

CNES

Verkenning naar grootschalige opslag van energie door stikstofinjectie in gasvelden

Versie	1.0
Datum	27-7-2018
Opdrachtgever	Rijksdienst voor ondernemend Nederland (RVO)
Projectleider	Michiel Geurds
Auteur(s)	Bastian Knoors, Michiel Geurds, Josha van der Beek (Liandon), Harry Eshuis (NAM), Frank Wilschut (TNO),
Verspreidingslijst	Liandon, NAM, TNO, RVO

	Versielog	Datum	Auteur	Opmerking
Versielog	0.0	20-7-2018	Geurds	Concept eindversie Liandon
	0.1	20-7-2018	Eshuis	Akkoord voor oplevering aan RVO (niet publiek)
	0.2	24-7-2018	Wilschut	Akkoord voor oplevering aan RVO (niet publiek)
	1.0	27-7-2018	Knoors	Eindversie

Context

In november 2017 is door RVO een offerteaanvraag uitgezet om binnen het programma Systeemintegratie een haalbaarheidsstudie uit te voeren naar duurzame energieopslag door middel van gecomprimeerde lucht of stikstof in zoutcavernes of gasvelden. De centrale vraagstelling binnen deze aanvraag betrof het schetsen op welke manier een betrouwbare en betaalbare faciliteit voor Compressed Air Energy Storage in een gasveld kan worden gerealiseerd, waarbij zowel technische als niet-technische aspecten benoemd worden.

De opdracht is toegekend aan een consortium met Liandon als coördinator, waarvan verder TNO en NAM deel uitmaakten. In dit rapport worden de resultaten van de opdracht gepresenteerd.

De studie die is uitgevoerd door het consortium is een verkennende studie gericht op energieopslag door gecomprimeerde stikstof in gasvelden. Hierin is een eerste inschatting gemaakt van de technische en economische haalbaarheid van de technologie. Mede gezien de beperkte omvang van de studie is een aantal aspecten niet of slechts beperkt belicht:

- Er worden geen uitspraken gedaan over toepassing van de technologie op een specifieke locatie; de haalbaarheid is alleen in algemene zin verkend.
- Er is gebruikt gemaakt van direct beschikbare data en informatie en scenario's zijn gebaseerd op actuele gegevens; er zijn geen nieuwe scenario's ontwikkeld voor bijvoorbeeld veranderingen in vraag en aanbod van duurzame energie of toekomstige prijsniveaus.
- Om de technische en economische van het onderzochte systeem te kwantificeren, is een eenvoudig rekenmodel gemaakt dat is toegepast op een enkele theoretische casus. Hiermee zijn eerste-orde inschattingen gemaakt van de technische en economische kernwaarden. De onzekerheidsmarge op de gepresenteerde getallen is groot.

In de studie worden naast verkenning van de technische, economische en maatschappelijke haalbaarheid aanbevelingen gedaan ten aanzien van de in het programma systeemintegratie gevraagde "systeemveranderingen [met betrekking op de onderzochte technologie] die essentieel zijn om de transitie naar een geïntegreerd en flexibel energiesysteem van de toekomst mogelijk te maken."

Samenvatting

Nederland heeft zich gecommitteerd aan het klimaatakkoord van Parijs. Om de nationale bijdragen aan de doelen van dit akkoord te halen, is een verduurzaming van de energievoorziening nodig. Daarin heeft energie uit wind en zon een belangrijk aandeel. In het toekomstige energiesysteem is grootschalige opslag van energie dan ook essentieel voor een continue energievoorziening in tijden dat er onvoldoende zon- en windenergie beschikbaar is. Voor zijn 95%-reductiescenario (van broeikasgassen), geeft het Planbureau voor de Leefomgeving een benodigde indicatieve opslagcapaciteit op van 15 TWh op basis van de totale behoefte aan opslagcapaciteit voor elektriciteit. De huidige opslagcapaciteit is nagenoeg nul.

Op dit moment is er nog geen technologie beschikbaar waarmee elektrische energieopslag op dergelijke schaal kan worden gerealiseerd. Compressed Nitrogen Energy Storage (CNES) is een technologie waarmee grootschalige opslag van zon- en windenergie mogelijk is, door met behulp van duurzaam opgewekte elektriciteit stikstof te comprimeren en injecteren in een gedepleteerd gasveld. In deze studie wordt een eerste verkenning gedaan naar de technische en economische aspecten van deze technologie en wordt een kader geschetst voor het maatschappelijke-acceptatieproces.

Eerste-orde berekeningen in deze studie resulteren in een opslagpotentie van CNES indien toegepast op een van de meest gunstige gasvelden in Nederland van 340 GWh. CNES kan daarmee een grote bijdrage leveren aan de benodigde opslagcapaciteit, veel meer dan alternatieve technieken zoals Compressed Air Energy Storage (CAES) in zoutcavernes. Het opslagrendement van CNES (30-36% voor de doorgerekende casus) is wel lager dan de toepassing van CAES. CNES is (onder voorwaarden) technisch haalbaar door gebruik van bewezen technieken. De maatschappelijke haalbaarheid hangt van vele, project-specifieke factoren af. In het algemeen kan worden gesteld dat de maatschappelijke haalbaarheid sterk vergroot wordt door een zorgvuldig participatieproces waarbij alle stakeholders deelgenoot worden.

CNES is vooral interessant als opslag voor langdurige tekorten van zon- en windenergie. In het huidige energiesysteem heeft het echter onvoldoende economische waarde. Op dit moment is CNES mogelijk wel kansrijk door integratie met het bestaande energiesysteem of in aanvulling op veranderingen hierin. Er zijn concrete kansen, zoals combinatie met bestaande en geplande stikstofproductie en het leveren van kwaliteitsconversie voor bestaande gasstromen, die het technische en economische rendement kunnen vergroten. Dit dient nader onderzocht te worden.

Met voldoende geschikte gedepleteerde gasvelden kan CNES voor Nederland dienen als een strategische opslag van elektriciteit, ten behoeve van de continue energievoorziening

noodzakelijk voor het behalen van klimaatdoelstellingen. Dit maakt genoemd nader onderzoek dan ook sterk aan te bevelen.

Inhoud

Context	2
Samenvatting	3
1 Inleiding	6
2 Technische haalbaarheid van CNES	7
2.1 CNES en CAES.....	7
2.2 Gasveld benodigd voor CNES.....	8
2.3 Procesinstallatie voor CNES.....	8
2.4 Warmteopslag in combinatie met CNES	10
2.5 Rekenmodel ter onderbouwing van CNES	11
2.6 Alternatieve technieken voor grootschalige energieopslag	13
2.7 Conclusies	14
3 Economische haalbaarheid van CNES	16
3.1 Investeringskosten voor toepassing van CNES.....	16
3.2 Businessmodellen	17
3.3 Kansen	18
3.4 Conclusies	19
4 Maatschappelijke acceptatie van CNES	21
5 Conclusies	23
6 Aanbeveling	25
Bijlage 1: Technieken voor stikstofproductie	26
Bijlage 2: Hoge temperatuur opslag (HTO)	29
Bijlage 3: Rekenmodel bij onderbouwing CNES	33
Bijlage 4: Alternatieve technologieën t.o.v. CNES	39
Bijlage 5: Het participatieproces t.b.v. maatschappelijke acceptatie	40

1 Inleiding

Nederland heeft zich gecommitteerd aan het klimaatakkoord van Parijs. Om de nationale bijdragen aan de doelen van dit klimaatakkoord te realiseren, is een verduurzaming van de energievoorziening nodig. Zo zal er onder andere meer zon- en windenergie gerealiseerd worden. Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) schetst hierbij in zijn publicatie 'Verkenning van klimaatdoelen'¹ een scenario waarbij 95% van de uitstoot in 2050 is gereduceerd ten opzichte van 1990. In dit zogeheten 'reductiescenario' is sprake van 75 GW wind op zee, 11 GW wind op land en 75 GW zon-PV. Omdat energieproductie uit zon en wind variabel is, is opslag noodzakelijk voor het balanceren van energievraag en -aanbod in de tijd. Er moet rekening gehouden worden met een opwekpiek van 60-70 GW als gevolg van zon- en windproductie. Het opslaan van zon- en windenergie op momenten dat het aanbod de vraag overtreft, is een manier om deze piek kwijt te kunnen. Binnen het reductiescenario van het PBL is dit vertaald naar een indicatieve opslagcapaciteit van 15 TWh op basis van de totale behoefte aan opslag van elektriciteit. De huidige opslagcapaciteit is nagenoeg nul.

Op dit moment is er nog geen technologie beschikbaar waarmee energieopslag op dergelijke schaal kan worden gerealiseerd. In deze studie wordt verkend of energieopslag in de vorm van een gecombineerde stikstof in gasvelden (mede) invulling kan geven aan de eerder genoemde opslagbehoefte. Door druk op te bouwen in een gasveld via compressie en injectie van stikstof is het mogelijk energie op te slaan. Door deze druk af te laten via een expansieturbine is het mogelijk de opgeslagen energie weer beschikbaar te krijgen. In het Engels heet deze technologie Compressed Nitrogen Energy Storage (CNES). CNES wordt in deze studie vergeleken met 'Compressed Air Energy Storage (CAES)', waarbij lucht in plaats van stikstof wordt gebruikt. In een gasveld is dit echter niet mogelijk – CAES wordt bijvoorbeeld toegepast in zoutcavernes.

Dit rapport beschrijft de bouwstenen van CNES in hoofdstuk 2, alsmede de technische haalbaarheid voor toepassing binnen Nederland. In hoofdstuk 3 wordt de economische haalbaarheid verkend en vergeleken met andere opslagtechnologieën. Hoofdstuk 4 gaat over hoe tot een maatschappelijk geaccepteerd systeem te komen. Hoofdstuk 5 en 6 geven de conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek naar de toepassing van de technologie in Nederland.

¹ Verkenning van klimaatdoelen, Planbureau voor de Leefomgeving.

2 Technische haalbaarheid van CNES

Voor het beoordelen van de technische haalbaarheid van CNES wordt eerst een beschrijving gegeven van CNES en de verschillen met CAES. Vervolgens wordt ingegaan op het voor de toepassing van CNES benodigde gasveld, de benodigde procesinstallatie en de warmteopslag. Tot slot komt het model aan bod dat als onderdeel van deze verkenning is opgezet om voor een specifiek gasveld en voor een specifiek scenario een eerste-orde schatting te bepalen van het systeemrendement en de opslagpotentie.

2.1 CNES en CAES

Bij energieopslag door compressie van gas wordt, met behulp van duurzaam opgewekte elektriciteit, gas gecomprimeerd en geïnjecteerd in een reservoir. Wanneer een tekort aan elektriciteit is, wordt het gas uit het reservoir geëxpandeerd via expansieturbines waarmee elektriciteit wordt opgewekt. Gas warmt op bij compressie. Deze warmte kan later gebruikt worden om het gas bij de expansie te verwarmen. De vrijkomende warmte bij compressie dient dan opgeslagen te worden voor gebruik bij de expansie. Dat kan bijvoorbeeld in een heetwaterbuffer. Gedepleteerde gasvelden zijn vanwege hun grote werkvolume interessante reservoirs voor de opslag van gecomprimeerd gas.

Er zijn twee soorten gassen die op dit moment onderzocht worden voor deze toepassing: lucht en stikstof. In het ideale geval gebruikt men lucht omdat dit direct voorhanden is. Dit is de techniek CAES die voornamelijk wordt toegepast met zoutcavernes als reservoir. Er kleven echter risico's aan de injectie van lucht in gasvelden. Lucht bevat zuurstof dat corrosie van ondergrondse systemen kan veroorzaken. Ook kan er door menging met achtergebleven methaan een explosief gasmengsel ontstaan of kunnen ongewenste chemische reacties optreden. De toepassing van CAES in gasvelden ligt daardoor allerm minst voor de hand en vereist uitvoerig onderzoek naar materiaalkeuze en het gedrag van zuurstof in gasvelden, om deze risico's goed in kaart te brengen en te mitigeren. Een alternatief voor lucht is stikstof (N_2). Stikstof is een inert gas waardoor de hierboven beschreven risico's uitblijven. Er is in Nederland ervaring met stikstofinjectie in gasvelden voor 'enhanced gas recovery'.

De potentiële opslagcapaciteit van CNES door de toepassing in gasvelden is groter dan CAES, omdat de werkvolumes in gasvelden groter zijn dan in zoutcavernes waarin CAES wordt toegepast. Ook kan door de toepassing in gasvelden bestaande (aard)gasinfrastructuur hergebruikt worden, hetgeen kostenbesparing en/of additionele inkomsten mogelijk maakt.

Het opslagrendement van CNES in gasvelden ligt wel lager dan CAES in zoutcavernes. Zoutcavernes kennen een lagere interne weerstand wat resulteert in een hoger opslagrendement. Ook is de productie van stikstof voor CNES energie-intensief, wat het opslagrendement over de hele keten verlaagt. Zie [Bijlage 1](#) voor de verschillende productietechnieken voor stikstof.

2.2 Gasveld benodigd voor CNES

Gasvelden zijn 'bewezen' structuren, ze hebben immers miljoenen jaren aardgas vastgehouden. Gedurende de productieperiode bij de exploitatie van gasvelden is data verzameld, waardoor het volume en andere belangrijke eigenschappen van de gasvelden beschikbaar zijn. Niet alle gasvelden zijn geschikt voor CNES. Belangrijke factoren zijn het mogelijke werkvolume, waardoor de opslagcapaciteit bepaald wordt, en de permeabiliteit van het gesteente, die invloed heeft op het rendement van het systeem.

De porositeit en gemiddelde dikte bepalen de opslagcapaciteit, terwijl de hoogte van het perforatie-interval en de permeabiliteit de weerstand van het reservoir bepalen. In een Amerikaanse studie zijn de volgende getallen genoemd als vuistregel voor geschiktheid van een gasveld voor energieopslag door gascompressie²:

- Product van dikte en permeabiliteit groter dan 5000 mDm (milli-Darcymeter).
- Werkvolume groter dan 2 bcm (billion normal cubic meters).

Van secundair belang zijn de diepte van het gasveld (bepalend voor de (initiële) druk en temperatuur) en de sterkte van de aquifer (een sterke aquifer zal leiden tot een lager rendement). In het rekenvoorbeeld beschreven in dit rapport wordt uitgegaan van de eigenschappen van het Grijpskerkveld (zie §2.5). Dit veld wordt momenteel gebruikt voor seizoensopslag van aardgas, waardoor veel relevante gegevens beschikbaar zijn voor het verkennen van een toepassing van CNES.

Andere belangrijke aspecten, die in deze studie echter niet verder in beschouwing worden genomen maar in vervolgonderzoek aan de orde moeten komen, betreffen de samenstelling van het gas, het water in het gasveld en de kwaliteit (dikte) van het afsluitende gesteente (de 'seal'. In deze studie wordt verondersteld dat deze in orde is voor gasvelden die in productie zijn, mits de drukken niet boven initiële drukken uitkomen). Voor de inpassing van de energieopslag in het energiesysteem is uiteraard ook de geografische locatie van belang.

2.3 Procesinstallatie voor CNES

De hieronder beschreven procesinstallatie voor CNES omvat de belangrijkste bovengrondse systemen die nodig zijn om de opslag te bedrijven (zie Tabel 1)

² Techno-economic Performance Evaluation of Compressed Air Energy Storage in the Pacific Northwest, PNNL-22235, U.S. Department of Energy, 2013.

Tabel 1: Bovengrondse systemen benodigd voor CNES.

Bovengronds systeem	Doel
Luchtcompressie	inlaat en compressie van lucht
Stikstofproductie	cryogene stikstofproductie uit lucht
Stikstofcompressie	compressie van stikstof voor injectie in de put
Stikstofexpansie	expansie van stikstof over een turbine
Katalytische verbrander	methaanverwijdering en stikstofuitlaat

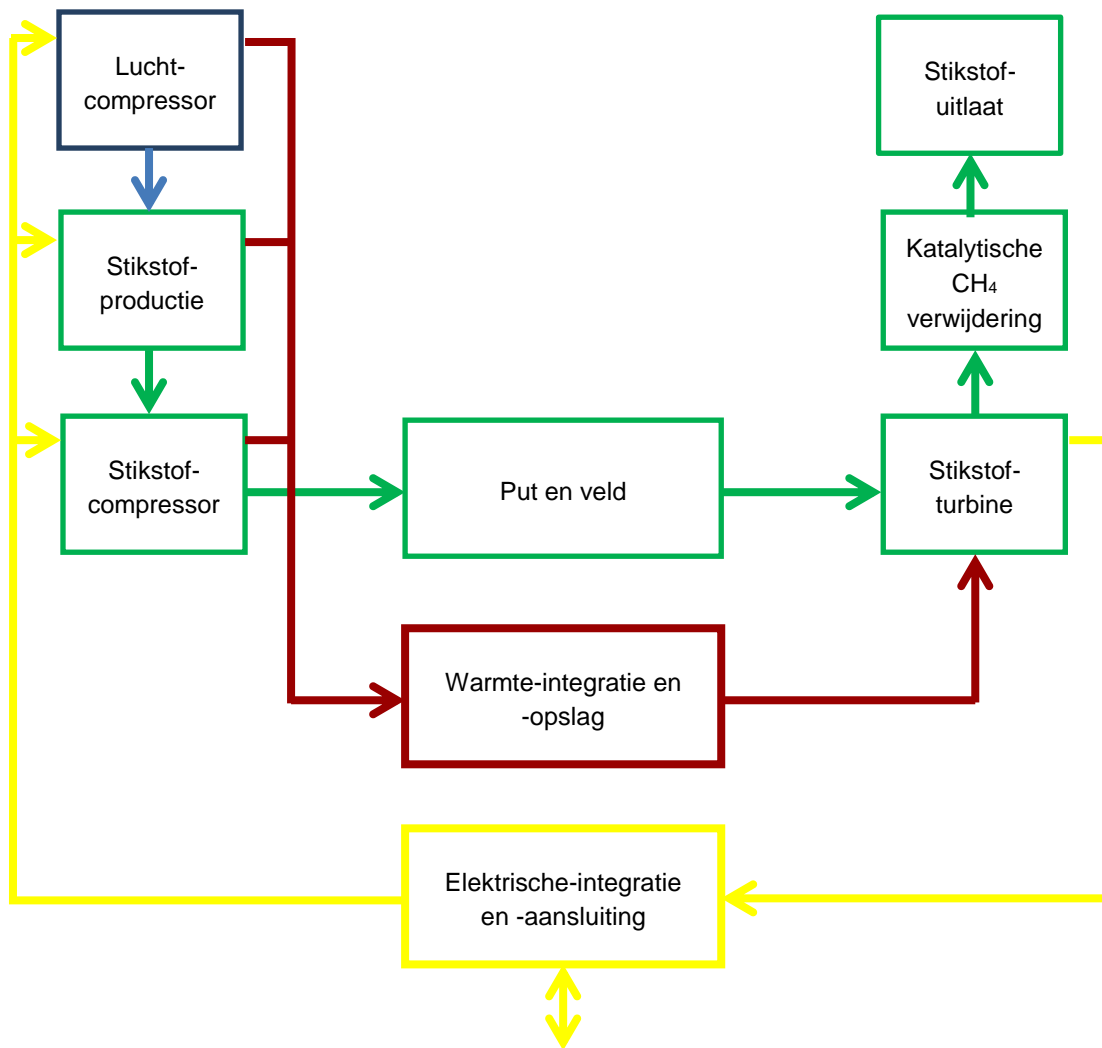
Zowel de luchtcompressie, stikstofcompressie als de stikstofexpansie zijn gangbare processtappen. Gedepleteerde gasvelden bevatten altijd nog een significante hoeveelheid aardgas. Bij toepassing van CNES zijn daarom voorzieningen nodig om te voorkomen dat het geproduceerde methaan samen met het stikstof in de buitenlucht terecht komt. Met behulp van een katalytische verbrander³ worden daarom de resten aardgas uit de vrijkomende stikstofstroom verwijderd. De samenstelling van het teruggeproduceerde gas, en de variatie daarvan gedurende de tijd, verschilt per reservoir. Een dynamisch model, gekalibreerd met metingen, is nodig om de samenstelling van het geproduceerde gas voor een specifieke casus te voorspellen gedurende de levenscyclus van het gasveld als energieopslag. Dit valt buiten de scope van deze studie. Daardoor kan in deze verkenning niet worden bepaald wat de eisen zijn ten aanzien van de katalytische verbranding.

Naast de genoemde hoofdcomponenten zijn diverse andere installaties nodig om het systeem draaiende te houden, zoals een gasdroging, persluchtvoorziening etc. Deze ondersteunende installaties worden verder niet besproken in deze studie.

Vermeld dient te worden dat het gasveld op druk gebracht moet worden voordat er energie in opgeslagen kan worden. De stikstof die hiervoor nodig is wordt 'kussengas' genoemd, het volume hiervan is niet inbegrepen in het werkvolume en heeft een aanzienlijke bijdrage in de kosten om een CNES-systeem in een gasveld te realiseren. Dit wordt verder toegelicht in het volgende hoofdstuk.

Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van het opslagsysteem middels CNES met de elementen van de procesinstallatie, het gasveld en de warmteopslag.

³ <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/lucht/digitale-ner/luchtemissie/overzicht-factsheets/factsheets/katalytische/>.



Figuur 1: Blokkenschema CNES-systeem inclusief elementen van de procesinstallatie, het gasveld en de warmteopslag.

2.4 Warmteopslag in combinatie met CNES

De efficiëntie van CNES kan verhoogd worden door de warmte die bij compressie van gas vrijkomt op te slaan en later weer te gebruiken voor het verwarmen van het gas bij expansie. Er zijn verschillende technologieën beschikbaar voor opslag van proceswarmte zoals heetwaterbuffers en bodemwarmteopslag. Vooral de opslagvolumes, de opslagduur en de opslagtemperatuur zijn van belang voor de keuze van de toe te passen opslagtechnologie.

CNES is vooral geschikt om energie voor een langere periode (weken tot maanden) op te slaan. De hoeveelheid warmte die opgeslagen moet worden om te gebruiken voor expansie is groot (meerdere GWh), en de temperatuur hoog (100 - 200°C). Hoge temperatuur opslag in de ondergrond (HTO) is de enige voldoende volwassen technologie voor grote volumes en hoge temperaturen, waarbij moet worden vermeld dat gedemonstreerde systemen niet de genoemde temperatuurrange halen. Er zijn enkele projecten die ervaring hebben met injectietemperaturen boven de 85°C. De hoogste temperatuur getest in een aquifer thermal

energy storage (TES) is 180°C en dit leidde tot grote uitdagingen met betrekking tot warmteterugwinning, pompen en de hoge waterdruk. [Bijlage 2](#) beschrijft de werking van HTO en verwachte toepassing in relatie met CNES.

2.5 Rekenmodel ter onderbouwing van CNES

Bij opslagsystemen is het werkvolume en daarmee de opslagpotentie (in kWh), het opslagrendement (percentage teruggeproduceerde energie ten opzichte van de energie nodig voor het laden) en het opslag- en productievermogen van belang. Om deze kernwaarden bij toepassing van CNES kwantitatief te onderbouwen, is een rekenmodel ontwikkeld. Hiermee is een specifieke casus doorgerekend, waarvan de resultaten hier worden toegelicht. [Bijlage 3](#) geeft een beschrijving van het model en een overzicht van de aannames bij de berekeningen.

Ter bepaling van de opslagwaarden is het nodig om een opslagcyclus vast te stellen. Hiertoe wordt gekeken naar de opwekprofielen van zon- en windenergie. In het verleden is gebleken dat er periodes kunnen zijn tot wel drie weken waarin weinig zon- en windvermogen wordt geleverd. Energielevering vanuit CNES kan deze periode overbruggen. In het model wordt daarom uitgegaan van drie weken energielevering. Voor de energieopslag is gekozen om het gasveld gedurende een langere tijd te vullen (waarbij het geïnjecteerde volume hetzelfde is als het geproduceerde volume). Zo kan de stikstofinstallatie met compressiestap klein blijven, waarmee kosten bespaard worden. In het model wordt daarom uitgegaan van een cyclus van zes weken energieopslag en drie weken energielevering (zie [Bijlage 3](#)).

NAM heeft ervaring met de opslag van aardgas in gasvelden, onder andere in het veld Grijpskerk dat in deze studie als referentie gebruikt wordt. In Tabel 2 worden de eigenschappen van het veld weergegeven. Grijpskerk heeft een indicatief totaal opslagvolume⁴ van 10 miljard Nm³ gas bij een initiële velddruk⁵ van 393 bar. De velddruk⁶ voor gasopslag mag daarbij variëren tussen de 180 en 375 bar.

Op basis van de productiegegevens van één van de putten van het Grijpskerkveld is een stikstof-productievolume van 8 miljoen Nm³/dag aangenomen in de, in deze studie, doorgerekende casus. Bij expansie resulteert dit in een geleverd vermogen van 42-53 MW, afhankelijk van de druk in het gasveld van respectievelijk 180-375 bar. De opslag wordt opgeladen door 4 miljoen Nm³/dag stikstof te injecteren. Dit resulteert in een benodigd vermogen van 45-74 MW tijdens het opladen bij een respectievelijke velddruk van 180-375 bar.

Voor een gasveld gelijk aan Grijpskerk zou ook gekozen kunnen worden om meerdere putten te gebruiken, hetgeen resulteert in hogere injectie- en productievermogens. Dit is afhankelijk

⁴ NAM data

⁵ NLOG

⁶ NAM data

van de beschikbaarheid en de kwaliteit van de putten. Dit is verder niet meegenomen in deze studie.

De opslagpotentie van CNES is afhankelijk van het opgeslagen volume gas bij maximale en bij minimale velddruk. Bij een velddruk tussen de 180 en 375 bar leiden modelberekeningen tot een totale indicatieve opslagpotentie van 340 GWh bij de toepassing van CNES in de, in deze studie, doorgerekende casus. Per opslagcyclus van zes weken laden en drie weken ontladen, wordt deze opslagcapaciteit maar ten dele benut. Zo wordt per opslagcyclus 21-27 GWh nuttige elektrische energie opgeslagen bij een respectievelijke velddruk van 180-375 bar. Het opereren van de CNES op lagere drukken (180 bar) is mogelijk, maar resulteert in een lagere opslagcapaciteit per opslagcyclus. Per opslagcyclus wordt tevens 31 GWh_{th} warmte opgeslagen.

Uit de modelberekeningen komt een opslagrendement voor de doorgerekende casus van 30-36%. Het rendement hangt daarbij af van de warmteopslag. Bij opslag tot 100°C is het rendement 30%, bij opslag tot 200°C loopt dit op tot 36%.

De in deze studie gepresenteerde waarden betreffen een eerste-orde schatting van de werking van het systeem voor een specifieke casus. Verfijning van het model is nodig om een meer accurate schatting te krijgen van de waarden, waarbij ook tijdsafhankelijke variatie in de drukken en vermogens wordt meegenomen.

Tabel 2: Eigenschappen van een energieopslag in een gasveld gelijkwaardig aan Grijpskerk. Zie verder [Bijlage 3](#).

Gasveld eigenschappen Grijpskerk	
Huidig werkvolume gasopslag	2,4 mld Nm³
Huidig druk regime	180 – 375 Bar
Opslag in veld gelijkwaardig aan Grijpskerk	
Laadtijd	6 weken
Ontlaad tijd	3 weken
Laad vermogen (MW)	72 - 74 MW , bij 4 mln Nm ³ /dag
Ontlaad vermogen (MW)	42 - 53 MW , bij 8 mln Nm ³ /dag
Totale energie inhoud opslagcyclus	21 - 27 GWh (3 wk x 7 dagen x 24 uur x 53 MW)
Totaal stikstof volume per cyclus	168 mln Nm³ (8 mln Nm ³ x 7 dagen x 3 wk)
Totaal druk verandering in cyclus	12 Bar
Maximale opslag potentie	340 GWh (2,4 mld Nm ³ / 8 mln Nm ³ x 24 uur x 47.5 MW)
Warmte opslag	
Vermogen laden	52 MW_{th}
Vermogen ontladen	62 MW_{th}
Totale warmteopslag per cyclus	31 GWh_{th} (62 MW _{th} x 24 uur x 7 dagen x 3 wk)

2.6 Alternatieve technieken voor grootschalige energieopslag

CNES heeft de potentie om grootschalig elektrische energie op te slaan en kan als zodanig vergeleken worden met alternatieve technologieën. Voor grootschalige opslag van elektriciteit is binnen Nederland aandacht voor de toepassing van valmeren (Ondergrondse Pomp Accumulatie Centrale, OPAC), CAES in zoutcavernes en 'power to hydrogen' inclusief waterstofopslag. Zie [Bijlage 4](#) voor een beschrijving van deze alternatieven.

De opslagpotenties van zowel OPAC (10 GWh⁷) als CAES in cavernes (maximaal 3 GWh⁸ per caverne) zijn veel kleiner in vergelijking met CNES (340 GWh voor de doorgerekende casus). De opslagpotentie van waterstof in zoutcavernes (240 GWh⁹ per caverne) is ook kleiner dan CNES, waarbij de energie beschikbaar is in de vorm van waterstof. Daar staat tegenover dat het aantal mogelijke cavernes vele malen (tientallen) groter is dan het aantal velden met vergelijkbare eigenschappen als de op Grijpskerk gebaseerde casus in deze studie.

De genoemde opslagrendementen van zowel OPAC (80%)¹⁰ als CAES (70%)¹¹ zijn daarentegen aanzienlijk hoger in vergelijking met CNES inclusief warmteopslag (30-36%). Het opslagrendement van CNES is vergelijkbaar met dat van waterstofproductie en -opslag met terug conversie naar elektriciteit (29 - 33%)¹² (zie Figuur 2).

⁷ www.o-pac.nl (2 TWh opslagcapaciteit op basis van 200 cycli per jaar resulteert in 10 GWh per cyclus)

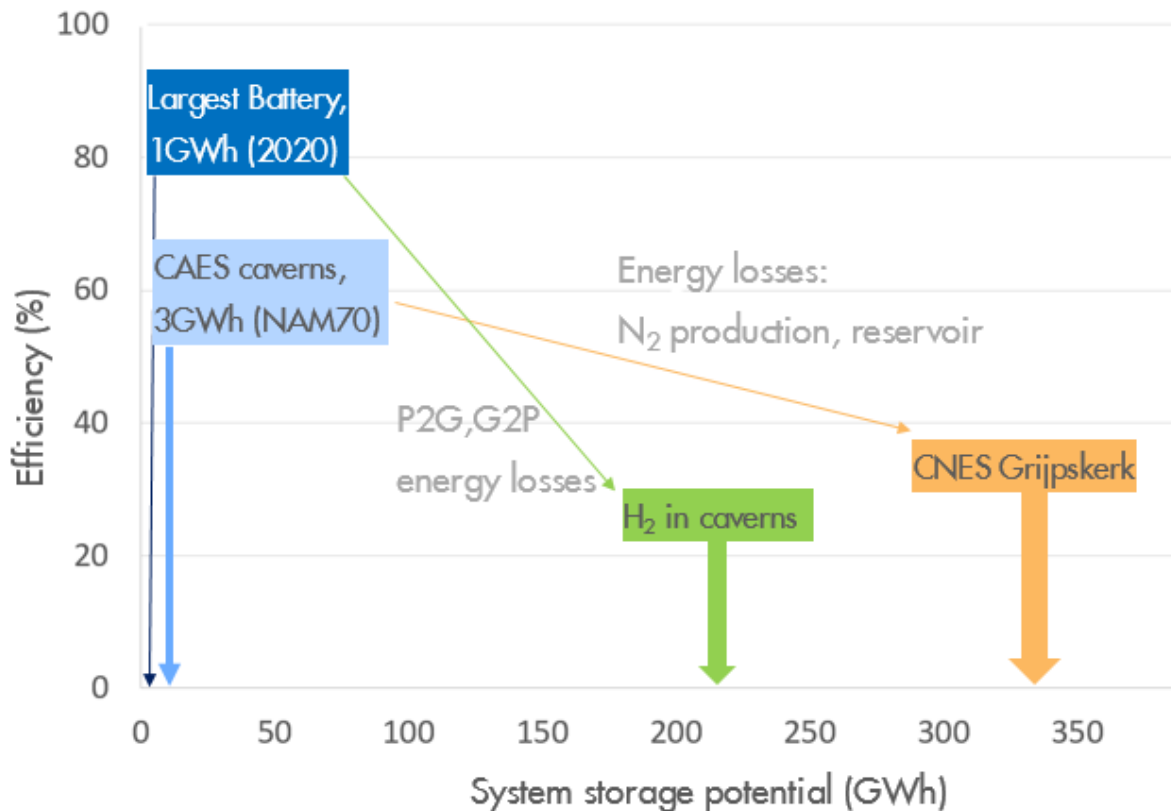
⁸ HyUnder (EU) - Benchmarking of large scale seasonal hydrogen underground storage with competing options

⁹ Energystock

¹⁰ IEA, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells

¹¹ www.storelectric.com, op basis van combinatie met warmte opslag

¹² IEA, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells



Figuur 2: Opslagpotenties [en theoretische –rendementen] van systemen voor grootschalige energieopslag in Nederland.

2.7 Conclusies

De opslag van energie door compressie en injectie van stikstof in gasvelden (CNES) is technisch haalbaar. Gasvelden zijn bewezen structuren geschikt voor injectie van stikstof. Een efficiënte CNES is daarbij afhankelijk van een geschikt gasveld met, naast een geschikt volume, vooral een hoge permeabiliteit-dikte. De toegepaste procesinstallatie met compressoren, stikstofproductie, warmteopslag (tot 100°C) en expansieturbines bestaat uit beschikbare technologieën. De toepassing van CNES is daarbij afhankelijk van de aanwezigheid van een geschikte (ondiepere) aquifer voor de warmteopslag. Bij toepassing op een gasveld gelijk aan dat van Grijpskerk kan op basis van de modelberekeningen 340 GWh aan nuttige elektrische energie opgeslagen worden bij een rendement tussen de 30–36%, afhankelijk van de temperatuur van de warmteopslag. Het gasveld Grijpskerk geldt hierbij als een van de meest gunstige gasvelden in Nederland.

Nader onderzoek

- De toepassing van hoge temperatuur warmteopslag op een temperatuur van 100 - 200°C dient nader onderzocht te worden. Toepassing met warmteopslag bij 200°C in plaats van 100°C verhoogt het opslagrendement van 30% naar 36%, maar ook de

kosten. Zelfs voor lagere temperaturen is het technology readiness level (TRL) laag vanwege de grote benodigde capaciteit van de HTO.

- De gassamenstelling bij productie na opslag in het gasveld dient nader onderzocht te worden. Hiervoor is een dynamisch model nodig dat inzicht geeft in de verwachte gassamenstelling na expansie tijdens de laad-ontlaadcycli gedurende de levensduur van een CNES-energieopslag. Op basis hiervan kan de gaszuivering en katalytische verbranding gedimensioneerd worden.
- Technische optimalisatie van de toepassing van CNES door integratie met bestaande gasinfrastructuur dient nader onderzocht te worden. Zoals de toepassing in combinatie met bestaande stikstofinstallaties voor het bijmengen van hoogcalorisch gas.

3 Economische haalbaarheid van CNES

In het toekomstige energiesysteem met voornamelijk zon- en windenergie is grootschalige energieopslag essentieel voor een betrouwbare energievoorziening. Het bepalen van de business case voor grootschalige opslag is moeilijk aangezien opslag niet als een losstaand systeem beschouwd kan worden en de huidige hoeveelheid duurzame energieproductie nog geen grootschalige opslag behoeft. Binnen dit onderzoek is daarom het investeringsniveau van CNES ingeschat en vergeleken met alternatieve grootschalige opslagstechnologieën. Ook worden kansen benoemd die de economische haalbaarheid van CNES binnen Nederland sterk vergroten.

3.1 Investeringskosten voor toepassing van CNES

CNES is een nieuwe technologie. Om de investeringskosten voor toepassing van CNES te bepalen zijn inschattingen gemaakt op basis van ervaring, kentallen en projectinformatie. Het abstracte niveau van deze studie maakt echter dat de kostenschattingen op basis van de beschikbare kennis een onzekerheid hebben van +/-50%.

De investeringskosten worden daarbij bepaald door de kosten voor de procesinstallatie, inclusief warmteopslag, en het vullen van het gasveld met stikstof. Voor het gemodelleerde systeem is de indicatie 286¹³ miljoen euro (zie Tabel 3). De procesinstallatie vraagt daarbij een investering van 178¹⁴ miljoen euro (zie Tabel 3). Dit is inclusief de compressie, stikstofproductie, expansie, warmteopslag, technische automatisering en elektrische aansluiting en projectrealisatie. Van deze systeemkosten vormen de stikstofproductie en -compressie met 105 miljoen euro de grootste investering. Er is geen kostenindicatie beschikbaar voor de gaszuivering en katalytische verbranding, omdat de specificaties van het geproduceerde gas ontbreken en er onvoldoende informatie direct voorhanden is. De genoemde kosten zijn hierdoor een optimistische inschatting.

De kosten voor het op druk brengen van het veld hangen af van het volume van het gasveld, de begindruk van het veld en de elektriciteitsprijs. Uitgaande van een uitgeproduceerd gasveld op 10 bar, met een initieel gasvolume van 10 miljard m³ dat naar een maximale druk van 375 bar wordt teruggebracht, is 4 miljoen MWh elektriciteit nodig (zie [Bijlage 3](#)). Rekening houdend met een prijs van 30 €/MWh resulteert dit in een investering van 108 miljoen euro (zie overzicht in Tabel 3).

¹³ Kostencalculatie NAM, Liandon

¹⁴ Kostencalculatie NAM, Liandon

Tabel 3: Investeringskosten van een CNES-systeem voor de doorgerekende casus.

Procesinstallatie CNES (53 MW)	Meuro
Stikstofproductie en -compressie	105
Procesinstallatie expansie	30
HTO15	25
Gaszuivering/katalytische verbranding	n.t.b.
Technische automatisering en elektrische aansluiting	13
Projectrealisatie incl. engineering en vergunningen	5
<i>Totaal procesinstallatie</i>	<i>178</i>
Vulling gasveld (kussengas)	108
<i>Totaal (procesinstallatie en vulling)</i>	<i>286</i>

De investering voor het systeem op basis van genoemde bedragen bedraagt daarmee 3.400 €/kW geïnstalleerd vermogen (kapitaalkosten excl. vulling). Aanvullend is 0,32¹⁶ €/kWh opslagcapaciteit benodigd voor het op druk brengen van het gasveld (kussengas).

CNES kan economisch vergeleken worden met alternatieve grootschalige opslagtechnologieën. Zowel valmeren (OPAC: 1.280 €/kW)¹⁷ als CAES (850 €/kW)¹⁸ hebben een aanzienlijk lager investeringsniveau in vergelijking met CNES (3.400 €/kW). CNES en waterstofproductie en -opslag (1.625 - 5.385 €/kW)¹⁹ zitten op een vergelijkbaar kostenniveau.

Tabel 4: Investeringskosten (€/kW) voor verschillende opslagtechnologieën.

Technologie	Investeringskosten [€/kW]
CNES	3.400
CAES	850
OPAC	1.280
Waterstof (stroom-stroom)	1.625 - 5.385

3.2 Businessmodellen

De economische waarde van grootschalige opslag van energie gaat veel verder dan enkel het prijsverschil tussen de opgeslagen en geleverde energie. Deze hangt af van installatie

¹⁵ TNO kosten indicatie

¹⁶ 108 miljoen € / 340 miljoen kWh

¹⁷ IEA, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells (pumped hydro storage: 1 500 USD/kW, wisselkoers 1.17 \$/€).

¹⁸ IEA, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells (CAES: 1 000 USD/kW, wisselkoers 1.17 \$/€).

¹⁹ IEA, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells (1 900 (with alkaline EL) - 6 300 USD/kW (with PEM EL), wisselkoers 1.17 \$/€).

specifieke aspecten zoals het productievermogen, de duur waarmee dit vermogen geleverd kan worden en de regelsnelheid.

Uit de 'Nationale Routekaart Energieopslag' blijkt dat door de energietransitie vraag ontstaat naar flexibiliteit op zowel minuten- en urenschaal, als op een schaal van enkele dagen tot enkele weken. Door de benodigde stikstofinstallatie is CNES weinig flexibel bij het laden waardoor deze niet geschikt is voor opslag op korte tijdschalen. CNES biedt daarbij vooral kansen bij de langere tijdschalen vanwege de mogelijkheid om langdurig vermogen te kunnen leveren. Daarmee kan CNES dienen als strategische energieopslag voor die momenten dat er langdurig geen zon- en windvermogen beschikbaar is. In het huidige energiesysteem wordt de strategische energieopslag grotendeels ingevuld door de aardgas bergingen, maar als fossiele energiebron valt aardgas buiten de beschouwing van deze verkenning.

Wanneer enkel gekeken wordt naar het benodigde prijsverschil tussen de ingekochte en verkochte energie dan is een verkoopprijs nodig van 365 €/MWh²⁰. Uitgaande van een scenario met vier opslagcycli per jaar, een inkoopprijs van 30 €/MWh bij toepassing van CNES, inclusief realisatie van een stikstofinstallatie en het vullen van het veld met stikstof. Wanneer gebruikgemaakt kan worden van een bestaande stikstofinstallatie, exclusief het vullen van het gasveld met stikstof, is de benodigde verkoopprijs 165 €/MWh²¹. Deze prijzen worden voornamelijk bepaald door de kapitaal- en energiekosten. Met basismarktprijzen die de afgelopen jaren variëren tussen de 30 en 50 €/MWh²² is CNES in het huidige energiesysteem niet rendabel. Ook het gebruik van de kortstondige spotprijzen tot 70 €/MWh²³ is onvoldoende. Het is echter te verwachten dat energieprijzen in de toekomst bij overschotten aan zon- en windenergie zullen dalen. Bij tekorten nemen de prijzen toe, dit effect zal sterker worden met het toenemende aandeel aan duurzame energiebronnen. Beide fenomenen zullen de economische kansen voor CNES doen toenemen. Daarnaast is er een aantal technische kansen die de economische inzet, en daarmee de waarde van CNES, in het toekomstige energiesysteem sterk kunnen vergroten.

3.3 Kansen

Uit voorgaande blijkt dat CNES een technisch haalbaar opslagconcept is met een opslagpotentie die ordes groter is dan conventionele CAES. De kosten voor toepassing van CNES kunnen aanzienlijk verlaagd worden door integratie met de bestaande gasinfrastructuur. Te denken valt aan (een combinatie van) de volgende opties:

²⁰ Gerekend met een afschrijftermijn van 20 jaar over de installatie, 5% onderhoud- en beheerkosten over de systeemkosten en 5% interne rentevoet, exclusief BTW en energiebelasting.

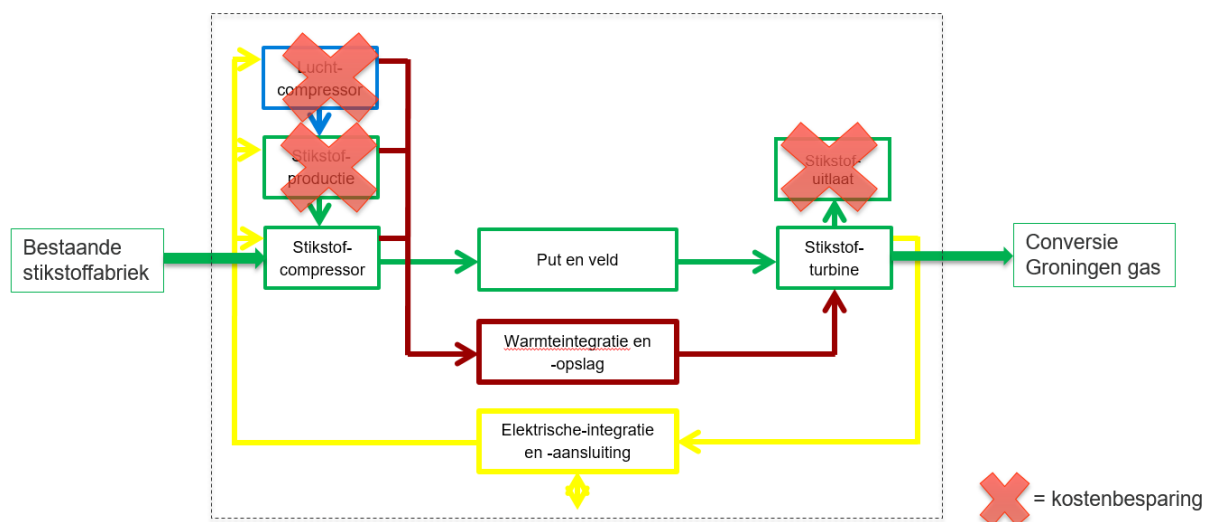
²¹ Gerekend met een afschrijftermijn van 20 jaar over de installatie, 5% onderhoud- en beheerkosten over de systeemkosten en 5% interne rentevoet, exclusief BTW en energiebelasting.

²² Energietrends2016

²³ <https://www.energiemarktinformatie.nl/beurzen/elektra/>

1. Het benutten van bestaande stikstofproductie- en compressiecapaciteit, bijvoorbeeld van NAM bij De Wijk (Hoogeveen), of van Gasunie (Ommen, Zuidbroek, Alkmaar). Er ligt een extra kans door integratie van de nog nieuw te ontwikkelen stikstofproductie van Gasunie. Met een CNES-demo-installatie en optimalisatie van stikstofproductie en -compressie op tijden dat de elektriciteitsprijs laag is (zie Figuur 3).
2. Combineren van het vullen van het gasveld met stikstof (kussengas) geoptimaliseerd met 'enhanced gas recovery', waarmee extra aardgas uit het gasveld gewonnen wordt. Dit levert inkomsten vóóordat de CNES in bedrijf wordt genomen en verkleint het risico van de investering.
3. Het gebruiken van het geproduceerde stikstof-aardgas mengsel om hoogcalorisch gas te verdunnen, in plaats van verbranding van aardgas in het katalytische verbrandingsproces. Door langstromend hoogcalorisch gas te vermengen tot Groningen kwaliteit, is minder importgas nodig, wordt het stikstof nuttig ingezet én is de waarde van het meegeproduceerde aardgas uit de CNES fors hoger.

De toepasbaarheid van deze kansen, en de daarmee te behalen economische waarde voor toepassing van CNES, dient nader onderzocht te worden.



Figuur 3: CNES-blokkenschema met besparing door integratie met een bestaande stikstoffabriek.

3.4 Conclusies

CNES kan worden toegepast voor energieopslag op langere tijdschalen van weken. In het huidige energiesysteem heeft dit echter nog nauwelijks economische waarde. De toepassing van CNES is wel mogelijk economisch haalbaar, indien synergie wordt gevonden met bestaande gasinfrastructuur. Bij productie vereist CNES zonder deze synergie verkoopprijzen van 165 – 365 €/MWh, hetgeen ruim hoger is dan de huidige marktprijzen (40 en 50 €/MWh) en spotprijzen (tot 70 €/MWh).

Het investeringsniveau (1.100 - 3.100 €/kW) ligt in de range van waterstofproductie, -opslag en conversie (1.625 - 5.385 €/kWh) en ligt veel hoger dan dat van CAES (850 €/kWh) en

OPAC (1.280 €/kWh). De aanvullende kosten voor toepassing van CNES zijn daarbij beperkt tot het vullen van het gasveld met stikstof à 0,32 €/kWh geïnstalleerde capaciteit.

Nader onderzoek

- De synergiën bij de toepassing van CNES in combinatie met een bestaande of te realiseren stikstofinstallatie verdient nader onderzoek. Met de inzet van bestaande of beschikbare stikstofinstallaties kan het investeringsniveau aanzienlijk teruggebracht worden.
- De kosten voor veldvulling met stikstof kunnen mogelijk (deels) terugverdiend worden met de opbrengsten van aardgas door veldvulling te combineren met enhanced gas recovery. Dit kan het risico van de investeringen verkleinen.
- De inzet van het geproduceerde stikstofgas en meegeproduceerde aardgas voor het bijmengen van hoogcalorisch gas tot Groningen kwaliteit kan nader onderzocht worden. Dit kan tot hogere inkomsten leiden.
- De waarde van CNES als (strategische) energiebuffer in het toekomstige energiesysteem dient nader onderzocht te worden. Zo wordt de inzetstrategie van het opslagsysteem in het toekomstige energiesysteem onderzocht.

4 Maatschappelijke acceptatie van CNES

Het gebruik van de ondergrond voor energiedoeleinden is momenteel onderwerp van maatschappelijke discussie. Het feit dat gasvelden al worden gebruikt voor de opslag van aardgas (Grijpskerk, Norg, Bergermeer) en stikstofinjectie in gasvelden al toegepast wordt (de Wijk), betekent niet dat de omgeving zonder meer meegaat bij toepassing van CNES. Het is daarom niet mogelijk om generiek te stellen dat de toepassing van CNES maatschappelijk haalbaar is. De kans op maatschappelijke acceptatie van energieopslag in gasvelden vergroot echter wel aanzienlijk door de stakeholders zorgvuldig te betrekken bij een project; van voorbereiding tot en met afronding van het project.

Het betrekken en informeren van stakeholders kan ook uitgedrukt worden met 'participatie' en vormgegeven worden in een 'participatieproces'. Participatie is iets waar de maatschappij steeds meer om vraagt; zij kantelt van een representatieve naar een participatieve democratie²⁴. Dat betekent dat de samenleving meer grip en direct zeggenschap wil over haar leefomgeving. Dit vraagt initiatiefnemers hun plannen en projecten in de leefomgeving anders te ontwikkelen en uit te voeren dan van oudsher gewend, namelijk met participatie van álle stakeholders en van plan- tot en met afrondingsfase. Ook de aanstaande Omgevingswet vraagt dat de omgeving van energieprojecten actiever bij besluitvorming over die projecten wordt betrokken²⁵. Daarnaast wordt gesteld dat een aantal manieren om conflicten in een 'not in my backyard (NIMBY)'-situatie te voorkomen, zijn i) onderhandeling met de bevolking, ii) het instellen van een mediator en iii) het compenseren van de bevolking²⁶ (bij issues, zie ook [Bijlage 5](#)). Hierbij is het belangrijk dat geen overcompensatie ontstaat. Dit wekt wantrouwen bij de bevolking. Wanneer gekozen wordt voor de onderhandeling of mediator optie is het belangrijk dat de lokale bevolking vroegtijdig in het besluitvormingsproces wordt betrokken. Wanneer in een later stadium eventuele compensatie wordt gekozen, is overleg met de bevolking in de keuze van compensatie van belang.²⁷

Een participatieproces omvat grofweg de volgende stappen:

1. Breng relevante stakeholders op gestructureerde wijze in beeld.
2. Betrek stakeholders op gepaste²⁸ wijze in het participatieproces.
3. Bepaal gevoeligheden en kansen samen met de stakeholders om meerwaarde te creëren.

²⁴ Salverda, I., Pleijte, M. en Van Dam, R. (2014) "Meervoudige democratie: meer ruimte voor burgerinitiatieven in het natuurdomein". Alterra Wageningen UR

²⁵ Kwast, O. en Wesselink, M. (2016) "Strategisch management van energieprojecten onder de Omgevingswet". WesselinkVanZijst & Wetgevingswerken

²⁶ Vos, de T., (2015), "De maatschappelijke acceptatie van compressed air energy storage; een onderzoek naar de invloed van diverse factoren op de maatschappelijke acceptatie van compressed air energy storage". TU Delft

²⁷ Het onderzoek van De Vos (2015) is gericht op de CAES-techniek. Echter voor deze context van maatschappelijke acceptatie komen CAES en CNES voldoende overeen, waardoor het mogelijk is om hier te refereren aan dit onderzoek.

²⁸ Zie onder meer de interactie-index in [Bijlage 5](#).

4. Benader het participatieproces als een uniek, doorlopend en dynamisch proces van voorbereiding tot en met afronding van het project.

[Bijlage 5](#) gaat dieper in op hoe middels participatie de kans op maatschappelijke acceptatie van CNES vergroot kan worden. Participatie is zeer locatie gebonden. De toepassing van CNES en het daarvoor benodigde participatieproces begint daarom bij een consortium dat de toepassing daarvan verder wil onderzoeken op een specifieke locatie.

5 Conclusies

Binnen dit onderzoek is gekeken naar de technische en economische haalbaarheid van CNES in Nederland. Tevens is gekeken naar de maatschappelijke aspecten bij toepassing van CNES. Op basis van het onderzoek kan het volgende geconcludeerd worden:

CNES is technisch haalbaar:

- Gasvelden zijn bewezen structuren geschikt voor de injectie van stikstof.
- De benodigde procesinstallatie (compressie, stikstofproductie, expansie, katalytische verbranding, warmteopslag tot 100°C) bestaat uit gangbare technische componenten.
- De in deze studie doorgerekende casus heeft een opslagrendement van 30-36% van stroom naar stroom, afhankelijk van de temperatuur van de warmteopslag.
- CNES heeft een grote opslagpotentie (340 GWh in de op Grijpskerk gebaseerde doorgerekende casus).
- De toepassing van CNES is afhankelijk van de beschikbaarheid van een geschikt (permeabel) gasveld en een geschikte aquifer voor de warmteopslag.

Nader onderzoek ter vergroting van technische haalbaarheid:

- De toepassing van hoge temperatuur warmteopslag met temperaturen boven de 100°C.
- De gassamenstelling en de consequenties voor katalytische verbranding bij productie na opslag in het gasveld.
- Technische en economische optimalisatie mogelijkheden door integratie van CNES met bestaande gasinfrastructuur.

CNES is door integratie met de huidige gasinfrastructuur mogelijk economisch haalbaar:

- De kosten voor CNES worden bepaald door de investering in de procesinstallatie (met name de stikstofproductie) en voor het vullen van het gasveld met kussengas.
- Door gebruik te maken van bestaande installaties kan de investering voor CNES (3.400 €/MW geïnstalleerd vermogen in het gepresenteerde voorbeeld, indicatie met 50% nauwkeurigheid) aanzienlijk verlaagd worden.
- Het vullen van de CNES-opslag in combinatie met enhanced gas recovery biedt kansen om de economische risico's van de initiële investeringen te verkleinen.
- Het gebruiken van het geproduceerde stikstof/aardgas mengsel om hoogcalorisch gas te versnijden tot laagcalorisch gas kan additionele inkomsten opleveren.

- De benodigde verkoopprijzen bij productie zonder aanvullende waarde liggen boven de huidige marktprijzen (40 en 50 €/MWh) en spotprijzen (tot 70 €/MWh).

Nader onderzoek ter vergroting van de economische haalbaarheid:

- Toepassing in combinatie met de inzet van bestaande stikstofproductie-eenheden.
- Het toepassen van enhanced gas recovery tijdens het vullen van een CNES-opslag.
- De inzet van het geproduceerde stikstofgas voor het bijmengen van hoogcalorisch gas tot laagcalorisch gas.
- De inzet en de waarde van CNES als (strategische) energieopslag in het toekomstige energiesysteem.

Maatschappelijke acceptatie

Het is niet mogelijk om generiek een uitspraak te doen over de maatschappelijke haalbaarheid van CNES. Wel dat de kans hierop aanzienlijk wordt vergroot door de maatschappij zorgvuldig te betrekken bij een specifiek project (van voorbereiding tot en met afronding), middels een gedegen participatieproces.

6 Aanbeveling

In het toekomstige energiesysteem is grootschalige opslag van energie essentieel voor een continue energievoorziening in tijden dat er geen zon- en windenergie beschikbaar is. Momenteel is de opslagcapaciteit echter nagenoeg nul. CNES biedt in potentie een opslagcapaciteit van dermate grote omvang dat deze techniek kan dienen als een strategische energieopslag ten behoeve van de continue energievoorziening.

Het is dan ook sterk aan te bevelen om de openstaande punten verder te onderzoeken, zoveel mogelijk gericht op een specifieke locatie. Hierbij moet vooral gelet worden op de economische kansen voor integratie met de bestaande gasinfrastructuur. Voor de technische haalbaarheid is bij de selectie van de locatie de beschikbaarheid van een geschikte aquifer voor de warmteopslag vereist. De kansen ten aanzien van het gebruik van bestaande stikstofinstallaties en de wensen en belangen van de stakeholders zijn mede bepalend in het te kiezen veld. Het ligt voor de hand in eerste instantie een uitgebreidere, locatie specifieke haalbaarheidsstudie te verrichten, alvorens wordt overgegaan tot het in de praktijk testen van (componenten van) een CNES-systeem.

Op het technische vlak kan tijdens de uitvoering de benodigde procesinstallatie en warmteopslag verder gedetailleerd en onderzocht worden voor toepassing op het geselecteerde gasveld. Ook wordt het opslagsysteem dynamisch gemodelleerd ter doorrekening van de opslagcyclus.

Bijlage 1: Technieken voor stikstofproductie

Voor de stikstofproductie zijn de volgende technologieën beschikbaar:

1. Cryogene luchtscheiding (ASU: Air Separation Unit)
2. Adsorptie (PSA: Pressure Swing Adsorption)
3. Membraanscheiding

1. Cryogene luchtscheiding

Dit is een veel voorkomende technologie om grote hoeveelheden stikstof te produceren met een hoge zuiverheidsgraad. Het principe werkt op basis van compressie van lucht, waarna deze sterk wordt afgekoeld om de onzuiverheden eruit te filteren, om uiteindelijk een zuivere stikstof, zuurstof en argon stroom over te houden. De stikstof wordt vervolgens verder gecomprimeerd voor injectie in het gasveld. Een ASU kan stikstof met een relatief laag zuurstofgehalte produceren (10 ppm O₂), met een constante kwaliteit en kwantiteit. Zie Figuur 4 voor een schematische weergave van deze techniek.

2. Pressure Swing Adsorption (PSA)

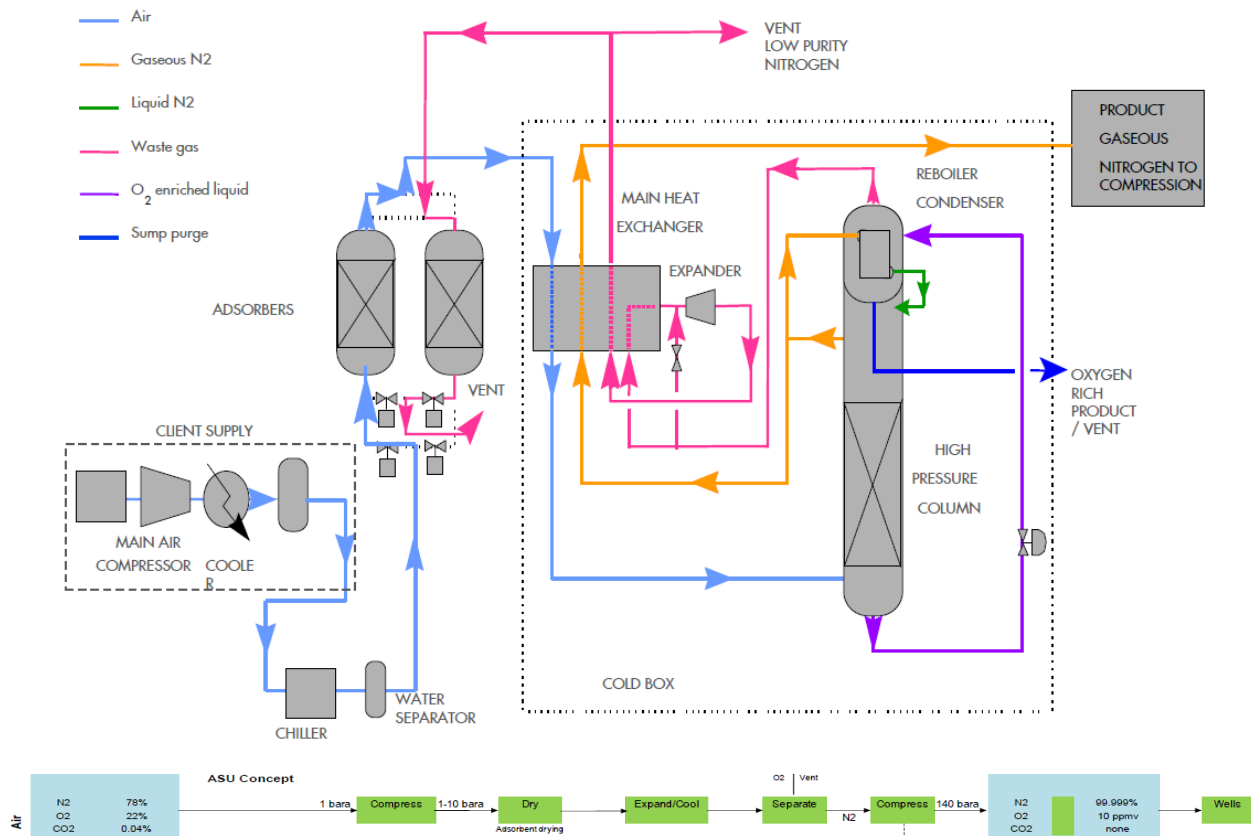
PSA is een technologie die gassen van elkaar scheidt middels verschil in aanhechtingsvermogen, hetgeen wordt veroorzaakt door specifieke moleculaire karakteristieken van de verschillende gassen. De PSA-technologie verbruikt meer energie dan de andere twee technologieën. Door middel van de PSA kan uit lucht een stikstofstroom geproduceerd worden met een resterende onzuiverheid van ongeveer 0,5% (5.000 ppm).

3. Membraanscheiding

Membraanscheiding is geschikt voor productie van relatief kleine hoeveelheden stikstof. Met de beperking dat het resterende zuurstofgehalte tot 1% (10.000 ppm) kan oplopen, hetgeen niet acceptabel is voor injectie in oude gasreservoirs.

Van bovenstaande technieken voldoet alleen het cryogene proces aan de vereiste zuurstofspecificatie. Daarnaast is deze technologie het meest geschikt voor het produceren van grote hoeveelheden stikstof en energie-efficiënter dan de PSA-technologie. De flexibiliteit van een dergelijke installatie is echter beperkt; de stikstofproductie kan naar verwachting tussen 50 en 100% van de capaciteit bedreven worden²⁹. Lagere productieniveaus zijn nagenoeg onmogelijk en vereisen het stopzetten van het hele proces. Zowel het stopzetten, als het opstarten van een ASU is een delicaat proces dat meerdere uren duurt. Indien een grotere flexibiliteit gewenst is, zal een stikstofbuffer toegevoegd moeten worden aan de installatie.

²⁹ http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/OCC2/Abstracts/Abstract%20OCC2%20ASU%20Air%20Liquide.pdf
Air Liquide, Air separation Unit: Flexibility & Energy Storage



Figuur 4: Schematische weergave ASU (cryogene luchtafscheiding t.b.v. stikstofproductie).

De precieze grenzen van de flexibiliteit zijn afhankelijk van de gekozen installatiefilosofie (bijv. 1 x 100% of 2 x 50% capaciteit). Verder zijn er diverse mogelijkheden in het ontwerp, zoals een modulaire opbouw, na-compressie, afvang van CO₂, etc.

De levensduur voor dergelijke proces technische installaties is meestal 15-20 jaar. Een mogelijk ASU-compressor ontwerp zou uit kunnen gaan van twee parallelle installaties van elk 0,6-0,7 mln. nm³/d om op de gewenste injectiehoeveelheid van 1,5 mln. nm³/d uit te komen (met of zonder redundantie). Drie kleinere installaties zouden meer flexibiliteit bieden m.b.t. N₂ productie, maar waarschijnlijk hogere kosten met zich meebrengen.

Start en stop intervallen

Hoewel elke installatie ontworpen wordt voor een specifiek doel waardoor elke installatie uniek is, worden hier enkele algemene kenmerken samengevat:

- Interval gepland onderhoud: 4 jaar
- Benodigde tijd voor het ontdooien van de koelbox: 24 uur
- Opstarttijd voor de stikstofproductie unit:
 - Na geplande stop van ten hoogste 1 uur: 2 tot 4 uur
 - Na geplande stop van 8 uur of korter: 3 tot 5 uur
 - Na gepland onderhoud van 24 uur: 6 tot 8 uur

Planning

Realisatie van een ASU is mogelijk binnen ongeveer drie jaar vanaf het moment van aanschaf. Dit hangt sterk af de marktvraag naar ASU-installaties, vooral de levertijd van de compressor kan sterk variëren.

Bijlage 2: Hoge temperatuur opslag (HTO)

Hoge temperatuur opslag is een techniek waarbij heet water voor langere tijd wordt opgeslagen in het natuurlijke poriënvolume van bodemlagen, zoals zand of zandsteen. De diepte waarop de warmte wordt opgeslagen, kan variëren van enkele honderden meters tot ongeveer twee kilometer. Het warme water wordt opgeslagen wanneer een overschot bestaat en geproduceerd wanneer er vraag naar is. Traditioneel wordt HTO vooral toegepast voor seizoensopslag. Hierbij wordt warmte opgeslagen in de zomer, wanneer de warmtevraag laag is, en geproduceerd in de winter, wanneer de warmtevraag hoog is (zie voor een schematische weergave Figuur 5). HTO is een bewezen technologie, die op veel plaatsen succesvol is of wordt toegepast. Voor hogere temperaturen, zeker boven 100°C, is de technologie nog niet vaak toegepast noch bewezen. De hoogste, geteste temperatuur is 180°C en dit leidde tot grote uitdagingen met betrekking tot warmteterugwinning, pompen en de hoge waterdruk.

Werkwijze

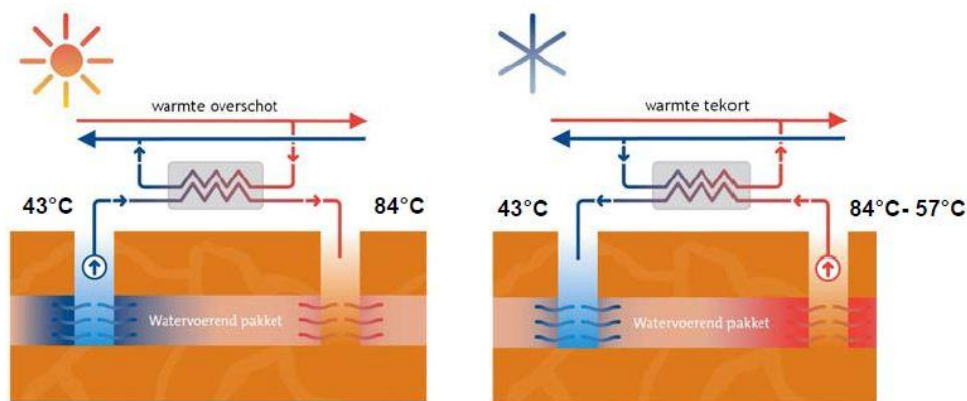
De ondergrond van Nederland bestaat uit een min of meer horizontale stapeling van afwisselend zand (zandsteen), klei (kleisteen), kalksteen en zout. Met name zandsteen is poreus. Een poreuze laag wordt 'reservoir' of 'aquifer' genoemd. Deze wordt aan boven- en onderzijde begrensd door minder poreuze (impermeabele) lagen ('aquitard' of 'seal'). Het volume tussen de korrels wordt ingenomen door water. De temperatuur van dit water neemt in Nederland toe met ruim 30°C per kilometer. Bij een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 10°C betekent dit dus dat de temperatuur op een kilometer diepte ongeveer 40°C is, en op twee kilometer ongeveer 70°C (zie Figuur 6).

Wanneer warm water in een verticale put (de 'injector') in een poreuze laag wordt geïnjecteerd, zal rondom de put een volume warm water ontstaan. Het geïnjecteerde water verdringt het al aanwezige bodemwater. Dit heet het laden van de opslag. Het volume heeft ongeveer de vorm van een verticale cilinder. De cilinder wordt aan bovenzijde begrensd door impermeabele lagen, die voorkomen dat het warme water naar boven verdwijnt. Het ontladen van de HTO vindt in omgekeerde volgorde plaats: het volume warme water wordt in dezelfde put opgepompt, tot zoveel van het warme water is geproduceerd dat oorspronkelijk aanwezig bodemwater geproduceerd gaat worden. Dit wordt gekenmerkt door het dalen van de temperatuur van het productiewater.

Een HTO kan een zeer groot volume water opslaan. Dit water wordt in koude toestand onttrokken aan hetzelfde reservoir door een tweede put (de 'producer'), die zich op enige afstand van de eerste bevindt. Aan de oppervlakte wordt het koude water verwarmd, alvorens weer geïnjecteerd te worden. Het vermogen van een HTO kan met gemak enkele MW_{th} bedragen en het opslagvolume vele GWh.

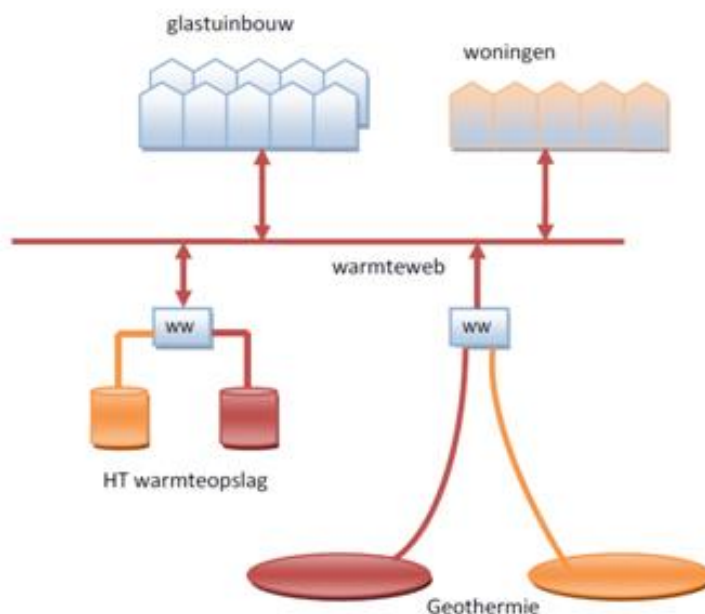
Gedurende de opslagperiode blijft het warme water op zijn plaats (wanneer de natuurlijke grondwaterstroming beperkt is). Er is wel enig warmteverlies aan boven- en onderliggende lagen door conductie, maar dit is relatief weinig. Niet al het opgeslagen warme water kan teruggeproduceerd worden. De efficiëntie van de HTO is gedurende de eerste paar opslagcycli relatief laag. Dit wordt veroorzaakt door de opwarming van het reservoir. Na verloop van tijd kan de efficiëntie echter ruim boven de 75% uitkomen. Met hogere temperaturen wordt dit rendement echter wel negatief beïnvloed.

De opslagcapaciteit hangt met name af van de dikte van het reservoir en het voorkomen van (ongunstige) kleilagen. De efficiëntie hangt vooral af van de permeabiliteit van het reservoir. Hoe groter de permeabiliteit, hoe makkelijker water te injecteren en te produceren is en neemt sterk af met de diepte. Ook de diepte van het reservoir is belangrijk; boorkosten vormen een aanzienlijk deel van de kosten van een HTO. De boorkosten nemen ongeveer lineair toe met de diepte. Een put met grotere diameter kan meer water injecteren / produceren, maar is ook duurder. Verder is de temperatuur van het opgeslagen water belangrijk; hoe hoger de temperatuur, hoe meer energie per verplaatst volume water opgeslagen wordt. Hogere temperaturen zullen ook de dichtheidsstromingen in het doelreservoir sterk beïnvloeden en zal invloed hebben op het warmteverlies uit het doelreservoir. Ook zal warmteverlies middels de put in ogenschouw moeten worden genomen bij zeer hoge temperaturen.



Figuur 5: Seizoensopslag met behulp van HTO; warmteopslag in de zomer (links) en warmteproductie in de winter (rechts)³⁰.

³⁰ http://ro-online.robeheer.nl/svhw/09A51F05-ECD5-4185-A533-EA07CA8F9225/t_NL.IMRO.0501.geomec4p-0140_2.2.html



Figuur 6: Schematische weergave HTO in combinatie met een geothermische bron (project GEOMECA4P)³¹.

Toepassing in Nederland

Uit studies van TNO (2016) en IF Technology (2016) blijkt dat HTO technisch mogelijk is in Nederland. Onderstaande tekst is overgenomen uit Veldkamp et al. (2017):

In Nederland zijn in het verleden twee HTO-projecten (>80°C) gerealiseerd, in Utrecht (~220 m diep) en Zwammerdam (~150 m diep). In Utrecht werd het systeem gebruikt om een teveel aan warmte vanuit de WKK-installatie op te slaan en te gebruiken voor gebouwverwarming.

In Zwammerdam werd het systeem ingezet voor het verwarmen van een tehuis voor verstandelijk gehandicapten de Hooge Burch (inmiddels heet de zorginstelling De Bruggen). De warmte werd geproduceerd door een WKK-installatie.

Beide systemen zijn momenteel niet meer in gebruik. Technisch gezien hebben beide systemen grotendeels goed gefunctioneerd. De belangrijkste reden om de systemen te sluiten waren:

Utrecht: geen goede afstemming van de installaties in het gebouw op de warmteopslag; de temperatuur van het water vanuit de gebouwen was te hoog. Hierdoor zijn de minimale vereisten voor de terugvoertemperaturen niet gehaald. De vraag naar lagere temperaturen bleek lager dan voorzien.

Het thermisch rendement van de opslag gedurende twee jaar was wel hoog, nl. 68% en 80%. Het gemiddelde lage opslagrendement van het hele systeem was echter maar 27% als gevolg

³¹ http://ro-online.robeheer.nl/svhw/09A51F05-ECD5-4185-A533-EA07CA8F9225/t_NL.IMRO.0501.geomec4p-0140_2.2.html

van de (kwaliteit van de) warmtevraag uit het gebouw en niet van verliezen in de bodem. Het thermisch gedrag van de warmteopslag in de bodem heeft voldaan aan de verwachtingen, alhoewel er wel problemen waren met de waterbehandelingstechniek.

Zwammerdam: de warmteopslag is vanwege financiële redenen uit bedrijf genomen. De WKK werd ingezet op basis van de elektriciteitsvraag dat tegen een gunstig tarief werd terug geleverd aan het net. De overtollige warmte die daarbij werd geproduceerd, werd opgeslagen voor later gebruik. Uit monitoringgegevens is gebleken dat de terugleververgoeding voor de elektriciteitsproductie en de winst uit de warmteopslag, financieel niet tegen elkaar hebben opgewogen. Daarom is destijds besloten om de WKK in draaiuren terug te brengen en de warmteopslag niet meer in te zetten. Het opslagrendement van deze HTO-installatie is berekend op circa 65%. Hierbij moet worden vermeld dat de warmteopslag een relatief kleine opslag betrof en dus meer hinder ondervond door verliezen in de bodem. Bij een grotere opslag van warmte werd een hoger opslagrendement verwacht.

HTO in relatie met CNES

Ondergrondse warmteopslag is de enige optie die voldoende schaal biedt qua opslagvolume (EASE-EERA 2017). Andere technologieën (bovengronds) halen ook in gevallen meerdere GWh aan volume, maar nemen bovengronds veel ruimte in. De ondergrondse opslagtechnologieën (UTES) bieden op dit moment tot 15 GWh aan opslagvolume (EASE-EERA, 2017). In een recente haalbaarheidsstudie voor een hoge temperatuuropslag (>100 Celsius) in een aquifer (HT-ATES) is dit volume hoger geschat op <40 GWh (TNO, 2016).

De benodigde 100-200 GWh van de in deze studie beschreven casus is dus een zeer groot volume in relatie tot bewezen en gedemonstreerde technologie. Naast het volume is de temperatuur een uitdaging daar dit eisen stelt aan het pompen, putontwerp, geschikte karakteristieken van het opslagreservoir (gasveld of aquifer) en zeker gezien de impact van de hoge temperaturen op het rendement van de opslag. De kosten van bestaande ondergrondse opslagsystemen liggen doorgaans tussen 150 en 350 €/kW. De grote systemen hebben dan enkele honderden duizenden euro's aan operationele kosten per jaar.

De hogere temperaturen en diepte van een theoretische warmteopslag, zoals die hier geschetst worden, leiden tot significant hogere kosten: de voorzichtige schatting is minimaal 400 €/kW. Dit komt met name door hoge putkosten (door de diepte en materialen) en striktere eisen aan materiaalkeuze voor materialen door de hoge temperatuur en druk. Dit beïnvloedt de kosten van pompen, warmtewisselaars, water/stoom behandelingssystemen en balance-of-plant en zorgt voor een complexer systeemontwerp (bijvoorbeeld i.v.m. veiligheidssystemen en systemen die scaling en corrosie moeten voorkomen/verminderen). Overall, de geschetste warmteopslag optie kent een zeer laag 'technology readiness level' (TRL) en zal veel uitdagingen kennen op het gebied van implementatie en performance. De kosten bedragen enkele miljoenen tot boven de 25 miljoen om een dergelijk systeem te realiseren, zo is de eerste voorzichtige schatting.

Bijlage 3: Rekenmodel bij onderbouwing CNES

Voor de kwantitatieve onderbouwing van de mogelijkheden die het concept van energieopslag in een gasveld brengt, is een rekenmodel³² ontwikkeld. Dit model wordt hier nader toegelicht.

Scenario

Als basis voor de modelstudie zijn de eigenschappen van de gasopslag in Grijpskerk gebruikt, omdat de gegevens over injectie en productie van gas goed beschikbaar zijn. Op basis hiervan berekenen we de benodigde vermogens bij injectie en productie en het resulterende opslagrendement. Hierbij gaan we uit van een doorzet die bij productie twee keer zo groot is als bij de injectie, om verliezen tijdens injectie te verkleinen. Zie Figuur 7 voor een componentenschema.

Stikstofproductie

Voor de productie van stikstof wordt een cryogene 'air separation unit' (ASU) gebruikt. In het model is niet de volledige installatie gemodelleerd. De installatie wordt energetisch benaderd door twee compressoren die lucht comprimeren tot 8 bar. In de ASU nemen we aan dat de drukval 5 bar is en er 47 volumeprocent van de originele lucht overblijft als stikstof-doorzet. Deze aannames zijn energetisch gelijk getrokken met gegevens van de NAM over een operationele ASU van eenzelfde omvang.

Injectie

De ASU produceert stikstof op een druk van 3 bar. Deze wordt met een compressiefactor van 2,7 in vijf stappen gecomprimeerd naar de injectiedruk van 325 bar. De temperaturen uit de compressor liggen rond de 190°C. De tussenkoeling gebeurt telkens in twee stappen; de hoge temperaturen worden opgeslagen in de hoge temperatuur opslag (HTO) vervolgens wordt de stikstof tot 50°C gekoeld met buitenlucht. In de stappen waar de uitgangstemperatuur uit de compressor te laag is, bestaat de koelstap alleen uit een buitenluchtkoeler. Na de laatste compressiestap wordt de stikstof met een druk van 325 bar en temperatuur van 100°C geïnjecteerd in het gasveld. Door de kolomdruk zal bij een injectie van 4 miljoen normaalkuub per dag de 'bottom hole pressure' (BHP) 390 bar zijn. De gebruikte injectiedruk en drukval volgt uit metingen van de NAM in Grijpskerk.

Productie

Bij productie wordt omgeschakeld naar de generatoren om met gecomprimeerde stikstof elektriciteit op te wekken. De doorzet voor productie ligt een factor twee hoger dan injectie op 8 miljoen normaalkuub per dag. De stikstof wordt in zes stappen van 210 bar naar atmosferische druk gebracht. Na elke stap wordt het gas met warmte uit de HTO naar 150°C

³² Model op basis van Enssim for Excel; Enssim Software; www.ensimm.nl

opgewarmd. Het weer opwarmen van het gas is belangrijk om zo veel mogelijk energie terug te winnen. Met een nog hogere temperatuur, bijvoorbeeld door een betere efficiency van de HTO, kan een nog beter opslagrendement gehaald worden.

Resultaten

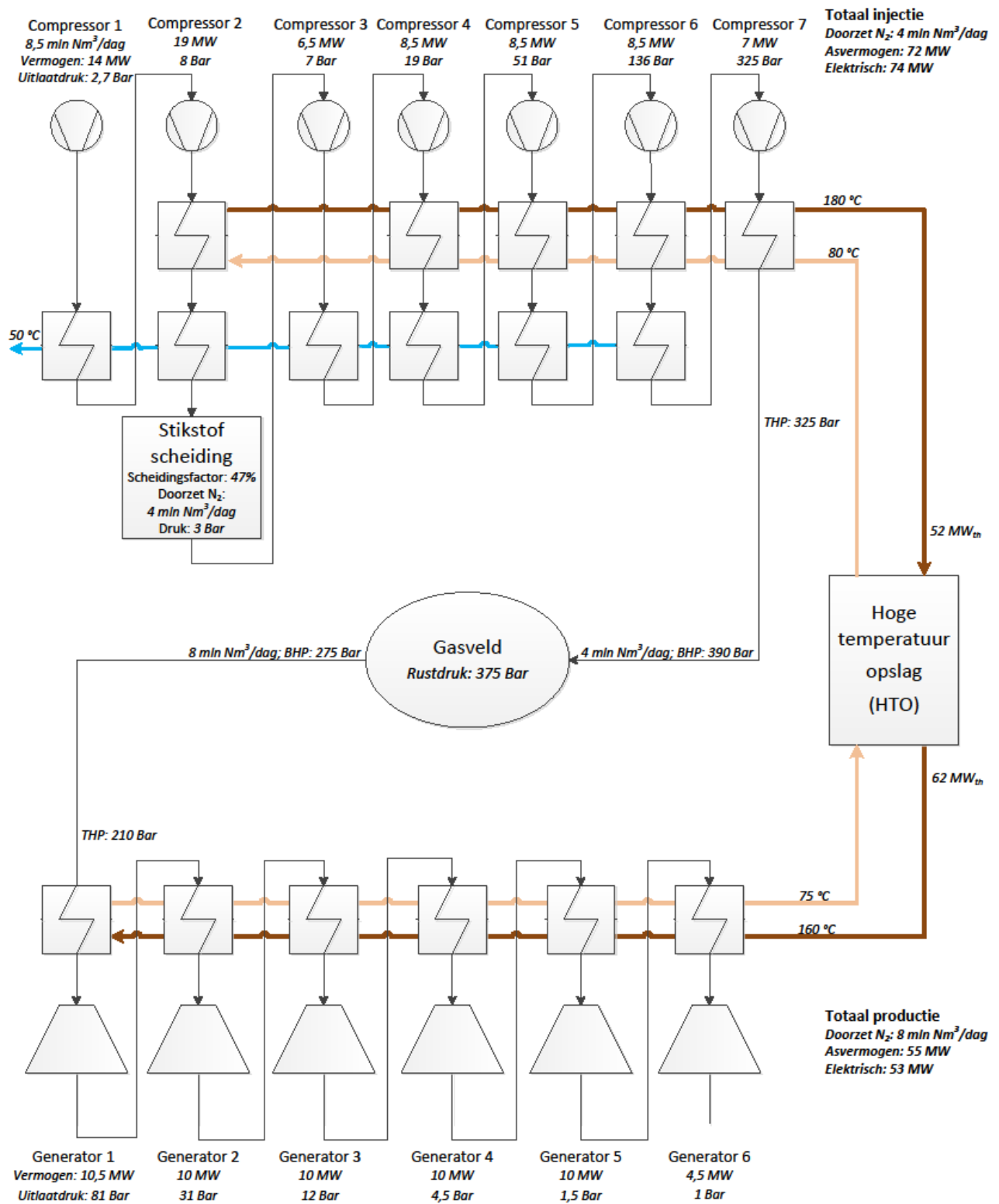
De berekening resulteert in het elektrische rendement van een opslagcyclus van 36%. De injectie gebeurt met de helft van de doorzet met een vermogen van 74 MW en de productie geeft een elektrisch vermogen van 53 MW. In onderstaande tabel staan de uitgangspunten voor de modelberekening opgesomd.

Tabel 5: Uitgangspunten voor de modelberekening.

Aannames en uitgangspunten	Aantal	Bron
Isentropisch rendement compressor < 10 bar	88%	Datasheet MAN compressor ³³
Isentropisch rendement compressor > 10 bar	75%	
Compressieverhouding	2,7	Op basis van gewenst temperatuur regiem bepaald
Efficiëntie elektrische aandrijving	98,5%	ABB ³⁴
Efficiëntie dynamo	98,5%	Gelijkgesteld aan de aandrijving
Isentropisch rendement generator	84%	TNO
Expansieverhouding	2,55	Vastgesteld op basis van het gewenste temperatuurregime
Efficiëntie HTO	60 %	TNO schatting
COP HTO	100	TNO schatting
Verhouding ontlaaddoorzet/laaddoorzet	2	Ontwerp uitgangspunt
Absoluut drukverlies tussenkoeler	250 mbar	Liandon ervaringsgetal
Relatief drukverlies tussenkoeler	2%	Liandon ervaringsgetal

³³ Technical Data, MAN RB Barrel type centrifugal compressors

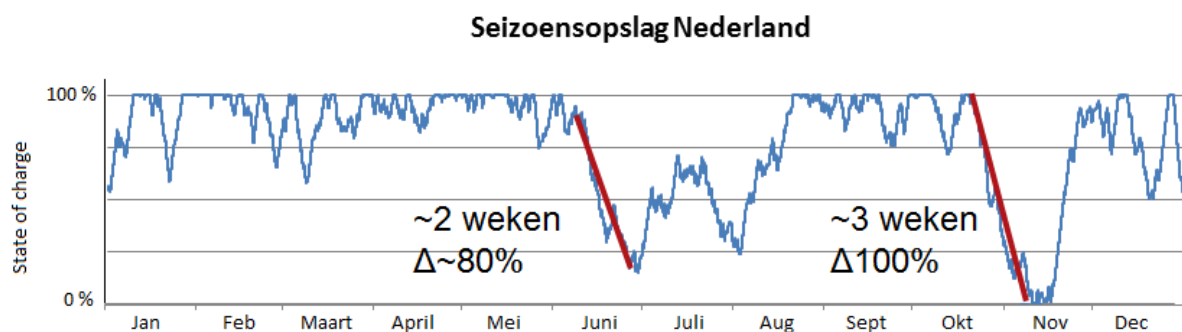
³⁴ https://new.abb.com/news/detail/1789/ABB-motor-sets-world-record-in-energy-efficiency-saves-half-a-million-dollars?_ga=2.140204529.377120494.1528731568-1000828731.1528731568



Figuur 7: Componentenschema gasveld Grijpskerk.

Opslagcyclus

Om de voor Nederland relevante opslagcyclus te bepalen, is het huidige elektraverbruik beschouwd dat op een duurzame manier wordt opgewekt. In dit scenario wordt uitgegaan van 50 GW zon-PV, 50 GW windturbines en het huidige elektriciteitsverbruik. Op basis van beschikbare productiegegevens van zon- en windvermogen uit 2016 en het belastingprofiel, zoals gepubliceerd door TenneT³⁵, kan een indicatief benodigde opslagcapaciteit bepaald worden. Zo geeft Figuur 8 de state of charge van een fictieve energieopslag die Nederland van een constante energie kan voorzien, wanneer omgeschakeld is naar opwek uit uitsluitend zon-PV en windturbines. Hieruit blijkt dat de opslag in november maximaal wordt ingezet. De volledige capaciteit is dan drie weken nodig om een tekort op te vangen met een benodigde opslagcapaciteit van 2 TWh. Om deze reden is voor de onlaadtijd uitgegaan van drie weken. Voor het opladen is meer tijd beschikbaar, hier gaan we uit van zes weken.



Figuur 8: Vulling van een fictieve energieopslag die Nederland van een constante energie kan voorzien wanneer volledig omgeschakeld is naar zon en wind.

Op basis van de opslagcyclus en de modelgegevens kunnen een aantal eigenschappen van de opslag berekend worden. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 6. Zo kan in een opslagcyclus van zes weken laden en drie weken ontladen 21 – 27 GWh nuttige energie opgeslagen worden, afhankelijk van de velddruk. De totale opslagcapaciteit is 340 GWh. Voor de energieopslag is naast het opslaan van stikstof onder druk ook opslag van warmte nodig. Uit het model volgt een benodigde opslagcapaciteit van 31 GWh_{th} bij een onlaadcyclus van drie weken.

³⁵ <https://www.tenneT.eu/nl/elektriciteitsmarkt/data-dashboard/belasting/>

Tabel 6: Eigenschappen van een energieopslag in een gasveld gelijkwaardig aan Grijskerk.

Gasveld eigenschappen Grijskerk	
Huidig werkvolume gasopslag	2,4 mld Nm³
Huidig druk regime	180 – 375 Bar
Opslag in veld gelijkwaardig aan Grijskerk	
Laadtijd	6 weken
Ontlaadtijd	3 weken
Laadvermogen (MW)	72 - 74 MW bij 4 mln Nm ³ /dag
Ontlaadvermogen (MW)	42 - 53 MW , bij 8 mln Nm ³ /dag
Totale energie inhoud opslagcyclus	21 - 27 GWh (3 wk x 7 dagen x 24 uur x 53 MW)
Totaal stikstofvolume per cyclus	168 mln Nm³ (8 mln Nm ³ x 7 dagen x 3 wk)
Totaal drukverandering in cyclus	12 bar
Maximale opslagpotentie	340 GWh (2,4 mld Nm ³ / 8 mln Nm ³ x 24 uur x 47 MW)
Warmte opslag	
Vermogen laden	52 MW_{th}
Vermogen ontladen	62 MW_{th}
Totale warmteopslag	31 GWh_{th} (62 MW _{th} x 24 uur x 7 dagen x 3 wk)

Opslagrendement

Het opslagrendement is een belangrijk kenmerk van een opslagsysteem. Het opslagrendement is de verhouding tussen de nuttig geleverde elektrische energie bij productie en de benodigde elektrische energie bij het laden. Het rendement van CNES hangt onder andere af van de temperatuur van de warmteopslag, de velddruk, de veldweerstand (permeabiliteit) en de benodigde energie voor de stikstofproductie. Op basis van het model is het energieverlies voor de verschillende componenten in het systeem berekend. Zie **Tabel 7**. Dit geeft inzicht in het belang van de verschillende factoren. De gepresenteerde getallen gelden voor de op Grijskerk gebaseerde casus die in deze studie is doorgerekend met als belangrijke aannames een (gemiddelde) velddruk van 375 bar en een hoge temperatuur warmteopslag van 200 graden. Onder deze condities is het berekende rendement 36%.

Tabel 7: energieverliezen in de doorgerekende casus per component.

Verlies bijdrage	beschrijving
2%-punt	Permeabiliteit van het gasveld
3%-punt	Weerstand in de putten
19%-punt	Benodigde productie van stikstof
7%-punt	Inefficiënties van compressoren
10%-punt	Inefficiënties van de generatieturbines
1%-punt	Pompenergie van de warmteopslag
4%-punt	Drukverliezen in warmtewisselaars
3%-punt	Verliezen in de elektrische omzetting
15%-punt	Overige verliezen (onder andere door interacties van de verschillende verliesfactoren op elkaar)

Bijlage 4: Alternatieve technologieën t.o.v. CNES

Valmeren (OPAC):

Ook wel ondergrondse pomp accumulatie centrale (OPAC). Door water via een turbine de Limburgse mijnen in te laten lopen, kan energie opgewekt worden. Hierbij wordt het hoogteverschil van wel 1200 meter gebruikt. Bij overproductie van zon- en windvermogen wordt het mijnwater weer omhoog gepompt. Bij deze technologie wordt een hoog cycluserendement van 80% geclaimd en een opslagcapaciteit van 1 GWh per opslagcyclus³⁶. De toepassing van valmeren is beschikbare technologie. Er wordt rekening gehouden met eenzelfde kostenniveau als dat van valmeren van 1.280 €/kW geïnstalleerd vermogen en 43 €/kWh opslagcapaciteit.

CAES in zoutcavernes:

Door bij overschotten zon- en windvermogen lucht in zoutcavernes te blazen en bij tekorten deze lucht via turbines te expanderen, kan elektriciteit worden opgeslagen. Hierbij dient de warmte die vrijkomt bij de compressie opgeslagen te worden voor toepassing bij de expansie. Dit kan met een theoretisch opslagrendement van 60% met een opslagpotentie van 3 GWh (McIntosh, USA). De opslagpotentie is daarbij afhankelijk van het volume van de zoutcaverne, de toegestane drukniveaus en warmtekoppeling. Een Engelse ontwikkelaar verwacht een rendement van 70% te kunnen halen.³⁷

Het investeringsniveau bedraagt 850 €/kW geïnstalleerd vermogen. In 2050 verwacht men dat dit gezakt is naar 650 €/kW. Voor de ontwikkeling van cavernes voor de toepassing van CAES is 26 €/kWh opslagcapaciteit benodigd.

'Power to hydrogen' inclusief ondergrondse opslag en conversie:

Door middel van elektrolyse worden overschotten zon- en windvermogen omgezet naar waterstof. Het waterstof wordt daarbij opgeslagen in zoutcavernes. Vervolgens wordt het waterstof weer terug omgezet naar elektriciteit via een brandstofcel. Het cycluserendement van stroom naar stroom is daarbij niet hoger dan 29 - 33% met een opslagpotentie van 240 GWh³⁸. Het investeringsniveau varieert van 1.625 - 5.385 €/kW geïnstalleerd vermogen, afhankelijk van de toegepaste technologie inclusief ondergrondse opslag. Door technologische ontwikkelingen wordt verwacht dat het rendement stijgt tot 44% in 2050 bij een investeringsniveau van ongeveer 1000 €/kW geïnstalleerd vermogen³⁹.

³⁶ www.o-pac.nl

³⁷ www.storelectric.com/technology

³⁸ Energy Stock: 3 kWh/nm³ H₂, 1.000.000 m³, 80 bar drukverschil

³⁹ Technology Roadmap, IEA, 2016, Hydrogen and fuel cells

Bijlage 5: Het participatieproces t.b.v. maatschappelijke acceptatie

Deze bijlage beschrijft een aanpak om de maatschappij te informeren over en te betrekken bij de planvorming en realisatie van energieopslag in een Nederlands gasveld. De kans op maatschappelijk draagvlak bij een CNES-project in Nederland wordt vergroot door stakeholders zorgvuldig te betrekken bij het project middels een participatieproces; van voorbereiding tot en met afronding van het project. Het participatieproces wordt nader toegelicht aan de hand van grofweg de volgende stappen:

1. Breng relevante stakeholders op gestructureerde wijze in beeld.
2. Betrek stakeholders op gepaste wijze⁴⁰ in het participatieproces.
3. Bepaal gevoeligheden en kansen samen met de stakeholders om meerwaarde te creëren.
4. Benader het participatieproces als een uniek, doorlopend en dynamisch proces van voorbereiding tot en met afronding van het project.

Breng relevante stakeholders in beeld

Een stakeholder of belanghebbende⁴¹ is eenieder die belang of invloed heeft, of meent te hebben, bij een initiatief. Dit kunnen personen, organisaties, bedrijven en overheden zijn. Wat de relevante lokale stakeholders zijn voor een project bepaal je aan de hand van wet- en regelgeving (zie ook de paragraaf 'wet- en regelgeving' verderop in deze bijlage), bureaustudie en interviews. Onderzoek bijvoorbeeld via sociale media hoe de burger zich lokaal georganiseerd heeft en wat hen bezighoudt (dit zijn gelijk aanwijzingen voor gevoeligheden of issues, zie verderop). Haal vervolgens rechtstreeks informatie bij de personen op via interviews. Kies dan slim je informatiebronnen, zoals bijvoorbeeld een medewerker van een gemeente, bijvoorbeeld een buitengewoon opsporingsambtenaar (BOA) of een lokale journalist of opiniemaker, met echte kennis van het gebied. Belangrijk is je daarbij niet uitsluitend te beroepen op één bron. Dit kan georganiseerd worden in de vorm van een openbare informatiebijeenkomst alwaar de initiatiefnemer het voorgenomen project bekendmaakt en in gesprek gaat met belangstellenden. Zo krijgt iedereen de kans zich te melden onder het motto: iedereen is welkom.

De stakeholders zijn grofweg onder te verdelen in overheden, bedrijven, bevolking (individuele burgers, burgergroepen en ondernemers), energie- en netwerkbedrijven, kennis- en onderwijsinstellingen en specifieke belangenorganisaties.

⁴⁰ Zie onder meer de interactie-index verderop in deze bijlage.

⁴¹ Een belanghebbende heeft ook een juridische betekenis waarvan men zich bewust moet zijn: Een belanghebbende is een (rechts)persoon wiens belang rechtstreeks bij een besluit is betrokken. Een belanghebbende kan bij een conceptbesluit een zienswijze indienen en kan tegen een besluit in bezwaar en/of beroep gaan. Of en wanneer een belanghebbende een zienswijze kan indienen of in bezwaar kan gaan, hangt van de gevolgde procedure af. Volgens de Raad van State is men alleen nog belanghebbende als aannemelijk is dat er gevolgen van enige betekenis kunnen worden ondervonden.

Betrek stakeholders op gepaste wijze in het participatieproces

Het op een juiste manier (zie bijvoorbeeld de interactie-index verderop in deze bijlage) betrekken van belanghebbenden in een project is cruciaal voor het slagen van het project. Dit betekent ook het managen van verwachtingen. Te ontwikkelen producten hierbij zijn een stakeholdermanagementstrategie en daaruit volgend een communicatieplan. Goed stakeholdermanagement vraagt om een gestructureerde aanpak, zoals de methodiek volgens International Project Management Association (IPMA). Dit is gebruikelijk voor een projectinitiatiefnemer/-ontwikkelaar als het gaat om stakeholdermanagement en vormt de basis van een participatieproces.

Soms is een project dermate complex of gevoelig dat dit hoge(re) eisen stelt aan stakeholdermanagement dan gebruikelijk en vraagt om een uitgebreider participatieproces. Dan kan de initiatiefnemer of ontwikkelaar overwegen om onafhankelijke procesbegeleiding van het participatieproces te organiseren. Dit helpt om de gelijkwaardigheid van ieders inbreng te benadrukken. Deze persoon kan de inbreng en weging van feiten, meningen en belangen belangeloos stroomlijnen en tevens zorgdragen voor een transparante afweging en heldere resultaten. Processen ontwerpen en begeleiden is een vak. Vaak hebben procesbegeleiders een groot verbindend vermogen en een hoge gunfactor. Hierdoor lopen processen soepeler en sneller en wordt meer draagvlak gecreëerd voor plannen. Tips daarbij⁴²:

1. Kies als procesbegeleider een onafhankelijk persoon. Dit kan een professional zijn die geen enkele relatie heeft met het gebied of vraagstuk, of een lokale sleutelfiguur die veel vertrouwen geniet bij alle betrokkenen.
2. Benut de onafhankelijkheid van de procesbegeleider om feitelijke informatie te beoordelen en presenteren, en te scheiden van meningen en belangen.
3. Gebruik een mediator om een vastgelopen traject weer vlot te trekken.

Het gaat hier om de introductie van een nieuwe technologie in Nederland waar nog weinig of geen praktische ervaring mee is opgebouwd in een maatschappij die steeds meer om participatie vraagt. Voor de maatschappelijke acceptatie is een goed participatieproces dan ook essentieel. Tevens is het raadzaam om de organisatie en begeleiding er van te beleggen bij een (onafhankelijke) procesbegeleider.

Factoren die van invloed zijn op de maatschappelijke acceptatie en bij uitstek positief beïnvloed kunnen worden in een participatieproces zijn onder meer de kennis van duurzame energievoorziening, de perceptie ten opzichte van CNES, de attitude richting CNES en het milieubewustzijn (De Vos, 2015). Attitude is de factor met de grootste invloed. Naarmate de attitude richting CNES positiever is, is men eerder geneigd de implementatie van de

⁴² <https://aandeslagmetdeomgevingswet.nl/thema/inspiratiegids/wind-mee/onafhankelijke/>

opslagtechniek te accepteren. Genoemde factoren zijn bij uitstek positief te beïnvloeden door het (tijdig) informeren en betrekken van stakeholders in de ontwikkeling van een energieopslag in gasvelden. Vanwege de maatschappelijke onbekendheid van CNES is het daarom ook raadzaam een vergelijkbare website als voor aardwarmte genoemd in de paragraaf over wet- en regelgeving te ontwikkelen voor deze en aanverwante technieken met de daarbij behorende relevante context.

Bepaal samen de gevoeligheden en kansen om meerwaarde creëren

Het is zonde om participatie alleen als een noodzakelijke verplichting te beschouwen; mits goed uitgevoerd, kan het veel opleveren. Maak gebruik van de lokale kennis en sluit aan bij wat belangrijk is in het gebied waar energieopslagactiviteiten worden ontwikkeld. Maak dat de betrokkenen in het gebied zélf de eindsituatie (mede)vormgeven, waarmee gelijktijdig meerwaarde wordt gecreëerd voor het project, en de omgeving van het project. De meerwaarde bestaat uit (meer) draagvlak, haalbare oplossingen die passen in het gebied en een pro-actief proces waardoor geen verrassingen verderop in het traject ontstaan en (jarenlange) vertragingen worden vermeden. Hiermee wordt het risico op budgetoverschrijding en imagoschade verkleind.

Gevoeligheden

Een participatieproces kan vanuit het definiëren van gevoeligheden of issues starten op basis waarvan de juiste stakeholders op gepaste wijze worden betrokken. Een issue is in deze een betwistbaar punt, welke consequenties heeft voor (de strategie van) een project. Issues zijn 'bewegende' publieke opinies met voor- en tegenstanders. Bepaal voor het project eerst welke belangen, bezwaren of frustraties uit het verleden (die mogelijk niet eens direct met het project te maken hebben) lokaal aanwezig kunnen zijn. De Vos (2015) stelde bijvoorbeeld vast dat de maatschappelijke acceptatie van CNES in Groningen kleiner zal zijn dan in het andere gebieden door een negatieve associatie met energieprojecten in de ondergrond en de daarbij betrokken partijen. Stel de mogelijke issues vervolgens op met stakeholders van het project. Het is belangrijk om deze zo vroeg mogelijk in het proces scherp te hebben om er op te kunnen anticiperen.

Kansen

Issues kunnen ook de kansen zijn voor een project; dit geeft onderhandelingsruimte (mogelijkheid voor compensatie zoals eerder genoemd in hoofdstuk 4). Door bijvoorbeeld het wegnemen van een (oud) issue, kun je met het project lokale waarde creëren waarmee je het maatschappelijke draagvlak vergroot. Issues brengen dus indirect de lokale waarden in beeld en dienen per project op de lokale situatie in beeld gebracht te worden.

Wat de maatschappelijke meerwaarde van een project is, creëer en bepaal je daarmee grotendeels samen met de omgeving. De toepassing van de CNES biedt weliswaar vele kansen voor de maatschappij. Door deze waarden samen met stakeholders te benoemen en ontwikkelen, zorgt een projectinitiatiefnemer of -ontwikkelaar er voor dat deze ook gedeeld worden door degenen die worden beïnvloed door het project en komt men mogelijk op kansen die men zelf nog niet kende. De waarden dienen ook per project op de lokale situatie in beeld gebracht te worden. Maak hierbij onderscheid in verschillende niveaus: internationaal, nationaal en lokaal/regionaal.

Het participatieproces is een uniek, doorlopend en dynamisch proces

Een participatieproces is geen statische aangelegenheid en erg locatie gebonden. Niets zo veranderlijk als de mens of het verloop van projecten in de openbare ruimte. Dat betekent dat het belangrijk is om de stakeholderanalyse per fase van een project te actualiseren en vervolgens het participatieproces (met onderliggende producten stakeholdermanagementstrategie en communicatieplan) daarop bij te sturen. Ook de omgeving rondom de locatie van een project is uniek, dat vraagt om een uniek proces. Wat voor de ene omgeving wel werkt, hoeft niet automatisch ook voor de andere omgeving te werken. Lokale cultuur en organisatie, maar ook geschiedenis (historie van gebeurtenissen) spelen daarbij mee. Kortom: elk CNES-project heeft een eigen en continue participatieproces in elke fase van het project nodig om de kans van slagen te vergroten. Gebruik daarvoor ook reeds beschikbare informatie, zoals bijvoorbeeld beschreven door De Vos (2015) waarin de maatschappelijke acceptatie en de daartoe relevante factoren zijn onderzocht.

Bouwstenen van een goed participatieproces

Een goed participatieproces is maatwerk; een 'one-size-fits-all' blauwdruk is dus niet mogelijk. Wel is het mogelijk om een aantal bouwstenen aan te geven waarmee tot een participatieproces op maat gekomen kan worden. Hieronder volgt eerst een opsomming van de voorwaarden als fundering voor een goedlopend proces en vervolgens 7 stappen (slechts op hoofdlijnen) die doorlopen kunnen worden om het proces te ontwerpen.

Voorwaarden

1. Participatie is onderdeel van elke projectfase
 - a. Dus van verkenningsfase t/m uitvoeringsfase (inclusief evaluatie/nazorg en beheer).
 - b. Start dus tijdig met participatie en fiets het er niet pas in om het proces halverwege op te lappen.
 - c. Hanteer voor elke fase een gestructureerde besluitvorming.
2. De initiatiefnemer(s) heeft een strakke en heldere projectorganisatie.

3. Ga strategisch om met de dynamische omgeving van projecten.
4. De initiatiefnemer vertelt een helder en transparant verhaal.
 - a. Maak waar wat je belooft.
 - b. Beloof dus niets wat je niet waar kunt maken.

Stappenplan

1. Maak samen met de opdrachtgever(s) zo concreet mogelijk wat het doel is van het participatieproces en leg dit vast.
2. Vorm een 360° beeld van de opgave, analyseer vanuit verschillende invalshoeken en verplaats je daarbij alvast in de omgeving.
3. Ga zorgvuldig na wie beïnvloed wordt door en/of invloed heeft op de opgave, maar ook met wie je samen wil en/of moet werken om het doel te bereiken.
4. Identificeer clusters op basis van informatie uit stappen 1 t/m 3. Deel stakeholders daar vervolgens op in om het proces strategisch en effectief te kunnen organiseren (voorwaarde 3)
5. Ieder cluster kan een eigen mate van betrokkenheid van stakeholders vragen, dus een eigen subparticipatieproces. Bepaal per cluster welke intensiteit van participatie nodig is om het doel te bereiken (zie de interactie-index in
6. Tabel 8).
7. Schrijf participatie- en/of communicatieplannen voor de clusters. Dit gaat over hoe je wil samenwerken. Leg dit duidelijk vast met opdrachtgever(s).
8. Blijf voortdurend en zorgvuldig regievoeren, want participatie is een dynamisch proces dat maatwerk en de mogelijkheid tot bijsturen blijft vragen. Blijf alert op voorwaarde 1 t/m 4, denk en werk in ankermomenten, leg deze vast en creëer zo je participatiedossier. Vanwege het innovatieve karakter van CNES in Nederland is het raadzaam het proces te laten begeleiden door een mediator of omgevingsmanager.

Interactie-index

De interactie-index (als alternatief op de klassieke participatieladder) geeft weer welke niveaus van interactie en beïnvloeding mogelijk zijn⁴³. Uitgangspunt is zoveel mogelijk gelijkwaardige samenwerking na te streven.

Tabel 8 geeft de verschillende niveaus van interactie in de interactie-index weer.

⁴³ <https://aandeslagmetdeomgevingswet.nl/thema/thema/participatie/inspiratiegids/aanpak/wanneer-samenwerken/>

Tabel 8: Niveaus van participatie; van grote mate van betrokkenheid naar geringe betrokkenheid.

Niveau	Omschrijving
Gezamenlijk bestuur	Vertegenwoordigers van bewoners, ondernemers, overheid en initiatiefnemers dragen samen verantwoordelijkheid voor de koers, plannen en uitvoering. Ieder heeft een bepalende en beslissende stem.
Coproduceren	In een continue dialoog tussen initiatiefnemer en betrokkenen worden plannen gemaakt en uitgevoerd. Iedereen brengt kennis, kunde en netwerk in. De initiatiefnemer is eindverantwoordelijke en bewaakt het publieke belang.
Adviseren	De meest betrokken partijen vormen voor de initiatiefnemer een klankbord. Samen geven zij advies in een open gesprek. Keuzes rond de invulling en uitvoering van het plan blijven in handen van de initiatiefnemer.
Raadplegen	De initiatiefnemer is in contact met alle betrokkenen. De meest betrokken partijen delen ieder voor zich hun standpunt. De initiatiefnemer maakt hierin keuzes en deelt deze met alle betrokkenen.
Informereren	De initiatiefnemer houdt alle betrokkenen goed op de hoogte van het verloop van haar plan. Er is geen ruimte voor beïnvloeding voorzien.

Wet- en regelgeving

Tot slot is voor de maatschappelijke acceptatie ook wet- en regelgeving van belang. In de bestaande wet- en regelgeving zijn inspraak- en bezwaarprocedures geregeld bij het verlenen van vergunningen door belanghebbenden (juridische betekenis, zie voetnoot ⁴¹). In inspraak- en bezwaarprocedures is het mogelijk voor belanghebbenden hun zienswijzen kenbaar te maken en eventueel bezwaar aan te tekenen. Om zorg te dragen voor een soepel verloopend proces bij uitvoering en toetsing van het juridisch kader, is het zaak om voorafgaand aan het project, zo specifiek en concreet mogelijk de verschillende activiteiten te definiëren. Aan de hand hiervan wordt het duidelijk welke wet- en regelgeving relevant zijn en welke bevoegde gezagen gelden voor het betreffende project, op die betreffende locatie. Dit maakt het mogelijk om alle benodigde (juridische) procedures vooraf te doorlopen om zo te voorkomen dat er nieuwe, onverwachte procedures tijdens de uitvoering van het project doorlopen moeten worden. Dat voorkomt niet alleen vertragingen, maar biedt tevens de maximale

gelegenheid om stakeholders vooraf écht te betrekken bij het project. Platgezegd kunnen omwonenden dan bijvoorbeeld aangeven: "Liever die activiteiten niet op maandag, want dan is het hier altijd zo druk." Voorts is intensief contact met de bevoegde gezagen gewenst om elkaars verwachtingen te verduidelijken en onnodig vertragingen te voorkomen. Bovenstaande zou moeten plaatsvinden tijdens het participatieproces.

De hoeveelheid (inter)nationale regels die van toepassing is op activiteiten rondom de uitvoering van opslag in gasvelden is groot. Om de mijnbouw in Nederland in goede banen te leiden, gelden voor de mijnbouw in Nederland de regels uit de Mijnbouwwet, het Mijnbouwbesluit en de Mijnbouwregeling. Deze regels sluiten aan op de regels binnen de Europese Unie. Partijen die zich bezighouden met activiteiten rondom CNES moeten, behalve met deze specifieke mijnbouwregels, ook rekening houden met het omgevingsrecht. Het omgevingsrecht is grofweg onder te verdelen in de volgende thema's: milieu, ruimtelijke ordening, natuur en water⁴⁴. Binnen deze thema's bestaan er talloze wetten en regels die van toepassing kunnen zijn op de uitvoering van de CNES. Andere wet- en regelgeving die van invloed kunnen zijn: de Ontgrondingenwet, de Wet inzake de luchtverontreiniging⁴⁵ en de Wet geluidhinder.

Voor het doel van deze haalbaarheidsstudie gaat het te ver om een uitputtende opsomming te geven van alle wet- en regelgeving die van invloed zijn. Zie <https://hoewerkaardwarmte.nl/info/wet-en-regelgeving/> voor de belangrijkste wetten en regels en juridische begrippen.

⁴⁴ Welke impact de technologie van energieopslag in gasvelden op deze thema's heeft, is nog een kennisleemte.

⁴⁵ In hoeverre het vrijkomen van methaan significante impact heeft op de omgeving, is een kennisleemte.