

› Whitepaper

# ONDERGRONDSE ENERGIEOPSLAG NOODZAKELIJK VOOR TOEKOMSTIG ENERGIESYSTEEM

OPSLAG GARANDEERT  
LEVERINGSZEKERHEID EN FLEXIBILITEIT

› oktober 2021

› Serge van Gessel (TNO)  
Thijs Huijskes (EBN)  
Barthold Schroot (EBN)  
Rory Dalman (TNO)

ebn

TNO

Na 2030 ontstaat een grote behoefte aan ondergrondse opslag van energie om te kunnen garanderen dat energie continu leverbaar blijft. Dat kan ook de leveringszekerheid en flexibiliteit van ons toekomstig energiesysteem veiligstellen. Opslag van waterstof als duurzame energiedrager is daarbij onontbeerlijk. Tijdige en praktische realisatie van ondergrondse opslag vormt een grote uitdaging. Studies van TNO en EBN concluderen dat de jaren tot 2030 cruciaal zijn voor een verantwoorde ontwikkeling van duurzame ondergrondse energieopslag tussen 2030 en 2050.

## › SAMENVATTING

---

### **ONS ENERGIESYSTEEM VRAAGT OM MEER FLEXIBILITEIT**

Ondergrondse aardgasopslag is een belangrijke hoeksteen van het huidige nationale energiesysteem, die zorgt dat in ons land het hele jaar genoeg aardgas leverbaar is. Op dit moment is aardgas in gebruik om zowel warmte als elektriciteit te maken. Met de transitie naar een klimaatneutraal energiesysteem – met andere energiedragers – zullen nieuwe technologieën en oplossingen nodig zijn. Niet alleen moet Nederland aardgas als seizoensbuffer vervangen door een andere vorm van energieopslag. Ook moet het energiesysteem veel flexibeler worden, vanwege de veel grotere inzet van weersafhankelijke energiebronnen als zon en wind.

---

### **GROTE VRAAG NAAR OPSLAG VANAF 2030**

Door de noodzaak om de sterk variabele vraag en aanbod in de toekomst in balans te houden, zal ondergrondse energieopslag vanaf 2030 cruciaal worden. Hiermee wordt de leveringszekerheid van energie gegarandeerd. Studies van TNO en EBN concluderen dat tussen 2030 en 2050 een substantiële vraag zal ontstaan naar de opslag van waterstof in zowel zoutcavernes als gasvelden, doordat de grootschalige productie van waterstof dan op gang zal komen. Daarnaast kunnen technologieën zoals hoge-temperatuur warmtopslag in aquifers een belangrijke bijdrage leveren om warmtenetten te verduurzamen en efficiënter te maken.

---

## VERANTWOORDE OPSCHALING VAN OPSLAG VOORBEREIDEN

De diverse technologieën zijn nu nog in een stadium van ontwikkeling of demonstratie. In de komende jaren zijn de volgende acties nodig om ondergrondse energieopslag na 2030 verantwoord te kunnen opschalen:

- Het is van belang om de technische haalbaarheid en veilige en economisch-rendabele ontwikkeling aan te tonen van waterstofopslag en hoge-temperatuur warmteopslag, in daarvoor geschikte ondergrondse ruimtes.
- Nederland moet een robuust beleids- en toezichtkader ontwikkelen voor een verantwoorde demonstratie en opschaling. Dit beleidskader bevat een duidelijke visie op ten eerste de ruimtelijke verdeling van opslaglocaties binnen de daarvoor geschikte ondergrondse ruimte, en daarnaast op de integratie met nationale en regionale energiestrategieën en op keuzes ten aanzien van bestaande en toekomstige ondergrondse en bovengrondse activiteiten.
- De overheid zal aan maatschappelijk draagvlak moeten werken, waarbij lokale gemeenschappen en belanghebbenden van het beginstadium worden betrokken bij mogelijke locatiekeuzes, de evaluatie van alternatieven en de afweging van lokale en nationale belangen.

# INHOUDSOPGAVE

## **OP WEG NAAR EEN BETROUWBAAR ÉN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM**

6

## **GROTE VRAAG NAAR ONDERGRONDSE OPSLAG VAN ENERGIE NA 2030**

9

## **NU BESCHIKBARE ONDERGRONDSE POTENTIE KENT ZIJN GRENZEN**

16

## **KOMENDE 10 JAAR ESSENTIEEL VOOR ONDERGRONDSE ENERGIEOPSLAG NA 2030**

20

## **SNEL HANDELEN IS GEBODEN**

23

## › OP WEG NAAR EEN BETROUWBAAR ÉN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM

Het Nederlandse energiesysteem staat te boek als één van de betrouwbaarste ter wereld. De ondergrondse opslag van aardgas vormt daarbij een belangrijke hoeksteen. Met het huidige systeem zijn we zelfs in uitzonderlijke situaties, zoals extreem koude winters, verzekerd van warmte en elektriciteit. Grootschalige verstoringen zijn zeer zeldzaam.

---

## ENERGIETRANSITIE: EEN SYSTEEMOMSLAG IN 30 JAAR

In 2050 moet Nederland de uitstoot van broeikasgassen te hebben teruggedrongen met minimaal 95% ten opzichte van het niveau in 1990. Daarmee staan nationale en decentrale overheden, netbeheerders, energiebedrijven en grootverbruikers in de komende drie decennia voor de enorme opgave om het energiesysteem te transformeren. Dat betekent een omslag naar schonere en duurzame energiebronnen en energiedragers en uiteraard ook het ontwikkelen van de bijbehorende infrastructuur om al die energie ook veilig en betrouwbaar bij de eindgebruikers te brengen. Onderdeel van die infrastructuur is energieopslag.

---

## DIRECTE GEVOLGEN VAN DE ENERGIETRANSITIE

Vier ontwikkelingen spelen een belangrijke rol bij de transitie naar een systeem dat is gebaseerd op duurzame energie.

### **Aanbod hangt samen met het weer**

Op een windstille, bewolkte dag is de opbrengst van wind en zon te laag om aan de landelijke energiebehoefte te voldoen. Zeker in de winter, wanneer de vraag naar energie veel groter is dan in de rest van het jaar. Naarmate het aandeel van zon en wind in de opwek van elektriciteit groeit, zullen productie van en vraag naar energie verder ontkoppeld raken, wat de uitdaging steeds groter maakt.

### **Grotere import-afhankelijkheid**

De aardgasproductie in Nederland loopt sterk terug en deze productieafname is niet alleen op te vangen door duurzame binnenlandse energieproductie. De onzekerheden over de energiemix en de mate van import voor de langere termijn (rond 2050) zijn nog groot. Duidelijk is echter wel dat de import-afhankelijkheid in de komende jaren in ieder geval nog sterk zal groeien.

**Energie-infrastructuur heeft forse aanpassingen nodig**

De patronen van vraag naar en productie van energie zullen sterk gaan veranderen; in geografische zin, maar ook de timing en de vorm van energie. Warmte en elektriciteit zullen straks vaker lokaal worden opgewekt via bijvoorbeeld geothermie, restwarmte en zonnepanelen. En een groot deel van de elektriciteit wordt op zee geproduceerd, door offshore windparken. Elektriciteitsnetten krijgen te maken met grotere en ongelijktijdige pieken in vraag en aanbod.

---

Het Nederlandse energiesysteem staat te boek als één van de meest betrouwbare ter wereld. Ondergrondse opslag van aardgas speelt daarin een grote rol.

**Waterstof wordt een belangrijke energiedrager**

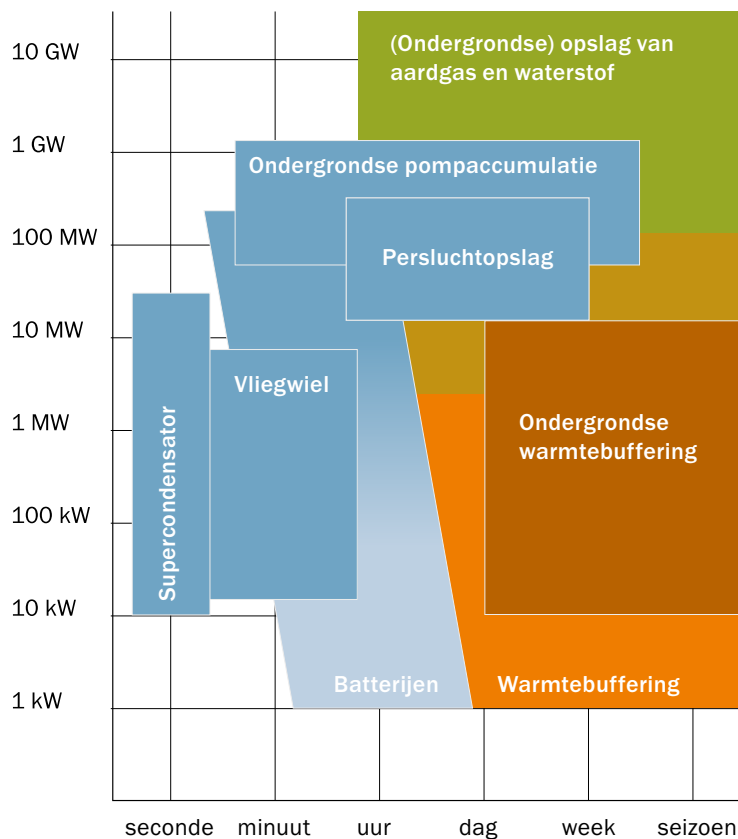
Waterstof komt meer en meer in beeld als een belangrijke energiedrager en biedt mogelijkheden voor grootschalige energieopslag. De versterking van de benodigde elektriciteitsinfrastructuur en het aanleggen een waterstofinfrastructuur gaan gepaard met allerlei vraagstukken, zoals in welke omstandigheden elektriciteit direct getransporteerd wordt via nieuw aan te leggen elektriciteitskabels, en wanneer het verstandiger is om elektriciteit vóór transport eerst om te zetten naar waterstof.

Naast deze rol van waterstof in de elektriciteitsketen, gaat er waarschijnlijk een waterstofeconomie ontstaan waarin waterstof ook andere rollen vervult. Denk aan de inzet in de mobiliteit, warmte leveren aan de industrie en als grondstof voor duurzame synthetische producten. Ook vanuit die toepassingen kan de opslag van waterstof belangrijk worden. De aanleg van een centrale infrastructuur voor waterstof zal alleen mogelijk zijn met grootschalige opslag.

## MEER FLEXIBILITEIT NODIG

De uitdagingen vragen ten eerste om meer flexibiliteit in het energiesysteem, zodat energie op elk tijdstip en op iedere locatie in de gevraagde vorm kan worden geleverd. Daarnaast is het van belang om de verschillende deelsystemen beter met elkaar te kunnen integreren. Grootschalige ondergrondse opslag van energie vormt een belangrijk deel van de oplossing.

TNO en EBN hebben samen onderzocht wat de verwachte bijdrage kan zijn van ondergrondse energieopslag in het toekomstige energiesysteem en welke acties nodig zijn om deze bijdrage ook tijdig te realiseren. De studie 'Ondergrondse opslag in Nederland: technische verkenning' van TNO en EBN uit 2018 bracht dit potentieel integraal in beeld. Een nadere uitwerking en detaillering van het potentieel voor het opslaan van waterstof en perslucht voerden we daarna uit in het TKI-project 'Large Scale Energy Storage in Salt Caverns and Depleted Fields' (TNO, 2020), en voor warmte in het project WINDOW (TNO, 2020). Het recente rapport 'Ondergrondse energieopslag in Nederland 2030-2050' (TNO en EBN, 2021) geeft de resultaten van nieuw werk en een synthese van uitgevoerd werk door verschillende partijen.



Figuur 1: Relatieve grootte en tijdsduur van technieken om tegemoet te komen aan buffering van energie.



## › GROTE VRAAG NAAR ONDERGRONDSE OPSLAG VAN ENERGIE NA 2030

Het klimaatakkoord en de ambities voor 2050 zullen in de komende jaren gaan leiden tot snelle veranderingen in het energiesysteem. Hoe het er precies uit gaat zien, is nog onbekend. Veel keuzes zijn pas in de komende decennia te maken. Maar deze veranderingen zijn wel sterk bepalend voor de aard en omvang van de benodigde grootschalige energieopslag.

---

## TOENAME VAN VARIABELE ENERGIEOPWEKKING HEEFT GEVOLGEN

De sterke toename van variabele elektriciteitsproductie door wind en zon zal tijdens de energietransitie centraal staan. Daarbij horen versterking van het transportsysteem (zogenoeten ‘netverzwaring’), de productie van (blauwe en groene) waterstof en de aanleg van duurzame warmteproductie binnen een groeiend systeem van warmtenetten.

---

## MOTIVATIE VOOR ONDERGRONDSE OPSLAG

Om verschillende redenen is de aanleg van (toekomstige) ondergrondse opslagfaciliteiten belangrijk.

- Vraag en aanbod met elkaar in balans brengen (leveringszekerheid) in centrale en regionale energienetten, en in de energiesystemen op wijk-/gemeenteniveau, waar ondergrondse opslag een goedkoper of robuuster alternatief biedt dan andere flexibiliteitsopties.
- Hoge kosten en negatieve maatschappelijke impact voorkomen.
- Bijdragen aan een efficiëntere inzet van duurzame warmtelevering, door gebruik te maken van zowel constante warmtebronnen (geothermie, restwarmte) als van seizoensgebonden warmtebronnen (zonthermie).
- Verdienmodellen ontwikkelen die rekening houden met energieprijswaarschuwingen, specifieke energiesysteemdiensten leveren en de (internationale) handel in energiedragers ondersteunen.
- Kosten en ruimtebeslag besparen door schaalgrootte.

---

## MEERDERE SCENARIO'S MOGELIJK

Verschillende partijen berekenden met behulp van modellen van het energiesysteem hoe de toekomstige energievoorziening kan bijdragen aan de gestelde klimaatambities, waarbij zij verschillende scenario's als input gebruikten. Er blijken meerdere wegen naar Rome te leiden, zo volgt uit de publicaties. De scenario's onderscheiden zich door verschillende voorspellingen (eindbeelden) voor de manier waarop ons land in 2050 energie produceert, transporteert en gebruikt, met als randvoorwaarde dat de gestelde klimaatdoelen worden bereikt.

De uitkomsten van de scenariostudies geven inzicht in onder meer de kosten van energievoorziening, de daarmee samenhangende CO<sub>2</sub>-uitstoot, de importafhankelijkheid van het energieaanbod en de flexibiliteitsmiddelen (inclusief opslag) die de betrouwbaarheid van het aanbod onder verschillende omstandigheden moeten zekerstellen.

---

## ANALYSE VAN RECENTE SCENARIO'S DOOR TNO EN EBN

Om inzicht te krijgen in de toekomstige vraag naar en het belang van (ondergrondse) opslag, naast inzet van andere flexibiliteitsopties, analyseerden TNO en EBN enkele recent gepubliceerde studies naar het toekomstige energiesysteem (zie box 1). De scenario's in deze studies nemen het Nationale Klimaatakkoord als uitgangspunt en specificeren vervolgens verschillende opties die leiden tot een gebalanceerde en CO<sub>2</sub>-neutrale energievoorziening in 2050. De uitkomsten van de analyse door TNO en EBN zijn vervolgens vertaald naar voorziene ontwikkelpaden voor ondergrondse energieopslag. Deze paden worden gebruikt om knelpunten, randvoorwaarden, benodigde beleidsacties en bijbehorend tijdspaden inzichtelijk te maken.

**BOX 1****Vormen van energiedragers**

Op hoofdlijnen zijn drie vormen van energie ondergronds op te slaan:

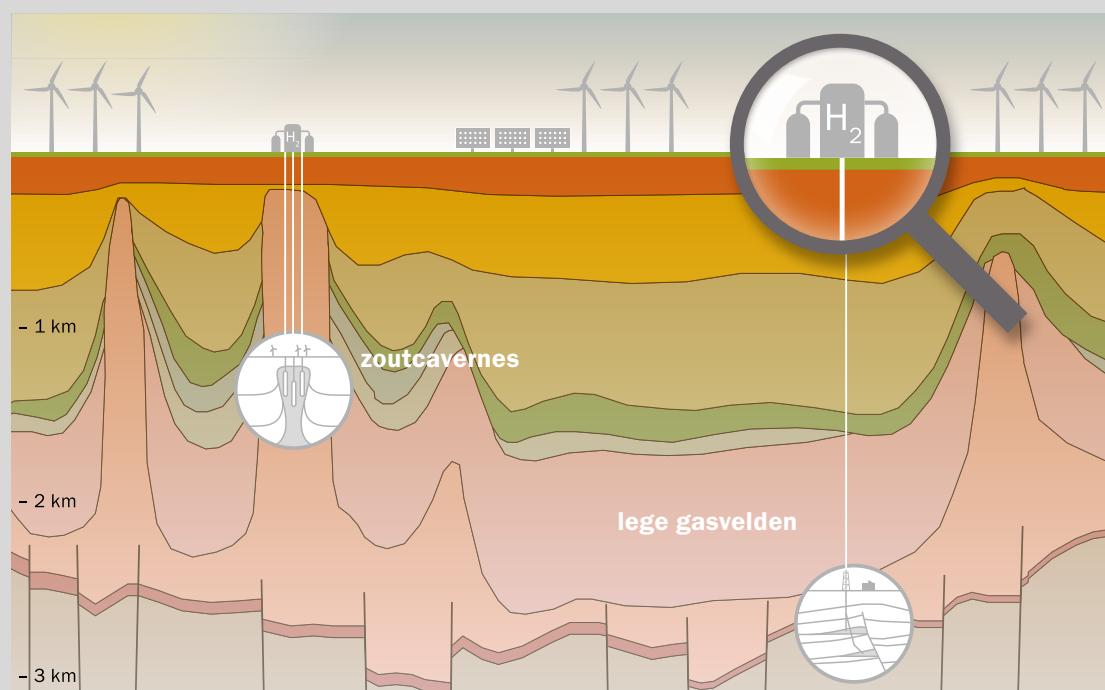
- Chemische vorm: moleculen zoals methaan en waterstof
- Thermische vorm: warm water
- Mechanische vorm: perslucht en pompaccumulatie

Deze ondergrondse energieopslagtechnologieën bieden een veel grotere opslagcapaciteit en hebben een veel groter realiseerbaar vermogen per installatie dan bovengrondse alternatieven, zoals batterijen.

**Opslaglocaties**

De Nederlandse ondergrond kent vervolgens op hoofdlijnen ook drie soorten ondergrondse ruimtes waarin energie is op te slaan:

- Ondergrondse holle ruimtes (meestal gecreëerd door menselijke activiteit), zoals zoutcavernes
- Gasvelden
- Watervoerende geologische lagen (aquifers)



**Figuur 2:** Ondergrondse ruimtes om waterstof in op te slaan; holruimtes in zoutpilaren en lege gasvelden.

## BOX 2

### Scenario's voor het toekomstige energiesysteem

Voor het bepalen van de toekomstige vraag naar ondergrondse energieopslag zijn drie recente energiesysteemstudies onderzocht. Dit zijn: i) "Klimaat-neutrale energiescenario's 2050" van Berenschot & Kalavasta (BK), ii) "*The role of large-scale energy storage in the energy system of the Netherlands, 2030-2050*" (rapportage WP1) van het samenwerkingsverband TKI Energie Large-Scale Energy Storage (LSES) en iii) "*Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050*" van TNO Energie Transitie Studies (ETS). Tezamen geven de studies een nieuw inzicht in de vraag naar flexibiliteit in het veranderende energiesysteem tussen 2030 en 2050, inclusief de mogelijk benodigde opslagcapaciteit in de vorm van ondergrondse opslag van energie. In alle scenario's wordt voldaan aan de doelstelling om 95% reductie van de emissies (in CO<sub>2</sub>-equivalenten) in 2050 t.o.v. het niveau in 1990 te realiseren.

De studie van BK poneert vier scenario's voor 2050 op basis van verschillende maatschappelijke beelden. Deze zijn door BK doorgerekend met het Energie Transitie Model van Quintel. De scenariokeuzes leiden tot de noodzaak voor het aanleggen van een ondergrondse opslagcapaciteit (m.n. waterstof) voor het balanceren van seizoensgebonden vraag-aanbodfluctuaties en de variabele elektriciteitsproductie uit zon en wind.

- **Regionale sturing:** Focus op regionale energieproductie en energienetten. Grote mate van zelfvoorziening met hernieuwbare productie van elektriciteit (zon en wind), warmte (geothermie, rest- en omgevingswarmte) en circulariteit. Krimp van energie-intensieve industrie.
- **Nationale sturing:** Focus op grote nationale energieprojecten en distributienetten. Grote mate van zelfvoorziening met hernieuwbare productie van elektriciteit (zon en wind), warmte (geothermie, rest- en omgevingswarmte) en circulariteit. Energie-intensieve industrie blijft gelijk.
- **Europese CO<sub>2</sub>-sturing:** Algemene CO<sub>2</sub>-heffing met importheffingen & compensatie aan de grenzen van Europa. Aardgas houdt een belangrijk aandeel in het energiesysteem naast waterstof en biomassa, waarvoor wereldwijde markten bestaan. Er is een grote importafhankelijkheid. CCS (CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag) krijgt veel ruimte om toegepast te worden voor het halen van klimaatdoelen. Energie-intensieve industrie groeit.
- **Internationale sturing:** Fossiele energie wordt wereldwijd beperkt. Vrije handel wordt gestimuleerd met wereldwijde waterstof- en biomassamarkt. Er is een grote importafhankelijkheid. CCS krijgt veel ruimte om toegepast te worden voor het halen van klimaatdoelen. Energie-intensieve industrie groeit.

De studie van LSES neemt naast een klimaatakkoordscenario voor 2030 een aangepaste versie van het "Nationale Sturing"-scenario van BK voor 2050 als uitgangspunt. Deze scenario's zijn doorgerekend met de OPERA- en COMPETES-modellen waarin technologieën worden gekozen op basis van de laagste maatschappelijke kosten in een bepaalde situatie (kostenoptimalisatie). Hierdoor krijgen alternatieve flexibiliteitsopties (interconnectiviteit, *curtailment* en vraagsturing) in veel gevallen de voorkeur boven het installeren van een grote ondergrondse opslagcapaciteit.

De studie van TNO-ETS presenteert twee scenario's voor de periode 2030-2050 op basis van twee extremen in intrinsieke motivatie van burgers en bedrijven. De resultaten zijn met het OPERA-model doorgerekend.

- **TRANSFORM:** Nederland is bereid tot gedragsverandering en schakelt over op een schone, energiezuinige economie met nieuwe innovatieve technologieën. Hierdoor wordt Nederland minder energie-intensief en krijgt hernieuwbare productie uit zon, wind en geothermie een belangrijke aandeel in de energievoorziening.
- **ADAPT:** Nederland bouwt voort op zijn huidige economische sterktes en kiest het voor zekerheid en behoud van de huidige levensstijl. Biomassa en aardgas hebben een groot aandeel in de energievoorziening en CCS speelt een belangrijke rol bij het behalen van de doelstellingen voor broeikasgasreducties.

---

## VERWACHTE ONTWIKKELINGEN VOOR OPSLAG

Voor de verschillende vormen van ondergrondse energieopslag zijn over het algemeen verschillende ontwikkelingen te voorzien.

### **Aardgas en groengas: voldoende opslagcapaciteit**

Aardgasopslag is wereldwijd de verst ontwikkelde vorm van grootschalige energieopslag en in vele vormen in gebruik. Nederland heeft momenteel vijf locaties voor gasopslag in voormalige gasvelden en in zoutcavernes. Die worden ingezet voor zowel leveringszekerheid als voor internationale handel in aardgas. Uit de onderzochte energiescenario's volgt dat er voor het opslaan van aardgas geen nieuwe locaties nodig zijn. De huidige aardgasopslagen bieden ruimschoots voldoende opslagcapaciteit voor de toekomstige vraag-aanbodbalans, inclusief de eventuele aanleg van strategische reserves (de verzekering van het aanbod bij grote importafhankelijkheid). Naar schatting zullen één à twee van deze locaties voldoende zijn om vraag en aanbod van aardgas en groengas<sup>1</sup> na 2030 in balans te brengen. Openstaande vragen daarbij zijn:

- Welke van de vijf locaties moeten worden behouden voor aardgasopslag?
- Zijn de overige locaties eventueel in te zetten voor waterstofopslag en zo ja, wat zijn de technische en juridische randvoorwaarden om deze transformatie te realiseren?

---

1 Aardgas-equivalent gas, geproduceerd uit biogas

### **Waterstofopslag volgens alle scenario's noodzakelijk**

In Nederland zijn nog geen locaties voor ondergrondse opslag van waterstof ontwikkeld. Diep gelegen cavernes in dikke steenzoutformaties bieden op dit moment al een technisch bewezen concept voor de opslag van pure waterstof. In het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten zijn vier locaties in bedrijf. De technische en economische haalbaarheid van pure waterstofopslag in poreuze gesteentelagen (waaronder gasvelden) moet nog worden bewezen. Diverse pilot- en demonstratieprojecten zijn in ontwikkeling binnen en buiten Europa. In Nederland zijn een test en pilot in voorbereiding, op de locatie van de aardgasopslag in Zuidwending.

---

### **Ondergrondse opslag van waterstof gaat de komende 20 à 30 jaar een essentiële rol krijgen.**

Volgens alle onderzochte scenario's is ondergrondse opslag van waterstof noodzakelijk om de leveringszekerheid van energie in Nederland te waarborgen. Naast de noodzakelijke opslag om vraag en aanbod in balans te brengen, zal er mogelijk ook een behoefte ontstaan om extra (strategische) reserves in opslagen aan te leggen en ons land zo te verzekeren tegen grootschalige verstoringen in aanbod, zoals uitval van de hoofdinfrastructuur, of geopolitieke conflicten. De inschattingen van de vraag naar waterstofopslag rond 2050 lopen sterk uiteen en variëren tussen ca. 2 TWh bij een zeer beperkte rol voor waterstof in het balanceren van het energiesysteem tot meer dan 50 TWh indien waterstof een centrale rol in het energiesysteem krijgt en vooral wordt geproduceerd uit variabele bronnen zoals zon en wind. Om dit in perspectief te plaatsen: het huidige elektriciteitsverbruik in Nederland is ongeveer 110 TWh per jaar.

Zoutcavernes bieden de meest voor de hand liggende mogelijkheid om in de komende jaren de eerste locaties voor ondergrondse waterstofopslag in Nederland te ontwikkelen. De technische en operationele realiseerbaarheid zijn redelijk goed bekend. Een groot deel van de onderzochte scenario's vergt echter een grotere opslagcapaciteit dan te realiseren is in zoutcavernes alleen. In dat geval is de ontwikkeling van extra opslagcapaciteit in gasvelden noodzakelijk.

### **Warmteopslag: constante en goedkope bronnen beter benutten**

Opslag van hoge-temperatuurwarmte is met name interessant om warmte uit constante productiebronnen efficiënter te benutten, zoals geothermie en industriële restwarmte. Daarnaast is het zeer bruikbaar in combinatie met seizoensgebonden warmtebronnen als zonthermie en grote warmtepompen die in de zomer goedkope warmte kunnen leveren. Zo is overproductie in de zomer in te zetten in de wintermaanden en daarmee beperk je ook de inzet van flexibele warmtebronnen, die met name warmte leveren op basis van aardgas, elektriciteit en biomassa.

De groei van hoge-temperatuur warmteopslag is afhankelijk van de toename van (nu nog beperkt beschikbare) warmtenetten met geothermie, restwarmte en zonthermie. Grootschalige opslag van hoge-temperatuurwarmte is mogelijk in grondwater dat aanwezig is in watervoerende lagen op enkele honderden meters diepte, zogeheten aquifers. Maar die techniek staat in Nederland nog in de kinderschoenen, met slechts enkele recente pilotprojecten in ontwikkeling of realisatie. De vergelijkbare technologieën voor warmte-koudeopslag (WKO) en lage-temperatuur opslag in ondiepe bodemsystemen zijn in Nederland wel zeer breed ontwikkeld.

---

### Grootschalige ontwikkeling van hoge-temperatuur warmteopslag kan sterk bijdragen aan een meer efficiënte inzet van duurzame warmtebronnen in warmtenetten.

### **Perslucht en ondergrondse pompaccumulatie voor regionale doeleinden**

Perslucht en pompaccumulatie zijn bekende technologieën die elektrische energie kunnen opslaan. Nederland heeft nog geen bestaande installaties, maar er zijn wel plannen om deze te ontwikkelen. Buiten Nederland zijn er twee operationele ondergrondse persluchttopslagen in zoutcavernes bekend. De belangrijkste technische uitdagingen zijn het volledige duurzaam krijgen van de technologie, die nu nog afhankelijk is van aardgas, en het verhogen van de efficiëntie, momenteel rond de 50%. Pompaccumulatie is wijdverbreid met stuwmeren in bergachtige gebieden. In vlakke gebieden kan in theorie een stuwmeer in een diep ondergrondse reservoir (in tunnels) worden aangelegd. Deze technologie is nog niet toegepast.

Volgens de onderzochte scenario's en modellen zijn persluchttopslag en pompaccumulatie geen kritische technologieën om de nationale leveringszekerheid te borgen. Het balanceren van aanbod en vraag van elektriciteit blijkt voldoende (bovengrondse) alternatieven te hebben. De aanleg van deze opslagtechnieken kan alsnog aantrekkelijk zijn voor private initiatieven met verdienmodellen die zich richten op ondersteunende diensten voor het elektriciteitsnet met tijdschalen van een kwartier tot hooguit één à twee dagen.

De aanleg van persluchttopslag zal wel concurreren met de benodigde ruimte voor aanleg van cavernes waarin waterstof is op te slaan. Er bestaan ideeën om ondergrondse pompaccumulatie te ontwikkelen in ondergrondse tunnels in kalksteenformaties in Zuid-Limburg op een diepte van 1400 meter. Deze ideeën zijn nog niet vergevorderd.

## NU BESCHIKBARE ONDERGRONDSE POTENTIE KENT ZIJN GRENZEN

Ondergrondse energieopslag omvat een breed palet aan technologieën die samenhangen met de verschillende energievormen en energiedragers. Ook al biedt de ondergrond in theorie enorm veel ruimte, het praktisch potentieel is veel kleiner.

## MOGELIJKHEDEN VOOR OPSLAG PER ENERGIEDRAGER

Niet ieder soort ondergrondse ruimte is geschikt voor het opslaan van alle drie de energievormen. Tabel 1 geeft een overzicht van de mogelijkheden.

	Aardgas	Waterstof	CAES*	Warmteopslag	OPAC*
<b>Holle ruimtes</b> - zoutcavernes	✓	■	■+	◐	—
- verlaten mijnen	—	—	—	✓	⊙
- tunnels	+	●	+	⊙	◐
<b>Poreuze ruimtes</b> - (lege) gasvelden	✓	◐	⊙	⊙	—
- watervoerende lagen	+	●	⊙	✓	—

- ✓ Ontwikkeld (NL)
- ⊙ Mogelijkheden onderzocht (NL)
- ⊙ Conceptueel
- ⊕ Ontwikkeld demo (buitenland)
- Mogelijkheden onderzocht (buitenland)
- Ongeschikt
- Ontwikkeling voorgenomen (NL)

**Tabel 1:** Overzicht van vormen van ondergrondse energieopslag en de theoretische geschiktheid van ondergrondse ruimte. \* = perslucht; \*\* = ondergrondse pompaccumulatie

## PRAKTISCH POTENTIEEL VOOR ONDERGRONDSE OPSLAG

De Nederlandse ondergrond biedt een groot technisch potentieel voor het aanleggen van ondergrondse opslaglocaties voor energie (Figuur 3), maar het praktisch realiseerbare potentieel is veel kleiner.

### Zoutcavernes bieden een deel van de ruimte

Zoutcavernes zijn wereldwijd al enkele decennia in gebruik voor de opslag van aardgas. In de toekomst zijn mogelijk ook cavernes aan te leggen om waterstof en perslucht in op te slaan. Daarvoor evalueerden TNO en EBN in eerste instantie de steenzoutformaties in het noorden en oosten van Nederland (zie Figuur 4), waarvoor nog in meer gedetailleerd onderzoek moet worden aangetoond of de locaties geschikt zijn. Dat gebeurt met opsporingsonderzoeken en boringen. In theorie



zouden ook zoutformaties onder de zeebodem te gebruiken zijn, maar de algemene praktische en economische haalbaarheid van die optie vergt nog nader onderzoek. Projecten op zee zullen in elk geval altijd aanzienlijk hogere kosten met zich meebrengen dan projecten op land.

De maximale ruimte die in onderzochte en geschikt veronderstelde zoutstructuren aanwezig is om nieuwe cavernes in aan te leggen, vormt de theoretische opslagcapaciteit. Uit het onderzoek van TNO en EBN volgt dat er op land – technisch gezien – ruimte is voor de aanleg van enkele honderden nieuwe zoutcavernes, maar de verwachting is dat tussen 2030 en 2050 maximaal slechts 60 cavernes kunnen worden aangelegd.

Door meerdere oorzaken is er een limiet aan het praktisch realiseerbare aantal cavernes. Bijvoorbeeld de snelheid waarmee cavernes worden geloofd: de aanleg van één grote caveerne duurt circa. drie jaar. Bovendien kan een beperkt aantal locaties gelijktijdig operationeel zijn. Verder zijn de afzetmogelijkheden voor het gewonnen steenzout van belang, zijn er ruimtelijke beperkingen voor de aanleg van caveerneclusters en gaat de aanleg naar verwachting gepaard met bodemdaling. Dit alles betekent dat in Noord- en Oost-Nederland maximaal 16 TWh opslagcapaciteit voor waterstof realiseerbaar is, inclusief de ombouw zoutcavernes nabij Zuidwending en Winschoten, die nu in gebruik zijn voor aardgasopslag (zie Tabel 2).

Gasvelden (land/kust)	Theoretisch/Technisch		Praktisch realiseerbaar	
	Aantal	TWh	Aantal	TWh
Bestaande gasopslagen	4	33	2-3*	16-24
Overige gasvelden	90	296	4	32

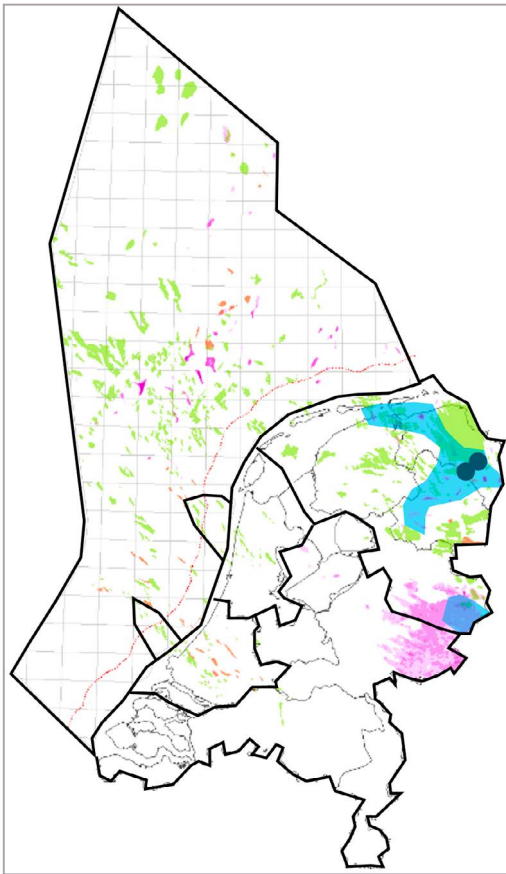
\* Aantal beschikbare gasopslagen voor waterstof afhankelijk van vraag naar aardgas-/groengasopslag opslag in 2050

Zoutcavernes (land)	Theoretisch/Technisch		Praktisch realiseerbaar	
	Aantal	TWh	Aantal	TWh
Bestaande opslagcavernes	5	1	5	1
Nieuwe zoutcavernes	160-315*	42	60	15

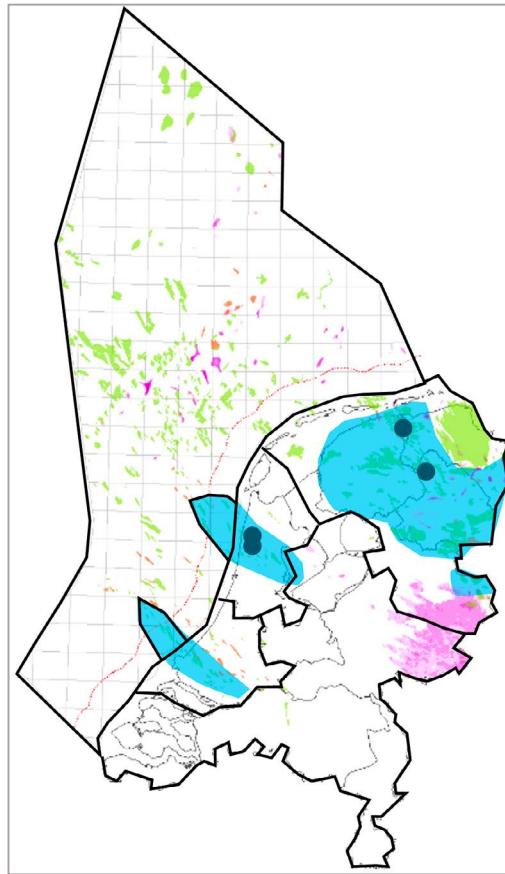
**Tabel 2:** Overzicht van theoretische en praktisch realiseerbare opslagcapaciteit voor waterstof in gasvelden en zoutcavernes (\*Het theoretisch aantal hangt af van de gekozen grootte van de cavernes.)

### Meeste ruimte in gasvelden, maar er zijn uitdagingen

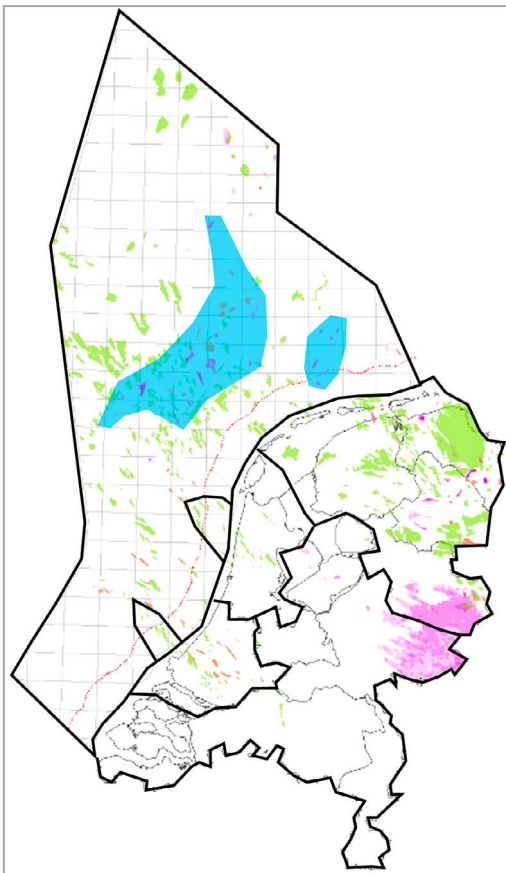
Tussen nu en 2030 zal een groot deel van de gasvelden op land en zee uit productie gaan. Deze velden bieden ruimte voor opslag van koolstofdioxide en waterstof. Waterstofopslag in gasvelden is nog geen bewezen technologie. Daarom werken meerdere partijen (internationaal) samen om openstaande technische vragen weg te nemen. Op land en in kustnabij zeegebied liggen in totaal zo'n 90 ontwikkelde gasvelden die voldoen aan basale technische geschiktheidscriteria. Voor waterstof resulteert dit in een theoretische opslagcapaciteit van 296 TWh.



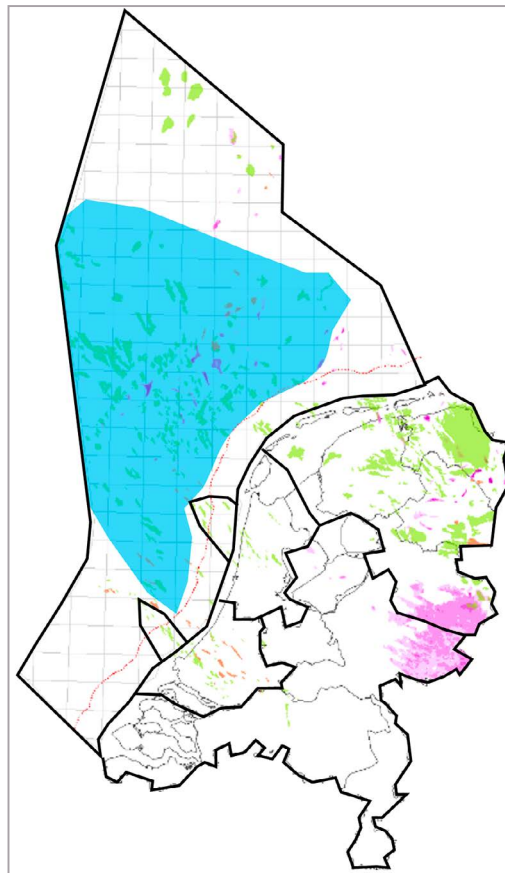
Bestaande opslagcavernes 1 TWh  
 Ontwikkelde structuren 9 TWh  
 Niet ontwikkelde structuren 33 TWh



Bestaande gasopslagen 33 TWh  
 Overige velden land 246 TWh  
 Velden kustnabij 50 TWh



Zoutstructuren offshore Niet bepaald



Gasvelden offshore 220 TWh

■ gasvelden   
 ■ zoutstructuren   
 ■ theoretisch potentieel   
 ● bestaande gasopslag

**Figuur 3:** Overzicht van gebieden waar zich gasvelden en zoutstructuren bevinden waarin mogelijk opslaglocaties kunnen worden aangelegd. De getallen geven de theoretische opslagcapaciteit voor waterstof weer.

Bij opslag van waterstof in gasvelden zijn er, afhankelijk van de locatie, diverse operationele uitdagingen. De mogelijkheid van chemische en microbiologische omzetting (en dus verlies) van waterstof bestaat. Reactieproducten of andere stoffen kunnen het reservoir vervuilen, er kunnen blokkades ontstaan van de doorstroming in het reservoir, waterstof kan niet volledig terug te winnen blijken, of het afsluitend gesteente of de productieput kan worden aangetast. TNO en EBN doen, samen met internationale partners, onderzoek om de gevolgen van deze risico's te minimaliseren.

Voor de periode tussen 2030 en 2050 gaan wij er in de recente studie van uit dat een maximum aantal van zes tot zeven gasvelden te ontwikkelen zijn tot waterstofopslaglocatie. Twee of drie daarvan zouden bestaande aardgasopslagen kunnen zijn die voor waterstof geschikt worden gemaakt. Dit uitgangspunt betekent een maximaal praktisch realiseerbare opslagcapaciteit van ca. 56 TWh (Tabel 2). De werkelijke capaciteit hangt af van de gekozen gasvelden en de operationele criteria. Pas als alle technische, beleidsmatige en maatschappelijke hordes genomen zijn, kan waterstofopslag in gasvelden plaatsvinden.

### **Aquifers voor warmteopslag**

De Nederlandse ondergrond bevat in het dieptebereik tussen ca. 100 en 1500 meter meerdere watervoerende geologische formaties: aquifers. In theorie zijn die geschikt zijn voor hoge-temperatuur warmteopslag. Voorwaarde is wel dat een 'geconcentreerde warmtevraag' – een groot genoeg woongebied – dichtbij is.

De technologie is op diverse plaatsen al gedemonstreerd. Veel van de aquifers zijn regionaal in beeld gebracht in het kader van nationale geologische en geohydrologische karteringen. De lokale geschiktheid hangt af van ondergrondse factoren, zoals de dikte van het zandpakket, de doorlatendheid en of een afsluitende kleilaag aanwezig is. Maar ook van bovengrondse factoren: van belang is onder meer dat warmtenetten met duurzame warmtebronnen nabij zijn en dat er geen interferentie is met beschermde natuurgebieden en oppervlaktewater.

De resultaten van het onderzoeksproject WINDOW geven voor een aantal gebieden in detail weer hoe kansrijk de opslag van hoge-temperatuurwarmte is. Grote delen van het westen van Nederland hebben een gunstige ligging voor de opslag van warm water, maar vooral de stedelijke gebieden in de provincie Zuid-Holland vallen op als kansrijke gebieden, zoals de regio Rotterdam-Den Haag.

De ontwikkeling van ondergrondse warmteopslag kent nog diverse barrières die door nader onderzoek weg te nemen zijn. Denk aan minder gunstige diepteligging van de watervoerende pakketten, de afwezigheid van een afsluitend gesteentepakket, onzekerheden over de doorstroming, breuken in het gesteente en de nabijheid van beschermde grondwatergebieden.

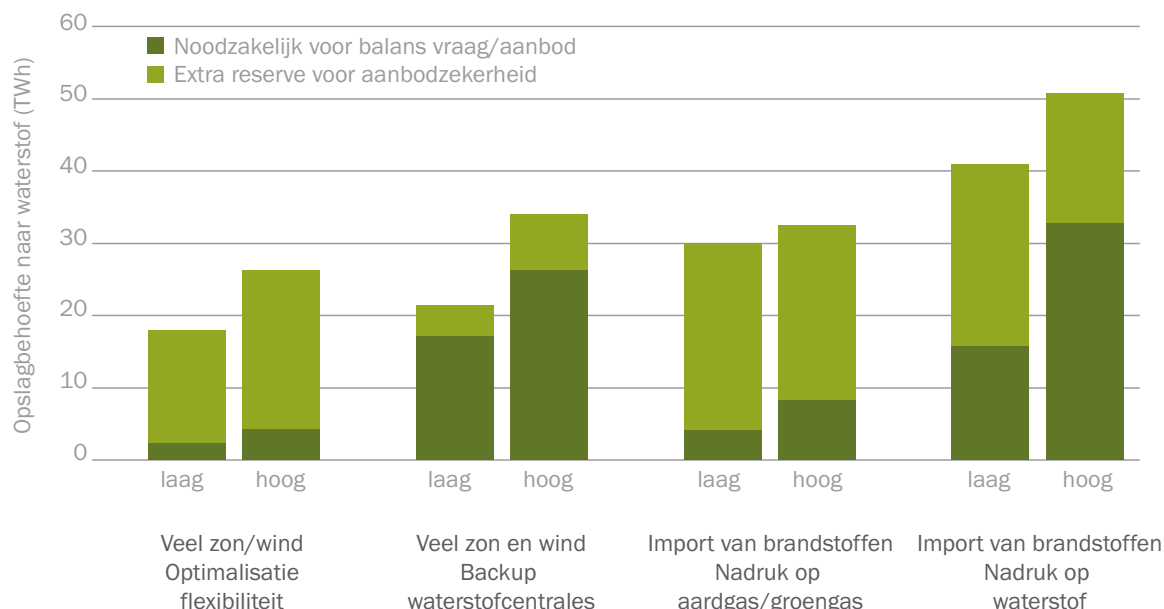
Een groot deel van Nederland vereist meer onderzoek om duidelijkheid te krijgen over de geschiktheid voor warmteopslag. Een klein gedeelte van Nederland, met name tegen de oostgrens, lijkt ongeschikt voor zulke opslag van warmte.

## › KOMENDE 10 JAAR ESSENTIEEL VOOR ONDERGRONDSE ENERGIEOPSLAG NA 2030

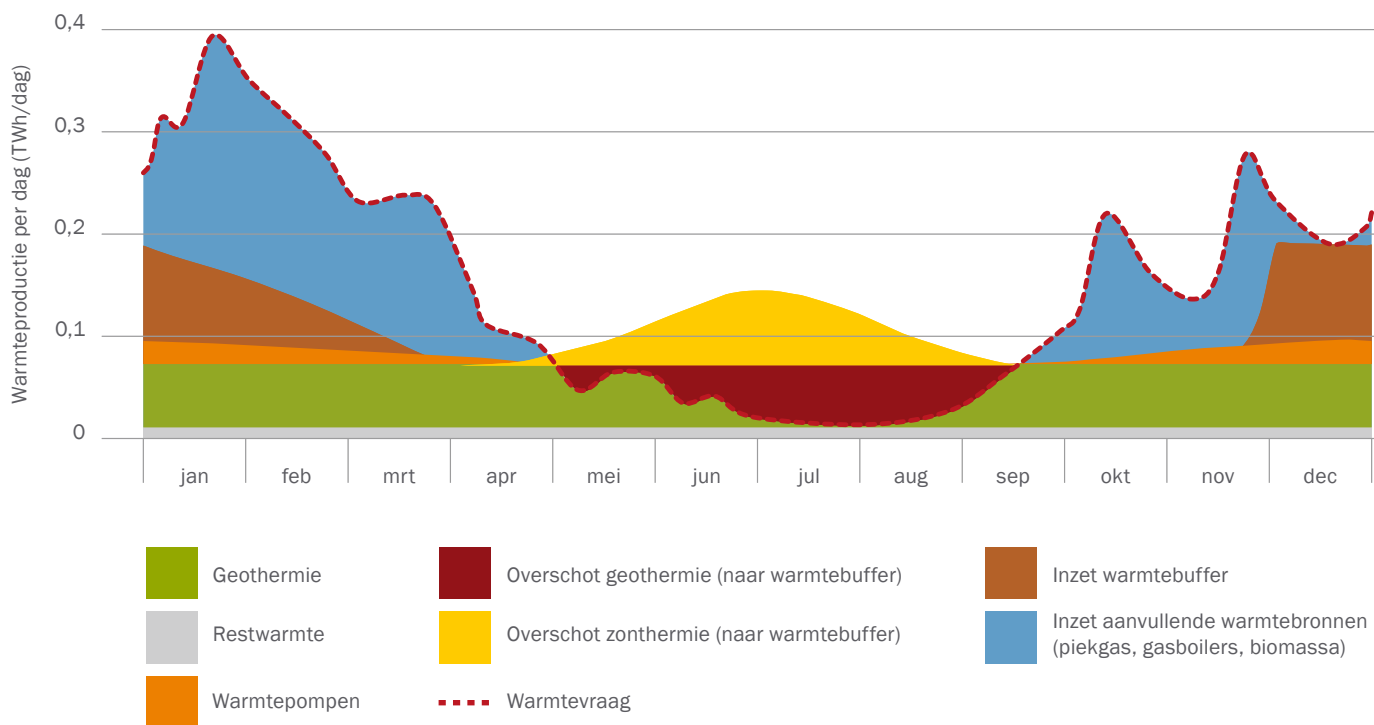
In het huidige energiesysteem in Nederland bestaat nog niet onmiddellijk de noodzaak om duurzame vormen van ondergrondse energieopslag in te zetten: de huidige beschikbaarheid van aardgas en aardgasopslagen garanderen nu nog voldoende flexibiliteit en de duurzame energiedragers van de toekomst hebben nog geen groot aandeel in het energiesysteem. We zitten nu nog in een comfortabele positie waarin de afstemming tussen vraag en aanbod vrij makkelijk gaat, maar dat zal snel veranderen.

### ONTWIKKELPADEN TNO EN EBN VOORZIEN STERKE GROEI OPSLAG WATERSTOF

De ontwikkelpaden die TNO en EBN opstelden, voorzien een sterk groeiende opslag van waterstof na 2030. Naast een noodzakelijke hoeveelheid voor de vraag-aanbodbalans zou die opslag ook extra reserves moeten omvatten, om ernstige en langdurige verstoringen van productie of import het hoofd te bieden. Voor waterstof kunnen die extra reserves in 2050 oplopen tot ruim 50 TWh. In dat geval zijn naast de maximaal 60 nieuwe zoutcavernes ook nog 5 of 6 gasvelden nodig.



Figuur 4: Mogelijke vraag naar waterstofopslag in 2050 in relatie tot verschillende ontwikkelingen van het energiesysteem.



Figuur 5: Schematisch voorbeeld van het effect van de inzet van ondergrondse warmtebuffering in 2050 met duurzame warmtebronnen.

## DUURZAME BRONNEN EFFICIËNTER BENUTTEN MET WARMTEOPSLAG

Grootschalige ontwikkeling van hoge-temperatuur warmteopslag kan sterk bijdragen om duurzame warmtebronnen efficiënter te benutten, en daarmee de inzet van andere (fossiele) bronnen te voorkomen. De ontwikkelpaden van TNO en EBN voorzien 100 tot 200 opslagsystemen in watervoerende lagen binnen de bovenste paar honderd meter van de ondergrond. Dit aantal is sterk afhankelijk van de aanleg van warmtenetten binnen het gebied waar de potentie voor aanleg van hoge-temperatuur opslag haalbaar is.

De Nederlandse ondergrond biedt een groot potentieel voor het aanleggen van ondergrondse opslag voor waterstof en warmte. Het praktisch realiseerbare potentieel is echter veel lager.

In het algemeen geldt dat veel werk nodig is voordat hoge-temperatuur warmteopslag serieus kan opschalen. De technologie, alhoewel technisch bewezen, bevindt zich nu aan het begin van de ontwikkelcurve. Vanwege de ontwikkeling van warmtenetten en constante warmtebronnen is het van belang om vóór 2030 met pilots te testen hoe de technologie efficiënt in warmtenetten is in te zetten. Daarnaast moet de overheid cruciale onzekerheden over het ondergrondse potentieel wegnemen en kijken hoe de vergunningprocedure aansluit bij de ontwikkeling. Vragen die gaan spelen, gaan bijvoorbeeld over de samenhang tussen de mijnbouwwet en de omgevingswet, over ruimtelijke inpassing en interacties, en hoe om te gaan met de aanleg rond het grensvlak waar de mijnbouwwet wel of niet van kracht is.

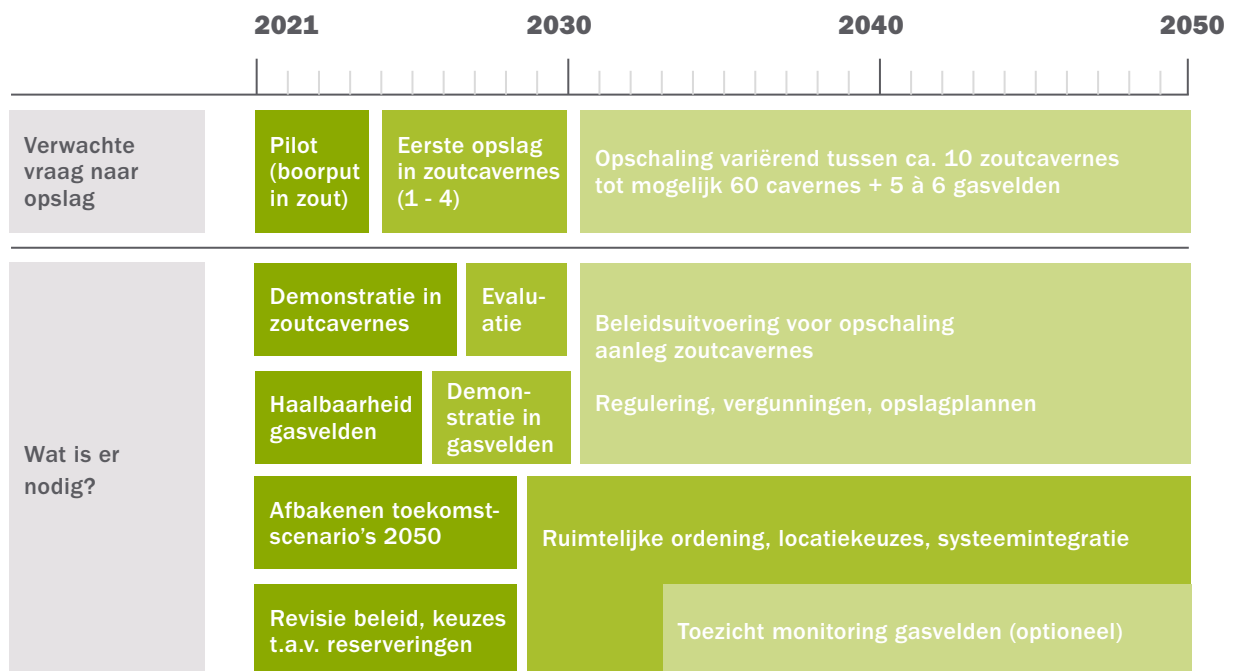
---

## **KLEINE ROL PERSLUCHT VOOR NATIONALE ENERGIEZEKERHEID**

Voor perslucht is er volgens de huidige scenario's en modellen geen noemenswaardige rol bij het in balans houden van het nationale energiesysteem. De technologie kan een interessant zijn voor privaat-commerciële diensten, bijvoorbeeld als onderdeel van regionale energiestrategieën.

## SNEL HANDELEN IS GEBODEN

Er bestaan nog significante technische en economische barrières voor grootschalige ondergrondse opslag van waterstof en hoge-temperatuurwarmte, en de ontwikkeling van deze technologieën neemt doorgaans enkele jaren tot een decennium in beslag. Daarom is snelle actie wenselijk om tot een maatschappelijk verantwoorde en efficiënte opschaling na 2030 te komen. We benadrukken dan ook het belang om vóór 2030 de volgende voorbereidingen en uitdagingen op te pakken.



Figuur 6: Grafische weergave van de tijdslijn met de te nemen barrières van ondergrondse waterstofopslag.

## DEMONSTREER VEILIGE EN RENDABELE INZET VAN OPSLAGTECHNOLOGIEËN

### Waterstof

Waterstofopslag in zoutcavernes is in principe een bewezen technologie. Onderzoek is nodig om na te gaan wat de gevolgen zijn van het aanleggen van grote aantallen cavernes – onder meer de effecten van lange-termijn bodemdaling – en hoe snel-cyclische productie en injectie de integriteit van putten en opslaginstallatie beïnvloeden.

De technische haalbaarheid van waterstofopslag in gasvelden moet nog worden aangetoond. Daarbij gaat het met name om de impact van omzetting van waterstof, vermenging met andere stoffen in de ondergrond, stromingsgedrag en geomechanische effecten op de veiligheid en het rendement van opslag.

Nieuwe inzichten uit nationaal en internationaal onderzoek moeten helpen om betere selectiecriteria op te stellen voor technisch geschikte gasvelden, om ontwerpschema's te maken voor het aanleggen van cavernes en om richtlijnen te formuleren voor een efficiënte en veilige bedrijfsvoering, inclusief het monitoren en mitigeren van eventuele risico's.

### **Warmte**

Een succesvolle opschaling van hoge-temperatuur warmteopslag staat of valt met een goed beeld van de ondergrondse mogelijkheden en een inschatting van de onzekerheden. Dit is essentieel voor het goed kunnen beoordelen van investeringsrisico's. R&D-programma's zouden zich onder andere moeten richten op monitoring en prestatie, en zouden demonstratieprojecten moeten opzetten, de levensduur en integriteit van putten onderzoeken en strategieën voor ontmanteling uiteenzetten.

---

## **STEL BELEIDSKADERS EN BIJBEHORENDE VISIE OP VOOR DUURZAME ENERGIEOPSLAG**

### **Waterstof**

De komende jaren zullen steeds meer gasvelden in aanmerking komen voor sluiting. Ons dringende advies is om daarbij de mogelijkheden voor waterstofopslag mee te wegen. Dat geldt met name voor de bestaande aardgasopslaglocaties die kunnen bijdragen aan een snellere ontwikkeling van waterstofopslag, zoals bewezen goede prestaties en de aanwezigheid van bovengrondse faciliteiten, inclusief aansluiting op het gasnetwerk. Bij nieuwe locaties voor zoutwinning is het ontwerp mogelijk af te stemmen op eventuele toekomstige opslag. Deze strategische keuzes vragen om aanvullend beleid om ruimte te reserveren en toegankelijk te houden voor de aanleg van opslagfaciliteiten.

Naast de mogelijkheden voor opslag op land moeten we ook kijken naar de haalbaarheid van opslag op zee. Dat kan mogelijk nog oplossingen bieden voor het opslagvraagstuk.

De voorbereiding en ontwikkeling van opslaglocaties is een langdurig en complex proces, met veel vergunningprocedures en interacties met lokale gemeenschappen en belanghebbenden. Nederland moet ervaring opbouwen om een effectief besluitproces in te richten. Dit omvat een solide en gedeelde kennisbasis voor alle partijen en duidelijkheid over de verschillende rollen en elementen van vergunningverlening en besluitprocessen.



## Warmte

Op dit moment heeft hoge-temperatuur warmteopslag nog een 'pilotstatus'. Er zal regelgeving moeten komen die continuïteit (investeringszekerheid) en opschaling mogelijk gaat maken. Verder is het van belang om vergunningseisen onder de Waterwet en Mijnbouwwet te harmoniseren. Experts moeten ontwerpstandaarden en veiligheidsnormen vaststellen voor het aanleggen en opereren van hoge-temperatuur warmteopslag te worden vastgesteld.

Inzet van hoge-temperatuur warmteopslag is een goede mogelijkheid als aan een aantal condities wordt voldaan.

- Aanwezigheid van warmtenetten met de juiste warmtebronnen.
- Een seizoensgebonden warmtevraag in bijvoorbeeld stedelijke gebieden.
- Gunstige ondergrondse condities.
- Er moet geen interferentie zijn met ander gebruik van de ondergrond (bijvoorbeeld grondwaterwinning)
- Afweging van maatschappelijke belangen (participatie van lokale overheden, en burgers).

---

# ONDERZOEK DE HAALBARE BUSINESS CASES

## Waterstof

Nevenopbrengsten zijn nodig om de investering in flexibele waterstofproductie met ondergrondse opslag in een zoutcaverne rendabel te maken. Resultaten van dit en eerder onderzoek laten zien dat grootschalige energieopslag de maatschappij essentiële diensten biedt: strategische energiereserves en leveringszekerheid. Op dit moment wordt de systeemwaarde, ofwel de toevoeging van flexibiliteit ten behoeve van leveringszekerheid, nog niet afdoende meegenomen in de marktwaarde van een waterstofopslagsysteem. De bedrijven verdienen dus simpelweg niet genoeg om een dergelijk systeem te bestieren. Waardestapeling van verschillende inkomstenbronnen om tot een levensvatbare *business case* te komen, zal essentieel zijn om grootschalige waterstofopslag te implementeren zonder grote financiële overheidsingrepen. Uitvoerders van de energieopslagprojecten kunnen waarde creëren doordat zij bij grootschalige verstoringen van bijvoorbeeld import of extreme weersomstandigheden alsnog energie kunnen leveren.

## Warmte

Een partij met plannen voor de aanleg van hoge-temperatuur warmteopslag zal voor financiering mede afhankelijk zijn van het succes van eerdere projecten. Ook beleidsinstrumenten kunnen daaraan bijdragen, door bijvoorbeeld de garantieregeling RNES voor warmteopslag uit te breiden, of de mogelijkheid om subsidie aan te vragen via het fonds voor duurzame initiatieven SDE++. Tenslotte is het van belang om een volledige (waarde)keten te ontwikkelen voor ontwikkelaars, dienstleveraars en kennisdragers, voor het laten landen en inbedden van projecten.

---

## KIES EEN ENERGIESCENARIO

Na 2030 lopen de verschillende energiescenario's sterk uiteen. Dat heeft een grote invloed op de omvang en aard van energieopslag in het algemeen, en van waterstofopslag in het bijzonder. Om de benodigde opslagcapaciteit tijdig te kunnen ontwikkelen, zal rond 2030 duidelijker moeten zijn in welke richting het energiesysteem zich ontwikkelt. Het jaar 2030 lijkt nog ver weg, maar er moet nu al veel duidelijk worden voor de energiescenario's in die tijd, anders zijn we te laat en halen we ofwel de emissiedoelen niet of we hebben een onbetrouwbaar energiesysteem. Het rampscenario zou een koude winter zonder verwarming zijn. Het is dan ook belangrijk om op korte termijn duidelijkheid te krijgen over de mogelijke (vormen van) aanbod en vraag van waterstof. Verder is het van belang om duidelijk te krijgen in welke mate ons land extra waterstofreserves aan moet leggen voor jaren met minder opbrengst uit wind en zon, of eventuele verstoringen van import.

## CREËER DRAAGVLAK

Het is raadzaam om burgers en lokale overheden tijdig te betrekken en te informeren bij de keuze en besluitvorming over mogelijke locaties. Percepties verkennen, lokale kennis benutten en bewustwording en inzicht creëren in mogelijkheden en onmogelijkheden kunnen sterk bijdragen aan een beter gedragen afweging tussen nationale, regionale en lokale belangen.

**Met dank aan:**

Joaquim Juez-Larré  
Remco Groenenberg  
John Zegwaard  
Raymond Godderij  
Bastiaan Jaarsma  
Tjitske Visscher (redactie)

**CONTACT**

TNO Adviesgroep Economische Zaken

**Serge van Gessel, senior adviseur ondergrond en energietransitie**

✉ [serge.vangessel@tno.nl](mailto:serge.vangessel@tno.nl)

EBN

**Thijs Huijskes, reservoir engineer CCS en ondergrondse energieopslag**

✉ [thijs.huijskes@ebn.nl](mailto:thijs.huijskes@ebn.nl)