Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

TNO-rapport
TNO2023_R10058 | Eindrapport

Waterstofopslag in cavernes

Een maatschappelijke kosten-batenanalyse

Datum 23 januari 2023

Auteur(s)

Exemplaarnummer 1
Oplage
Aantal pagina's 82 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen 9
Opdrachtgever Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam Ondergrondse energieopslag en de zoutmarkt
Projectnummer 060..51941/01.10.05

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

1 Inleiding 4
1.1 Aanleiding 4
1.2 Onderzoeksvraag 5
1.3 Onderzoeksmethode 6
1.4 Leeswijzer 8

2 Marktfalen als reden voor overheidsingrijpen 9
2.1 Vrije mededinging 9
2.2 Zoutmarkt 9
2.3 Waterstofopslagmarkt 11
2.4 Marktfalen 13
2.5 Bevindingen 16

3 Beleidsalternatieven 17
3.1 Waterstofopslagcapaciteit 17
3.2 Nulalternatief 18
3.3 Beleidsalternatieven 18
3.4 Alternatief 1 18
3.5 Alternatief 2 21

4 Waterstofsysteemkosten en -baten 22
4.1 Nationaal energiesysteemmodel 22
4.2 Energiescenario's & waterstofvraag 22
4.3 Beperkte opslagcapaciteit 24
4.4 Opslagcavernes 25
4.5 Modelresultaten 26
4.6 Gevoeligheidsanalyse 29
4.7 Bevindingen 31

5 Overige kosten en baten 32
5.1 Ruimtelijke inpassing 32
5.2 Fysieke veiligheid 33
5.3 Aanbodzekerheid 34
5.4 Weerbaarheid 35
5.5 Ecologie 36
5.6 Bevindingen 37

6 Analyseresultaten 38
6.1 Verdisconteren van kosten en baten 38
6.2 Resultaten 39
6.3 Discussie 41
6.4 Bevindingen 46

7 Handelingsperspectief 47
7.1 Beantwoording onderzoeksvraag 47
7.2 Aanbevelingen 49

8 Referenties 50

9 Bijlagen 54
9.1 Nederlandse en Europese zoutmarkt 54
9.2 Ontwikkeling van opslagcavernes 59
9.3 Waterstofopslag in gasvelden 61
9.4 Standaard opslagcaverne 62
9.5 Onderbouwing bovengrens aantal opslagcavernes 64
9.6 Pekellozing in de praktijk 65
9.7 Caverne-aanlegkosten per variant 68
9.8 MKBA resultaten 76
9.9 Gevoeligheidsanalyse 79

Dankwoord 81

Ondertekening 82

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Voor een duurzaam, betrouwbaar en betaalbaar energiesysteem in Nederland en een goed functionerende waterstofmarkt wordt grootschalige waterstofopslag na 2030 aantrekkelijk, zo niet noodzakelijk (TNO & EBN, 2018; Berenschot & Kalavasta, 2020). Het verlaagt de totale kosten van het energiesysteem en voorkomt (deels) de kosten van leveringszekerheidsonderbrekingen. Schattingen van de benodigde opslagcapaciteit lopen behoorlijk uiteen (Tabel 1.1).

Tabel 1.1 Schattingen van de benodigde waterstofopslagcapaciteit

IJkpunt	**Opslagbehoefte**		**bron**
	bcm	**PJ**	
huidige Nederlandse swingcapaciteit	40	500	(NAM, 2022)
2050	14	155	(HyUnder, 2014)
2050	16	200	(Berenschot & Kalavasta, 2020)
2050	8	100	(SodM, 2018a)
2050	1,3 tot 7,5	26 tot 52	(TNO & EBN, 2021)
2050	0.4 tot 0.8	5 tot 10	(TNO, 2020a)

Opslag van waterstof kan om drie redenen nuttig zijn, namelijk:

(i) Opvangen van dagelijkse en wekelijkse fluctuaties in (vooral) het aanbod van waterstof. Het verwachte waterstofgebruik in de industrie zal overwegend continue zijn, terwijl de productie uit wind en zon of import zal fluctueren;

(ii) Seizoensopslag. Zowel vraag (bij gebruik voor warmte) als aanbod (wind en zon) kunnen een seizoenpatroon vertonen;

(iii) Strategische reserve als zekerheid tegen verstoringen in de productie of aanvoer van waterstof.

Om te voorzien in de benodigde waterstofopslagcapaciteit is ondergrondse opslag in opslagcavernes de op dit moment best ontwikkelde technologie (TNO & EBN, 2018; TNO, 2020b). Dit pakt de markt pas op als er goed functionerende verdienmodellen zijn voor ondergrondse energieopslag, terwijl daarover nu nog grote onzekerheden zijn. Naast de onzekerheid in de huidige schattingen van de benodigde opslagcapaciteit tussen 2030 en 2050 (Tabel 1.1) moeten de uitgangspunten[1] voor regulering, besluitvorming en maatschappelijke inbedding voor een belangrijk deel nog vorm krijgen en wordt de technologie voor opslag van waterstof in lege gasvelden ontwikkeld als alternatief of als aanvullende opslagcapaciteit. Een andere complicatie is de lange doorlooptijd voor de aanleg van opslagcavernes (in de orde van 10 jaar, zie hoofdstuk 2).

[1] https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/11/04/verantwoord-omgaan-met-veiligheid-en-gezondheid-in-de-energietransitie

1.2 Onderzoeksvraag

Doel van dit onderzoek is inzicht in welke mate de zoutmarkt sturend of beperkend is voor de ontwikkeling van ondergrondse waterstofopslag in Nederland. Daarbij is de onderzoeksvraag:

Is een andere regulering van de zoutmarkt welvaartsverhogend? En hoeveel welvaartsverhogend is het?

Hierbij richten wij onze aandacht eerst op *wat* de overheid zou kunnen en willen bereiken, en vervolgens en in minder detail op *hoe* dat kan (handelingsperspectief). De wat-vraag gaat over hoe groot de kosten en baten worden van een andere regulering, de hoe-vraag raakt aan de verdeling van kosten en baten.

Voor dat laatste is het relevant als mensen zich zorgen maken over de mogelijke effecten van een andere regulering op henzelf of hun leefomgeving. Bij zoutwinning spitsten deze zorgen zich momenteel toe op de vraag, in hoeverre bodemdalingsschade naar toekomstige generaties mag worden doorgeschoven (Zoutworkshop[2], 2019). Bij de energietransitie maken toezichthouders zich momenteel vooral zorgen over de (financiële) haalbaarheid van duurzame energietechnologie, zoals waterstof. Zullen de betrokken bedrijven in staat blijken om alle erkende schadeclaims te vergoeden (SodM, 2017)? Deze en verwante onderwerpen, die raken aan de toekomstige (her)verdeling van de lusten en lasten van een waterstofeconomie (in combinatie met zoutwinning), laten we vanwege het politiek-bestuurlijke karakter ervan buiten beschouwing.

De onderzoeksvraag hebben we opgeknipt in drie hoofdvragen met ieder meerdere deelvragen.

1. *Is het zorgen voor een tijdige aanleg van opslagcavernes een overheidstaak?*
   De Routekaart Waterstof (RVO, 2022) zegt hierover het volgende: "*Intensieve samenwerking van alle spelers in de keten, zowel nationaal als internationaal, is vereist zodat er nú keuzes gemaakt worden voor beleidsmaatregelen die op korte termijn tot investeringen leiden. De overheid speelt hierbij een belangrijke rol als initiator en regisseur van dit proces en bij het scheppen van de randvoorwaarden*". Dit duidt mogelijk op marktfalen en een juist begrip daarvan is van belang voor de vraag of overheidsingrijpen nodig is (en zo ja, voor het in kaart brengen van het handelingsperspectief van de overheid). Is er sprake van marktfalen bij de markt voor flexibiliteit van waterstof, of zijn er problemen met de systeemintegratie of leveringszekerheid, die overheidsingrijpen rechtvaardigen? Of is de zoutmarkt een markt met marktfalen, waardoor opslagcavernes niet gerealiseerd worden als daar wel behoefte aan is?

2. *Is het aanleggen van opslagcavernes (en daar nu al mee beginnen) welvaartsverhogend? Zo ja, hoeveel verhogen extra cavernes de welvaart?*
   Bij het in kaart brengen van de mogelijkheden om tijdig voldoende opslagcavernes aan te leggen gaan we na in welke mate dit sturend of

[2] https://www.nlog.nl/sites/default/files/2020-11/resume_salt_workshop_november2019.pdf

beperkend is voor de ontwikkeling van ondergrondse waterstofopslag in Nederland. Relevante vragen daarbij zijn: Wat levert een opslagcaverne aan baten op, als die gebruikt wordt voor waterstofopslag (in vergelijking met alternatieve vormen van waterstofopslagcapaciteit)? En wat betekenen meer opslagcavernes voor de veiligheid in brede zin?

3. *Als cavernes maatschappelijk gezien wenselijk zijn, en als marktfalen waarschijnlijk zorgt voor onvoldoende cavernes, dan kan regulering gewenst zijn (als de kosten van regulering erg hoog zijn, kan het alsnog ongewenst zijn). Hoe zou die regulering eruit kunnen zien en wat is het effect op de zoutmarkt?*
   Regulering in dit onderzoek draait om de vraag of de reguliere zoutwinning gecombineerd zou moeten worden met de aanleg van cavernes voor waterstofopslag in de toekomst. Concrete opties voor de inzet van beleidsinstrumenten (zoals wettelijke verplichtingen, financiële maatregelen of staatsdeelname) om dit te stimuleren liggen buiten reikwijdte van dit onderzoek, evenals veranderende beleidskaders met betrekking tot de zout- of waterstofopslagmarkt. Wel moeten er niet alleen op papier betere voorwaarden voor de ontwikkeling van voldoende waterstofopslagcapaciteit zijn, want een andere regulering is pas succesvol als in de praktijk daadwerkelijk tijdig voldoende opslagcavernes aangelegd worden. Bij het veranderen van de huidige regelgeving naar een vriendelijker vorm voor de aanleg van opslagcavernes is daarom een aantrekkelijk investeringsklimaat (RVO, 2022) van belang (anders staken de zoutwinners hun productie of verplaatsen deze naar het buitenland).

1.3 Onderzoeksmethode

Een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) heeft als doel het inzichtelijk maken wat de welvaartseffecten van mogelijk beleid zijn, zodat beleidsmakers op basis van objectieve informatie kunnen beslissen. Daarom moeten alle relevante beleidsalternatieven meegenomen worden in de analyse. Per alternatief wordt in kaart gebracht wat de effecten zijn ten opzichte van een nulalternatief zonder nieuw beleid. De effecten worden daarbij uitgedrukt in euro's (monetariseren of waarderen in geld). Daarbij worden ook effecten[3], waarvoor geen marktprijzen bestaan, bediscussieerd en waar mogelijk gewaardeerd. Hoe beter de opstellers van een MKBA er in slagen alle kosten en baten in geld uit te drukken, hoe beter de effecten en maatregelen onderling vergelijkbaar worden en hoe inzichtelijker de informatie voor de beleidsmakers.

Sinds 2000 zijn in Nederland voor verschillende beleidsterreinen MKBA-handleidingen gemaakt. In 2013 is een algemene handleiding verschenen (CPB/PBL, 2013). Deze vervangt de voorgaande handleidingen en is door de Rijksoverheid benoemd als basis voor rijks-MKBA's (Ministerie van Financien, 2013, p. 3). De volgorde van de stappen is op hoofdlijnen logisch, al hoeven de stappen niet altijd lineair te worden uitgevoerd: soms is het nodig om na de uitvoering van een latere stap een eerdere stap te herzien.

[3] zoals effecten op het gebied van veiligheid

Tabel 1.2 Stappenplan MKBA. Bron: (CPB/PBL, 2013).

1.	Probleemanalyse	• Welk knelpunt of welke kans doet zich voor en hoe ontwikkelt deze zich? • Welke beleidsdoelstelling volgt daaruit? • Welke oplossingsrichtingen zijn kansrijk?
2.	Vaststellen nulalternatief	• Meest waarschijnlijke ontwikkeling zonder beleid • Effect = beleidsalternatief – nulalternatief
3.	Definitie beleidsalternatieven	• Beschrijf de te nemen maatregelen • Rafel pakketten uiteen tot samenstellende onderdelen • Definieer meerdere alternatieven en varianten
4.	Bepalen effecten en baten	• Identificeer effecten • Kwantificeer effecten • Waardeer (monetariseer) effecten
5.	Bepalen kosten	• Opgeofferde middelen om de oplossing te implementeren • Kosten kunnen eenmalig of periodiek zijn, vast of variabel • Alleen de extra kosten ten opzichte van het nulalternatief
6.	Varianten en risicoanalyse	• Identificeer de belangrijkste onzekerheden en risico's • Analyseer de gevolgen voor de uitkomsten
7.	Opstellen overzicht kosten en baten	• Reken alle kosten en baten naar hetzelfde basisjaar en bepaal het saldo • Breng alle effecten in beeld (ook niet-gekwalificeerde en/of niet-gemonetariseerde effecten)
8.	Resultaten presenteren	• Relevant, toegankelijk en duidelijk • Verantwoorden: transparantie en reproduceerbaarheid • Interpreteren: wat kan de besluitvormer uit de MKBA leren?

In principe is de looptijd van een MKBA oneindig, of zolang er verschillen tussen nulalternatief en beleidsalternatieven zijn. Praktisch gezien wordt de looptijd van een MKBA beperkt[4]. Over deze periode moeten de kosten en baten moeten worden teruggerekend naar een gemeenschappelijk basisjaar (verdisconteren). De gedachte hierachter is, dat een geldbedrag nu meer waard is dan eenzelfde bedrag over 10 of 20 jaar. Bij MKBA's voor de overheid is de standaard discontovoet 2,25%[5] (Minister van Financiën, 2020)[6].

[4] bij infrastructuur vaak tot 100 jaar na ingebruikname, tenzij de verwachte levensduur korter is

[5] Reëel en risicogewogen

[6] Er zijn twee uitzonderingen, deze gelden op het niveau van kosten- of batenstromen. De eerste uitzondering betreft vaste, verzonken kosten. Daarvoor geldt een lagere discontovoet van 1,6%. Hiervan is sprake als de kosten (grotendeels) onafhankelijk zijn van het gebruik en als de gedane investering in de praktijk (vrijwel) geen alternatieve aanwendingsmogelijkheden kent (Dit is vaak zo bij investeringen in fysieke infrastructuur zoals bij de aanleg van wegen, vaarwegen, dijken, spoorinfrastructuur, havens en sluizen, en de transport- en distributie-infrastructuur voor energie). De tweede uitzondering betreft de private discontovoet van bedrijven. Zij gebruiken een hogere discontovoet dan de maatschappij (overheid). Dit weerspiegelt het verschil in financieringskosten, de beperktere mogelijkheden van bedrijven om risico's te diversifiëren en winstbelasting als kostenpost (voor de samenleving als geheel zijn belastingbetalingen overdrachten van de een naar de andere actor).

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 analyseren we de markt voor zout en voor opslag van waterstof (Hoofdvraag 1). Dit laat zien dat er vanuit marktwerkingsperspectief een aantal redenen zijn waarom deze markten onvoldoende werken en er dus een suboptimale hoeveelheid opslagcavernes zal worden aangelegd als dit aan de markt wordt overgelaten.

In Hoofdstuk 3 leiden we af welke beleidsalternatieven (gegeven de aanleg van 0, 30 of 60 extra opslagcavernes) de overheid kan nastreven om dit te repareren. Binnen de alternatieven zijn er meerdere varianten of combinaties daarvan mogelijk voor de aanleg van opslagcavernes.

Hoofdstuk 4 tot en met 6 vormen de kern van onze maatschappelijke kosten-batenanalyse (Hoofdvraag 2). In Hoofdstuk 4 gaan we per variant na wat het aanleggen van extra opslagcavernes kost ten opzichte van het nulalternatief en berekenen we de energiesysteembaten voor de drie alternatieven. Hiervoor gebruiken we het energiesysteemmodel OPERA en de bestaande energietransitie-scenario's ADAPT en TRANSFORM. In Hoofdstuk 5 behandelen we de verschillen tussen de alternatieven op het gebied van veiligheid en weerbaarheid van het energiesysteem. Dit betreft zonder uitzondering lastig te monetariseren onderwerpen. In Hoofdstuk 6 presenteren we de resultaten van de MKBA (het saldo van kosten en baten per alternatief). Daar gaan we ook in op de gevoeligheid van de resultaten voor de gedane aannamen en andere discussiepunten.

In hoofdstuk 7 vatten we de bevindingen uit hoofdstuk 4 tot en met 6 samen en doen we een aantal aanbevelingen voor hoe verder met de regulering van de zoutmarkt in relatie tot de groene waterstofopslagmarkt (Hoofdvraag 3).

2 Marktfalen als reden voor overheidsingrijpen

In dit hoofdstuk gaan we na of opslag in voldoende mate tot stand komt als het wordt overgelaten aan de markt. We geven eerst een beschrijving van de kenmerken voor vrije mededinging, dan bespreken we de zoutmarkt en de waterstofmarkt om vervolgens in te gaan op eventueel marktfalen en de oorzaken daarvan in relatie tot regulering van de zoutmarkt (Hoofdvraag 1).

2.1 Vrije mededinging

Als het gaat om vrije mededinging (als in preventie van ongelijke concurrentie-verhoudingen) zijn er een aantal kenmerken, waar een markt aan moet voldoen (Tabel 2.1). Bijna geen markt voldoet helemaal aan deze kenmerken. Economen en juristen gaan daarom meestal uit van effectieve concurrentie: een markt werkt bij benadering efficiënt. Vanuit deze kenmerken kijken we welk falen (kan) optreden op de zoutmarkt in relatie tot de waterstofopslagmarkt, want dat kan aanleiding geven voor overheidsingrijpen.

Tabel 2.1 Kenmerken voor vrije mededinging

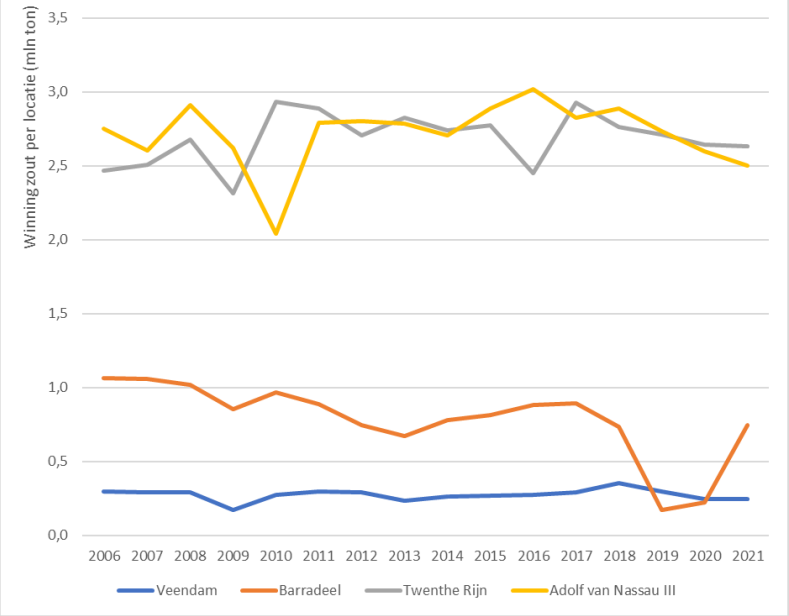
Kenmerk	**Toelichting**
een groot aantal aanbieders	borgt dat geen marktpartij afzonderlijk invloed heeft op de prijs (en dat ze niet samenwerken)
een groot aantal vragers	
homogeen goed	de goederen zijn voor de kopers van gelijke kwaliteit en samenstelling, het maakt dus niet uit waar een koper zijn goederen koopt
volkomen transparantie	vragers weten perfect en kosteloos waar welke producten te koop zijn en wat ze kosten, en dat verkopers weten wie hun concurrenten zijn, wat die aanbieden en wat hun prijzen zijn
vrije toe- en uittreding	geen verzonken kosten bij toetreding (want deze kosten kunnen bij uittreding niet worden terugverdiend)

2.2 Zoutmarkt

Een overzicht van de Nederlandse en Europese zoutmarkt is weergegeven in Bijlage 9.1. De Europese zoutmarkt is minder geconcentreerd dan de Nederlandse zoutmarkt (waar één bedrijf domineert) en wordt bediend door enkele multinationals en grotere bedrijven. Alle grote concurrenten beschikken over uitgebreide distributienetwerken en kunnen elkaar in elk land beconcurreren (SodM, 2018b). Vrije toe– en uittreding (Tabel 2.1) is een probleem. Om als zoutproducent toe te treden moeten flinke investeringen gedaan worden (die in de tijd goed op elkaar moeten aansluiten) in geologisch onderzoek, vergunningen, fabrieken, marktverkenning en verkoop, voordat sprake is van winning en inkomsten. Bij

uittreding als zoutwinner kunnen deze kosten niet meer goed gemaakt worden. In de praktijk kunnen deze barrières fors zijn[7].

In Nederland wordt nu zo'n 6 miljoen ton zout per jaar gewonnen[8]. De zoutwinning in de afgelopen jaren is weergegeven in Figuur 2.1. Het zout wordt hoofdzakelijk gewonnen door oplosmijnbouw[9]. Hierbij wordt een ondergrondse zoutlaag aangeboord, die vervolgens wordt geloogd door het injecteren van zoet water en weer terugwinnen van de verzadigde pekel. Zo ontstaat een met pekel gevulde holruimte of caverne. Het proces en bijbehorende risico's staan beschreven in SodM (2018).



Figuur 2.1 Zoutwinning in Nederland per vergunning. Nobian wint steenzout in Twente Rijn en Adolf van Nassau III (Zuidwending), Frisia in Barradeel. Nedmag wint kaliummagnesiumzout in Veendam. Gemeten in gewicht wint Nobian gemiddeld 83% van het zout in Nederland, Frisia zo'n 12% en Nedmag de resterende 4-5%. Voor opslag is alleen de winning van steenzout van belang[10]. Bron: TNO 2018 TNO-rapport R11372 | | 1 november 2018, p. 58. TNO (2019/2020/2021/2022) Jaarverslag delfstoffen en aardwarmte in Nederland, in opdracht van EZK. 2018/2019/2020/2021, https://www.nlog.nl/jaarverslagen.

[7] De Frisia zoutfabriek vergde rond 1994 een investering van 250 miljoen gulden (toen nog onder de naam Frima) en ging in 2000 failliet, waarna het bedrijf voor 70 miljoen gulden werd verkocht aan het Duitse K+S. Het is nu onderdeel van ESCO (Boer, et al., 2019). De investeerder heeft in dit geval dus veel van de oorspronkelijke investering niet meer terugverdiend.

[8] Dit is ruwweg een volume van 3 miljoen m^3.

[9] In Zeeland wordt een kleine hoeveelheid zeezout gewonnen door indamping (2,2 ton per jaar https://zeeuwschezoute.nl/ons-verhaal/. Zoutmijnen, waar ondergrondse zoutvoorkomens uitgegraven worden via schachten en tunnels, komen in Nederland niet voor (https://nl.wikipedia.org/wiki/Zoutmijn).

[10] De betere oplosbaarheid van kaliummagnesiumzout in water zorgt voor onregelmatig gevormde cavernes, die om die reden ongeschikt zijn voor opslag (zie ook Bijlage 9.4).

2.3 Waterstofopslagmarkt

Verdienmodel

Investeerders baseren hun verdienmodel voor opslag[11] op goedkoop inkopen bij perioden van overschot, opslaan en vervolgens tijdens perioden van schaarste duurder verkopen[12], of (afhankelijk van de waterstofproductielocatie) op vermeden kosten voor netverzwaring en -uitbreiding. Op deze manier beïnvloedt de beschikbare opslagcapaciteit de prijsvorming[13], zeker als opslag grootschalig is[14,15].

Markttransparantie (Tabel 2.1) betekent dat opslageigenaren voldoende zicht hebben op de marktvraag, aanbod van waterstof (en profielen daarvan in de tijd) en van binnen- en eventuele buitenlandse partijen om hun marge te kunnen bepalen. Dat is nu niet mogelijk, want de markt bestaat nog niet: er zijn nog (bijna) geen aanbieders en vragers van (groene) waterstof[16]. Wel is duidelijk, dat bij uitbreiding van de opslagcapaciteit[17] sprake is van een nivellerend effect (Tekstblok 2.1). Daardoor ontwikkelt de markt zich in de richting van de optimale hoeveelheid opslag[18] (in het ideale geval, dus zolang er geen sprake is van marktfalen).

Beleidskaders

De beleidskaders voor de waterstofmarkt worden momenteel ontwikkeld. De Europese Commissie heeft het *Hydrogen and Decarbonised Gas Markets Package* voorgesteld. Daarin zal onder andere de regulering van waterstofopslagen worden vastgelegd (zie Naar koolstofvrije gasmarkten - Energy.nl). De Commissie stelt een gereguleerde derden toegang voor waterstofopslag voor[19] en er is een voorstel opgenomen om waterstofopslagtarieven te reguleren. Door tariefregulering voor te stellen gaat de EC blijkbaar al uit van marktfalen bij de markt voor waterstofopslag.

---

[11] Het verdienmodel van aardgasopslagen is in de meeste landen, en ook in Nederland, het gemiddelde verschil tussen de gasprijs in de winter en de zomer. Dat was de laatste jaren een wankel verdienmodel (zie ook paragraaf 2.4). De grootste gasopslag in het Verenigd Koninkrijk (Rough) werd in 2017 gesloten vanwege de beperkte verdiensten en omdat een dure renovatie en verlenging van de levensduur commercieel niet aantrekkelijk werden geacht door de operator. Ook voor de gasopslag in Grijpskerk is sluiting om economische redenen een reële optie geweest (HCCS, 2021, p. 11).

[12] Cournot-competitie

[13] Dergelijke prijseffecten zijn beschreven voor de gasmarkt (EC, 2015).

[14] We verwachten, dat ondergrondse waterstofopslag in de orde van meerdere opslagcavernes effect op de waterstofprijs zal hebben.

[15] Immers, hoe meer opslagcapaciteit er beschikbaar is, hoe minder FCE opslagcavernes gemiddeld per jaar hebben. Een Full Cycle Equivalent (FCE) is de verhouding tussen het jaarlijks opgeslagen volume en de omvang van de opslag. Een FCE van 5 betekent, dat er per jaar vijfmaal zoveel wordt opgeslagen als de omvang van de opslag (doordat de opslag gedurende het jaar steeds (deels) gevuld en weer geleegd wordt). Met een lager aantal FCE per jaar moet de investeerder nog steeds hetzelfde per jaar verdienen om de investering terug te betalen, maar evenredig meer per FCE en per opgeslagen kilo waterstof (een lagere marge, zie Tekstblok 2.1).

[16] Veel waterstof, die nu gebruikt wordt, wordt intern gemaakt en niet verhandeld of getransporteerd.

[17] Een goed prijsmodel hiervan is ingewikkeld. Het effect van opslag op de prijs is belangrijk, omdat de arbitrage-opbrengst snel daalt met de opslagcapaciteit (dit is aangetoond met een elektriciteitsmarktanalyse, zie (Karaduman, 2021). Ook welke partij (producenten of consumenten) de opslag heeft kan uitmaken voor de welvaart (Karaduman, 2021). Voor een gasmarktmodel, waarbij het vullen en het leeghalen effect heeft op de prijs, zie bijvoorbeeld (Cretì, et al., 2009).

[18] Waarbij we IRR (Internal Rate of Return) > maatschappelijke discontovoet verwaarlozen, wat gezien de lange doorlooptijd en het hoge risico wel degelijk een probleem kan zijn.

[19] Dat is een strenger regime dan voor aardgas, omdat de EC verwacht, dat het potentieel voor waterstofopslag is geconcentreerd in specifieke lidstaten, die beschikken over opslagcavernes (voorlopig nog geen lege gasvelden of aquifers, zie Bijlage 9.3).

Tekstblok 2.1 Rekenvoorbeeld waterstofopslagverdienmodel

Stel een investering in opslagcavernes van €6 miljoen in 2030 en € 100 miljoen in 2050 en baten in de 20 jaar erna. Overige kenmerken: een werkgasvolume van 75 miljoen m^3 per caverne, het soortelijk gewicht van waterstof van 0,09 kg/m^3, 5 FCE per jaar, en een discontovoet van 2,25 % reëel. Dan is de marge, die een opslagondernemer moet verdienen, € 0,19 per kilo opgeslagen waterstof (waarbij de operationele kosten nog niet meegenomen zijn). Bij 10 FCE bedraagt de marge € 0,10 per kilo opgeslagen waterstof, terwijl voor seizoensopslag (1 FCE per jaar) 5 maal € 0,19 = € 0,96 per kilo opgeslagen waterstof moet worden verdiend. Ter vergelijking: de gemiddelde, verwachte prijs bedraagt in dit voorbeeld € 2,70 per kilo opgeslagen waterstof.

Deze marges gelden, als de caverne zeker gebruikt gaat worden. Bij 25 % kans op gebruik van de opslag moet de ondernemer - als de caverne wel wordt gebruikt en de hele investering gedaan moet worden voordat de onzekerheid is opgelost - viermaal (!) zoveel verdienen om de investering terug te verdienen (€0,76 in plaats van € 0,19 per kilo opgeslagen waterstof). Een deel van de investeringskosten wordt pas later gemaakt (kussengas, *compressor* en *decompressor* worden pas geïnstalleerd als de caverne gebruikt gaat worden), waarmee het effect in de praktijk kleiner is.

Pas in 2051 en verder zien de overheid en de samenleving of de opslagcaverne nodig is of niet. Zo niet, dan is dat het ondernemersrisico. Als de caverne wel wordt gebruikt, dan ziet de samenleving, dat de ondernemer een rendement haalt van 14,6 % per jaar (of een nog hoger percentage bij gebruik van een hogere discontovoet). Dat vergroot de kans, dat de gasopslag alsnog gereguleerd (afgeroomd) wordt en de ondernemer dus minder verdient - wellicht minder dan nu nodig is voor een positief (of neutraal) verdienmodel.

De opslagfaciliteiten voor waterstof wil de Nederlandse overheid tijdig realiseren (marktconsultatie over de inrichting van de toekomstige waterstofmarkt; Minister voor Klimaat en Energie, 2022). Gezien de onzekerheid over hoe de waterstofmarkt zich gaat ontwikkelen (en mits sprake is van marktfalen) stelt de overheid voor, dat publieke bedrijven (zoals netwerkbedrijven) tot nader orde mogen deelnemen aan projecten voor de ontwikkeling van ondergrondse opslagfaciliteiten. Daarbij moet voor private partijen investeringsruimte blijven bestaan en moet vrije toegang tot ondergrondse faciliteiten worden geregeld, want de overheid houdt er rekening mee, dat op termijn voldoende concurrentie kan ontstaan bij de ontwikkeling van grootschalige opslagfaciliteiten. Vanaf dat moment is geen bemoeienis van publieke bedrijven meer nodig. Ook anderen zien op langere termijn voldoende concurrentie ontstaan (Ministerie van EZK, 2022), omdat meer cavernes beschikbaar komen, opslag in gasvelden een optie kan worden en omdat bovengrondse opslag in tanks (in de vorm van derivaten) zal gaan toenemen[20]. Voor de korte(re) termijn zal deze concurrentie minder groot zijn, omdat (nog) minder geschikte locaties beschikbaar zijn. Marktpartijen verwachten, dat er voldoende interesse vanuit private partijen zal zijn om opslag te ontwikkelen en wijzen erop, dat hier ook voldoende ruimte voor

[20] Volgens de respondenten op de consultatie marktordening, zie de Appreciatie van de reacties

moet zijn. Tegelijkertijd wijzen meerdere partijen op het belang van een betrokken overheid bij het op peil houden van opslagcapaciteit- en volumes (bijvoorbeeld door het aanhouden van een strategische voorraad, zoals bij aardolie).

De gascrisis 2021/2022 laat zien hoe belangrijk het is, dat de overheid kan sturen op de capaciteit en inzet van opslag- en importfaciliteiten. Daarvoor is publiek eigendom van een deel van de beschikbare capaciteit noodzakelijk. Daarom wil de minister publieke netwerkbedrijven de mogelijkheid geven om ondergrondse opslagfaciliteiten en importterminals voor waterstof te ontwikkelen en te beheren, net als bij aardgas het geval is (Ministerie EZK, 2022).

Marktkenmerken

Wat betreft de marktkenmerken (Tabel 2.1) is (of lijkt) waterstof homogeen. Van belang is momenteel de locatie, waar de waterstof gekocht is. Dat kan in de toekomst veranderen, als een goede transportinfrastructuur is ontwikkeld[21]. Het bestaan van een goede infrastructuur en beschikbaarheid van opslagcavernes is ook van belang voor vrije toe- en uittreding. Dit kenmerk is problematisch, want voor de opslag in de ondergrond worden eisen gesteld aan kennis en ervaring met beheer van ondergrondse opslagcavernes en aan de financiële positie van opslagbedrijven. Een partij kan nu investeren in cavernes, maar als vervolgens blijkt dat de markt tegen valt, dan kan die partij haar investering niet of (beperkt, bijvoorbeeld voor persluchtopslag) terugverdienen door de caverne weer te verkopen.

De toetreding tot de opslagmarkt is zelfs nog ingewikkelder om twee geografische redenen. De eerste reden betreft besluitvorming over waar cavernes komen en hoe ze aangesloten worden op het transportnet. Dat vereist een zorgvuldig omgevingsproces (Ministerie EZK, 2022, p. 4). De tweede reden betreft de vraag of bij opschaling van de opslagcapaciteit per locatie meerdere aanbieders actief gaan zijn. Dat is van belang, omdat het aantal locaties, waar grootschalige waterstofopslag mogelijk is, beperkt is (Ministerie van I en W en Ministerie EZK, 2018). Alle opslagcavernes in een caverneveld kunnen bij één partij terecht komen met kennis en ervaring met beheer van ondergrondse opslagcavernes in Nederland (momenteel is dat Nobian), of door allemaal verschillende partijen worden gebruikt (zoals nu in Epe in Duitsland het geval is). Als nieuwe partijen toetreden tot de nationale of regionale markt[22], kan zowel de zoutmarkt als de waterstofopslagmarkt daarvan profiteren. Bij uitblijven van nieuwe partijen wordt het ontstaan van een geconcentreerde zout/opslagmarkt (met weinig spelers) juist versterkt.

2.4 Marktfalen

De vraag is waarom de markt er niet zelf voor kan zorgen, dat er voldoende opslagcavernes voor waterstof komen. Meer specifiek: als er synergie is met zoutwinning, zouden marktpartijen van dat synergievoordeel gebruik kunnen maken om te anticiperen op de behoefte aan waterstofopslag. Waarom doen ze dat niet?

[21] https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2022-23561.pdf; Waterstofnetwerk Noordzeekanaalgebied, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Staatscourant 8 september 2022

[22] Onduidelijk is nog of de opslagmarkt een Nederlandse, Noordwest-Europese of Europese markt wordt (Bijlage 9.1). Dat zal onder andere afhangen van de transportcapaciteit en verschillen in vraag en aanbodpatronen, en de locaties, waar opslag (of andere vormen van flexibiliteit) wordt gerealiseerd.

Transactiekosten & coördinatie
De waterstofopslagmarkt is een deel van de markt voor waterstof, die als geheel onzeker is: veel ontwikkelingen en projecten hebben verschillende doorlooptijden en moeten tegelijk klaar zijn. Daar durven investeerders in afzonderlijke projecten zich (nog) niet aan te branden; hun rendement hangt af van het tijdig gereedkomen van andere projecten, waar ze geen grip op hebben[23]. Dit gaat om projecten rond productie, opslag, transport en gebruik. Alle partijen bij elkaar brengen en zorgen, dat de investeringen en plannen gecoördineerd zijn en op elkaar aansluiten is ondoenlijk. Als de markt dit zelf moet doen, zorgt het voor hoge transactiekosten[24]. Dit type falen staat ook wel bekend als het hold-up probleem (Rli, 2021) en is van toepassing op de aanleg van waterstofopslagen (zie Tekstblok 2.1).

Ondernemersbelang bij schaarste
Als een concurrent eerder investeert, dan is er al een opslag en verslechtert het verdienmodel om te investeren in een extra opslag (paragraaf 2.2). Daardoor is laat instappen onaantrekkelijk en dat zou vroeg investeren moeten bevorderen. Anderzijds heeft elke eigenaar/beheerder van opslagcavernes belang bij schaarste in de markt. Kunstmatig schaarste creëren[25] mag niet, maar terughoudend investeren kan wel. En zolang de ontwikkeling van de waterstofmarkt onzeker blijft (wellicht tot na 2030, zie Tabel 1.1) kan laat en weinig investeren voor een investeerder weleens aantrekkelijker zijn dan tijdig en ruim.

Overheidsfalen
Overheden kunnen ingrijpen in markten om korte termijndoelen te realiseren[26]. Bijvoorbeeld onder druk van sectoren of consumenten(organisaties), die een stabiele levering willen tegen betaalbare prijzen, ongeacht de omstandigheden. De huidige gascrisis in Europa laat zien, dat de roep om regulering daadwerkelijk kan leiden tot ingrijpen in prijzen en afromen van de winsten van energiebedrijven[27]. De kans hierop[28] vergroot het risico voor de investeerder: ze anticiperen op strenge prijscontroles in de toekomst en zijn daardoor minder geneigd om te investeren (zie Tekstblok 2.1). Dit reguleringsrisico is extra van belang voor de ontwikkeling van waterstofopslagcapaciteit om twee redenen. De eerste reden is de huidige onzekerheid over de behoefte aan opslagcavernes (Tabel 1.1), inclusief coördinatieproblemen met andere onderdelen van de waterstofketen (productie, transport, vraag; RVO, 2022). De tweede reden is de lange investeringshorizon vanwege de doorlooptijd voor de ontwikkeling van opslagcavernes (Bijlage 9.2).

---

[23] Gasunie (100 % staatseigendom) heeft als enige Nederlandse partij geïnvesteerd in opslagcavernes. Zij geven aan, dat hun investeringen economisch moeten renderen, waardoor ze pas (grootschalig) in caverneopslag voor waterstof kunnen investeren als ze klanten hebben (Kuijlman, 2022).
[24] Precies om deze reden investeert de overheid momenteel in de aanleg van de infrastructuur voor waterstof (https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2022-23561.pdf; Waterstofnetwerk Noordzeekanaalgebied, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Staatscourant 8 september 2022), net als indertijd voor de infrastructuur van aardgas en recenter voor wind op zee.
[25] dat wil zeggen bestaande flexibiliteitsoplossingen niet gebruiken
[26] hoewel markten efficiëntere uitkomsten realiseren dan overheden, zie ook (Mulder, et al., 2006; Cretì, et al., 2009).
[27] https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/koopkracht/plannen-kabinet-met-prijsplafond-voor-gas-en-elektriciteit
[28] De overheid kan niet nu vastleggen, dat er in de toekomst niet gereguleerd gaat worden voor waterstofopslag.

Eigendomsverhoudingen
Momenteel zijn de eigendomsverhoudingen van opslagcavernes niet afdoende geregeld. De partij, die een caverne loogt, heeft nu juridisch gezien niet het recht om daar ook een opslagcaverne te vestigen (vergunningverlening voor zoutwinning en opslag worden apart geregeld). Deze marktordening verlaagt de prikkel voor een zoutwinner om opslagcavernes aan te leggen als volgt.

De bestaande opslagcavernes (niet voor waterstof) zijn tot stand gekomen doordat in een vroeg stadium van de zoutwinning er een overeenkomst is gesloten tussen de zoutwinner en het beoogde opslagbedrijf[29]. Daarbij kunnen zoutwinner en opslagbedrijf dezelfde bedrijven zijn, of dezelfde moedermaatschappij hebben. Als de zoutwinner tevens optreedt als beheerder voor de gasopslag is meteen aan de eis van een capabele uitvoerder voldaan voor de huidige Mijnbouwwet zonder dat de aansprakelijkheid aan een andere partij moet worden overgedragen. Het opslagbedrijf hoeft niet dezelfde te zijn als de partij, die feitelijk gebruik gaat maken van de opslagfaciliteit[30]. Maar de synergie is beperkt tot de vroege zoutwinningsfase, dus er moet vooruit worden geïnvesteerd in de aanleg van opslagcavernes. En in de komende jaren (tot na 2030) zijn er waarschijnlijk weinig tot geen beoogde opslagbedrijven in beeld vanwege de onzekerheid over de behoefte aan opslagcavernes (Tabel 1.1) en het daaruit voortvloeiende gebrek aan klanten. Met andere woorden, in deze situatie zullen opslagcavernes alleen worden gerealiseerd als zoutwinners op eigen initiatief en risico investeren. En dat roept vragen op: kunnen ze het risico dragen, willen ze het risico dragen (verdienen ze er in de toekomst genoeg mee), hebben ze voldoende ze kennis over opslag en waterstof[31] en is het vanuit het oogpunt van vrije mededinging (Tabel 2.1) wenselijk om beide markten op deze manier met elkaar te verknopen[32]?

Onderliggende oorzaken
Drie van de vier vormen van marktfalen (coördinatieprobleem, ondernemersbelang bij schaarste en overheidsfalen) vloeien voort uit twee onderliggende oorzaken. De eerste daarvan is de onzekerheid over de toekomstige behoefte aan opslagcavernes (Tabel 1.1). Dit raakt het coördinatieprobleem (omdat projecten met verschillende opdrachtgevers en doorlooptijden tegelijk klaar moeten zijn om de hele waterstofketen te laten werken) en het ondernemersbelang bij schaarste (verwachte schaarste hangt mede af van de onzekere ontwikkeling van de groene waterstofmarkt). De tweede onderliggende oorzaak betreft de lange investeringshorizon, waar investeerders tegenaan kijken. Dit is vervlochten met overheidsfalen (vanwege de toenemende kans op toekomstige, strenge prijscontroles) en met eigendomsverhoudingen (omdat de synergie met de zoutmarkt beperkt is tot de vroege zoutwinningsfase).

[29] waarin de fasering, geometrie en het aantal van de opslagcavernes wordt bepaald
[30] Zo is bijvoorbeeld Gazprom eigenaar van het gas in de Bergermeergasopslag (zowel het kussengas als het werkgas), maar Taqa is de operator en tevens de voormalige gaswinner
[31] Nobian is geïntegreerd met HyCC, grootste producent van groene waterstof
[32] Er is een gerede kans, dat de nu grootste zoutwinner uiteindelijk het grootste waterstofopslagbedrijf wordt in de toekomst (wat niet garandeert, dat er maatschappelijk gezien voldoende opslagcavernes zullen worden aangelegd)

2.5 Bevindingen

In dit hoofdstuk hebben we meerdere vormen van marktfalen op de zout- en waterstofopslagmarkt besproken. Een deel vraagt om een ander type beleidsinterventie dan waar wij ons in dit onderzoek op richten. Een ander deel is relevant voor onze onderzoeksvraag en wordt op hoofdlijnen veroorzaakt door:

I. Onzekerheid over de toekomstige behoefte aan opslagcavernes;
II. Een lange investeringshorizon;
III. De eigendomsverhoudingen tussen de zout- en opslagmarkt.

In combinatie zorgen punt 1 en 2 ervoor, dat nu investeren in cavernes (ondanks de synergie met zoutwinning) weinig aantrekkelijk is; het risico is heel groot, de terugverdientijd heel lang. En als partijen bereid zijn om in deze omstandigheden te investeren, dan is het nog de vraag of hun hoge marges maatschappelijk geaccepteerd worden. En zelfs als een partij bereid is om te investeren, dan kan de huidige marktordening (punt 3) dit in de weg staan.

Daarom kan toetreding tot de waterstofopslagmarkt voor private opslagen ook de komende jaren onaantrekkelijk blijven, terwijl dat voor consumenten en de samenleving als geheel mogelijk wel aantrekkelijk is. Dat maakt het nodig om de waarde van energieopslag voor het energiesysteem mee te wegen bij keuzes over zoutwinning: stel dat de regulering van de zoutwinning de behoefte aan waterstofopslag volgt. Dit is ons uitgangspunt voor het opstellen van beleidsalternatieven in het volgende hoofdstuk.

3 Beleidsalternatieven

In het vorige hoofdstuk hebben we vanuit het perspectief van regulering van de zoutmarkt laten zien, welk marktfalen mogelijk van toepassing is op de aanleg van opslagcavernes. In dit hoofdstuk leiden we af welke beleidsalternatieven de overheid kan nastreven om dit te repareren om in de komende hoofdstukken te kunnen nagaan of dit welvaartsverhogend is (Hoofdvraag 2). Ons uitgangspunt voor de beleidsalternatieven is, dat de behoefte aan energieopslag leidend is en zoutwinning volgend.

3.1 Waterstofopslagcapaciteit

Opslagcapaciteit voor het in balans houden van de vraag en aanbod van waterstof kan binnen het toekomstige waterstofsysteem op meerdere manieren worden gerealiseerd. Ten eerste door de productiecapaciteit van industriële processen, waarin waterstof wordt gebruikt, in de tijd te variëren (de zogenaamde vraagresponse). Een tweede mogelijkheid benut de verbondenheid tussen het waterstofsysteem en het elektriciteitssysteem via conversies[33] door elektriciteit op te slaan als perslucht in opslagcavernes[34] of als bovengrondse batterijopslag[35]. Ten derde kan waterstof rechtstreeks worden opgeslagen (bovengronds in tanks, ondergronds in cavernes of gasvelden). In dit onderzoek nemen we aan, dat al deze manieren van opslag[36] beschikbaar zijn (waarbij we rekening houden met relevante beperkingen).

Waterstofopslag in gasvelden is als technologie nog niet uitontwikkeld. Deze technologie kan de aantrekkelijkheid van waterstofopslag in cavernes beïnvloeden (Bijlage 9.3), al blijft de haalbaarheid onduidelijk totdat in Nederland een demonstratieproject gerealiseerd is. Omdat deze technologieontwikkeling parallel loopt aan de eventuele aanleg van opslagcavernes, nemen we dit mee in de gevoeligheidsanalyse en niet als apart alternatief.

[33] elektriciteit → waterstof en waterstof → elektriciteit
[34] Compressed Air Energy Storage (CAES)
[35] bijvoorbeeld Li-ion
[36] Een nieuwe ontwikkeling is *redoxflow*. Daarbij worden twee cavernes gezamenlijk gebruikt als een soort batterij. Deze technologie heeft op dit moment nog een lage *technology readiness level* en hebben we daarom in dit onderzoek niet meegenomen. Op termijn zou redoxflow in cavernes een attractief alternatief voor CAES kunnen zijn. Het is geen echt alternatief voor grootschalige waterstofopslag vanwege de lage opslagcapaciteit (meer dan drie ordes kleiner).

3.2 Nulalternatief

In het nulalternatief voert de Nederlandse overheid geen bijzonder beleid om de aanleg van ondergrondse opslagen voor waterstof te stimuleren. En hoewel marktpartijen waarschijnlijk onvoldoende prikkels of mogelijkheden hebben om daar in de komende periode grootschalig in te investeren (zie Hoofdstuk 2), nemen we aan dat de markt in die periode 5 *standaard* opslagcavernes (Bijlage 9.4) voor opslag van waterstof realiseert door ombouw van bestaande opslagcavernes voor aardgas[37]. Zodoende onderscheiden de beleidsalternatieven zich van het nulalternatief in de aanleg van *extra* opslagcavernes.

3.3 Beleidsalternatieven

Een belangrijke capaciteitsbeperking voor ondergrondse waterstofopslag in het toekomstige waterstofsysteem is een bovengrens van maximaal 60 opslagcavernes aan het aantal opslagcavernes, dat tot 2050 gerealiseerd kan worden (TNO & EBN, 2018; TNO & EBN, 2021; TNO & EBN, 2022). Voor deze bovengrens zijn twee aspecten meegenomen, namelijk het geologische potentieel voor de aanleg van opslagcavernes in de Nederlandse ondergrond en het tempo, waarin nieuwe opslagcavernes kunnen worden gerealiseerd. Er is geologisch gezien voldoende potentieel. Het theoretisch potentieel op land en zee ligt respectievelijk rond de 300 en 700 opslagcavernes (TNO & EBN, 2018, 2021 & 2022). Daarbij blijft onzeker of en waar nieuwe opslagcavernes daadwerkelijk kunnen worden gerealiseerd als ook rekening wordt gehouden met alle andere randvoorwaarden; naast juridische en economische voorwaarden betreft dat met name veiligheidsaspecten (Hoofdstuk 5). De beperking zit dus in het aanlegtempo; als we uitgaan van een optimale synergie met de zoutmarkt (conform paragraaf 2.5) komen we tot een bovengrens van maximaal 60 nieuwe opslagcavernes in 2050 (zie Bijlage 9.5).

Daarom hanteren we in dit onderzoek twee beleidsalternatieven, die onderling verschillen in de beschikbaarheid van opslagcapaciteit voor het toekomstige Nederlandse waterstofsysteem. Bovenop de opslagcapaciteit in het nulalternatief kan tussen 2030 en 2050 een extra capaciteit worden gerealiseerd tot 30 of 60 standaard opslagcavernes in respectievelijk alternatief 1 en 2. Het jaar 2030 hebben we genomen als *vroegst mogelijke startdatum* voor het logen van 30 opslagcavernes, omdat de voorbereiding daarvan de nodige tijd vraagt (Bijlage 9.2). Beide alternatieven lichten we hieronder nader toe.

3.4 Alternatief 1

In dit alternatief voert de Staat beleid om de aanleg van ondergrondse opslagen te stimuleren, waardoor marktpartijen voldoende prikkels of mogelijkheden zien om daarin te investeren. Het jaar 2030 hebben we genomen als *vroegst mogelijke startdatum* voor het logen van extra opslagcavernes, omdat de voorbereiding daarvan de nodige tijd vraagt (Bijlage 9.2). Daarbij nemen we aan, dat de markt 30

[37] In de locatie Zuidwending worden momenteel 5 cavernes ingezet voor de opslag van aardgas. We gaan ervan uit, dat deze cavernes voor 2050 kunnen worden omgebouwd voor waterstofopslag. Deze optie wordt momenteel in Etzel (Duitsland) onderzocht. Daarnaast is er één ongebruikte opslagcaverne, die ook kan worden ingezet. Binnen de bestaande opslagvergunning kunnen nog vier cavernes worden geloogd. Eén hiervan is meegeteld. De cavernes in Zuidwending zijn kleiner (730.000 m^3) dan de standaard opslagcaverne. Dit maakt dat er slechts 5,11 miljoen m^3 opslagcapaciteit (in de vorm van cavernes) beschikbaar is in het nulalternatief.

standaard opslagcavernes kan realiseren bovenop het nulalternatief. De overheid kan kiezen tussen 7 varianten voor de ontwikkeling van opslagcavernes, die verschillen in de mate van synergie met de zoutmarkt.

A Binnen huidig vergunningsgebied
Het geschatte geologisch potentieel wordt *uitsluitend* benut voor de aanleg van 30 opslagcavernes. Daarvoor zullen nieuwe of aangepaste winningsplannen plus opslagplannen en opslagvergunningen moeten worden aangevraagd om na te gaan of 30 opslagcavernes geologisch, maatschappelijk en ruimtelijk (inclusief bovengrondse faciliteiten) ingepast kunnen worden. De zoutproductie blijft op het huidige niveau en binnen de huidige vergunningen.

B Extra winning op land
Het huidige totale productieniveau van 6 miljoen ton zout per jaar wordt opgeschaald tot 9 miljoen ton zout per jaar. Dat creëert ruimte voor 30 opslagcavernes op land, terwijl alle bestaande zoutwinningsvergunningen op hun huidige niveau blijven door produceren (zonder opslagcavernes aan te leggen). Hiervoor wordt geïnvesteerd in het exploreren en ontwikkelen van nieuwe zoutvoorkomens (Bijlage 9.5) en de capaciteit van de bestaande pekelverwerkende installaties zal moeten worden opgeschaald of aangevuld met nieuwe pekelverwerkende installaties.

Om deze investeringen te onderbouwen zijn twee randvoorwaarden van toepassing. Als eerste moeten de spelers op de zoutmarkt zicht hebben op een lange-termijn verdienmodel, waarmee de investering economisch kan worden afgedekt (Hoofdstuk 2). Ook moeten alle belanghebbenden (omwonenden, overheden, etc.) erop kunnen vertrouwen, dat deze uitbreiding van de zoutwinning plaats vindt op veilige en verantwoorde wijze (zie ook paragraaf 1.2, Hoofdstuk 5).

C Verplaatste winning op land
Door de bestaande zoutwinning in voor opslag ongeschikte vergunningsgebieden voortijdig stop te zetten en deze te verplaatsen naar voorkomens op land, die geschikt zijn voor zowel zoutwinning[38] als voor de aanleg van opslagcavernes, kunnen 30 opslagcavernes worden gerealiseerd.

Dit vergt extra investeringen door de betreffende zoutproducenten in de exploratie van nieuwe gebieden (Bijlage 9.2) en verplaatsing van zoutverwerkingsinstallaties[39] of de aanleg van pijpleidingen naar bestaande zoutverwerkingsinstallaties, terwijl het zoutproductieniveau (en daarmee de opbrengsten) gelijk blijft.

D Uitbreiding op land met pekellozing
Hier wordt ruimte gecreëerd voor de aanleg van 30 opslagcavernes op land, waarbij de pekel in zee wordt geloosd. Voor deze variant moet wet- en regelgeving worden aangepast, omdat het nu wettelijk verplicht is om een gewonnen delfstof nuttig te gebruiken en in Nederland het zout daarom niet geloosd mag worden[40].

---

[38] waarbij het zout aan specifieke eisen van samenstelling moet voldoen vanwege de toepassingen in de markt
[39] Zo rendabel mogelijk betekent waarschijnlijk het slopen van bestaande installaties om elders nieuwe installaties te bouwen, eventueel met hergebruik van materialen.
[40] in Duitsland mag dit wel, zie Bijlage 9.6

Vanwege het lozen staan er geen zoutopbrengsten tegenover de ontwikkel- en aanlegkosten en moet ook een en ander worden uitgezocht op milieugebied. Dit betekent investeren in de benodigde zuiverings- en lozingsinfrastructuur en in het ontwikkelen van nieuwe locaties (de capaciteit van de bestaande, pekelverwerkende installaties hoeft niet te worden uitgebreid). Een nadeel is, dat meer putten geboord worden voor eenzelfde hoeveelheid opslagcavernes (in vergelijking met de andere varianten[41]).

Deze variant biedt de snelste route voor de aanleg van opslagcavernes[42] doordat opslagcavernes pas geloogd hoeven worden als er vraag naar is. Dit vermindert het risico op de aanleg van cavernes, die later toch niet nodig of rendabel blijken.

De benodigde wettelijke aanpassingen maken de vergunningverlening lastig(er) te realiseren. Wij schatten in dat - mocht deze variant maatschappelijk gezien wenselijk zijn - dit binnen de hier onderzochte tijdshorizon (tot 2030) mogelijk is.

E Extra winning op zee
Het huidige, totale productieniveau van 6 miljoen ton zout per jaar wordt opgeschaald tot 9 miljoen ton zout per jaar. Dat creëert ruimte voor 30 opslagcavernes in de ondergrond onder de zeebodem.

Er wordt geïnvesteerd in het exploreren en ontwikkelen van nieuwe voorkomens (Bijlage 9.5), er worden pijpleidingen aangelegd om de pekel naar land te brengen en de capaciteit van de bestaande installaties zal moeten worden opgeschaald of aangevuld. Op zee zijn de ontwikkel- en aanlegkosten hoger. Mogelijk is de vergunningverlening eenvoudig(er) te realiseren.

F Verplaatste winning op zee
Door de bestaande zoutwinning in voor opslag ongeschikte vergunningsgebieden voortijdig stop te zetten en deze te verplaatsen naar voorkomens op zee, die geschikt zijn voor zowel zoutwinning[43] als voor de aanleg van opslagcavernes (Bijlage 9.5), kunnen 30 opslagcavernes worden gerealiseerd. Dit vergt extra investeringen van de betreffende zoutproducenten in exploratie (Bijlage 9.3), pekelleidingen en verwerkingsinstallaties, terwijl het zoutproductieniveau gelijk blijft. Op zee zijn de ontwikkel- en aanlegkosten hoger. Mogelijk is de vergunningverlening daar eenvoudig(er) te realiseren.

G Uitbreiding op zee met pekellozing
Er wordt ruimte gecreëerd voor 30 opslagcavernes op zee, waarbij de pekel in zee wordt geloosd. Door het lozen staan er geen zoutopbrengsten tegenover de ontwikkel- en aanlegkosten. Deze handelingsmogelijkheid lijkt sterk op variant D, wel zullen de kosten anders zijn.

[41] In variant D staat de aanleg los van de reguliere zoutwinning, waarvoor ook putten nodig zijn.
[42] Er kan letterlijk sneller geloogd worden. Immers, als er geen afhankelijkheid bestaat van de capaciteit van de pekelverwerkende industrie en de vraag naar zout doet de pekelkwaliteit er niet toe (afgezien van de milieueisen bij lozing).
[43] waarbij het zout aan specifieke eisen van samenstelling moet voldoen vanwege de toepassingen in de markt

3.5 Alternatief 2

Ook in dit alternatief voert de Staat beleid om de aanleg van ondergrondse opslagen te stimuleren, waardoor marktpartijen voldoende prikkels of mogelijkheden zien om daarin te investeren. We nemen aan, dat de markt in die periode tot 60 standaard opslagcavernes kan realiseren bovenop het nulalternatief (Bijlage 9.5). Bovenop de 30 extra opslagcavernes in alternatief 1, worden dus nogmaals (tot maximaal) 30 extra opslagcavernes gerealiseerd. Voor de aanleg hiervan zijn er praktisch gezien 6 varianten beschikbaar van de 7 hierboven beschreven varianten (het is niet mogelijk om nogmaals 30 extra opslagcavernes aan te leggen binnen het huidige vergunningsgebied). Dit levert in totaal 42 potentiële combinaties op, zodat we ons in alternatief 2 beperken tot het analyseren van twee hoekpunten en een midden oplossing (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Overzicht van alternatieven met varianten. De varianten, die we in dit onderzoek nader analyseren zijn weergegeven in witte letters met een zwarte achtergrond. Dat betreft de combinatie met de laagste kosten (A Binnen huidig vergunningsgebied + B Extra winning op land), de combinatie met de hoogste kosten (E Verplaatste winning op zee + F Extra winning op zee) en een combinatie van aanleg op land en op zee (A Binnen huidig vergunningsgebied + F Extra winning op zee).

Alternatief 1	**Alternatief 2**					
Handelingswijze	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**
A	AB	AC	AD	AE	AF	AG
B	BB	BC	BD	BE	BF	BG
C	CB	CC	CD	CE	CF	CG
D	DB	DC	DD	DE	DF	DG
E	EB	EC	ED	DE	EF	EG
F	FB	FC	FD	FE	FF	FG
G	GB	GC	GD	GE	GF	GG

4 Waterstofsysteemkosten en -baten

In dit hoofdstuk berekenen we met het nationaal energiesysteemmodel[44] de kosten van het Nederlands energiesysteem voor twee energiescenario's met uiteenlopende waterstofvraag tot 2050. Voor beide scenario's berekenen we de systeemkosten zonder en met de mogelijkheid om waterstof op te slaan in extra opslagcavernes (respectievelijk het nulalternatief en alternatief 2). Vervolgens gebruiken we alternatief 1 om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren.

4.1 Nationaal energiesysteemmodel

We gebruiken in dit onderzoek het OPERA-model. Dit model bestrijkt het volledige Nederlandse energiesysteem[45] en is een optimalisatiemodel: het model rekent het energiesysteem en de bijbehorende emissies uit tegen de laagste maatschappelijke kosten, gegeven bepaalde doelen (bijvoorbeeld een broeikasgasreductiedoel) en randvoorwaarden (bijvoorbeeld de maximaal beschikbaar potentieel voor productie van wind- en zonne-energie). Hierbij wordt gebruik gemaakt van de nationale kosten-batenanalysemethode (Hof, et al., 2020). Bij het toepassen van een broeikasgasreductiedoel worden naast CO_2 ook niet-CO_2 broeikasgassen beschouwd, zoals methaan-en lachgasemissies[46]. Het energiesysteem en de kosten daarvan worden berekend voor een bepaald zichtjaar. Bij bepalen van investeringen wordt rekening gehouden met investeringen, die gedaan zijn in voorgaande jaren. Daarbij houdt het model rekening met energie-uitwisseling met het buitenland, met pieken en dalen van vraag en aanbod van energie en er wordt rekening gehouden met beperkingen in energietransport tussen verschillende regio's in Nederland.

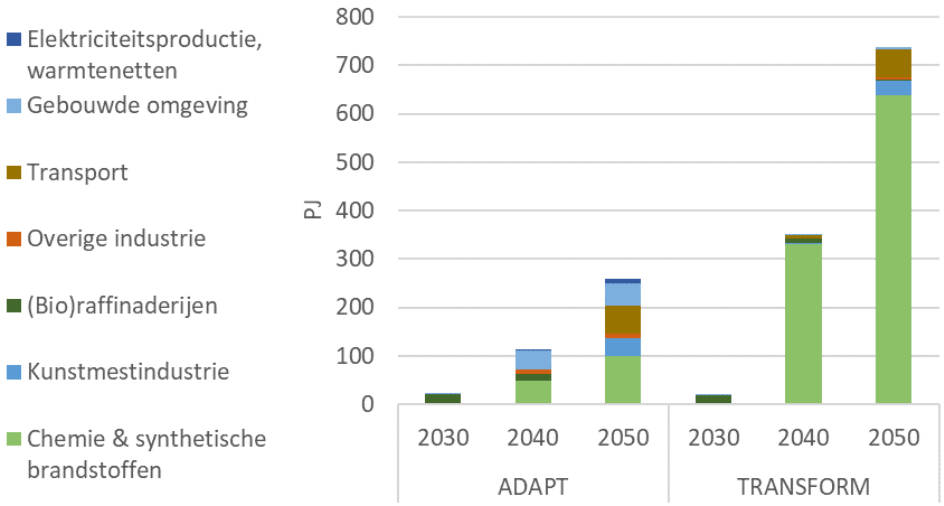
4.2 Energiescenario's & waterstofvraag

De energiesysteemkosten zijn berekend tegen de achtergrond van twee scenario's (Tekstblok 4.1), die leiden tot een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland in 2050 (Scheepers, 2022). Hoewel in beide scenario's de reductiedoelstellingen voor broeikasgassen gerealiseerd worden, is het TRANSFORM-scenario in vergelijking met het ADAPT-scenario ambitieuzer bij het verduurzamen van de productie van chemicaliën, kunststoffen en brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart. Dit leidt tot een waterstofvraag, die in 2050 voor TRANSFORM bijna drie keer hoger is dan voor ADAPT (Figuur 4.1).

In beide scenario's wordt de meeste waterstof geproduceerd uit hernieuwbare elektriciteit (groene waterstof). Het grootste deel van de waterstofproductie vindt in 2050 plaats op platforms nabij windparken op zee, waarbij deze waterstof via

[44] Ten opzichte van de scenariostudie (Scheepers, 2022) zijn enkele aanpassingen gemaakt. Om de behoefte aan opslagcapaciteit goed te kunnen bepalen is een hogere tijdsresolutie toegepast, maar is geen onderscheid naar regio's gehanteerd. Daarnaast zijn de scenario's doorgerekend met tijdstappen van 10 jaar t.o.v. 5-jaarsstappen in de oorspronkelijke scenariostudie. De aannames m.b.t. techno-economische parameters voor waterstofopslag in zoutcavernes zijn voor deze studie geactualiseerd naar de laatste inzichten.
[45] Dat wil zeggen, de sectoren energieproductie, industrie, transport, gebouwde omgeving, agrarische sector, bunkerbrandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart en het niet-energetisch gebruik van koolwaterstoffen.
[46] inclusief de emissies voor landgebruik

pijpleidingen naar land wordt getransporteerd. Hoewel waterstofproductie ook kan plaatsvinden bij industriële processen, wordt die optie vanwege hogere kosten minder ingezet. Door de fluctuerende productie van windenergie varieert ook de waterstofproductie. De waterstofvraag heeft een veel constanter profiel. Om waterstofaanbod en -vraag te balanceren wordt waterstof bovengronds (in tanks) of ondergronds (in opslagcavernes) opgeslagen. In de scenario's is geen waterstofimport verondersteld. Zou de waterstofvraag (deels) door middel van import worden gedekt, dan zal de behoefte aan waterstofopslag kleiner zijn (aangezien het aanbod uit import een vlak profiel heeft). Scenario's zonder waterstofimport geven dus een bovengrens voor de behoefte in de waterstofmarkt aan opslagcapaciteit.



Figuur 4.1 Waterstofverbruik in 2030 tot 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's. De grafiek geeft de waterstof weer, die extern kan worden geleverd en is exclusief de waterstof, die ontstaat en wordt gebruikt binnen chemische processen.

Tekstblok 4.1 Toekomstscenario's voor verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem. In beide scenario's wordt in 2030 gestreefd naar 55% reductie van broeikasgasemissies en in 2050 naar broeikasgasneutraliteit.

In het ADAPT-scenario bouwt de Nederlandse economie voort op de bestaande sterktes met behoud van de huidige levensstijl, maar met een aanzienlijke vermindering van de broeikasgasuitstoot. Het huidige systeem wordt aangepast en geoptimaliseerd, terwijl de impact op energiegebruikssectoren relatief beperkt is. De mobiliteitsvraag en ook de industriële productie blijven groeien. Voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de broeikasgasemissies buiten de nationale doelstelling vallen, wordt gestreefd naar een halvering van de broeikasgasemissies. In dit scenario zijn geen grote maatschappelijke bezwaren tegen gebruik van fossiele brandstoffen in combinatie met CO_2-afvang en -opslag. Ook wordt een ruime import voor biomassa geaccepteerd.

In het TRANSFORM-scenario kiest de Nederlandse samenleving voor een structurele verandering naar een meer duurzame economie, waardoor Nederland minder energie-intensief wordt. Doordat burgers meer milieubewust zijn en daar ook naar handelen, neemt de energievraag af, verandert de mobiliteitsvraag (bijvoorbeeld meer gebruik van openbaar vervoer en fiets) en de vraag naar milieubelastende industriële en agrarische producten (bijvoorbeeld dalende vleesconsumptie). Ook bedrijven nemen initiatieven tot een ambitieuze transformatie door bestaande processen te vervangen door duurzame alternatieven. De industrie wordt minder energie-intensief, er worden zoveel mogelijk gerecyclede en duurzaam verkregen grondstoffen ingezet en een deel van de economische activiteit verschuift naar de dienstensector, die daardoor groeit. Ook leidt de maatschappelijke verandering tot aanpassingen in de agrarische sector, zoals meer duurzame landbouw en minder veeteelt. Voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de broeikasgasemissies buiten de nationale doelstelling vallen, geldt een 95% reductiedoelstelling. CO_2-opslag wordt slechts beperkt toegepast en biomassa wordt vooral ingezet voor toepassingen waarvoor geen alternatieven zijn.

4.3 Beperkte opslagcapaciteit

Opslagcapaciteit voor het in balans houden van de vraag en aanbod van waterstof kan binnen het toekomstige waterstofsysteem op meerdere manieren worden gerealiseerd (zie paragraaf 3.1). In het nulalternatief zijn in 2030 5 standaard opslagcavernes[47] voor waterstofopslag beschikbaar, waarna geen uitbreiding meer plaatsvindt (zie paragraaf 3.2). Door deze capaciteitsbeperking zal het OPERA-model gebruik moeten maken van andere manieren, waaronder opslag in bovengrondse tanks op een druk van 200 bar (Danish Energy Agency, 2018). Ook deze vorm van opslag kent een capaciteitsbeperking[48], want tanks nemen ruimte in doordat veiligheidscontouren in acht genomen moeten worden. Verder kunnen opslagcavernes, die gebruikt worden voor energieopslag in de vorm van perslucht, niet gebruikt worden voor waterstofopslag en andersom. Daarom kunnen in het nulalternatief geen opslagcavernes voor perslucht aangelegd worden (Tabel 4.1).

[47] of 7 cavernes van 700.000 m^3

[48] in ADAPT tot 0,9 PJ (ca. 5800 m^3 geometrisch opslagvolume) aangesloten op de hoge druk pijplijn (backbone) en 0,3 PJ (ca. 1900 m geometrisch opslagvolume) aangesloten op het waterstofdistributienet. Voor het TRANSFORM scenario zijn iets hogere waarden voor de maximale bovengrondse opslagcapaciteit aangenomen, resp. 1,5 PJ en 0,5 PJ.

Tabel 4.1 Overzicht van het aantal cavernes en de beschikbare opslagcapaciteit, die in de verschillende zichtjaren maximaal kunnen worden ingezet voor opslag (voor waterstof of perslucht).

	Nulalternatief			Alternatief 1			Alternatief 2		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
# zoutcavernes (nulalternatief)[a]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
# zoutcavernes (alternatief 2)[b]	-	-	-	-	15	30	-	30	60
Opslagcavernes miljoen m^3 geometrisch	5,11	5,11	5,11	5,11	20,1	35,1	5,11	35,11	65,11
Potentieel voor waterstofopslag, cumulatief[c] in PJ	4,6	4,6	4,6	4,6	18,4	31,6	4,6	31,6	58,6
Potentieel voor energieopslag in de vorm van perslucht, cumulatief[d] in PJ	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,7	0,1	0,7	1,2

[a] of 7 cavernes van 730.000 m^3 geometrisch per zoutcaverne
[b] 1000.000 m^3 geometrisch per zoutcaverne
[c] 183 GWh voor een caverne van 730.000 m^3 en 250 GWh voor een caverne van 1000.000 m^3
[d] 5,3 GWh per miljoen m^3 geometrisch

4.4 Opslagcavernes

Een belangrijke invoer voor het OPERA-model zijn de kosten voor de aanleg en het in bedrijf brengen per opslagcaverne met alle kosten, die daarbij kunnen komen kijken. Deze zijn per variant weergegeven in Tabel 4.2 op grond van de onderbouwing in Bijlage 9.7. Afhankelijk van de gekozen variant lopen deze kosten uiteen (in alternatief 1 van € 200 miljoen tot krap € 1695 miljoen en in alternatief 2 van € 580 miljoen tot € 3.370 miljoen[49]).

Om te functioneren als opslag heeft een eenmaal aangelegde opslagcaverne kussengas nodig. Een standaard opslagcaverne (volgens de definitie in Bijlage 9.4) bevat circa 75 miljoen m^3 waterstof als kussengas ofwel 6,75 miljoen kilo waterstof. Met een richtprijs van 2,7 €/kg kost het kussengas dan ruim € 18 miljoen per caverne. Ook zijn een compressor en expander nodig, ieder met een maximale capaciteit van 2 GW. Een compressor kost 40 miljoen € /GW en een expander 48,5 miljoen € /GW. Deze kosten zijn inclusief het aansluiten van de caverne op de betreffende faciliteiten plus de kosten van gasbehandeling. Deze kosten variëren niet of nauwelijks tussen de varianten en worden bovendien alleen gemaakt als een (eerder aangelegde) opslagcaverne daadwerkelijk gebruikt gaat worden voor opslag.

[49] waarbij de kosten voor de combinatie van varianten A en F in alternatief 2 € 1.875 miljoen zijn

Tabel 4.2 Kosten per variant ten opzichte van het nulalternatief (aanleg 30 opslagcavernes met put, bedragen × € miljoen). Varianten: A Binnen huidig vergunningsgebied, B Verplaatste winning op land, C Extra winning op land, D Op land met pekellozing, E Verplaatste winning op zee, F Extra winning op zee, G Op zee met pekellozing.

	A	B	C	D	E	F	G
kosten cavernes	180	180	180	180	360	360	360
exploratie en vergunningen	20	100	100	100	125	125	125
vergunningskosten betaald uit de zoutopbrengst			-100			-100	
zoutverwerkingsfabriek verwerkingsinstallatie		100	100		100	100	
betaald uit zoutopbrengst			-100			-100	
pekelleiding				100	400	400	
verschil marktwaarde en kosten uitbreiding winning			180			180	0
uitloogkosten				155			155
onderzoek naar lozen				10			10
aanleg waterstofleiding van zee naar land					140	140	140
satellietplatforms					150	150	150
Waterstofleiding van en naar opslag op zee					560	560	560
totaal (niet verdisconteerd)	**200**	**380**	**360**	**545**	**1695**	**1675**	**1360**

4.5 Modelresultaten

In deze paragraaf presenteren we een aantal relevante resultaten uit onze OPERA berekeningen.

Toepassing van waterstof

Het OPERA-model bepaalt door middel van kostenoptimalisatie welke hoeveelheid waterstof waarvoor wordt gebruikt. In de huidige situatie wordt waterstof vooral gebruikt in olieraffinaderijen. Richting 2050 zal waterstof in toenemende mate een rol gaan spelen als grondstof en energiedrager in de industrie naast gebruik voor zwaar wegtransport en als distributiegas (zie Figuur 4.1). De rol van opslag zal in eerste instantie gericht zijn op het afstemmen van variabel aanbod op een min of meer constant vraagprofiel binnen de industrie.

Benodigde opslagcapaciteit

Het OPERA-model bepaalt door middel van kostenoptimalisatie welke hoeveelheid opslagcapaciteit voor waterstof nodig is, zowel boven als ondergronds (Tabel 4.3). In het nulalternatief is in beide scenario's in 2030 1 caverne nodig voor waterstofopslag en vanaf 2040 zijn dat er 7 (het maximale aantal). In het alternatief 2 zijn in het ADAPT-scenario in 2040 en 2050 in totaal respectievelijk 11 en 24 cavernes nodig. In 2040 worden 3 cavernes gebruikt voor energieopslag in de vorm van perslucht en de anderen voor waterstofopslag. In 2050 zijn de cavernes voor

perslucht niet meer nodig[50] en worden alle cavernes gebruikt voor waterstofopslag. In het TRANSFORM-scenario is het aantal benodigde cavernes hoger (29 in 2040 en 38 in 2050, waarvan 1 voor perslucht en de anderen voor waterstofopslag). Het maximum aantal van 30 nieuwe cavernes in 2040 en 60 in 2050 wordt niet bereikt.

Tabel 4.3 Resultaten OPERA-berekeningen. Berekende waterstofopslagcapaciteit voor de verschillende zichtjaren, inclusief het benodigde aantal opslagcavernes. In rood is aangegeven waar de maximaal beschikbare capaciteit wordt gebruikt. De bovengrondse waterstofopslag vindt plaats in tanks, die op twee manieren zijn verbonden met het energiesysteem (via pijpleidingen of via het distributienet).

	ADAPT					TRANSFORM				
		Nulalternatief		Alternatief 2			Nulalternatief		Alternatief 2	
	2030	2040	2050	2040	2050	2030	2040	2050	2040	2050
Aantal opslagcavernes	1	7	7	11	24	1	7	7	29	38
• perslucht	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3
• waterstof	0,4	7,0	7,0	7,3	23,2	0,2	7,0	7,0	27,3	36,1
Waterstofvraag	21	102	293	111	330	22	348	729	350	735
Opslagvolume waterstof (PJ)										
• Bovengronds	0,1	0,2	6,3	0,1	0,0	0,3	4,6	65,3	0,0	2,3
• Ondergronds	3,3	40	59	46	100	3,3	66	82	110	187
Opslagcapaciteit waterstof (PJ)										
• Tanks (pijpleidingen)	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	1,5	0,0	0,0
• Tanks (distributienet)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,1
• Ondergrondse waterstofopslag	0,3	4,6	4,6	6,2	20,3	0,1	4,6	4,6	23,2	31,6
Aantal FCE	12	9	13	7	5	23	14	18	5	6

Doordat de kosten voor waterstof voor eindgebruikers in het nulalternatief hoger zijn dan in alternatief 2, is de waterstofvraag in het nulalternatief een fractie lager dan in alternatief 2. In alternatief 2 wordt bovengrondse opslag beperkt benut, terwijl in het nulalternatief (naast de - beperkte - ondergrondse opslagcapaciteit) juist de bovengrondse opslag wordt ingezet voor opslag van waterstof. De omvang hangt af van het scenario: in ADAPT is deze inzet minder dan de maximale capaciteit; in TRANSFORM wordt in 2050 het maximum van 1,5 PJ voor waterstoftanks gebruikt, die zijn aangesloten op hoge druk pijpleidingen[51].

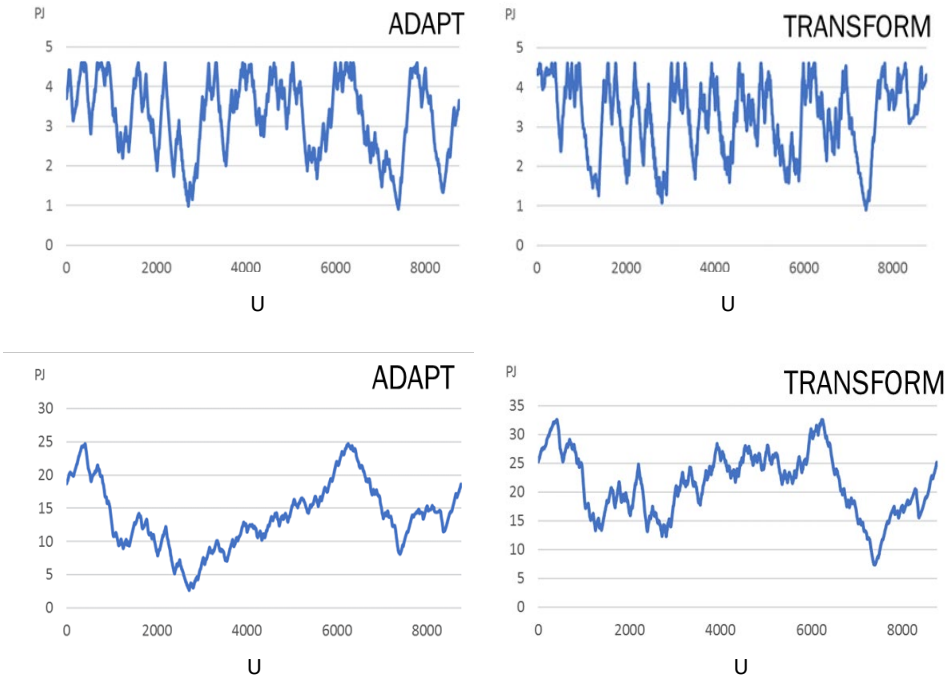
[50] Voor het balanceren van het elektriciteitssysteem zijn andere, goedkopere flexibiliteitsopties beschikbaar gekomen. De CAPEX blijft in de systeemkosten meetellen, omdat voor de energieopslag een levensduur van 30 jaar is verondersteld. Cavernes, die niet langer voor energieopslag d.m.v. perslucht gebruikt worden, kunnen geschikt gemaakt worden voor waterstofopslag.

[51] De inzet van waterstoftanks, die zijn aangesloten op het waterstofdistributienet, blijft met 0,4 PJ net onder het maximum van 0,5 PJ.

Vulgraad opslagcavernes

De wijze waarop de opslagcavernes worden ingezet (inclusief het FCE, zie ook Tekstblok 2.1) verschilt per alternatief (Figuur 4.2). In het nulalternatief zijn het aantal vulcycli per jaar groter, de opslagtermijnen korter en de opslagvolumes kleiner dan in alternatief 2. Met andere woorden, in het nulalternatief functioneert de waterstofopslag meer als een korte-termijn buffer; in alternatief 2 is meer sprake van seizoensopslag.

Figuur 4.2 Vulgraad van de opslagcavernes (in PJ per uur). Situatie in 2050. Bovenste rij is het nulalternatief, onderste rij alternatief 2.[52]



Andere flexibiliteitsopties

De vraag-aanbod balans voor waterstof wordt deels opgevangen door de productiecapaciteit van industriële processen, waarin waterstof wordt gebruikt, in de tijd te variëren. Doordat de productie van chemicaliën wordt aangepast aan het aanbod draaien de productie-installaties voor een deel van de tijd in deellast. Deze vraagrespons vindt zowel in het nulalternatief als in alternatief 2 plaats, maar vaker in het nulalternatief (Tabel 4.4).

[52] We hebben in het model rekening gehouden met beperkingen in de vulgraad van de opslagcavernes, uitgedrukt in een maximaal debiet/dag.

Tabel 4.4 Productievolume, waterstofvraag en gemiddelde benuttingscapaciteit voor methanol- en ammoniakproductie, inclusief de maximaal aanwezig productiecapaciteit. Situatie in 2050.

	ADAPT		TRANSFORM	
	Nul-alternatief	Alternatief 2	Nul-alternatief	Alternatief 2
Methanol[a]				
• Productievolume (Mton/jaar)	0,81	1,34	21,1	21,8
• Waterstofvraag (PJ/jaar)	18	30	490	505
• Gemiddelde benuttingscapaciteit	29%	44%	79%	88%
• Maximale productiecapaciteit (Mton/jaar)	2,79	3,05	26,8	24,7
Ammoniak				
• Productievolume (Mton/jaar)	2,9	2,6	1,3	1,3
• Waterstofvraag (PJ/jaar)	63	57	29	29
• Gemiddelde benuttingscapaciteit	57%	66%	43%	69%
• Maximale productie capaciteit (Mton/jaar)	5,1	4,0	3,1	1,9

[a] geproduceerd uit waterstof en niet-fossiele koolstof

Maatschappelijke baten

In de twee scenario's met een hoge en lage waterstofvraag/productie is het effect van het wel of niet beschikbaar zijn van waterstofopslagcapaciteit in opslagcavernes op de jaarlijkse systeemkosten berekend. Voor het Nederlandse energiesysteem als geheel zijn de jaarlijkse kosten voor het in bedrijf hebben van enkele tientallen opslagcavernes (alternatief 2) maatschappelijk gezien lager dan de jaarlijkse kosten voor een energiesysteem, waarbij deze optie niet ingezet kan worden (nulalternatief; Tabel 4.5). De baten zijn het grootst in het TRANSFORM-scenario.

Tabel 4.5 Maatschappelijke baten voor het energiesysteem bij waterstofopslag in alternatief 2 ten opzichte van nulalternatief.

	ADAPT			TRANSFORM		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Totaal (miljoen €$_{2021}$)	0	4	91	0	246	1.062

4.6 Gevoeligheidsanalyse

Voor het TRANSFORM-scenario hebben we onderzocht in welke mate de uitkomsten worden beïnvloedt door een kleinere beschikbaarheid van opslagcavernes (alternatief 1) en door beperkte vraagresponse (zie paragraaf 4.3).

Minder opslagcavernes

Als de beschikbaarheid van opslagcavernes in het ADAPT-scenario wordt verlaagd van 60 (alternatief 2) naar 30 opslagcavernes (alternatief 1), blijft de berekende kostenbesparing van het waterstofsysteem gelijk; dit is dus geen beperking waar

het energiesysteem last van heeft. In het TRANSFORM-scenario leidt dezelfde verlaging wel tot een aanzienlijke daling van de maatschappelijke baten (in 2040 tot 237 miljoen euro en in 2050 tot 693 miljoen euro). Dit is het gevolg van de toegenomen, jaarlijkse systeemkosten in alternatief 1 ten opzichte van alternatief 2. Het OPERA model compenseert de afname van de ondergrondse opslagcapaciteit (-5% in 2040 en -21% in 2050) door meer bovengrondse opslag en door de productiecapaciteit van industriële processen (waarin waterstof wordt gebruikt) in de tijd te variëren. Dit laat zien, dat in het OPERA model (net als in de werkelijkheid) relatief grote verschuivingen kunnen optreden door relatief kleine veranderingen in de beschikbare waterstofopslagcapaciteit[53].

Beperkte vraagresponse
Vraagresponse wordt vooral gebruikt voor opvangen van korte termijn fluctuaties en daarvoor is bovengrondse opslag een beter alternatief dan ondergrondse opslag[54]. Voor de ontwikkeling van vraagresponse bestaan diverse barrières (Wildt, et al., 2022). Het is daarmee nog onzeker hoe en in welke mate vraagresponse tot ontwikkeling komt. Mocht de vraagresponse niet of minder bijdragen aan de balanshandhaving tussen waterstofvraag en -aanbod, dan zal de behoefte aan waterstofopslag toenemen.

Als we de beschikbaarheid van vraagresponse in het TRANSFORM-scenario beperken, maakt het model meer gebruik van bovengrondse opslag en neemt in 2040 ook het aantal opslagcavernes toe (van 28 naar 33 cavernes). In deze situatie nemen de totale systeemkosten in het nulalternatief sterker toe dan in alternatief 2, waardoor de baten in 2040 uitkomen op 685 miljoen euro (een factor 2,7 hoger dan wanneer vraagresponse wel bijdraagt aan de waterstofbalans).

In het nulalternatief blijkt de bovengrondse opslagcapaciteit in combinatie met de toename van de hoeveelheid waterstof in 2050 onvoldoende om het volledig wegvallen van vraagresponse te kunnen opvangen. Daardoor komt het model niet tot een oplossing en kunnen we geen kostenvergelijking maken met alternatief 2.

Kanttekeningen
Bij de scenario's en modelberekeningen gaan we uit van *perfect foresight*, terwijl de overheid en marktpartijen bij ontwikkeling van de waterstofmarkt en waterstofopslag te maken hebben met onzekerheden. Bovendien houden marktpartijen bij hun investeringsbeslissingen geen rekening met het maatschappelijk optimum (zie Tekstblok 2.1). De energietransitie hoeft daardoor niet via een kostenoptimaal transitiepad te verlopen. Daardoor kan in werkelijkheid de behoefte aan waterstofopslag afwijken van de modelberekeningen.

Voor de modelberekeningen doen we aannames over toekomstige technologiekosten. Onzekerheden hierin kunnen tot enigszins andere uitkomsten leiden (zowel voor de fysieke resultaten als voor de maatschappelijke baten).

Voor de berekening is één weerjaar gebruikt (2015), terwijl het aanbodprofiel voor waterstof per jaar anders kan zijn, doordat de productie van windenergie varieert van jaar tot jaar.

[53] door niet-lineair gedrag
[54] Daarom wordt in het nulalternatief vrijwel alle flexibiliteit opgevangen met bovengrondse opslag.

4.7 Bevindingen

De modelresultaten laten zien, dat in een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland in 2050 - afhankelijk van het scenario voor de ontwikkeling van de waterstofmarkt - 24 tot 38 opslagcavernes nodig zijn (zie Tabel 4.5). Wordt de waterstofopslag beperkt (tot de 5 cavernes van het nulalternatief of vanwege beperkte vraagresponse in de industrie (paragraaf 4.6)), dan nemen de maatschappelijke kosten toe.

Voor het opvangen van fluctuaties in de productie van waterstof is flexibiliteit aan de vraagzijde belangrijk. Als deze vraagresponse niet tot ontwikkeling komt, blijkt in het nulalternatief de bovengrondse opslagcapaciteit - in combinatie met de toename van de hoeveelheid waterstof in 2050 - onvoldoende om het volledig wegvallen van vraagresponse te kunnen opvangen. Daardoor komt het model binnen de opgelegde randvoorwaarden (waaronder broeikasgasneutraliteit) niet tot een oplossing.

5 Overige kosten en baten

In dit hoofdstuk bespreken we de overige kosten en baten van de verschillende alternatieven met hun varianten. Dit betreft een heel spectrum van aan publieke belangen[55,56] en veiligheid gerelateerde onderwerpen. Alleen al omdat niet alle risico's van mogelijke toekomstige energiesystemen in kaart zijn gebracht (ANV, 2019; ANV, 2022), is het monetariseren hiervan lastig. Ook is de uitwerking van bepaalde effecten in belangrijke mate locatiespecifiek; zonder helder gedefinieerde projecten op specifieke locaties is het monetariseren daarvan weinig zinvol. Daarom bespreken we de onderwerpen in dit hoofdstuk overwegend in kwalitatieve zin.

5.1 Ruimtelijke inpassing

Voor het nulalternatief (of als opslagcavernes niet tijdig zijn gerealiseerd) voorziet het OPERA model in de balans tussen vraag en aanbod door een grotere inzet van bovengrondse opslagfaciliteiten (vooral tanks) en meer vraagrespons (waarbij de productie-installaties van chemische fabrieken voor een deel van de tijd in deellast draaien, zie Hoofdstuk 4). Dit leidt in het TRANSFORM scenario tot een fors ruimtebeslag aan maaiveld (meer dan 3000 hectare, wat overkomt met 4592 voetbalvelden of 6,3 maal de huidige tankopslag in Rotterdam, zie Tabel 5.1), waardoor alternatief 2 aantrekkelijker wordt ten opzichte van het nulalternatief.

Naast het ruimtebeslag aan maaiveld is voor de ruimtelijke inpassing (Ministerie van I en W en Ministerie EZK, 2018) relevant waar welke opslagactiviteit moet worden ingepast en of dat haalbaar is. In deze studie nemen we aan, dat ruimtelijke inpassing uiteindelijk haalbaar is. Dit is niet zeker en is dus een onzekerheid bij zowel het nulalternatief als alle varianten.

Tabel 5.1 Ruimtebeslag (bron: berekeningen in hoofdstuk 4)

alternatief	**energiescenario**	**# hogedruk-installaties[57]**	**# extra opslag-cavernes**	**Totaal ruimtebeslag (hectare)**
nulalternatief	ADAPT	17	-	169
	TRANSFORM	330	-	3279
alternatief 2[58]	ADAPT	0	24	480
	TRANSFORM	17	38	929

[55] EZK hanteert voor energiebeleid de volgende uitgangspunten: betaalbaar, betrouwbaar, schoon, veilig en ruimtelijk inpasbaar. Daarbij is ook een (politiek gezien) rechtvaardige verdeling voor elk van deze publieke belangen van belang.
[56] https://open.overheid.nl/repository/ronl-b42d1231-293b-4455-a2be-05ff89aaf140/1/pdf/kamerbrief-over-rijksvisie-marktontwikkeling-voor-de-energietransitie.pdf
[57] iedere opslaginstallatie omvat 100 opslagcontainers/tanks van 11 ×1,8 meter met daaromheen een veiligheidszone van 150 meter (vergelijkbaar met opslag van LPG)
[58] onder aanname, dat iedere opslaglocatie verbonden is met 7 standaard opslagcavernes per cluster met een onderlinge afstand van 300 m en een omringende bufferruimte van 150 m, oftewel ca. 95 hectare per locatie (gelijk aan het oppervlakte van de Zuidwending UGS installaties, inclusief een veiligheidszone). De bovengrondse installaties (m.n. compressie en dehydratie) nemen zo'n 45 hectare in.

De ruimtelijke inpassing van opslagcavernes hangt mede af van de kosten van bodemdaling. In het nulalternatief zijn hiervoor vanwege de zoutwinning vaak al kosten gemaakt of gereserveerd (gerelateerd aan het gerealiseerde of verwachte dalingsvolume). De aanleg van extra opslagcavernes in beide alternatieven leidt dan gedurende de looptijd van deze MKBA (tot 2050) tot een incrementele verandering in deze kosten ten gevolge van aanleg en bedrijfsvoering tijdens opslag. Dit werkt per variant anders uit (Tabel 5.2).

De aanleg van opslagcavernes op land resulteert in een incrementele toevoeging van het dalingsvolume ten opzichte van het nulalternatief. Deze is het minst voor variant A, want de aanlegfase maakt hier deel uit van de reguliere zoutproductie en dat leidt dus niet tot extra dalingsvolume. Extra zoutwinning (variant B) of pekellozing (variant D) zal in beide fases resulteren in meer dalingsvolume en dus hogere kosten. Variant C veronderstelt verplaatsing van de winning van de bestaande locatie naar een nieuw (voor opslag geschikt) gebied. Wat dat betekent voor het dalingsvolume is locatiespecifiek en kan in theorie beide kanten op werken. Voorzichtigheidshalve gaan we er hier van uit, dat dit resulteert in hogere kosten. Als de zoutwinning verplaatst van land naar zee (variant F), is gewoonlijk sprake van baten door het vermijden van bodemdalingskosten op land.

Tabel 5.2 Overzicht van de relatieve kosten respectievelijk baten voor bodemdaling per variant in de periode tot 2050. 0 is neutraal; - en + zijn respectievelijk kosten en baten ten opzichte van het nulalternatief.

variant	aanleg	opslag
A: Binnen huidig vergunningsgebied	0	-
B: Extra winning op land	-	-
C: Verplaatsing winning op land	-	-
D: Uitbreiding op land met pekellozing	-	-
E: Extra winning op zee	0	0
F: Verplaatsing winning naar zee	+	+
G: Uitbreiding op zee met pekellozing	0	0

5.2 Fysieke veiligheid

De veiligheidsrisico's van waterstof en op waterstof gebaseerde technologieën met inbegrip van de verschillende vormen van waterstofopslagcapaciteit (vraagresponse in chemische fabrieken, conversies/batterijopslag, waterstoftanks en opslagcavernes) zijn qua effecten en waarschijnlijkheid goed vergelijkbaar met huidige industriële activiteiten (LPG en aardgas) (ANV, 2019; ANV, 2022)[59]. Bovendien moeten alle alternatieven aan de huidige wet- en regelgeving voldoen (Kamerbrief, 4 november 2022[60]).

[59] Bij ondergrondse opslag geeft de studie aan, dat waterstof onbedoeld kan vrijkomen en als het zich dan ergens ophoopt ontstaat het risico op brand of explosie. Omdat waterstof een kleiner molecuul is hoopt het zich minder gemakkelijk op dan aardgas. Daarmee is het effect hiervan niet dusdanig, dat (ANV, 2019; ANV, 2022), het verder uitwerkt op nationale schaal.
[60] https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/11/04/verantwoord-omgaan-met-veiligheid-en-gezondheid-in-de-energietransitie

Dit gezegd hebbende, verwachten we wel verschil in de fysieke veiligheid tussen het nulalternatief (waarbij bovengrondse opslag een grote rol speelt) en de beleidsalternatieven (waarbij ondergrondse opslag domineert); bij eventuele calamiteiten is ondergrondse opslag veiliger vanwege verminderde blootstelling.

Ook verwachten we verschil tussen de varianten, die volledig uitgaan van opslag op land (A, B, C, F, AB) en de andere varianten of combinaties, die (deels) uitgaan van opslag op zee. In vergelijking met land is het risico per medewerker op zee waarschijnlijk hoger (extreme weersomstandigheden en lange vluchtroutes), maar valt het risico voor omwonenden weg. De installaties voor compressie en dehydratie worden in alle varianten aangelegd op land, dus daar verwachten we geen verschil.

Om meer zicht te krijgen op de maatschappelijke baten en kosten van de twee alternatieven ten opzichte van het nulalternatief qua fysieke veiligheid moeten de specifieke risico's worden gekwantificeerd, die samenhangen met iedere installatie. Dit valt buiten de reikwijdte van deze studie.

5.3 Aanbodzekerheid

Met een toenemende afhankelijkheid van waterstof zullen voorzieningen moeten worden getroffen om onverwachte of grootschalige verstoringen van waterstofaanbod[61] te kunnen mitigeren[62]. Hoeveel reserve aan aardgas of waterstof beschikbaar moet zijn in de vorm van strategische waterstofopslag is onbekend, want de Nederlandse overheid heeft daarvoor geen afspraken gemaakt of uitgangspunten vastgesteld binnen bestaand beleid en regelgeving[63].

Stel dat naar analogie met aardolieopslag[64] in 2050 een strategische opslagcapaciteit voor 3 maanden waterstofverbruik wordt aangehouden. Dan komt dit overeen met 92 tot 205 standaard opslagcavernes (in ADAPT, respectievelijk TRANSFORM). Aangezien er tussen 2030 en 2050 maximaal 60 cavernes kunnen worden aangelegd en deze waarschijnlijk (grotendeels) worden ingezet voor de het onderhouden van de reguliere vraag-aanbodbalans (zie Hoofdstuk 4), zal (het overgrote deel van) de strategische waterstofopslag op een andere manier moeten worden opgelost.

Omgekeerd geldt, dat als de opslagcavernes na aanleg (deels) economisch niet nodig blijken[65], hun capaciteit beschikbaar komt voor strategische waterstofopslag

[61] Dit aanbod volgt uit de binnenlandse productie via conversie van koolwaterstoffen of hernieuwbare elektriciteit, of uit import van waterstof.
[62] Hier definiëren we aanbodzekerheid als garantie, dat er binnen het energiesysteem in de basis waterstof beschikbaar is, gegeven de tijd- en plaatsgebonden afstemming van vraag en aanbod in het energiesysteem (als onderdeel van leveringszekerheid).
[63] Zie ook de aanbeveling van de Raad van State: Wijziging Gaswet en Mijnbouwwet in verband met de beëindiging van de gaswinning uit het Groningenveld. 13 oktober 2021.
[64] Voor aardolie gelden internationale afspraken om een strategische voorraad in opslag beschikbaar te hebben, die in het uitzonderlijke geval dat het reguliere aanbod wegvalt, gedurende een periode 90 dagen in de vraag kan voorzien.
[65] bijvoorbeeld in geval de overheid eerst inzet op een op TRANSFORM gelijkend beleidsscenario en in een later stadium alsnog overgaat naar een op ADAPT gelijkend beleidsscenario, zie Tekstblok 4.1

– tegen beperkte investeringen van de zijde van de Nederlandse overheid[66]. Hiervoor zouden op basis van de uitkomsten van deze MKBA (Hoofdstuk 4) in 2050 tot 41 cavernes beschikbaar kunnen komen (aannemende, dat er in de ADAPT en TRANSFORM scenario's respectievelijk 24 en 38 cavernes nodig zijn om te voorzien in de reguliere vraag-aanbodbalans, zie Tabel 5.1). In dat geval worden de energiesysteembaten (deels) vervangen door verzekeringsbaten[67] op grond van vermeden kosten als gevolg van aanbodverstoringen. Omdat deze baten[68] de kans op verzonken kosten door de aanleg van extra opslagcavernes (die achteraf niet economisch blijken) verkleint, neemt de aantrekkelijkheid van alternatief 2 toe.

5.4 Weerbaarheid

De alternatieven en varianten voor plaatsing en verdeling van opslagcavernes (Hoofdstuk 3) verschillen in de mate waarin ze gevoelig zijn voor opzettelijke of externe verstoring van het waterstofsysteem[69] dan wel in de mate waarin ze de gevolgen van dergelijke verstoringen kunnen opvangen.

In het nulalternatief wordt het waterstofsysteem hoofdzakelijk ingeregeld door waterstofopslag in tanks en vraagresponse. Bovengrondse opties (zie paragraaf 5.3) zijn relatief gevoelig voor verstoring door derden[70] (ANV, 2022). En waar bij import de weerbaarheid van het energiesysteem kan worden vergroot door aanboddiversifiëring, is de invloed van de Nederlandse overheid op de bescherming van productie- en opslaglocaties in het buitenland beperkt en biedt dit geen garantie in bijzondere omstandigheden[71]. Op het onderwerp weerbaarheid valt deze vergelijking met het nulalternatief dus gunstig uit voor de beleidsalternatieven.

Op land en ondergronds zal de bescherming van opslaglocaties tegen externe en extreme invloeden (zoals aanslagen of extreme weersomstandigheden) relatief eenvoudig en goedkoop te realiseren zijn. De weerbaarheid is het best gewaarborgd indien de opslagcavernes voor waterstof conform variant AB in Alternatief 2 over verschillende locaties op land worden verdeeld. In dit geval zijn er ruimschoots voldoende cavernes (60) om de benodigde mate van flexibiliteit voor beide energiescenario's te realiseren. Zelfs als een opslaglocatie uitvalt, zijn er waarschijnlijk voldoende andere locaties, die in directe verbinding staan met het waterstofnetwerk om dit te kunnen opvangen. Voor de varianten A, B, C en F van Alternatief 1 is de situatie grotendeels vergelijkbaar met variant AB in Alternatief 2.

---

[66] Primair de kosten voor onderhoud en het bedrijfsgereed houden van opslagcapaciteit. Hiervoor bestaat op de markt geen verdienmodel, aangezien strategisch opgeslagen waterstof slechts in uitzonderlijke gevallen mag worden aangesproken.

[67] De zo te realiseren baten hangen af van de aard van de verstoringsrisico's (zoals uitgestelde industriële productie, haperende goederendistributie, wegvallen van distributiegas voor verwarming etc.) en van alternatieve mitigatieopties (zoals diversificatie van het aanbod over verschillende aanbieders, waterstofopslag in schepen, etc.).

[68] Een andere mogelijkheid om in deze situatie baten te realiseren is het beschikbaar stellen van deze opslagcapaciteit aan buurlanden, die minder ondergrondse opslagmogelijkheden tot hun beschikking hebben (bijvoorbeeld België).

[69] NRC 1 oktober 2022 Nord Stream-aanslag is wake-upcall. De vernieling van gaspijpleidingen toont de kwetsbaarheid van cruciale infrastructuur op de zeebodem, zoals datakabels.

[70] Zie ook de situatie in Oekraïne

[71] Temeer, daar het eventueel uitvallen van de (weinige) binnenlandse opslagcavernes voor waterstof van grote invloed kan zijn op de zekerheid/betaalbaarheid van het waterstofaanbod in de markt.

Daarbij zijn wel minder cavernes (30) beschikbaar, zodat er een lagere dekking van de flexibiliteitsvraag beschikbaar is. In andere woorden, overdimensionering van opslagcapaciteit ontbreekt, waardoor eventuele uitval van een locatie meer gevolgen heeft.

Omgekeerd zijn de varianten, die cavernes (deels) op zee aanleggen, het kwetsbaarst voor externe invloeden (zoals de kans op botsingen tussen schepen en platforms, uitval van installaties door extreem weer en terroristische aanslagen). De kosten van bescherming en beveiliging op zee zijn navenant groter, ook vanwege de afgelegen ligging en lastige bereikbaarheid. Bovendien zijn deze locaties niet direct aangesloten op het landelijke waterstofnetwerk, maar verbonden via enkele pijplijnverbindingen van zee naar land. Een ernstige beschadiging daarvan kan leiden tot het langdurig en volledig wegvallen van het gebruik van opslagfaciliteiten.

5.5 Ecologie

Om zicht te krijgen op de baten en kosten van de twee alternatieven ten opzichte van het nulalternatief qua ecologische voetafdruk moeten de specifieke risico's, die samenhangen met iedere installatie (waterstofopslag in tanks, chemische fabrieken, opslagcavernes met toebehoren), worden gekwantificeerd. Dit valt vanwege het locatiespecifieke karakter ervan buiten de reikwijdte van deze studie.

Grotere installaties hebben over het algemeen een grotere kans op uitstoot, dus bij benadering geeft het ruimtebeslag (Tabel 5.1) een indicatie van de relatieve kans op uitstoot van ongewenste stoffen (via emissies of lekkages) vanuit de installaties. Op grond hiervan lijkt alternatief 2 (opslagcavernes en pijpleidingen) aantrekkelijker onder het TRANSFORM scenario en het nulalternatief (meer chemische fabrieken) aantrekkelijker onder het ADAPT scenario.

Een aantal varianten (paragraaf 3.4) gaan uit van pekellozing in zee. Over de milieueffecten van pekellozing op zee is weinig bekend[72]. Daarom baseren we ons op bekende praktijksituaties en studies (Bijlage 9.6), waarbij het milieueffect steeds het grootst lijkt in de buurt van het lozingspunt. Onze kostenschatting van pekellozing bij de aanleg van 30 standaard opslagcavernes baseren we op een vergelijking met de bestaande MER over lozing op de Eems (1988, zie Bijlage 9.6). Qua hoeveelheid gaat het om 6 maal het cavernevolume in (aangenomen) 8 jaar, uitgaande van 16% opgelost zout in het te lozen water[73]. De pieklozing zal dan zo'n 50% hoger zijn dan indertijd berekend voor lozing op de Eems, wat naar verwachting zal leiden tot iets grotere effecten[74]. Dit effect plus een schatting van € 10 miljoen aan onderzoekskosten naar de milieueffecten van pekellozing nemen we mee in de kosten van de varianten met pekellozing (D en G). Daarbij nemen we in deze studie ook aan, dat pekellozing uiteindelijk mag. Dit is een onzekerheid bij de varianten met pekellozing.

[72] niet behandeld in het Handboek Milieuprijzen (CE, 2017)

[73] In Duitsland wordt gewoonlijk om de kosten te drukken zeewater of (brak) oppervlaktewater gebruikt bij de aanleg, daarom verwaarlozen we hier deze kosten. Stel dat zoet drinkwater zou worden gebruikt voor caverne-aanleg, dan kost dat 6 m^3 per m^3 cavernevolume, en dus in alternatief 2: 60 miljoen m^3 * 6 m^3/m^3 = 360 miljoen m^3 water. Tegen een prijs van ca. 1 €/m^3 is dat € 360 miljoen. Als we dit bedrag meenemen worden variant D en F nog wat duurder, voor de MKBA als geheel maakt het weinig uit.

[74] Bij lozing op zee kan de verdunning groter zijn afhankelijk van aantal lozingspunten en onder andere de stroomsnelheid. Als dat zo is, zijn effecten uiteraard kleiner.

5.6 Bevindingen

In deze paragraaf vatten we de bevindingen uit dit hoofdstuk samen op het niveau van respectievelijk de alternatieven en de varianten.

Alternatieven

Het verschil in maatschappelijke kosten tussen de alternatieven blijkt (deels):

I. te kwantificeren. Bijvoorbeeld pekellozing;
II. niet te kwantificeren, want locatiespecifiek. Bijvoorbeeld ruimtelijke inpassing en ecologie (ecologische voetafdruk);
III. vergelijkbaar, omdat altijd aan de huidige wet- en regelgeving op het gebied van veiligheid moet worden voldaan. Bijvoorbeeld fysieke veiligheid;
IV. afhankelijk van de ontwikkeling van de waterstofmarkt (energiescenario's). Bijvoorbeeld ecologie (emissies of lekkages vanuit installaties);
V. gunstig voor alternatief 2. Bijvoorbeeld weerbaarheid;
VI. ongevoelig voor regulatie van de zoutmarkt. Bijvoorbeeld aanbodzekerheid.

Varianten

De maatschappelijke kosten voor een deel van de onderwerpen (ruimtelijke inpassing, fysieke veiligheid, weerbaarheid en ecologie) verschillen tussen de varianten voor plaatsing en verdeling van opslagcavernes. Op het gebied van veiligheid is systeemfalen gedurende de transitie een belangrijk punt van aandacht, net als de verstoringsgevoeligheid van het waterstofsysteem door derden (weerbaarheid). Deze is het best gewaarborgd indien de opslagcavernes voor waterstof over verschillende locaties op land worden verdeeld[75]. Omgekeerd zijn de varianten, die opslagcavernes (deels) op zee aanleggen, op dit punt het kwetsbaarst (paragraaf 5.4).

[75] Voor de varianten A, B, C en F van Alternatief 1 is de situatie op het punt van weerbaarheid grotendeels vergelijkbaar met de combinatie van variant A en B in Alternatief 2. Daarbij zijn wel minder cavernes (30) beschikbaar, zodat er een lagere dekking van de flexibiliteitsvraag beschikbaar is. In andere woorden, overdimensionering van opslagcapaciteit ontbreekt, waardoor eventuele uitval van een locatie meer gevolgen heeft.

6 Analyseresultaten

In dit hoofdstuk presenteren we de MKBA-resultaten. Aansluitend bediscussiëren we de bevindingen en gaan we in op de robuustheid daarvan.

6.1 Verdisconteren van kosten en baten

Voor het uitvoeren van de analyse hebben we bij het opstellen van het kosten- en batenoverzicht alle bedragen (uit Hoofdstuk 4 en 5) over tijd teruggerekend[76] (Tekstblok 6.1) naar een gemeenschappelijk basisjaar (prijspeil januari 2022, zie paragraaf 1.3). Praktisch gezien hebben we als levensduur voor opslagcavernes 20 jaar genomen na de ingebruikname van de laatste caverne (in 2050), dus tot het jaar 2070[77]. In de gevoeligheidsanalyse hebben we gerekend met 40 jaar, dus tot het jaar 2090.

Tekstblok 6.1 Overzicht kostenverdeling over de tijd.

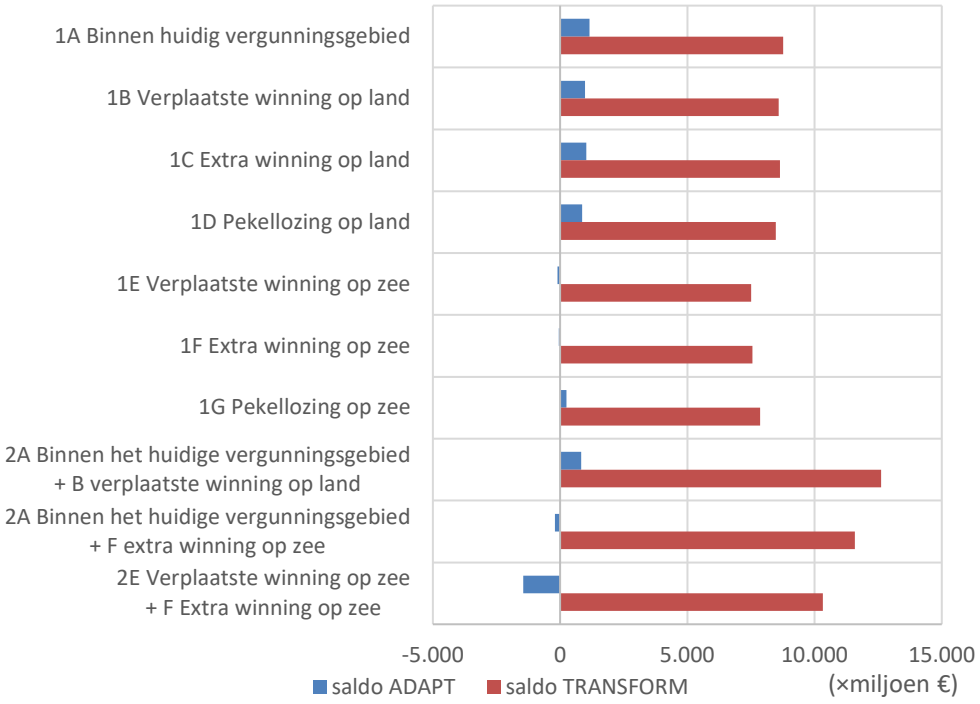
De kosten van cavernes, het verschil tussen marktwaarde van zout en de kosten van zoutwinning, satellietplatforms en kosten van bodemdaling worden gerealiseerd tijdens het boren van de cavernes. Aangenomen is, dat in ieder jaar van 2030 tot en met 2049 5% van de totale kosten gemaakt wordt.
Exploratie en vergunningen, zoutverwerkingsfabriek, eventuele opbrengst uit de zoutopbrengst en de pekelleiding worden gerealiseerd in de jaren, voordat met logen begonnen wordt: van 2023 tot en met 2029 wordt ieder jaar een zevende van deze kosten gemaakt.
Loogkosten voor cavernes, waarvan het zout in zee wordt geloosd, worden tussen 2040 en 2049 gemaakt, ieder jaar 10%.
De kosten van onderzoek naar lozen en de kosten van waterstoftransportleidingen van en naar opslag op zee worden van 2037 tot 2040 gemaakt, ieder jaar een kwart.
De kostenbesparing in het waterstofsysteem wordt vanaf 2040 gerealiseerd. De 2040 en 2050 waarden volgen uit het OPERA model, voor de jaren daartussen is een lineaire toename aangenomen. Voor 2040 is de waarde nul aangehouden en vanaf 2050 is de waarde constant gehouden.
De kostenbesparing van het energiesysteem zijn inclusief de kosten van een *compressor* en *expander* per opslagcaverne. Deze kosten worden in OPERA via CAPEX meegenomen.

[76] Voor alle kosten is de discontovoet van verzonken kosten gebruikt (1,6%) en voor de baten is de standaard discontovoet van 2,25% gebruikt.
[77] In lijn met de opslagprofielen in de bestaande opslagplannen (www.nlog.nl).

6.2 Resultaten

In deze paragraaf presenteren we de analyseresultaten voor respectievelijk de alternatieven en de varianten. Dat doen we voor de systeembaten in de vorm van het kostenbatensaldo en het rendement per geïnvesteerde euro, inclusief een overzicht van de overige, niet-gemonetariseerde effecten.

Kostenbatensaldo
Dit is weergegeven in Figuur 6.1. In het TRANSFORM scenario is de waterstofvraag hoog en de noodzaak tot opslag dus groot. In die situatie is de beschikbaarheid van 60 opslagcavernes (alternatief 2) het meest aantrekkelijk: het levert de hoogste netto baten op (Tabel 6.1). Ook 30 opslagcavernes (alternatief 1) leveren in deze situatie meer op dan het nulalternatief.



Figuur 6.1 Saldo maatschappelijke kosten en baten voor de twee energiescenario's ADAPT en TRANSFORM per variant (alternatief 1) en voor drie combinaties van varianten (alternatief 2, conform Tabel 3.1). Alle effecten zijn uitgedrukt als saldo van kosten en baten en betreffen het verschil ten opzichte van het nulalternatief. Over het nulalternatief worden dus geen kosten en baten gerapporteerd. De cijfers van deze tabel zijn opgenomen in Bijlage 9.8.

In het ADAPT scenario is de noodzaak tot opslag lager en leveren 30 opslagcavernes op land (alternatief 1A-D) de hoogste netto baten (Tabel 6.1). De varianten op zee (1E-G) leveren vooral minder maatschappelijke systeembaten op door de hogere aanlegkosten (Tabel 4.2). Het saldo per variant is mede afhankelijk van hoeveel opslagcavernes, die in het model worden gerealiseerd (Tabel 4.3).

Tabel 6.1 Overzicht van het alternatief met de hoogste netto baten per energiescenario.

Systeemrealisatie	Hoogste netto baten	# opslagcavernes
ADAPT	Alternatief 1	30
TRANSFORM	Alternatief 2	60

Maatschappelijk rendement

Voor de beleidsalternatieven hebben we ook uitgerekend[78] hoeveel elke geïnvesteerde euro oplevert (zie Figuur 6.2). Variant 1A heeft voor het ADAPT scenario een B/K verhouding van bijna 4; voor het TRANSFORM scenario levert diezelfde variant ruim 10 euro op per geïnvesteerde euro. Voor de andere varianten van alternatief 1 ligt die waarde lager. En voor alternatief 1F en 1G ligt deze net onder de 1 in het ADAPT scenario. In het ADAPT scenario is de combinatie van varianten A en B in alternatief 2 minder aantrekkelijk dan variant 1A, maar nog steeds levert een euro investering ruim 2 euro welvaart op. Onder TRANSFORM scoort deze combinatie het best van allemaal met bijna 11 euro opbrengst per geïnvesteerde euro[79].

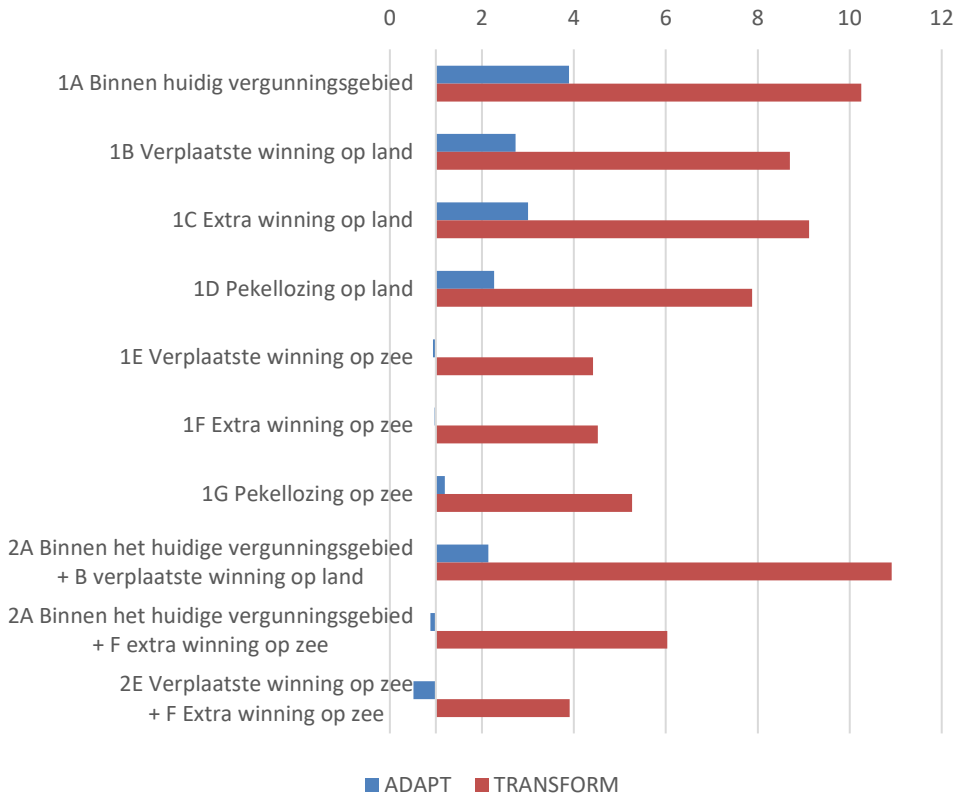
Overige effecten

Een voor besluitvorming belangrijke toevoeging aan de systeembaten zijn de 7 maatschappelijke effecten (Bijlage 9.8), die we om verschillende redenen (Hoofdstuk 4 en 5) niet hebben gewaardeerd in euro's.

In het overzicht valt op, dat tussen de varianten op land en op zee de weerbaarheid (de gevoeligheid van het toekomstige waterstofsysteem voor verstoring door derden) en de bodemdaling elkaar spiegelen. Daarbij merken we op, dat bodemdaling ruimtelijke inpassing op lokaal niveau betreft (paragraaf 5.1), terwijl de weerbaarheid raakt aan de nationale veiligheid (ANV, 2019; ANV, 2022).

[78] Dit vereist een paar extra stappen ten opzichte van de getoonde getallen, omdat de gerapporteerde energiesysteembaten een netto kostenbesparing betreft. Daarom zijn de kosten van cavernes genomen, plus de kosten van extra compressors en expanders ten opzichte van het nulalternatief. Qua baten zijn de systeemkosten genomen, deze zijn verhoogd met de standaardkosten van cavernes, die OPERA meeneemt (deze verschillen niet tussen de varianten), en de kosten van extra compressors en expanders ten opzichte van het nulalternatief.

[79] Het verschil in B/K verhouding met variant A in alternatief 1 is kleiner dan het verschil in netto contante waarde vanwege de hogere investering, die nodig is voor de combinatie van varianten A en B in alternatief 2.



Figuur 6.2 Baten-kosten verhouding (B/K ratio) voor de twee energiescenario's ADAPT en TRANSFORM per variant (alternatief 1) en voor drie combinaties van varianten (alternatief 2, conform Tabel 3.1) ten opzichte van het nulalternatief. Een beleidsalternatief of variant met positieve welvaartsbijdrage heeft een B/K groter dan 1.

6.3 Discussie

Uiteraard zijn veel aannames, parameters en schattingen onzeker. Daarom hebben we een gevoeligheidsanalyse[80] uitgevoerd op de belangrijkste parameters (Bijlage 9.9) en bediscussiëren we in het licht daarvan de robuustheid van onze resultaten.

Ontwikkeling waterstofmarkt

De belangrijkste onzekerheid is hoe de energiemarkt zich zal gaan ontwikkelen (ADAPT versus het TRANSFORM scenario). Dus de kans is aanwezig, dat de overheid bij de aanleg van opslagcavernes *nu* kiest voor een beleidsalternatief (alternatief 1 of 2 conform Tabel 6.1), dat *later* niet blijkt aan te sluiten bij de marktwerkelijkheid. Dat roept de vraag op, hoeveel baten de samenleving in die situatie kan mislopen. Deze situatie is weergegeven in Tabel 6.2.

[80] gebaseerd op de systeembaten onder aanname, dat de overheid per alternatief steeds kiest voor de variant of combinatie van varianten met het hoogste saldo in de MKBA berekeningen (A en A+B). De 'overige effecten' laten we in de gevoeligheidsanalyse buiten beschouwing.

Tabel 6.2 Gemiste baten bij een verkeerde inschatting van de marktontwikkeling (vergelijk Tabel 6.1).

Systeemrealisatie	Alternatief (verkeerd)	Misgelopen baten	# opslagcavernes voor strategische waterstofopslagcapaciteit*
ADAPT	Alternatief 2	€ 325 miljoen	41 (in plaats van 11)
TRANSFORM	Alternatief 1	€ 3.846 miljoen	-

* zie paragraaf 5.3

De misgelopen baten door een verkeerde inschatting zijn scheef verdeeld. Bij verkeerd anticiperen op het TRANSFORM scenario loopt de Nederlandse samenleving ruim 10 maal meer baten mis dan bij verkeerd anticiperen op het ADAPT scenario[81]. Dit maakt alternatief 2 aantrekkelijker dan alternatief 1: als de toekomstige waterstofmarkt lijkt op het TRANSFORM scenario, dan is de aanleg van 60 opslagcavernes de juiste keuze; mocht het ADAPT scenario werkelijkheid worden, dan zijn de misgelopen baten te overzien.

Fasering & opslag in gasvelden

Fasering en uitstel kunnen een manier zijn om verstandig om te gaan met onzekerheid **(**Romijn en Renes, 2013, p. 150; CPB, 2017, adviseert een beslisboomanalyse). Daarbij is de vraag, of een alternatief met een andere fasering (lees: uitstel van de investeringsbeslissing) welvaartsverhogend is.

Wat als de overheid de aanleg van opslagcavernes uitstelt tot in Nederland een demonstratieproject gerealiseerd is voor waterstofopslag in gasvelden (zie paragraaf 3.1)? Uitstel is niet gratis: de synergie met zoutwinning gaat deels verloren (zie reguleringsrisico en eigendomsverhoudingen, paragraaf 2.4), waardoor de kosten van het later alsnog aanleggen van opslagcavernes hoger zijn.

Andersom kan ook gebeuren, dat gedurende de onderzochte periode (tot 2050) de technologie voor waterstofopslag in gasvelden beschikbaar komt. Ook in deze situatie is het aantrekkelijk (Bijlage 9.9) als het waterstofsysteem kan beschikken over 30 opslagcavernes (alternatief 1, zie ook Tabel 6.2). Voor alternatief 2 hangt dit af van de ontwikkeling van de waterstofmarkt[82].

Uitwisselbare varianten

De uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse (Bijlage 9.9) zijn robuust in de zin, dat de resultaten getalsmatig reageren op veranderingen in de invoer[83], maar welk alternatief het meest aantrekkelijk is voor een gegeven energiescenario verandert niet. Dat is eenmaal wel het geval voor de optimale variant. Bij hogere

[81] al wordt de pijn in het laatste geval iets verzacht door het beschikbaar komen van meer opslagcavernes voor strategische waterstofopslag, zie Tabel 6.2

[82] Met waterstofopslag in gasvelden is alternatief 2 in het TRANSFORM scenario welvaartsverhogend, voor het ADAPT scenario is het saldo negatief (afgezien van eventuele baten door strategische waterstofopslag, zie Bijlage 9.9 en Tabel 6.2).

[83] In de gevoeligheidsanalyse hebben we het volgende gevarieerd: looptijd van 40 in plaats van 20 jaar; het beschikbaar komen van opslag in gasvelden; reduceren van de baten van cavernes tot 90 %; verlies op zoutwinning naar 15 %, of zoutwinning juist 5 % meer winstgevend; hogere of lagere discontovoet en hogere energiemarktbaten (conform paragraaf 4.6).

zoutopbrengsten dan wij in dit onderzoek hebben aangenomen (Bijlage 9.1) kan het namelijk aantrekkelijker zijn om extra opslagcavernes aan te leggen door de zoutwinning uit te breiden (variant C) dan om ze aan te leggen in het huidige vergunningsgebied (variant A).

Locatiespecifieke uitwerking
Bij gedetailleerdere geografische planning zullen de kosten en baten preciezer geschat kunnen worden. Dit kan de voorkeursvolgorde van de varianten veranderen. Het lijkt niet waarschijnlijk, dat dit effect heeft op de voorkeursalternatieven (30 of 60 cavernes). Het preciezer uitwerken van de varianten per locatie zal meer inzicht bieden in hoeveel extra opslagcavernes daadwerkelijk aangelegd kunnen worden, inclusief welke effecten dit heeft op de lokale zoutwinning en op de doelmatigheid daarvan (in de zin van de Mijnbouwwet). Niet iedere variant zal (volledig) haalbaar blijken. Zo kunnen bovengrondse activiteiten de waterstofopslag op sommige plaatsen minder wenselijk of zelfs onmogelijk maken.

Onzeker nulalternatief
In het nulalternatief nemen we aan, dat de markt bij ongewijzigd beleid geen extra opslagcavernes aanlegt (paragraaf 3.2). Dit is mogelijk teveel een hoekpuntoplossing, aangezien laat instappen voor ondernemers onaantrekkelijk is (zie paragraaf 2.4). Stel dat de markt ergens tussen het nulalternatief en alternatief 1 uitkomt, dan is op basis van de MKBA-uitkomsten duidelijk dat er vanuit maatschappelijk oogpunt te weinig opslagcavernes zijn aangelegd. En als de markt toch evenveel cavernes zou bouwen als in alternatief 1, dan zijn de kosten gelijk aan zoals we ze nu geschat hebben. Met andere woorden, dit punt maakt alleen uit voor de verdeling van kosten en baten, niet voor het totaal.

Onzekere waterstofopslagwaarde
Ieder model heeft zijn beperkingen (dus ook het OPERA model, zie paragraaf 4.6), en de toekomst voorspellen is inherent onzeker. Daarmee kan de noodzaak en maatschappelijke waarde van waterstofopslag in werkelijkheid zowel hoger als lager zijn dan het model heeft berekend. Als de aangenomen kostenminimalisatie niet gerealiseerd wordt, dan lijkt per saldo de kans dat er dan in de samenleving meer behoefte is aan waterstofopslag groter dan de kans dat er dan minder behoefte is aan waterstofopslag. Dit geldt ook voor het optreden van extreme weerjaren (TNO & EBN, 2021)[84].

Onzekere zoutmarkt
We beschikken niet over een marktprognose voor zout voor de komende 30 jaar en daarom hebben we deze markt constant veronderstelt (er zijn momenteel geen aanwijzingen voor forse krimp van de vraag). Als de zoutmarkt krimpt (vanwege economische veranderingen of door gewijzigd overheidsbeleid), heeft dat een duidelijk negatief effect op de hoeveelheid cavernes, die in synergie met

[84] Figuur 5.5 van deze referentie vat voor een aantal scenario's de waterstofopslagbehoefte samen. Vijf scenario's waarvoor een gewoon en extreem weerjaar (Dunkelflaute en koude winter) is doorgerekend laten zien dat er voor de balanshandhaving (de markt) van waterstof in een slecht weerjaar zo'n 75 procent tot 185 procent meer capaciteit nodig is dan bij een standaard weerpatroon.

zoutwinning kan worden gerealiseerd[85]. Dan stijgen de kosten van nieuwe cavernes en kan het optimaal zijn er minder aan te leggen dan met de huidige kosten.

Eventuele effecten van dergelijke krimp op de chemische industrie en de gebruikers van de producten daarvan (de samenleving) hebben we niet onderzocht. We hebben aangenomen, dat de marginale waarde van zout op de Europese markt gelijk is aan de prijs. Dit is voor marginale hoeveelheden zout een redelijke aanname, maar hoeft bij grote hoeveelheidsveranderingen niet op te gaan[86].

Import

In de analyse hebben we aangenomen, dat alle waterstofvraag binnenlands wordt geproduceerd. Deze aanname is op praktische gronden gedaan. Het Nederlandse energiesysteem in detail modeleren is al lastig, op Europese of wereldschaal is dat onmogelijk zonder in te boeten op andere, belangrijke modelkenmerken (bijvoorbeeld een lagere resolutie in tijd/ruimte, of minder ver uitgewerkte energietechnologie). Tegelijk zal het buitenland ook in 2050 relevant zijn voor de waterstofmarkt op minstens twee vlakken, het waterstofaanbod en de waterstofopslagcapaciteit.

Import van waterstof (en mogelijke export) naar buurlanden kan een grotendeels vergelijkbaar aanbodprofiel hebben als de binnenlandse productie. Geïmporteerde waterstof van buiten Europa via havens zal een vlakker aanbodprofiel hebben (om de transportcapaciteit economisch optimaal te benutten) tegenover een relatief vlak vraagprofiel, waardoor behoefte van waterstofopslag om vraag/aanbod te balanceren waarschijnlijk afneemt (hierdoor kan tegelijk de behoefte aan strategische opslagcapaciteit juist toenemen). Hoe groot de rol van geïmporteerde waterstof wordt is nog niet te zeggen, de verwachting is dat Nederland na 2025 waterstof importeert uit een steeds groter wordende groep landen binnen en buiten Europa (RVO, 2022). Wel zal lokaal geproduceerde waterstof zeker aantrekkelijk blijven vanwege de relatief hoge transportkosten van waterstof[87] (Beukel, 21 maart 2021).

Het belang van buitenlandse waterstofopslagcapaciteit voor Nederland betreft de flexibiliteit uit handel en uit opslag over de grens. Een deel van de flexibiliteit kan komen door het binnen Europa verhandelen van waterstof van plaatsen waar tijdelijk veel waterstof wordt geproduceerd (lage prijs) naar waar tijdelijk weinig waterstof wordt geproduceerd (hoge prijs). Dit is goed vergelijkbaar met hoe nu internationaal de uitwisseling van stroom gebeurt en vereist een Europese waterstofinfrastructuur.[88] Dus waterstofopslag is deels een alternatief voor de internationale waterstoftransportcapaciteit (en omgekeerd).

Een ander deel van de nodige flexibiliteit kan komen uit het gebruiken van waterstofopslagen in bijvoorbeeld Duitsland, waarmee Nederland in feite flexibiliteit importeert. Deels is dit vergelijkbaar met hoe Nederland gebruik maakt van de

[85] varianten A, B, C, E en F

[86] De waarde kan dan hoger zijn dan de waarde uitgedrukt in de prijs. Zo is ook de waarde van lucht hoger dan de prijs ervan.

[87] Ten opzichte van de binnenlandse productiekosten, met name als waterstof wordt geproduceerd op momenten wanneer de elektriciteitsprijs laag, d.w.z. op momenten met veel wind- en zonaanbod.

[88] Voor inzicht in hoe belangrijke spelers (TSO's) daar nu tegenaan kijken, zie bijvoorbeeld (Guidehouse, 2021)

waterkrachtcentrales in Noorwegen. Aan deze optie liggen wel veel aannames ten grondslag[89].

Afwijkingen van de standaard opslagcaverne
Als opslagcavernes worden aangelegd met een kleiner volume dan de standaard opslagcaverne (Bijlage 9.4), dan nemen de boorkosten per 1 miljoen m^3 opslagruimte toe. Bij opslagcavernes van 600.000 m^3 (waar in de praktijk sprake van is, zie TNO, 2018, 2020) nemen de kosten toe tot € 10 miljoen per miljoen m^3 opslagruimte. De meerkosten per variant (voor 30 opslagcavernes) lopen dan op met € 120 miljoen op land en € 240 miljoen op zee, terwijl de andere kosten (kussengas, compressor en expander) waarschijnlijk hetzelfde blijven (vaak zal dit soort installaties voor een aantal cavernes tegelijk worden aangelegd). Hoewel substantieel qua geld, is het effect te klein om onze resultaten (zoals de voorkeur per alternatief) te beïnvloeden.

In de meeste gevallen voldoen de puteigenschappen, inclusief diameter, voor zowel de aanleg/winnings- als opslagfase. Als later blijkt, dat een put nodig is met een grotere diameter (met navenant grotere uitzendcapaciteit), dan resulteert dat in extra boorkosten. Deze extra kosten zijn gelijk aan de extra boorkosten tijdens logen (€ 6 miljoen). Als dat van toepassing is op 30 of 60 cavernes, dan gaat het om aanzienlijke meerkosten. Maar ten opzichte van de totale kosten per caverne (€ 40 miljoen voor put en kussengas; € 40 miljoen per GW *compressor*; en € 48,5 miljoen per GW *expander*) is het te weinig om onze bevindingen te kunnen beïnvloeden.

We zijn in onze vergelijking met het nulalternatief uitgegaan van de huidige winningspraktijk. Mogelijk krijgen toekomstige winningscavernes met het oog op milieueffecten, infrastructuurlevensduur en peilbeheer (RIVM, 2019; TNO, 2003; Hunfeld et al., 2022[90]) al een kleiner volume (SodM, 2018a) dan nu soms nog gebruikelijk. In dat geval zullen de extra boorkosten lager zijn dan nu geschat.

Verdelingseffecten
De effecten van deze MKBA zijn niet gelijk verdeeld over de verschillende groepen in de samenleving. En lokale effecten kunnen anders zijn dan nationale effecten. Zo kan lokaal de veiligheid afnemen, terwijl die nationaal verbeterd (of andersom). Hier speelt dus een verdelingsprobleem. Tegelijk zijn de totale baten zo groot, dat verliezers (in ieder geval op papier) gemakkelijk gecompenseerd kunnen worden. Dit is in MKBA's vaak een voldoende voorwaarde om te concluderen, dat het beleidsalternatief de welvaart vergroot[91].

---

[89] Dit veronderstelt ten eerste, dat de waterstofopslagmarkt in Duitsland niet faalt (hoewel de onderliggende oorzaken van marktfalen, zie paragraaf 2.5, onverkort ook van toepassing zijn in Duitsland) dan wel dat de Duitse overheid actief ingrijpt in de markt, zodat Duitsland in de periode tot 2050 ruim voldoende opslagcavernes en transportcapaciteit aanlegt voor zowel de eigen behoefte als de buitenlandse vraag. Die buitenlandse vraag zal zeker niet alleen van Nederland komen, want andere Europese landen (zoals België, Zwitserland en Oostenrijk) kampen met beperkte (potentiële) waterstofopslagcapaciteit (zie ook paragraaf 2.3). Tenslotte veronderstelt het, dat Duitsland in extreme situaties (zie paragraaf 5.4) export van waterstof blijft toestaan.
[90] Abandonment of solution mined salt caverns in the (nlog.nl); https://www.sodm.nl/onderwerpen/milieu/documenten/rapporten/2019/02/15/rivm-verkenning-van-de-milieu-aspecten-van-de-activiteiten-die-onder-het-staatstoezicht-op-de-mijnen-vallen; The influence of a threshold stress for pressure solution creep on cav (taylorfrancis.com)
[91] Hicks-Kaldor criterium

6.4 Bevindingen

In dit hoofdstuk hebben we alle kosten en baten verdisconteerd met als uitkomst, dat de aanleg van 30 extra opslagcavernes (alternatief 1) zeker welvaartsverhogend is. De aanleg van 60 extra opslagcavernes (alternatief 2) kan nog veel aantrekkelijker zijn, waarbij de belangrijkste onzekerheid is hoe de waterstofmarkt zich ontwikkelt. Ook met die onzekerheid is deze conclusie robuust. De onzekere ontwikkeling van de waterstofmarkt maakt alternatief 2 aantrekkelijker dan alternatief 1: als de toekomstige waterstofmarkt lijkt op het TRANSFORM scenario, dan is de aanleg van 60 opslagcavernes de juiste keuze; mocht het ADAPT scenario werkelijkheid worden, dan zijn de misgelopen baten te overzien.

Met de analyseresultaten uit dit hoofdstuk hebben we feitelijk de onderliggende oorzaken achter marktfalen (paragraaf 2.5) gekwantificeerd. De onzekerheid over de behoefte aan opslagcavernes betreft in potentie € 3,8 miljard aan gemiste baten (zie Tabel 6.2). De investeringshorizon is lang, omdat de kostenbesparing in het waterstofsysteem pas vanaf 2040 wordt gerealiseerd (zie Tekstblok 6.1). En als in plaats van zoutwinning de behoefte aan energieopslag leidend is, dan kan een maatschappelijk saldo worden gerealiseerd van maximaal € 12,6 miljard (voor combinatie van de varianten A en B voor het TRANSFORM scenario, zie Figuur 6.1). Bij hoge zoutopbrengsten en lage bodemdalingskosten is aantrekkelijker om extra opslagcavernes aan te leggen door de zoutwinning uit te breiden (variant C) dan om ze aan te leggen in het huidige vergunningsgebied (variant A).

Varianten en combinaties daarvan, die (deels) uitgaan van de aanleg van opslagcavernes op zee, blijken zowel qua weerbaarheid van het waterstofsysteem als qua netto baten minder aantrekkelijk (Bijlage 9.8; paragraaf 6.2). Daardoor ligt het monetariseren van de weerbaarheid (voor zover mogelijk, zie paragraaf 5.6) niet op het kritische pad[92]. Omdat weerbaarheid en bodemdaling elkaar spiegelen (Bijlage 9.8), is bij de aanleg van opslagcavernes op land hun lokale inpassing (paragraaf 5.1) een punt van aandacht (en omgekeerd de weerbaarheid, mocht de overheid besluiten om in te zetten op waterstofopslag op zee).

Wachten met de investeringsbeslissing totdat meer bekend is over de haalbaarheid van waterstofopslag in gasvelden (uitstel) is welvaartsverlagend.

We zien momenteel geen aanwijzingen voor krimp van de zoutvraag, maar mocht de zoutmarkt krimpen in de periode tot 2050 (vanwege economische veranderingen of door gewijzigd overheidsbeleid), dan heeft dat een duidelijk negatief effect op de hoeveelheid opslagcavernes, die in synergie met zoutwinning kan worden gerealiseerd (varianten A, B, C, E en F). Op de overige varianten (met pekellozing, variant D en G) heeft dit geen effect.

[92] Dit geldt ook voor eventuele beperkingen aan de aanleg van opslagcavernes op zee in verband met Natura 2000 gebieden.

7 Handelingsperspectief

In dit hoofdstuk beantwoorden we de onderzoeksvraag (inclusief de drie daarvan afgeleide hoofdvragen) en formuleren we op basis daarvan aanbevelingen.

7.1 Beantwoording onderzoeksvraag

In deze paragraaf vatten we de bevindingen uit dit onderzoek samen op het niveau van de drie hoofdvragen (paragraaf 1.2) om te komen tot een antwoord op de onderzoeksvraag *Is een andere regulering van de zoutmarkt welvaartsverhogend?* Het antwoord daarop is volmondig ja. Het antwoord op de vraag *En hoeveel welvaartsverhogend is het?* volgt hieronder (hoofdvraag 2).

Hoofdvraag 1 Marktfalen
Is het zorgen voor een tijdige aanleg van opslagcavernes een overheidstaak?

We constateren, dat marktfalen (door transactiekosten en coördinatieproblemen; ondernemersbelang bij schaarste; overheidsfalen en eigendomsverhoudingen) waarschijnlijk is vanwege:

I. onzekerheid over de behoefte aan opslagcavernes, wat bij misinterpretatie van de ontwikkelingen op de waterstofopslagmarkt kan leiden tot € 3,8 miljard aan gemiste baten;
II. de lange investeringshorizon, waarbij de kostenbesparing in het waterstofsysteem pas vanaf 2040 wordt gerealiseerd;
III. de huidige regulering, waarbij opslagcavernes pas worden aangelegd wanneer er vraag naar opslagcapaciteit is, kan ertoe leiden dat cavernes te laat of in te geringe mate worden aangelegd, waardoor een potentieel maatschappelijk saldo van maximaal € 12,6 miljard netto baten wordt gemist.

Ook andere vormen van marktfalen, zoals beperkingen in toe- en uittreding tot de markt; trage omgevingsprocessen; en beperkte mogelijkheden om verzonken kosten te spreiden/verzekeren, kunnen optreden op de zout- en waterstofopslagmarkt. Deze vragen om een ander type beleidsinterventie dan waar wij ons in dit onderzoek op richten en hebben we daarom buiten beschouwing gelaten.

Hoofdvraag 2 Welvaartsverhogend
Is het aanleggen van opslagcavernes (en daar nu al mee beginnen) welvaartsverhogend? Zo ja, hoeveel verhogen extra cavernes de welvaart?

Samengevat is de aanleg van 30 extra standaard opslagcavernes op basis van de OPERA modeluitkomsten zeker welvaartsverhogend. De aanleg van 60 extra standaard opslagcavernes kan nog veel aantrekkelijker zijn als de vraag naar opslagcapaciteit hoog is[93]. Is die capaciteit niet zo hoog, dan is de aanleg van 60 cavernes minder aantrekkelijk dan 30 cavernes. Hierbij is de belangrijkste onzekerheid hoe het waterstofsysteem zich ontwikkelt.

[93] De genoemde aantallen kunnen veranderen als bij het caverne-ontwerp wordt afgeweken van de in dit onderzoek aangenomen definitie van een standaard opslagcaverne (Bijlage 9.4). Het gaat om een opslagvolume van 60 x 1 miljoen m^3 = 60 miljoen m^3 in de vorm van opslagcavernes.

Ook de ontwikkeling van de zoutmarkt is van belang. We zien momenteel geen aanwijzingen voor krimp van de zoutvraag, maar mocht de zoutmarkt krimpen in de periode tot 2050, dan heeft dat een duidelijk negatief effect op de hoeveelheid opslagcavernes, die in synergie met zoutwinning kan worden gerealiseerd.
Het rendement varieert sterk tussen de onderzochte varianten en energiescenario's (van onaantrekkelijk tot een opbrengst van bijna 11 euro per geïnvesteerde euro).

Concreet laten de modelresultaten zien, dat in een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland in 2050 tussen de 24 en 38 opslagcavernes nodig zijn: bij minder opslagcavernes nemen de maatschappelijke kosten toe. En voor het opvangen van fluctuaties in de productie van waterstof is flexibiliteit aan de vraagzijde belangrijk: als deze vraagresponse niet tot ontwikkeling komt, kan bovengrondse waterstofopslag dit binnen de opgelegde randvoorwaarden (waaronder broeikasgasneutraliteit in 2050) niet volledig opvangen en is ondergrondse opslag nog veel waardevoller dan hierboven berekend.

De aanleg van extra opslagcavernes op land versterkt de weerbaarheid van het waterstofsysteem. Wel zal op een andere manier moeten worden voorzien in strategische waterstofopslag, want dat vraagt om aanzienlijk meer opslagvolume dan de bovengrens van maximaal 60 standaard opslagcavernes, die tot 2050 kunnen worden aangelegd.

Voor een aantal onderwerpen (ruimtelijke inpassing, fysieke veiligheid, weerbaarheid en ecologie) verschillen de maatschappelijke kosten tussen de varianten voor plaatsing en verdeling van opslagcavernes. Dat levert een gemengd beeld op. Om dit aan te scherpen is vooral informatie nodig over de locatiespecifieke omstandigheden (buiten reikwijdte van dit onderzoek).

Hoofdvraag 3 Regulering
Hoe zou regulering eruit kunnen zien en wat is het effect op de zoutmarkt?

Nu al beginnen met aanleg is wenselijk, want gegeven de huidige zoutwinning kunnen tussen 2030 en 2050 *maximaal* 60 cavernes worden aangelegd als *nu* begonnen wordt met het voorbereiden ervan. Eén van de onzekerheden is of waterstofopslag in gasvelden technisch mogelijk en in de toekomst economisch aantrekkelijk is. Deze onzekerheid is niet zodanig, dat nu investeren in geschikte opslagcavernes onaantrekkelijk is.

Ontwikkelde zoutstructuren binnen bestaande winningsvergunningen voor zout (deels overlappend met opslagvergunningen voor aardgas en stikstof) bieden waarschijnlijk voldoende geologische ruimte en productiecapaciteit voor aanleg van 30 opslagcavernes. Dat is in alle onderzochte varianten aantrekkelijk (voor zover haalbaar gegeven de overige locatiespecifieke omstandigheden). De keuze voor hoe de volgende 30 cavernes het beste aangelegd kunnen worden is nog niet helder, want daarvoor zijn waarschijnlijk nieuwe gebieden nodig.

Bij het veranderen van de huidige regelgeving naar een vriendelijker vorm voor de aanleg van opslagcavernes is een aantrekkelijk investeringsklimaat van belang, net als de toekomstige (her)verdeling van de lusten en lasten van een waterstofeconomie (buiten reikwijdte van dit onderzoek).

7.2 Aanbevelingen

In deze paragraaf geven we een overzicht van onze aanbevelingen op grond van de bevindingen uit dit onderzoek.

De overheid is aan zet
Wij bevelen de overheid aan om haar ambities voor de groene waterstofmarkt te ondersteunen door de bestaande en toekomstige zoutwinning in Nederland in te zetten voor de aanleg van 60 opslagcavernes (alternatief 2).

Omdat dit aantal raakt aan de bovengrens van wat haalbaar is, is inzet op meerdere varianten verstandig. We bevelen daarom aan om de varianten A Binnen huidig vergunningsgebied, B Extra winning op land en C Verplaatste winning op land nader uit te werken met aandacht voor de locatiespecifieke omstandigheden en het vergroten van de weerbaarheid van het toekomstige waterstofsysteem.

Wij raden aan om ook de opslagcapaciteit in het nulalternatief (vraagresponse in chemische fabrieken, conversies/batterijopslag en waterstoftanks) op een gelijksoortige, locatiespecifieke manier nader uit te werken, zodat het politiek-bestuurlijke debat over de wenselijkheid van de varianten, inclusief herverdeling van lusten en lasten, onderbouwd kan worden gevoerd.

Terugvaloptie
Mocht implementatie van de drie aantrekkelijkste varianten onwenselijk blijken of onvoldoende zicht bieden op een tijdige aanleg van voldoende opslagcavernes, dan kan de (snelle) variant D Uitbreiding op land met pekellozing dienen als terugvaloptie. De synergie met de zoutwinning gaat dan verloren. We bevelen de overheid aan de voor pekellozing benodigde milieuonderzoeken en aanpassingen in wet- en regelgeving te regelen, zodat deze terugvaloptie uiterlijk rond 2030 daadwerkelijk beschikbaar komt.

Strategische waterstofopslagcapaciteit
Wij bevelen de overheid aan om het toekomstige waterstofsysteem te versterken door een acceptabel niveau van strategische waterstofopslagcapaciteit met aanboddiversifiëring vast te stellen[94]. In dat kader passen ook onze overige aanbevelingen:

I. In overleg treden met de Duitse overheid over de aanleg van tot 205 standaard opslagcavernes voor strategische waterstofopslag op meerdere locaties (risicospreiding) nabij de gezamenlijke grens, inclusief de aanleg van de benodigde transportinfrastructuur;
II. Stimuleren van de technologieontwikkeling voor waterstofopslag in gasvelden, inclusief demonstratieprojecten;
III. Stimuleren en monitoren van diversificatie van het waterstofaanbod;
IV. Meenemen van waterstofaanbodzekerheid in de nationale risicoanalysecyclus.

[94] Analoog aan aardgasopslagen: die zijn bewust met overcapaciteit gebouwd (Brouwer, 19 april 2022). https://www.ebn.nl/events/week-van-de-ondergrondse-energieopslag/hoe-gaan-we-om-met-de-aardgasopslagen-in-de-huidige-crisis-en-wat-kunnen-we-hiervan-leren-voor-de-toekomst/

8 Referenties

ANV Rijksbrede risicoanalyse nationale veiligheid [Rapport]. - https://www.nctv.nl/documenten/publicaties/2022/09/26/rijksbrede-risicoanalyse-nationale-veiligheid : Analistennetwerk Nationale Veiligheid, 2022.

ANV Verkenning risico's van de energietransitie voor de nationale veiligheid [Rapport]. - [sl] : Analistennetwerk Nationale Veiligheid, 2019.

Berenschot & Kalavasta Klimaatneutrale energiescenario's 2050. Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastrucuurverkenning 2030-2050 [Rapport]. - [sl] : Auteurs: Bert den Ouden, John Kerkhoven, Jan Warnaars, Rob Terwel, Max Coenen, Thijs Verboon, Tuuli Tiihonen & Anne Koot., 2020.

Beukel Jilles van den Waterstof: quo vadis? [Rapport]. - [sl] : Energeia. https://energeia.nl/trilemma/40091869/waterstof-quo-vadis, 21 maart 2021.

Caglyan Dilara Gulcin [et al.] Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe [Rapport]. - [sl] : International Journal of Hydrogen Energy. Volume 45, Issue 11,, 2020.

CMEO milieu-effectrapport zoutwaterlozing Eems [Rapport]. - [sl] : Centrum voor Milieu-effectonderzoek, 1988.

Commissie voor de milieu-effectrapportage Toetsingsadvies over het milieu-effectrapport zoutwaterlozing op de Eems [Rapport]. - Utrecht : [sn], 1989.

CPB/PBL Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse [Rapport]. - [sl] : Romijn, Gerbert, en Gusta Renes , 2013.

Cretì Anna en Villeneuve Betrand Gas Storage and Security of Supply [Rapport]. - [sl] : Chapter 5 in: Anna Cretì (ed) (2009) The Economics of Natural Gas Storage. A European Perspective. Springer, 2009.

Danish Energy Agency Technology Data - Energy storage [Rapport]. - [sl] : Energinet, 2018.

EC The role of gas storage in internal market and in ensuring security of supply [Rapport]. - [sl] : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REPORT-Gas%20Storage-20150728.pdf, 2015.

Gasunie Milieu-effectrapportage zoutwaterlozing Eems. Startnotitie. Nota van toelichting op het 'voornemen' [Rapport]. - 1987.

Guidehouse Extending the European Hydrogen Backbone. A European hydrogen infrastructure vision covering 21 countries [Rapport]. - [sl] : https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2021/06/European-Hydrogen-Backbone_April-2021_V3.pdf, 2021.

H21 H21 North of England. H21, Northern Gas Networks, Equinor, Cadent [Rapport]. - [sl] : https://h21.green/, 2018.

HCCS De afnemende leveringszekerheid van aardgas in Nederland [Rapport]. - Auteurs: Jilles van den Beukel en Lucia van Geuns : [sn], 2021.

Hof B., Van der Wal E. en Mot E. Kosten- en batenbegrippen in het Klimaatbeleid - Methodologisch achtergrondrapport [Rapport]. - [sl] : PBL & CPB, 2020.

H-Vision lue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry. A feasibility study report [Rapport]. - 2019.

HyUnder Assessment of the Potential, the Actors and Relevant Business Cases for Large Scale and Long Term Storage of Renewable Electricity by Hydrogen Underground Storage in Europe [Conferentie]. - [sl] : http://hyunder.eu/publications/, 2014.

Karaduman Ömer Economics of Grid-Scale Energy Storage in Wholesale Electricity Markets. [Rapport]. - [sl] : MIT Center for Energy and Environmental Policy Research, 2021.

LBEG Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2021 [Rapport]. - [sl] : Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 2021.

Minister van Financiën Betreft Kabinetsreactie werkgroep Discontovoet. Brief aan de Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal. 10 november 2020 [Rapport]. - [sl] : Kenmerk: 2020-0000206831, 2020.

Minister voor Klimaat en Energie Brief van de minister voor Klimaat en Energie, Aan de Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal. Den Haag, 29 juni 2022 [Rapport]. - [sl] : 32 813. Kabinetsaanpak Klimaatbeleid. Nr. 1060, 2022.

Ministerie EZK Appreciatie reacties consultatie marktordening. Bijlage bij Kamerbrief 'Voortgang ordening en ontwikkeling van de waterstofmarkt' [Rapport]. - [sl] : 22 juni 2022, 2022.

Ministerie EZK Betreft Ontwikkeling transportnet voor waterstof. Brief aan de Tweede Kamer [Rapport]. - [sl] : 29 juni 2022, 2022.

Ministerie van EZK Appreciatie reacties consultatie marktordening. Bijlage bij Kamerbrief 'Voortgang ordening en ontwikkeling van de waterstofmarkt' [Rapport]. - 22 juni 2022 : [sn], 2022.

Ministerie van Financien Kabinetsbrief bij de algemene MKBA Leidraad [Rapport]. - [sl] : Ons kenmerk IRF/2013/993, 6 december 2013, 2013.

Ministerie van I en W en Ministerie EZK Structuurvisie Ondergrond [Rapport]. - [sl] : https://open.overheid.nl/repository/ronl-da2bbe33-1384-4f85-9912-1b3d389e091e/1/pdf/bijlage-1-structuurvisie-ondergrond.pdf, 2018.

Mulder M en Zwart G Market failures and Government policies in gas markets [Rapport]. - [sl] : CPB Memoranda 143, 2006.

NAM Ondergrondse waterstofopslag in gasvelden [Conferentie]. - [sl] : https://www.shell.nl/content/dam/royaldutchshell/documents/business-function/external-relations/europe/netherlands/white-paper-hydrogen-storage-finalnl.pdf, 2022.

Rli Waterstof de ontbrekende schakel [Rapport]. - Raad voor de leefomgeving en infrastructuur : [sn], 2021.

RVO Routekaart Waterstof [Rapport]. - [sl] : https://nationaalwaterstofprogramma.nl/PageByID.aspx?sectionID=238846&contentPageID=2339011, 2022.

Scheepers M.J.J. Een Klimaaneutraal energiesysteem voor Nederland - Nieuwe verkenning toont grenzen mogelijkheden [Rapport]. - [sl] : TNO, 2022.

Scherpbier E. L. J. en Eerens H. C. Decarbonisation options for the Dutch salt industry [Rapport]. - [sl] : PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO, The Hague, 2021.

SodM De Staat van de sector zout [Rapport]. - 2018b.

SodM Staat van de Sector Geothermie [Rapport]. - https://www.sodm.nl/documenten/rapporten/2017/07/13/staat-van-de-sector-geothermie : [sn], 2017.

SodM Toekomstbeelden van de energietransitie [Rapport]. - [sl] : https://www.sodm.nl/documenten/rapporten/2019/01/7/toekomstbeelden-energietransitie, 2018a.

STORAG ETZEL Das Infozentrum [Rapport]. - [sl] : https://www.storag-etzel.de/info-service/infozentrum-fuehrungen. Geraadpleegd 14-3-2022, 2022.

STORAG ETZEL KAVERNEN SPEICHER ETZEL. Standortbroschuere kavernenspeicher etzel [Rapport]. - [sl] : www.kavernenspeicher-etzel.de, 2017.

TNO & EBN Haalbaarheidsstudie offshore ondergrondse waterstofopslag [Rapport]. - 2022.

TNO & EBN Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 – 2050 (I): Technische evaluatie van vraag en aanbod [Rapport]. - Auteurs: Serge van Gessel (TNO), Thijs Huijskes (EBN), Joaquim Juez-Larré (TNO), Rory Dalman (TNO) : TNO2021 R11125, 2021.

TNO & EBN Ondergrondse Opslag in Nederland. Technische verkenning [Rapport]. - TNO Rapport 2018 R11372 : S.F. van Gessel (TNO) J. Breunese (TNO), J. Juez Larré (TNO), T.D. Huijskes (EBN), G. Remmelts (TNO), 2018.

TNO Large-Scale Energy Storage in Salt Caverns and Depleted Fields (LSES) – Project Findings [Rapport]. - TNO Report 2020 R12006 : Groenenberg R., Koornneef J., Sijm J.,Janssen G., Morales-Espana G., van Stralen J.,Hernandez-Serna R., Smekens K., JuezLarré J., Goncalvez C., Wasch L., Dijkstra H.,Wassing B.,

Orlic B., Brunner L., van der Valk K., van Unen M., Hajonides van der Meulen, 2020b.

TNO Techno-Economic Modelling of Large-Scale Energy Storage Systems [Rapport]. - Remco Groenenberg, Joaquim Juez-Larré, Cintia Goncalvez, Laura Wasch, Hester Dijkstra, Brecht Wassing, Bogdan Orlic, Logan Brunner, Kaj van der Valk, Thomas Hajonides van der Meulen, Karin Kranenburg-Bruinsma : TNO 2020 R12004, 2020c.

TNO The role of large-scale energy storage in the energy system of The Netherlands, 2030-2050 [Rapport]. - Sijm J., Janssen G., Morales-Espana G., van Stralen J., Hernandez-Serna R. and Smekens K. : TNO Report 2020 P11106, 2020a.

Westra H. M. Afvalwaterleidingen in de provincie Groningen: De HOWA en de VKA [Rapport]. - [sl] : Milieukunde Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen. Universiteit Utrecht, 1993.

Wildt de B., Quirke R. en Sijm Jos Barriers to demand response [Rapport]. - [sl] : TNO 2022 P10368, 2022.

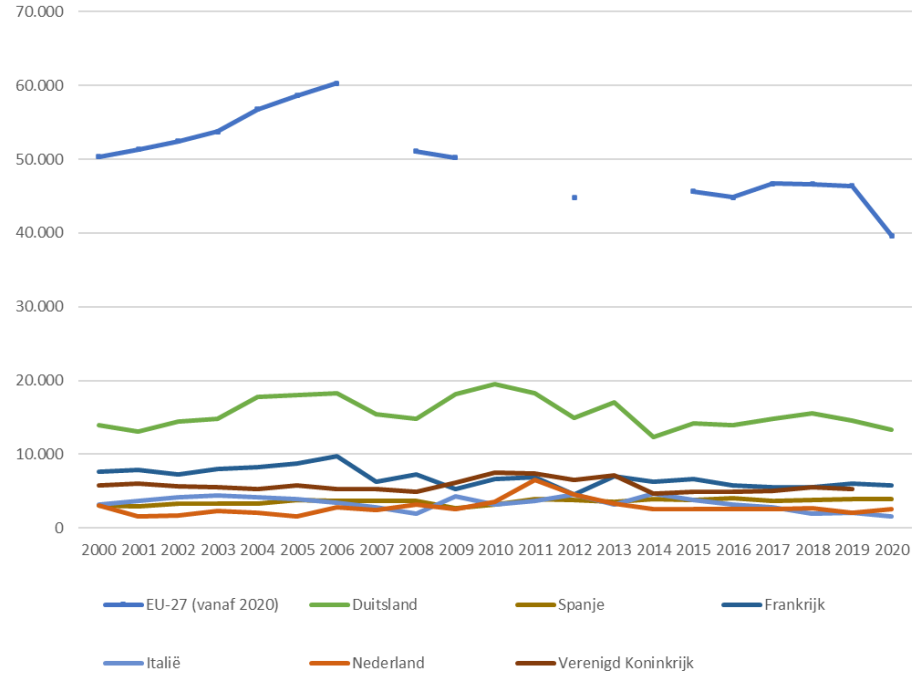
9 Bijlagen

9.1 Nederlandse en Europese zoutmarkt

In deze bijlage bespreken we eerst de toepassingen van zout en de marktafbakening. Aansluitend bepalen we een gemiddelde zoutprijs.

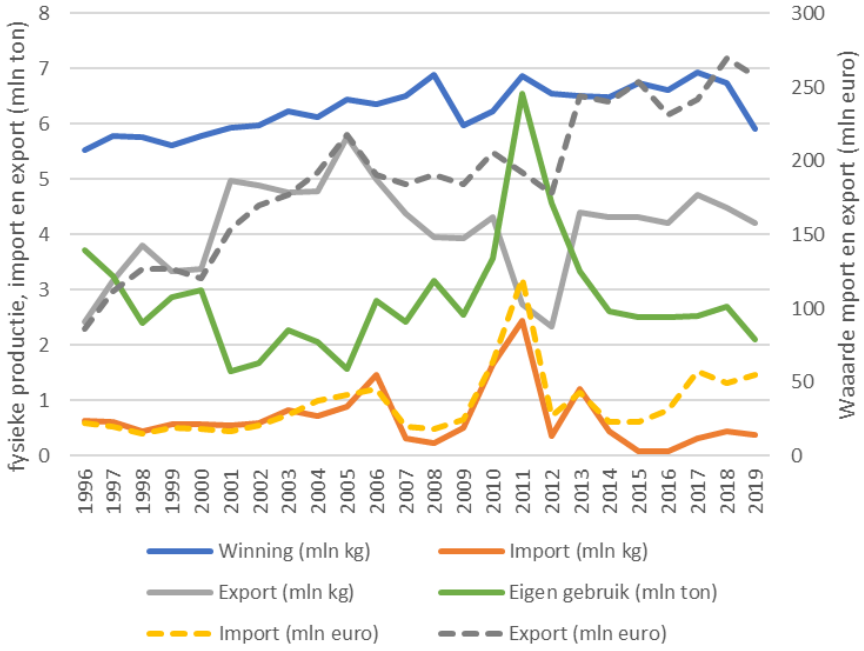
Toepassingen
Steenzout heeft verschillende toepassingen (SodM, 2018b). Ongeveer 40% wordt gebruikt voor elektrolyse. Dat is een chemisch proces, waarin pekel wordt omgezet in andere chemische producten voor onder meer de productie van PVC, aluminium en papier. Van de rest van het zout is 25% bestemd voor strooizout en 15% voor consumptiezout. De overige 20% wordt onder andere gebruikt voor vaatzout, onthardingszout, zout voor diervoeder en zout voor farmaceutisch gebruik (o.a. voor dialyse en fysiologisch zout). Zout is ook verbonden met andere industriële producten, zoals chloor, soda, kali, zeep en glas.

Het zoutgebruik in de Europese Unie is tot 2006 gestegen en daarna gedaald met bijna 14.000 ton tot 2019 (Figuur 9.1)[95]. In de meeste Europese landen is over deze periode het zoutgebruik gedaald (met de nodige fluctuaties per land). De afname is het grootst geweest in Duitsland en Frankrijk, in beide landen zo'n 3.600 ton op jaarbasis. Het binnenlands zoutverbruik[96] piekt rond 2011[97] (Figuur 9.2).



Figuur 9.1. Zoutgebruik in de Europese Unie en geselecteerde landen. Bron: Eurostat, Material flow accounts. Salt

[95] EU-27 optelling door Eurostat voor enkele jaren niet gegeven
[96] saldo productie + import - export
[97] Een verklaring hiervoor ontbreekt. Dezelfde piek komt in de Eurostat gegevens voor. Dit is geen verklaring of bewijs van het ontbreken van fouten, want de data van Eurostat zijn afkomstig van de nationale, statistische bureaus.



Figuur 9.2 Zout in Nederland (natriumchloridezout en afgeleide producten). Bron: CBS, 2022[98]. Winning, invoer en uitvoer van materialen naar soort; nationale rekeningen. Alle jaren betreffen voorlopige cijfers.

Afbakening van de markt

Zout wordt internationaal verhandeld, tegelijk wordt veel zout gebruikt daar waar het gewonnen wordt (Tabel 9.1). Dit kan een gevolg zijn van transportkosten of van een historische ontwikkeling[99]. In de periode 2008-2021 vond zo'n 87% van de export binnen Europa plaats en ging ruim 40% naar Duitsland. De twee belangrijkste exportmarkten daarna zijn België (15%) en Noorwegen (10%). De import is duidelijk kleiner dan de export en komt iets vaker van buiten de Europese Unie (2/3 van binnen de EU), waarvan iets minder dan 40% uit Duitsland.

De 3 belangrijkste kenmerken van de Europese zoutmarkt zijn (SodM, 2018b):

I. De Europese zoutmarkt wordt bediend door enkele multinationals en grotere bedrijven. Nobian[100] en European Salt Company GmbH & Co. KG (ESCO) hebben elk ongeveer een vijfde van de markt in handen. ESCO wint zout in Duitsland, Frankrijk, België, Nederland[101], Spanje, Portugal en Italië. Nobian wint zout in Nederland en in Denemarken. Daarnaast zijn andere bedrijven actief in Frankrijk (Salins du Midi), Duitsland (Sudsalz) en in het Verenigd Koninkrijk (Salt Union). Zij bedienen gezamenlijk ruim 40% van de markt;
II. Alle grote concurrenten beschikken over uitgebreide distributienetwerken en kunnen elkaar in elk land beconcurreren;
III. Een derde deel van de wereldwijde zouthandel vindt binnen Europa plaats.

[98] https://opendata.cbs.nl/statline#/CBS/nl/dataset/83180NED/table?ts=1658731087134.
[99] zout- of pekelverwerkende industrie nabij historische zoutwinningslocaties
[100] toen AkzoNobel
[101] Frisia is onderdeel van ESCO

Tabel 9.1 Uitvoer en invoer van zout in Nederland. Gemiddelde over de periode 2008-2021

	Totaal	Europa (exclusief Nederland)	België	Duitsland	Finland	Frankrijk	Noorwegen	Spanje	Verenigd Koninkrijk
Uitvoerwaarde (mln €)	232,3	202,9	34,7	92,1	10,5	14,1	21,5	3,0	3,4
Uitvoerhoeveelheid (mln ton)	4,0	3,5	0,6	1,8	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1
Invoerwaarde (mln €)	48,2	37,3	6,6	18,0	0,2	2,1	0,0	1,7	3,0
Invoerhoeveelheid (mln ton)	0,6	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Uitvoer (% van de waarde)	100	87	15	40	5	6	9	1	1
Uitvoer (% van de hoeveelheid)	100	88	14	45	6	3	12	1	1
Invoer (% van de waarde)	100	77	14	37	0	4	0	4	6
Invoer (% van de hoeveelheid)	100	66	5	38	0	4	0	5	4

Bron: CBS 2022 statline[102]. Goederensoorten naar land; minerale brandstoffen en chemie.

Tabel 9.2 Zoutgebruik en productie in diverse Europese landen in 2019 (1000 tonnen)[103]. 2019 is genomen als laatste pre-coronajaar. Bron: Eurostat, Material flow accounts. Salt.

	winning	verbruik	import	export
Europese unie - 27 landen	45.312	46.610	4.190	2.892
Duitsland	16.230	15.530	3.126	3.825
Nederland	6.751	2.705	437	4.483
Spanje	5.336	3.814	140	1.662
Frankrijk	4.965	5.507	723	181
UK	4.700	5.463	1.130	367
Polen	4.125	4.570	859	415
Italië	1.894	1.887	767	774
Oostenrijk	1.177	846	264	594
Bosnië Herzegovina	1.063	1.020	59	103
Denemarken	600	617	456	439
Zwitserland	530	515	12	28
Tsjechië	0	578	619	41
Hongarije	0	924	1.004	79
Zweden	0	760	776	16
Noorwegen	0	1.304	1.360	56
België			1.368	155

[102] https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/81268ned/table?ts=1659615002227

[103] Veel van de invoer en uitvoer van zout in Europese landen vindt plaats binnen de Europese unie, waardoor de invoer en uitvoer voor de hele EU kleiner is dan de som van de afzonderlijke landen.

De zoutmarkt is economisch gezien niet helder afgebakend (dat vereist een aparte studie). Er lijkt een redelijk aantal vragers te zijn, al weten we niet hoe geconcentreerd de vraag is (zeker bij een geografisch beperkte marktafbakening[104]). Ook is ons niet bekend hoeveel van deze vraag is ingevuld met lange termijncontracten of met verticale integratie[105]. Zout lijkt een redelijk homogeen goed te zijn en de markt is ook redelijk transparant.

In Europees verband is Nederland de grootste exporteur van zout (Tabel 9.2) en met 15% de tweede producent in de Europese Unie[106]. Qua verbruik staat Nederland op een zesde plek. Ook wereldwijd is Nederland een grote speler op de zoutmarkt (in ieder geval in termen van waarde): 278 miljoen $ in 2015.[107]

Zoutprijs

De zoutprijs varieert afhankelijk van de toepassing (tussen circa 40 euro per ton voor strooizout voor wegen tot tienmaal zo veel voor geraffineerd keukenzout, SodM, 2018); er is geen eenduidige zoutprijs. De gemiddelde zoutprijs kunnen we op twee manieren berekenen. De eerste manier is gebaseerd op de omzet in euro's en volume voor de hele zoutsector (exclusief Nedmag). De tweede manier is op basis van de marktprijs per toepassing en het marktaandeel per toepassing. Dit geeft een prijs van respectievelijk €53,30 en €56,80 per ton zout (Scherpbier, et al., 2021).

Een andere indicator is de prijs aan de grens (Figuur 9.3). De laatste 10 jaar werd gemiddelde 61% van de Nederlandse zoutproductie geëxporteerd (fluctuerend tussen 36% en 71%). De laatste 5 jaar wordt gemiddeld 67% van de zoutproductie geëxporteerd. Over de periode 2010-2019 was de gemiddelde exportprijs €59,16 en de importprijs €132,83. Over deze periode was de exporthoeveelheid (in ton) ruim 16 maal zo groot als de importhoeveelheid. Daardoor zegt de exportprijs meer over de gemiddelde zoutprijs aan de grens dan de importprijs. Over de laatste 5 jaar ligt de exportprijs gemiddeld iets lager (€57,31) en de importprijs juist hoger (€215,53). Ook de verhouding export ten opzichte van importvolume ligt hoger (met krap 28). Als de import laag is, ligt de prijs juist hoog.

In deze studie hanteren we een gemiddelde prijs van €55/ton zout.[108]

---

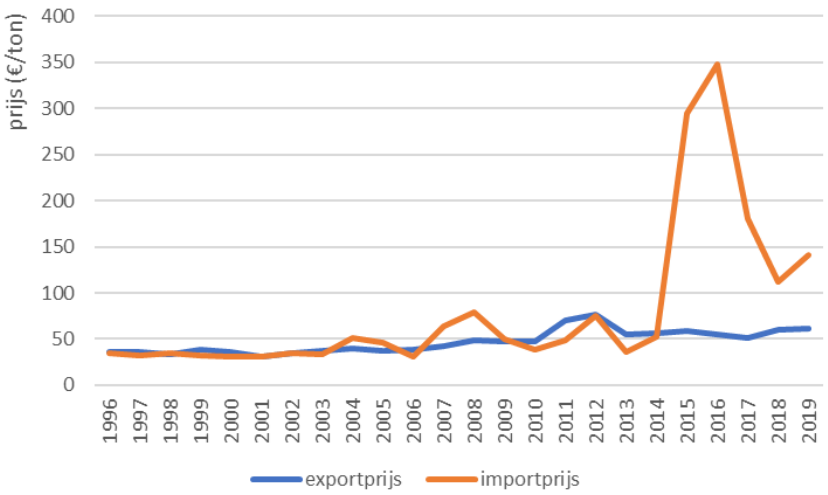
[104] De Nederlandse markt is geconcentreerd (één speler bedient ruim 80 % van de markt), maar in Europa als geheel geldt dat niet. Als de markt meer regionaal is (Noordwest Europa), dan ligt de concentratie behoorlijk hoog.

[105] zoutwinner en afnemer zijn dan onderdeel van hetzelfde bedrijf

[106] Duitsland is de grootste producent én gebruiker van zout; een derde van al het zout in de Europese Unie wordt in Duitsland gewonnen en gebruikt.

[107] Deze exportwaarde komt overeen met de waarde van het CBS na omrekening van $ in €. https://www.worldatlas.com/articles/20-top-salt-exporting-countries.html

[108] Op internet staan soms hogere prijzen. Bijvoorbeeld: https://rocksaltusa.com/bulk-rock-salt-prices-per-ton-and-why-they-matter/ geeft een prijs van 240 – 280 $/ton (geraadpleegd 15 augustus 2022). Deze prijs is afgeleid door de prijs voor zout per 25 kilo zak maal 40 te vermenigvuldigen om een prijs per ton te krijgen. De betreffende fabrikant gebruikt dit om aan te zetten tot tijdig (voor de winter) bestellen. De doorklik naar hun prijzen geeft maar voor één locatie een prijs en die ligt met 99 dollar al flink lager (en gaat over minimum afname van 22 ton).



Figuur 9.3 Import- en exportprijs van zout. Eigen berekening op basis van CBS, 2022[109]. Winning, invoer en uitvoer van materialen naar toepassing.

[109] https://opendata.cbs.nl/statline#/CBS/nl/dataset/83180NED/table?ts=1658731087134.

9.2 Ontwikkeling van opslagcavernes

In deze bijlage geven we een korte toelichting op de te doorlopen stappen voor de aanleg en ontwikkeling per opslagcaverne, of een serie van opslagcavernes (Tabel 9.3).

Tabel 9.3 Stappen voor de aanleg en ontwikkeling per opslagcaverne. Bij de tijdsduur gaan we uit van gangbare omstandigheden[110].

Nummer	Stap	Duur	Omschrijving
1	Verkenning, screening en haalbaarheid	enkele maanden tot ca. 2 jaar	Identificeren van kansrijke locaties binnen gestelde randvoorwaarden (geologische en technische haalbaarheid, ruimtelijke inpassing en aansluiting op de marktvraag).
2	Exploratie en vergunningaanvraag	2 tot 4 jaar	Vaststellen geschiktheid van het zoutvoorkomen (één of meerdere proefboringen om inzicht te krijgen in de interne opbouw van de structuur, de kwaliteit van het zout en zijn mechanische eigenschappen). Aanvraag winnings- of opslagvergunning (ook relevant in een reeds ontwikkeld zoutvoorkomen met een winningsplan in een bestaande vergunning).
3	Planning en ontwerp	6 maanden tot een jaar	Indienen winningsplan. Indienen opslagplan. Bij opslag wordt ook een Milieu- en effectrapportage (MER) opgesteld als onderdeel van de Rijkscoördinatieregeling.
4	Ontwikkeling van de locatie	ca. 1-2 jaar	Boren en afwerken van de putten, aanleggen van pekelverwerkende faciliteiten of aansluiten van de locatie op een bestaande faciliteit (via pekelleidingen). Het lozen van gewonnen pekel is onder huidige wetgeving niet toegestaan.
5	Aanleg cavernes en verwerking van gewonnen pekel	3 – 7 jaar	Logen van de caverne. De benodigde tijdsduur hangt af van het beoogde cavernevolume en de gewenste kwaliteit van de pekel.

[110] geen vertragingen door o.a. technische problemen, extra lange vergunningprocedures, maatschappelijke draagvlakissues, etc.

6	Suspenderen van caverne	onbepaalde periode	Dit kan worden ingezet als de caverne een ideale vorm/omvang heeft voor opslag om de opslagoptie open te houden. Als verder wordt geloogd vervalt de opslagoptie.
7	Gereed maken voor opslag	6 maanden tot 2 jaar?	Put en caverne geschikt maken voor opslag, inclusief aansluiting op de opslagfaciliteit. Daarna wordt de pekel in de caverne weggepompt en kan de eerste vulling met (kussen)gas plaatsvinden.
8	Uitvoering van de opslagactiviteiten	typisch 20 tot 40 jaar	Opslagactiviteiten. Levensduur is afhankelijk van de technische staat van caverne en put, het verdienmodel of maatschappelijke opslagbehoefte. Tijdens periodieke onderhoudswerkzaamheden, die soms tot enkele maanden in kunnen beslag nemen, is de opslag buiten werking.
9	Ontmanteling, afsluiting en abandonnering	enkele maanden tot een jaar	De caverne wordt in de regel weer gevuld met pekel en vervolgens afgekoppeld en gesloten, waarna de infrastructuur wordt verwijderd en de nazorg, inclusief monitoring, een aanvang neemt.

9.3 Waterstofopslag in gasvelden

In deze bijlage zetten we de voor- en nadelen van de technologie voor waterstofopslag in gasvelden op een rij (Tabel 9.4).

Tabel 9.4 Mogelijke voor- en nadelen van waterstofopslag in gasvelden

Voordelen	**Nadelen**
Lege gasvelden liggen (zonder logen) klaar voor ontwikkeling of komen beschikbaar in de komende 5-10 jaar	
Groot volume (een gemiddeld gasveld representeert het opslagvolume van enkele tientallen cavernes)	De werkgas/kussengas verhouding is meestal ongunstiger dan bij zoutcavernes. Verder is er mogelijk sprake van geochemische of microbiologische omzetting van het ondergronds opgeslagen waterstof, wat kan leiden tot problemen[111]. Waterstof uit gasvelden moet mogelijk eerst gereinigd worden voor het bruikbaar is, en eventueel is het niet meer bruikbaar voor toepassing in chemische processen (vanwege de hoge kwaliteitseisen die daar aan het waterstof worden gesteld).
Mogelijkheid voor geografische spreiding (bijvoorbeeld in Zuid/Noord Holland, waar geen zoutvoorkomens liggen)	
Geen bodemdaling (bodemdaling is feitelijk al opgetreden tijdens gaswinning en de vulling met waterstof stopt verdere daling of maakt deze deels ongedaan)	Sommige gasvelden zijn gevoelig voor bevingen.
Meerdere putten in 1 veld maakt de productie schaalbaar (bij zoutcavernes moet daarvoor een nieuwe holruimte worden aangelegd)	
Lege gasvelden of bestaande aardgasopslagen in gasvelden zijn meestal reeds aangesloten op gasinfrastructuur	

[111] Verliezen, verminderde terugneembaarheid of contaminatie van het opgeslagen gas, verminderde performance, op den duur aantasting van putmaterialen of afsluitingen en daarmee tot veiligheidsissues bovengronds.

9.4 Standaard opslagcaverne

In deze bijlage definiëren we een standaard opslagcaverne.

Operationele eisen voor opslag
Opslagcavernes kunnen worden aangelegd in ondergrondse zoutlagen volgens specifieke ontwerpcriteria, die aansluiten op de operationele eisen van opslag. Daarbij zijn vorm (sigaarvormig), volume en toegestane drukbereik (als afgeleide van de diepte[112]) belangrijke parameters[113]. Immers, bij opslag wordt de caverne afwisselend met een gas (nu meestal aardgas of perslucht, in de toekomst groene waterstof) gevuld en leeggehaald. Daarbij is sprake van frequente wisselingen in druk. Om de stabiliteit van de caverne te waarborgen moeten de maximum- en minimumdruk binnen een vastgestelde bandbreedte blijven[114]. Dat is bepalend voor het werkvolume. En voor de opslagcapaciteit. Want hoe dieper het hoogste punt van een caverne ondergronds ligt, hoe hoger de druk in de caverne kan worden opgebouwd en dus hoe groter de opslagcapaciteit. Het gangbare dieptebereik ligt tussen de 1000 en 1500 meter (Figuur 9.4). het ontwerp van een caverne hangt ook af van de lokale zoutsamenstelling en de precieze geologische structuur te plaatse.

Bestaande winningscavernes in Nederland voldoen niet aan bovenstaande, operationele eisen[115]. Daarmee zijn ze in normale omstandigheden[116] ongeschikt om te (her)gebruiken als opslagcaverne. Omgekeerd zijn opslagcavernes economisch gezien suboptimaal voor zoutwinning.

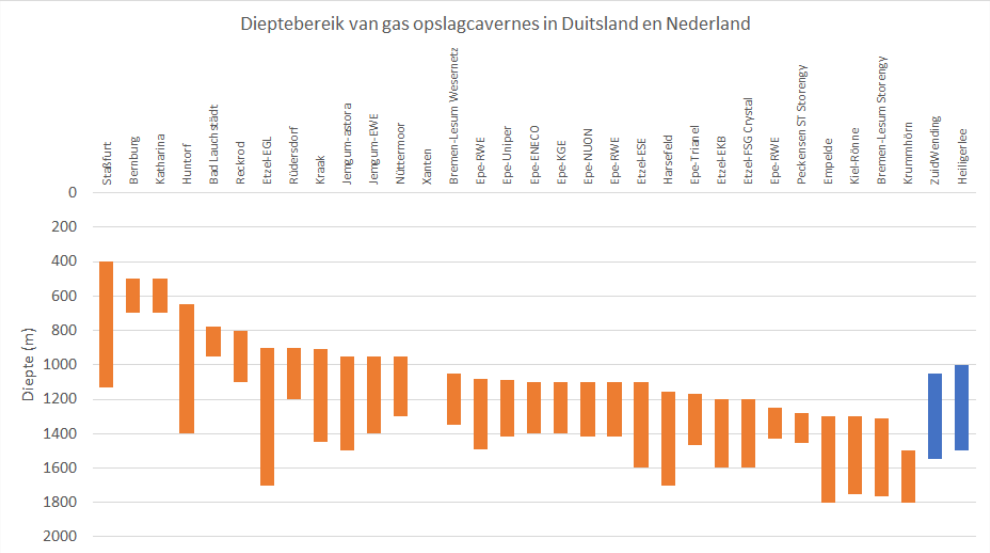
Definitie van een standaard opslagcaverne
Om opslagcavernes onderling te kunnen vergelijken definiëren we een gestandaardiseerde opslagcaverne als volgt:

Een standaard opslagcaverne heeft een volume van 1 miljoen m^3 en een diepteligging tussen de 1000-15000 meter. De gemiddelde diameter is 90 meter. De caverne heeft een drukbereik van P_{min} 80 bar tot P_{max} 180 bar. Hierdoor gaat er 75 miljoen m^3 waterstof in als kussengas en evenveel als werkgas. De maximum opslagcapaciteit per caverne is daarmee 0,81 PJ ofwel 225 GWh.[117]

---

[112] Nabij het aardoppervlak gedragen de meeste zouten zich als een hard en bros materiaal. Daaronder gedraagt het zich door de steeds hogere druk en temperatuur als een soort taaie stroop of tandpasta (zoutkruip). Voor steenzout (overwegend natriumchloride) ligt deze overgang ruwweg rond de 1000 meter diepte. Cavernes onder deze diepte worden daardoor in de loop van de tijd kleiner, door de hoge druk worden ze als het ware langzaam dichtgedrukt.
[113] Voor meer technische details zie https://www.nlog.nl/zout en https://www.nlog.nl/jaarverslagen.
[114] https://kemprogramma.nl/blog/view/33d9f684-27ef-4e30-bde0-54487d91bdd9/kem-01-geomechanical-factors-determining-fault-criticality-during-pressure-cycling-of-underground-gas-storage-in-reservoirs-finished
[115] Op de locatie Barradeel (Harlingen) zijn de cavernes op grote diepte (> 2,5 km) aangelegd, waardoor deze als gevolg van zoutkruip vrij snel weer worden dichtgedrukt. De cavernes rond Hengelo liggen weer te ondiep (circa 350 m) voor het opbouwen van hoge druk. Bij Veendam wordt een ander type zout (magnesiumzout) ontgonnen met een grillig gevormde caverne als gevolg. En de winningscavernes in Zuidwending en Heiligerlee hebben een geometrisch volume, dat ruimschoots groter is dan 1 miljoen m^3. Bovendien ligt hun zoutdak mogelijk te ondiep voor de gewenste drukopbouw.
[116] Hierbij kunnen de stand van economie en technologie een rol spelen: als opslagcapaciteit heel schaars is, kan ook minder efficiënte opslag aantrekkelijk zijn.
[117] Analoog aan de definitie van (TNO & EBN, 2018) en (TNO, 2020b) voor opslagcavernes met een volume van 600.000 m^3.

Figuur 9.4 Overzicht van het dieptebereik, waarbinnen bestaande opslagcavernes in Duitsland (oranje) en Nederland (blauw) zijn aangelegd. Bronnen: i) https://www.lbeg.niedersachsen.de/download/177852/Untertage-Gasspeicherung_in_Deutschland_Stand_1.1.2021_.pdf en ii) Opslagplannen Zuidwending en Heiligerlee (www.nlog.nl).



9.5 Onderbouwing bovengrens aantal opslagcavernes

In deze bijlage berekenen we de bovengrens aan het aantal opslagcavernes, dat tot 2050 gerealiseerd kan worden, verondersteld dat de regulering van de zoutwinning de behoefte aan waterstofopslag volgt (paragraaf 2.5).

We veronderstellen, dat de doorgaande steenzoutproductie (op het huidige productieniveau) tot 2050 helemaal wordt ingezet voor de aanleg van standaard opslagcavernes (in lijn met paragraaf 2.5 en Hoofdstuk 3). Dat leidt (Tabel 9.5) afgerond tot de aanleg van maximaal **60 opslagcavernes**.

Tabel 9.5 Jaarlijkse steenzoutproductie als indicator voor de mogelijke aanleg van standaard opslagcavernes tot 2050

	Nobian + Frisia	Nobian	Nobian 1000-1500m***	
Gemiddelde steenzoutproductie in de periode 2014-2018*	6,4	5,6		Mton/jaar
Soortelijk gewicht van steenzout	2,164	2,164		ton/m^3
Cavernevolume**	3,0	2,6	1,9****	miljoen m^3
Tijdshorizon	20	20	20	jaar
Totaal te logen cavernes**	59,1	51,8	38,0	
Aantal aangelegde cavernes in 2030	7	7	7	
Totaal aantal cavernes in 2050 (excl zoutkruip)	66,1	58,8	45,0	
Totaal aantal cavernes in 2050 (incl. zoutkruip)****	63,0	55,9	42,7	

* De tabel is exclusief het magnesiumzout uit Veendam.
** Regel 3 = regel 1/regel 2. Regel 5 = regel 3 x regel 4.
*** gebaseerd op hoeveel zoutwinning (uitgedrukt in geometrische ruimte) op korte termijn verwacht wordt in de zoutlaag tussen 1500-1000 meter
**** TNO & EBN (2018)

9.6 Pekellozing in de praktijk

In deze bijlage gaan we in op pekellozing aan de hand van een aantal projecten uit de praktijk (Tabel 9.6).

Tabel 9.6 Voorbeelden van projecten met pekellozing

Gateway Gas storage project, Eastern Irish Sea, VK Dit betreft een ontwikkelstudie (2007) voor een ondergronds gasopslagproject (methaan). De locatie ligt 24 km uit de kust en er zijn 20 opslagcavernes met een enkele put voorzien, waarbij zeewater wordt gebruik voor de caverne-aanleg. Daarom is voorzien in een mono-pod voor de put ten behoeve van het oplossen van het zout tijdens de aanlegfase en voor injectie/extractie van gas tijdens de opslagfase. Een Milieu Effect Rapportage (MER) was onderdeel van dit project (Marine Works Regulations, no 22, 2007 (MWR)), welke rekening houdt met per caverne pekellozingen van 675 m^3/uur gedurende 2 tot 4 jaar. Modelstudies tonen voor deze locatie een minimaal en kortdurend effect ontstaat op het mariene milieu aan. Dit effect zal beperkt zijn tot het gebied direct rondom de lozingsmond/mono-pod. De relatief zware pekel zal naar de bodem van de zee zinken, waarbij de pekel geleidelijk verdunt en zich door stromingen verspreidt. Daardoor ontstaat een zone met verhoogde saliniteit met een piek van 7 ppt boven de omgevingswaarde (ca. 35 ppt). Deze impact beperkt zich tot minder dan 500 m van het platform. De MER voorziet, dat deze lozing geen significante impact heeft en zich bovendien hersteld wanneer de lozing wordt beëindigd. Ook bevoegd gezag (Cefas, Centre for Environment, Fisheries, and Aquaculture Science, een agentschap van Defra (the Government's Department of Environment, Food and Rural Affairs) heeft vastgesteld, dat de impact verwaarloosbaar is. Wel dient de uitvoerder de lozingen te monitoren om te verzekeren dat de verspreiding en oplossing van de pekel conform de modellen verloopt en om vast te kunnen stellen of mitigatie wenselijk is. Naast pekellozing is bij uitvoering van dit project ook voorzien, dat ruim 20 ton gesteentegruis vrijkomt bij het boren van de putten. Dat leidt dan tot een tijdelijke toename van gesuspendeerde sedimentdeeltjes en het ontstaan van sedimenthopen, die naar verwachting gaandeweg door de getijdenstromen zullen worden verspreid over een veel groter gebied. Bron: Gateway Gas Storage Project - Offshore Environmental Statement Addendum 1, December 2011 GatewayAddendum1.pdf
Nedmag Brak water als restproduct van de magnesiumzoutwinning wordt geloosd op de Eems door de Veenkoloniale Afvalwater Leiding (Nedmag, 2021; Westra, 1993). Zowel de hoeveelheid water als het zoutgehalte ervan zijn fors minder dan waar sprake van is bij onze MKBA varianten.

Gasunie
In het kader van de aanleg van opslagcavernes is eind jaren 80 van de vorige eeuw een MER opgesteld voor zoutlozing in de Eems (CMEO, 1988). Deze ging over de aanleg van 10 cavernes van 500.000 m^3 per stuk in 4 jaar (Gasunie, 1987). Men ging in de berekening uit van vertraagde vergunningverlening, waardoor de doorlooptijd van het logen korter (bijna half zo kort) werd en er meer cavernes tegelijk geloogd zouden worden. Dat werkte door in de zoutlozingsprognose: de voorgestelde lozing zou in het slechtste geval leiden tot een tijdelijk effect van maximaal 7% sterfte van organismen (plankton) nabij de lozingsmond.

Bij onafhankelijke toetsing kwam naar voren, dat de MER de ernst van deze planktonsterfte onderschatte (Commissie voor de milieu-effectrapportage, 1989) en dat alternatieven (pekelverwerking of het uitsmeren van de lozing over een langere periode) meer aandacht hadden moeten krijgen. Kortom, de vraag of de lozing niet voorkomen kon worden verdiende meer aandacht.

Daar AKZO de pekel kon verwerken (onder andere doordat de cavernes uiteindelijk op een andere locaties aangelegd zijn dan eerder voorzien) is er uiteindelijk geen zout geloosd.

Island magee Gas Storage Facility (IGSF)

Project: Geplande (voor 2017) en nog niet gerealiseerde ondergrondse gasopslag in 7 cavernes op een diepte van 1500 m in de Perm zoutlagen (equivalent van de Zechstein) van Noord-Ierland bij Larne Lough.

De pekellozing vindt plaats op 450 meter uit de kust bij een waterdiepte van 27 meter. De pekelsaliniteit bedraagt maximaal 260 promille bij een temperatuur van ca. 2° C boven de temperatuur van het innamewater. Bij het bereiken van de zeebodem is de concentratie verdund tot 37,6 - 50,5 ppt. *Medium to far-field dispersion* modellen hebben berekend, dat een lozing tot 1000 m^3/uur (door twee diffusers) minimale impact heeft op enige afstand van de lozingsmond. Maximale saliniteitstoename van 0,5 psu boven de achtergrondwaarden worden niet voorzien op meer dan 100 meter van de diffuser. Een saliniteit van meer dan 36 psu wordt niet voorzien op meer dan 100 meter afstand.

Bron: IBE1547 | IGSF Brine Dispersion Modelling | F01 | 30 October 2019, https://www.islandmageeenergy.com/Environmental statement, non technical summary

Duitsland
In Duitsland bestaan momenteel cavernes op land, waarvan de pekel op de Waddenzee is geloosd. De effecten van de pekellozing zijn door Bundesanstalt für Wasserbau beoordeeld en afgestemd met het lokale bevoegd gezag (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) in Aurich als regionale hydrologische dienst en de stad Leer (Departement van Water Management). Dit betrof met name de saliniteit, de hoeveelheid geloosde pekel en de effecten op de bodemorganismen.

Het monitoringsprogramma heeft geen aanleiding gegeven tot aanpassing van de voorwaarden in de watervergunning voor pekellozing: het maximum blijft 3000 m^3/uur.

Het monitoringsprogramma is voortgezet tot de grootste lozingen plaatsvonden (2012/2013). Tevoren werd verondersteld, dat sprake zou zijn van verwoestijning van de zeebodem in een gebied van 1 hectare. Hiervoor is een compensatie geïmplementeerd (onder de Natuurbeschermings-compensatie balans). In retrospectief heeft dit niet heeft plaatsgevonden. Ondertussen was de caverne gerealiseerd en klaar voor gebruik.

Caverne-aanleg met alle voorschriften voor veiligheid en gebruik valt onder de mijnbouwwet (Bundesberggesetzt). De huidige cavernes in het gebied, waar de LBEG bevoegd gezag is (Noordwest Duitsland), zijn van voor de milieuvergunningsverplichting (UVP). LBEG heeft daar dus geen ervaring mee.

Momenteel bekijkt Duitsland of toekomstige cavernes voor waterstofopslag onder de by-law UPV-V moeten vallen (waarmee een UPV/MER verplicht wordt). Waterstofopslag in opslagcavernes op zee valt in Duitsland onder de Major Accidents Ordinance (Störfallverordnung) en dat impliceert een goedkeuringsprocedure met participatie van het publiek. Al deze bovengenoemde regels, behalve de mijnbouwwet (Bundesberggesetz) en de offshore mijnbouwwet (Offshore Bergverordnung) gelden niet voor de EEZ (offshore/Noordzee).

Voorbeeldprojecten:

<u>Jemgum caverne (bij Leer)</u>
Dit project omvat 33 cavernes met totale opslagcapaciteit van 1 miljard kubieke meter aardgas. In de eerste fase is een capaciteit gerealiseerd van 320 miljoen m^3 met een productiecapaciteit van 250,000m^3/h en een injectiecapaciteit van 200,000 m^3/u. Voor het logen werd water uit de Ems rivier gebruikt en de pekeloplossing werd via een 40 km lange pijpleiding geloosd op de Noordzee om zodoende de milieu-impact te verkleinen. Het project heeft een speciale watervergunning voor het lozen van pekel in de Ems rivier. Binnen de vergunning is in 2008 een monitoringsprogramma opgezet. Sinds april 2012 zijn er binnen 1 jaar 7 cavernes geloogd.

<u>Storag Etzel GmbH</u>
Bij Storag Etzel GmbH worden cavernes uitgeloogd met zeewater. De verzadigde pekel wordt nabij Wilhelmshafen weer in zee geloosd. Hiervoor is een vergunning. Zover bekend zijn er geen significante milieueffecten.

9.7 Caverne-aanlegkosten per variant

In deze bijlage onderbouwen we eerst onze kostenschatting voor caverne-aanleg per variant (paragraaf 3.4) ten opzichte van het nulalternatief. Deze schattingen toetsen we vervolgens aan een aantal praktijkvoorbeelden[118] (Tekstblok 9.2). De onzekerheden ten aanzien van deze kosten nemen we mee in de gevoeligheidsanalyse[119].

Onze kostenschattingen zijn indicatief en generiek. Daar waar we refereren aan specifieke gebieden of vergunningen, doen we dat uitsluitend als ijkpunt voor een realistische kostenschatting: het zijn geen uitspraken over de haalbaarheid of wenselijkheid van de aanleg van opslagcavernes ter plaatse.

De aanleg van opslagcavernes is gewoonlijk duurder dan die van winningscavernes Een belangrijke reden daarvoor zijn de hogere boorkosten (om dezelfde hoeveelheid zout te winnen zal vaker geboord moeten worden, zie ook Bijlage 9.4). Een andere reden is de opstartperiode: voor een standaard opslagcaverne maakt de (voor zoutwinning minder efficiënte) opstartperiode een groter deel van de levensduur uit, waardoor eventuele zoutopbrengsten achterblijven (Bijlagen 9.2 en 9.4).

A Binnen huidig vergunningsgebied
Het zoutproductieniveau in de vergunningsgebieden wordt gehandhaafd, maar waar mogelijk worden opslagcavernes in plaats van winningscavernes aangelegd. Dit resulteert in extra kosten, omdat de productie wordt verspreid over meer en kleinere cavernes (Bijlage 9.4) bij gelijkblijvende opbrengsten van het zout[120]. Voor waterstofopslag zijn meer boorgaten met een grotere putbreedte nodig en ze moeten mogelijk met andere materialen worden afgewerkt. Volgens Nobian (persoonlijk communicatie) is € 6 miljoen per caverne een bruikbare, eerste schatting voor deze meerkosten. Voor 30 cavernes komt dit neer op € 180 miljoen.[121] Daarnaast komen de kosten voor het inregelen en verkrijgen van de benodigde vergunningen[122], inclusief opslag- en winningsplannen. Deze kosten worden geraamd op € 20 miljoen onder aanname van een maximale doorlooptijd van 4 jaar en inzet van 50 mensjaar à € 100.000 per jaar per persoon, waarbij de inzet bij de overheid en de betrokken bedrijven een verhouding heeft van 1:5. Onze schatting van de kosten komt daarmee op **€ 200 miljoen**.

---

[118] Bij het vergelijken van kosten tussen projecten spelen geologische factoren (ondergrond, diepte), het feit dat waterstof opslaan duurder is dan de opslag van aardgas, schaalvoordelen, lagere compressorcapaciteit en uitstroomsnelheid allemaal een rol. Een goede vergelijking kan dan ook een eigen onderzoeksproject zijn.

[119] door het resultaat eveneens te berekenen onder de aanname dat deze kosten 4x hoger zijn, zie paragraaf 9.9

[120] Merk op dat in het nulalternatief winningscavernes worden aangelegd. (SodM, 2018a) pleit ervoor om de maximale grootte van cavernes te beperken in het winningsplan. Onduidelijk is welke grootte SodM beoogd en of dit pleidooi zal worden overgenomen in het beleid. Begrenzing van het toegestane volume bij nieuwe winningscavernes betekent dat meer boorgaten nodig zijn per ton geproduceerd zout. In de vergelijking met de aanleg van opslagcavernes zal dit tot lagere kosten leiden dan hier geschat.

[121] Als een deel van deze cavernes uiteindelijk niet wordt gebruikt voor waterstofopslag of andere vormen van energieopslag, dan kunnen de maatschappelijke kosten worden verlaagd door een groter cavernevolume voor zoutwinning toe te staan (afhankelijk van de ruimtelijke inpassing en andere randvoorwaarden).

[122] Als er in ontwikkelde structuren sprake is van exploratie en uitbreiding van vergunningen dan wordt dit in jargon aangeduid als *appraisal*.

B Verplaatste winning op land

Er zijn twee extra kostenposten ten opzichte van variant A, namelijk pekelverwerking en exploratie & vergunningverlening[123]. De totale kostenposten hebben we als volgt gedefinieerd:

I. Aanleg van 30 opslagcavernes: 30 maal € 6 miljoen= € 180 miljoen;
II. Voor de pekelverwerking nemen we aan[124] dat de verplaatste winning of via een 100 kilometer pijplijn aangesloten wordt op een bestaande verwerkingsfabriek (à € 1 miljoen per kilometer, dus € 100 miljoen; (TNO & EBN, 2022)[125] of dat een fabriek wordt verplaatst of nieuw gebouwd (à € 100 miljoen met een bandbreedte van € 60 tot 140 miljoen (TNO & EBN, 2022) met een terugverdientijd van 20 jaar of langer. Totaal voor dit onderdeel is € 100 miljoen;
III. De laatste post zijn de vergunnings- en exploratiekosten voor de ontwikkeling van nieuwe locaties op land. De kostenschatting hiervan baseren we op drie, van elkaar onafhankelijke manieren.

Schatting 1

Onze eerste en grofste schatting neemt aan, dat opslagcavernes in een nieuw gebied 2 tot 4 keer meer kosten dan in een bestaand veld. Dat komt neer op € 15 tot € 25 miljoen per caverne. Deze bandbreedte kan niet ongecorrigeerd worden opgeschaald (naar € 450 tot € 750 miljoen voor 30 cavernes) om twee redenen. Ten eerste kunnen bij succesvolle exploratie de kosten worden uitgesmeerd over meerdere cavernes en ten tweede nemen de verwachte kosten af voor latere aanlegfases. Na correctie (factor 1/3) schatten we de vergunnings- en exploratiekosten voor 30 cavernes tussen de € 150 en € 250 miljoen.

Schatting 2

Een tweede kostenschatting maken we aan de hand van de stapsgewijze ontwikkeling van cavernes (Tabel 9.7). Dat leidt tot een mediane schatting voor vergunnings- en exploratiekosten (€ 20 miljoen + € 50 miljoen + € 5 miljoen + € 2 miljoen = € 77 miljoen) van afgerond € 75 miljoen.

[123] Waarbij ook de doorlooptijd naar verwachting zal toenemen van 4 naar 6-8 jaar.
[124] Mogelijk is nog een leiding nodig voor aanvoer van het zoete(re) water, dat gebruikt wordt tijdens het logen. We nemen aan, dat zo'n leiding een relatief korte afstand overbrugt en daarom zijn de kosten daarvoor niet apart in kaart gebracht.
[125] 100 kilometer op land aangenomen als bovengrens.

Tabel 9.7 Kostenschatting voor caverne-ontwikkeling in nieuw gebied

Activiteit per fase	Tijdsinschatting per fase	Meerkosten ten opzichte van het nulalternatief
Voorbereiding en behandeling vergunningsaanvraag (met jaarlijks 50 mensjaar à 100.000 per jaar per persoon voor geotechnische, juridische afhandeling en omgevingsmanagement)	2 tot 4 jaar	€ 20 miljoen
Exploratie, screening en haalbaarheid (met jaarlijks 50 mensjaar à 100.000 per jaar per persoon voor herinterpretatie seismiek etc.)	enkele maanden tot ca. 2 jaar	€ 50 miljoen (waarvan 4 onderzoeks-boringen à € 10 miljoen)
Planning en ontwerp	6 maanden tot een jaar	€ 5 miljoen
Ontwikkeling van de locatie	ca. 1-2 jaar	< € 2 miljoen
Aanleg cavernes en verwerking van gewonnen pekel*	3 – 7 jaar per caverne	€ 6 miljoen per caverne
Suspenderen van caverne in afwachting van omzetting naar opslag*	onbepaalde periode	Verwaarloosbaar
Gereed maken voor opslag, installatie compressor en decompressor*	6 maanden tot 2 jaar?	Aanschafbeslissing en kosten via het Opera model
Uitvoering van de opslagactiviteiten*	typisch 20 tot 40 jaar	Aanschafbeslissing en OPEX kosten via het Opera model
Decommissioning en afsluiting (installatie meetnet voor monitoring) *	enkele maanden tot een jaar	Geen verschil met nulalternatief of buiten reikwijdte van deze studie
Abandonnering, inclusief monitoring*	minimaal 30 jaar	Geen verschil met nulalternatief of buiten reikwijdte van deze studie

* Deze stappen maken formeel geen onderdeel uit van de caverne ontwikkeling, maar zijn hier voor de volledigheid toch opgenomen.

Schatting 3

Een onafhankelijke indruk van de kosten voor de vergunnings- en exploratiekosten van opslagcavernes op land verkrijgen we uit een eerder gedane investering (Tekstbox 9.1). Deze informatie resulteert in een minimale schatting van tussen de € 25 en € 105 miljoen.

Tekstbox 9.1 Lessen van de investering van Frisia

De Frisia zoutfabriek (aangelegd na vergunningverlening in 1994) kostte destijds 250 miljoen gulden (Boer, et al., 2019). Omgerekend naar euro's en gecorrigeerd voor consumenteninflatie over de periode 2000-2021 (bron CBS) is dat nu € 165 miljoen. Gecorrigeerd voor de kosten van een nieuwe zoutverwerkingsfabriek (€ 100 miljoen met een bandbreedte van € 60-140 miljoen (TNO & EBN, 2022)) schatten we de minimale kosten[126] van exploratie en vergunningverlening aan de zijde van het bedrijf voor een (bescheiden) caverneveld op land tussen de € 25 en € 105 miljoen (€ 165 miljoen minus € 140 miljoen ofwel € 165 miljoen minus € 60 miljoen).

Samenvattend (Tabel 9.8) tekent zich voor de vergunnings- en exploratiekosten een scheve verdeling af met een mediane waarde van € 100 miljoen (en een gemiddelde waarde rond de € 125 miljoen). Daarmee komt onze schatting van de totale kosten op (€ 180 miljoen + € 100 miljoen + € 100 miljoen =) **€ 380 miljoen**.

Tabel 9.8 Kostenschattingen van de vergunnings- en exploratiekosten

Drie manieren	**Kostenschatting**
Schatting 1	Gecorrigeerde schatting € 150 - 250 miljoen, ongecorrigeerd tot € 750 miljoen
Schatting 2	Mediane schatting van afgerond € 75 miljoen
Schatting 3	Minimaal € 25 - 105 miljoen

C Extra winning op land

Bij deze variant is zowel sprake van meerkosten (extra zout logen en verwerken) als meeropbrengsten (verkoop van extra zout). De meerkosten voor het aanleggen van de standaard opslagcavernes schatten we weer op € 180 miljoen. Voor extra winning op land is exploratieonderzoek nodig. Deze kosten schatten we op € 100 miljoen (net als in variant B). Tegenover deze kostenpost staat een baat van € 100 miljoen, omdat deze kosten bij de normale winningskosten horen en dus uit de zoutopbrengst betaald worden. Bij extra winning is tevens een extra zoutverwerkingsfabriek nodig à €100 miljoen. Tegenover deze kostenpost staat een even grote baat, omdat deze fabriek uit de normale opbrengsten van het zout wordt betaald.

We merken op, dat marktpartijen tot nu toe geen extra investering in productie-uitbreiding hebben gedaan; de Nederlandse zoutproductie is het afgelopen decennium behoorlijk constant (zie Bijlage 9.1). Kennelijk zijn de risicogewogen kosten hoger dan de verwachte opbrengsten. De marktwaarde van de verkoop van 65 miljoen ton zout uit 30 standaard opslagcavernes (gemiddelde steenzoutdichtheid van 2,164 ton/m^3) bedraagt circa € 3,6 miljard (tegen 55 €/ton zout). Stel de marktwaarde is 5% lager dan de kosten, dan komt dit overeen met een kostenpost van circa € 180 miljoen. [De 5% aanname baseren we op onze gesprekken met enkele marktpartijen (persoonlijke communicatie). Deze geven aan, dat hun huidige productie is gemaximeerd op de capaciteit van hun pekelverwerkende installaties. Ze zien in de markt meer afzetmogelijkheden voor

[126] Mogelijk was de fabriek van Frisia relatief goedkoop, want kleiner dan Nobian's fabrieken in Twente en in Groningen. In dat geval waren de kosten van de vergunningen en exploratie navenant hoger.

hun zout[127], maar of extra verwerkingscapaciteit benut kan worden hangt af van het maatschappelijk draagvlak in relatie tot mijnbouweffecten[128]. Daarbij constateren we, dat de Europese zoutmarkt krimpt (paragraaf 2.2). Of dit komt door een dalende vraag of door achterblijvend zoutaanbod (bijvoorbeeld door winningsbeperkingen in de verschillende landen) is ons onbekend. Mogelijk zien de Nederlandse marktpartijen wel kansen op de Europese zoutmarkt, omdat hun zout erg zuiver is.]

Hiermee komt onze schatting van de totale kosten op (€ 180 miljoen + € 180 miljoen =) **€ 360 miljoen.**

D Uitbreiding op land met pekellozing

De kosten zijn:

I. € 180 miljoen voor de putten van opslagcavernes;
II. Er zijn geen kosten voor een nieuwe verwerkingsfabriek en pekelleiding naar een verwerkingsfabriek. Wel is er een pekelleiding naar zee nodig met een zuiveringsinstallatie, die de pekel zuivert voor het in zee mag worden geloosd. Zo'n leiding schatten we op € 100 miljoen (lengte 50 tot 100 kilometer tegen € 1 miljoen per kilometer). Bijkomend voordeel is dat eventueel met zeewater kan worden geloogd.[129]
III. De kosten van het energiegebruik bij pekellogen zijn van belang.[130] De energiekosten maken 37% van de totale winningskosten uit, waarvan circa 4,3% bij het uitlogen wordt gebruikt (Scherpbier, et al., 2021). Dat komt neer op omgerekend 1,6% van de totale kosten. Als deze kosten (opex) 1,6 tot 4,3% van de verkoopwaarde van het zout bedragen (terwijl het zout niet verkocht wordt), dan zijn de extra kosten € 57 tot € 154 miljoen;
IV. Of versneld logen mogelijk is tot hetzelfde cavernevolume en in hoeverre dit effecten heeft op de vorm van de caverne moet nog technisch uitgezocht worden. Ook moet onderzocht worden wat de milieugevolgen zijn van pekellozing. De kosten hiervoor ramen we op € 5 tot 10 miljoen.[131]
V. Exploratie en vergunningsverlening: € 100 miljoen.

De totale kosten zijn (€ 180 miljoen + € 100 miljoen + € 155 miljoen + € 10 miljoen + € 100 miljoen =) **€ 545 miljoen**.

E Verplaatste winning op zee

De kostenopbouw van deze variant lijkt sterk op die van variant C:

I. Boren op zee is duurder, net als leidingen. (TNO & EBN, 2022) schatten deze kosten op 100% hoger: € 180 miljoen voor de kleinere cavernes plus 100% = € 360 miljoen;

---

[127] Merk op dat dit een gunstiger uitspraak is dan in (TNO & EBN, 2018): "*Er is voorlopig geen marktvraag die de aanleg van een nieuwe zoutverwerkingsfabriek rechtvaardigt, en het transporteren van zout/pekel over grote afstanden is economisch niet rendabel*."

[128] Een overheid, die een locatie aanwijst en vergunningen voor langere tijd afgeeft, verlaagt dit risico door het (deels) te verplaatsen naar het publieke domein.

[129] Als de pekel verwerkt wordt tot zout kan dat niet, omdat er dan verontreinigingen meekomen met het zeewater.

[130] Bij verplaatste winning moet het nieuwe caverneveld uiteraard ook geloogd worden met de bijkomende kosten, maar die kosten vielen weg tegen de vermeden kosten van het logen van het verlaten caverneveld. In deze variant is er geen verlaten caverneveld waarvan de kosten wegvallen.

[131] Het voordeel van snellere caverne-aanleg kan pas worden benut als dit punt is uitgezocht.

II. 200 km pijpleiding tegen 2 M€/km = € 400 miljoen om de pekel aan land te brengen en zoet water aan te voeren (de kosten per kilometer zijn voor een gecombineerde pekel- en zoetwaterleiding);
III. Exploratie op zee is duurder. Dit schatten we op 25% meer, want deels is er minder kennis beschikbaar van de interne samenstelling van de zoutstructuren, deels is werk op zee duurder (transport en boren); Sommige onderdelen zijn goedkoper (bij seismisch onderzoek hoeft minder rekening gehouden te worden met omwonenden). En het analysewerk verandert niet qua kosten (grotendeels achter hetzelfde bureau). De geschatte kosten van exploratie op zee: 125% van € 100 miljoen = € 125 miljoen;
IV. € 100 miljoen voor een fabriek (gezien de huidige locaties van de zoutverwerkingsfabrieken lijkt een nieuwe fabriek gewenst of een lange leiding over land);
V. Bij opslag op zee staan *compressor* en *expander* waarschijnlijk op land[132] en zijn twee leidingen nodig: een om de waterstof naar de opslag te krijgen en een om de waterstof eruit te krijgen. Eventueel kan het met een leiding voor zowel heen als retour. Echter, dat geeft meer drukwisselingen en is dus gevoeliger voor problemen. We zijn hier uitgegaan van twee leidingen. Eventueel is een combinatie mogelijk met productie van waterstof op zee (dan volstaat 1 leidingen en zijn de kosten lager). We gaan uit van een afstand van 200 kilometer waterstofleiding, tegen € 1,4 miljoen per kilometer: € 560 miljoen.
VI. Voor waterstofopslag op zee zijn tevens satellietplatforms nodig. Daarvan kunnen vijf tegelijk worden aangesloten op een satellietplatform. Een platform kost € 25 miljoen (bandbreedte € 15-35 miljoen; TNO en EBN, 2022). De kosten voor 30 cavernes zijn dan (30/5)*€ 25 miljoen = € 150 miljoen.

De totale kosten zijn **€1.695 miljoen**.

F Extra winning op zee

Net zoals variant E lijkt op variant B, lijkt de kostenopbouw van variant F sterk op die van variant C. Net als bij variant E schatten we de kosten van boren en leidingen op zee 100% hoger dan op land. De kosten van extra winning op zee worden dan:

I. €180 miljoen voor de kleinere cavernes plus 100% = € 360 miljoen;
II. 200 km pijpleiding tegen 2 M€/km = € 400 miljoen om de pekel aan land te brengen en zoet water aan te voeren (de kosten per kilometer zijn voor een gecombineerde pekel en zoetwaterleiding);
III. Exploratie op zee wederom 25% duurder dan op land: 125% van € 100 miljoen = € 125 miljoen;
IV. Baat: Tegenover deze kostenpost staat een baat van € 100 miljoen, omdat deze kosten bij de normale winningskosten horen en dus uit de zoutopbrengst betaald worden tot de hoogte waarop ze normaal gesproken gemaakt worden (namelijk bij winning op land);
V. Er is een extra zoutverwerkingsfabriek nodig à € 100 miljoen. Tegenover deze kostenpost staat een even grote baat, omdat deze fabriek uit de normale opbrengsten van het zout wordt betaald;

[132] Een alternatief is op een groot platform of een deel van een kunstmatig eiland op zee.

VI. Verlies op zout = € 180 miljoen;
VII. Waterstofleiding tussen *compressor* en *expander* op land (een heen- en een terugleiding) en de opslag: twee maal € 1,4 miljoen per kilometer maal 200 kilometer: € 560 miljoen;
VIII. Ook nu zijn zes satellietplatforms met ieder aansluiting op 5 cavernes nodig à € 25 miljoen: € 150 miljoen.

Totale kosten bedragen **€ 1.675 miljoen**.

G Uitbreiding winning op zee met pekellozing
De kosten zijn als volgt:
I. Voor de caverne-aanleg, inclusief putten: €360 miljoen;
II. Er is geen pekelleiding naar land nodig. De pekel kan na beperkte zuivering op het platform direct geloosd worden. Energiegebruik € 155 miljoen;
III. Onderzoek € 10 miljoen;
IV. Exploratie en vergunningen: € 125 miljoen;
V. Waterstofleiding tussen *compressor* en *expander* op land en de opslag (een leiding voor heen en een leiding voor terug) tegen € 1,4 miljoen per kilometer maal 200 kilometer: € 560 miljoen.
VI. Ook nu zijn zes satellietplatforms nodig à € 25 miljoen: € 150 miljoen.

De totale kosten zijn **€ 1.360 miljoen**.

Toetsing aan praktijkervaring
De praktijkvoorbeelden en ander vergelijkingsmateriaal (Tekstblok 9.2) suggereren, dat onze kostenschatting waarschijnlijk aan de hoge kant is.

Tekstbox 9.2 Praktijkervaring en met de aanleg van opslagcavernes en andere inschattingen daarvan

Techno-Economic Modelling of Large-Scale Energy Storage Systems
In dit onderzoek (TNO, 2020c) zijn de kosten van het logen van een opslagcaverne van 0,545 miljoen m^3 geschat op € 23,5 miljoen. Daar komen de kosten voor *compressoren* (€ 113 miljoen), *expanders* (€ 45 miljoen) en kussengas (€ 2,3 miljoen) bij. Dat maakt de totale investering per caverne € 183 miljoen (voor een iets meer dan half zo grote caverne als hier). De extra kosten ten opzichte de kosten van reguliere zoutwinning zijn hierin niet meegenomen.

H-vision
Deze studie (H-Vision, 2019) schat de investeringskosten voor een opslagcaverne van 600.000 m^3 (zoals nu in Zuidwending is gemaakt) op € 150 tot € 160 miljoen, inclusief bovengrondse faciliteiten (exclusief kussengas). Dit is gebaseerd op informatie van Gasunie. De aanleg van een extra opslagcaverne kost ongeveer € 35 miljoen extra, want deze kan relatief goedkoop gebruik maken van de bovengrondse faciliteiten (met name van de *compressor* en *expander*).

H21 North of England project
Dit betreft een studie naar een caverneveld van 10 opslagcavernes van 300,000 m^3 op relatief grote diepte (en dus met een groot drukverschil). Per 600.000 m^3 cavernevolume zijn de investeringskosten € 81 miljoen, waarvan € 23 miljoen voor de caverne zelf.

Etzel, Duitsland
In Etzel zijn tussen 2006-2014 35 cavernes geloogd met een gemiddeld volume van 537.497 m^3. De investeringen bedroegen € 800 of € 2000 miljoen (de bronnen (STORAG ETZEL, 2017) en (STORAG ETZEL, 2022) verschillen op dit punt) plus een inflatiecorrectie van 50%: € 35 tot € 80 miljoen per caverne.

9.8 MKBA resultaten

Rekenresultaten van de maatschappelijke kosten- en batenanalyse per scenario en per variant of combinatie van varianten[133]. De derde regel bevat de besparing in het energiesysteem[134]. Het saldo daarvan is vetgedrukt. Voor de niet-gemonetariseerde kosten baten geldt dat scores kunnen worden vergeleken binnen een effect, maar niet tussen de verschillende effecten. 0 is neutraal; - en + zijn respectievelijk kosten en baten ten opzichte van het nulalternatief; (.) geeft aan dat het effect onder specifieke omstandigheden optreedt. Bodemdaling is uitgesplitst tussen aanleg- en opslagfase (zie Tabel 5.2).

[133] A Binnen huidig vergunningsgebied, B Verplaatste winning op land, C Extra winning op land, D Op land met pekellozing, E Verplaatste winning op zee, F Extra winning op zee, G Op zee met pekellozing.

[134] OPERA neemt de aanlegkosten van opslagcavernes mee. Om dubbeltelling van aanlegkosten te voorkomen (namelijk in rij 1 en in de berekening van de lagere energiesysteemkosten) is een post opgenomen (het aantal cavernes, dat het OPERA model gebruikt in een scenario in 2050 vermenigvuldigd met € 21,8 miljoen). Deze waarde is vervolgens 2050 verdisconteert met 2,25%.

ADAPT	1A Binnen het huidige vergunningsgebied	1B Verplaatste winning op land	1C Extra winning op land	1D Pekellozing op land	1E Verplaatste winning op zee	1F Extra winning op zee	1G Pekellozing op zee	2A Binnen het huidige vergunningsgebied + B verplaatste winning op land	2A Binnen het huidige vergunningsgebied + F extra winning op ze[e]	2E Verplaatste winning op zee + F Extra winning op zee
Kosten aanleggen cavernes	156	325	274	441	1.406	1.355	1.053	480	1.511	2.761
Kosten cavernes al in OPERA	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
Energiesysteemkostenbesparing	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026
Saldo ADAPT	**1.151**	**982**	**1.032**	**865**	**-100**	**-49**	**254**	**826**	**-204**	**-1.454**
Vraagresponse/CO_2-neutraliteit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ruimtebeslag/uitstoot	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Bodemdaling	-	--	--	--	0	++	0	---	+	++
Fysieke veiligheid	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
# cavernes aanbodzekerheid	11	11	11	11	11	11	11	41	41	41
Weerbaarheid	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-
Milieueffect pekellozing	0	0	0	-	0	0	-	0	0	0

TRANSFORM										
Kosten aanleggen cavernes	156	325	274	441	1.406	1.355	1.053	480	1.511	2.761
Kosten cavernes al in OPERA	409	409	409	409	409	409	409	444	444	444
Energiesysteemkostenbesparing	8.510	8.510	8.510	8.510	8.510	8.510	8.510	12.646	12.646	12.646
Saldo TRANSFORM	**8.763**	**8.594**	**8.645**	**8.478**	**7.513**	**7.564**	**7.866**	**12.610**	**11.579**	**10.329**
Vraagresponse/CO_2-neutraliteit	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Ruimtebeslag/uitstoot	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Bodemdaling	-	--	--	--	0	++	0	---	+	++
Fysieke veiligheid	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
# cavernes aanbodzekerheid	0	0	0	0	0	0	0	27	27	27
Weerbaarheid	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-
Milieueffect pekellozing	0	0	0	-	0	0	-	0	0	0

9.9 Gevoeligheidsanalyse

Tabel A1. Gevoeligheidsanalyse voor ADAPT

	Basis	10 jaar na 2050	40 jaar na 2050	Energie-markt-baten half zo groot/ gasveld reduceert de baten naar 50%	Energie-markt-baten 10% / gasveld reduceert de baten naar 10%	Kosten per caverne vier maal zo hoog	Extra zout-winning 10% minder aantrek-kelijk	Extra zout-winning wel rendabel (5%)	0,4% hogere disconto-voet[135]	0,4% lagere disconto-voet	Baten energie-systeem 2.7 maal zo groot
1A Binnen huidig vergunningsgebied	1.151	804	1.650	638	227	740	1.151	1.151	1.001	1.323	2.895
1B Verplaatste winning op land	982	635	1.481	469	58	571	982	982	835	1.152	2.726
1C Extra winning op land	1.032	686	1.532	519	109	622	895	1.306	891	1.196	2.777
1D Pekellozing op land	865	519	1.365	352	-58	455	865	865	728	1.025	2.609
1E Verplaatste winning op zee	-100	-446	400	-613	-1.023	-921	-100	-100	-197	18	1.645
1F Extra winning op zee	-49	-395	451	-562	-972	-870	-186	225	-140	62	1.695
1G Pekellozing op zee	254	-93	753	-259	-670	-568	254	254	158	368	1.998
2A Binnen huidig vergunningsgebied + B verplaatste winning op land	826	479	1.325	313	-98	4	826	826	688	986	2.570
2A Binnen huidig vergunningsgebied + F extra winning op zee	-204	-551	295	-717	-1.128	-1.437	-341	69	-287	-103	1.540
2E Verplaatste winning op zee + F Extra winning op zee	-1.454	-1.801	-955	-1.967	-2.378	-3.097	-1.591	-1.181	-1.485	-1.409	290

[135] De werkgroep discontovoet 2020 adviseert om gevoeligheidsanalyses met betrekking tot de discontovoet te verplichten bij de uitvoering van MKBA's, als er twee of meer toekomstscenario's worden gebruikt, die duidelijk verschillen qua welvaartsgroei. De gevoeligheidsanalyse behelst een 0,4 % verhoging en verlaging van de gehanteerde discontovoeten in de hoofdanalyse. Dit is niet van toepassing op dit onderzoek, omdat beide energiescenario's (ADAPT en TRANSFORM) dezelfde economische groei (BBP groei van 1,5% per jaar) hebben.

Tabel A2. Gevoeligheidsanalyse voor TRANSFORM

	Basis	10 jaar na 2050	40 jaar na 2050	Energie-markt-baten half zo groot/ gasveld reduceert de baten naar 50%	Energie-markt-baten 10%/ gasveld reduceert de baten naar 10%	Kosten per caverne vier-maal zo hoog	Extra zout-winning 10% minder aantrek-kelijk	Extra zout-winning wel rendabel (5%)	0,4% hogere disconto-voet	0,4% lagere disconto-voet	Baten energie-systeem 2.7 maal zo groot
1A Binnen huidig vergunningsgebied	8.763	6.125	12.566	4.508	1.104	8.353	8.763	8.763	7.686	10.006	23.231
1B Verplaatste winning op land	8.594	5.956	12.397	4.339	935	8.184	8.594	8.594	7.520	9.834	23.062
1C Extra winning op land	8.645	6.007	12.447	4.390	986	8.235	8.508	8.919	7.576	9.878	23.113
1D Pekellozing op land	8.478	5.840	12.280	4.223	819	8.067	8.478	8.478	7.413	9.707	22.946
1E Verplaatste winning op zee	7.513	4.875	11.315	3.258	-146	6.692	7.513	7.513	6.488	8.700	21.981
1F Extra winning op zee	7.564	4.926	11.366	3.309	-95	6.743	7.427	7.838	6.545	8.745	22.032
1G Pekellozing op zee	7.866	5.229	11.669	3.611	207	7.045	7.866	7.866	6.843	9.050	22.334
2A Binnen huidig vergunningsgebied + B verplaatste winning op land	12.610	8.567	18.436	6.286	1.228	11.788	12.610	12.610	11.017	14.449	34.108
2A Binnen huidig vergunningsgebied + F extra winning op zee	11.579	7.537	17.406	5.256	198	10.347	11.442	11.853	10.042	13.360	33.078
2E Verplaatste winning op zee + F Extra winning op zee	10.329	6.287	16.156	4.006	-1.052	8.686	10.192	10.603	8.843	12.055	31.828

Dankwoord

De volgende collega’s hebben bijgedragen aan dit onderzoek. heeft de OPERA berekeningen uitgevoerd. en hebben in meerdere gesprekken hun kennis over de zoutmarkt met ons gedeeld. De kwaliteitsbeoordeling is uitgevoerd door (economie) en (ondergrond & gehele manuscript).

Ondertekening

Utrecht, 23 januari 2023 TNO-AGE