweknetcongestie verminderen. Voorkomen moet echter worden dat thuisbatterijen ook congestie veroorzaken, bijvoorbeeld als plaatselijk, meerdere huishoudens zonder zonnepanelen en met een dynamisch energiecontract handelen op de day-aheadmarkt. In dit geval zal de thuisbatterij veel vermogen vragen bij lage elektriciteitsprijzen en veel vermogen leveren bij hoge elektriciteitsprijzen.

Voor collectieve batterijen, denk aan buurtbatterijen of batterijen van samenwerkende bedrijven, zijn er meer mogelijkheden dan voor thuisbatterijen. Collectieve batterijen kunnen een belangrijke rol spelen in het beperken van de vraag naar transportcapaciteit. Met name in combinatie met energiemangement op bedrijventerreinen en in wijken. Vergelijkbaar met thuisbatterijen, kleven er nadelen aan collectieve batterijen: collectieve batterijen zijn op dit moment nog relatief duur vergeleken met netverzwaring en lossen niet alle problemen op. Zo kan een collectieve batterij niet alle pieken afvangen bij grootschalige uitrol van zon op dak en biedt het niet in alle gevallen de ideale oplossing voor netcongestie. Waar de netcapaciteit al zeer groot is of netverzwaring onvermijdelijk lijkt, zijn de investeringskosten van netverzwaring lager dan van collectieve batterijen. De combinatie van een collectieve batterij en gebruikers met verschillende vraagprofielen is zeer interessant, bijvoorbeeld in energy hubs of laadpleinen voor elektrische auto's. Het is hierbij van belang dat gebruikers afspraken kunnen (en mogen) maken over het gezamenlijk gebruik van de buurtbatterij. Een collectieve batterij is daarnaast te overwegen als het niet mogelijk is lokaal aanwezige flexibiliteit (van bijvoorbeeld laden van elektrische auto's op momenten van stroomoverschotten) om pieken in elektriciteitstransport en/of bijbehorende netverzwaringen te voorkomen. Virtuele collectieve batterijen, waar de gezamenlijke gebruikers elkaar real-time op de hoogte houden van hun energieverbruik is een andere toepassing die verder uitgezocht moet worden. Bij de collectieve batterijen doen zich verschillende belemmeringen voor. Netbeheerders zijn beperkt in het eigenaarschap en de gebruiksmogelijkheden van een collectieve batterij. De uitsparing van netverzwarkosten (en mogelijk andere baten) worden momenteel niet toegerekend aan collectieve batterijen. Privaat eigendom van een collectieve batterij vereist bij gezamenlijk gebruik een complexere juridische constructie dan bij gebruik achter de meter. Bij een collectieve batterij is – anders dan bij een batterij achter de meter – bovendien energiebelasting verschuldigd. Dit verslechtert de businesscase. Tot slot is een combinatie van huishoudens en bedrijven momenteel lastig vanwege de consumentenbescherming van huishoudens.

De businesscase van grootschalige batterijen is nu beter dan die van thuis- en buurtbatterijen, omdat grootschalige batterijen geld kunnen verdienen met netbalanceringsdiensten van TenneT. Maar ook hierbij geldt dat voorkomen moet worden dat dit leidt tot netcongestie.

Elektrische auto's bieden enorme kansen voor de maatschappij

Met het groeien van de markt van elektrische auto's groeit het aantal batterijen dat mobiel beschikbaar is. Naar verwachting is er in 2030 tussen de 14-63 GWh *theoretisch* batterijvolume beschikbaar. Door deze accu's te koppelen aan het net, het zogenaamde Vehicle-to-Grid (V2G), ontstaan enorme kansen voor de maatschappij. Zo kan het leiden tot minder hoge investeringskosten in het elektriciteitsnet door het voorkomen van regionale congestie en het reduceren van de piekvraag en lagere CO₂-uitstoot door het reduceren van curtailment van hernieuwbare energie en het voorkomen van de inzet van grijze back-up productie. Voor huishoudens worden energiekosten lager vanwege goedkope back-up levering van elektriciteit en het optimaliseren van inkoop aan goedkope duurzame energie. Eigenaren van 'elektrische auto's kunnen

besparen op de energierekening, inkomsten genereren via het verhandelen van batterijcapaciteit en immateriële baten gerelateerd aan verduurzaming en onafhankelijkheid creëren.

Tussen 2027 en 2030 zullen autofabrikanten nieuwe modelintroducties naar verwachting geschikt maken voor V2G. Voor die tijd dienen een aantal knelpunten worden opgelost, waaronder het beperkte aantal publieke V2G laadpalen, het gebrek aan transparantie over de prijzen bij het laden en opbrengsten bij het ontladen, de onduidelijkheid over de impact van V2G op de levensduur van de batterij, en de dubbele energiebelasting die afgedragen moet worden bij het leveren van V2G-diensten aan het elektriciteitsnet. Een andere belangrijke belemmering is de beperkte capaciteit van het laagspanningsnet. Voor V2G is met de Voorjaarsnota 2023 € 403,8 mln. gereserveerd.

Grootschalige elektriciteitsopslag heeft veel potentie curtailment te verminderen

Grootschalige batterijen bij zonneparken kunnen er voor zorgen dat meer zonnepanelen kunnen worden aangesloten, zonder netverzwaring. Het gaat hier in potentie om enorme benodigde batterijvermogens en hoeveelheden zon-PV energie (volgens CE Delft 5,5 GW batterijopslag voor 7,5 GW_p zonneparken). Stimulering hiervan is wenselijk omdat het enorme kansen biedt voor de energietransitie. Het is dan echter wel cruciaal te verzekeren dat de grootschalige batterijen bij zonneparken ook daadwerkelijk ingezet worden voor uitgestelde levering; dit vereist een goed samenspel tussen de geleverde flexibiliteit voor de energiebalans en transportbalans. Deze stimulering past niet binnen de bestaande SDE++ subsidie omdat de maximale toegestane kosten van 300 euro per ton CO₂ ruim wordt overschreden. Met de Voorjaarsnota 2023 heeft het Kabinet besloten bestaande subsidieregelingen voort te zetten waarbij de verplichting wordt ingevoerd om batterijen te plaatsen bij zonneparken (met een reservering van € 416,6 mln. in MJP 2025).

Batterijen zijn nodig ter ondersteuning van het elektriciteitsnet

Balanshandhaving (ter ondersteuning elektriciteitsnet) heeft baat bij elektriciteitsopslag. TenneT verwacht ongeveer 10GW aan batterijen nodig te hebben in 2030 om de betrouwbaarheid van het hoogspanningsnet te garanderen, waarvan 9GW stand-alone op basis van het huidige kabinetsbeleid waarin in 2030 centrales geen kolen meer mogen verstoken. Ondanks een groot aantal aangevraagde aansluitingen voor batterijen in Nederland en een zeer hoog vermogen (inmiddels opgeteld meer dan 34 GW vermogen), is het niet zeker dat de gevraagde batterijen er ook daadwerkelijk komen omdat er simpelweg geen voldoende financieel aantrekkelijke markt voor bestaat. Naar verwachting komt er niet meer dan ongeveer 2GW aan stand-alone batterijen met een eigen aansluiting rendabel tot stand.

(Landelijke) Sturing is nodig om wildgroei batterijen te voorkomen

Een ander knelpunt m.b.t. het groot aantal aanvragen voor batterij-aansluitingen is dat momenteel juist provincies en met name gemeentes geconfronteerd worden met aanvragen voor het plaatsen van batterijen. Om wildgroei van batterijen te voorkomen, is sturing nodig. De Rijksoverheid kan hierbij helpen door het stellen van voorwaarden aan inzet van dergelijke batterijen. Daarnaast kan TenneT zorgen voor een lijst van preferentie locaties, op basis van (technische) netwerkanalyse en praktische criteria. Provincies en gemeentes kunnen helpen met vergunningen en – waar nodig – aankoop van grond.

Mogelijkheden elektriciteitsopslag nog niet in lijn met de behoeften

Momenteel worden voornamelijk Li-ion batterijen voor de gebruiksvormen van elektriciteitsopslag (thuis-, buurt-, grootschalig en stand-alone) gebruikt. Voor het balanceren van energievraag en -aanbod op middellange en lange termijn is Li-ion vooralsnog niet geschikt. PHS (waterkrachtcentrales), CAES (persluchtinstallaties) en LAES (vloeibare lucht opslag) zijn hiervoor wel geschikt, maar worden (nog) niet in Nederland toegepast. Ook flowbatterijen hebben veel potentie.

Het is niet realistisch dat de huidige generatie Li-ion batterijen (1-, 2-, en maximaal 4-uurs) netcongestie voor afname oplossen, omdat de opslagduur in veel gevallen te beperkt is en de financiële grens van congestiemanagement te laag is om de gemiste inkomsten te compenseren. Daarnaast hebben de momenteel gangbare Li-NMC batterijen een aantal maatschappelijke nadelen. Zo is de CO₂-uitstoot gedurende productie hoog, zijn er kritieke en geografisch geconcentreerde materialen voor nodig en bevatten ze chemische stoffen die bij onjuist gebruik kunnen zorgen voor beschadigingen of ontbranding.

Daarom is het van belang te onderzoeken hoe elektriciteitsopslag in een andere vorm dan Li-NMC batterijen – zoals PHS, CAES, LAES, flowbatterijen en nieuwe(re) technieken – in Nederland gestalte kan krijgen. In het energie-innovatiebeleid moet worden gezien of hier aanscherpingen of verbeteringen in mogelijk zijn.

7.3 Moleculenopslag tot 2035

Een groot aantal acties voor moleculenopslag zijn te vinden in paragraaf 5.4.2.

Moleculenopslag is nodig, maar kent grote uitdagingen én onzekerheden

De toekomst voor moleculenopslag kent grote uitdagingen én onzekerheden. Zowel als het gaat om het realiseren van waterstofopslag, gasopslag als het verduurzamen van strategisch opslagen van olie(producten). Verschillende acties zijn hiertoe reeds in gang gezet. Om hier mee om te gaan wordt momenteel hard gewerkt om de kennisbasis te vergroten en aan visievorming en strategie. Het is namelijk duidelijk dat moleculenopslag momenteel de enige technische optie is voor het balanceren van vraag en aanbod op middellange en lange termijn en (grotendeels) als strategische voorraad.

De toekomstige vraag naar moleculenopslag zal door een groot aantal factoren worden gestuurd, zoals de samenstelling van het energieaanbod en eindverbruik, beschikbare infrastructuur om vraag en aanbod te verbinden, technologieontwikkeling, mondiale energiemarkt ontwikkelingen en externe invloeden. De afhankelijkheid van al deze factoren maakt het toekomstbeeld onzeker. Inzicht in dit toekomstbeeld is van groot belang om tijdig te kunnen sturen op de juiste routes en investeringen om de noodzakelijke opslag infrastructuur tijdig te realiseren. Ondergrondse waterstofopslag komt in alle energiescenario's naar voren als een belangrijke en noodzakelijke technologie die met name tussen 2030 en 2050 zal opschalen in Nederland. Bij deze vorm van opslag moet er zorgvuldig worden omgegaan met de mogelijke gevolgen die het kan hebben voor de leefomgeving van bewoners. Hierbij zijn de adviezen van Parlementaire Enquête aardgaswinning Groningen (PEGA) van toepassing waarbij het borgen van het belang van de bewoners centraal moet staan. Samen met decentrale overheden en bewoners moet worden bepaald waar de volgende opslag locaties op land kunnen worden geaccommodeerd.

Voor moleculenopslag moeten keuzes (snel) worden gemaakt

Grootschalige moleculenopslag, zowel boven als ondergronds, vergt infrastructuur met lange ontwikkeltijden door vergunningstrajecten en projectontwikkeltijd. Daarom moeten snel keuzes worden gemaakt over welke activiteiten waar mogen plaatsvinden en over welke instrumenten de overheid wil inzetten om deze activiteiten te stimuleren. Waar mogelijk moet bestaande infrastructuur worden hergebruikt om onnodige vertraging te voorkomen. Dit is goed van toepassing bij bestaande olietanks in de havens die in de toekomst kunnen worden hergebruikt voor duurzame moleculenopslag. Voor grootschalige ondergrondse waterstofopslag is er een programmatische aanpak nodig voor de verdere opschaling na 2030 die ruimtelijke, financiële, maatschappelijke en marktorderingsaspecten samenbrengt. Met de Voorjaarsnota 2023 is € 125 miljoen gereserveerd om de financiële risico's van grootschalige waterstofopslag te dekken. Dit bedrag kan verdubbeld worden voor extra cavernes indien nodig.

7.4 Warmteopslag tot 2035

Een groot aantal acties voor warmteopslag zijn te vinden in paragraaf 6.4.2.

Lokale seizoenopslag van warmte is nodig voor duurzame warmtevoorziening

Om leveringszekerheid te kunnen bieden met een duurzame collectieve warmtevoorziening is lokale seizoenopslag van warmte in de toekomst noodzakelijk. Met name in de collectieve warmtevoorziening is warmteopslag een onmisbaar element om te komen tot verregaande verduurzaming. Zowel de korte-termijn variatie in warmtevraag (uren, dagen) als de langere termijn variatie (zomer/winter) is moeilijk op te vangen met een duurzame bron als geothermie of zonthermie zonder warmteopslag.

Seizoensopslag van warmte is een relatief goedkope vorm van energieopslag.

Een standaard voor seizoenopslag van warmte is zinvol in het licht van leveringszekerheid, kosten-efficiëntie en duurzaamheid van warmtenetten in combinatie met de inzet van duurzame warmtebronnen.

De diverse methoden om warmte op te slaan verschillen in omvang, temperatuur en techniek. Deze kernmerken bepalen in hoge mate de geschiktheid voor een bepaalde toepassing. De technische standaardisatie dient rekenschap te geven aan deze verschillen. Bekendheid met de belangrijkste kenmerken zal bijdragen aan een grotere inzet van warmteopslag. Dit geldt ook voor industriële toepassing van warmteopslag.

Naast een toegenomen leveringszekerheid zorgt warmteopslag ervoor dat warmtenetten en bronnen gezamenlijk kostenefficiënter en op een duurzamere wijze warmte kunnen leveren aan de klant.

Korte-termijn warmteopslag van invloed op de elektriciteitsvoorziening

Elektrificatie zal een belangrijke rol spelen in gebieden waar alleen individuele, duurzame oplossingen mogelijk zijn, maar ook in gebieden waar de elektrificatie van de industrie grootschalig zal worden uitgerold. Hierdoor zal het mitigeren van netcongestie belangrijker worden. De variatie in beschikbare duurzame elektriciteit en de netcongestie kan in deze gebieden opgevangen worden door korte-termijn opslag van warmte. Dit kan mogelijk de benodigde investeringen in netverzwaring reduceren en kan prijschommelingen van elektriciteit tegengaan.

Conversie van en naar warmteopslag speelt een belangrijke rol

Power-to-Heat met opslag (P2H+S) kan zorgen voor een merkbare impact op de verduurzaming van warmtenetten. Om rekening te kunnen houden met het actuele aanbod van duurzame elektriciteit moet de inzet van P2H+S flexibel kunnen zijn. De huidige methodiek om de duurzaamheid van P2H te bepalen kan mogelijk worden aangepast om de werkelijke CO₂-emissiereductie tot uiting te brengen.

Voor de verdere ontwikkeling van warmteopslag zijn beleidskaders nodig

Het is van belang dat de Rijksoverheid aandacht besteedt aan het scheppen van kaders en de maatschappelijke bewustwording bij provincies, gemeentes en omgevingsdiensten. Onderwerpen voor deze kaders zijn: landelijke coördinatie rondom warmteopslag, juridische kaders voor hoge en midden temperatuuropslag (voor ondiepe en dieper gelegen aquifers), bewustwording en ruimtelijke ordening, financiering voor warmteopslag en energieprestatienormering van gebouwen.

Onbekendheid van en met warmteopslag is een knelpunt voor uitrol van warmteopslag

De diverse technieken om warmte op te slaan verschillen in omvang en temperatuurniveau en vervullen daarmee een verschillende functie. Bekendheid met de kenmerken van de diverse technieken vormt een voorwaarde tot een verspreiding en vergroting van de inzet. Om de bekendheid te vergroten, zullen EZK en RVO werken aan handreikingen voor gemeentes (in het bijzonder voor seizoenopslag) en industrie (in het bijzonder voor korte-termijn warmteopslag).

De geschikte duurzame bronnen en technieken worden sterk bepaald door de lokale omstandigheden aan de bronkant, maar ook aan de vraagkant. Elektrificatie van de warmtevoorziening kan individueel plaatsvinden met warmtepompen, maar kan middels een elektroboiler en grote warmtepomp en warmteopslag ook worden ingezet in een duurzame collectieve warmtevoorziening. De flexibele inzet van deze omzetting kan bovendien een positieve bijdrage leveren in de behoefte aan flexibiliteit in de stroomvoorziening.

Meer kennis en kennisdeling nodig m.b.t. de ondergrond

Het gebruik van de ondergrond voor warmteopslag is nuttig en waardevol. Om kennis over de ondergrond tot de 500 meter bij elkaar te brengen, moet een plan van aanpak gemaakt worden, waarin niet alleen aandacht is voor kennisontwikkeling, maar ook voor kennisdeling.

7.5 Aangrijpingspunten voor beleidsontwikkeling

In het energiesysteem van de toekomst zal elektriciteit de belangrijkste energiedrager worden, zal waterstof een belangrijke systeemrol vervullen, en zal decentrale duurzame warmtevoorziening een groot deel van de warmtevraag invullen. De transport- en distributie infrastructuur en flexibiliteitsmogelijkheden zoals opslag moeten in een bijpassend tempo op die veranderingen inspelen.

Het NPE ziet toe op een meer gecoördineerde ontwikkeling van de energietransitie, waarbij de verschillende schakels in het energiesysteem zo goed mogelijk op elkaar worden afgestemd. Zo wordt in het NPE o.a. uitgewerkt wat de verwachte rol is van de verschillende vormen van flexibiliteit (incl. energieopslag) en wat de inzet van het Rijk is om deze op te schalen.

Voor energieopslag betekent dat het volgende:

- De Routekaart Energieopslag zet op een rij wat de verschillende rollen van energieopslag zijn en hoe die zich kunnen ontwikkelen.
- Het NPE beschrijft de relatie van energieopslag met andere delen van het energiesysteem (bijv. opwek, gebruikers, etc.) en kwantificeert waar mogelijk.

Energieopslag speelt een cruciale rol in het energiesysteem bij elektriciteit, moleculen en warmte. Deze routekaart bevat een analyse van de verschillende vormen van energieopslag en de verwachte ontwikkelingen in Nederland. Ook is hierbij gekeken naar de situatie in de ons omringende landen. Op basis van deze analyse wordt inzichtelijk welke aangrijpingspunten er in beleid en uitvoering zijn om de toepassing van energieopslag te verbeteren. Dan gaat het met name om:

- a. Beleid gericht op toepassing van energieopslag in de elektriciteits-, waterstof- en warmteketen;
- b. Beleid gericht op innovatie van energieopslag;
- c. Energieopslag in de leefomgeving en bijbehorende vraagstukken van veiligheid, maatschappelijk draagvlak en ruimtelijke ordening;
- d. Vraagstukken rond (circulaire toepassing van) grondstoffen voor energieopslag en geopolitieke aspecten;
- e. Samenwerking tussen overheden en andere partijen.

7.5.1 Toepassing van energieopslag in het energiesysteem

Beleid m.b.t. energieopslag moet rekening houden met de volgende zaken:

- Het beantwoorden van de vraag hoeveel energieopslag nodig zal zijn in het energiesysteem van de toekomst is niet eenvoudig, maar wel van belang om zo richting te geven aan investeringen en overheids-interventies te kunnen bepalen. Het antwoord hangt af van de flexibiliteit van de energievraag, de samenstelling van het energieaanbod en de functies waarvoor energieopslag wordt gebruikt. Elektriciteits-, moleculen- en warmteopslag vullen elkaar goed aan qua toepasbaarheid.
- De overheid maakt geen keuze voor specifieke energietechnieken, maar kan wel sturen op de eigenschappen van die technieken. De overheid maakt keuzes gebaseerd op de maatschappelijke afwegingen gebaseerd op de ontwerpcriteria. Voor een goede toepassing van energieopslag moet het hele energiesysteem in acht worden genomen. Het bevorderen van systeemdenken is daarom cruciaal. Het stimuleren van bijvoorbeeld thuisbatterijen kan zowel een positief als een negatief effect hebben op netbeheerkosten, afhankelijk van hoe de batterijen worden ingezet. Bovendien zal het stimuleren van thuisbatterijen een negatief effect hebben op de adoptie van andere vormen van energieopslag (zowel in huis als elders in het energiesysteem).
- Voor effectieve implementatie van energieopslag is onderscheid nodig tussen korte-termijnopslag en seizoensopslag.
- Transport, opslag en conversie zijn tot op bepaalde hoogte (niet volledig) uitwisselbaar. Energieopslag zal nodig zijn, toekomstvoorspellingen wijzen uit dat andere flexibeltoesluitingen niet volledig voldoen. Het is zeer onwaarschijnlijk dat NL zich op de lange termijn (2035 – 2050) volledig kan voorzien in haar energiebehoefte met alleen zelfopgewekte zonne- en windenergie.
- Energie-import door middel van moleculen lijkt de meest voor de hand liggende manier om te voorzien in de energiebehoefte die niet in NL opgewekt kan worden. Voor leveringszekerheid lijkt een combinatie van (diversificatie van) import en (seizoens)opslag ideaal.

Het blijkt dat in de huidige markt energieopslag in veel gevallen niet rendabel is, op een paar uitzonderingen na, zoals grootschalige opslag van aardgas, WKO en warmtebuffers bij WKK's van tuinders. Voor de periode tot aan 2050 zijn er meer technieken nodig en zal de opslag van aardgas hooguit een beperkte rol spelen. Batterijopslag en warmteopslag wordt nu nog weinig toegepast in relatie tot wat nodig is de komende jaren. Stimulering van meer vormen van energieopslag is wenselijk, omdat deze technieken al snel nodig zijn.

Stimulering kan via de volgende routes:

1. Via financiële stimulansen, zoals prijzen van pieklast, subsidies, capaciteitstarief, variatie in aansluitkosten etc.;
2. Verplichting via normen etc.;
3. Eventuele knelpunten voor toepassing wegnemen in o.a. regelgeving;
4. Flankerend beleid. Aanvullend op de bovenstaande maatregelen. Bijvoorbeeld voor draagvlak en ruimtelijke inpassing.

Vanwege de toenemende congestie op het net en het toenemende aandeel zonne- en windenergie in het net, zal op de lange termijn (2035 – 2050) de huidige manier van (volume gebaseerd) prijzen van energie mogelijk niet tot voldoende flexibiliteit kunnen leiden. Onderzocht zal moeten worden hoe in beprijzing meer rekening kan worden gehouden met de waarde van flexibiliteit en aansluitcapaciteit. Dit zal er toe leiden dat de vraag zich meer zal aanpassen op het aanbod en de beschikbare netcapaciteit.

7.5.2 Innovatie en opschaling versnellen

Er bestaan grote verschillen tussen de stromen elektriciteits-, moleculen- en warmteopslag en tussen technieken voor korte-termijn en seizoensopslag. Een aantal technieken zit nog in de innovatie- of demonstratiefase en kan in de toekomst een grote rol gaan spelen.

Prijsstructuren zullen zó moeten zijn dat er een market pull voor opslag komt. Dit betekent niet dat innovatie en vroege fase opschaling niet nodig zijn, maar wel dat er aandacht moet komen voor de lange-termijn prijsstructuur.

7.5.3 Energieopslag in de leefomgeving

Het aantal energieopslag-initiatieven zal de komende jaren toenemen, inclusief bijbehorende ruimtevrage en leefomgevingseffecten. Energieopslag is voor overheden, maar ook voor inwoners en gebruikers, een relatief nieuwe (ruimtelijke) functie. Voor diverse opslag-technieken zal behoefte ontstaan aan aanvullend ruimtelijk beleid. Hierbij zijn niet alleen de directe leefomgevingseffecten van belang (denk aan: veiligheid, vormgeving), maar ook de bredere effecten op het energiesysteem (denk aan: ruimtelijke omvang en efficiëntie van het totale energiesysteem).

Voor elektriciteitsopslag vraagt inpassing in de leefomgeving, waar veiligheidsvraagstukken onderdeel van uitmaken, de komende jaren meer aandacht. Zowel als het gaat om normstelling, certificering en onderzoek, als om kennis en standaardisering.

Veiligheid is een cruciale randvoorwaarde voor grootschalige moleculenopslag. Grootschalige ondergrondse opslag in zoutcavernes kan leiden tot o.a. bodemdaling. Omtrent het veilig afsluiten van cavernes is nog onvoldoende bekend, maar wordt door verschillende partijen onderzocht. Het grootschalig gebruik en de opslag van ammoniak brengt significante risico's met zich mee die goed in kaart gebracht en gemitigeerd moeten worden.

Voor warmteopslag zijn diverse technieken gebaat bij innovatie en ervaringsprojecten om te komen tot een significante opschaling. Meer kennis over de ondergrond is essentieel om seizoensopslag in de ondergrond te laten slagen. Momenteel ontbreekt een helder kader voor de ruimtelijke ordening van deze nieuwe systemen dat deels kan zorgen voor opschaling van seizoensopslag. Bovendien kan een dergelijk kader bescherming bieden aan andere functies en voor duidelijkheid en snelheid in procedures zorgen.

Voor alle vormen van energieopslag is vormgeving met voldoende ruimtelijke kwaliteit van belang. Het gaat dan om het ontwerpen van energieprojecten met oog voor, en waar mogelijk versterking van, omgevingskwaliteit. Op verschillende schaalniveaus zal komende tijd nagedacht moeten worden over de vormgeving van verschillende opslag-technieken. Zo wordt in nationaal programma Mooi Nederland bijvoorbeeld gewerkt aan inspiratie en handvaten voor de inpassing van grootschalige batterijopslag.

7.5.4 Vraagstukken omtrent grondstoffen

Net als bij andere producten in de energietransitie, moet er ook bij energieopslag aandacht zijn voor grondstoffen- en geopolitieke vraagstukken. Belangrijke voorbeelden zijn batterijen en elektrolyzers waar de drie grootste producerende landen goed zijn voor ten minste 70% van de wereldwijde productiecapaciteit en China het meest dominant is. Ook de winning van kritieke delfstoffen is zeer geconcentreerd. Aspecten die in het Nederlandse energie-innovatiebeleid meegewogen moeten worden zijn o.a. circulariteit, duurzame mijnbouw en raffinage, diversificatie, verduurzaming van de (internationale) ketens, kennisopbouw en monitoring. Ook is het van belang beleid op internationaal vlak te adresseren en af te stemmen, via de EU of andere multilaterale samenwerking, zoals het IEA.

7.5.5 Samenwerking tussen overheden en andere partijen

De actie agenda's van deze routekaart (tot 2035) laten zien dat er verschillende partijen hebben een rol in de ontwikkeling van energieopslag. Naast de netbeheerders zijn de Rijksoverheid en decentrale overheden sleutelfiguren in het veld. Zij hebben zowel grote invloed op als grote belangen bij het laten slagen van energieopslag.

Andere sleutelfiguren in het veld zijn marktpartijen die bezig zijn met het ontwikkelen van energieopslag technologieën. De invloed op de besluitvorming van deze partijen is weliswaar minder dan van overheden en netbeheerders, maar omdat er nog veel technische ontwikkelingen gaande zijn, is hun invloed op het (toekomstige) veld enorm. Uit gesprekken met deze partijen blijkt dat er nog een hoop te winnen valt door het belang van energieopslag uit te leggen en nuances te maken m.b.t. de verschillende technieken en hun mogelijkheden.

Elektriciteitsopslag

Zowel bij toepassing in de elektriciteitsketen, bij regulering, als bij innovatie en bij toepassing van elektriciteitsopslagsystemen in de praktijk is samenwerking tussen de betrokken partijen essentieel.

Voor het energie-innovatiebeleid van elektriciteitsopslag is dit de afgelopen jaren vormgegeven binnen de Topsector Energie. Het Klimaatakkoord heeft de basis gevormd voor samenwerking gericht op de realisatie van de opwekking van hernieuwbare energie. Meer recent is de samenwerking tussen overheden en netbeheerders bij Integraal Programmeren van het energiesysteem en de samenwerking met ook marktpartijen binnen het Landelijk Actieprogramma Netcongestie. Deze samenwerkingsstructuren vormen goede platforms voor bovengenoemde verbetermogelijkheden.

De vergunningverlening voor andere vormen van elektriciteitsopslag dan Li-ion batterijen komt moeizaam tot stand. Er wordt een handreiking opgesteld met uniforme regels waarmee ook een snelheid van realisatie worden vergroot.

Moleculenopslag

Voor ondergrondse moleculenopslag is het essentieel vroegtijdig aan draagvlak te werken. Nieuwe ondergrondse opslaglocaties zullen waarschijnlijk voornamelijk komen in gebieden waar al mijnbouw (gas-, olie-, zoutwinning) plaatsvindt en waar al weinig draagvlak voor mijnbouw is. Tijdige start van participatie van de omgeving en eerlijke lusten en lasten als in de geest van de Contourennota aanpassing Mijnbouwwet⁴¹ zijn nodig om draagvlak te creëren en te behouden.

⁴¹ Kamerbrief 'Contourennota aanpassing Mijnbouwwet', 20 januari 2023

Voor ondergrondse moleculenopslag is tijdig beginnen met plannen, doorlopen van vergunningentraject en uitvoering essentieel. De doorlooptijd van ondergrondse moleculenopslag duurt vele jaren van plannen tot realisatie. Dit komt door het grote aantal vergunningen voor boven- en ondergrondse ontwikkelingen. Daarnaast is de uitvoering met aanleg van bovengrondse installaties, boren van putten en eventueel ontwikkelen van opslagcavernes een proces dat jaren kan duren.

Warmteopslag

Korte-termijnopslag van warmte biedt kansen om elektriciteitsoverschotten nuttig in te zetten, wat stabiliserend werkt op het energiesysteem. Nationale en regionale kaders en marktcondities moeten korte-termijnopslag van warmte voldoende stimuleren.

Kennisuitwisseling en kennisdeling voor seizoenopslag vergemakkelijkt de toepassing daarvan en de doorloopsnelheid van vergunningsprocedures. Het innovatie-instrumentarium, de nationale en regionale kaders en de marktcondities dienen een juiste toepassing van seizoenopslag van warmte te ondersteunen.

7.6 Aanbevelingen voor actoren

Uit de routekaart volgt welke acties genomen moeten worden om de randvoorwaarden te scheppen voor de ontwikkeling van energieopslag. Voor eindgebruikers van energieopslag, zoals huishoudens en bedrijven, zijn geen acties gedefinieerd. Omdat eindgebruikers een belangrijke rol te spelen hebben, bij deze een aantal aanbevelingen:

7.6.1 Aanbevelingen voor huishoudens

Huishoudens die overwegen zonnepanelen te plaatsen zouden dat met een oost-west-oriëntatie kunnen doen. Door de panelen oost-west te oriënteren wordt de stroomopwekking gelijkmatiger over de dag verdeeld, wat netcongestie en zeer lage day-aheadprijzen verminderd.

Huishoudens die geen zonnepanelen kunnen plaatsen, kunnen profijt hebben van dynamische contracten.

Een goede manier waarop huishoudens het eigenverbruik van hun zonnestroom kunnen verhogen (en daarmee netcongestie kunnen verminderen) is door het energieverbruik meer af te stemmen op de energieproductie van de zonnepanelen. Bijvoorbeeld door de wasmachine of vaatwasser aan te zetten op momenten met veel zon, of door slim elektrisch te verwarmen (eventueel in combinatie met een buffervat).

Huishoudens met zonnepanelen kunnen overtollige zonnestroom omzetten naar warmte met een warmtepomp of e-boiler en opslaan in een warmwatervat. Daarmee kunnen ze netcongestie door zonnepanelen voorkomen en kunnen ze meer van de eigen zonnestroom gebruiken. Het opgeslagen warme water kan vervolgens gebruikt worden voor tapwater of ruimteverwarming. Huishoudens met een dynamisch elektriciteitscontract kunnen profiteren van prijschommelingen in de elektriciteitsprijs gedurende de dag door water te verwarmen op goedkope uren en de warmte te gebruiken wanneer ze het nodig hebben (vaak op dure uren).

Het subsidiëren van thuisbatterijen is waarschijnlijk niet wenselijk, want:

- Ze bevatten veel (dure) materialen die uit landen komen waar (geo)politieke risico's een rol spelen.
- Thuisbatterijen zorgen alleen voor CO₂-besparing als ze worden ingezet om curtailment te voorkomen. Omdat dat geen rendabele businesscase is zal het weinig voorkomen, wat er toe leidt tot dat het niet gegarandeerd is dat de CO₂-emissie van de productie gecompenseerd wordt over de levensduur van de batterij. Bij elektrische auto's is de CO₂-emissie van de productie ruimschoots gecompenseerd over de levensduur van de batterij, omdat elektrische auto's benzine-auto's vervangen die veel meer CO₂ uitstoten per gereden kilometer.
- Binnenkort staan in elke straat volledig elektrische auto's die door slim laden en ontladen dezelfde functies zouden kunnen vervullen als thuisbatterijen.

7.6.2 Aanbevelingen voor gemeentes

Plaatsing van batterijen op het elektriciteitsnet is nodig voor het energiesysteem van de toekomst. Gemeenten hebben voor de realisatie een belangrijke rol bij de planvorming en vergunningverlening. Het is daarom raadzaam om voor te sorteren met een aantal acties. Agendeer binnen je gemeentelijke organisatie het belang van batterijen als randvoorwaarde voor regionale plannen. Er zijn beleidsdoelen voor duurzame opwek, extra bedrijvigheid en woningen, maar regelmatig nog niet voor het extra ruimtebeslag voor batterijen net als voor transformatorstations of kabels. Het verband tussen die twee wordt niet altijd gelegd. Zorg voor besef dat het cruciaal is voor de ambities van de regio. Het vrijhouden van geschikte plekken scheelt in doorlooptijd en voorkomt weerstand. Houd al bij het maken van ruimtelijke plannen rekening met de hiervoor benodigde ruimte, bijvoorbeeld bij de inrichting van een bedrijventerrein. Zorg dat er bij het verwerken van aanvragen voor vergunningen voor batterijen een beleidsmedewerker betrokken is die bekend is met de netsituatie. Regelmatig overleg met de regionale netbeheerder zorgt voor actuele kennis hiervan. TenneT werkt in samenwerking met bevoegde gezagen aan een plan voor batterijen op het landelijke elektriciteitsnet. Betrek verder bewoners zorgvuldig en vroegtijdig bij de wijziging van ruimtelijke plannen en bij de vergunningverlening.

Binnen het Nationaal Programma Lokale Warmtetransitie (NPLW) kunnen gemeenten zich aan de hand van de factsheet warmteopslag oriënteren op de diverse mogelijkheden. Ook zijn er binnen de proeftuinen aardgasvrije wijken diverse voorbeelden met warmteopslag. Voorbeelden zijn te vinden bij de proeftuinen Nagele en Vlieland.⁴²

Verder wordt opgemerkt dat korte-termijn opslag van warmte van invloed is op de elektriciteitsvoorziening, omdat een belangrijk deel van de elektriciteit voor warmte (en koude) gebruikt wordt. Elektrificatie zal een belangrijke rol spelen in gebieden waar individuele, duurzame oplossingen worden toegepast, maar ook in gebieden waar de elektrificatie van de industrie grootschalig zal worden uitgerold. Hierdoor zal het mitigeren van netcongestie op alle spanningsniveaus belangrijker worden. De variatie in beschikbare duurzame elektriciteit en de netcongestie kan in deze gebieden opgevangen worden door het optimaliseren van de inzet van power-to-heat en lokale opslag van warmte. Verder kan de opslag van warmte in veel gevallen een betaalbaarder techniek zijn dan elektriciteitsopslag. Het wordt aanbevolen conversies van elektriciteit naar warmte en vice versa mee te nemen in afwegingen voor lokaal energiebeleid.

7.6.3 Aanbevelingen voor netbeheerders

Voor de ontwikkeling van energieopslag is transparantie en de beschikbaarheid van real-time data van netbeheerders van groot belang. Dit kan onder andere helpen te bepalen of en waar investeringen (het meest) rendabel zijn, maar ook waar energieopslag niet gewenst is. Met een energiesysteem dat onder invloed van zonne- en windenergie steeds meer aanbodgedreven wordt, zal de vraag naar deze informatie de komende jaren alleen maar toenemen. Hoe eerder netbeheerders aan deze vraag kunnen voorzien, hoe beter.

Landelijke of regionale sturing van (grootschalige) stand-alone batterijen zal in eerste instantie op basis van informatie van netbeheerders worden gebaseerd. In 2023 zullen TenneT en EZK onderzoeken of sturing van batterij locaties op basis van netwerk analyses en uitvoerbaarheid mogelijk is. Met het oog op o.a. vergunningen, wordt ook het IPO hierbij betrokken.

7.6.4 Aanbevelingen voor bedrijven

Versillende bedrijven in Nederland maken reeds succesvol gebruik van batterijen, bijvoorbeeld door samen te werken in lokale gemeenschappen of door tijdelijk batterijen te plaatsen als een nieuwe of grotere netaansluiting niet direct mogelijk is. EZK, RVO en brancheorganisatie ESNL zullen binnenkort online communicatie starten om bedrijven in staat te stellen van elkaar te leren.

⁴² Zie ook de website: [Proeftuinen op de kaart | Programma Aardgasvrije Wijken](#)

7.6.5 Aanbevelingen voor industrie

Dynamische elektriciteitscontracten

Bij elektriciteitscontracten met dynamische prijzen zijn de tarieven voor elektriciteit direct gekoppeld zijn aan de prijzen op de day-ahead markt. Door met de vraag naar elektriciteit in te spelen op de elektriciteitsprijzen, kan in potentie veel geld worden bespaard.

Verduurzaming en ruimtelijke ordening

Inpassing van verduurzaming vraagt vaak letterlijk om ruimte. Daarnaast zijn vaak vergunningen nodig. Door vroegtijdig in gesprek te gaan met lokaal gezag, kunnen tijdig knelpunten worden geïdentificeerd.

Warmteopslag biedt veel kansen

In vergelijking met andere eindgebruikers, is de vraag naar warmte in de industrie vaak groot. Warmte kan momenteel nauwelijks over lange afstanden worden getransporteerd, en dat maakt lokale warmteopslag noodzakelijk. Met het verduurzamen van de warmteketen, zal het voor de industrie steeds belangrijker worden in lokale warmteopslag te investeren. De Routekaart Energieopslag heeft verschillende warmteopslag technieken benoemd die relevant zijn voor de industrie, elk met verschillende technologie niveaus (TRLs). Afhankelijk van de mogelijkheden en de urgentie te investeren, zijn deze technieken de moeite waard te overwegen: grote warmwater tank (beschikbaar, TRL 9-11), vaste stof warmteopslag (in demonstratie TRL 6-7) en thermochemische materialen (prototypes, TRL 4-6).

7.7 Bibliografie

- Abdin, Z. e. (2019). Chapter 4 — Single and Polystorage Technologies for Renewable-Based Hybrid Energy Systems. In K. Khalilpour, *Polygeneration with Polystorage for Chemical and Energy Hubs* (pp. 77-131). Elsevier Inc.
- Air Products. (2007). *Safetygram #9 Liquid Hydrogen*. Opgehaald van Depart of Energy (VS): <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/safetygram-9-liquid-hydrogen>
- AIVD en MIVD. (2023). 24/2 - De Russische aanval op Oekraïne: een keerpunt in de geschiedenis. AIVD en MIVD.
- AIVD, MIVD en NCTV. (2022). *Dreigingsbeeld Statelijke Actoren 2*. AIVD, MIVD en NCTV.
- Algemene Rekenkamer. (2022). *Focus op strategische voorraden*. Den Haag: Algemene Rekenkamer.
- Allevi, C. e. (2017). C12 - Hydrogen production in ICGG systems. In T. e. Wang, *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies* (pp. 419-443). Elsevier Inc.
- Alliander. (2021). *Businesscase voor thuisopslag, analyse financieel rendement onder scenario's voor de salderingsregeling afbouw en aanvullende stimulering*. Arnhem: Alliander.
- Andersson, J. (2023). Large-scale storage of hydrogen. In T. Nejat Veziroglu, *International journal of hydrogen energy, Volume 48, Issue 49* (pp. 11901-11919). Elsevier.
- Bafa. (2023). *Zulassung von Wärme- und Kältespeichern*. Opgehaald van Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Waerme_Kaeltespeicher/waerme_kaeltespeicher_node.html
- Bakema, G. &. (2018). *State of the art HT-ATES in the Netherlands Evaluation of thermal performance and design considerations for future projects*. HeatStore-GEOTHERMICA.
- BEIS & Ofgem VK. (2021). *Transitioning to a net zero energy system: smart systems and flexibility plan 2021*. Londen: Department for Business, Energy & Industrial Strategy en Office of Gas and Electricity Markets VK.
- BEIS. (2022). *Proposals for hydrogen transport and storage business models (consultation)*. Oxford: British Institute for Energy Economics.
- Berenschot. (2019). *Validatie businesscase O-PAC, Gedeeltelijke* eindrapportage*. Utrecht: Berenschot.
- Berenschot en Kalavasta. (2020). *Klimaatneutrale energiestenario's 2050; Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*. Amsterdam: Berenschot.
- Boesten, S. I. (2019). 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply. In *Advanced Geosciences volume 49* (pp. 129–136). European Geosciences Union.
- CE Delft. (2021). *Omslagpunt grootschalige batterijopslag. Wat is de betekenis van batterijopslag voor de inpassing van zon in het energiesysteem?* Delft: CE Delft.
- CE Delft. (2021). *Werk door investeringen in groene waterstof. Update en uitbreiding*. Delft: CE Delft.
- CE Delft. (2022). *Het net slimmer benut! Beleidsmaatregelen voor efficiëntere benutting van de elektriciteitsinfrastructuur*. Delft: CE Delft.
- CE Delft. (2023). *Beleid voor grootschalige batterijsystemen en afnamenetcongestie*. Delft: CE Delft.
- CE Delft. (2023). *Power-to-Heat en warmteopslag in warmtenetten. Businesscase, potentieel en rol in energiesysteem*. Delft: CE Delft.
- Chiyoda. (2013). *Development of large-scale H₂ storage and transportation technology with liquid organic hydrogen carrier (LOHC)*. Yokohama: Chiyoda.
- CIE AGSI. (2023, mei 3). *AGSI Storage Inventory*. Opgehaald van Aggregated Gas Storage Inventory: <https://agsi.gie.eu/#/>
- CMS Law. (2023). *Energy regulation in Germany*. Opgehaald van CMS Law: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-energy-storage/germany>
- Cryogenic Society. (2022, mei 6). *World's Largest Liquid Hydrogen Tank Nears Completion*. Opgehaald van Cryogenicsociety.org: [https://www.cryogenicsociety.org/index.php?option=com_dailyplanetblog-liquid-hydrogen-tank-nearsh=05&day=05&id=48:world-s-largest-liquid-hydrogen-tank-nears-completion#:~:text=Construction%20of%20the%20world%27s%20largest,550%20ft\)%20to%20the%20southeast.](https://www.cryogenicsociety.org/index.php?option=com_dailyplanetblog-liquid-hydrogen-tank-nearsh=05&day=05&id=48:world-s-largest-liquid-hydrogen-tank-nears-completion#:~:text=Construction%20of%20the%20world%27s%20largest,550%20ft)%20to%20the%20southeast.)
- DEA. (2020). *Technology Data for Energy Storage*. Kopenhagen: Danish Energy Agency.
- Deloitte. (2022). *Hydrogen: making it happen*. Amsterdam: Deloitte Netherlands.
- DENA. (2023). *Pumped-storage integrates renewable energy into the grid*. Opgehaald van Deutsche Energie-Agentur: <https://www.dena.de/en/topics-projects/energy-systems/flexibility-and-storage/pumped-storage/>
- DESNZ & BEIS VK. (2022). *Proposals for hydrogen transport and storage business models*. Londen: Department for Energy Security and Net Zero en Department for Business, Energy & Industrial Strategy VK.

- DESNZ, Ofgem & BEIS VK. (2021). *Transitioning to a net zero energy system: smart systems and flexibility plan 2021*. Londen: Department for Energy Security and Net Zero, Office of Gas and Electricity Markets en Department for Business, Energy & Industrial Strategy VK.
- DLA Piper. (2022, maart 31). *New political agreement to develop and promote Power-to-X*. Opgehaald van DLA Piper: <https://denmark.dlapiper.com/en/news/new-political-agreement-develop-and-promote-power-x>
- DNE Research. (2022). *Nationaal Smart Storage Trendrapport*. Bergschenhoek: Dutch New Energy Research. Opgehaald van <https://www.smartstorage.nl/trendrapport/>
- EBN. (2023). *Infographic Energie in cijfers 2023*. Utrecht: Energie Beheer Nederland.
- EC. (2023, maart 14). *Commission recommendations on how to exploit the potential of energy storage (europa.eu)*. Opgehaald van Europese Commissie: https://energy.ec.europa.eu/news/commission-recommendations-how-exploit-potential-energy-storage-2023-03-14_en
- EC. (2023). *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023*. Brussel: Europese Commissie.
- ECW. (2022). *Factsheet: Bodemenergie en WKO*. Expertise Centrum Warmte.
- EemsEnergyTerminal. (2023, mei). *EemsEnergyTerminal*. Opgehaald van EemsEnergyTerminal: <https://www.eemsenenergyterminal.nl/>
- EERA. (2023). *Industrial Thermal Energy Storage Supporting the transition to ecarbonize industry*. Brussel: European Energy Research Alliance.
- Elia Group. (2020). *Tarieven voor de toegang tot het net Periode 2020-2023*. Brussel: Elia Transmission Group België.
- Elia Group. (2021). *CRM Veilingrapport Y-4. Veiling voor de Periode van Capaciteitslevering 2025 – 2026*. Brussel: Elia Transmission Group België.
- Elia Group. (2021). *CRM Veilingrapport Y-4. Veiling voor de Periode van Capaciteitslevering 2025 – 2026*. Elia Group.
- Eneco. (2020). *23 kV / 12 MW Electrode boiler. Electrode Boiler project WKC Ypenburg*. Eneco Heat & Industrials.
- ESNL. (2021, mei 10). *Elestor en Vopak ondertekenen Joint Development Agreement voor ontwikkeling waterstofbroomstroombatterij*. Opgehaald van EnergyStorageNL: <https://www.energystoragenl.nl/elestor-en-vopak-ondertekenen-joint-development-agreement/>
- ETES2050. (2023). *Tussenrapportage met eerste conclusies en aanbevelingen na een half jaar onderzoek Expertteam Energiesysteem 2050*. Den Haag: Expertteam Energiesysteem 2050.
- Eypasch, M. (2017). *Model-based techno-economic evaluation of an electricity storage system based on liquid organic hydrogen carriers*. In Z. e. Vale, *Applied energy* (pp. 320-330). Elsevier.
- Federal Reserve Bank of Dallas. (2023, maart 10). *Texas to get new type of refinery: a lithium refinery*. Opgehaald van Federal Reserve Bank of Dallas: <https://www.dallasfed.org/research/swe/2023/swe2302>
- FOD Economie. (2022). *Visie en Strategie Waterstof update oktober 2022*. Brussel: Federale Overheidsdienst Economie België. Opgehaald van Federale Overheidsdienst Economie België.
- FOD Economie. (2023). *Energietransitiefonds*. Opgehaald van Federale Overheidsdienst Economie België: <https://economie.fgov.be/nl/themas/energie/energietransitie/energietransitiefonds>
- Gasunie. (2023, mei). *Peakshaver*. Opgehaald van Gasunie: <https://www.gasunie.nl/begrippenlijst/peakshaver>
- Gate terminal. (2023, mei). *Profiel*. Opgehaald van Gate terminal: <https://www.gateterminal.com/gate-terminal/profiel/>
- GOPACS. (2023, april 28). *GOPACS*. Opgehaald van GOPACS: <https://www.gopacs.eu/wat-is-gopacs/>
- Green Car Congress. (2022). *Bioage.typepad.com*. Opgehaald van Green Car Congress: <https://bioage.typepad.com/.a/6a00d8341c4fbe53ef02a2eed8e4af200d-popup>
- GTS. (2023, april 28). *Balanceringsregime*. Opgehaald van Gasunie Transport Services: <https://www.gasunie-transportservices.nl/shippers/balanceringsregime>
- Guglielmetti, L. B.-E.-P. (2021). *Environmental effects of UTES technologies in Europe. HeatStore, D6.6. HeatStore-GEOTHERMICA*.
- H2Platform. (2022, juli 26). <https://opwegmetwaterstof.nl/krijgen-we-vloeibare-waterstof-uit-portugal/>. Opgehaald van H2Platform: <https://opwegmetwaterstof.nl/krijgen-we-vloeibare-waterstof-uit-portugal/>
- Hahn, F. A.-P. (2019). *Monitoring plans: demonstration projects and case studies. HeatStore, D5.1. HeatStore-GEOTHERMICA*.
- Hahn, F. V.-P. (2019). *Feasibility assessment & design for demonstration projects-learnings of an international workshop. HeatStore-GEOTHERMICA*.
- Hamm, V. M.-P.-A. (2021). *Synthesis of demonstrators and case studies – Best practice guidelines for UTES development. HeatStore, D1.4. HeatStore-GEOTHERMICA*.
- Harrison, C. e. (2022). *Energy Storage Policy in the UK*. Birmingham: University of Birmingham.

- HCSS. (2022). *Tankopslag in Transitie*. Den Haag: The Hague Center for Strategic Studies.
- He, T. P. (2015). Liquid organic hydrogen carriers. In X. e. Bao, *Journal of Energy Chemistry, Volume 24, Issue 5* (p. Journal of Energy Chemistry). Elsevier.
- IEA. (2023). *Energy Technology Perspectives 2023*. Parijs: Internationaal Energie Agentschap.
- IEA Technology Collaboration Program Energy Storage. (2021). *Country report Germany (non-public version)*. Parijs: Internationaal Energie Agentschap.
- IEA Technology Collaboration Program Energy Storage. (2021). *Country report United Kingdom*. Parijs: Internationaal Energie Agentschap.
- IEA Technology Collaboration Program Energy Storage. (2022). *Country report Belgium*. Parijs: Internationaal Energie Agentschap.
- IEA Technology Collaboration Program Energy Storage. (2022). *Country report Denmark*. Parijs: Internationaal Energie Agentschap.
- InvestingNews.com. (2023, maart 28). *7 Biggest Lithium-mining Companies in 2023*. Opgehaald van InvestingNews.com: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/lithium-investing/top-lithium-producers/>
- Invest-NL. (2021, september 3). *Invest-NL investeert in LeydenJar*. Opgehaald van Invest-NL: <https://www.invest-nl.nl/actueel/invest-nl-investeert-in-leydenjar>
- ISEA. (2023). *Battery charts*. Opgehaald van ISEA and PGS, RWTH Aachen University: <https://battery-charts.rwth-aachen.de/main-page/>
- Kallesøe, A. J.-P. (2019). *Underground Thermal Energy Storage (UTES) – state-of-the-art, example cases and lessons learned*. HeatStore, D1.1. HeatStore-GEOTHERMICA.
- KfW. (2023). *Erneuerbare Energien – Standard*. Opgehaald van KfW: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-Standard-\(270\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-Standard-(270)/)
- Kim, K. (2017). A review on design strategies for metal hydrides with enhanced reaction thermodynamics for hydrogen storage applications. In *International journal of energy research*, Vol 42, Issue 4 (pp. 1455-1468). Wiley and Sons.
- LDDES Council. (2022). *The journey to net-zero. An action plan to unlock a secure, net-zero power system*. Long Duration Energy Storage Council.
- LionVolt. (2023, mei 5). *Dutch battery startup LionVolt closes e4 million seed round led by innovation industries*. Opgehaald van LionVolt: <https://lionvolt.com/news/dutch-battery-startup-lionvolt-closes-e4-million-seed-round-led-by-innovation-industries/>
- Loughborough University, VK. (2023, mei 19). *Compressed Air Energy Storage*. Opgehaald van Energy Systems and Energy Storage Lab, Centre for Renewable Energy Systems Technology (CREST), Loughborough University (VK): <http://www.eseslab.com/ESsensePages/CAES-page>
- McKinsey. (2022, oktober 18). *Power spike: How battery makers can respond to surging demand from EVs*. Opgehaald van McKinsey: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/power-spike-how-battery-makers-can-respond-to-surging-demand-from-evs#/>
- Mijnwater. (2023, februari 10). *Forse groei van warmtenet mijnwater mogelijk door investeringsbesluiten van Enexis Holding N.V. en provinciale staten van Limburg*. Opgehaald van Mijnwater: <https://mijnwater.com/actueel/forse-groei-van-warmtenet-mijnwater-mogelijk-door-investeringsbesluiten-van-enexis-holding-n-v-en-provinciale-staten-van-limburg>
- Milieu Centraal. (2022, december 1). *Thuisbatterij nog geen aanrader*. Opgehaald van Milieu Centraal: <https://www.milieucentraal.nl/persberichten/thuisbatterij-nog-geen-aanrader/>
- Modi, P. e.-Z. (2021). Room temperature metal hydrides for stationary and heat storage applications: a review. In *Frontiers in energy research* (pp. 20-24). Frontiers.
- NBNL. (2023). *Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's*. Den Haag: Netbeheer Nederland.
- Nielsen, J. E.-P. (2019). *Underground Thermal Energy Storage (UTES) — general specifications and design*. HeatStore, D1.2. HeatStore-GEOTHERMICA.
- Oerlemans, P. D. (2022). First field results on the technical risks and effectiveness of mitigation measures for the full scale HT-ATES demonstration project in Middenmeer. (pp. 1-9). Berlijn: European Geothermal Congress.
- PBL. (2020). *Startanalyse aardgasvrije buurten; Gemeenterapport met toelichting bij tabellen met resultaten van de Startanalyse*. Den Haag: PBL.

- Petitpas, G. (2018). *Boil-off losses along LH₂ pathway*. US Department of Energy Office of Scientific and Technical Information (OSTI).
- Regionale ontwikkelingsmaatschappijen. (2022, juni 13). *Regionale ontwikkelingsmaatschappijen motor achter maatschappelijke transitie*. Opgehaald van Regionale ontwikkelingsmaatschappijen: <https://www.rom-nederland.nl/regionale-ontwikkelingsmaatschappijen-motor-achter-maatschappelijke-transities/>
- Sakintuna, B. L.-D. (2007). Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. In T. Nejat Veziroglu, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32, Issue 9 (pp. 1121-1140). Elsevier.
- Schmidt, T. P. (2018). *Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling*. Parijs: IEA Technology Collaboration Programme on District Heating and Cooling.
- SodM. (2023, mei 3). *Meer informatie over ondergrondse opslag De Marssteden (Enschede)*. Opgehaald van Staatstoezicht op de Mijnen: <https://www.sodm.nl/documenten/vragen-en-antwoorden/meer-informatie-over-ondergrondse-opslag-de-marssteden-enschede#:~:text=De%20ogasolieopslag%20Twente%20bevindt%20zich,volume%20van%20250.000%20kubieke%20meter.>
- Solar Magazine. (2022, maart 21). *Minister Jetten: 'Geen subsidie voor batterijen via SDE++, kosten te hoog'*. Opgehaald van Solar Magazine: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/126752/minister-jetten-geen-subsidie-voor-batterijen-via-sde-kosten-te-hoog>
- Solarmagazine.nl. (2023, mei 8). *Europese koepelorganisaties lanceren Energy Storage Coalition*. Opgehaald van Solarmagazine.nl: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/134210/europese-koepelorganisaties-lanceren-energy-storage-coalition>
- Strategy&. (2021). *The business position and opportunities in the battery value chain for the Netherlands*. Amsterdam: PWC Strategy&.
- Strategy&. (2021). *V2G – waarde en weg voorwaarts*. Amsterdam: PWC Strategy&.
- Strategy. (2023, maart 9). *34 GW aan batterijprojecten in beeld bij netbeheerders per eind februari 2023*. Opgehaald van Strategy: <https://www.strategy.nl/post/34-gw-aan-batterijprojecten-in-beeld-bij-netbeheerders-per-eind-februari-2023>
- TenneT. (2023, mei 12). *Leveringszekerheid van elektriciteit in een volledig duurzaam elektriciteitsysteem*. Opgehaald van TenneT: <https://www.tennet.eu/nl/nieuws/leveringszekerheid-van-elektriciteit-een-volledig-duurzaam-elektriciteitsysteem>
- TenneT. (2023). *Monitoring Leveringszekerheid 2022 (2025-2030)*. Arnhem: TenneT.
- TenneT. (2023, mei 3). *Ondersteunende diensten (Nederland)*. Opgehaald van TenneT: <https://www.tennet.eu/nl/de-elektriciteitsmarkt/ondersteunende-diensten-nederland>
- TenneT. (2023). *TenneT's position on Battery Energy Storage Systems (BESS)*. Arnhem: TenneT.
- TNO & EBN. (2018). *Publicatie Rapport t.b.v. Technische Verkenning voor Visie Ondergrondse Opslag*. TNO & EBN.
- TNO & EBN. (2022). *Haalbaarheidsstudie offshore ondergrondse waterstofopslag*. TNO & EBN.
- TNO. (2020). *Large-Scale Energy Storage in Salt Caverns and Depleted Fields (LSES) – Project Findings*. TNO.
- TNO. (2020). *Whitepaper scenario's voor klimaatneutraal energiesysteem slimme combinaties van energie-opties leiden tot duurzame en betaalbare energiehuishouding*. TNO.
- TNO. (2020). *Workflow to evaluate the risk of mineral scaling in a HT-ATES system and application to a potential site in Middenmeer, The Netherlands*. TNO.
- TNO. (2022). *Elektrisch rijden personenauto's & logistiek. Trends en impact op het elektriciteitsstelsel*. TNO.
- Visser, M. (2023, maart 7). *Geef thuisaccu's geen subsidie!* Opgehaald van Energie Podium: <http://www.energie-podium.nl/artikel/geef-thuisaccu-geen-subsidie>
- Visual Capitalist. (2022, februari 28). *Mapped: EV Battery Manufacturing Capacity, by Region*. Opgehaald van Visual Capitalist: <https://www.visualcapitalist.com/sp/mapped-ev-battery-manufacturing-capacity-by-region/>
- Visual Capitalist. (2022, december 26). *Visualizing 25 Years of Lithium Production, by Country*. Opgehaald van Visual Capitalist: <https://www.visualcapitalist.com/visualizing-25-years-of-lithium-production-by-country/>
- Vlaamse regering. (2022). *Visienota Flexibiliteitsplan 2025*. Brussel: Vlaamse regering. Opgehaald van <https://beslissingenvlaamse-regering.vlaanderen.be/?search=flexibiliteit%20elektriciteitsdistributienet>
- Vlaamse regering. (2023). *Nieuwe nettarieven (onder meer capaciteitsstarief) voor gezinnen en kleine bedrijven sinds 1 januari 2023*. Brussel: Vlaamse regering.
- Witteveen+Bos. (2023). *Onderzoek buurtbatterijen*. Deventer: Witteveen+Bos.
- WSJ Pro. (2023, februari 21). *Lithium Industry Looks to Australia for Refining, Not Just Mining*. Opgehaald van WSJ Pro Sustainable Business: <https://www.wsj.com/articles/lithium-industry-looks-to-australia-for-refining-not-just-mining-7cd93cd4>

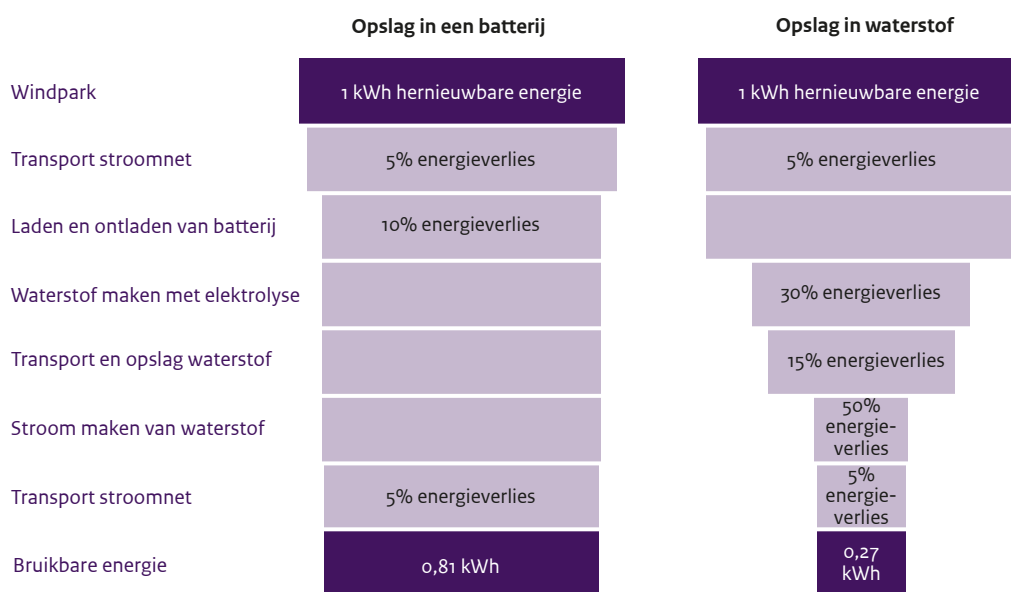
8. Bijlagen

8.1 Bijlage 1: Energie efficiëntie heeft een grote impact

Opslag van elektriciteit in een batterij

Een windpark wekt 1 kWh elektriciteit op. De stroom wordt van het windpark naar de batterij gebracht door het stroomnet. De verliezen in het stroomnet zijn ongeveer 5%. Vervolgens wordt de energie opgeslagen in een batterij. Met het laden en vervolgens ontladen van de batterij gaat ongeveer 10% van de energie verloren. Ten slotte wordt de energie weer via het stroomnet getransporteerd naar de finale bestemming. Uiteindelijk is 0,81 kWh van de 1,0 kWh windstroom overgebleven voor finaal verbruik.

Figuur 15 Vergelijking efficiëntie van batterij en waterstof



Opslag van elektriciteit met waterstof

Een windpark wekt 1 kWh elektriciteit op. De stroom wordt van het windpark naar een elektrolyser getransporteerd. De verliezen in het stroomnet zijn ongeveer 5%. De elektrolyser gebruikt de elektriciteit om water te splitsen naar waterstof en zuurstof (70% efficiënt). De waterstof wordt gecomprimeerd of vloeibaar gemaakt om opgeslagen te worden (85%). De waterstof wordt daarna in een gascentrale omgezet naar elektriciteit. Ongeveer 50% van de energie in de waterstof kan worden omgezet naar elektriciteit. Ten slotte wordt de elektriciteit via het stroomnet getransporteerd naar de eindbestemming. Uiteindelijk is 0,27 kWh van de 1,0 kWh windstroom overgebleven voor finaal verbruik.

Door elektriciteit in een batterij op te slaan blijft er ongeveer 3 keer meer energie over dan wanneer elektriciteit wordt opgeslagen in de vorm van waterstof. Dat betekent dus dat er 3 keer zo veel windparken nodig zijn om dezelfde hoeveelheid energie te leveren als het wordt opgeslagen als waterstof. Belangrijk om daarbij op te merken is dat niet alle energie in batterijen opgeslagen kan worden. Waterstof kan bijvoorbeeld veel beter gebruikt worden om elektriciteit voor een veel langere periode op te slaan. Dit illustreert dat niet iedere vorm van energieopslag voor iedere toepassing even nuttig is en dat het van belang is om bewust te zijn van hoe de verschillende eigenschappen van energieopslag aansluiten bij de gewenste

eigenschappen van de functie die vervuld moet worden. Op dezelfde manier kan energieopslag ook concurreren met andere flexibiliteitsoplossingen zoals vraagsturing of curtailment.

8.2 Bijlage 2: Matchmaking tabel: Functies versus technologieën

Het doel van onderstaande tabel is om een overzicht geven van de technieken die (over het algemeen) het beste geschikt zijn om een bepaalde functie te vervullen. De tabel is een grove richtlijn die een beeld schetst van waar kansen en knelpunten liggen. Er zullen altijd situaties zijn waar afgeweken wordt van de tabel. In de tabel wordt over korte, middellange en lange termijn gesproken. Kort is 1 seconde – 1 dag, middellang is 1 dag – 1 week en lang is 1 week – 1 jaar.

Tabel 8 Toelichting op functies en termijnen energieopslag volgens het IEA⁴³

Vraag en aanbod afstemmen op korte-termijn:	Tekorten of overschotten van energie binnen een dag opvangen.
Vraag en aanbod afstemmen op middellange-termijn:	Tekorten of overschotten van energie binnen een week opvangen.
Vraag en aanbod afstemmen op lange-termijn:	Tekorten of overschotten van energie binnen een jaar opvangen.
Netondersteunende diensten:	FCR, aFRR, blackstart, spanningsondersteuning etc.
Congestieverlichting:	Lokaal congestie kunnen verlichten door excessieve vraag of aanbod van elektriciteit op te vangen.
Strategische voorraden	Bepaalde hoeveelheid energie voor zeer lange termijn opslaan om op elk moment te kunnen gebruiken.

Tabel 9 Technology Readiness Level (TRL) niveaus

1	Initieel idee: basisprincipes zijn gedefinieerd
2	Applicatie geformuleerd: concept en applicatie van de oplossing zijn geformuleerd
3	Concept behoeft validatie: oplossing moet worden toegepast en prototype van gemaakt worden
4	Eerste prototype: prototype is bewezen in testcondities
5	Groot prototype: onderdelen zijn bewezen in gebruikcondities
6	Volledig prototype op schaal: prototype is bewezen op schaal en in normale gebruikcondities
7	Pre-commerciële demonstratie: prototype werkt in normale gebruiksomgeving
8	Eerste van zijn soort commerciële installatie: commerciële demonstratie op schaal en in normale gebruiksomgeving
9	Commerciële operatie in relevante omgeving: De oplossing is commercieel beschikbaar, behoeft wel verbeteringen om competitief te blijven
10	Integratie op schaal nodig: de oplossing is commercieel en competitief, maar behoeft verdere integratie
11	Bewijs van stabiliteit bereikt: voorspelbare groei

⁴³ De TRL systematiek volgens het IEA is gelijk aan die van de EU, met twee toegevoegde niveaus voor commerciële toepassing (10-11).

Tabel 10 Matchmaking tabel met toelichting⁴⁴

Legenda Goed geschikt ●●● Minder goed geschikt ●● Niet goed geschikt ○ Ongeslacht X

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-ondersteuning	Congestie verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Elektriciteitsopslag							
Pumped Hydro Storage (waterkrachtcentrales)	TRL: 11 Kosten: onbekend (erg locatie-afhankelijk) Efficiëntie roundtrip: 70 - 90% "Nearly 96% if global storage capacity is pumped hydro, with over 150GW deployed around the world" (IEA)	●●● Hoge efficiëntie, relatief korte reactietijd, ~1 dag ontladduur mogelijk, onbekende kosten (want erg locatie-afhankelijk). Pumped hydro storage is erg locatie-afhankelijk. In Nederland zijn er nog geen geschikte locaties (behalve mogelijk pompgemalen of kunstmatige meren).	●●● Hoge efficiëntie, relatief korte reactietijd, ~1 dag ontladduur mogelijk, onbekende kosten (want erg locatie-afhankelijk). Pumped hydro storage is erg locatie-afhankelijk. In Nederland zijn er nog geen geschikte locaties (behalve mogelijk pompgemalen of kunstmatige meren).	●● Hoge efficiëntie, relatief korte reactietijd, onvoldoende lange ontladduur mogelijk, onbekende kosten (want erg locatie-afhankelijk). Pumped hydro storage is erg locatie-afhankelijk. In Nederland zijn er nog geen geschikte locaties (behalve mogelijk pompgemalen of kunstmatige meren).	●●● Hoge efficiëntie, relatief korte reactietijd, lange opslagduur mogelijk, onbekende kosten (want erg locatie-afhankelijk). Pumped hydro storage is erg locatie-afhankelijk. In Nederland zijn er nog geen geschikte locaties (behalve mogelijk pompgemalen of kunstmatige meren).	●● Pumped hydro storage is erg locatie-afhankelijk, dus onduidelijk of het lokale netcongestie kan verlichten. Opslagduur is wel lang genoeg.	○ Te korte opslagduur, maar weinig zelfontlading over langere periodes.
Vliegwheels	TRL: 9 Kosten (CAPEX): € 150 - 250 / kWh Efficiëntie roundtrip: ~90%	●●● Hoge efficiëntie, korte reactietijd, zeer beperkte opslagduur (minuten tot enkele uren)	○ Te korte opslagduur (max. enkele uren).	X Te korte opslagduur (max. enkele uren).	●● Korte opslagduur (max. enkele uren), maar wel geschikt voor inertia.	○ Te korte opslagduur (max. enkele uren).	X Te korte opslagduur (max. enkele uren)
LAES (vloeibare luchtopslag)	TRL: 9 Kosten: € 100 - 400 / kWh of € 2.000 - 3.500 / kW Efficiëntie roundtrip: 45 - 75% (afhankelijk van techniek)	●● Efficiëntie lager dan andere geschikte opties in dit tijdvak.	●●● Voldoende lange opslagduur, maar lagere efficiëntie dan andere opties in dit tijdvak.	●● Opslagduur waarschijnlijk niet toereikend.	●● Efficiëntie lager dan andere geschikte opties in dit tijdvak.	●● In principe voldoende opslagcapaciteit, maar nog weinig projecten gerealiseerd en lagere efficiëntie dan andere geschikte opties.	○ Te korte opslagduur.
CAES (perslucht-installaties)	TRL: 8 Kosten: onbekend Efficiëntie roundtrip: 45 - 75% (afhankelijk van techniek)	●● Efficiëntie lager dan andere geschikte opties in dit tijdvak.	●●● Voldoende lange opslagduur, maar lagere efficiëntie dan andere opties in dit tijdvak.	●● Opslagduur waarschijnlijk niet toereikend.	●● Efficiëntie lager dan andere geschikte opties in dit tijdvak.	●● In principe voldoende opslagcapaciteit, maar nog weinig projecten gerealiseerd en lagere efficiëntie dan andere geschikte opties.	○ Te korte opslagduur.

⁴⁴ Kosten zijn weergegeven als CAPEX in €/kWh tenzij anders vermeld

Legenda

Goed geschikt ●●●

Minder goed geschikt ●●

Niet goed geschikt ○

Ongeschikt X

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-ondersteuning	Congestie verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Elektriciteitsopslag							
Ondergrondse pomp accumulatie-centrale (OPAC)	TRL: onbekend Kosten: onbekend Efficiëntie roundtrip: 70 - 90%	●●● Nog lage TRL, in theorie hoge efficiëntie en korte reactietijd.	●●● Nog lage TRL, in theorie hoge efficiëntie en korte reactietijd en relatief lange opslagduur.	●● Nog lage TRL, in theorie hoge efficiëntie en korte reactietijd en relatief lange opslagduur, maar niet lang genoeg voor deze toepassing	●●● Nog lage TRL, in theorie hoge efficiëntie en korte reactietijd en lange opslagduur.	●● Locatie-afhankelijk, dus kan niet altijd in congestiegebieden geplaatst worden.	○ Te korte opslagduur, maar weinig zelfontlading over langere periodes.
Zwaartekracht-gebaseerde opslag	TRL: onbekend Kosten: onbekend Efficiëntie roundtrip: ~90% "	●●● In theorie hoge efficiëntie en korte reactietijd en relatief lange opslagduur, maar nog niet op grote schaal toegepast.	●●● In theorie hoge efficiëntie en korte reactietijd en relatief lange opslagduur, maar nog niet op grote schaal toegepast.	●● In theorie hoge efficiëntie en korte reactietijd en relatief lange opslagduur, maar niet lang genoeg voor deze toepassing	●●● In theorie hoge efficiëntie, korte reactietijd en genoeg opslagduur voor deze toepassing, maar nog niet op grote schaal toegepast.	●● Locatie-afhankelijk, dus kan niet altijd in congestiegebieden geplaatst worden.	○ Te korte opslagduur.
Lithium-ion batterijen (stationair)	"TRL: 9 Kosten (CAPEX): € 400 - 500 / kWh Efficiëntie roundtrip: ~90%	●●● Hoge efficiëntie, korte reactietijd en langere opslagduur dan vliegwielen	○ Te korte opslagduur (meestal 1-2u, max. 8u)	○ Te korte opslagduur (meestal 1-2u, max. 8u)	●●● Hoge efficiëntie, korte reactietijd en lage marginale kosten maken batterijen goed geschikt voor netondersteunende diensten.	●● In sommige gevallen goed geschikt, maar niet geschikt voor alle vormen van congestie, vanwege te korte opslagduur en/of te hoge kosten.	X Te korte opslagduur (meestal 1-2u, max. 8u) en zelfontlading over langere periodes.
Lithium-ion batterijen (EVs)	TRL: 9-11 (voor toepassing in auto's, nog niet V2G) Kosten (CAPEX) : € 700 - 900 / kWh (inclusief auto) Efficiëntie roundtrip: ~90%	●●● Hoge efficiëntie, korte reactietijd en langere opslagduur dan vliegwielen. Aandachtspunt zijn de knelpunten voor V2G die benoemd zijn in paragraaf 4.3.1.	○ Te korte opslagduur (meestal 1-2u, max. 8u)	○ Te korte opslagduur (meestal 1-2u, max. 8u)	●●● Hoge efficiëntie, korte reactietijd en lage marginale kosten maken batterijen goed geschikt voor netondersteunende diensten (mits meerdere EVs gekoppeld kunnen worden tot 'virtual machine')	●● In sommige gevallen goed geschikt, maar niet geschikt voor alle vormen van congestie, vanwege te korte opslagduur en/of te hoge kosten.	X Te korte opslagduur (meestal 1-2u, max. 8u) en zelfontlading over langere periodes.

Legenda

Goed geschikt ●●●

Minder goed geschikt ●●

Niet goed geschikt ○

Ongeschikt X

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-ondersteuning	Congestie verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Elektriciteitsopslag							
Flowbatterijen	TRL: 8 Kosten: onbekend "long cycle life, unlimited energy capacity, low energy density" (IEA)	●●● Relatief hoge efficiëntie, relatief korte reactietijd en voldoende lange opslagduur.	●●● Opslagduur: in theorie onbeperkt te schalen, maar huidige systemen hebben maar 4u opslagduur.	○ Te korte opslagduur.	●●● Iets lagere efficiëntie en hoger ruimtegebruik dan li-ion batterijen, maar wel korte reactietijd en lage marginale kosten.	●●● In principe voldoende opslagcapaciteit, maar kosten zijn nog onvoldoende duidelijk en er zijn nog weinig systemen geïnstalleerd.	○ Te korte opslagduur, maar weinig zelfontlading over langere periodes.
Liquid CO ₂	TRL: onbekend Kosten: onbekend Efficiëntie roundtrip: 45 - 75% (afhankelijk van techniek)	●● Efficiëntie lager dan andere geschikte opties in dit tijdvak.	●●● Voldoende lange opslagduur, maar lagere efficiëntie dan andere opties in dit tijdvak.	●● Opslagduur waarschijnlijk niet toereikend.	●● Efficiëntie lager dan andere geschikte opties in dit tijdvak.	●● In principe voldoende opslagcapaciteit, maar nog weinig projecten gerealiseerd en lagere efficiëntie dan andere geschikte opties.	○ Te korte opslagduur.

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-onder-steuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Moleculenopslag							
Biobrandstoffen voor transport (bio-ethanol, kerosine etc.)	TRL: 11 Kosten: zeer laag, vergelijkbaar met benzine-opslag	○ Opslag van biobrandstoffen en onttrekken uit de opslag kan snel en met weinig energieverlies. De productie van de biobrandstoffen kent echter wel veel energieverlies. Daarom is het beter deze alleen te gebruiken in sectoren waar geen alternatief voor is.	●● Geschikt voor zeer lange opslag tegen zeer lage kosten. Kent wel hoge energieverliezen, dus daarom beter alleen te gebruiken voor langere termijn-opslag.	●●● Geschikt voor zeer lange opslag tegen zeer lage kosten.	X Opslag van biobrandstoffen speelt geen rol bij de balancerings van het elektriciteitsnet.	X Opslag van biobrandstoffen speelt geen rol bij netcongestieverlichting.	●●● Deze vloeistoffen kunnen in bestaande tankers voor olie-reserves worden opgeslagen.

Legenda

Goed geschikt ●●●

Minder goed geschikt ●●

Niet goed geschikt ○

Ongeslacht X

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-onder-steuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Moleculenopslag							
Groen gas of synthetisch methaan in zoutcavernes	TRL: 6 Kosten per opgeslagen hoeveelheid: € 0,015 / kWh + energiekosten	○ Ondergrondse gasopslag is momenteel de enige manier in Nederland om zeer grote hoeveelheden energie op te slaan. Opslag in zoutcavernes toont snellere reactiesnelheden dan in gasvelden. Voor korte periodes is opslag in de vorm van elektriciteit of warmte echter efficiënter.	●● Geschikt om dagen/ weken/ maanden te overbruggen.	●●● Geschikt voor seizoenopslag.	●● Doormiddel van gasopslagen te combineren met gascentrales kan het net worden gebalanceerd op momenten dat er onvoldoende elektriciteit wordt opgewekt. Het is echter geen CO ₂ -vrije optie (tenzij alle CO ₂ wordt afgevangen, of in het geval van synthetische methaan CO ₂ is afgevangen voor de productie). Elektriciteitsopslag is beter geschikt om deze functies te vervullen vanwege de hogere efficiënties en het gebrek aan broeikasgasemissies.	○ Helpt niet voor lokale congestieproblemen.	●● We hebben in NL geen strategische voorraden omdat ze te duur zijn, maar in principe zouden ze kunnen worden aangelegd.
Groen gas of synthetisch methaan in aardgasvelden.	TRL: 11 Kosten per opgeslagen hoeveelheid: € 0,01 - 0,05 / kWh (afhankelijk van opslagduur)	○ Ondergrondse gasopslag is momenteel de enige manier in Nederland om zeer grote hoeveelheden energie op te slaan. Opslag in zoutcavernes toont snellere reactiesnelheden dan in gasvelden. Voor korte periodes is opslag in de vorm van elektriciteit of warmte echter efficiënter.	●● Geschikt om dagen/ weken/ maanden te overbruggen.	●●● Geschikt voor seizoenopslag.	●● Doormiddel van gasopslagen te combineren met gascentrales kan het net worden gebalanceerd op momenten dat er onvoldoende elektriciteit wordt opgewekt. Het is echter geen CO ₂ -vrije optie (tenzij alle CO ₂ wordt afgevangen, of in het geval van synthetische methaan CO ₂ is afgevangen voor de productie). Elektriciteitsopslag is beter geschikt om deze functies te vervullen vanwege de hogere efficiënties en het gebrek aan broeikasgasemissies.	○ Helpt niet voor lokale congestieproblemen.	●● We hebben in NL geen strategische voorraden omdat ze te duur zijn, maar in principe zouden ze kunnen worden aangelegd.

Legenda

Goed geschikt ●●●

Minder goed geschikt ●●

Niet goed geschikt ○

Ongeschikt X

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-onder-steuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Moleculenopslag							
Waterstofderivaten (Ammoniak, methanol en LOHCs)	TRL: 9 - 11 Kosten: onbekend	○ Niet geschikt voor zeer korte opslag omdat waterstof verbonden is aan chemische stof en het vrij maken kost tijd. Daarbij komt dat de energie-efficiëntie afneemt met elke extra verwerkingsstap.	●● Kan worden ingezet voor transport en langer durende opslag.	●●● Kan worden ingezet voor transport van energie en langer durende opslag.	●● Sommige derivaten kunnen direct worden verbrand in bestaande elektriciteitscentrales om diensten te bieden aan het net. Elektriciteitsopslag is echter beter geschikt om deze functies te vervullen vanwege de hogere efficiënties.	○ Helpt niet voor lokale congestieproblemen.	●●● Kan eventueel worden ingezet voor strategische voorraden (ter vervanging van olie strategische voorraden).
Waterstofgas in zoutcavernes	TRL: 5-6 voor cyclische opslag als energetische toepassing Kosten: € 0,17 - 0,65 / kWh	●● Snelle injectie- en productiesnelheden (in de orde van seconden), maar lage energie-efficiëntie vergeleken met elektriciteitsopslag en warmte-opslag.	●● Cavernes kunnen worden gerbuikt om waterstof meerdere dagen op te slaan.	●●● Kan ook worden ingezet voor seizoensopslag.	●● In combinatie met waterstof-gestookte elektriciteitscentrales kunnen opslagen het net helpen balanceren. Elektriciteitsopslag is echter beter geschikt om deze functies te vervullen vanwege de hogere efficiënties.	○ Helpt niet voor lokale congestieproblemen.	●● We hebben in NL geen strategische voorraden omdat ze te duur zijn, maar in principe zouden ze kunnen worden aangelegd.
Waterstofgas in gasvelden	TRL 3-4 voor pure waterstofopslag Kosten: € 0,03 - 0,6 / kWh	○ Gasvelden zijn niet geschikt voor snelle reactietijden (behalve als er meerder putten worden gemaakt, maar dat gaat ten koste van de totale kosten). Zoutcavernes zijn beter geschikt voor dit doel.	●● Gasvelden kunnen worden gebruikt om waterstof meerdere dagen op te slaan (in theorie, TRL nog laag).	●●● Zeer geschikt voor seizoensopslag, grote volumes (groter dan zoutcavernes).	●● In combinatie met waterstof gestookte elektriciteitscentrales kunnen opslagen het net helpen balanceren. Elektriciteitsopslag is echter beter geschikt om deze functies te vervullen vanwege de hogere efficiënties.	○ Helpt niet voor lokale congestieproblemen.	●● We hebben in NL geen strategische voorraden omdat ze te duur zijn, maar in principe zouden ze kunnen worden aangelegd.

Legenda

Goed geschikt ●●●

Minder goed geschikt ●●

Niet goed geschikt ○

Ongeschikt ✕

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-onder-steuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Molecuul opslag							
Waterstof in vaste stoffen	TRL: 3 - 5 Kosten: onbekend	○ Niet geschikt voor zeer korte opslag omdat waterstof verbonden is aan chemische stof en het vrij maken kost tijd. Daarbij komt dat de energie-efficiëntie afneemt met elke extra verwerkingsstap.	●● Kan worden ingezet voor transport en langer durende opslag.	●●● Kan worden ingezet voor transport van energie en langer durende opslag.	●● Sommige stoffen kunnen direct worden verbrand om diensten te bieden aan het net. Elektriciteits-opslag is echter beter geschikt om deze functies te vervullen vanwege de hogere efficiënties.	○ Helpt niet voor lokale congestieproblemen.	●●● Kan eventueel worden ingezet voor strategische voorraden.

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-onder-steuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Warmte opslag							
Lage temperatuur bodemenergie (open, gesloten)	TRL: 9-11 Kosten: € 0,5 - 1 / kWh	○ Dimensionering is middellange-termijn tot seizoensopslagtermijn.	●● Koudere periode of Dunkelflaute kunnen worden opgevangen, maar voornamelijke toepassing ligt bij seizoensopslag.	●●● Compleet seizoen kan overbrugd worden.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Warmte en/of koude kan lang worden opgeslagen en op elk gewenst moment gebruikt worden. Is echter lastig transporteerbaar.
Midden- en hoge temperatuursopslag bodem (aquifers, ATES)	TRL: 7-8 Kosten: € 0,2-0,3 / kWh	○ Dimensionering is middellange-termijn tot seizoensopslagtermijn.	●● Koudere periode of Dunkelflaute kunnen worden opgevangen, maar voornamelijke toepassing ligt bij seizoensopslag.	●●● Compleet seizoen kan overbrugd worden.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Warmte en/of koude kan lang worden opgeslagen en op elk gewenst moment gebruikt worden. Is echter lastig transporteerbaar.
Hoge temperatuur gesloten bodemenergie (boreholes, BTES)	TRL: 7-8 Kosten: € 0,25-0,7 / kWh	○ Dimensionering is middellange-termijn tot seizoensopslagtermijn.	●● Koudere periode of Dunkelflaute kunnen worden opgevangen, maar voornamelijke toepassing ligt bij seizoensopslag.	●●● Compleet seizoen kan overbrugd worden.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Warmte en/of koude kan lang worden opgeslagen en op elk gewenst moment gebruikt worden. Is echter lastig transporteerbaar.

Legenda

Goed geschikt ●●●

Minder goed geschikt ●●

Niet goed geschikt ○

Ongeschikt X

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-onder-steuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Warmteopslag							
Warmteopslag in mijnen	TRL: 7-8 Kosten: maatwerk, te weinig data	○ Dimensionering is middellange-termijn tot seizoensopslagtermijn.	●● Koudere periode of Dunkelflaute kunnen worden opgevangen, maar voornamelijke toepassing ligt bij seizoensopslag.	●●● Compleet seizoen kan overbrugd worden.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Warmte en/of koude kan lang worden opgeslagen en op elk gewenst moment gebruikt worden. Is echter lastig transporteerbaar.
Kuil thermische opslag (PTES)	TRL: 7-8 Kosten: € 0,4 - 1,4 / kWh	○ Dimensionering is middellange-termijn tot seizoensopslagtermijn	●● Afhankelijk van dimensionering.	●●● Compleet seizoen kan overbrugd worden.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Warmte en/of koude kan lang worden opgeslagen en op elk gewenst moment gebruikt worden. Is echter lastig transporteerbaar.
Grote warmwater tank (lange-termijn, lager vermogen)(TTES)	TRL: 6-7 Kosten: € 2 - 4 / kWh	○ Kan dag en nacht opvangen of een koudere dag, maar toepassing ligt in middelange-termijn- of seizoensopslag.	●● Koudere periode of Dunkelflaute kunnen worden opgevangen, maar voornamelijk toepassing lijkt bij seizoensopslag.	●●● Compleet seizoen kan overbrugd worden.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Warmte en/of koude kan lang worden opgeslagen en op elk gewenst moment gebruikt worden. Is echter lastig transporteerbaar.
Thermochemische materialen (TCM)	TRL: 4-6 Kosten: € 10 - 130 / kWh	●● Beschikbare volume aan warmte is voldoende voor korte- en middel-lange termijn. Grotere energiedichtheid dan water. Mogelijkheid om hogere temperatuur (>100 graden Celcius) op te slaan dan in water. Kosten zijn nu nog te hoog voor korte-termijn toepassing en de reactietijd is lang, vanwege de chemische productietijd.	●●● Beschikbare volume aan warmte is voldoende voor korte- en middel-lange termijn. Economische potentieel nog onduidelijk en afhankelijk van dimensionering. Nog volop in ontwikkeling.	●●● Compleet seizoen kan overbrugd worden. Economische potentieel nog onduidelijk en afhankelijk van dimensionering. Nog volop in ontwikkeling.	●● Afhankelijk van toepassing.	●● Afhankelijk van toepassing.	●● Overbrugging van max enkele weken afhankelijk van dimensionering. Nog volop in ontwikkeling. Is mogelijk wel makkelijker te transporteren dan warme vloeistoffen.

Legenda

Goed geschikt ●●●

Minder goed geschikt ●●

Niet goed geschikt ○

Ongeslacht X

Techniek ↓	Functie →	Vraag en aanbod van energie afstemmen			Net-onder-steuning	Congestie-verlichting	Strategische voorraden
	Termijn →	Kort	Middellang	Lang	Kort	Middellang	Lang
 Warmteopslag							
Vaste stof (beton, steen e.d.)	TRL: 6-7 Kosten: € 15 - 40 /kWh	●●● Beschikbare volume aan warmte is voldoende voor korte- en middel-lange-termijn. Grotere energiedichtheid dan water. Mogelijkheid om hogere temperatuur (>100 graden Celcius) op te slaan dan in water.	●●● Beschikbare volume aan warmte is voldoende voor korte- en middel-lange-termijn. Grotere energiedichtheid dan water. Mogelijkheid om hogere temperatuur (>100 graden Celcius) op te slaan dan in water.	●● Afhankelijk van gebruik van medium en volume van de opslag.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Overbrugging van max enkele weken afhankelijk van dimensionering en isolatie. Is ook lastig transporteerbaar.
Faseovergang (PCM)	TRL: 6 -9 Kosten: € 53 - 106 /kWh	●●● Beschikbare volume aan warmte is voldoende voor korte- en middel-lange termijn. Grotere energiedichtheid dan water.	●●● Beschikbare volume aan warmte is voldoende voor korte- en middel-lange termijn. Grotere energiedichtheid dan water.	○ Te korte opslagduur (max. enkele dagen). Afhankelijk van dimensionering en isolatie.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	●● Eventueel aanvullend verdienmodel via power-to-heat.	○ Te korte opslagduur (max. enkele dagen). Afhankelijk van dimensionering en isolatie.
Grote warmwater tank (korte-termijn, groot vermogen)(TTES)	TRL: 9-10 Kosten: < € 1,3 /kWh	●●● Kan binnen minuut opstarten.	●●● Voorziet in beschikbaarheid warm water en stoom over uren en dagen heen.	○ Capaciteit onvoldoende, verliezen te groot.	●●● Via power-to-heat een belangrijk verdienmodel.	●●● Mogelijk via power-to-heat.	○ Niet van toepassing.
Kleine warmwater tank (woning)(TTES)	TRL: 9-11 Kosten: € 20 - 50 / kWh	●●● Kan binnen minuut opstarten.	●●● Voorziet in deel warmtebehoefte door de dag heen.	○ Capaciteit onvoldoende, verliezen te groot.	●●● Via power-to-heat een belangrijk verdienmodel.	●●● Mogelijk via power-to-heat.	○ Niet van toepassing.

Korte-termijn	1 seconde - 1 dag
---------------	-------------------

Middellange-termijn	1 dag - 1 week
---------------------	----------------

Lange-termijn	1 week - 1 jaar
---------------	-----------------

8.3 Bijlage 3: Energieopslag in referentielanden

Wereldwijd is er toenemende aandacht voor de rol van energieopslag in de energietransitie. De Europese Commissie vraagt lidstaten om acties te definiëren die barrières voor energieopslag wegnemen en om de flexibiliteitsbehoefte beter in kaart te brengen (EC, 2023). Er zijn landen die kwantitatieve beleidsdoelen hebben gesteld, zoals Spanje en Griekenland, waarbij de nadruk vaak ligt op elektriciteitsopslag. In de ons omringende landen zijn geen nationaal bindende doelen gesteld voor (duurzame) energieopslag, en de prioriteiten verschillen per land.

8.3.1 Duitsland⁴⁵

In Duitsland is geen specifiek beleid geformuleerd voor energieopslag. De implementatie van elektriciteitsopslag wordt niet in algemene zin gestimuleerd, zoals dat voor elektriciteitsopwekking jarenlang wel is gedaan. Wel zijn opslagsystemen in Duitsland deels vrijgesteld van de tarieven voor het gebruikmaken van het elektriciteitsnet, en kunnen voor thuisbatterijen goedkope leningen worden aangevraagd bij staatsbank KfW. Voor warmteopslag is er in het kader van de flexibilisering van WKK-installaties een investeringssubsidie beschikbaar van tot € 10 mln per project. Ook wordt er gewerkt aan het definiëren van de juridische positie van energieopslag, volgend uit de Europese richtlijn voor ordening van de elektriciteitsmarkt. Hierin ligt de nadruk op het in de tijd verplaatsen van het gebruik van elektriciteit, maar wordt ook ruimte gelaten voor conversie naar andere energiedragers.

In het innovatiedomein is veel aandacht voor opslag, met 50 nieuw gestarte binnenlandse onderzoeksprojecten in 2020. Duitsland is ook actief betrokken bij twee IPCEI's over batterijen en een IPCEI over ondergrondse waterstofopslag. Vanuit het 7^e energie-onderzoeksprogramma van het 'Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz' (BMWK) zijn sinds 2019 tien grootschalige living labs van start gegaan op de thema's sectorkoppeling (in Nederland vaker systeemintegratie genoemd), grootschalige elektriciteitsopslag en energie-optimalisatie in de gebouwde omgeving. Uit deze innovatieprojecten worden aandachtspunten in de ontwikkeling van wet- en regelgeving gehaald, al gebeurt dit ook in directe consultatie met de sector zelf.

De belangrijkste sectororganisatie voor energieopslag (BVES) is in binnen- en buitenland actief om best practices te delen en inzicht te geven in de stand van de sector. BVES verzamelt marktdata zoals omzet en aantallen installaties, en splitst dit uit in de marktsegmenten residentieel, commercieel-industrieel, en utiliteit. Deze data laten zien dat ongeveer de helft van de sectoromzet komt van thuisinstallaties, waarbij de sterkste groei ligt bij thermische systemen. Op utiliteitsniveau heeft Duitsland al veel capaciteit aan waterkracht, maar er is ook veel aandacht voor batterijsystemen om de congestie op het hoogspanningsnet (met name noord-zuid) te mitigeren en grote (snel)laadstations te realiseren. Ook in grootschalige warmteopslag worden stappen gezet, met voorbeelden als de in aanbouw zijnde watertank van 2600 MWh voor een Berlijns warmtenet en de realisatie van een warmteopslag in vulkanisch gesteente in Hamburg. Voor ondergrondse waterstofopslag worden in het kader van de IPCEI enkele onderzoeken gedaan.

8.3.2 België⁴⁶

In België wordt energieopslag vooral gezien vanuit het perspectief van elektrificatie en de toenemende behoefte aan flexibiliteit in het elektriciteitssysteem. Flexibiliteit krijgt al enkele jaren aandacht in beleidsstukken van de Vlaamse overheid, met het eind 2022 gepubliceerde 'Flexibiliteitsplan 2025' als meest prominente voorbeeld. Hierin wordt de aftrap gegeven om gericht beleid te ontwikkelen, en zijn eerste acties gedefinieerd over onder andere het in kaart brengen van de flexibiliteitsbehoefte, het creëren van draagvlak en bewustzijn, aanpassingen in wet- en regelgeving en de behoefte aan data en indicatoren. Ook de flexibiliteitspotentie van publieke eigendommen, waaronder gemalen en openbaar vervoer, wordt onderzocht.

⁴⁵ Gebruikte bronnen Duitsland: (IEA Technology Collaboration Program Energy Storage, 2021), (CMS Law, 2023), (ISEA, 2023), (DENA, 2023), (KfW, 2023) en (BAFA, 2023).

⁴⁶ Gebruikte bronnen België: (IEA Technology Collaboration Program Energy Storage, 2022), (FOD Economie, 2023), (Vlaamse regering, 2022), (Vlaamse regering, 2023), (FOD Economie, 2022), (Elia Group, 2021), (Elia Group, 2020)

Voor waterstof publiceerde de federale overheid in 2021 een visiedocument, dat eind 2022 werd aangescherpt. Hierin positioneert België zich als belangrijke Europese hub voor in- en uitvoer van waterstof en waterstofderivaten, en wordt de noodzaak om strategische opslagfaciliteiten aan te leggen aangestipt. De Belgische ondergrond wordt hiervoor in het visiedocument beperkt geschikt geacht, en met name de opslag van derivaten als ammoniak en methanol krijgen aandacht.

België beschikt reeds over substantiële elektriciteitsopslagcapaciteit in de vorm van waterkrachtcentrales. Daarnaast volgen de aankondigingen en realisaties van grootschalige Li-ion batterijen elkaar in rap tempo op, met de inauguratie van een 50 MW / 100 MWh systeem in Wallonië eind 2022 als meest recente voorbeeld. Het helpt hierbij dat aan het net gekoppelde opslaginstallaties in België reeds enkele jaren zijn vrijgesteld van een deel van de transmissienettarieven. Ook zijn in de capaciteitsveiling van netbeheerder Elia (vier jaar vooruit) enkele Megawatt afkomstig van batterijsystemen. Thuisbatterijen hebben in Vlaanderen recent een vlucht genomen met hulp van een tijdelijke subsidie: in 2022 ging het om enkele tienduizenden geïnstalleerde systemen. Deze subsidie is inmiddels weer gestopt, en de middelen zijn verlegd naar warmtepompboilers voor tapwater. Daarvan waren er in 2021 bijna 35.000 gerealiseerd. Het aantal geïnstalleerde zonneboilers in Vlaanderen bedroeg dat jaar meer dan 80.000.

Voor de financiering van innovatie bestaat in België op federaal niveau het energietransitiefonds. In de tender van eind 2022 is 25 miljoen beschikbaar, waarbij flexibiliteit en leveringszekerheid één van de drie pijlers is. Er wordt veel aandacht geschonken aan innovaties op het gebied van interconnectie, waaronder het plan voor een energie-eiland dat vanaf 2026 stapsgewijs in gebruik moet worden genomen. Energieopslag wordt vooral benoemd in de context van netbalanceren, en waterstof in relatie tot offshore wind. Op het gebied van warmte is samenwerkingsverband EnergyVille betrokken bij enkele projecten, waaronder het inmiddels afgeronde Europese Heatstore waarbij de potentie van verschillende soorten grootschalige warmteopslag wordt onderzocht. Doel hiervan is om met slimme aansturing van verschillende bronnen de inzet van gasboilers op de koudste dagen van het jaar zo veel mogelijk te beperken.

8.3.3 Verenigd Koninkrijk⁴⁷

In het Verenigd Koninkrijk staat energieopslag al enkele jaren op de beleidsagenda, en dan vooral in relatie tot de flexibilisering van het elektriciteitssysteem. In het kader van het 'Smart Systems and Flexibility Plan' zijn sinds 2017 enkele wijzigingen in wet- en regelgeving doorgevoerd die er aan hebben bijgedragen dat met name grootschalige batterijen sneller van de grond komen. De wijzigingen hadden onder andere betrekking op versimpeling van vergunningaanvragen, het wegnemen van dubbele lasten voor het gebruik van infrastructuur en het hervormen van markten voor het leveren van systeemdiensten. Ook in het geüpdatete plan in 2021 is veel aandacht voor het verbeteren van de juridische kaders en ordening van elektriciteitsmarkten. Zo onderzoekt toezichthouder Ofgem manieren om de netkosten voor opslag te laten reflecteren dat de impact op de infrastructuur beperkt is als er congestiediensten worden geleverd. In het kader van leveringszekerheid is de Britse overheid een consultatie gestart naar transport en opslag van waterstof, waarin onder andere bekeken wordt in hoeverre strategische planning en aangepaste wetgeving nodig zijn om deze waterstofinfrastructuur gerealiseerd te krijgen.

Mede als gevolg van de genoemde wijzigingen heeft batterijopslag een prominente rol gekregen in de Britse capaciteits- en flexibiliteitsmarkten. In de T-4 veiling (vier jaar vooruit) voor capaciteit in 2025/2026, ging er meer dan 1 GW naar grootschalige batterijen – 800 MW meer dan het jaar ervoor. Het aantal vergunningaanvragen voor dergelijke systemen, waarbij het typisch gaat om Li-ion batterijen van 1 of 2 uur, verdubbelde in 2021 ten opzichte van het jaar ervoor.

Voor wat betreft innovatie wordt in het Verenigd Koninkrijk veel nadruk gelegd op langeretermijn opslag (LDES), waarmee typisch systemen worden bedoeld die een halve dag tot enkele maanden energie kunnen leveren. In 2021 lanceerde de Britse overheid een tender voor de demonstratie van dit type technologieën, waaruit in totaal 10 projecten zijn geselecteerd. De gesubsidieerde projecten gaan onder andere over opslag

⁴⁷ Gebruikten bronnen VK: (IEA Technology Collaboration Program Energy Storage, 2021), (Harrison, 2022), (BEIS & Ofgem VK, 2021), (BEIS, 2022), (DESNZ, Ofgem & BEIS VK, 2021) en (DESNZ & BEIS VK, 2022).

van waterstof in metaalhydrides, mechanische elektriciteitsopslag met gewichten in een mijnschacht, offshore elektriciteitsopslag met behulp van perslucht, flowbatterijen op basis van lithium-zwavel, en residentiële warmteopslag in faseovergangsmateriaal (PCM). Naast het verstrekken van investeringssubsidie is de regeling ook bedoeld om beter inzicht te krijgen in niet-technische barrières voor de opschaling van langeretermijn opslag.

8.3.4 Denemarken⁴⁸

Energieopslag is in Denemarken een bekend thema. Er zijn vanuit het nationale beleid geen kwantitatieve doelen gesteld, maar er wordt wel al sinds 2014 informatie verzameld over een breed assortiment aan opslagtechnologieën. Het Deense energieagentschap houdt een technologiecatalogus bij, met als doel om een uniforme informatiebasis te bieden voor het maken van energiebeleid (ruimtelijke ordening, leveringszekerheid, innovatie). Grootschalige warmteopslag is in Denemarken een wijdverbreid fenomeen en wordt gezien als een belangrijke enabler voor de verduurzaming van warmtenetten. Kortere-termijn opslag stelt WKK's in staat om vooral elektriciteit te produceren op momenten van schaarste, efficiënter te opereren en stabiele prijzen te kunnen rekenen. Ook van lange-termijn warmteopslag zijn in Denemarken reeds enkele voorbeelden te vinden, met name in de vorm van grote waterreservoirs in gegraven kuilen (Pit Thermal Energy Storage).

Ook op het terrein van waterstof is Denemarken actief. Begin 2022 kwam het Deense parlement tot overeenstemming over het ondersteunen van power-to-x, waarbij onder andere is afgesproken dat er in de loop van 2023 een framework komt voor de realisatie en het beheer van waterstofinfrastructuur. In dit kader wordt onderzocht welke rol netbeheerder Energinet kan spelen met betrekking tot waterstofopslag, concreet kijkend naar de colocatie van grootschalige waterstofproductie, ondergrondse waterstofopslag en ondergrondse perslucht opslag.

Innovatie wordt gestimuleerd via twee programma's, het Innovation Fund (€ 40 mln / jaar) voor R&D en het Energy Technology Development and Demonstration Program (EUDP) (€ 100 mln / jaar) voor pilots en demonstratieprojecten. Het EUDP heeft power-to-fuels en warmteopslag als prioriteiten aangewezen en meerdere opslagprojecten gefinancierd, waaronder 3 van de 6 gegraven waterreservoirs. Sinds 2021 is in Denemarken ook het publiek-privaat samenwerkingsverband 'Danish Center for Energy Storage' actief, waarin de ontwikkeling van energieopslag wordt gecoördineerd en gefocust. Op de gebieden batterijtechnologie, warmteopslag, power-to-x en systeemintegratie werken partijen uit de hele waardeketen, van onderzoek tot industrie, samen om kennis te delen en consortia te vormen.

⁴⁸ Gebruikte bronnen Denemarken: (IEA Technology Collaboration Program Energy Storage, 2022), (DLA Piper, 2022), (DEA, 2020),

Overzichtstabel

Onderstaande tabel geeft een indicatieve weergave van de mate waarin er per land op beleidsniveau aandacht is voor de drie opslagvormen.

Tabel 11 Overzicht energieopslag beleid in referentielanden

	VK	Duitsland	Denemarken	België
Aantal inwoners	±68 miljoen	±83 miljoen	±6 miljoen	±12 miljoen
Subsidies	£68M LDES prototyping en demo (TRL 4-7), 10 projecten totaal £45M onderzoek naar opslag (actieve projecten)	- IPCEI Batteries innovation - IPCEI Hydrogen and underground storages 90M€ onderzoek naar grid/storage/sector coupling in 2020 - CAPEX-subsidie thermische opslag bij WKKs - KfW-lening voor batterijen t.b.v. zelfconsumptie	€140M/j voor RDD rond energie (EUDP, Innovation Fund)	€30M voor opslag R&D in 2020 €25M voor flexibiliteit in Energietransitiefonds eind 2022 - CAPEX-subsidie op thuisbatterijen per 2023 verschoven naar warmtepompboilers (Vlaanderen)
Beleids-instrumenten, prioriteiten en marktordening	Smart Systems and Flexibility Plan: aanpassen wetten en marktordening - Capaciteitsmarkten (T-4, T-1) - CfD voor opwekking met regels over rol opslag - Opslag betaalt als opwekking voor netgebruik - LDES tender verzamelt info over barrières opschaling Consultatie waterstofopslag in 2025 - Lokale vergunningverlening voor groot-schalige e-opslag	- Hydrogen Strategy and Technology Initiative - Vrijstelling deel nettarieven voor netgekoppelde opslag	- Hoge belasting op fossiele brandstoffen - Uitgebreide technologie-catalogus t.b.v. een uniforme basis voor beleid - Politieke overeenkomst over eerste stappen P2X-implementatie - PPP gestart met focus-groepen batterijen, TES, P2X en integratie	Flexibiliteitsplan 2025 (Vlaanderen) - Nettarieven per 2023 afhankelijk van de maandgemiddelde piek (Vlaanderen) - Vrijstelling deel nettarieven voor netgekoppelde opslag - Capaciteitsmarkt (T-4) Visie en strategie waterstof update okt-22
Nationale doelen	Geen	Geen	Geen	Geen
Capaciteit	- PHS: 3 GW - Grote Li-ion: 1 GW - LAES (vloeibare luchttopslag): 5 MW - CAES (persluchtinstallaties): 150 kW	- PHS: 7 GW - Grote Li-ion: 1 GW - Thuisbatterijen: 2.9 GW, 580.000 installaties	- TTES: veel - PTES: 6 - BTES: 1 (600 kW) - CAES/UHS: 1 in ontwikkeling	- PHS: 1.3 GW - Grote LiB: Enkele 100en MW - Thuisbatterijen: 35.000

8.4 Bijlage 4: Elektriciteitsopslag, overzicht technieken

Tabel 12 Overzicht ontwikkeling elektriciteitsopslag batterijen

	Batterijsystemen				
	Huidige technieken (Li-ion)			Innovatieve technieken	
	Thuisbatterij	Grote batterij bij opwekker/verbruiker	Stand-alone batterij	Flowbatterij	Zoutwaterbatterij
Vermogen	2-10 kW (0,002-0,01 MW)	0,3-10MW	Ca. 0,3 -3 MW (buurtbatterij), 5-1.000+ MW (grote batterij)	1-100 MW	Enkele kilowatten
Capaciteit	2-40 kWh	0,3-40 MWh	0,6-1.000 + MWh	1-1.000+ MWh	1-100 kWh
Tijdsduur ontladen op vol vermogen	1-4 uur	1-4 uur	2-4 uur	4-100 uur	2 uur en meer
Toepasbaarheid op schaalniveau	woningniveau	Alle niveaus	Van buurtniveau tot hoogspanningsnet	Alle niveaus	Alle niveaus
Technische realisatie voor 2030	Zeker te realiseren	Zeker te realiseren	Zeker te realiseren	Mogelijk te realiseren	Mogelijk te realiseren
Investeringskosten	Ca. 700-1.200 euro/kWh plus 500-1000 euro installatie-kosten	500 euro/kWh (stationair > 1 MW) tot 700 euro/kWh (mobiel)	Ca. 700 euro/kWh voor buurtbatterij, ca. 380 euro/kWh voor grote stand-alone batterij (60 MW, 240 MWh)	Ca. 500 euro/kWh	Duurder dan Li-ion, geen betrouwbare kostenschatting beschikbaar
Efficiëntie	Ca. 90%	Ca. 90%	Ca. 85%	Ca. 70%	80-90% afhankelijk van laadsnelheid
Doorlooptijd	<1 jaar	1-2 jaar	1-2 jaar	1-2 jaar als techniek beschikbaar is	1-2 jaar als techniek eenmaal beschikbaar is
Ruimtelijke impact	<1 m ² , past meestal in meterkast	30-80 m ² /MWh	Ca. 25 m ² /MWh voor stand-alone batterij	Ca. 10 m ² per MWh	Geen betrouwbare cijfers, maar fors groter ruimtebeslag dan Li-ion.
Veiligheidsaspecten	Brandveiligheid bij oudere types Li-ion. De nieuwe lithium-ijzer-fosfaat batterijen zijn veel veiliger.	Er is een circulaire "Risicobeheersing Li-ion energiedragers" beschikbaar met veiligheidsvoorschriften in afwachting van de PGS37-2. Brandveiligheid is het voornaamste aandachtspunt. Voor realisatie van buurtbatterij is een NEN-norm opgesteld.		Nog geen normen. Veiliger dan Li-ion, want componenten zijn vloeibaar en niet ontvlambaar.	Geen, bevat enkel zout en water.

Tabel 13 Overzicht ontwikkeling elektriciteitsopslag kinetische energie

Vliegwielen	
Vermogen	1 MW
Capaciteit	30 kWh
Tijdsduur ontladen op vol vermogen	Enkele minuten
Toepasbaarheid op schaalniveau	laagspanningsnet
Technische realisatie voor 2030	zeker te realiseren
Investeringskosten	200-250 €/kWh afhankelijk van het materiaal
Efficiëntie	92%
Doorlooptijd	1-2 jaar
Ruimtelijke impact	533 m ² per MWh
Veiligheidsaspecten	veilig en haast geruisloos

Tabel 14 Overzicht ontwikkeling elektriciteitsopslag potentiële energie en conversie waterstof

	CAES (persluchtinstallaties)	LAES (vloeibare luchtopslag)	Ondergrondse pomp- accumulatiecentrale (O-PAC)	Waterstof conversie
Vermogen	100-300 MW	100-300 MW	1,4 GW	1 MW – 10 GW
capaciteit	400-4000 MWh	600- 10000+ MWh	8,4 GWh	0,125 tot 0,25 TWh
tijdsduur ontladen op vol vermogen	6-12 uur	6 uur en langer	6 uur	enkele dagen tot enkele maanden
toepasbaarheid op schaalniveau	Hoogspanningsnet	Hoogspanningsnet	Hoogspanningsnet	Middenspanningsnet – hoogspanningsnet
Technische realisatie voor 2030	zeker te realiseren	Vermoedelijk te realiseren	ja mits start in 2023	zeker te realiseren
investeringskosten	150 €/kWh	300 – 600 €/kWh	41 €/MWh	onbekend
Efficiëntie	D-CAES: 60%; A-CAES: 70%	70-80%	80%	~40%
Doorlooptijd	2,5 jaar bij bestaande caverne, >5jaar als nieuwe caverne nodig is	2-5 jaar	>5 jaar	2,5 jaar bij bestaande caverne, >5jaar als nieuwe caverne nodig is
Ruimtelijke impact	11 m ² /MWh	16 m ² /MWh	Ruimte voor waterreservoir bovengronds, verder met name impact in de ondergrond	7 m ² /MWh
Veiligheidsaspecten	Kans op verzakking van de bodem en seismische activiteiten	Ontvlammings- en explosiegevaar van zuurstof in extreem gekoelde lucht, maar vergeleken met vloeibaar aardgas is dit risico een stuk kleiner. Als het verwarmen van de lucht met duurzame energie gedaan wordt stoot LAES geen CO ₂ uit.	Bodem moet geschikt zijn	Mogelijk risico op bodemdaling, seismiciteit of lekkage van waterstof ondergronds.

8.5 Bijlage 5: Moleculenopslag, overzicht energiedragers en ontwikkelingen

Vloeibare waterstof

Op het moment zijn ruimtevaartorganisaties zoals NASA degenen die in het bezit zijn van de [grootste opslagfaciliteiten](#) voor vloeibare waterstof. (Cryogenic Society, 2022) Opslag van vloeibare waterstof geschied momenteel in het algemeen nog op erg kleine schaal: grofweg 6 tot 100 m³ (Air Products, 2007). De grootste tank van NASA heeft een capaciteit van ongeveer 4700 m³. (Abdin, 2019), (Allevi, 2017)

De eerste plannen voor vloeibare waterstof in NL zijn wel te vinden in het H₂Sines project waarbij vloeibare waterstof van Portugal naar de haven van Rotterdam vervoerd wordt over zee. Vopak, Shell en Engie nemen deel aan dit project voor de import en opslag van de vloeibare waterstof in de haven. In 2027 zou de eerste scheepslading moeten arriveren. (H2Platform, 2022)

Ondanks inspanningen om zo goed mogelijk te isoleren, blijft 'boil-off' van de waterstof een aanwezig probleem. Warmte uit de externe omgeving gaat de opslagtank in en hierdoor verdampt een gedeelte van de vloeibare waterstof. Als er geen optie is om de verdampte waterstof te laten ontsnappen naar de omgeving, zal de druk in de opslagtank stijgen. Niet alleen bij opslag, maar ook bij overdracht van vloeibare waterstof van het ene opslagmedium naar het andere is boil-off een probleem. (Petitpas, 2018)

Het vloeibaar maken van waterstof een energetisch verlies heeft van 20 tot 30% (Deloitte, 2022). Voor langere tijd vloeibare waterstof opslaan kost energie, aangezien een lage temperatuur behouden moet worden en er sprake is van boil-off. Hier zijn vooralsnog geen precieze getallen van beschikbaar bij ons.

Ammoniak

De grootschalige opslag en transport van ammoniak als algehele technologie is volwassen. Voor ammoniakopslag is er een handleidingen opgesteld in de vorm van Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS), namelijk PGS12 "Ammoniak – Opslag en Verlading". Ammoniak opslag vindt in het algemeen plaats in vloeibare vorm. Ammoniak gas is vloeibaar te maken door deze te koelen (< -35°C) of onder druk te zetten (> 10 bar). De gekoelde Opslagtanks hebben in het algemeen grote volumes (circa 60.000 m³). De externe veiligheid wordt via externe veiligheid afstaande geborgd.

Als energiedrager heeft ammoniak twee opties: de conversie naar waterstof of direct gebruik. Voor de directe toepassing kan gedacht worden aan ammoniak turbines, ammoniak brandstofcellen, en andere technieken die gebruik van de energie in ammoniak voor elektriciteit, warmte of beweging mogelijk maken. De meeste van deze technieken staan momenteel in de kinderschoenen, maar conventionele ammoniak krakers bestaan en worden onder andere gerealiseerd door Nederlandse bedrijven zoals Duiker. Het endotherme kraakproces wordt hier verwarmd door ammoniak verbanding.

Vergeleken met andere energiedragers draagt ammoniak een extra gevaar met zich mee: het is giftig en gasvormig onder normale omstandigheden. Recente ongelukken met ammoniaktransport tonen het gevaar van een mobiele gifwolk. Zulke gevaren kunnen ook optreden bij falen van opslagfaciliteiten. Huidige zorgen kunnen vergroot worden bij een energietransitie waarin ammoniak een grote rol zal spelen. De productie van ammoniak heeft een efficiëntie verlies van 20-30%. Mocht ammoniak opgeslagen worden voor waterstofgebruik, dan vindt er nogmaals een efficiëntie verlies plaats 30-40% (Deloitte, 2022) Voor langere tijd vloeibare ammoniak opslaan kost energie, aangezien een lage temperatuur behouden moet worden.

LOHC

Het concept van LOHC's is chemisch gezien redelijk eenvoudig. Een organische verbinding wordt door een hydrogenering (toevoegen van waterstof) gereduceerd of "verzadigd" met waterstof. De daarbij ontstane nieuwe verbinding is een normale stabiele chemische stof die vervoerd en opgeslagen kan worden, ook gedurende langere tijd. Waterstof is gebonden aan de rest van het molecuul, het is niet geadsorbeerd in het

materiaal en kan daardoor ook niet plotseling vrijkomen. Door de omgekeerde reactie, een dehydrogenering, kan waterstof weer aan de verbinding onttrokken worden. Dit gebeurt meestal met behulp van verhoogde temperatuur en vaak ook met een katalysator. De reactie is endotherm (heeft warmte nodig) en de oorspronkelijke stof (carrier) wordt hierbij terug gevormd en is weer beschikbaar voor een nieuwe cyclus.

Grootschalige industriële/commerciële toepassing van deze vorm van waterstofopslag is nog niet bekend in de wereld. De industriële beschikbaarheid van de meeste genoemde verbindingen varieert en is afhankelijk van de huidige toepassingen, zo die al bestaan.

Voorbeelden van LOHC's die zijn onderzocht en in de literatuur als kansrijk worden beschouwd zijn: toluen, benzyltolueen, difenyltolueen, N-ethylcarbamaat, Naftaleen en Mierenzuur.

Een belangrijke kostenpost in de economische analyse van de LOHC cyclus is de prijs van de waterstofdrager in combinatie met de levensduur en stabiliteit van de drager. Ook de doelstelling van de opslag (kortdurend flexibel met veel cycli, of seizoen/reserve opslag) maakt verschil voor kosten en de te kiezen drager.

Het ontwikkelstadium van de LOHC's is in de demonstratiefase/opschaling. Echter, er is nog een groot verschil in ontwikkelstadium tussen verschillende dragers.

Een bekend voorbeeld van een LOHC is de ontwikkeling van Chiyoda/Mitsubishi waar toluen wordt gebruikt. Er zijn proeven gedaan waarbij grote hoeveelheden (>100 ton waterstof) over grote afstanden (Brunei-Japan) zijn vervoerd en waarbij de cyclus volledig is getest. Ook het H₂A project is een toonaangevend initiatief. In dit project wordt benzyltolueen gebruikt om waterstof te transporteren en op te slaan.

De belangrijkste ontwikkelingen voor het gebruik van LOHC's worden verwacht op proces technisch niveau. De componenten vergen geen bijzondere materialen of veiligheidsvoorzieningen in de opslag of procesinstallaties en de reacties zijn voor andere doeleinden veel toegepast (petrochemie). Voor de efficiëntie van de cyclus zal thermische integratie belangrijk zijn en de combinatie van katalysator en waterstof drager. Vraagstukken die reesteren zijn van belang zijn voor de economische haalbaarheid van het systeem, maar niet zozeer voor de werking van de stappen aan sich. (Eypasch, 2017), (He, 2015), (Andersson, 2023) en (Chiyoda, 2013)

Vaste stof opslag (metalen en hydrides)

Er kan waterstof opgeslagen worden in ijzerpoeder. In dit concept wordt de waterstof gebruikt om het ijzeroxide te reduceren naar ijzer.

Het cyclische proces bestaat uit verbranding van de ijzerpoeder waarbij warmte gegenereerd wordt voor o.a. industrie. De gevormde ijzeroxide wordt opgevangen en met groene waterstof gereduceerd naar ijzerpoeder. Het ijzerpoeder wordt weer hergebruikt voor verbranding. De ijzerpoeder is hiermee een circulaire energiedrager.

Daarnaast kan waterstof opgeslagen worden in hydrides. Dit kan via drie hoofd vormen:

- Absorptie van waterstof in kristalrooster van metallische verbindingen. Dit is een fysisch proces zonder chemische reacties, reversibel en werkend bij lage temperatuur, maar met een lage hoeveelheid waterstof per kg (1-2 massaprocent). Toepassing voor grootschalige opslag van energie wordt in de literatuur niet of nauwelijks beschreven. Beoogde toepassingen zijn veelal voor mobiliteit en off-grid oplossingen.
- Metaalhydrides. Mechanisme is een combinatie van fysische en chemische absorptie, waar de reactie reversibel is, werkend bij verhoogde temperatuur en druk. De binding met waterstof is sterk en de vormingsreactie is exotherm, vrijmaken van de opgenomen waterstof kost daarom weer aanzienlijke hoeveelheden energie. De veiligheidsaspecten die aan deze vorm van opslag gekoppeld zijn, zijn niet triviaal: het materiaal kan in fijn verdeelde vorm ontbranden aan de lucht. Een beschermende atmosfeer is noodzakelijk. Toepassing voor grootschalige opslag van energie wordt in de literatuur niet of nauwelijks beschreven. Beoogde toepassingen zijn veelal voor mobiliteit en off-grid oplossingen.
- Complexe hydrides, veelal op basis van boor (BH₃-) of aluminum (AlH₄-). Gekenmerkt door een ionische binding tussen metaal en waterstof. In deze verbindingen kunnen grote hoeveelheden waterstof worden

opgeslagen per gewicht van de drager. Echter, de hiermee gepaard gaande vaste stof chemie is complex en nog niet volledig begrepen. Onttrekken van waterstof door temperatuurverhoging resulteert in nieuwe verbindingen en kristalstructuren. De reversibiliteit van de reactie is onvolledig door zowel fysische als chemische omzettingen. De verbindingen zijn daarnaast gevoelig voor zuurstof en water. Toepassing voor grootschalige opslag van energie wordt in de literatuur niet of nauwelijks beschreven. Beoogde toepassingen zijn veelal voor mobiliteit en off-grid oplossingen.

Overall geldt voor opslag in hydrides dat toepassingen schaars zijn en het ontwikkelstadium nog in de R&D fase zit. Kosten en cyclus efficiëntie zijn daardoor moeilijk te bepalen. Specifieke voordelen die verder onderzoek kan steunen zijn het beperkte ruimtebeslag, en varianten waarbij het synergistisch kan werken met opslag onder druk. Vooruitzichten voor een bijdrage aan grootschalige (>>PJ) opslag op korte-termijn zijn zeer beperkt. (Kim, 2017), (Modi, 2021), (Sakintuna, 2007)

8.6 Bijlage 6: Warmteopslag, overzicht technieken

Tabel 15 Overzicht van warmteopslag technieken

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

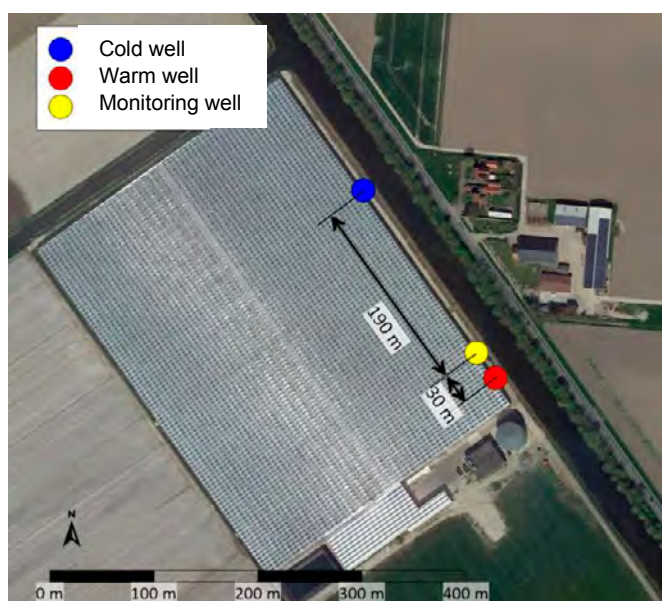
8.7 Bijlage 7: Warmteopslag, case studies

Case Study: Hoge Temperatuur Opslag Middenmeer

Hoge temperatuur opslag (HTO) richt zich op warmte opslag en heeft een temperatuurbereik dat kan oplopen tot 90 °C. Dit is een belangrijk verschil met een WKO-systeem. Door het dieptebereik van HTO is het energieverlies bij opslag beperkt en valt HTO buiten het bereik van de als drinkwater gedefinieerde aquifers. HTO gebruikt geen of minder warmtepompen en heeft een hoge COP (Coëfficiënt of Performance). Dit betekent lagere OPEX kosten (OPERational EXpenditures) en een lage CO₂-emissie. Een pilot HTO is gerealiseerd in Middenmeer.

In de provincie Noord-Holland bevindt zich het tuinbouwgebied Agriport, waar het energiebedrijf ECW warmte levert en produceert, onder meer via geothermie. Om de geothermieputten niet stil te hoeven leggen en in de winter meer kassen van warmte te kunnen voorzien, heeft het ECW een hoge temperatuur opslag gerealiseerd (zie Figuur 16). De HTO bestaat uit een injectie put (de warme put), een productie put (de koude put) en een monitoringsput. De HTO slaat water met een temperatuur van maximaal 85°C op in een zandige laag op een diepte van -370 m (dieper dan een Eiffeltoren). De efficiëntie van dit systeem is in de eerste jaren relatief laag omdat de ondergrond nog opgewarmd moet worden. Verwacht wordt echter dat na ca. 5 jaar de efficiëntie reeds meer dan 85% van de maximale efficiëntie heeft bereikt. Deze HTO is onderdeel van het internationale HEATSTORE project waarin diverse vormen van (MT en HT) warmteopslag verder zijn ontwikkeld en gedemonstreerd (Bakema, 2018), (TNO, 2020), (Hahn F. A.-P., 2019), (Hahn F. V.-P., 2019), (Guglielmetti, 2021), (Kallesøe, 2019), (Nielsen, 2019), (Oerlemans, 2022).

Figuur 16 Locatie van de HTO installatie van ECW Middenmeer (Hamm, 2021)



Case Study: E boiler in Nederland

Bovengronds kan warmte opgeslagen worden in verschillende soorten tanks. Het voordeel hiervan is dat deze systemen goed controleerbaar en herhaalbaar zijn, maar daar staat tegenover dat de opslagcapaciteit en het energieverlies over de tijd heen beperkend kunnen zijn. Een voorbeeld hiervan is de E-boiler of elektrische boiler, een bewezen techniek om op basis van elektriciteit warmte tot circa 100°C te produceren en op te slaan in de vorm van heet water. In de Haagse wijk Ypenburg is er een E-boiler met een vermogen van 12 MW_{th} gerealiseerd als stadswarmtevoorziening (zie Figuur 17). Met deze installatie kan de warmtevoorziening flexibeler omgaan met het wisselende aanbod duurzame elektriciteit en congestie op het elektriciteitsnet verminderen.

Figuur 17 E-boiler Ypenburg als onderdeel van het Haagse Stadswarmtenet (Eneco, 2020)

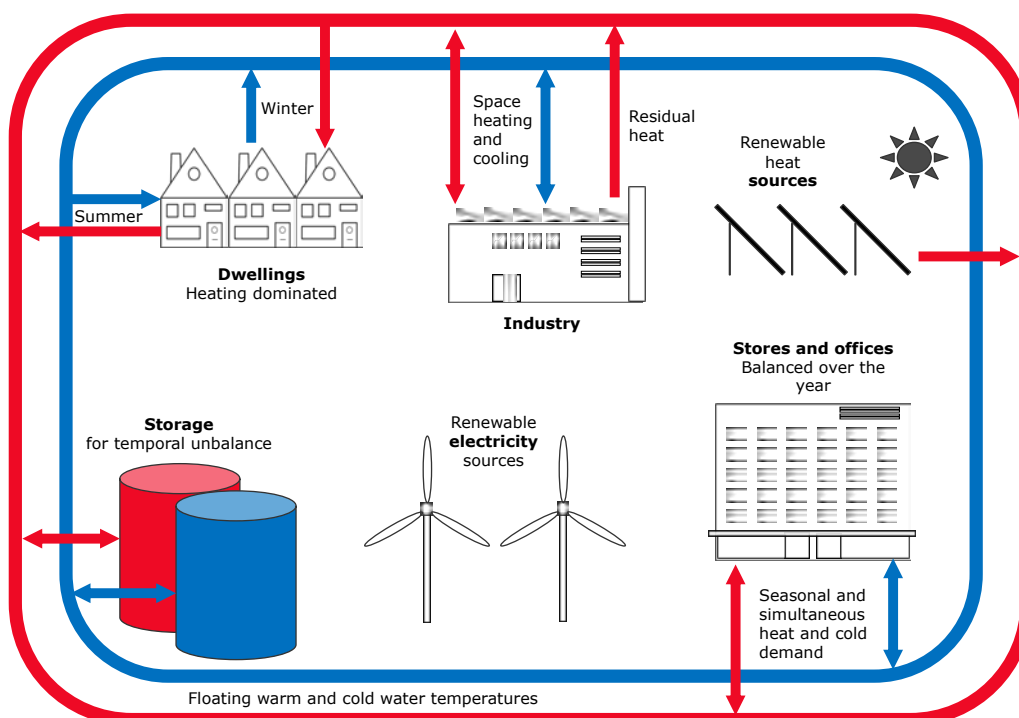


Naast de warmteopslag in water wordt ook onderzoek gedaan naar andere stoffen, zowel vloeibaar als vast. In Broek op Langedijk wordt de chipsfabriek van PepsiCo geëlektrificeerd met inzet van een thermisch systeem op basis van ijzerslakken. In dit materiaal kan warmte op hoge temperatuur (>100 °C) worden opgeslagen, en worden afgegeven aan de olie wanneer dat nodig is (TSE, 2023).

Case Study: Systeemaanpak vijfde generatie warmte- en koudenet

Vijfde generatie warmte- en koudenetten (5GDHC-netwerk) zijn stedelijke netten voor verwarming én koeling. De warmte of koude wordt lokaal verkregen en bestaat uit meerdere voedingspunten, die ook van een laag temperatuurniveau kunnen zijn. Duurzame warmtebronnen, warmtepompen en warmteopslag worden gekoppeld aan een verbindend netwerk, dat zorgt voor energie uitwisseling tussen gebouwen op straat-, wijk-, of het wijk-overstijgend niveau (zie bijlage voor verdere details).

Figuur 18 Schematische illustratie vijfde generatie district heating en cooling (5GDHC) netwerk (Boesten, 2019)



Het Mijnwaterproject in Heerlen is een voorbeeld van een 5GDHC-netwerk. Lokale koude- en warmte-afnemers zoals kantoren, woningen en een supermarkt kunnen warmte en koude onttrekken aan de zeer lage temperatuur netwerken, die in kleine clusters georganiseerd zijn. Voor de seizoensbalans buffert het project warmte en koude in voormalige mijngangen. Voor de toekomst wordt een aanzienlijke uitbreiding van het verzorgingsgebied voorzien. (Mijnwater, 2023)

8.8 Bijlage 8: Benodigd ruimtebeslag voor 100% hernieuwbare opwek

Vraag: Kan het Nederlands energiegebruik op eigen bodem met zon en wind worden opgewekt?

Om een orde-van-grootte beeld te hebben hoeveel grond/zee we in Nederland nodig hebben om het Nederlands energiegebruik op te wekken, is onderstaande schatting. Hieronder is een ruwe schatting, dat uit gaat uit van huidige technieken en uit gaat van de volgende punten en geeft een eerste orde benadering

- Nederland gebruikt(e in 2017) 3.157PJ primaire energie. Over een jaar uitgesmeerd is dit vrijwel exact 100GW continuvermogen.
- Zonnepanelen leveren jaarlijks ongeveer 125kWh/m² op. Dit is per m² paneeloppervlak. Per m² grondoppervlak is dit ongeveer de helft. Dat is over een jaar uitgesmeerd een continuvermogen van ongeveer 7W/m² (grondoppervlak) = 7MW/km²(grondoppervlak).
- Wind op zee heeft een loadfactor van ongeveer 40% en wordt gebouwd met 6MW(piek)/km² en levert dus over een jaar uitgesmeerd een continuvermogen van 2,4MW/km²

Gesteld dat deze 100GW 50/50 wordt opgewekt door zon-op-land en wind-op-zee.

- Voor 50GW jaargemiddeld zonvermogen is nodig: 7.140 km². Nederland heeft een oppervlak van 41.000 km². Dit is 17% van het landoppervlak.
- Voor 50GW jaargemiddeld wind-op-zeevermogen is nodig: 22.300 km². De Nederlands Exclusieve Economische Zone heeft een oppervlak van 58.000 km². Dit is 38% van de EEZ.

Samenvattend: om de Nederlandse energiebehoefte volledig met zon en wind op te wekken is naar schatting 17% van het Nederlandse landoppervlak en 38% van het Nederlandse zeeoppervlak nodig.