

Samenspel gasvelden en zoutcavernes voor waterstofopslag



Common Futures rapport voor EBN
19 januari 2024

Samenspel gasvelden en zoutcavernes voor waterstofopslag

Verhoudingen tussen volumes en injectie- en uitzendvermogens



In opdracht van:



Energiebeheer Nederland

Auteurs:

Steffan Brosschot
Daan Peters
Kees van der Leun
Evelien Smit

Common Futures, Energy Transition Specialists B.V.
Vondellaan 54, 3521 GH Utrecht

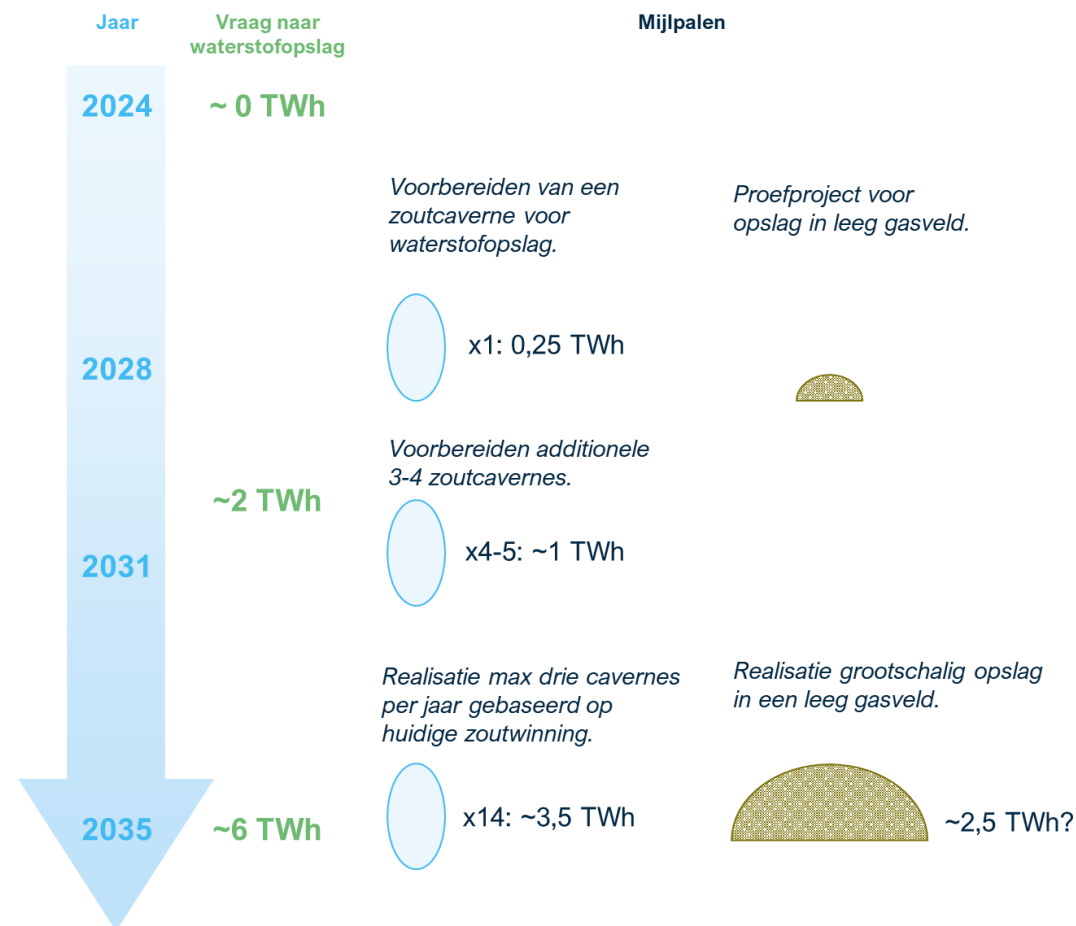
<https://www.commonfutures.com/>
+31 30 281 9699

Belangrijkste conclusies (1/2)

Nederland ontwikkelt een aantal eerste zoutcavernes voor waterstofopslag. Het is nog onduidelijk hoeveel opslagcapaciteit op middellange termijn, tot 2035, nodig zal zijn, en hoeveel injectie- en uitzendcapaciteit. Dit rapport biedt hier inzicht in, wat helpt bij het beantwoorden van de vraag in hoeverre er in de toekomst een rol voor waterstofopslag in gasvelden kan worden voorzien.

Onder de door EBN gegeven aannames over volumes en vermogens van gasvelden en zoutcavernes, en op basis van de waterstofopslag-profielen uit de Investeringsplannen 2024 (IP24) scenario's van Netbeheer Nederland, trekt Common Futures de volgende conclusies.

1. Waterstofopslag in een **gasveld lijkt onontbeerlijk** in 2035 omdat anders minstens 27 cavernes nodig zijn (bij de geldende beleidsdoelen), wat niet haalbaar lijkt.
2. Op basis van de huidige zoutproductie zijn **tot 2035 maximaal 14 zoutcavernes** te realiseren. Hiermee rekening houdende is er een grotere gasopslag nodig dan de huidige piek-gasopslag in Alkmaar met ~2,5 TWh werkvolume en meer injectie- en uitzendvermogen.
3. **Injectie- en uitzendvermogens met dezelfde verhouding** tot het werkvolume als een 'type Alkmaar' zijn **voldoende** voor een grotere gasopslag om samen met zoutcavernes aan de toekomstige opslagbehoefte te voldoen.



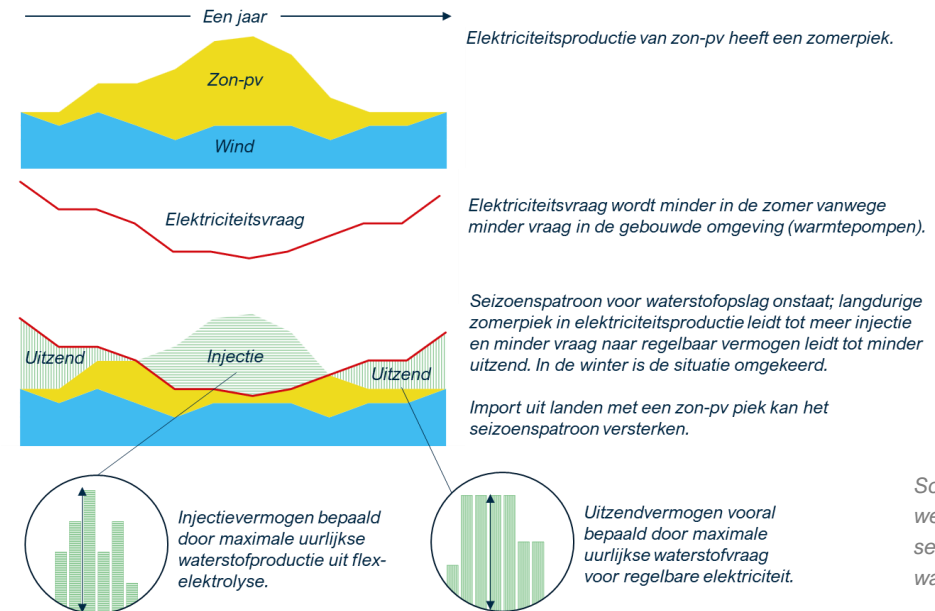
Tijddlijn van de waterstofopslag-ontwikkelingen tot en met 2035 in onze analyse.

Belangrijkste conclusies (2/2)

4. Uit onze analyse blijkt dat het benodigde **injectievermogen** vooral wordt bepaald door de maximale uurlijkse waterstofproductie uit **flex-elektrolyse**, terwijl het **uitzendvermogen** wordt bepaald door de maximale uurlijkse waterstofvraag voor **regelbare elektriciteit**.
5. Het totale benodigde **werkvolume** wordt **bepaald door** het **seizoenspatroon** in de **elektriciteitsvoorziening**. Op basis van huidige ontwikkelingen in Nederland **treedt dit effect bijna onvermijdelijk op**, onafhankelijk van de IP24/II3050 profielen.
In de zomer wordt er (door het grote aandeel zon-PV) meer hernieuwbare elektriciteit geproduceerd terwijl er minder vraag is in de gebouwde omgeving (warmtepompen). Dit leidt tot een langdurige periode met lage elektriciteitsprijzen, waarin veel elektriciteit gebruikt wordt voor waterstofproductie met flex-elektrolyse. Veel hernieuwbare elektriciteit bij een lage elektriciteitsvraag betekent ook dat 's zomers weinig waterstof nodig is voor regelbaar vermogen. In de winter is de situatie omgekeerd. Dit leidt tot een **seizoenseffect in waterstofopslag**.
 - a) Het **seizoenseffect wordt versterkt** in **extreme weerjaren** met weinig hernieuwbare elektriciteitsproductie (minder waterstofproductie uit flex elektrolyse) en veel vraag naar regelbare elektriciteitsproductie (veel vraag naar waterstof uit opslag). De **benodigde waterstofopslagvolumes worden dan groter**.
 - b) Indien waterstof **geïmporteerd wordt uit zuidelijke landen** waar het geproduceerd wordt **met zon-PV** kan dit ook het **seizoenseffect**

versterken. De benodigde waterstofopslagvolumes en de injectie- en uitzendvermogens worden dan ook groter. Voor variaties van waterstofimport uit landen met veel windenergie met een winterpiek zou dit andersom kunnen liggen.

6. Het **optimaal benutten van opslag** door trading kan leiden tot een goed **samenspel** tussen opslag in **gasvelden en zoutcavernes**. Bij gebrek daaraan kan een tekort aan elektriciteit ontstaan of moet de industrie afschakelen doordat waterstofvraag niet kan worden vervuld ('lost load'). Ook kan het voorkomen dat waterstofproductie moet worden terug geregeld ('curtailment').



Inhoud



Hoofdstuk 1:
Inleiding



Hoofdstuk 2:
Waterstofopslag in de IP24 en II3050 scenario's



Hoofdstuk 3:
Het voorzien in de waterstofopslagbehoefte met gasvelden en zoutcavernes



Hoofdstuk 4:
Samenspel tussen gasveld en cavernes



Hoofdstuk 5
Conclusies en aanbevelingen



Bijlage

Shaping
Change

A photograph of a cave interior. The ceiling is covered with numerous long, thin, white stalactites hanging down. The walls are made of reddish-brown rock with some white mineral deposits. A path of light-colored, textured material (possibly snow or mineral deposits) leads from the foreground towards a bright opening in the distance. A blue semi-circular graphic is in the top left corner.

Inleiding

Inleiding

Achtergrond en doel van dit rapport

Analyse naar de waterstofopslagbehoefte in 2035* op basis van IP 2024 in zoutcavernes en gasvelden...

Een goed werkende waterstofbackbone heeft opslag nodig. Net als pijpleidingen is opslag een noodzakelijke voorwaarde voor de ontwikkeling van de systeemrol van waterstof. Scenario's zoals geformuleerd in de II3050 studie¹ van Netbeheer Nederland laten zien dat in de komende jaren een steeds grotere opslagbehoefte bestaat. Grootschalige opslag kan plaatsvinden in zoutcavernes en lege gasvelden, eventueel inclusief omgebouwde aardgasopslagen. Zoutcavernes en gasvelden hebben verschillende karakteristieken, zo hebben zoutcavernes een beperktere opslagcapaciteit (werkvolume) maar kunnen ze sneller worden gevuld (injectievermogen) en leeggehaald (uitzendvermogen). Ook is het ene gasveld het andere niet, er bestaan grotere en kleinere gasvelden met verschillende groottes werkvolumes, gasvelden verschillen in de snelheid waarmee ze kunnen worden gevuld (afhankelijk van het aantal injectieputten en compressoren) en er kunnen ook verschillen optreden in de uitzendcapaciteit afhankelijk van de geologische eigenschappen van het reservoir en de verhouding van kussengas en werkvolume.

...en hoe kunnen combinaties van zoutcavernes en gasvelden met diverse eigenschappen het benodigde opslagvolume en de benodigde injectie- en uitzendcapaciteit bieden om te voldoen aan de opslagbehoefte?

In dit rapport voor EBN onderzoekt Common Futures hoe de opslagbehoefte voor waterstof die volgt uit IP24 scenario's² kan worden ingevuld door combinaties van meerdere zoutcavernes met een enkel gasveld. Hierbij hebben we meerdere malen een de rol van een gasveld met telkens wisselende karakteristieken geanalyseerd. Specifiek wordt gekeken in hoeverre verschillende opslagcombinaties kunnen voldoen aan het benodigde werkvolume en de benodigde injectie- en uitzendcapaciteiten; daarbij wordt bekeken in hoeverre *lost load* (onvoldoende waterstof beschikbaar uit opslag) en *curtailment* (onvoldoende injectiecapaciteit beschikbaar) optreden.

* De analyse richt zich op het jaar **2035** omdat dit het aller vroegste jaar waar er gestreefd wordt naar grootschalig waterstofopslag in een gasveld.

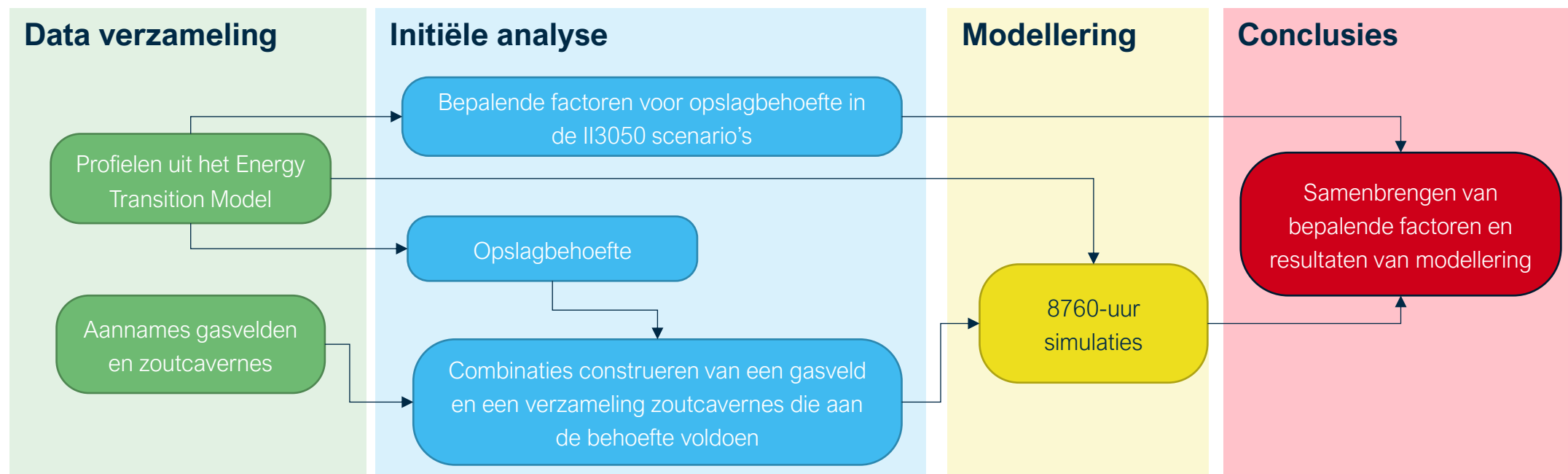
¹ Netbeheer Nederland (2023), [II3050 Eindrapport](#).

² Netbeheer Nederland (2023), [Scenario's investeringsplannen 2024](#). De IP24 scenario's (2025-2035) dienen als vertrekpunt voor de II3050 scenario's.

Inleiding

Hoe de analyse is uitgevoerd

Common Futures gebruikt IP24 profielen voor waterstofopslag uit het Energy Transition Model (ETM) om de opslagbehoefte te definiëren. Samen met EBN heeft Common Futures combinaties van zoutcavernes en gasvelden geconstrueerd, elk met hun eigen karakteristieken. Drie typen opslag in een gasveld werden gedefinieerd: (1) een gasveld met een lage injectie- en uitzendcapaciteit, (2) een sneller gasveld ('piek-gasopslag') en (3) een grotere gasopslag die qua eigenschappen past bij een systeem met 14 cavernes in 2035. Vervolgens werd op basis van de opslagprofielen gemodelleerd (op 8760 uur basis) hoe de diverse combinaties kunnen voldoen aan de opslagbehoefte in de diverse IP24 scenario's. Hierbij maakte Common Futures gebruik van het eigen waterstofopslag-simulatiemodel. Tenslotte werden de verschillen in de uitkomsten tussen de scenario's geanalyseerd.



Inleiding

Begrippenlijst en gehanteerde afkortingen

Werkvolume: Het (gas)volume in een (ondergrondse) opslag dat daadwerkelijk bijdraagt aan de opslagfunctie, oftewel het maximale volume dat tijdens een volledige opslagcyclus kan worden geïnjecteerd en geproduceerd. Vaak wordt dit volume weergegeven in termen van de energie-inhoud (TWh H_2 (LHV), GWh, etc) daarvan.

(Piek)injectievermogen: maximale snelheid waarmee een opslag gevuld kan worden (in GW waterstof)

(Piek)uitzendvermogen: maximale snelheid waarmee waterstof onttrokken kan worden uit een opslag (in GW waterstof)

Direct gekoppelde elektrolyzers: productie-installaties voor hernieuwbare waterstof die direct gekoppeld zijn aan (offshore) windparken dan wel zon-PV installaties en het elektriciteitsproductiepatroon daarvan volgen

Flexibele elektrolyzers: productie-installaties voor hernieuwbare waterstof die worden ingezet om pieken in elektriciteitsproductie te gebruiken om waterstof te produceren

Gasveld:* waterstofopslag in een uitgeproduceerd gasveld op basis van de gegevens verstrekt door EBN

Piekgasopslag:* waterstofopslag in een uitgeproduceerd gasveld met de eigenschappen van een hoog flexibele opslaglocatie, op basis van de gegevens verstrekt door EBN

Grotere gasopslag:* waterstofopslag in een uitgeproduceerd gasveld met een – ten opzichte van de piekgasopslag - vergroot werkvolume en aangepaste injectie- en uitzendvermogens

II3050	Integrale infrastructuurverkenning 2030 – 2050
IP24	Investeringsplannen 2024
NAT	Nationaal leiderschap scenario (II3050)
KA	Klimaatambitie scenario (II3050)
IA	Internationale ambitie scenario (II3050)
ND	Nationale drijfveren scenario (II3050)
GV	Gasveld
PGO	Piekgasopslag
GGO	Grotere gasopslag
ZC	Zoutcaverne
COP	Coefficient of performance

*De werkvolumes van de gasvelden in dit rapport hebben betrekking op relatief 'kleine' gasvelden.



Hoofdstuk 2

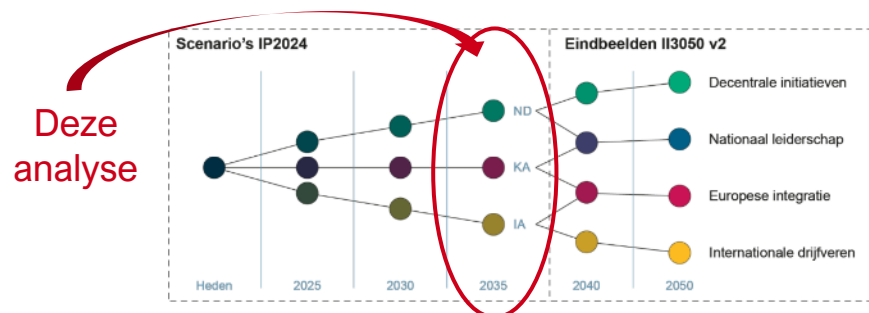
Waterstofopslag in de IP2024 scenario's

Waterstofopslag op basis van IP24 scenario's

De IP24 scenario's bepalen de theoretische opslagbehoefte in 2035

Investeringsplannen 2024 (IP24) schetsen scenario's tot 2035 inclusief waterstofopslagbehoefte

De IP24 scenario's en de II3050 scenario's van de netbeheerders schetsen toekomstbeelden en transitiepaden voor het Nederlandse energiesysteem tot aan 2050 (zie figuur). De IP24 scenario's (2025-2035) dienen als vertrekpunt voor de II3050 scenario's (2035-2050).¹ Het Energie Transitie Model (ETM) wordt gebruikt voor de modellering, waarin alle energiedragers inclusief waterstof meegenomen worden.²



Samenhang tussen de IP24 en II3050 v2 scenario's. Bron: [Netbeheer Nederland \(2023\)](#)

Deze studie gebruikt resultaten uit drie scenario's voor 2035 - het vroegst mogelijke jaar waarin een gasveld voor waterstofopslag gereed kan zijn

De IP24 schetsen drie scenario's voor 2035. Het Klimaatambitie (KA) scenario gaat uit van bestaand klimaatbeleid (2022) nog zonder 'Fit for 55'. Vergeleken met het KA scenario, zet het Nationale Drijfveren (ND) scenario sterker in op elektrificatie en duurzame opwek, terwijl het Internationale ambitie (IA) scenario sterker op groene gassen (biomethaan en waterstof) inzet. Het beleidsvoornemen uit het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) van een CO₂-vrij elektriciteitssysteem per 2035 wordt niet

meegenomen in de scenario's.¹ Wel voldoen ze aan het in de Klimaatwet vastgelegde doel van 55% CO₂-reductie in 2030.³ Een volledige uiteenzetting van de verschillen per scenario op het gebied van waterstof is te vinden in de bijlage.

Hoe komt het Energie Transitie Model (ETM) aan een waterstofopslag-behoefte?

Uit de modellering volgen uurlijkse vraag- en aanbodprofielen van waterstof. Op jaarbasis leidt dit tot een onbalans van waterstofvraag en aanbod, wat in ETM gelijk getrokken wordt door het aanpassen van import en export (beide in baseload). Ook op uurbasis ontstaat een onbalans; dit laat de theoretische behoefte aan waterstofopslag zien zonder beperkingen aan opslagcapaciteit en -vermogens. Er wordt niet geoptimaliseerd met kosten om aan de behoefte te komen; opslag zorgt ervoor dat alle overschotten van waterstof opgeslagen worden en alle waterstofvraag die niet direct beantwoord wordt door opslag voorzien wordt.

Behoeft bestaat uit volume en injectie- en uitzendvermogen

Het volume is de cumulatieve behoefte gedurende een jaar. Er wordt in de analyse gewerkt met een weerpatroon uit een gemiddeld weerjaar. De behoefte aan injectie- en uitzendvermogen wordt bepaald door de uren met de grootste onbalans tussen vraag en aanbod. In het geval van injectievermogen gaat het om de maximale hoeveelheid waterstof die in de opslagen geïnjecteerd moet worden om het gehele uurlijkse overschot aan waterstofaanbod op te kunnen slaan. De behoefte aan uitzendvermogen volgt uit de maximale hoeveelheid die uit opslag geproduceerd moet worden om aan de volledige uurlijkse waterstofvraag te kunnen voldoen.

¹ Netbeheer Nederland (2023), [II3050 Eindrapport](#), p.16, 37.

² Quintel, [Energytransitionmodel](#)

³ Netbeheer Nederland (2023), [Scenario's investeringsplannen 2024](#), p.3.

Waterstofopslag in de IP24 scenario's

Benodigd injectie- en uitzendvermogen wordt bepaald door opgestelde vermogens van flexibele elektrolyse en regelbaar vermogen

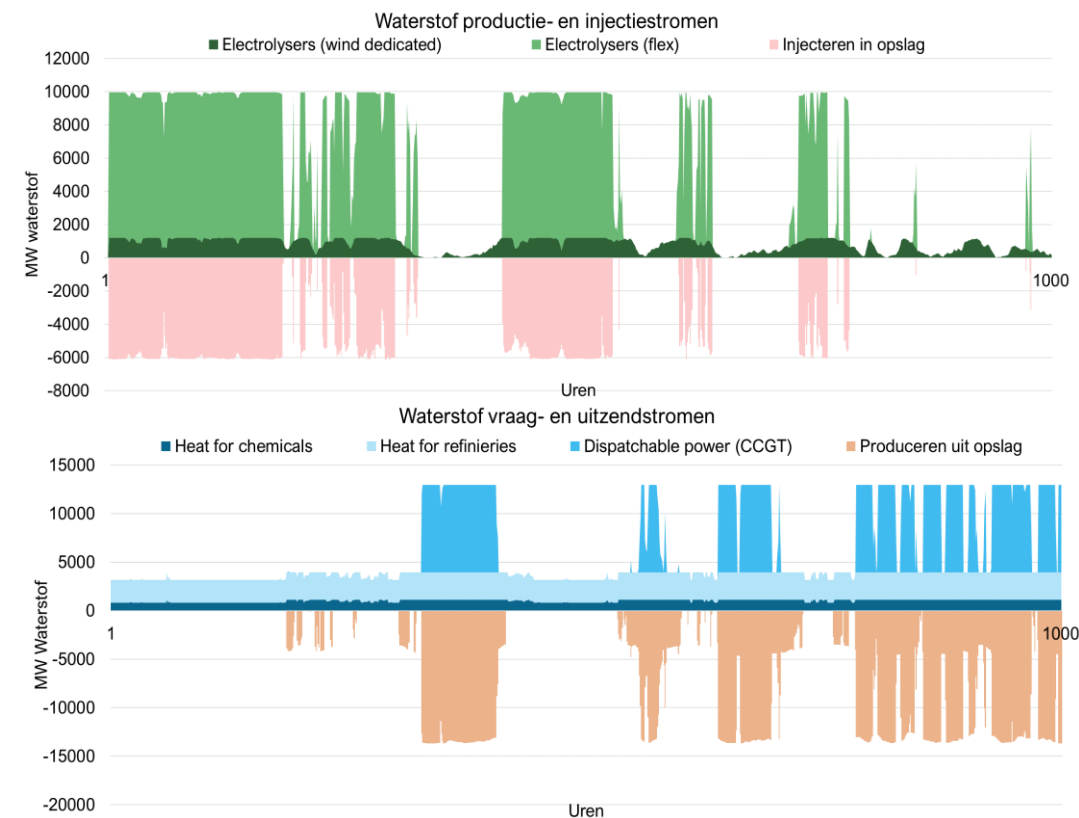
Benodigd injectievermogen vooral bepaald door flexibele elektrolyse

De vraag naar injectievermogen in 2035 wordt vooral bepaald door flex elektrolyse, en deels ook door waterstofproductie uit direct gekoppelde elektrolyzers.* Flex elektrolyse wordt ingezet om de pieken van hernieuwbare elektriciteitsopwek (zon en wind) te ontsluiten. Geproduceerde waterstof kan niet altijd direct worden ingezet en dus is opslag nodig, met een hoog injectievermogen. Direct gekoppelde elektrolyse is direct gekoppeld aan wind op zee, en volgt het productieprofiel daarvan.

In de IP24/II3050 scenario's is ervan uitgegaan dat andere waterstof-opwekstromen een vlak profiel hebben, zoals te verwachten is voor blauwe en grijze waterstofproductie.

Uitzendvermogen wordt vooral bepaald door regelbaar vermogen

Het uitzendvermogen wordt vooral bepaald door de waterstofvraag voor regelbare elektriciteitsproductie. Tijdens schaarste in elektriciteit uit zon-PV en wind wordt waterstof uit de opslag gebruikt om elektriciteit te produceren. De pieken in de uitzend uit opslag weerspiegelen het opgestelde regelbaar vermogen. In mindere mate wordt het uitzendvermogen ook gedreven door de vraag naar waterstof in industrie voor hybride boilers. Als de elektriciteitsprijs hoger wordt dan de waterstofprijs, gaan de hybride boilers waterstof gebruiken, en wordt er uit opslag geproduceerd om in deze vraag te voorzien. In het NPE wordt ervan uitgegaan dat blauwe waterstof gebruikt wordt in regelbaar vermogen.¹



Figuren met de uurprofielen in de eerste 1000 uur van het ND scenario voor 2035 uit IP24. Bovenaan de waterstofproductie en -injectie in opslag. Onderaan, de waterstofvraag en -uitzend uit opslag. De profielen zijn asymmetrisch in deze figuren omdat de waterstofvraag- en -productiestromen met een vlak profiel buiten beschouwing zijn gelaten. Zie de bijlage voor de volledige, symmetrische profielen.

* 'Direct gekoppelde elektrolyse' wordt ook 'dedicated elektrolyse' genoemd.

¹ RVO (2023), [Nationaal plan energiesysteem](#), p.31.

Waterstofopslag in de IP24 scenario's

Benodigd werkvolume vooral bepaald door seizoenspatroon in elektriciteit

Flexibele elektrolyse wordt vaker ingezet in de zomer

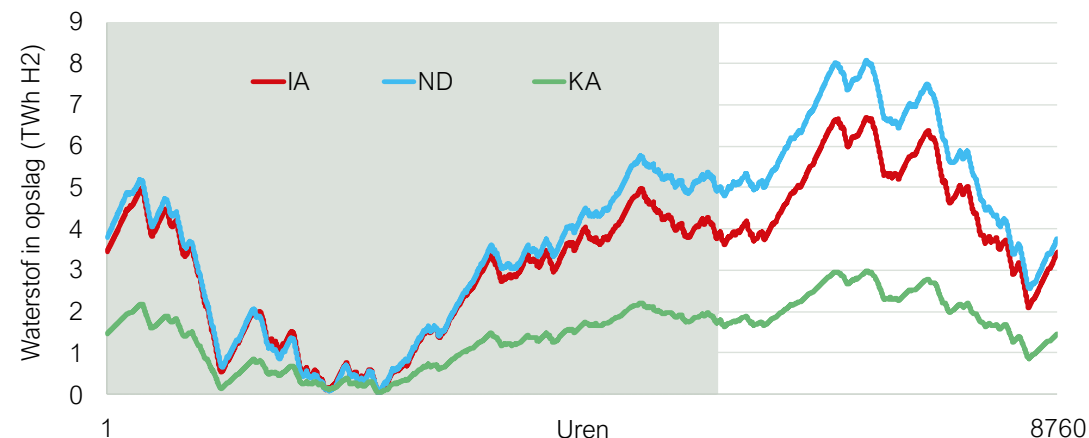
Het benodigde werkvolume wordt vooral bepaald door een seizoenspatroon in elektriciteitsaanbod en -vraag. In de zomer is er veel elektriciteitsproductie uit zon-PV¹, terwijl de elektriciteitsvraag voor warmtepompen in de gebouwde omgeving dan juist lager is. Als gevolg hiervan worden flexibele elektrolyzers vaker ingezet om de hernieuwbare pieken in elektriciteitsproductie te benutten. Het grootste deel van de hieruit geproduceerde waterstof wordt in de opslag geïnjecteerd.

Minder waterstof nodig voor regelbaar vermogen in de zomer

Tegelijkertijd is er ook minder vraag naar waterstof voor regelbaar vermogen in de zomer, omdat er meer hernieuwbare elektriciteit geproduceerd wordt bij een lagere elektriciteitsvraag. Dit leidt tot een overschot van waterstof in de zomer.

Samen met het omgekeerde effect in de winter leidt dit tot seizoenspatroon

In de winter gebeurt het omgekeerde; minder waterstofproductie door flex elektrolyse, en meer waterstofvraag in regelbaar vermogen. Hierdoor wordt netto waterstof aan de opslag onttrokken.



Profiel van waterstofopslag gedurende het jaar 2035 in de IP24 scenario's. De steilste delen laten het maximum injectie- resp. uitzendvermogen zien. Zie de bijlage voor de uurlijkse injectie- en uitzendvermogens.

Geïnstalleerd regelbaar vermogen, elektrolysecapaciteit (flex en direct gekoppeld) en benodigd werkvolume voor waterstofopslag in 2035 in de IP24 scenario's.

	Eenheid	KA	ND	IA
Regelbaar vermogen	GW	3,5	6,0	8,5
Elektrolyse	GW	7	15,6	11,6
Flex	GW	4	13,6	5,6
Direct gekoppeld	GW	3	2	6
Werkvolume	TWh	3,0	8,1	6,7

¹ Geïnstalleerd vermogen zon-PV in 2035: 53 – 98 GW, vergeleken met ca. 25 GW eind 2023, dat is een toename van 2-6 GW/jaar, vergeleken met een toename van ca. 4 GW/jaar in de afgelopen jaren.

² Kamerbrief 29 juni 2022 ([link](#)). De redenatie achter de vuistregel is niet bekend, maar kan voortkomen uit het feit dat 1 GW elektrolyse met ~67% efficiëntie ~0.67 GW waterstof produceert, wat gelijk is aan het vermogen van een zoutcaverne.

Meer dan 1 zoutcaverne nodig per GW elektrolyse vanwege de vraag naar opslagvolume

Nu gehanteerde vuistregel²

1 zoutcaverne (0,67 GW H₂ vermogen) per 1 GW_e elektrolyse.

Gebaseerd op de vraag naar opslag**vermogen**

Afgeleid uit IP24, gemiddelde scenario's 2035

2 zoutcavernes (van 0,25 TWh H₂ per caverne) per 1 GW_e elektrolyse

Gebaseerd op de vraag naar opslag**volume**

Waterstofopslag in de IP24 scenario's

Van IP2024 naar II3050: veel meer opslagvolume en vermogen in 2050

Injectie- en uitzendvermogen veel hoger in 2050

In 2050 zijn de aanjagers van het injectievermogen (elektrolysevermogen) het uitzendvermogen (regelbaar vermogen) nog aanwezig, maar de absolute vermogens zijn veel groter. Nederland heeft als ambitie 8 GW elektrolyse in 2032 en volgens het NPE groeit dit naar 15-20 GW in 2040.¹ De II3050 scenario's gaan ook uit van deze vermogens in 2040, met verdere groei tot 45 GW in 2050 (scenario NAT).

Uitzendvermogen ook gebruikt voor hybride warmtepompen in gebouwen

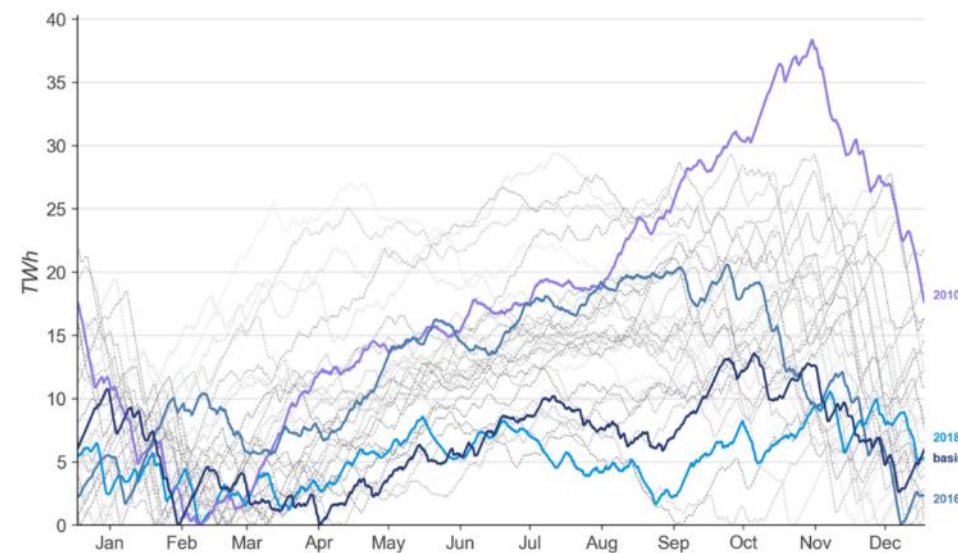
De vraag naar uitzendvermogen wordt in 2050 mede bepaald door gebruik van waterstof in hybride warmtepompen in gebouwen (in scenario's EUR en INT), die waterstof gebruiken in plaats van elektriciteit wanneer de COP van de warmtepomp te laag is (als het koud is).

Daarnaast wordt voor het uitzendvermogen ook uitgegaan van meer regelbaar vermogen met lagere rendementen (gasturbines), wat de waterstofvraag verder opstuwt. Meer laag-rendement regelbaar vermogen (gasturbines/OCGTs) leidt in de II3050 scenario's tot meer vraag naar uitzendvermogen. In de II3050 scenario's voor 2050 is uitgegaan van 1/3 CCGTs en 2/3 OCGTs,² wat leidt tot een zeer hoge piekvraag naar waterstof. In de II3050 is regelbaar vermogen tussen 11 – 20 GW.

Seizoenspatroon ook aanwezig in 2050

Net als in 2035 laat II3050 ook een seizoenspatroon in waterstofopslag zien in 2050.

Het meest duidelijk is dat in het NAT scenario waarvan meerdere weerjaren zijn gepubliceerd, zoals weergegeven in het figuur. De II3050 scenario's gaan uit van een versimpeld vlak importprofiel; import en export worden in de II3050 scenario's wordt gebruikt om de vraag en aanbod op jaarbasis te balanceren. Een variërend importprofiel zou het seizoenspatroon van waterstofopslag kunnen beïnvloeden.



Het profiel van waterstofopslag gedurende het jaar in 2050 in het NAT scenario van II3050, voor 30 weerjaren.

¹ RVO (2023), [Nationaal plan energiesysteem](#), p.31.

² Interview met Gasunie, december 2023.

Waterstofopslag in de IP24 scenario's

Grote onzekerheden over de behoefte aan waterstofopslag; benodigde capaciteiten en volumes kunnen nog sterk wijzigen

De huidige IP24 scenario's geven een eerste basis voor de verhoudingen in de opslagbehoefte in 2035, maar onzekerheden in de aannames kunnen het totale werkvolume en de injectie- en uitzendvermogens nog sterk veranderen. EBN en TNO hebben al een aantal van deze onzekerheden gemodelleerd.¹

Uitzendvermogen gevoelig voor opgestelde vermogen regelbare elektriciteit

Nederland heeft een CO₂-vrij elektriciteitssysteem als ambitie in 2035,² maar hoeveel CO₂-vrij regelbaar vermogen nodig is om dit te behalen is onzeker.³ Het benodigde uitzendvermogen stijgt met een groter opgestelde capaciteit van gasturbines die waterstof gebruiken. Wanneer gasturbines met een lager rendement gebruikt worden neemt de uitzendvermogen verder toe doordat er nog meer waterstof nodig is per eenheid elektriciteitsproductie. Gasturbines kunnen ook op biomethaan (groen gas) draaien. Dan zou de vraag naar uitzendvermogen van waterstofopslag verminderen en de vraag naar (uitzendvermogen van) methaanopslag toenemen.

Inzet waterstof in hybride warmtepompen onzeker

Als hybride warmtepompen die elektriciteit en waterstof gebruiken grootschalig ingezet worden, kan de vraag naar uitzendvermogen toenemen in de winter. Het is nu nog niet duidelijk of waterstof in de gebouwde omgeving gebruikt zal worden; in de II3050 scenario's gebeurt dit alleen in het INT scenario op grote schaal. Juist hier biedt biomethaan aanzienlijke voordelen omdat gasketels en –meters niet vervangen hoeven te worden.

Totale werkvolume gevoelig voor weerpatronen

Extreme weerjaren kunnen leiden tot een veel hogere vraag naar waterstofopslag-volume. Tijdens lange windstille periodes in de winter, is er weinig elektriciteitsproductie uit zon en wind, veel vraag naar regelbaar vermogen en veel vraag naar warmte. Waterstofopslag kan deze periodes overbruggen, maar de benodigde volumes lopen snel op. In de II3050 analyse zijn 30 weerjaren gemodelleerd, en het benodigde opslagvolume kan in extreme jaren 3 tot 4 keer zo groot zijn als in een gemiddeld jaar. Echter, leveringszekerheid over lange perioden wordt niet geanalyseerd doordat het ETM op jaarbasis de onbalans gelijk trekt; de cumulatieve behoefte over meerdere (slechte) weerjaren wordt niet geanalyseerd.

Keuze voor type warmtepompen in gebouwde omgeving heeft invloed

Indien vooral wordt ingezet op elektrische warmtepompen treedt een piekvraag naar elektriciteit op in de winter, maar als vooral wordt ingezet op hybride warmtepompen met biomethaan wordt de piekvraag in de winter deels opgevangen door biomethaan; dus minder vraag naar waterstof, en meer vraag naar methaanopslag.

Seizoenseffect in import verwacht, benodigd werkvolume kan groter worden

Waterstofimport uit zonnige gebieden zoals Spanje zal naar verwachting een zomerpiek kennen; dit vergroot het benodigde werkvolume en de benodigde piekinjectie- en uitzendvermogens (verder toegelicht aan het eind van dit hoofdstuk).

Het benodigde werkvolume kan ook toenemen met een seizoenspatroon in de industriële vraag naar waterstof. In Nederland treedt dit effect in de profielen van de huidige industriële gasvraag echter niet of nauwelijks op.⁴

¹ EBN en TNO (2021) [Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 – 2050](#)

² RVO (2023), [Nationaal Plan Energiesysteem](#) p.37

³ [Aurora \(2023\)](#): 10 GW, [Tennet Adequacy Outlook \(2023\)](#): 4 – 16 GW, NPE: 138 PJ (ca 38 TWh, of 19 GW met 2000 uur bedrijftijd) groene waterstof gebruik.

⁴ [CBS \(2023\)](#), aardgas gebruik van industrie.

The background image shows a large industrial facility, possibly a refinery or chemical plant, with several tall, cylindrical distillation columns and a complex network of pipes and valves. The scene is captured during sunset or sunrise, with a warm orange and yellow glow in the sky. A large, solid red curved shape is overlaid on the right side of the image. The text is in a bold, white, sans-serif font.

Hoofdstuk 3

Het voorzien in de waterstofopslagbehoefte met gasvelden en zoutcavernes

Combinaties van opslagtypen construeren voor de opslagbehoefte

Gemiddelde opslagbehoefte in de IP24 2035 scenario's geeft een beeld van het benodigde werkvolume en de benodigde injectie- en productievermogens

De opslagbehoefte bestaat uit een ideaal werkvolume en injectie- en uitzendvermogen, gebaseerd op de IP24 scenario's. In de analyse wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde verhouding van de werkvolume en de injectie en uitzendvermogens over de drie scenario's in 2035.

Om aan de behoefte te voldoen worden drie combinaties geconstrueerd met gegeven aannames van een leeg gasveld, piek-gasopslag en zoutcavernes

Om aan de behoefte te voldoen, worden combinaties geconstrueerd; 1) een leeg gasveld met een verzameling zoutcavernes, 2) een piek-gasopslag met een verzameling zoutcavernes en 3) een verzameling zoutcavernes zonder gasopslag. Elke bouwsteen heeft zijn eigen karakteristieken voor volume en injectie- en uitzendvermogen, aangeleverd door EBN. Het type gasveld en het daarnaast benodigde aantal zoutcavernes wordt worden bepaald en afgestemd op basis van de opslagbehoefte (volume en vermogen).

*Overzicht van aannames voor een gasveld, gasopslag en zoutcavernes, gespecificeerd door EBN.**

Type opslag	Bouwsteen voor de combinaties	(werk)volume (TWh)	Injectievermogen (GW)	Uitzendvermogen (GW)
Gasveld	Gasveld (GV)	2,27	0,47	1,18
Gasveld	Piekgasopslag (PGO)	1,70	1,07	4,73
Zoutcaverne	Verzameling zoutcavernes (ZC) (waarde per caverne)	0,25	0,67	0,67

Er wordt een additionele combinatie gemaakt met een aangepaste gasopslag

Naast de gegeven aannames van de twee typen gasveld worden ook de karakteristieken van een aangepaste gasopslag gekozen. Dit wordt gedaan op basis van de totale behoefte en een realistisch aantal zoutcavernes die tot en met 2035 gebouwd kunnen worden.

De verschillende combinaties worden in de tijd gemodelleerd met een waterstofopslag-simulatiemodel

Het opslagmodel is gemaakt in Excel en opereert op een 8760-uur basis, met een profiel voor opslagbehoefte als input. De profielen van de uurlijkse opslagbehoefte in de IP24 scenario's worden uit het ETM gehaald (zie pagina 10).

In het samen modelleren van gasvelden en zoutcavernes voor opslag wordt een 'voorrangprocedure' gebruikt; er wordt eerst in het gasveld geïnjecteerd of uitgezonden. Wanneer de uurlijkse opslagbehoefte het injectie- of uitzendvermogen van het gasveld overschrijdt (doordat het gasveld vol/leeg is of doordat de behoefte groter is dan de vermogens van het gasveld), wordt er geïnjecteerd in of uitgezonden uit de verzameling zoutcavernes. Dit is een simplificering van de opslag-werking in de realiteit, waar er nog meer overeenstemming en optimalisatie zou gebeuren tussen opslagen.

Uitkomsten van de modellering zijn het aantal cycli van de opslag, uurprofielen van de vulgraad en de residuele waterstofvraag (*lost load*) en –aanbod (*curtailment*). Zie de bijlage voor een volledige beschrijving van het model.

* De aangeleverde werkvolume van de gasvelden zijn relatief 'klein'; gasvelden kunnen ook een orde groter zijn dan gespecificeerd in de tabel. Het werkvolume van een zoutcaverne is ook een aangenomen gemiddeld van de verwachte grootte. Individuele zoutcavernes kunnen afwijken.

Het voorzien in de waterstofopslagbehoefte met gasvelden en zoutcavernes

Gasveld kan de benodigde opschaling van zoutcavernes flink verlagen

Behoefte aan opslagvolume in de IP24 scenario's; van TWh naar aantal zoutcavernes

De behoefte naar opslag-volume in de scenario's zijn in TWh opslagvolume weergegeven. In 2035 is dit tussen 3 en 8 TWh. Met een gemiddelde opslagvolume van 0,25 TWh per caverne staat dit gelijk aan 12 tot 32 cavernes. Wanneer alleen scenario's met geldende beleidsdoelen meegenomen worden* is er 6,7 – 8 TWh nodig, of tussen de 27 – 32 cavernes.

Equivalent van circa 24 cavernes nodig in 2035

Het benodigde jaarlijkse opslagvolume in 2035 in de IP24 scenario's is gemiddeld zo'n 6 TWh waterstof. Dit staat gelijk aan 24 zoutcavernes.

Op basis van de huidige zoutwinningcapaciteit zou een opschaling naar 14 zoutcavernes in 2035 mogelijk kunnen zijn – wat onvoldoende is

Volgens de Routekaart Energieopslag van het Ministerie van EZK zullen er 4 tot 5 zoutcavernes gereed zijn in 2032.¹ Op basis van de huidige zoutwinning schatten EBN en TNO (2021) dat er drie zoutcavernes per jaar gerealiseerd kunnen worden.² Dit zou al een snelle start van de voorbereidingen vergen, inclusief het creëren van draagvlak in de betreffende regio's. Samen geeft dit 14 zoutcavernes in 2035, wat fors lager is dan de benodigde 24.

¹ RVO (2023), [Routekaart-Energieopslag](#) p.61

² EBN en TNO (2021) [Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 – 2050](#). p. 61

*Scenario KA wordt ontsloten, omdat hierin de RED III niet meegenomen wordt.

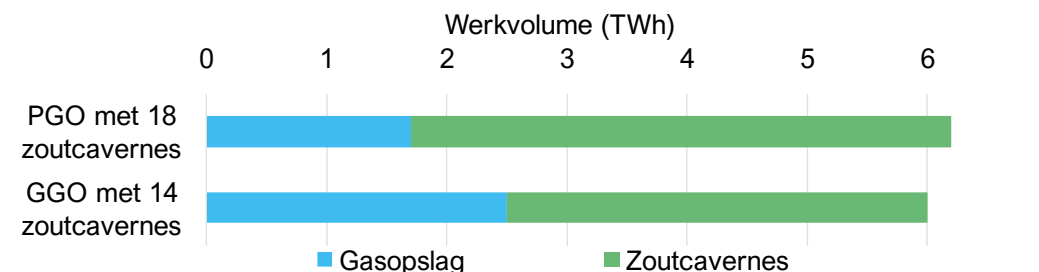
Waterstofopslag in een piekgasopslag met de karakteristieken van een bestaande piekgasopslag kan aantal benodigde zoutcavernes verlagen tot 18

De piekgasopslag (PGO) zou dit aantal kunnen verminderen tot 18 zoutcavernes, zonder enige aanpassing in totale injectie- en productievermogens. De PGO zou dan voor 1,7 TWh werkvolume zorgen, en de zoutcavernes voor 4,5 TWh. Naast het huidige gasveld (GV) van 2,3 TWh zouden meer zoutcavernes nodig zijn, doordat het uitzendvermogen van het GV te laag is – het knelpunt is dan dus het uitzendvermogen, niet het totale volume.

Er is waarschijnlijk een grotere gasopslag nodig

In een scenario waar maximaal 14 zoutcavernes 3,5 TWh kunnen bijdragen, is een grotere gasopslag (GGO) met een werkvolume van ~2,5 TWh nodig.

Het voorbereiden van zo'n GGO vergt ook keuzes voor het injectie- en uitzendvermogen. Er is een optimale verhouding tussen het werkvolume en de injectie- en uitzendvermogens.



Vergelijking van de opbouw van opslag in gasvelden en zoutcavernes om de benodigde gemiddelde werkvolume in 2035 te voldoen. PGO: piekgasopslag. GGO: grotere gasopslag.

Het voorzien in de waterstofopslagbehoefte met gasvelden en zoutcavernes

Verhouding tussen werkvolume en vermogen verschilt per opslag

Uit gemiddelde opslag-behoefte komt ideale verhouding van werkvolume : vermogen

Naast het totale benodigde werkvolume kan er uit de IP24 opslagprofielen ook een optimale verhouding tussen de werkvolume in TWh, de injectievermogen in GW, en de uitzendvermogen in GW achterhaald worden. Zo'n ideale verhouding kan altijd aan de opslag-behoefte voldoen.

In 2035 is de gemiddelde verhouding 1 TWh werkvolume: 0,9 GW injectievermogen : 2,2 GW uitzendvermogen. Dit kan ook gelezen worden als een maximale vul snelheid van ~1100 uur en een maximale uitzendsnelheid van ~450 uur.

De gemiddelde verhoudingen in de 2050 zijn in de II3050 scenario's vergelijkbaar, hoewel met een hogere uitzendvermogen; 1 TWh : 0,8 GW : 2,7 GW.

Verhoudingen van gasvelden en zoutcavernes zijn niet ideaal

Verhoudingen tussen de volumes en de vermogens van de gegeven aannames van het gasveld (GV), piekgasopslag (PGO) en zoutcavernes (ZC) zijn niet ideaal, zoals weergegeven in de tabel. GV is te traag. PGO heeft een te lage injectiecapaciteit en heeft een overschot aan uitzendcapaciteit. De zoutcavernes hebben een overschot aan beide.

In een scenario met 18 zoutcavernes en het gasopslag wordt er voor voldoende volume en vermogen gezorgd. Echter, met maximaal 14 zoutcavernes is een grotere gasopslag (GGO) van 2,5 TWh nodig, groter dan de PGO van 1,7 TWh.

Uitgaand dat er een grotere gasopslag met 2,5 TWh werkvolume nodig is, zijn er twee strategieën voor het kiezen van de verhoudingen die daar bij passen

Om aan de ideale verhoudingen van de opslag-behoefte te voldoen zou de verhoudingen van de GGO op twee manieren geschikt gemaakt kunnen worden; met een verhouding waar de GGO samen optimaliseert met de verhoudingen en volumes van zoutcavernes (Samenwerkende GGO), of een verhouding waar de GGO zoveel mogelijk zelf aan de opslag-behoefte kan voldoen (GGO met Overcapaciteit).

Tabel van verschillende opslagtypen en behoeften met de totale werkvolume (in TWh) en de versimpelde verhoudingen daarvan ten opzichte van de injectie en uitzendvermogen (in GW). Het aantal cycli uit de modellering is ook vermeld waar het kan.

Opslag	Versimpelde verhoudingen		Werkvolume (TWh)
	Werkvolume (TWh) : Injectie (in GW) : Uitzend (in GW)		
Ideale behoeftes			
Gemiddelde behoefte in 2035	1 : 0,9 : 2,2		~6
Gemiddelde behoefte in 2050	1 : 0,8 : 2,7		~20
Bouwstenen			
Gasveld (GV)	1 : 0,2 : 0,5		2,27
Gasopslag (PGO)	1 : 0,6 : 2,8		1,70
Zoutcavernes (ZC)	1 : 2,7 : 2,7		0,25
Combinaties			
18 ZC	1 : 2,7 : 2,7		4,5
Combi: PGO met 18 ZC	1 : 2,1 : 2,7		6,2

Het voorzien in de waterstofopslagbehoefte met gasvelden en zoutcavernes

Grotere gasopslag kan op vermogen besparen door slim samen te werken met zoutcavernes

Door samen te werken met zoutcavernes kan een gasopslag besparen op injectie- en uitzendvermogen

De dimensionering van de grotere gasopslag (GGO) kan rekening houden met de interactie met de zoutcavernes. De GGO kan leunen op de aanzienlijke capaciteiten van de zoutcavernes, die grotendeels de piek-injectiebehoefte kunnen dekken. Desalniettemin is het noodzakelijk dat de GGO ook over voldoende injectievermogen beschikt, ofwel moeten de zoutcavernes de GGO tussentijds kunnen aanvullen. Verdere analyse is nodig om te bepalen welk injectievermogen vereist is.

Doordat de zoutcavernes ook heel snel kunnen uitzenden, zou het uitzendvermogen van de samenwerkende GGO gereduceerd kunnen worden tot ~3,8 GW, dus een verhouding van 1 TWh werkvolume : 1,5 GW uitzendsnelheid.

Vrijstaande gasopslag beweegt beter mee met de opslagbehoefte

Als vrijstaande gasopslag zou de GGO geschikt gemaakt worden om zo goed mogelijk aan de benodigde pieken in injectie- en productievermogens te kunnen voldoen. Het weerspiegelt dus de versimpelde verhoudingen van de totale opslagbehoefte in 2035; 1 TWh werkvolume: 0,9 GW injectievermogen : 2,2 GW uitzendvermogen. Dit zou betekenen dat bij een werkvolume van 2,5 TWh ca. 2,3 GW injectie en 5,5 GW uitzendvermogen nodig zou zijn. Zo'n gasveld is dan ook toekomstbestendig voor de gemiddelde verhoudingen in 2050 (1 : 0,8 : 2,7).

Doordat de GGO de verhoudingen uit de profielen nauwkeuriger weerspiegelt, heeft

het waarschijnlijk de capaciteit om meer cycli te draaien dan wanneer de GGO volledig met de zoutcavernes zou samenwerken. Hoewel dit mogelijk betere inkomsten kan opleveren, is het noodzakelijk om het totale effect op de business case te analyseren, inclusief de bijkomende kosten voor de bouw van de GGO met deze vermogens.

Aantal wisselingen tussen injectie en uitzenden moet mogelijk beperkt worden voor gasvelden

Er wordt in de II3050 uitgegaan dat lang-cyclische opslag niet meer dan vier keer per jaar tussen injectie en uitzenden kunnen wisselen. Dit komt voort uit de huidige opzet van seizoensopslagen van aardgas. Het is niet bekend of dit technisch te overkomen zou zijn, of dat deze regel voor alle typen gasvelden geldig is.

Tabel van verschillende opslagtypen en behoeften met de totale werkvolume (in TWh) en de versimpelde verhoudingen daarvan ten opzichte van de injectie en uitzendvermogen (in GW). Het aantal cycli uit de modellering is ook vermeld waar het kan.

Opslag	Versimpelde verhoudingen Werkvolume (TWh) : Injectie (GW) : Uitzend (GW)	Werkvolume e (TWh)	Cycli (# per jaar)
Gemiddelde behoefte in 2035	1 : 0,9 : 2,2	~6	-
Combinaties met 14 zoutcavernes			
14 ZC	1 : 2,7 : 2,7	3,5	2-3
GGO met Overcapaciteit	1 : 0,9 : 2,2	2,5	4-5
Combi: GGO met Overcapaciteit + 14 ZC	1 : 2,0 : 2,5	6	-
Samenwerkende GGO	1 : ? : 1,5	2,5	-
Combi: Samenwerkende GGO + 14 ZC	1 : > 0,9 : 2,2	6	-

Het voorzien in de waterstofopslagbehoefte met gasvelden en zoutcavernes

Import uit zonnige landen leidt tot sterker seizoenspatroon

Import in IP24/II3050 scenario's heeft een vlak profiel

Import en export worden gebruikt in het ETM om de onbalans van waterstof op jaarbasis gelijk te trekken, en hebben dus een vlak profiel. In 2035 is er al behoefte aan 16 - 107 TWh volgens de scenario's, dat is aanzienlijk vroeger dan in het NPE, dat pas in 2040 grootschalige waterstofimport aanneemt.¹

Import uit zonnige landen vermindert de verhouding werkvolume : vermogen

Waterstofimport uit zonnige gebieden zoals Spanje zal naar verwachting een zomerpiek kennen; dit vergroot het benodigde werkvolume en de benodigde piekinjectie- en productievermogens. Echter, de benodigde verhouding tussen injectie- en productievermogens en het werkvolume wordt kleiner, zoals weergegeven in het tabel. Met andere woorden: met meer import uit zonnige landen groeit het benodigde volume meer dan het benodigde injectie- en uitzendvermogen. Dit kan leiden tot een grotere rol voor gasvelden, die typisch tragere snelheden maar grotere volumes hebben.

Verdubbeling in werkvolume nodig met 20% importvariatie

Met een simpele import-variatie van 20% verlaging in de winter en 20% verhoging in de zomer, zou al meer dan een verdubbeling in het werkvolume van de GGO nodig zijn, van 2,5 TWh naar 5,5 TWh, naast 14 zoutcavernes.

De GGO heeft dan een injectie- en uitzendvermogen van respectievelijk 3,9 GW en 8,3 GW nodig. Voor een samenwerkende GGO is het benodigd uitzendvermogen 3,9 GW, en wordt het injectievermogen opgevangen door de 14 zoutcavernes.

Seizoenspatroon kan juist afnemen door importprofielen met een winterpiek

Het seizoenspatroon zou juist ook kunnen afnemen met import uit andere landen, bijvoorbeeld Finland, waar waarschijnlijk een winterpiek te verwachten is vanwege de grote plannen voor waterstof geproduceerd uit windenergie.



Figuur van scenario IA 2035 uit de IP24 zonder en met een versimpelde 20% importvariatie in de zomer- en wintermaanden. Zie de bijlage voor de uurlijkse injectie- en uitzendvermogens.

Tabel met verschillende opslagtypen en behoeften met de totale werkvolume (in TWh) en de versimpelde verhoudingen daarvan ten opzichte van de injectie en uitzendvermogen (in GW).

Opslag	Versimpelde verhoudingen	Werkvolume (TWh)
	Werkvolume (TWh) : Injectie (GW) : Uitzend (GW)	
Gemiddelde behoefte in 2035	1 : 0,9 : 2,2	~6
Met import uit zonnige landen, gemiddelde behoefte in 2035	1 : 0,7 : 1,5	~9
Combi: GGO met Overcapaciteit + 14 ZC	1 : 0,7 : 2	9 (5,5 + 3,5)
Samenwerkende GGO	1 : ? : 0,7	5,5
Combi: Samenwerkende GGO met 14 ZC	1 : > 0,7 : 1,5	9



Hoofdstuk 4

Samenspel tussen gasveld en cavernes

Samenspel tussen gasveld en cavernes

Nuttige rol voor gasopslag als deze samenwerkt met cavernes

Gasvelden en zoutcavernes moeten samenwerken voor opslag

Waterstofopslag in een grotere gasopslag (GGO) kan een rol spelen in waterstofopslag in 2035. Het kan alleen aan de opslagbehoefte bijdragen als zoutcavernes en gasvelden samen in een waterstofmarkt actief zijn, mogelijk ook met uitwisseling van waterstof tussen beide type opslagen via de waterstofbackbone.

Zonder samen te werken kan er *lost load* of *curtailment* optreden

Zonder een markt kan er altijd *lost load* en *curtailment* van waterstof optreden, ook al zijn de opgestelde volumes en vermogens van gasvelden en zoutcavernes samen in theorie genoeg om aan de jaarlijkse totale opslagbehoefte te voldoen.

Lost load vindt plaats tijdens periodes waarin één opslag volledig leeg is, wat betekent dat er uitzendvermogen uitvalt en dus kan opslag niet meer ingezet worden om te voldoen aan de vraag (1 en 3 in het figuur). *Curtailment* van waterstofproductie is nodig wanneer één van de opslagen volledig gevuld is, wat betekent dat er injectievermogen uit valt en er dus dat opslag niet meer ingezet kan worden om overschotten in waterstofproductie op te slaan (2 in het figuur).

Er moet zoveel mogelijke voorkomen worden dat deze effecten optreden, maar *lost load* heeft ergere gevolgen.

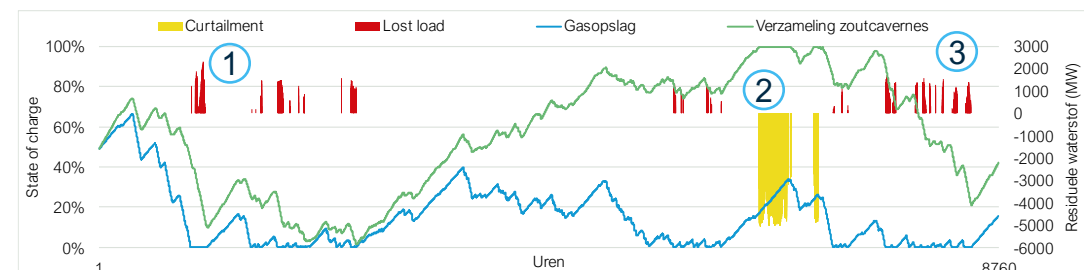
Lost load kan tot zeer hoge kosten leiden voor de maatschappij

Als er onvoldoende waterstof onttrokken kan worden uit opslag om de vraag in

industrie of regelbaar vermogen te beantwoorden, kan dit leiden tot hele hoge kosten. Industriële processen moeten worden stilgelegd of afgeschaald, en in het huidige elektriciteitssysteem heeft *lost load* door een tekort aan (regelbaar) vermogen geschatte kosten van €68.887 / MWh.¹

Curtailment leidt tot verminderde ontsluiting van hernieuwbare energie

Groene waterstof wordt geproduceerd en geïnjecteerd in de opslag tijdens piek-opwek van hernieuwbare elektriciteit. Wanneer de opslag vol is, moet *curtailment* plaatsvinden: hernieuwbare elektriciteitsproductie moet worden terug geregeld. Kleinschalige *curtailment* is te verwachten in een elektriciteitssysteem, maar grote hoeveelheden kunnen ertoe leiden dat de opslag niet genoeg gevuld wordt door het jaar heen, wat weer leidt tot *lost load* later in het jaar (2 en 3 in de figuur) en dus hogere kosten.



Uurprofiel van PGO met 26 zoutcavernes in scenario IA 2035. 1) Lost load; gasopslag is leeg en uitzendvermogen van de verzameling zoutcavernes is te laag om de productie te beantwoorden. 2) Curtailment; zoutcavernes zijn vol, en injectiecapaciteit van gasopslag is daardoor te laag. 3) Lost load na de deels onbenutte zomerpiek, omdat het gasveld leeg is en niet kan bijdragen aan de vraag.

¹ ACM (2022), [The value of lost load for electricity in the Netherlands](#), p.5

Samenspel tussen gasveld en cavernes

Optimalisatie tussen beide typen opslagen kan via de markt en mogelijk ook door uitwisseling

Optimalisatie tussen opslagen via marktwerking

Door de waterstofopslag te optimaliseren tussen de zoutcavernes en het gasveld via marktwerking kan ervoor gezorgd worden dat geen van de opslagen volledig gevuld wordt of leeg loopt, wat anders tot beperkingen in de totale injectie of uitzend zorgt. Er kan bijvoorbeeld voor gekozen worden om de zoutcavernes tijdens kort-cyclische pieken te benutten en gasvelden tijdens de langdurige pieken. Dit vraagt om betrouwbare voorspellingen en een functionerende waterstofmarkt. Er zou ook in de tijd bijgestuurd worden met uitwisseling tussen beide opslagen.

Uitbreiding in modellering nodig om te analyseren op welke wijze gasvelden en zoutcavernes in een markt zouden ‘samenwerken’

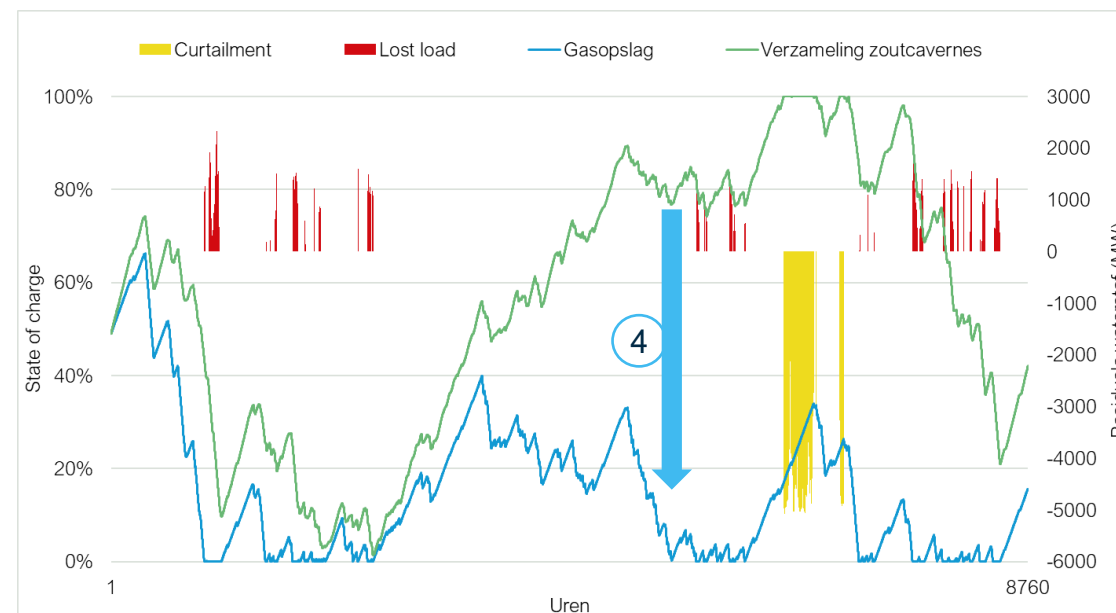
Communicatie en samenwerking tussen opslagen is niet gemodelleerd in deze analyse. Dit zou eenvoudig aangepast kunnen worden in het waterstofopslag simulatiemodel met een voorrangprocedure. Bijvoorbeeld als zoutcavernes 80% vol lopen of gasvelden tot aan 20% leeg, dan wordt waterstof eerst uit de zoutcavernes gehaald. In het huidige model wordt er uit gegaan dat waterstof eerst in gasvelden uitgezonden en geïnjecteerd wordt.

Om betere inzichten te krijgen van hoe dit optimaal zou werken over de tijd, zou met een optimalisatiemodel gewerkt kunnen worden.

Uitwisseling zou kunnen gebeuren wanneer de vraag naar opslag minder is

Met uitwisseling van waterstof tussen beide (type) opslagen via de backbone kan

er beter geoptimaliseerd met opslag (zie 4 in de figuur). Deze uitwisseling moet plaatsvinden op momenten waarop de door het energiesysteem gevraagde injectie of extractie van waterstof uit opslag laag is. Bijvoorbeeld ‘s avonds na een zonnige dag, wanneer de waterstofproductie uit hernieuwbare elektriciteit lager is. Wel zou dit grofweg een verdubbeling in de opslagkosten kunnen betekenen. Een efficiënte waterstofmarkt zou ervoor zorgen dat dit alleen gebeurt indien nodig.



Gasopslag met 26 zoutcavernes in scenario IA 2035.

4) Een moment om waterstof van zoutcavernes naar gasopslag te sturen, voordat de zoutcavernes vol raken, en het gasveld leeg.

A photograph of a cave interior. The walls are covered in numerous stalactites hanging from the ceiling. The floor is a mix of dirt and small pools of water. A path leads from the foreground into the distance, where a bright light source is visible. The overall atmosphere is dim and mysterious.

Hoofdstuk 5

Conclusies en aanbevelingen

Conclusies en aanbevelingen

Waterstofopslag in een gasveld lijkt onontbeerlijk in 2035 omdat anders minstens 27 cavernes nodig zijn

1. Alle relevante stakeholders zouden in discussie moeten gaan over het ontwikkelen van een integraal waterstofopslag-programma voor zoutcavernes en gasvelden.
2. Ga parallel hieraan snel mogelijk aan de slag met een proefproject voor waterstofopslag in een gasveld.

De resultaten van het proefproject en van aanbevelingen 3 tot en met 9 kunnen input kunnen leveren voor een dergelijk nationaal waterstofopslag-programma.

Een verhouding tussen werkvolume en injectie- en uitzendvermogen vergelijkbaar met die van de bestaande piek-gasopslag is voldoende voor de toekomstige opslagbehoefte, maar er is in 2035 waarschijnlijk al een gasveld met meer werkvolume nodig.

3. Onderzoek is nodig naar de systeemkosten van waterstofopslag. Hierbij worden de kosten van constellaties van zoutcavernes en één of meerdere gasopslagen in kaart gebracht, inclusief de kosten voor extra compressie (injectie) of extra putten (uitzend) voor een grotere gasopslag.

De benodigde injectie- en uitzendvermogens worden bepaald door de opgestelde vermogens van respectievelijk flex-elektrolyse en regelbare elektriciteitsproductie.

4. Er moet onderzocht worden hoeveel regelbaar vermogen en flex-elektrolyse Nederland in de toekomst nodig heeft.

Optimale waterstofhandel of een functionerende waterstofmarkt kan leiden tot een goed samenspel tussen opslag in gasvelden en zoutcavernes. Om de samenwerking van opslag met gasvelden en zoutcavernes in de tijd te analyseren, zou gemodelleerd moeten worden.

5. Hoe kan gezorgd worden voor een optimaal samenspel tussen gasvelden en zoutcavernes en wat is hierbij de rol van de waterstofbackbone, waterstofhandel, en de waterstofmarkt? In hoeverre bestaan er limieten aan de uitwisseling tussen beide opslagen?
6. Wat betekent een optimale samenwerking voor de verhouding tussen het werkvolume dat in zoutcavernes gerealiseerd zou moeten worden en het werkvolume van het gasveld?
7. Wat is de benodigde injectiecapaciteit van een grotere gasopslag als het optimaal samenwerkt met de zoutcavernes? Hoe vaak en snel kunnen verschillende gasopslagen omwisselen tussen injectie en uitzend, en wat is de impact op de optimale combinatie?

Variaties in de import en in extreme weerjaren hebben effect op de karakteristieken van de benodigde waterstofopslag.

8. Nader onderzoek is nodig over het verwachte waterstof-profiel onder extreme weerjaren en van te verwachten waterstofimport, inclusief het effect van import per schip.
9. Nader onderzoek is nodig over mogelijke samenwerking Nederland-Duitsland, gegeven het grote volume aan lege gasvelden in Nederland en het grote aantal bestaande zoutcavernes in Duitsland. Zouden Nederland en Duitsland als één biedzone kunnen beschouwd worden?

A photograph of an industrial facility, possibly a refinery or chemical plant, featuring large vertical distillation columns and complex piping systems. The scene is captured during sunset, with a warm orange and yellow sky. A large, solid red curved shape is overlaid on the right side of the image. The word "Bijlagen" is written in white text across the middle of the image.

Bijlagen

Bijlage

Waterstof in de drie IP24 2035 scenario's

In 2035 hebben alle drie de IP24 scenario's vrijwel gelijke blauwe waterstofproductie en industriële waterstofvraag, nul vraag in de gebouwde omgeving en weinig vraag in landbouw.

Geen van de scenario's volgen de laatste wijzigingen in de RED III verplichting; 42% in 2030 en 60% in 2035.

Op basis van het tabel en de mechanismen die de waterstofopslagbehoefte beïnvloeden kunnen de scenario's gesimplificeerd worden in de volgende termen:

KA: weinig elektrolyse, regelbaar vermogen en gemiddelde import

ND: veel elektrolyse en regelbaar vermogen, en weinig import

IA: gemiddelde elektrolyse, veel regelbaar vermogen en import.

Waterstofdata in de drie IP24 scenario's voor 2035. Data uit het ETM¹ en de II3050.²

Karakteristiek	Eenheid	IP24 scenario 2035		
		KA	ND	IA
Opslagvolume	TWh H ₂	3.0	8.1	6.7
Piek laadvermogen	GW H ₂	2.9	6.1	6.3
Piek ontladvermogen	GW H ₂	7.6	13.7	15.7
H ₂ vraag: regelbaar vermogen	TWh H ₂	7.6	14.0	24.1
Regelbaar vermogen op H ₂	GW _e	3.5	6.0	8.5
H ₂ vraag: industrie	TWh H ₂	54.9	47.4	63.9
H ₂ vraag: transport	TWh H ₂	6.6	4.3	17.6
H ₂ vraag: landbouw	TWh H ₂	0.0	0.0	2.3
RED III verplichting (2030/2035)		Geen verplichting	50% / 70%	30% / 50%
H ₂ exports	TWh H ₂	46.0	40.3	73.5
H ₂ productie: groen	TWh H ₂	23.3	51.3	37.6
Elektrolysecapaciteit	GW _e	7 (4.0 flex, 3 dedicated wind op zee)	15.6 (13.6 flex, 2 dedicated wind op zee)	11 (5.6 flex, 6 dedicated wind op zee)
H ₂ productie: blauw	TWh H ₂	41.9	39.8	38.1
H ₂ import	TWh H ₂	49.9	15.5	106.9

¹ Energy Transition Model

² Netbeheer Nederland (2023), [II3050 Bijlagen](#), p.4

Bijlage

Modellering en aannames

Waterstofopslag wordt gemodelleerd in een simulatiemodel. Het opslagmodel is gemaakt in Excel en opereert op een 8760-uur basis, met een opslagprofiel van waterstof, gebaseerd op de II3050 scenario's. In deze scenario's is het opslagprofiel een uitkomst van het uurlijkse onbalans tussen de som van waterstofproductie (13 verschillende technologieën) en de som van de waterstofvraag (26 verschillende vraagcentra). De II3050 geven een goede basis voor de opslag-behoefte. Echter kennen deze scenario's andere gevoeligheden en beperkingen; het gebruik van waterstof in hybride boilers en hybride warmtepompen is binaire zonder glijdende schaal, en de meeste vraag- en aanbod profielen zijn volledig vlak zonder enige uurlijkse- of seizoensvariatie. Voor de andere gevoeligheden en beperkingen van de scenario's zie pagina's 10, 11, 13 en 14 in hoofdstuk 2.

In de eerste sectie van het model wordt voor elk uur de hoeveelheid waterstof dat geïnjecteerd in, of uitgezonden uit de opslag berekend. Aangenomen wordt dat de opslag begint met opereren op 1 januari bij een vulgraad (% van het werkvolume dat in gebruik is) van 50%.

Als, onder de opslag profielen, een waterstofaanbod voorkomt (waar aanbod > vraag), wordt waterstof geïnjecteerd in de opslag. De hoeveelheid wordt bepaald door de hoeveelheid waterstofaanbod, de maximale injectiesnelheid van het type opslag en de hoeveelheid beschikbaar leeg volume in de opslag. Als er een waterstofvraag voorkomt (waar aanbod < vraag), wordt waterstof geproduceerd uit de opslag. De hoeveelheid wordt bepaald door de hoeveelheid waterstofvraag, de

maximale productiesnelheid, en de resterende volume waterstof in opslag.

Voor injectie en uitzend hanteert dit rapport de aanname dat het gasveld eerst gaat injecteren of uitzenden. Als de vermogens van het gasveld overschreden wordt of het gasveld loopt vol op leeg, gaan de zoutcavernes injecteren of uitzenden.

Vervolgens wordt de totale jaarlijkse geïnjecteerde en geproduceerde waterstof berekend. Dit geeft inzicht in de hoeveelheid residuele waterstof (waterstof wat niet door de opgestelde opslag geïnjecteerd of uitgezonden kon worden, en kan ook gebruikt kan worden om het aantal cycli te berekenen. Het aantal cycli wordt berekend door de volgende formule:

$$Cycli \text{ (\#)} = \frac{\text{gemiddelde jaarlijkse opgeslagen en onttrokken } H_2 \text{ volume (MWh } H_2\text{)}}{\text{opslagvolume (MWh } H_2\text{)}}$$

De voorpagina van het model ('Dashboard') geeft een overzicht van de belangrijkste aannames en resultaten, onder andere het aantal cycli, uurprofielen van de vulgraad en residuele waterstof.

In de Dashboard is ook de mogelijkheid om verschillende aannames te variëren, zoals de vulgraad van opslag aan het begin van het jaar, de werkvolume en injectie- en uitzendvermogens, en het aantal zoutcavernes. De effecten hiervan worden direct getoond in de resultaten.

* Bron: EBN

Bijlage

Aanvullende IP2024 materie: waterstofprofielen voor scenario ND 2035

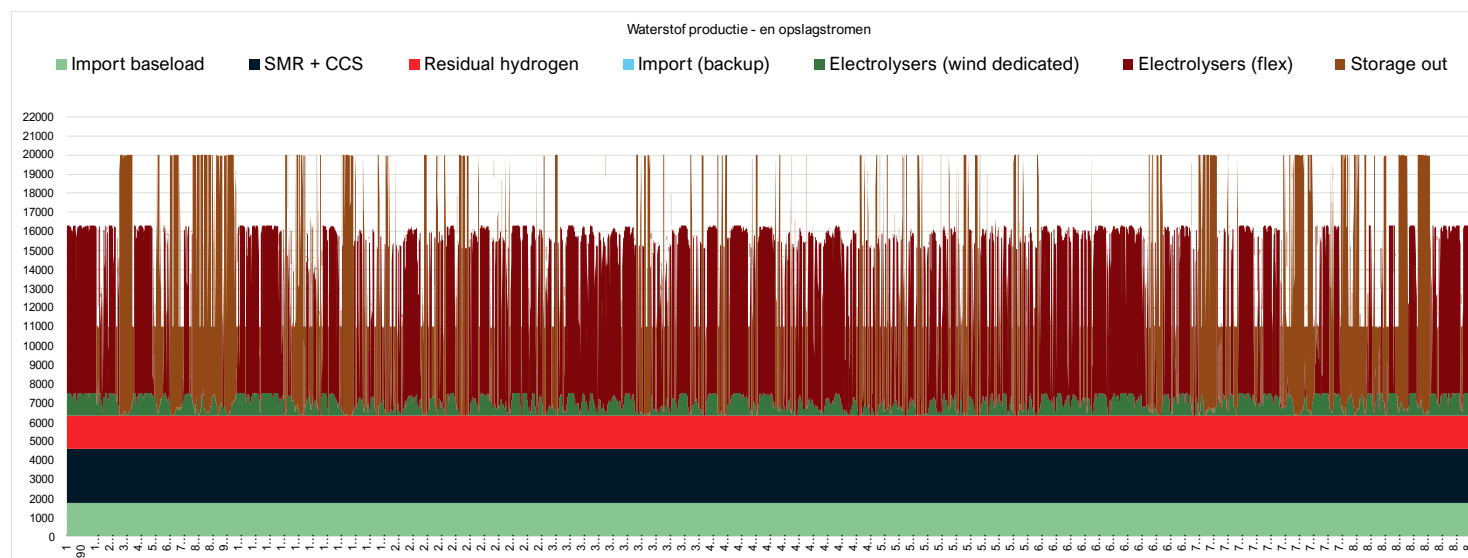
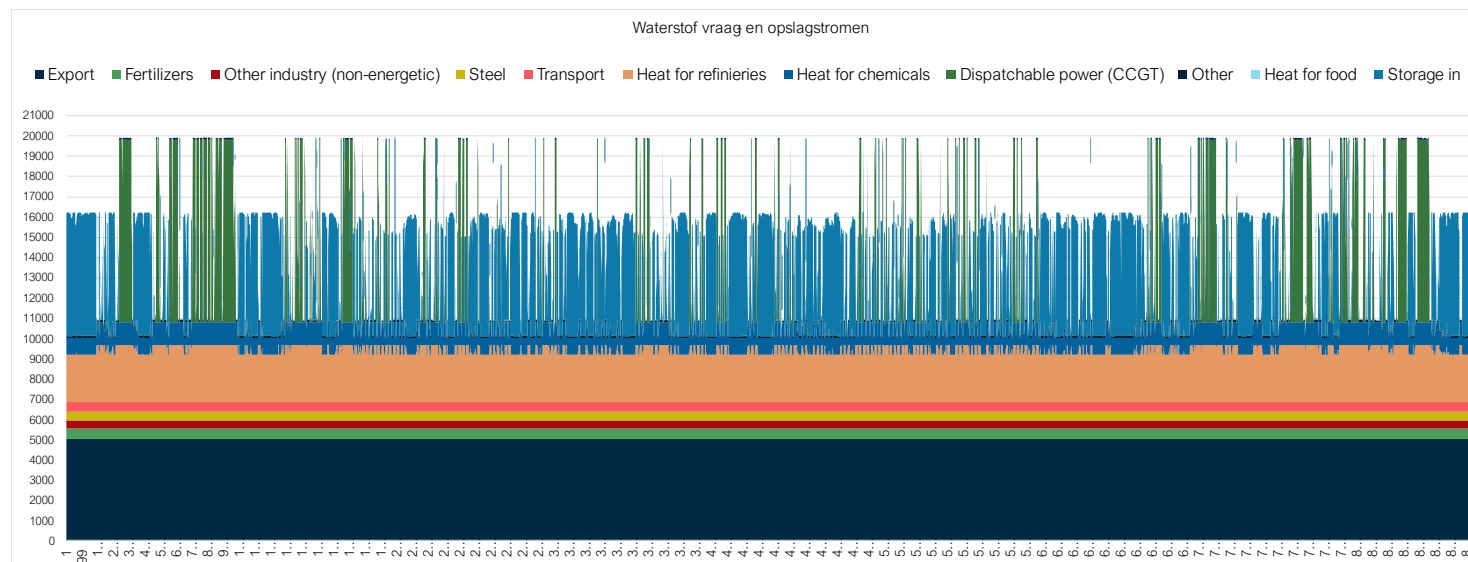
Waterstofproductie, waterstofvraag en waterstofopslag profielen. Over het jaar heen is vraag en aanbod hetzelfde.

De meeste waterstofvraag stromen hebben een vlak profiel, behalve de vraag naar warmte in raffinaderijen, warmte voor chemicaliën, warmte voor eten productie en voor regelbaar vermogen.

In de waterstofproductie stromen hebben elektrolyse stromen een variabel profiel, en de andere stromen een vlak profiel.

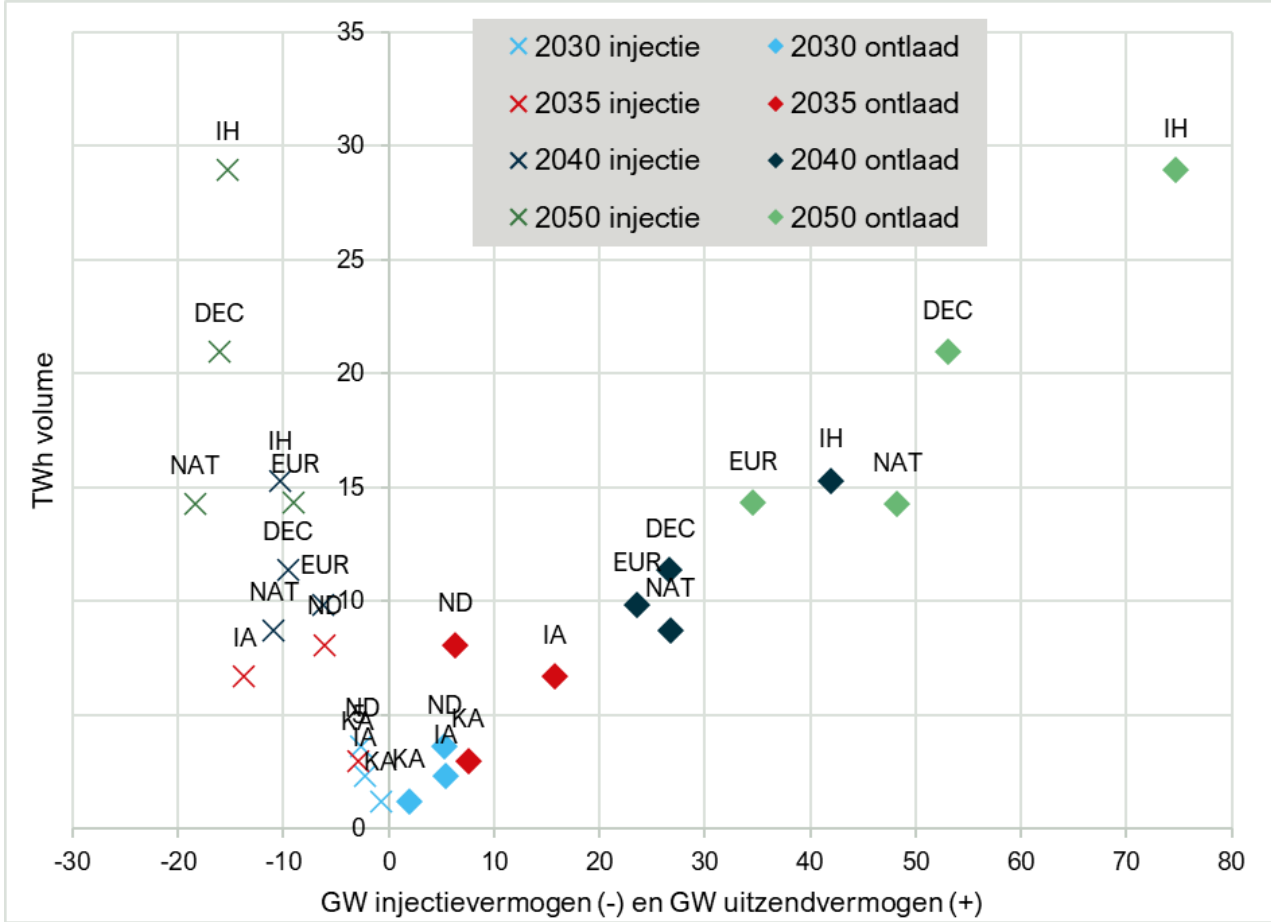
Uit beide grafieken is te achterhalen dat injectie in opslag vooral beïnvloed wordt door flex elektrolyse, en uitzend uit opslag vooral beïnvloed wordt door regelbaar vermogen.

Volledige waterstofproductie, waterstofvraag en waterstofopslag profielen voor IP24 scenario ND 2035.



Aanvullende II3050 materie: opslagbehoefte voor elk scenario en peiljaar

Grafiek en tabel van behoefte aan volume en injectie en uitzendvermogens uit de IP24 scenario's en II3050 scenario's voor jaren 2030-2050. Profielen komen uit het ETM.



De behoefte aan werkvolume en injectie- en uitzendvermogen in de II3050 scenario's groeit over de tijd heen (vanaf 2030 tot 2050), maar de verhoudingen tussen volume en injectie- en uitzendvermogen blijven redelijk constant.

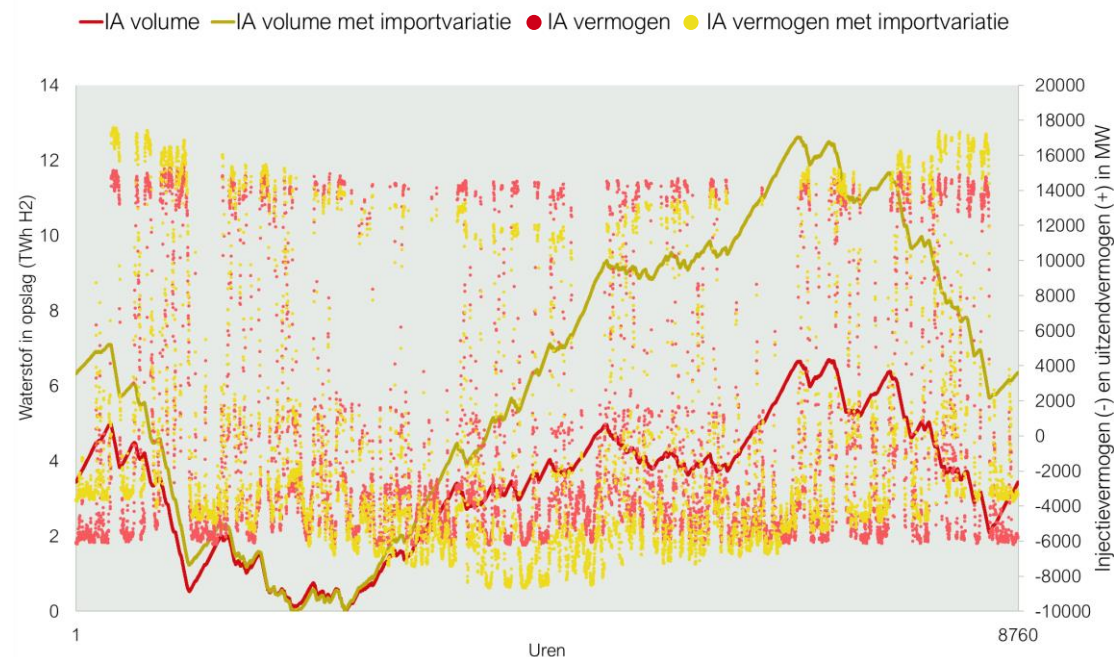
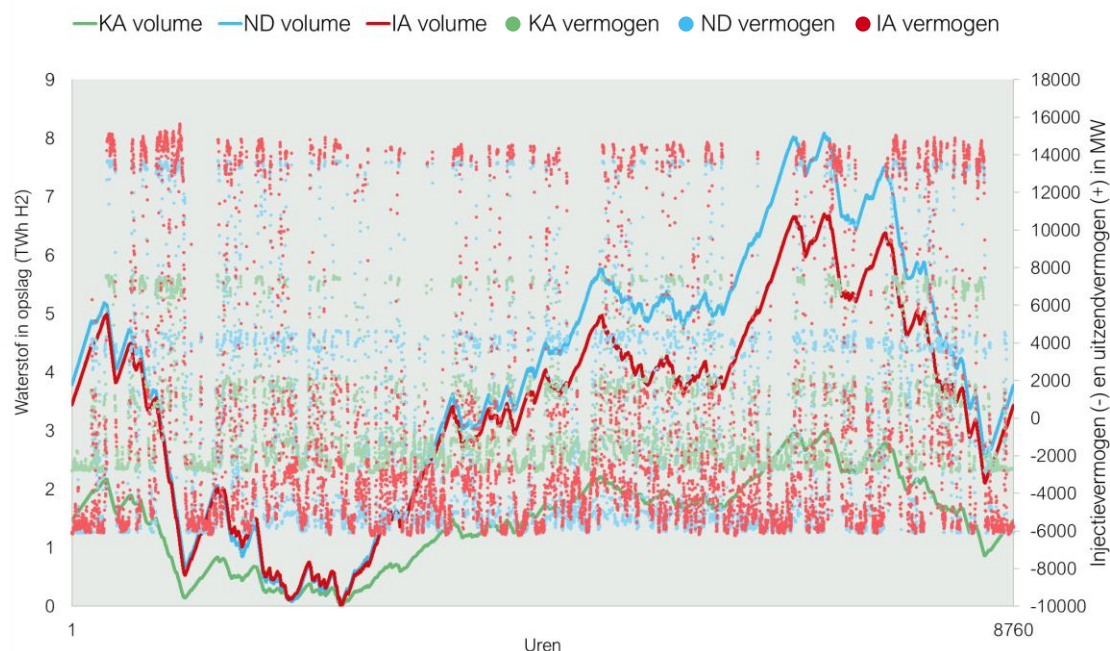
Scenario		Opslagvolume	Injectie vermogen	Uitzend vermogen	Verhouding volume : injectie : uitzend
		TWh H2	GW H2	GW H2	TWh : GW : GW
2030	KA	1.2	-0.7	1.9	1 : 1.1 : 1.6
	ND	3.6	-2.6	5.3	1 : 0.7 : 1.5
	IA	2.3	-2.3	5.4	1 : 1.0 : 2.4
2035	KA	3	2.9	7.6	1 : 1.0 : 2.6
	ND	8.1	6.1	6.3	1 : 0.8 : 1.7
	IA	6.7	13.7	15.7	1 : 0.9 : 2.3
2040	DEC	11.4	-9.5	26.7	1 : 0.8 : 2.3
	EUR	9.9	-6.2	23.5	1 : 0.6 : 2.4
	IH	15.3	-10.3	42.0	1 : 0.7 : 2.7
	NAT	8.7	-10.9	26.8	1 : 1.2 : 3.1
2050	DEC	21.0	-16.1	53.0	1 : 0.8 : 2.5
	EUR	14.3	-9.0	34.5	1 : 0.6 : 2.4
	IH	29.0	-15.3	74.7	1 : 0.5 : 2.6
	NAT	14.3	-18.4	48.3	1 : 1.3 : 3.4

Bijlage

Aanvullende II3050 materie: opslagprofielen en uurlijkse vermogens

De behoefte aan werkvolume en injectie- en uitzendvermogen in de II3050 scenario's. Injectie- en uitzendvermogens voor de scenario's ND en IA zijn redelijk gelijk, rond de 14.000 MW uitzend en 6.000 MW injectie. Scenario KA heeft minder injectie en uitzend nodig; rond de 7.000 MW uitzend en 3.000 MW injectie. Met een importvariatie voor scenario IA wordt de benodigde volumes en injectie-en uitzendvermogen veel hoger.

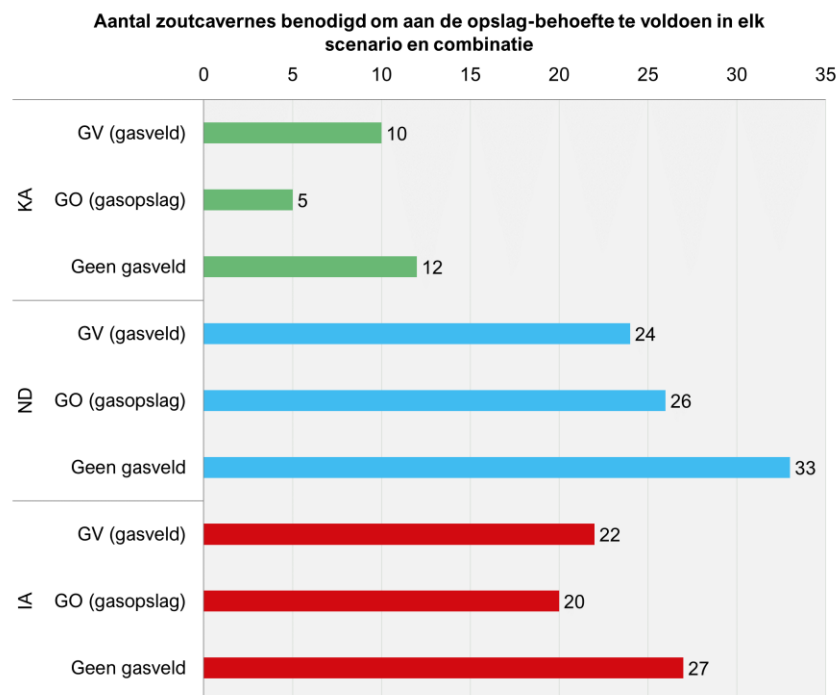
Grafieken van de jaarlijkse opslagprofiel en uurlijkse opslagvermogen voor alle scenario's in 2035 (links) en voor de importvariatie van scenario IA (rechts).



Bijlage

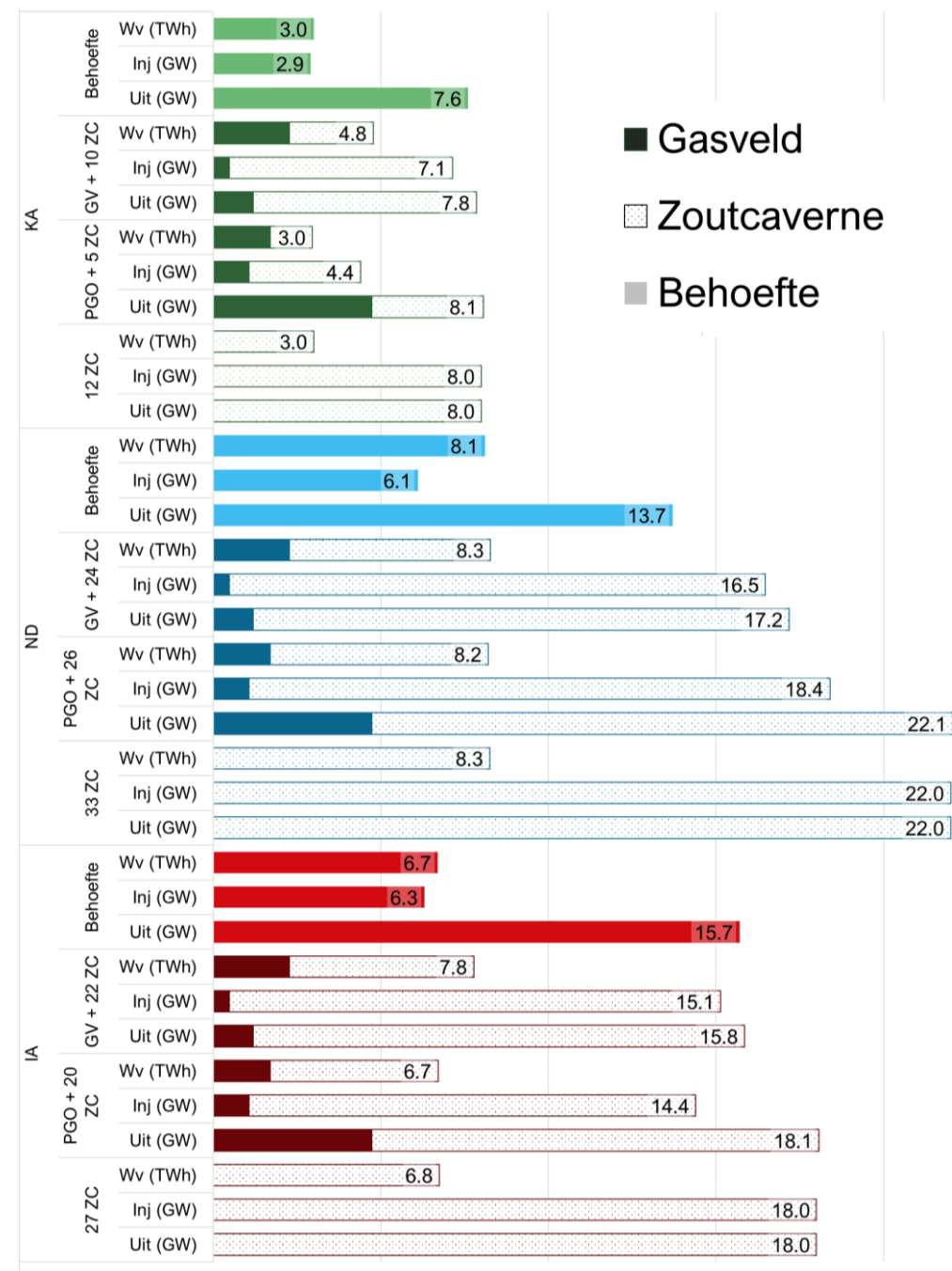
Resultaten: aantal zoutcavernes en opgestelde volumes en vermogens per combinatie en scenario

Combinaties van gasvelden en zoutcavernes om aan de technische opslag-behoefte (volume en vermogens) te voldoen. In de opstelling van de resultaten is er niet gekeken naar de kosten van ieder type opslag, dat tot verschillende combinaties en opgestelde gasvelden en zoutcavernes zou kunnen zorgen.



Aantal zoutcavernes nodig per scenario om aan de opslagbehoefte te voldoen.

Opslagbehoefte en totale opgestelde werkvolumes (Wv) en injectie- en uitzendvermogens (Inj, Uit) van elk scenario.



Bijlage

Resultaten: cycli en residuele waterstof

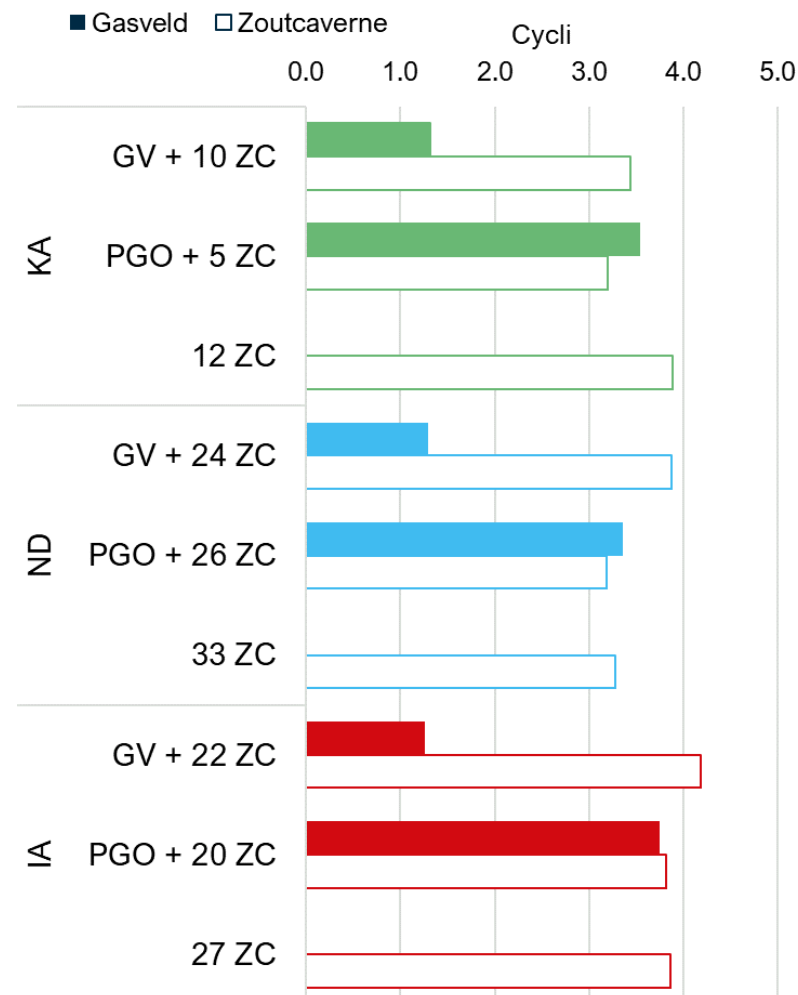
De hoeveelheid cycli en hoeveelheid 'curtailment' en 'lost load' per scenario en per combinatie van een gasveld en een verzameling zoutcavernes.

Het PGO heeft altijd een vergelijkbaar hoeveelheid cycli met de zoutcavernes, terwijl het GV altijd lage cycli heeft.

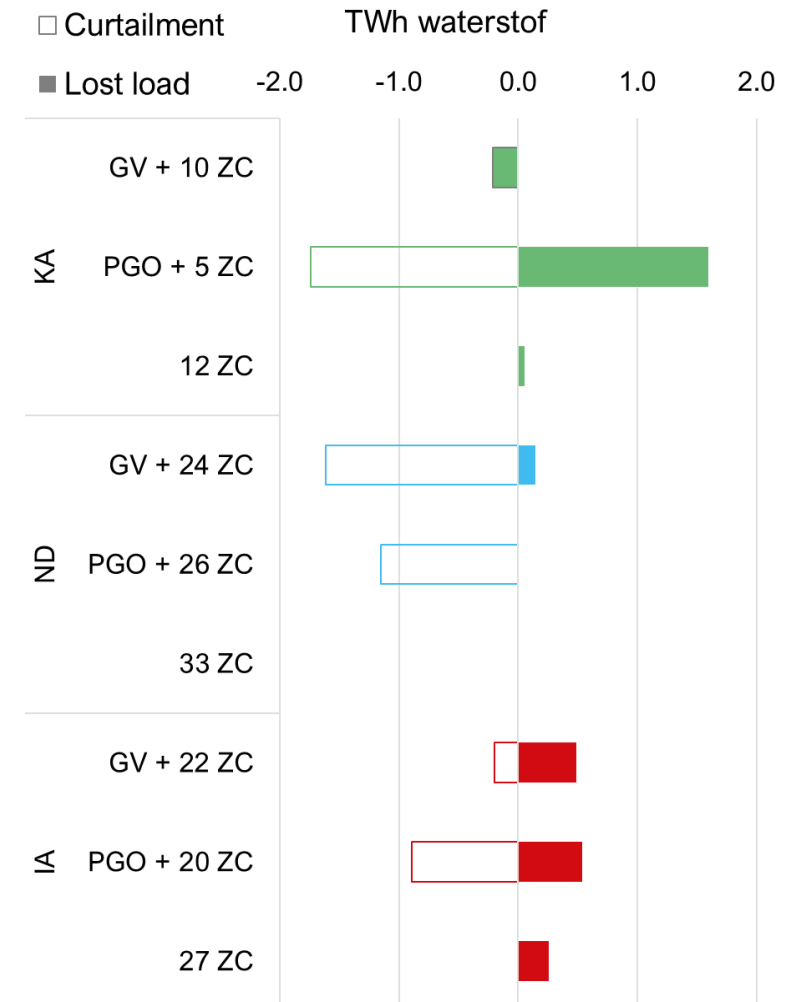
De verzameling zoutcavernes heeft altijd het minste lost load of curtailment. Dit komt doordat de combinaties van het GV met zoutcavernes en de PGO met zoutcavernes niet optimaal samenwerken, dat betekent dat een van de opslagen vol of leeg lopen, en dus niet aan de waterstofopslag-behoefte kunnen voldoen.

De verschillen in curtailment en lost load tussen de scenario's en tussen de GV en de PGO worden in de volgende slides uitgelegd.

Cycli per scenario en per combinatie..



Residuele waterstof in elk scenario en elk combinatie.
'Curtailment': residuele aanbod. 'Lost load': residuele vraag.



Bijlage

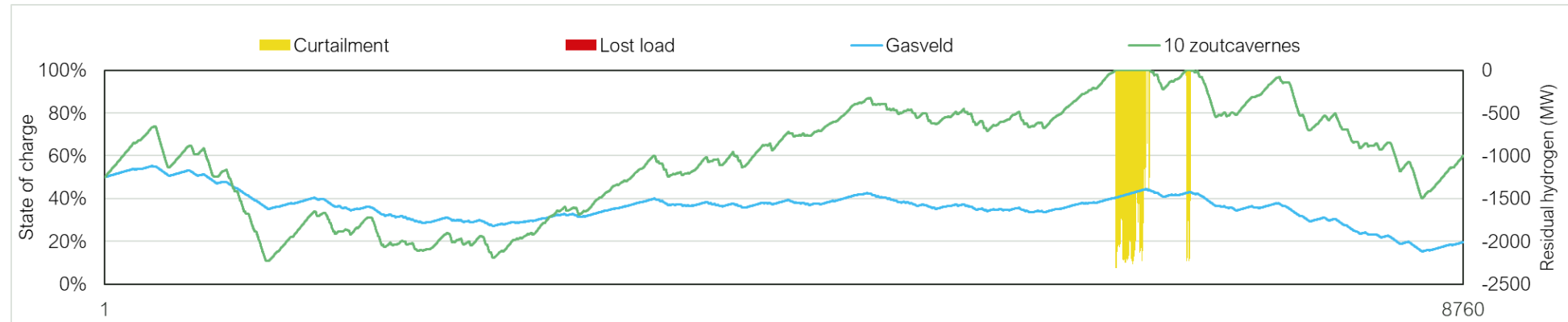
Resultaten: uurprofielen van vulgraad en residuele waterstof (KA)

1. Curtailment ontstaat doordat zoutcavernes vol lopen en dat het gasveld onvoldoende injectievermogen heeft om waterstof op te slaan.

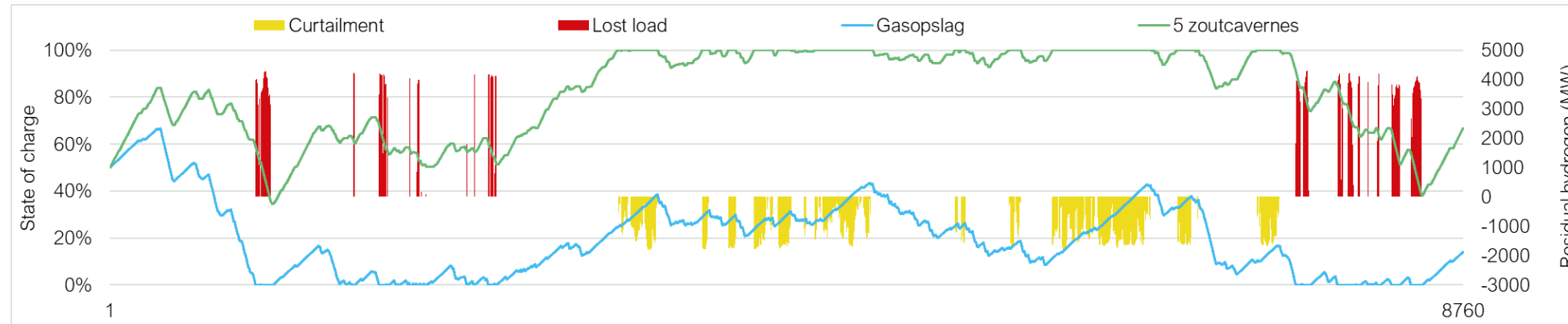
2. Lost load ontstaat doordat het gasopslag leeg loopt en dat de zoutcavernes onvoldoende uitzendvermogen hebben om de vraag te beantwoorden. Curtailment ontstaat omdat de zoutcavernes vol zijn.

3. Curtailment gebeurt omdat de vulgraad van de zoutcavernes te hoog is aan het begin van het jaar.

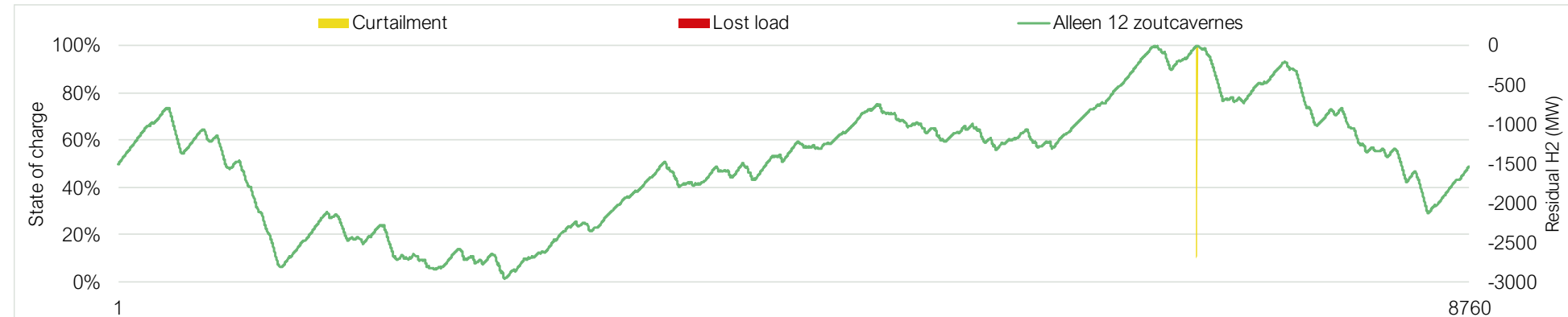
1. Gasveld en zoutcavernes



2. Gasopslag en zoutcavernes



3. Alleen zoutcavernes.



Bijlage

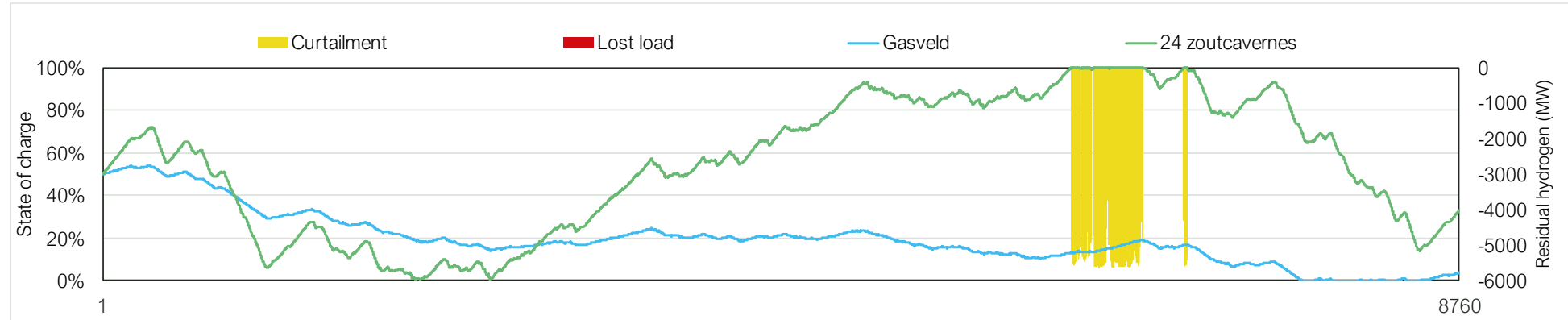
Resultaten: uurprofielen van vulgraad en residuele waterstof (ND)

1. Curtailment ontstaat doordat zoutcavernes vol lopen en dat het gasveld onvoldoende injectievermogen heeft om waterstof op te slaan.

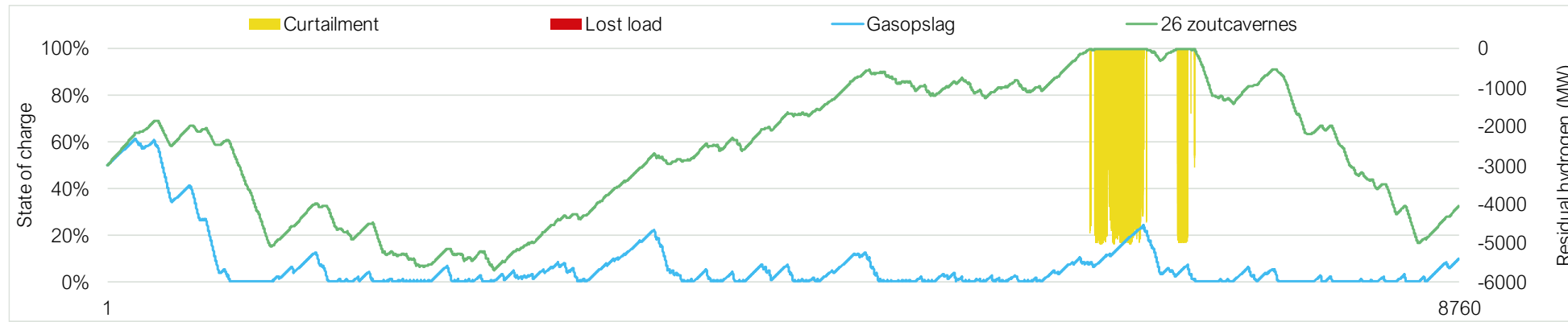
2. Curtailment ontstaat doordat zoutcavernes vol lopen en dat het gasopslag onvoldoende injectievermogen heeft om waterstof op te slaan.

3. Curtailment gebeurt omdat de vulgraad van de zoutcavernes te hoog is aan het begin van het jaar.

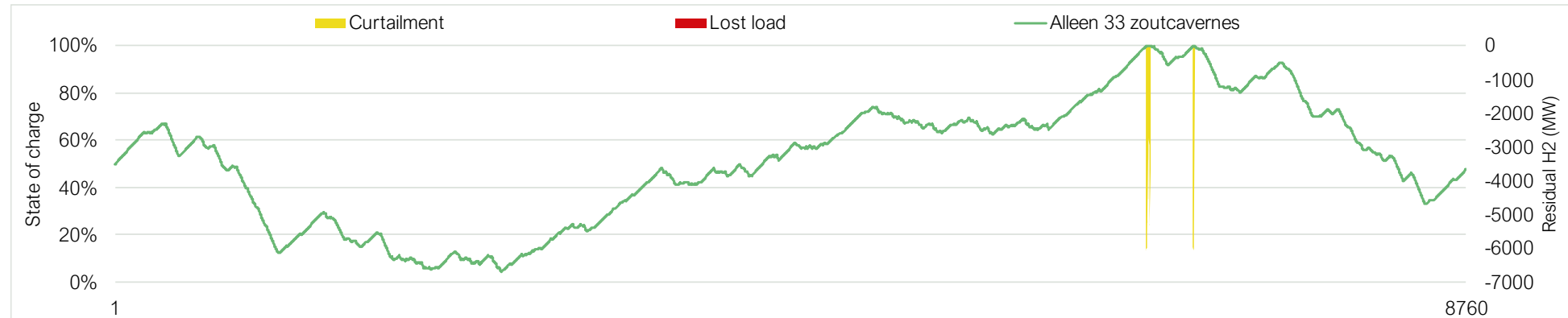
1. Gasveld en zoutcavernes



2. Gasopslag en zoutcavernes



3. Alleen zoutcavernes.



Bijlage

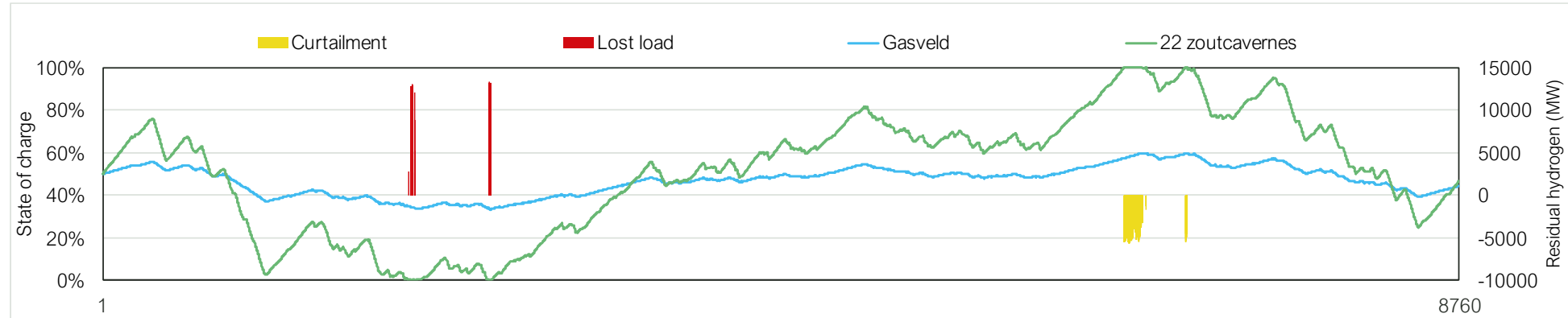
Resultaten: uurprofielen van vulgraad en residuele waterstof (IA)

1. Lost load ontstaat doordat de zoutcavernes leeg lopen en dat het gasveld onvoldoende uitzendvermogen heeft om de vraag te beantwoorden. Curtailment ontstaat omdat de zoutcavernes vol zijn.

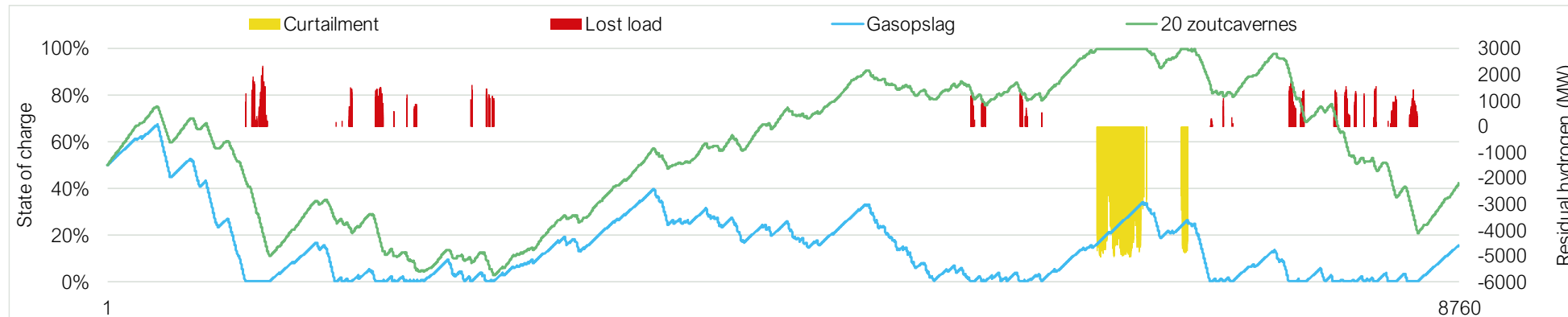
2. Lost load ontstaat doordat het gasopslag leeg loopt en dat de zoutcavernes onvoldoende uitzendvermogen hebben om de vraag te beantwoorden. Curtailment ontstaat omdat de zoutcavernes vol zijn.

3. Lost load gebeurt omdat de vulgraad van de zoutcavernes te laag is aan het begin van het jaar.

1. Gasveld en zoutcavernes



2. Gasopslag en zoutcavernes



3. Alleen zoutcavernes.

