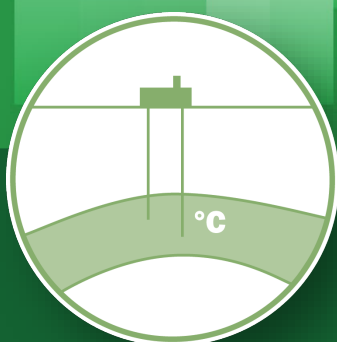


Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 – 2050

Ontwikkelpaden en aanbevelingen



Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat



TNO innovation
for life

TNO PUBLIEK

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nlT +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75**TNO-rapport****TNO2021 R11147****Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 –
2050: Ontwikkelpaden en aanbevelingen**

Datum	22 juni 2021
Auteur(s)	Serge van Gessel (TNO) Thijs Huijskes (EBN) Joaquim Juez-Larré (TNO) Rory Dalman (TNO)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	22 pagina's
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	OPVIS 2.0
Projectnummer	060.43342/01.04.06

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO



TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Achtergrond technische analyses ondergrondse energieopslag	4
3	Huidige situatie	7
4	Ontwikkelpaden ondergrondse opslag	8
4.1	Ontwikkelpaden tot 2030	8
4.2	Ontwikkelpaden 2030 – 2050	9
4.3	Synthese ontwikkelpad waterstofopslag 2020 – 2050	12
4.4	Synthese ontwikkelpad warmteopslag 2020 – 2050	17
5	Aanbevelingen	20
6	Ondertekening	22

1 Inleiding

Dit rapport presenteert de beleidsaanbevelingen die onderdeel zijn van de beleidsstudie naar de toekomstige ondergrondse opslag van energie in Nederland tussen 2030 en 2050. Het rapport “Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 – 2050: Technische evaluatie van vraag en aanbod” presenteert de resultaten van recentelijk gepubliceerde energie-scenariostudies en aanvullende analyses van TNO en EBN, waarmee antwoord wordt gegeven op de volgende vragen:

- Hoe ontwikkelt zich de toekomstige vraag naar grootschalige ondergrondse opslag (gespecificeerd naar energiedrager, technologie, omvang, timing en locatie) volgens verschillende beschouwde energie transitie scenario's?
- Hoe kan de resulterende vraag naar grootschalige ondergrondse opslag worden ingepast binnen het bekende potentieel en wat zijn hiervan de ruimtelijke consequenties?

Dit adviesrapport beschrijft de potentiële ontwikkelpaden voor ondergrondse energieopslag in Nederland tot 2050 en geeft aanbevelingen om een verantwoorde en tijdige aanleg van grootschalige ondergrondse opslag mogelijk te maken.

2 Achtergrond technische analyses ondergrondse energieopslag

Ondergrondse energieopslag omvat een breed spectrum aan technologieën en energievormen binnen verschillende geologische formaties. Op hoofdlijnen betreft dit opslag van energie in chemische vorm (bijv. moleculen zoals methaan en waterstof), thermische vorm (bijv. water op hoge temperatuur) en mechanische energie (bijv. perslucht en pompaccumulatie). Deze ondergrondse energieopslagtechnologieën onderscheiden zich met name van hun bovengrondse alternatieven door de veel grotere opslagcapaciteit en/of het grotere realiseerbare vermogen per installatie.

Belangrijke redenen voor de aanleg van (toekomstige) ondergrondse opslagfaciliteiten zijn:

- Het verzorgen van de vraag-aanbodbalans (leveringszekerheid) in centrale energienetten t/m energiesystemen op wijk-/gemeenteniveau, waar ondergrondse opslag een goedkoper of robuuster alternatief biedt dan andere flexibiliteitsopties.
- Het voorkomen van hoge kosten en negatieve maatschappelijke impact als gevolg van een langdurige (dagen, weken) onderbreking van het aanbod van energiebronnen waarvoor geen vervangende alternatieven zijn.
- Het bijdragen aan een efficiëntere inzet van duurzame warmtelevering door het gebruik maken van zowel constante warmtebronnen (geothermie, restwarmte) als seizoensgebonden warmtebronnen (zonthermie).
- Het ontwikkelen van private verdienmodellen samenhangend met energieprijzfluctuaties, levering van specifieke systeemdiensten en ondersteuning van (internationale) handel in energiedragers.
- Kostenbesparing door schaalgrootte. Voor grootschalige opslag lijkt opslag ondergronds een economisch aantrekkelijke optie t.o.v. alternatieven (dus niet alleen wanneer er onderbreking is van aanbod → leveringszekerheid).
- Het voorkomen van een groot ruimtebeslag indien opslag op vele locaties aan het oppervlak moet worden aangelegd (bijv. druktanks).

Drie recente energiesysteemstudies uitgevoerd door Berenschot & Kalavasta (BK)¹, TNO Energie Transitie Studies (ETS)² en TKI – Large-Scale Energy Storage (LSES)³, geven een nieuw inzicht in de toekomstige (2030 – 2050) vraag naar flexibiliteit en balanscapaciteit in het veranderende energiesysteem, inclusief de mogelijk benodigde capaciteit in de vorm van ondergrondse opslag van energie. Voor dit doel zijn meerdere nationale energiescenario's ontwikkeld met het Nationale Klimaatakkoord (2030-situatie) en de 2050 doelstellingen als uitgangspunt. De scenario's zijn gebaseerd op onderscheidende maatschappelijke beelden die invulling geven aan de toekomstige vraag en het aanbod van energie. Iedere studie gebruikt verschillende energiesysteemmodellen om de scenario's door te rekenen, ieder met zijn eigen specifieke kenmerken. BK gaat uit van het Energie Transitie Model (ETM). ETS en LSES gebruiken de modellen OPERA en COMPETES.

Naast de evaluatie van vraag naar grootschalige energieopslag, is opnieuw gekeken naar het potentieel om energiedragers op te slaan in de Nederlandse ondergrond. Het rapport "Ondergrondse energieopslag in Nederland: Technische verkenning" van TNO/EBN uit 2018⁴

¹ <https://www.berenschot.nl/actueel/2020/april/nederland-klimaatneutraal-2050/>

² <https://energy.nl/en/publication/towards-a-sustainable-energy-system-for-the-netherlands-in-2050/>

³ <https://publications.tno.nl/publication/34637699/Xi7BTQ/TNO-2020-P11106.pdf>

⁴ (<http://www.nlog.nl/sites/default/files/2018-11/Ondergrondse%2BOpslag%2Bin%2BNederland%2B-%2BTechnische%2BVerkenning.pdf>)

vormt hierbij het startpunt. Ten eerste zijn de capaciteiten opnieuw geëvalueerd aan de hand van recente inzichten en analyses uit onder andere LSES (waterstofopslag en perslucht) en het project WINDOW⁵ (warmteopslag). Vervolgens is de berekende theoretische en technische capaciteit vertaald naar **praktisch realiseerbare capaciteit** (zijnde de capaciteit die mogelijk in de praktijk kan worden aangelegd, rekening houdend met verwachte technische, logistieke, economische en maatschappelijke beperkingen).

Op basis van de uitkomsten van de energiescenario's en modellen en eigen analyses zoals beschreven in het technische rapport, is geëvalueerd hoe de vraag naar grootschalige energieopslag zou kunnen worden ingepast binnen de ondergrondse opslagcapaciteit die als "mogelijk realiseerbaar" wordt beschouwd.

Bij de uitkomsten van de technische analyse worden de volgende algemene kanttekeningen geplaatst:

- De 2050-scenario's van BK (II3050) betreffen een weergave van de randen van het speelveld. Ook TNO-ETS schetst twee contrasterende eindbeelden. De scenario's omvatten onderscheidende maatschappelijke keuzes die bepalend zijn voor aanbod en verbruik van energie en geven inzicht in de technologieën om vraag en aanbod in de verschillende sectoren in balans te houden. Daarbij zijn per studie verschillende invloeden zoals afwijkende weerjaren, ontwikkeling van technologiekosten, beperkingen om technologieën in te zetten in ogenschouw genomen. Aangezien een aantal cruciale keuzes en randvoorwaarden pas in een later stadium van de energietransitie bekend zullen zijn, kan op dit moment nog geen voorkeur voor specifieke scenario's worden uitgesproken. Het is zeer goed denkbaar dat de ontwikkeling van het energiesysteem na 2030 een combinatie zal zijn van elementen uit de verschillende scenario's.
- BK heeft binnen één van de vier scenario's onderzocht wat de mogelijkheden zijn voor inzet van kernenergiecentrales. De overige studies (en scenario's) laten kernenergie buiten beschouwing. Er zijn geen directe modelresultaten beschikbaar die inzicht geven in hoe benodigde energieopslagcapaciteit wordt beïnvloed door de inzet van kernenergie en dit rapport omvat derhalve geen verdere analyses of conclusies. De verwachting is dat de invloed beperkt is.
- De studies hebben geen warmtebuffering meegenomen in de scenario's en modeluitkomsten. Deze technologie is wel geïmplementeerd in de laatste online update van het ETM-model (juli 2020) maar is niet beschreven in het rapport van BK uit 2020. In de technische analyse van deze studie is daarom nader geanalyseerd hoe ondergrondse warmtebuffering kan bijdragen aan een efficiëntere inzet van constante of seizoensgebonden duurzame warmtebronnen in warmtenetten.
- De studie van BK geeft indicatieve inschattingen voor aanvullende waterstofopslag bovenop de benodigde opslag voor (seizoensafhankelijke) vraag-aanbod balans. Enerzijds betreft dit extra reserves om import te vermijden tijdens extreme weerjaren waarin het totale jaaraanbod uit eigen productiemiddelen tekortschiet (lagere productie uit wind en zon naast een grotere inzet voor warmtevraag). Anderzijds zijn de reserves afgestemd op een situatie waarbij sprake is van grote importafhankelijkheid en de aanvoer uit het buitenland langdurig onderbroken wordt (bijv. vanwege een geopolitieke crisis en productietekorten in andere landen). Voor deze laatste reserve wordt in sommige scenario's een opmerkelijk grote

⁵ Dinkelman, D., Bergen, F. van, Veldkamp, J., 2020: Geological model, shallow subsurface temperature model and potential maps for HT-ATES in the Netherlands. WINDOW research programme. (nr: TNO 2020 R11686) (incl. Appendix 4: Potential Map Results)

opslagreserve genoemd die 100% van de totale jaarimport bedraagt en niet inpasbaar is binnen de praktisch realiseerbare ondergrondse ruimte. Deze inschattingen worden derhalve buiten beschouwing gelaten in de ontwikkelpaden.

- Deze studie volgt een alternatieve bepaling voor aanvullende opslagbehoefte van waterstof. In de praktijk blijkt dat de beschikbare opslagcapaciteit voor aardgas en aardolie ca. 25% van het totale jaarverbruik bedraagt. Dit geldt voor Nederland en voor Europa als geheel. Voor aardolie omvat deze capaciteit o.a. een strategische reserve voor 90 dagen (volgens internationale afspraken). Voor aardgas gaat het om capaciteit voor vraag-aanbod balans (piek en seizoen) en ondersteuning van arbitrage (internationale handel). Voor de maximale opslagcapaciteit van waterstof (vraag-aanbod balans plus evt. opslag voor arbitrage en extra reserves) wordt eveneens uitgegaan van 25% van het totale jaarverbruik. Voor de toekomstige bepaling van (strategische) reserves wordt aanbevolen om een analyse uit te voeren die o.a. de impact en consequenties van aanleg afweegt tegen de risico's die gepaard gaan met onderbreking van aanbod van waterstof.
- De technische en praktische ondergrondse opslagcapaciteit zoals beschreven in het technische rapport betreft een indicatief potentieel op basis van regionale portfolio analyses, beschikbare data, en een generiek ontwerp voor opslaglocaties. Voor alle nieuw aan te leggen opslaglocaties geldt dat de specifieke lokale technische geschiktheid en de praktisch realiseerbare capaciteit nader dient te worden vastgesteld. Voor sommige vormen van opslag (o.a. waterstofopslag in gasvelden) dient de technische en praktische realiseerbaarheid in algemene zin te worden bewezen.

3 Huidige situatie

Aardgasopslag

In de huidige situatie wordt energieopslag in zowel Nederland als in de rest van Europa gedomineerd door ondergrondse opslag van aardgas (UGS). In termen van opslagcapaciteit en -vermogen betreft dit meer dan 99% van het totaal van alle geïnstalleerde energieopslag (inclusief batterijen en pompaccumulatiemerren). Opslag van aardgas wordt niet alleen ingezet als noodzakelijk middel om vraag en aanbod in balans te houden, maar heeft vaak ook een duidelijk commercieel oogmerk door te anticiperen op periodieke prijsschommelingen (o.a. gestuurd door variërende vraag per seizoen) en om internationale markt voor aardgas te faciliteren (arbitrage).

Waterstofopslag

De rol van waterstof in het huidige energiesysteem is grotendeels beperkt tot het produceren van industriële grondstoffen. Inmiddels wordt waterstof ook geleidelijk ingezet als transportbrandstof (net als in het buitenland). Nederland is zelf een belangrijke producent van waterstof uit aardgas. Er is nog geen ondergrondse opslag van waterstof in Nederland maar er worden wel voorbereidingen getroffen voor een pilotproject in een zoutcaverne bij Zuidwending (HyStock).

Ondergrondse opslag verbonden met het elektriciteitsnet

Omdat Nederland momenteel over een goed regelbare (en flexibele) capaciteit voor opwekking van elektriciteit beschikt (o.a. door inzet van aardgascentrales), is de behoefte aan grootschalige opslagcapaciteit voor elektrische energie in de huidige situatie nog zeer beperkt of afwezig, zelfs nu het vermogen aan wind en zon groeit (feitelijk wordt dit nu nog geregeld door de flexibele inzet van aardgascentrales). In een aantal landen in Europa is grootschalige opslag van elektriciteit (met name via pompaccumulatiemerren in bergachtige gebieden) sterker ontwikkeld. Vaak hangt dit samen met een minder flexibele productiecapaciteit (bijv. van kerncentrales die uit kostenoverwegingen een constant vermogen leveren).

Warmtebuffering

Grootschalige opslag van hoge-temperatuurwarmte in aquifers (HT-ATES) staat in Nederland nog in de kinderschoenen met slechts enkele recente pilotprojecten in ontwikkeling of realisatie. Warmte-koudeopslag (WKO) en lage-temperatuuropslag in ondiepe bodemsystemen zijn zeer breed ontwikkeld. Warmte kan zeer flexibel worden geproduceerd met aardgas, waardoor buffering in de huidige situatie nog geen duidelijk nut of noodzaak kent. Warmtenetten die worden gevoed door duurzame warmtebronnen met een constante aanvoer (bijv. duurzame restwarmte of geothermie) in combinatie met seizoensgebonden warmtebronnen (bijv. zonthermie) zijn slechts in beperkte mate aangelegd.

4 Ontwikkelpaden ondergrondse opslag

4.1 Ontwikkelpaden tot 2030

De onderzochte scenario's voor 2030 zijn conform de uitgangspunten in het Nationale Klimaatakkoord opgesteld en op hoofdlijnen met elkaar in overeenstemming. Op basis van dit akkoord, de huidige bekende ontwikkelingen en de analyses van onderzochte scenario's schetst Tabel 4.1 de mogelijke ontwikkelingen voor ondergrondse energieopslag tot 2030. Hierbij worden de volgende opmerkingen geplaatst:

- Aardgasopslag blijft tot 2030 vrijwel zeker noodzakelijk. Er blijft voorlopig nog vraag naar aardgas voor de productie van elektriciteit, lage- en hoge-temperatuurwarmte en als grondstof voor de industrie. Het is onwaarschijnlijk dat er in 2030 al voldoende alternatieven zijn die aardgas volledig overbodig maken. De vraag in de gebouwde omgeving behoudt een seizoensgebonden karakter. Enerzijds neemt de benodigde opslagcapaciteit waarschijnlijk af vanwege de afbouw van L-gas-levering aan omringende landen en het begin van de uitfasering van aardgas in de gebouwde omgeving. Anderzijds is het nog onduidelijk of de toenemende importafhankelijkheid (door afnemende binnenlandse productie) aanleiding geeft tot de aanleg van extra reserves in ondergrondse opslag.
- Het aandeel variabele opwek van elektriciteit uit zon en wind zal sterk groeien. Dit is voor een belangrijk deel vastgelegd in concrete doelstellingen, toekenning van vergunningsgebieden en projecten die worden voorbereid.
- Waterstof wordt in toenemende mate uit hernieuwbare elektriciteit en uit aardgas met CCS geproduceerd (respectievelijk groene en blauwe waterstof). De inzet van waterstof in de energievoorziening stijgt (m.n. transport, warmte voor industrie) en blijft belangrijk als grondstof voor de industrie. De verwachting is dat voor 2030 een backbone voor waterstof wordt aangelegd⁶. Eerste opslagprojecten in zoutcavernes worden gerealiseerd. Locaties voor aardgasopslag (UGS) die hun functie verliezen, kunnen mogelijk interessant zijn voor toekomstige ombouw naar locaties voor waterstofopslag (zie ontwikkelpaden 2030 – 2050).
- In geen van de onderzochte scenario's volgt een noodzaak of voorkeur voor de aanleg van perslucht (CAES) of ondergrondse pompaccumulatie (O-PAC). Wel kunnen deze technologieën bijdragen aan het leveren van flexibiliteit en netstabiliteit. Daarin hebben ze concurrentie van diverse alternatieven zoals vraagsturing, *curtailment*, interconnectiviteit en ook het inzetten van (deels) vraag-gestuurde elektrolyse die volgens de doorgerkende scenario's veelal technisch en economisch efficiëntere opties blijken. CAES en O-PAC zijn mogelijk interessant als privaat-commerciële initiatieven voor het stapelen van een aantal commerciële diensten met technische diensten aan het elektriciteitsnet. Dit aspect komt niet of zeer beperkt aan bod in de gebruikte modellen.
- Eventueel benodigde nieuwe zoutcavernes voor waterstofopslag en voor een beoogd persluchtproject⁷ zijn in alle onderzochte scenario's waarschijnlijk goed in te passen binnen de bestaande zoutwinningsvergunningen Zuidwending en Heiligerlee (afhankelijk van locatie-specifiek onderzoek). Er dient wel rekening gehouden te worden met de ontwikkeltijd van de aanleg van zoutcavernes alsmede de mogelijkheden om gewonnen pekels uit de nieuwe cavernes conform de bepalingen in de Mijnbouwwet en Omgevingswet te verwerken dan wel af te voeren.
- De ontwikkeling van warmtebuffers is sterk verbonden met de ontwikkeling van warmtenetten gevoed door geothermie, restwarmte en/of zonthermie. Zowel

⁶ O.a. www.hyway27.nl

⁷ <https://correenergystorage.nl/caes-the-project/>.

warmtenetten als HT-ATES worden gekenmerkt door sterke plaatsgebonden afhankelijkheden (warmtevraag in gebouwde omgeving, potentieel in geschikte aquifers).

Tabel 4.1: Overzicht mogelijke ontwikkelingen voor opslag tot 2030 (aangenomen waterstofopslagcapaciteit: zoutcaverne ca. 125 - 250 GWh; gasveld gemiddeld ca. 8 TWh; warmtebuffercapaciteit: 0,016 GWh per HT-ATES).

Type	Categorie	Capaciteit schatting (TWh)	Omvang / Ruimte	Opmerking
Aardgasopslag	Laag	37 – 54	ca. 2-3 bestaande UGS-locaties (L-gas)	Opslag alleen voor Nederlandse balans, rekening houdend met weercondities
	Hoog	130	Alle bestaande UGS-locaties	Opslag blijft belangrijk voor (internationale) handel
Waterstofopslag	Minimaal	<0,001	Test in zoutboorgat of mini-caverne	Waterstof als energiedrager komt niet van de grond
	Laag	0,042	1 (nieuwe) zoutcaverne	Waterstof groeit als energiedrager, optimale inzet van andere flexibilitieopties
	Hoog	0,475	2 - 4 (nieuwe) zoutcavernes	Waterstof groeit als energiedrager en wordt preferente flexibilitieoptie
Perslucht (CAES)	Mogelijk	0,003 - 0,004	2 - 3 nieuwe zoutcavernes	Verwachte aanvraag voor een CAES-project
Ondergrondse pompaccumulatie (O_PAC)	Mogelijk	0,0084	Tunnelstelsel op 1400 m diepte	Mogelijke aanvraag voor een O-PAC project
Warmtebuffers	Laag	0,16	10 locaties	Geen grote groei na eerste pilotprojecten
	Hoog	0,16 - 0,48	10 - 30 locaties	Sterke groei van HT-ATES na eerste pilots

4.2 Ontwikkelpaden 2030 – 2050

De onderzochte scenario's voor 2050 gaan alle uit van 95% minder CO₂-uitstoot t.o.v. 1990, maar hebben een zeer diverse aanpak om dat te bereiken. Dit wordt gereflecteerd in de samenstelling van de energiemix (aanbod), de aard van het (finale) energieverbruik binnen de verschillende sectoren, en de technische middelen die worden ingezet om leveringszekerheid en aanbodzekerheid te borgen. De scenario's worden door de betreffende studies beschreven als "hoekpunten van het speelveld" of ook wel "verschillende maatschappelijke beelden". Dit is wezenlijk anders dan de scenario's voor 2030 die een meer concreet en praktisch beeld schetsen op basis van het Nationale Klimaatakkoord.

Alles samengenomen, kunnen de onderzochte scenario's voor 2050 grosso modo in twee groepen worden ingedeeld:

- Scenario's die uitgaan van een sterke transformatie van het energiesysteem: daling van de primaire energievraag, sterke inzet op elektrificatie een groot aandeel hernieuwbare bronnen (o.a. wind, zon), groei van geothermie en andere duurzame warmtebronnen (restwarmte, zonthermie), productie van groene waterstof, focus op zelfvoorzienendheid en minimaliseren van het gebruik van fossiele brandstoffen. Energie-intensieve industrie blijft merendeels gelijk of daalt licht.
- Scenario's die voortbouwen op de elementen van het huidige energiesysteem: vrijwel gelijkblijvende primaire energievraag, een minder sterke focus op elektrificatie, belangrijke rol voor traditionele en nieuwe brandstoffen (o.a. aardgas, aardolie, biomassa, blauwe waterstof), een grote mate van importafhankelijkheid en de inzet van CCS om de emissies van CO₂ uitstotende processen te voorkomen. Vaak is er ook sprake van groei van de energie-intensieve industrie.

De meeste scenario's laten kernenergie buiten beschouwing. Slechts voor één van de BK-scenario's zijn varianten doorgerekend waarbij een kerncentrale wordt ingezet. Er is geen doorrekening beschikbaar van de effecten van een kerncentrale op de vraag naar flexibiliteit en in het bijzonder energieopslag.

Hoe het energiesysteem zich in werkelijkheid zal ontwikkelen tussen 2030 en 2050 is nog grotendeels onbekend en zal sterk afhankelijk zijn van een groot aantal technische, politieke en maatschappelijke keuzes en ontwikkelingen. Dat geldt ook voor de uiteindelijke vorm en omvang van energieopslagcapaciteit en andere flexibiliteitsopties. Tabel 4.2 vat de benodigde ondergrondse opslagcapaciteiten samen, uitgaande van de uitkomsten van de onderzochte scenario's en aanvullende analyses zoals beschreven in het technische rapport. Hieronder worden enkele ontwikkelingen en bijbehorende keuzes voor ondergrondse opslag toegelicht.

Aardgasopslag:

- In alle onderzochte scenario's kan de benodigde aardgasopslagcapaciteit voor binnenlandse vraag-aanbodbalans in principe worden geacommodeerd in één of twee van de bestaande UGS-locaties (afhankelijk van welke worden gekozen).
- De keuze voor aanleg van extra opslagreserves volgens één van de scenario's in BK zou leiden tot benutting van de volledige opslagcapaciteit van de bestaande UGS-locaties. Voor het in stand houden van dergelijke grote reserves ontbreekt momenteel nog een goede onderbouwing. Nederland heeft momenteel geen verplichting tot aanleg van strategische reserves.

Waterstofopslag:

- Met een sterk toenemend aandeel hernieuwbare elektriciteit uit wind en zon zal de vraag naar flexibiliteit bovenop de reeds bestaande seizoensgebonden warmtevraag sterk groeien. Indien waterstofopslag als preferente (dominante) optie wordt gekozen om vraag en aanbod voor elektriciteit en warmte in balans te houden, dan zal de benodigde opslagcapaciteit een grote omvang krijgen die, in termen van gasvolume, in de orde grootte van de huidige aardgasopslagen uitkomt. In dit geval is de inzet van gasvelden⁸ wenselijk, zo niet noodzakelijk, om ruimtelijke inpassing, maatschappelijke impact en tijdige ontwikkeling praktisch realiseerbaar te houden.
- De LSES-studie laat zien dat de benodigde opslagcapaciteit voor waterstof, zoals beschreven volgens het bovengenoemde ontwikkelpad, significant kan worden gereduceerd indien optimaal gebruik wordt gemaakt van andere, meer kostenefficiënte

⁸ Bestaande aardgasopslagen in gasvelden kunnen mogelijk in aanmerking komen voor ombouw naar waterstofopslag indien de huidige functie komt te vervallen.

flexibiliteitsopties zoals interconnectie en vraagsturing via elektrische boilers en productie van synthetische brandstoffen uit waterstof. In het ideale geval zouden de huidige zoutwinningslocaties Zuidwending en Heiligerlee dan voldoende capaciteit kunnen bieden via de aanleg van zoutcavernes. Het is echter belangrijk om te vermelden dat de lage inschatting van opslagcapaciteit door LSES geen rekening houdt met onverwachte omstandigheden zoals afwijkende weerjaren of verstoringen in energieaanbod en/of het energiesysteem.

- Indien het aanbod van waterstof hoofdzakelijk via import⁹ verloopt, dan kan ondergrondse opslag nog steeds een significante omvang krijgen, mede vanwege de variabele (seizoensgebonden) warmtevraag.
- Tenslotte kan voor waterstofopslag de (politieke) keuze worden gemaakt om extra (reserve) capaciteit aan te leggen voor strategische reserves of ondersteuning van internationale handel in waterstof. Indien wordt uitgegaan van een totale opslagcapaciteit ter grootte van 25% van het totale jaarverbruik (conform bestaande verhoudingen voor aardgasopslag en aardolieopslag), dan betreft dit in het maximale geval een ca. 1,5 keer zo groot volume als het huidige gasvolume dat in de bestaande aardgasopslagen aanwezig is en wordt de ontwikkeling van één of meerdere gasvelden onvermijdelijk.

CAES en O-PAC:

- Voor deze technologieën zijn geen schattingen beschikbaar op basis van de onderzochte scenario's. In het algemeen wordt geen directe noodzaak gezien voor aanleg van CAES en/of O-PAC om leveringszekerheid binnen de nationale energievoorziening te borgen. Andere flexibiliteitsopties krijgen in de modellen de voorkeur omdat ze tot lagere kosten leiden. Wel kunnen CAES en O-PAC diverse ondersteunende systeemdiensten op het elektriciteitsnet leveren die gericht zijn op korte tijdschalen en die aantrekkelijk zijn voor private initiatieven. Dit soort diensten zijn niet of beperkt meegenomen in de gebruikte energiesysteemmodellen.
- Aanleg van CAES neemt mogelijk zoutcaverneruimte in die anders gebruikt had kunnen worden voor aanleg van waterstofopslag (i.e. het maximale aantal 60 praktisch realiseerbare cavernes). Dit is een factor die mogelijk meeweegt in de ruimtelijke planning en inpassing van CAES-projecten.

Warmtebuffering:

- De ontwikkelingen voor grootschalige warmtebuffering wordt met name bepaald door: 1) de grootte van de inzet van warmtenetten, 2) de mate waarin warmtenetten gevoed zullen worden door basislastbronnen of bronnen die goedkoop zijn in de zomer, t.o.v. centrale boilers (groen gas, waterstof, biomassa) of via warmtepompen/power-to-heat. De onderzochte scenario's laten zien dat dit sterk afhankelijk is van de mate waarin warmtelevering regionaal wordt opgelost, en de mate waarin grondstoffen zoals waterstof (goedkoop) te importeren zijn. Niettemin wordt in alle scenario's verwacht dat er enige mate van warmtebuffering nodig zal zijn.
- De mate van ontwikkeling van HT-ATES ligt qua potentie ergens tussen praktisch elk warmtenet tot slechts een gedeelte van de warmtenetten. De bronnen van een specifiek warmtenet zullen hierin leidend zijn (bijv. de grootschalige inzet van restwarmte).

⁹ Een deel van de scenarioberekeningen gaat uit van constante import. In werkelijkheid zal dit waarschijnlijk fluctueren.

Tabel 4.2: Overzicht mogelijke ontwikkelingen voor opslag tot 2050 (aangenomen waterstofopslagcapaciteit: nieuwe zoutcavernes ca. 250 GWh en gasveld gemiddeld ca. 8 TWh; De opslagcapaciteit van HT-ATES varieert per scenario door het type warmtelevering en het aantal warmtenetten)

Type	Categorie	Capaciteit schatting (TWh)	Omvang / Ruimte	Opmerking
Aardgasopslag	Laag	2 - 7	1 bestaande UGS-locatie	Aardgas speelt een ondergeschikte rol in elektriciteits- en warmtevoorziening
	Hoog	15 - 25	1 - 2 bestaande UGS-locaties	Aardgas blijft belangrijk voor Nederlandse elektriciteitsvoorziening en warmtevraag
	Maximaal	130	Alle bestaande UGS-locaties blijven in bedrijf	Keuze voor strategische reserves en blijvende inzet voor (internationale) handel
Waterstofopslag	Minimaal	2 - 4	10 – 20 zoutcavernes	Laag aandeel waterstof en/of optimale inzet flexibiliteit, geen rekening houdend met onzekere (weers-) omstandigheden
	Midden	4 - 12	10 – 50 minimum 0 gasvelden maximum 0-2 gasvelden	Gemiddelde inzet flexibiliteit, rekening houdend met onzekere omstandigheden
	Hoog	12 - 32	10 – 65 zoutcavernes minimum 0-2 gasvelden maximum 3-4 gasvelden	Waterstof als preferente balansoptie (seizoen) inclusief extreme weerjaren
	Zeer Hoog	20 - 52	15 – 65 zoutcavernes minimum 1-2 gasvelden maximum 5-6 gasvelden	Aangevuld tot 25% van het totale jaarverbruik van waterstof (extra reserve/arbitrage)
Perslucht	Geen schatting binnen onderzochte scenario's			
Ondergrondse pompaccumulatie	Geen schatting binnen onderzochte scenario's			
Warmtebuffers	Laag	0,6 – 1,1	100 – 140 warmtebuffers, waarvan een deel HT-ATES, en een deel kleinschaliger warmtebuffers	Weinig of geen inzet van basislast of duurzame warmte in de zomer. Veel inzet van gasboilers in warmtenetten.
	Hoog	4 - 8	100 – 200 HT-ATES, daarnaast mogelijk nog meer kleinschaliger warmtebuffers	Meer aanbod basislast of grootschalige inzet van zonthermie door combinatie met HT-ATES.

- Uitdagingen zijn:

- Het opbouwen van opererende partijen en dienstverlening die een portfolio van enkele honderden HT-ATES kan aanleggen, opereren en onderhouden.
- In drukker regio's mogelijk de ondergrondse interferentie en concurrentie met andere warmtebuffering. Bij WKO bestaat dit probleem al in Nederland.
- Concurrentie met ander gebruik van de ondergrond of een beschermde status van de ondergrond, zoals waterwinningsgebieden.
- De mogelijkheid dat potentie voor HT-ATES mist in sommige gebieden. Daarom kan aanvullend (veld)werk gedaan worden om kennis over de potentie voor HT-ATES uit te breiden.

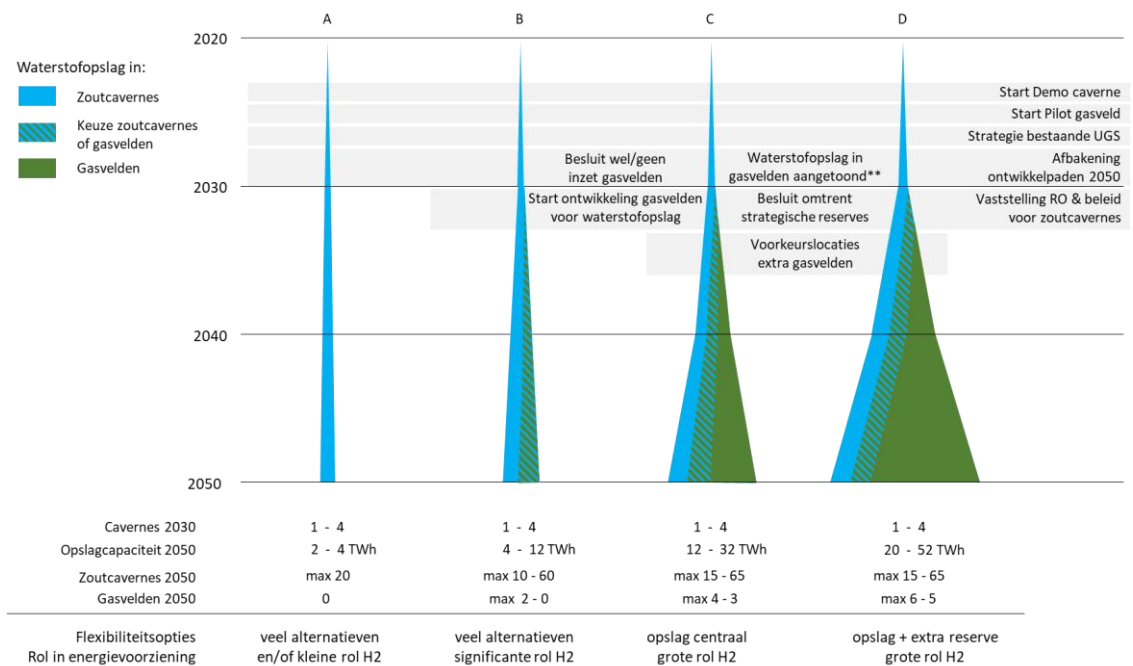
4.3 Synthese ontwikkelpad waterstofopslag 2020 – 2050

Uit het bovenstaande blijkt dat waterstofopslag (van alle onderzochte vormen van ondergrondse energieopslag) waarschijnlijk de grootste technische, ruimtelijke en maatschappelijke uitdaging gaat vormen voor nationaal beleid. Dit hangt met name samen met de mogelijk grote aantallen locaties (zoutcavernes) die moeten worden ontwikkeld, de daarmee samenhangende ruimtelijke en maatschappelijke consequenties en effecten, en de noodzaak om tijdig inzicht te krijgen in de technische en praktische realiseerbaarheid. Om maatschappelijke redenen kan het eventueel wenselijk zijn om de ontwikkeling van waterstofopslag op zee (bijv. kustnabije velden en zoutstructuren) te onderzoeken. Dit zal wel gepaard gaan met significant hogere kosten.

Voor de opslag van aardgas voldoen de bestaande opslaglocaties (het is zeer onwaarschijnlijk dat nieuwe locaties moeten worden aangelegd). Voor CAES en O-PAC is het onwaarschijnlijk dat er locaties moeten worden aangelegd voor het garanderen van (nationale) leveringszekerheid. Bovendien is de aanleg hiervan meer ingegeven door nut voor netstabiliteit en commerciële diensten dan door noodzaak voor grootschalige en langere-termijn balanceren van het elektriciteitsnet. Voor netstabiliteit bestaan meerdere (goedkopere) opties zoals vraagsturing, inperking van levering en bovengrondse opslag van elektriciteit. Warmteopslag kan mogelijk tot grootschalige toepassing groeien, maar dat zal vooral gebeuren op basis van lokale initiatieven. Hiervoor geldt dat opslag met name gebruikt wordt om bepaalde duurzame bronnen efficiënt in te kunnen zetten, maar er zijn alternatieven, zoals het weggooien van warmte bij overproductie en het inzetten van gasboilers bij te veel vraag.

In Figuur 4.1 worden vier mogelijke ontwikkelpaden beschreven voor aanleg van ondergrondse waterstofopslag inclusief belangrijke mijlpalen voor beleid en onderzoek. Het uitgangspunt is hier dat het maximaal aantal nieuw aan te leggen zoutcavernes voor 2050 om technische en praktische redenen tot 60 wordt beperkt¹⁰. Enerzijds hangt dit samen met de beschikbare tijd om deze cavernes aan te leggen (productiecapaciteit) en anderzijds met de mogelijke beperkingen om gewonnen pekels te verwerken dan wel af te voeren. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen hoeveel cavernes praktisch gezien kunnen worden gerealiseerd voor 2050. De technische en praktische realiseerbaarheid van pure waterstofopslag in gasvelden dient rond 2030 te zijn aangetoond om tijdig toegang te hebben tot operationele locaties. Indien dat haalbaar blijkt, kunnen mogelijk bestaande UGS-locaties worden omgebouwd. Met de ontwikkeling van andere gasvelden kan een betere spreiding van waterstofopslaglocaties (Zuid/Noord Holland, Kustnabije velden) worden bereikt.

¹⁰ De aanleg van drie grotere (1 miljoen m³) opslagcavernes per jaar tussen 2030 en 2050 resulteert jaarlijks in een hoeveelheid zout die gelijk is aan de huidige totale jaarproductie van ca. 6 miljoen ton steenzout.



Figuur 4.1 Overzicht van vier mogelijke ontwikkelpaden en bijbehorende mijlpalen voor aanleg van ondergrondse waterstof tussen 2020 en 2050. De aantallen cavernes en gasvelden betreffen indicatieve ranges die zijn afgeleid van de scenario's in de technische analyse (aangenomen waterstofopslagcapaciteit: zoutcaverne ca. 250 GWh en gasveld ca. 8 TWh).

Hieronder worden de paden kort toegelicht:

A – D. Alle ontwikkelpaden gaan uit van de aanleg van 1 – 4 zoutcavernes voor waterstofopslag. Het aantal zal afhangen van de mate waarin andere flexibiliteitsopties worden ingezet.

- A. In dit ontwikkelpad is de aanleg voor waterstofopslagcapaciteit gering en in principe goed inpasbaar binnen nieuw aan te leggen zoutcavernes in de nu ontwikkelde zoutformaties. Dat kan twee hoofdredenen hebben, 1) er is sprake van een merendeels regelbare/constante productie (SMR/ATR¹¹, import), 2) groene waterstof heeft weliswaar een belangrijke rol in samenhang met een groot opgesteld vermogen aan wind en zon, maar er wordt zoveel mogelijk opslag vermeden door optimaal gebruik te maken van alternatieve flexibiliteitsopties (o.a. interconnectiviteit, vraagsturing via warmteboilers en productie synthetische brandstoffen).
- B. De uitgangspunten voor dit ontwikkelpad zijn grotendeels gelijk aan A(2), met het belangrijke verschil dat minder alternatieve flexibiliteitsopties worden ingezet. In plaats daarvan zullen waterstofcentrales een belangrijkere rol spelen bij het reguleren/balanceren van elektriciteitsproductie. Hierdoor zou een groter aantal zoutcavernes nodig zijn en moeten mogelijk nieuwe zoutstructuren (buiten huidige zoutwingebieden) worden aangelegd. Met de (optionele) ontwikkeling van een gasveld voor waterstofopslag kan dit waarschijnlijk vermeden worden. De verzekering van aanbod van waterstof (bijv. door verstoorde of tegenvallende productie) worden opgevangen door (variabele) import en gediversifieerde aanvoerroutes.

¹¹ Steam Methane Reforming en Autothermal Reforming: Technologieën die waterstof uit aardgas produceren, eventueel in combinatie met CCS.

- C. In dit ontwikkelpad is opslag van waterstof de belangrijkste optie voor het balanceren van grootschalige (seizoensgebonden) variaties in de elektriciteits- en mogelijk deels de warmtevoorziening. Alternatieve flexibiliteitsopties worden hoofdzakelijk voor kortdurende variaties ingezet. Een deel van de waterstofopslagen wordt ingezet als strategische reserve om een langdurige onderbreking van de waterstofproductie (windstilte) op te vangen. Vanwege de grote vraag naar waterstofopslagcapaciteit is de ontwikkeling van opslag in gasvelden noodzakelijk om het aantal aan te leggen zoutcavernes te beperken.
- D. Dit ontwikkelpad is vergelijkbaar met C met als belangrijk verschil dat er rekening wordt gehouden met grote onzekerheden omtrent aanbod. Enerzijds omdat er rekening wordt gehouden met forse extremen in weersomstandigheden (samenloop van tegenvallende jaarproductie uit wind/zon en zeer koude winters). Anderzijds omdat Nederland voor het aanbod van waterstof sterk afhankelijk is van import uit het buitenland en daarbij rekening moet worden gehouden met mogelijke onderbreking/verstoring. Om dit te ondervangen, wordt een reserve-opslagcapaciteit aangelegd tot maximaal 25% van het totale jaarverbruik. Hiervoor zijn meerdere gasvelden nodig.

In de recent uitgebrachte LSES-studie en de “Technische verkenning ondergrondse opslag in Nederland” van TNO uit 2018 worden een aantal technische, economische en juridische uitdagingen en knelpunten benoemd die moeten worden opgelost om de aanleg van ondergrondse waterstofopslag soepel en maatschappelijk verantwoord te laten verlopen. De belangrijkste punten zijn:

- Opslag van pure waterstof in zoutcavernes wordt al toegepast op enkele locaties in de Verenigde Staten en het Verenigd Koninkrijk. Deze installaties betreffen echter een lang-cyclische vorm van opslag. Er is onder meer verder onderzoek nodig naar de effecten en risico's van snel-cyclische opslag, waarbij waterstof met zeer hoge snelheid wordt geïnjecteerd en geproduceerd.
- Grootschalige opslag van pure waterstof in gasvelden is tot dusverre onbewezen. Op diverse plaatsen (o.a. Oostenrijk en Argentinië) vinden momenteel onderzoeken en pilots plaats om de haalbaarheid van waterstofopslag in (lege) gasvelden en poreuze formaties te onderzoeken en daarmee inzicht te krijgen in aspecten als terugwinbaarheid van waterstof, geochemische effecten en microbiologische effecten¹².
- De inschatting is dat er in de komende jaren nog onvoldoende markt is voor commercialisatie en opschaling van ondergrondse opslag van waterstof. Naast technische randvoorwaarden zal ook het marktpotentieel voor ondergrondse waterstof moeten worden gedefinieerd met innovatieve business cases (o.a. combineren van verschillende verdienmodellen). Hierbij moet het beschikbare potentieel voor opslag aansluiten (in tijd en ruimte) op de locatie-specifieke elementen van de energie-infrastructuur die de vraag naar opslag bepalen.
- Voor een succesvolle realisatie van opslagprojecten zal in vroegtijdig stadium (ruim voor het ingaan van het besluitvormingsproces) aandacht moeten worden besteed aan de juridisch en maatschappelijke inbedding, bijvoorbeeld:
 - Uitwerken van het publieke participatieproces (maatschappelijk draagvlak) onder de nieuwe Omgevingswet. Daarbij dient ook aandacht te zijn voor het feit dat veel van het bekende potentieel voor aanleg van zoutcavernes in specifieke gebieden in noord en noordoost Nederland is geconcentreerd

¹² Voor een actueel overzicht zie: N. Heinemann, J. Alcalde, J.M. Miocic, S.J.T. Hangx, J. Kallmeyer, C. Ostertag-Henning, A. Hassanpouryouzband, E.M. Thaysen, G.J. Strobel, C. Schmidt-Hattenberger, K. Edlmann, M. Wilkinson, M. Bentham, S. Haszeldine, R. Carbonell and A. Rudloff (2021), Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. The Royal Society of Chemistry. DOI: 10.1039/d0ee03536j.

- Opstellen van beleidsambities en beleidsinstrumenten die zowel nationale als regionale en lokale belangen in ogenschouw nemen.
- Heldere vergunningsprocedures, rekening houdend met het langdurige en complexe karakter van opslagprojecten (voorbereiding, uitvoering en sluiting) als ook de brede groep stakeholders (verschillende rollen en verantwoordelijkheden) die daarbij betrokken is.
- Voor grootschalige ondergrondse opslag zal mogelijk aanvullende wet- en regelgeving nodig zijn om de aanleg en opschaling verantwoord te laten verlopen. Voorbeelden zijn duidelijke afwegingscriteria voor vergunningen indien meerdere opslagvormen op dezelfde locatie worden aangevraagd, richtlijnen voor abandonnering en wettelijke oplossingen om eventueel overtollige pekel af te voeren.

De ontwikkelpaden in Figuur 4.1 leiden tot de volgende mijlpalen voor beleid en onderzoek tot 2030:

Demonstratie caverne: Dit is een essentiële actie die tijdig (lieft voor 2025) antwoord moet geven op operationele en beleidsmatige¹³ vraagstukken die samenhangen met waterstofopslag in zoutcavernes. Dit is een belangrijke randvoorwaarde om, indien nodig, rond 2030 een operationele opslagcapaciteit te kunnen realiseren ter grootte van 1 – 4 zoutcavernes.

Pilot en demonstratie gasveld: Ook deze ontwikkeling dient tijdig te starten. De aanlooptijd en ontwikkeltijd van een eerste waterstofopslag in een gasveld zal al snel ongeveer 10 jaar kunnen duren¹⁴. Indien de paden B, C of D realiteit worden, zal rond 2030 de technische en praktische realiseerbaarheid van waterstofopslag in gasvelden moeten zijn aangetoond met een pilot en opvolgende demonstratie. Uitgangspunt is dat er voor 2040 operationele opslagcapaciteit in gasvelden beschikbaar zal zijn.

Strategie toekomst UGS: De bestaande UGS-locaties kunnen een belangrijke rol spelen voor 2030 en 2050, als aardgas-/groengasopslag en/of als waterstofopslag. Voor 2030 dienen de opties voor deze locaties te worden uitgewerkt zodat een tijdige afweging omtrent ombouw of sluiting mogelijk is. Indien gasopslagen tussen 2020 en 2030 overbodig worden, zal ook een strategie moeten worden opgesteld voor hoe om te gaan met eventuele (tijdelijke) sluiting (wel/niet abandonneren, waar wordt onderhoud van aangelegde infrastructuur belegd, etc.).

Afbakening ontwikkelpaden 2050: Na 2030 lopen de verschillende energiescenario's sterk uiteen. Dit heeft een grote invloed op de omvang en aard van energieopslag en waterstof in het bijzonder. Om de benodigde opslagcapaciteit tijdig te kunnen ontwikkelen, zullen enkele doorslaggevende keuzes in 2030 moeten worden vastgelegd (met name t.a.v. aanbod en inzet van waterstof).

Afhankelijk van de verdere afbakening en keuzes in ontwikkelpaden, worden de volgende (voorwaardelijke) mijlpalen tussen 2030 en 2040 voorzien:

Vaststelling ruimtelijke ordening en mijnbouwbeleid zoutcavernes: Paden B – D gaan uit van de aanleg van een mogelijk groot aantal cavernes (waarschijnlijk startend vanuit de bestaande opslaglocaties Zuidwending en Heiligerlee, en mogelijk uitgroeiend naar andere

¹³ O.a. gedrag van zoutcavernes bij kort-cyclische opslag van waterstof, integriteit infrastructuur, vergunningprocedures.

¹⁴ Naast de technische realisatie zullen ook de benodigde vergunningstrajecten moeten worden doorlopen.

zoutformaties in Overijssel, Drenthe, Groningen en Friesland). Om dit in goede banen te leiden zal er vlak na 2030 een goede strategie moeten worden opgesteld om deze aantallen op een verantwoorde wijze te ontwikkelen. Dit betreft o.a. i) de praktische en technische inpasbaarheid boven- en ondergrond, ii) de lange-termijn bodemdaling (tientallen tot honderden jaren na sluiting van de opslag), iii) de afvoer van gewonnen pekel.

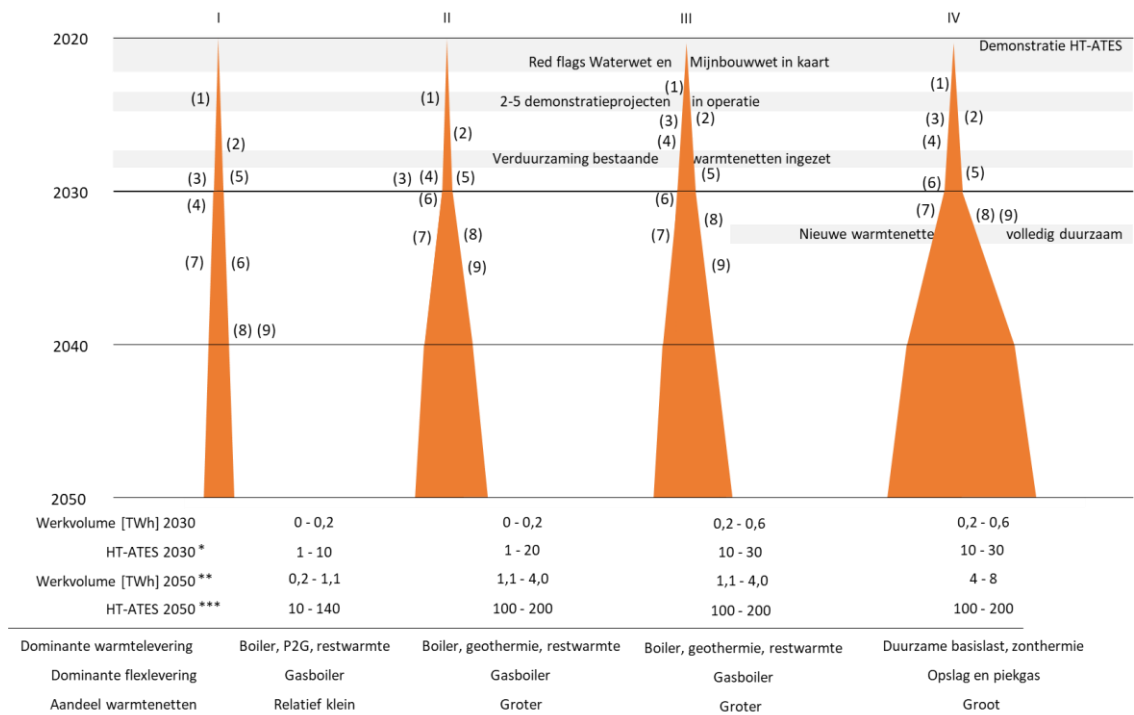
Besluit inzet gasvelden: In paden C en D wordt aanleg van waterstofopslag in gasvelden (en dus ook aantoning van geschiktheid) als noodzakelijke randvoorwaarde gezien. De tijdige aanleg van meer dan 60 zoutcavernes (vóór 2050) is in praktisch opzicht niet of zeer lastig te realiseren. In pad B is opslag in gasvelden een optionele keuze op voorwaarde dat de geschiktheid wordt aangetoond. Hiermee kan de aanleg van grote aantallen zoutcavernes eventueel worden voorkomen. Gezien het tempo van sluiting en verlating van gasvelden en de aanlooptijd voor ontwikkeling van locaties, zal uiterlijk in 2030 bekend moeten zijn of deze optie technisch en economisch haalbaar is. Deze keuze is dus ook sterk bepalend voor de vaststelling van het ruimtelijke plan en beleid voor de aanleg van zoutcavernes.

Besluit extra reservecapaciteit: Op basis van verdere afbakening van het ontwikkelpad richting 2050 zullen tijdig (vlak na 2030) keuzes moeten worden gemaakt omtrent eventuele aanleg van strategische waterstofreserves in ondergrondse opslag (pad C en D). Voor deze afweging moeten risico's omtrent aanbodzekerheid en leveringszekerheid goed in kaart worden gebracht. De uitkomsten zijn bepalend voor het aantal gasvelden en zoutcavernes dat moet worden ontwikkeld.

Start aanleg eerste opslag in gasveld, selectie andere kandidaten: Gezien de lange aanloop- en ontwikkeltijd voor aanleg van waterstofopslag in gasvelden (indicatie 10 jaar voor eerste veld, latere velden mogelijk sneller), zal in de ontwikkelpaden C en D moeten worden geanticipeerd op een start vóór 2035.

4.4 Synthese ontwikkelpad warmteopslag 2020 – 2050

Voor warmteopslag is een vergelijkbare analyse uitgevoerd als voor waterstofopslag. In Figuur 4.2 wordt de potentiële ontwikkeling van HT-ATES schematisch weergegeven. In het algemeen geldt dat er vóór 2030 veel werk verricht moet worden voordat er grootschalige ontwikkeling plaats kan vinden. HT-ATES bevindt zich nu aan het begin van de ontwikkelcurve ("S-curve"), en voor de grootschalige ontwikkeling van HT-ATES zijn er twee zaken van belang: het moment waarop barrières hiervoor zijn weggenomen (vroeg of laat) en het energiesysteem (en/of het type warmtevoorziening in warmtenetten) in 2050 waar naartoe gegroeid wordt. Het aantal buffers en de gemiddelde grootte wordt bepaald door het aantal warmtenetten en door inrichting van de warmtelevering door die warmtenetten.



Figuur 4.2 Overzicht van 4 mogelijke ontwikkelpaden en bijbehorende mijlpalen voor aanleg van HT-ATES tussen 2020 en 2050. De grootte en het aantal opslagen betreffen indicatieve ranges die zijn afgeleid van de scenario's in de technische analyse. * Het aantal HT-ATES wordt bepaald door uitkomst pilots en business case; ** Het aantal HT-ATES wordt bepaald door het aantal beschikbare warmtenetten; *** Het totale werkvolume wordt bepaald door de inrichting van het energiesysteem

De ontwikkelpaden zijn gecategoriseerd langs vier lijnen:

- i. Voor 2030 wordt getest met pilots, maar de technische performance of het economisch rendement is onzeker. De low case is dat het aantal HT-ATES klein zal blijven. Het energiesysteem is sterk ingericht op import van energiedragers en het gebruik van gasvormige energiedragers en elektriciteit in de warmtevoorziening. Hierdoor blijft het markt- en technisch potentieel voor warmtebuffering laag, zelfs als het aantal warmtenetten groot is.
- ii. Voor 2030 wordt getest met pilots, maar de technische performance of het economisch rendement is onzeker. Het kan ook zijn dat er onvoldoende barrières weggenomen zijn om snelle opschaling van het aantal HT-ATES te realiseren. Opschaling van het aantal HT-ATES is dan tegen 2035 wel ingezet. Warmtelevering in warmtenetten in 2050 gebeurt door boilers, warmtepompen en door industriële restwarmte en mogelijk geothermie.
- iii. Voor 2030 wordt getest met pilots. Voor 2030 blijkt de technische performance en het economisch rendement zodanig dat grootschalige groei van het aantal HT-ATES al is ingezet. Barrières in o.a. wet- en regelgeving zijn weggenomen zodat een groei in het aantal HT-ATES gerealiseerd kan worden. Bij het aanleggen van nieuwe warmtenetten zal het meenemen van warmtebuffering vanzelfsprekend zijn. Warmtelevering in warmtenetten in 2050 gebeurt door boilers, warmtepompen en door industriële restwarmte en geothermie.
- iv. Voor 2030 wordt getest met pilots. Voor 2030 blijkt de technische performance en het economisch rendement zodanig dat grootschalige groei van het aantal HT-ATES al is ingezet. Barrières in o.a. wet- en regelgeving zijn weggenomen zodat een groei in het aantal HT-ATES gerealiseerd kan worden. Bij het aanleggen van nieuwe warmtenetten zal het meenemen van warmtebuffering vanzelfsprekend zijn.

Warmtelevering in warmtenetten in 2050 gebeurt primair alleen door duurzame warmteproductie, dat technisch en economisch efficiënter wordt dan alternatieven door combinatie met warmtebuffer. Hierbij kan gedacht worden aan geothermie, duurzame restwarmte en zomers aanbod van goedkope warmte zoals zonthermie en omgevingswarmte (grote warmtepompen). In dit ontwikkelpad is het ook mogelijk dat warmtelevering door goedkope duurzame warmte in combinatie met warmtebuffering zodanig aantrekkelijk is geworden dat levering door warmtenetten een groter aandeel gaat krijgen in het energiesysteem dan voorzien in de meeste scenario's.

In het algemeen geldt dat er vóór 2030 veel werk verricht moet worden voordat grootschalige ontwikkeling (volgens de S-curve) plaats kan vinden. Begin jaren '20 dienen alle barrières in de wet- en regelgeving in kaart gebracht te zijn, zodat deze eind jaren '20 opgelost kunnen zijn. Rond 2025 zullen meerdere demonstratieprojecten in nieuwe en bestaande warmtenetten operationeel zijn. Deze zijn cruciaal om generieke inzichten te krijgen in o.a. het technisch rendement en technische uitdagingen (en oplossingen), en het economisch rendement voor business cases.

Mijlpalen vóór 2030:

- (1) Opslagpotentieel in kaart gebracht voor de Nederlandse ondergrond: een opslagatlas.
- (2) Kennisdelingsprogramma monitoring en prestatie demonstratieprojecten is opgezet, inclusief levensduurbepaling en strategieën voor ontmanteling.
- (3) Barrières in wet- en regelgeving zijn weggenomen:
 - a. Op dit moment heeft HT-ATES nog een "pilotstatus" (met haar eigen uitzonderingsregels). Er zal regelgeving moeten komen die continuïteit (investeringszekerheid) en opschaling mogelijk gaan maken.
 - b. Harmonisatie vergunningseisen onder Waterwet en Mijnbouwwet.
- (4) Ontstaan van een financierbare business case: een partij met HT-ATES-plannen moet bijvoorbeeld financiers kunnen vinden. Hiervoor is er een bewezen technologie nodig (zeg tien positieve ervaringen met HT-ATES) en ook een business case, mogelijk met steun (zoals uitbreiden RNES voor warmteopslag, of toevoeging aan SDE++).
- (5) Ruimtelijke planning ondergrond en bovengrond gereed: inclusief stakeholdermanagement betreft participatie burgers (nieuwe Omgevingswet) en afweging concurrerend/alternatief grondgebruik.

Mijlpalen na 2030:

- (6) Ontwerpstandaarden en veiligheidsnormen voor het aanleggen en opereren van HT-ATES zijn vastgesteld.
- (7) Ruimtelijk beleid is ingericht en maatschappelijk draagvlak wordt gemonitord. (Dit is een vervolgstap van (3)).
- (8) Bewezen en volwassen technologie: volledig financierbaar.
- (9) Een volledige (waarde)keten van ontwikkelaars, dienstleveraars en kennisdragers is ontwikkeld om ongeveer tien projecten per jaar uit te voeren.

5 Aanbevelingen

Zorg uiterlijk in 2030 voor een beter gedefinieerde blauwdruk van het energiesysteem in 2050 waarin concrete keuzes worden gemaakt omtrent de inzet en planning van de ondergrondse opslag. In alle onderzochte scenario's speelt de opslag van enige vorm van energie in de ondergrond een belangrijke rol bij het veiligstellen en efficiënt houden van het huidige en toekomstige energiesysteem. De scenario's laten ook zien dat er een zeer grote bandbreedte is in mogelijke ontwikkelpaden voor ondergrondse opslag (vorm en omvang). De ontwikkeling van ondergrondse opslag heeft een lange aanlooptijd. Het tijdig starten met de inventarisatie (vooronderzoek) en opvolgende aanleg van locaties is daarom essentieel. Afwijken van éénmaal ingezette ontwikkelingen kan mogelijk grote gevolgen hebben voor de voortgang van de energietransitie en/of de leveringszekerheid van energie. Een verantwoorde aanleg van locaties is sterk afhankelijk van een gedegen ruimtelijk ordeningsplan.

Er wordt sterk aangeraden om uiterlijk 2030 een antwoord te hebben op de vraag of waterstofopslag in gasvelden een technisch, economisch en praktisch realiseerbare optie is. Aanleg van waterstofopslag in gasvelden kan onder bepaalde randvoorwaarden en energiesysteemkeuzes noodzakelijk worden (m.n. waterstofopslag als voorkeursoptie voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit en seizoensgebonden warmte, beperkte inzet van andere flexibiliteitsopties, sterke afhankelijkheid van binnenlandse productie). Met dit inzicht kunnen ontwikkelpaden nog worden bijgestuurd en kan, zo nodig, tijdig worden begonnen met de voorbereiding en ontwikkeling van waterstofopslag in gasvelden. Specifiek dient hierbij ook gekeken te worden naar de mogelijkheden (en onmogelijkheden) van waterstofopslag op zee zodat dit mee kan worden genomen in afwegingen rondom maatschappelijke acceptatie.

Zorg dat tussen 2020 en 2030 de laatste technische vraagstukken omtrent waterstofopslag in lege gasvelden worden weggenomen, zodat de technologie in *technology readiness* stijgt naar pilotwaardig niveau. Stimuleer het starten van veldtesten. Mogelijk is deze kennis en zelfs een gasveldlocatie voor waterstofopslag sneller dan nu voorzien nodig na 2030 indien de (tijdige) aanleg van opslagcapaciteit in zoutcavernes onhaalbaar blijkt om redenen van technische barrières, ruimtebeperkingen, onaantvaardbare mijnbouweffecten en/of ontbrekend maatschappelijk draagvlak.

Zorg ervoor dat er voor 2030 een duidelijk beeld is van mogelijke alternatieven voor het geval dat waterstofopslag in gasvelden niet realiseerbaar blijkt. Dit kan forse implicaties hebben voor de keuzevrijheid in mogelijke ontwikkelpaden (o.a. grotere afhankelijkheid van import, noodzaak voor aanleg groot aantal zoutcavernes en/of inzet van alternatieve flexibiliteitsopties).

Zorg dat er vóór 2030 een duidelijk inzicht is in het aantal benodigde zoutcavernes voor waterstofopslag. Daarvoor dienen resterende technische en beleids-gerelateerde vragen te zijn beantwoord. Dit is nodig om tijdige aanleg mogelijk te maken (tientallen zoutcavernes) en een basis te bieden voor de ruimtelijke ordening en voorbereiding van beleid (o.a. ruimtelijke inpasbaarheid, bodemdaling, mogelijkheden voor aanleg op zee, verwerking en afvoer van gewonnen pekels, snelheid van aanleg zoutcavernes,

vergunningprocedures, toezicht). Dit zal ook samenhangen met de wens om voor 2030 een waterstof backbone aan te leggen.

Weeg bij de beoordeling van komende aanvragen voor CAES- en O-PAC-projecten mee dat de ervaringen uit deze projecten kunnen bijdragen aan een beter inzicht in hoe deze technologieën in praktische zin kunnen bijdragen aan de energievoorziening na 2030. Nader onderzoek is nodig om de noodzaak van CAES en O-PAC voor kortdurende netbalancering te bepalen. Met de huidige inzichten zijn er geen directe redenen om aan te nemen dat aanleg van een CAES-demonstratieproject voor 2030 zal leiden tot ruimtelijke conflicten met de aanleg van waterstofopslag. Echter, de aanleg van CAES neemt mogelijk wel zoutcaverneruimte in die anders gebruikt had kunnen worden voor aanleg van waterstofopslag (i.e. het maximaal 60 praktisch realiseerbare cavernes). Met het oog op de leveringszekerheid van de nationale energievoorziening richting 2050, dient er dus voor te worden gewaakt dat de ontwikkeling van CAES-projecten niet gaat leiden tot een blokkering van cavernes die nodig zijn voor waterstofopslag (beschikbare ondergrondse ruimte en productieruimte).

Onderzoek voorafgaand aan eventuele sluiting van bestaande UGS-locaties (ondergrondse ruimte en bijbehorende infrastructuur) of deze capaciteit moet worden behouden voor toekomstige strategische aardgasreserves dan wel waterstofopslag.

Dit kan o.a. op basis van aanbod-risicobeoordelingen en leveringszekerheid analyses (bijv. N-1-analyses) waarbij de 2030-scenario's als uitgangspunt worden genomen. Weeg hierbij ook ruimtelijke factoren mee zoals bijvoorbeeld de wens om waterstofopslag beter te spreiden buiten de geschikte locaties voor zoutcavernes (Noordoost-Nederland). Het is aannemelijk dat de vraag naar ondergrondse waterstofopslag na 2030 tot inpassingsproblemen voor nieuwe zoutcavernes kan leiden (zie ontwikkelpaden 2030 – 2050). Wat is er technisch en financieel nodig om bestaande UGS-locaties te behouden.

Anticipeer bij de aanleg van nieuwe warmtenetten en het verduurzamen van bestaande warmtenetten i.c.m. geothermie, restwarmte en duurzame bronnen zoals zonthermie en warmtepompen, op een eventuele integratie van ondergrondse warmtebuffering door bij het ontwerp rekening te houden met het lokale potentieel voor (hoge-temperatuur)warmteopslag. Dit vergroot de kans dat deze technologie efficiënt kan bijdragen aan het optimaliseren van duurzame warmtebronnen en helpt om eventuele ruimtelijke (ondergrondse) conflicten tijdig te identificeren.

6 Ondertekening

Utrecht, 23 juni 2021



TNO
J.A.J. Zegwaard



EBN
B.M. Schroot