

RAPPORT

Milieueffectrapportage HyStock

Deel 2: Ondergrondstudie

Klant: EnergyStock, Nobian

Referentie: BI6063 Ondergrond HyStock 20250210

Status: Definitief/05

Datum: 10 februari 2025

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Postbus 151
6500 AD Nijmegen
Netherlands
Industry & Buildings

Telefoon: +31 88 348 70 00
Email: info@rhdhv.com
Website: royalhaskoningdhv.com

Titel document: Milieueffectrapportage HyStock

Ondertitel: Deel 2: Ondergrondstudie
Referentie: BI6063 Ondergrond HyStock 20250210
Uw kenmerk [Click or tap here to enter text.](#)
Status: Definitief/05
Datum: 10 februari 2025
Projectnaam: HyStock
Projectnummer: BI6063
Auteur(s): Floris Swennenhuis, Marc Giesberts

Opgesteld door: RHDHV

Gecontroleerd door: RHDHV, Nobian, Gasunie

Datum: 11 november 2024

Goedgekeurd door: MGj

Datum: 10 februari 2025

Classificatie

Projectgerelateerd

Disclaimer

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden veeleenvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Achtergrond	1
2	De achtergrond van zoutwinning	3
2.1	Geologische geschiedenis van zoutlagen	3
2.2	Nederlandse Zoutwinning	4
2.3	Energiebuffer	5
3	De Zuidwending- zoutpijler	8
3.1	Inleiding	8
3.2	Ontwerp zoutcavernes	11
3.3	Ontwikkeling van individuele cavernes	12
3.4	Zoutkruip en bodemdaling	14
3.5	Evaluatieboringen Zuidwending	15
3.6	Seismisch onderzoek	15
3.7	Bodemdalingsmetingen	16
4	Kennis over opslag van waterstof	18
4.1	Ervaring met waterstofopslag in het buitenland	18
4.2	Fysische en chemische aspecten van de waterstofopslag	20
4.2.1	Permeabiliteit van zoutcavernes en lektheid put	21
4.2.2	Het gedrag van waterstof	22
4.2.3	Chemische reacties met waterstof	23
5	Risico's	25
5.1	BowTie risicoanalyse	25
5.1.1	BowTie methode	25
5.1.2	BowTie analyse zoutwinning	26
5.1.3	BowTie analyse grootschalige waterstofopslag in een zoutcaverne	28
5.1.4	Conclusies BowTie analyse waterstofopslag	34
5.2	Materialen en technieken	35
5.2.1	Integriteitseisen voor SECE's (componenten en barrières)	37
5.2.2	Cavern & Well Integrity Categorization Model	39
5.2.3	Operationele omstandigheden	41
6	Bodemdaling	42
6.1	Mechanisme bodemdaling	42
6.2	Beschrijving bodemdaling scenario's	44

6.3	Berekende bodemdaling	45
7	Afsluiten van een caverne	54
7.1	Inleiding	54
7.2	Thermisch evenwicht	54
7.3	Afsluiting	54
7.4	Nazorg en monitoring	55
	Referenties	56

Tabellen

Tabel 2-1:	Kerngegevens aardgasbuffer	7
Tabel 2-2:	Gehanteerde en toegestane drukken (afgerond) in aardgascavernes bij de LCCS.	7
Tabel 2-3:	Toegestane drukverandering.	7
Tabel 3-1:	Gegevens van de HyStock cavernes	10
Tabel 4-1:	Kenmerken van bekende waterstofopslagen in zoutcavernes (TNO, 2022)	18
Tabel 4-2:	Vergelijk VS/UK praktijk met die van HyStock en beoordeling.	19
Tabel 4-3:	Gebruikte bronnen	20
Tabel 5-1:	Overzicht van de onderzochte risico's in de risicoanalyse.	27
Tabel 5-2:	Risico's op en gevolgen van ondergrondse lekkage waterstof.	31
Tabel 5-3:	Put-gerelateerde maatregelen om ondergrondse lekkage van waterstof te voorkomen	32
Tabel 5-4:	Caverne-gerelateerde maatregelen om ondergrondse lekkage van waterstof te voorkomen	33
Tabel 5-5:	Maatregelen om gevolgen van ondergrondse lekkage van waterstof te voorkomen of mitigeren	34
Tabel 5-6:	Integriteitseisen voor SECE.	38
Tabel 6-1:	Uitgangspunten en uitkomsten voor H2-max, Referentiesituatie met HyStock en HyStock alleen.	46

Figuren

Figuur 2-1:	Geologische tijdschaal (Cohen et al., 2013)	3
Figuur 2-2:	Halokinese (Wong et al., 2007).	4
Figuur 2-3:	Bestaande en beoogde opslaglocaties aan het maaiveld.	6
Figuur 2-4:	Bestaande en beoogde zoutwinnings-/opslaglocaties aan het maaiveld (zicht in westelijke richting).	6
Figuur 3-1:	3D weergave van het zoutkussen bij Zuidwending (DEEP, 2012)	8
Figuur 3-2:	Doorsnede Zuidwending-zoutpijler nabij beoogde locaties HyStock opslagcavernes(DEEP.KBB, 2012).	9
Figuur 3-3:	Locatie van de Hystock cavernes in Zuidwending.	10
Figuur 3-4:	Schematische weergave van caverneontwikkeling door de tijd.	13
Figuur 3-5:	Belangrijkste stappen in het gereed maken van een caverne voor de opslag van waterstof.	14
Figuur 3-6:	Aardbevingen in de omgeving van Zuidwending (KNMI).	16
Figuur 5-1:	Notatie BowTie diagram	26

Figuur 5-2: BowTie analyse ondergrondse lekkage waterstof (gebaseerd op (Groenenberg et al., 2021))	28
Figuur 5-3: BowTie diagram dat risico op interne corrosie en bijbehorende maatregelen beschrijft.	29
Figuur 5-4: BowTie diagram met mogelijk negatieve gevolgen waterstoflekkage en mitigerende maatregelen.	30
Figuur 5-6: Primaire and secondaire barrière.	36
Figuur 5-6: Cavern & Well Integrity Categorization Model.	40
Figuur 6-1: Relatie tussen convergentie van caverne en grootte bodemdalingskom (Buzogany, 2023).	43
Figuur 6-2: Onderscheiden scenario's in bodemdalingsstudie.	45
Figuur 6-3: Conservatief berekende bodemdaling in 2050, H2-max.	47
Figuur 6-4: Verwachte bodemdaling in 2050, H2-max.	47
Figuur 6-5: Conservatief berekende bodemdaling in 2075, H2-max.	48
Figuur 6-6: Verwachte bodemdaling in 2075, H2-max.	48
Figuur 6-7: Conservatief berekende bodemdaling in 2100, H2-max.	49
Figuur 6-8: Verwachte bodemdaling in 2100, H2-max.	49
Figuur 6-9: Conservatief berekende bodemdaling in 2125, H2-max.	50
Figuur 6-10: Verwacht bodemdaling in 2125, H2-max.	50
Figuur 6-11: Conservatief berekende bodemdaling in 2150, H2-max.	51
Figuur 6-12: Verwachte bodemdaling in 2150, H2-max.	51
Figuur 6-13: Conservatief berekende bodemdaling in 2200, H2-max.	52
Figuur 6-14: Verwachte bodemdaling in 2200, H2-max.	52
Figuur 6-15: Conservatief berekende bodemdaling in 2250, H2-max.	53
Figuur 6-16: Verwachte bodemdaling in 2250, H2-max.	53

Bijlagen

Bijlage: Cavern & Well Integrity Categorization Model

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Dit rapport is deel 2 van het milieueffectrapport voor HyStock en betreft de ondergrondstudie. Deze ondergrondstudie gaat in op zoutwinning en ondergrondse energieopslag en de – daarmee samenhangende en optredende - processen in de ondergrond, geeft een toelichting op de opbouw van de diepe ondergrond en beschrijft de risico's, gevolgen en maatregelen voor zoutwinning en energieopslag.

Voor het HyStock initiatief is een gecombineerde plan- en project-MER opgesteld. Het MER bestaat uit drie delen: een hoofdrapport (deel 1), deze ondergrondstudie (deel 2) en een publiekssamenvatting (deel 3).

De toelichting op het overheidsbeleid is opgenomen in paragraaf 1.5 van het hoofdrapport. Het van toepassing zijnde beleidskader staat in bijlage 3 van het hoofdrapport.

Het doel van deze ondergrondstudie is het in kaart brengen van processen en risico's van zoutwinning en energieopslag in cavernes bij Zuidwending, de optredende gevolgen en te nemen maatregelen. Het rapport is op de volgende wijze ingedeeld:

- Hoofdstuk 2 beschrijft de achtergrond en gaat in op de geologie, zoutwinning en historisch gebruik van de cavernes.
- Hoofdstuk 3 gaat in meer detail in op de zoutpijlers, het ontwerp en de ontwikkeling van de cavernes, en de onderzoeken die zijn uitgevoerd ter onderbouwing hiervan.
- Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de wetenschappelijke kennis die bestaat over de opslag van waterstof in zoutcavernes. Hierbij wordt ingegaan op best practices die zijn opgedaan bij andere projecten en de fysische en chemische aspecten van de opslag van waterstof.
- Hoofdstuk 5 beschrijft de risico's en bijbehorende mitigatieopties voor opslag van waterstof in zoutcavernes. Deze zijn in kaart gebracht middels een BowTie risicoanalyse.
- Hoofdstuk 6 behandelt de scenario's voor bodemdaling in het kader van de HyStock project.
- Hoofdstuk 7 geeft een toelichting op het proces van het afsluiten van de cavernes en de nazorg en monitoring die daarop volgt.

1.2 Achtergrond

De biosfeer is het gedeelte van de aarde waar leven mogelijk is en omvat de bodem, het oppervlaktewater en de atmosfeer. In de milieuwetgeving is de biosfeer in de diepte afgebakend tot 100 meter diepte. Dit betekent dat activiteiten tot 100 meter diepte worden getoetst volgens de Milieuwetgeving. Voor activiteiten beneden 100 meter diepte geldt de Mijnbouwwetgeving (Mw art. 2 lid 2).

Effecten in de diepe ondergrond kunnen gevolgen hebben voor de biosfeer, zoals:

- Ongewenste omstandigheden met gevolgen voor de biosfeer. Dit maakt het belangrijk risico's in beeld te brengen en mitigerende maatregelen te beschrijven. Dit is uitgewerkt in hoofdstuk 5.
- Zoutwinning en de opslag van waterstof kunnen leiden tot veranderingen in de diepe ondergrond, zowel chemisch, mechanisch en thermisch. Omdat deze veranderingen (in)direct mogelijk tot milieueffecten in de biosfeer leiden, moeten deze goed worden beschreven. Hoofdstukken 3 en 4 gaan hierop in.

- Bodembeweging aan het maaiveld ten gevolge van ondergrondse activiteiten. Hieronder valt zowel bodemdaling als geïnduceerde trillingen. Deze zijn besproken in hoofdstuk 2. Gedetailleerde bodemdalingsscenario's komen aan bod in hoofdstuk 5.

2 De achtergrond van zoutwinning

2.1 Geologische geschiedenis van zoutlagen

Gedurende het Perm - de geologische periode die duurde van 299 tot 252 miljoen jaar geleden (Figuur 2-1) – lag Nederland aan de rand van het Zuidelijk Perm Bekken. Deze laaggelegen vlakke bevond zich op ongeveer dezelfde noorderbreedte als de huidige Sahara. Het centrum lag in het Nederlandse deel van de (huidige) Noordzee (Wong et al., 2007). Vanwege de nabijheid van de evenaar was het in onze omgeving zeer droog en heersten er sterke passaatwinden.

Geologische tijdschaal

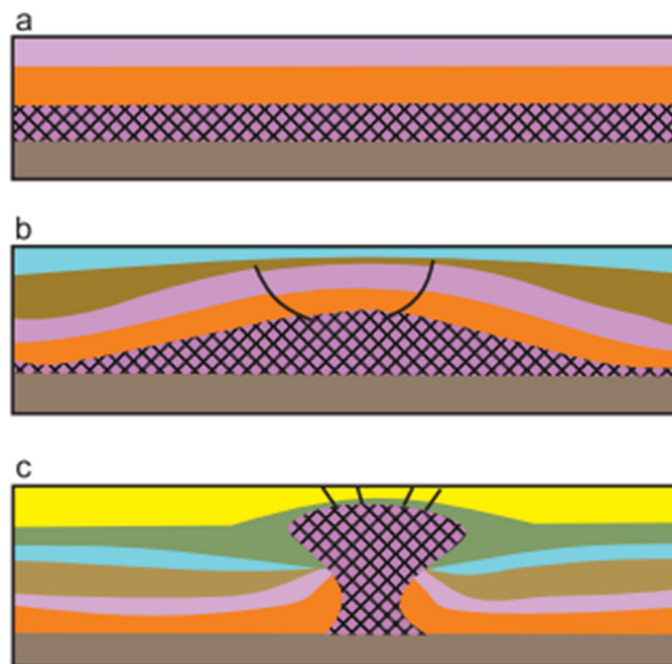
Era	Periode	Ouderdom (miljoen jaar)
Cenozoïcum	Kwartair	2,58
	Neogeen	23
	Paleogeen	66
Mesozoïcum	Krijt	145
	Jura	201
	Trias	252
Paleozoïcum	Perm	299
	Carboon en ouder	

↳ Periode van afzetting Zechstein zoutlagen

Figuur 2-1: Geologische tijdschaal (Cohen et al., 2013)

Tijdens het laatste deel van de Perm periode zorgde een snelle zeespiegelstijging ervoor dat de Rotliegend woestijn verdronk. Het Zuidelijk Perm Bekken veranderde in een marien bekken met diepere en ondiepere gedeelten dat zich uitstreckte van Engeland tot Polen en dat we kennen als de Zechstein zee. De heersende hoge temperaturen en harde wind zorgden voor sterke verdamping van zeewater en neerslag van mineralen. Door herhaalde perioden van nieuwe aanvoer van zeewater gevolgd door verdamping ontstond een dik pakket evaporieten, de Zechstein Groep. Deze bestaat vooral uit steenzout, anhydriet en andere zouten. Langs de randen van de Zechstein zee werden ook carbonaatafzettingen (kalksteen en dolomiet) gevormd. De totale dikte van de Zechsteinafzettingen loopt op van ongeveer vijftig meter in Zuid-Nederland tot 1200 m onder het Nederlandse deel van de Noordzee.

De Zechsteinsedimenten zijn afgezet als min of meer horizontale lagen, maar manifesteren zich nu in de ondergrond op een opvallende manier: in de vorm van zoutkussens en zoutpijlers (ook zoutkoepels genoemd). Na het Perm raakten de zoutlagen begraven onder dikke sedimentpakketten die in toenemende mate druk op het zout uitoefenden. Dit zorgde er in combinatie met tektonische activiteit voor dat het relatief lichte zout ging 'vloeien', in een proces dat 'halokinese' wordt genoemd. De aldus gevormde structuren worden geclassificeerd als 'lagen', 'kussens', of 'diapieren' (ook wel: zoutpijlers) op basis van de mate van vervorming (minst tot meeste vervorming, zie Figuur 2-2). Zoutkussens ontstaan door horizontale zoutstroming, terwijl zoutpijlers vormen wanneer de zoutbeweging verticaal wordt. De groei van een zoutkussen kan extensie en breukvorming van de sedimentaire bedekking erboven veroorzaken, wat resulteert in zoutpijlers. In Nederland zijn een aantal zoutpijlers gevormd van het zout uit de Zechstein Groep, waaronder de Zuidwending zoutpijlers in de Adolf van Nassau concessie. In Figuur 2-2 is zichtbaar dat door het gewicht van het bovenliggende gesteente het lichtere zout kan gaan vloeien. Dit wordt halokinese genoemd. Onverstoord zout vormt een laag (a), welke door halokinese tot zoutkussens (b) of diapieren (c) kan worden vervormd. De Zuidwending diapier is een voorbeeld van het laatste.



Figuur 2-2: Halokinese (Wong et al., 2007).

Het hierboven beschreven proces heeft er uiteindelijk toe geleid dat de bovenkant van de Zuidwending-zoutpijler zich op minder dan 200 m onder het maaiveld bevindt. De bovenkant van de zoutpijler bestaat niet uit steenzout maar uit een ongeveer 50 m dikke laag sulfaten en kleien die het restproduct zijn van de oplossing en erosie van het steenzout (de zogenaamde Zechstein 'caprock'). Hierboven bevindt zich nog een bijna 200 m dikke laag ongeconsolideerde kleien en zanden uit het Neogeen en het Kwartair (Figuur 2-1) (Trusheim, 1960).

2.2 Nederlandse Zoutwinning

Nobian Delfzijl

De zoutfabriek van Nobian Delfzijl verwerkt de pekels die door uitloging in Zuidwending en Heiligerlee is vrijgekomen tot zout. Zout is de grondstof voor de geïntegreerde chemieketen op het Chemie Park van

Delfzijl. Het kwalitatief hoogwaardige zout van Nobian wordt lokaal, nationaal én internationaal ingezet voor de productie van basischemicaliën door een proces dat chemische transformatie heet en elders plaatsvindt, met name voor de productie van chloor en loog.

Nobian produceert in Delfzijl ruim 2,6 miljoen ton zout per jaar. Bij het zoutbedrijf werken ongeveer honderd medewerkers. Dit betreft directe werkgelegenheid.

De betekenis van Nobian voor de energietransitie

Nederland is bezig aan een ingrijpende energietransitie waarbij aardgas grotendeels zal worden vervangen door duurzaam geproduceerd waterstof. Om de Nederlandse infrastructuur geschikt te maken voor waterstof moet worden voorzien in buffercapaciteit voor zowel lang- als kort-cyclische variaties in vraag en aanbod.

Nobian is de enige partij die in Noord-Nederland zoutcavernes heeft ontwikkeld ten behoeve van gasopslag. Deze kennis wordt nu ingezet om, in samenhang met productie van zout, cavernes te ontwikkelen waarbij Nobian opslagcapaciteit realiseert voor derden en zelf de vrijkomende pekkel verwerkt tot zout.

De bestaande Nobian cavernes in Zuidwending zijn - gelet op de grootte en de onderlinge afstand - niet geschikt voor het gebruik als opslagcavernes voor waterstof.

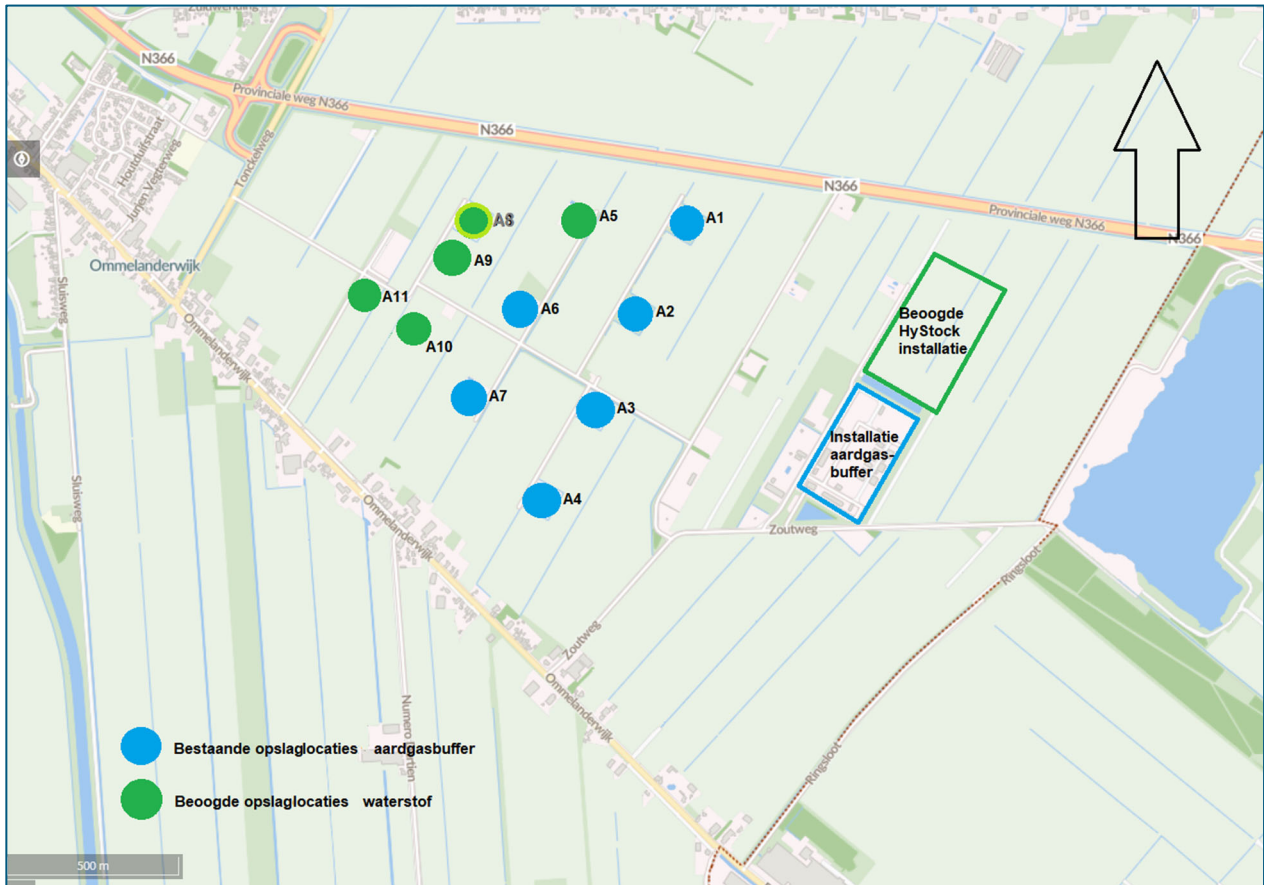
2.3 Energiebuffer

De energiebuffer Zuidwending (ook wel aardgasbuffer genoemd) wordt bedreven door EnergyStock en bestaat uit zes zoutcavernes waarin aardgas onder druk is opgeslagen. De energiebuffer is in staat een plotseling verschil tussen vraag en aanbod van aardgas op te vangen. Het draagt zo bij aan de leveringszekerheid van aardgas. De energiebuffer is in 2011 in (commercieel) gebruik genomen.

Deze ondergrondse opslag met kort-cyclische injectie en uitzending van aardgas is een belangrijk maatregel om het bestaande aardgasnetwerk te balanceren.

De zes aardgas opslagcavernes (A1, A2, A3, A4, A6 en A7, zie Figuur 2-3) hebben een totaal volume van 4,37 miljoen kubieke meter. De cavernes variëren in grootte van 0,6 miljoen m³ (A2, A3, A4 en A6) tot 1 miljoen m³ (A1 en A7). Doordat het aardgas onder druk wordt opgeslagen, is de hoeveelheid gas onder atmosferische druk in de orde grootte van honderden miljoenen m³.

Figuur 2-4 kijkt in westelijke richting. Op de achtergrond is de bebouwing van Veendam zichtbaar.



Figuur 2-3: Bestaande en beoogde opslaglocaties aan het maaiveld.



Figuur 2-4: Bestaande en beoogde zoutwinnings-/opslaglocaties aan het maaiveld (zicht in westelijke richting).

Elke caveerne van de energiebuffer is voorzien van twee putten, zodat hoge injectie- en uitzendstroomsnelheden kunnen worden behaald. In Tabel 2-1 zijn de kerngegevens van de aardgasbuffer weergegeven. Deze gegevens zijn ontleend aan het opslagplan (Gasunie, 2017).

Tabel 2-1: Kerngegevens aardgasbuffer

Cavernes	Injectiecapaciteit miljoen m ³ /uur	Uitzendcapaciteit miljoen m ³ /uur	Kussengasvolume miljoen m ³	Werkgasvolume miljoen m ³
A1, A2, A3, A4, A6, A7	1,1	1,8	383	382

De maximale (toegestane) opslagdruk van iedere caveerne wordt bepaald door de diepte van de zogenaamde LCCS (last cemented casing shoe, diepte punt van de mantelbuis in het boorgat). De minimale opslagdrukken zijn afhankelijk van de diepte van de bodem van iedere caveerne. Deze waarden zijn in Tabel 2-2 opgenomen.

Tabel 2-2: Gehanteerde en toegestane drukken (afgerond) in aardgascavernes bij de LCCS.

Druktoestand	A1	A2	A3	A4	A6	A7
P _{max} (barg)	189	176	181	185	181	185
P _{min} (barg) ¹	84	80	80	80	80	84
P _{max} -P _{min} (barg)	105	126	131	134	131	101

¹⁾ De P_{min} refereert aan de cavernedruk waaronder een caveerne maximaal 90 dagen per jaar bedreven mag worden, omdat het verschil met de druk in het omliggende gesteente dan maximaal is.

De maximale hoeveelheid aardgas die per dag aan een caveerne onttrokken wordt, wordt bepaald door de gesteentemechanische eigenschappen c.q. grenzen van de caveerne en wordt uitgedrukt in een maximum drukverandering per dag. In Tabel 2-3 is die drukverandering per dag weergegeven.

Tabel 2-3: Toegestane drukverandering.

Cavernedruk	Maximale drukverandering (bar / dag)
P _{min} < P _{cav} < P _{max}	-10 ≤ dp/dt ≤ 10

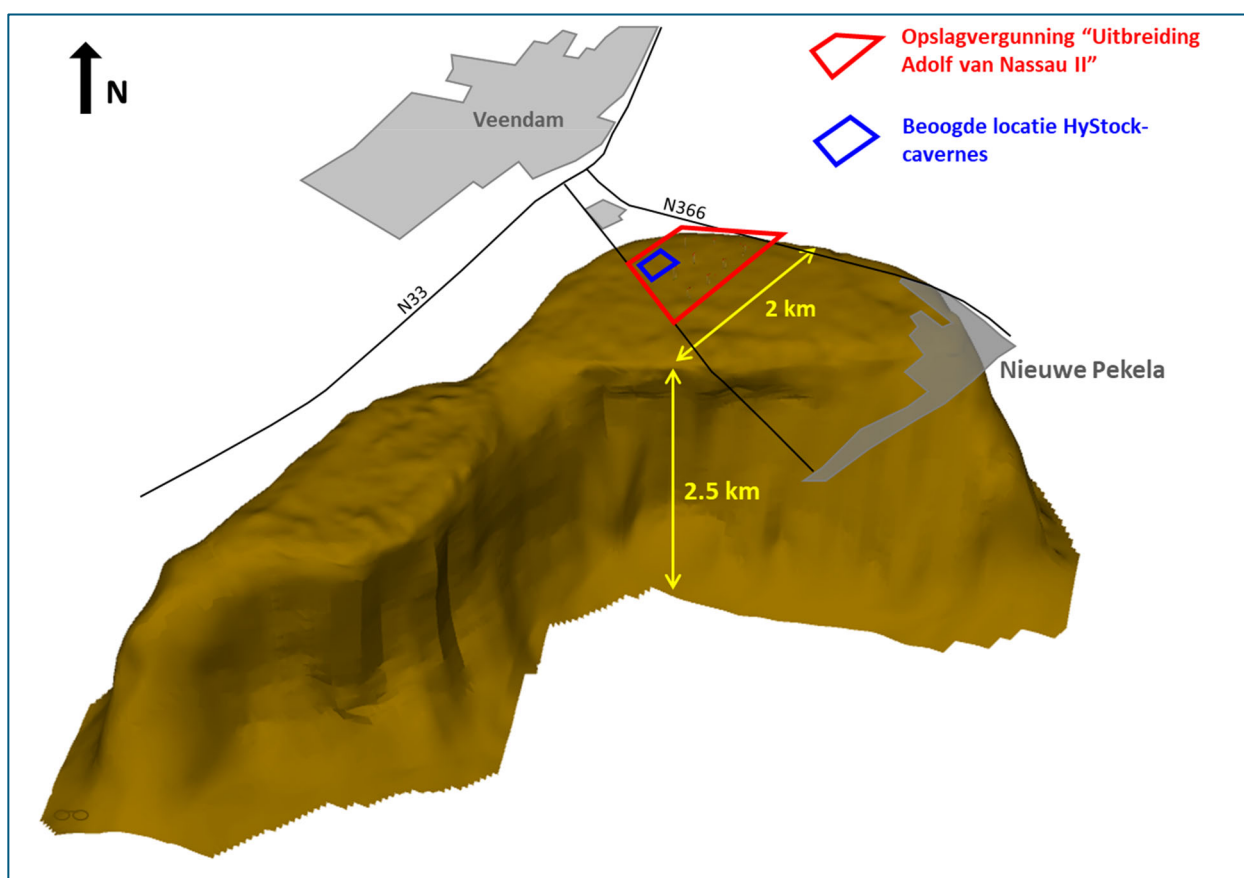
dp/dt is de drukverandering per tijdseenheid.

3 De Zuidwending- zoutpijler

3.1 Inleiding

HyStock wordt gerealiseerd in de Zuidwending-zoutpijler. De vorm en afmeting van deze zoutpijler zijn weergegeven in Figuur 3-1 en de interne structuur ervan in Figuur 3-2. Dit hoofdstuk behandelt in detail de gevolgen van mijnbouwactiviteiten in het zoutkussen en gaat in op de maatregelen die genomen worden om deze activiteiten veilig en verantwoord uit te voeren.

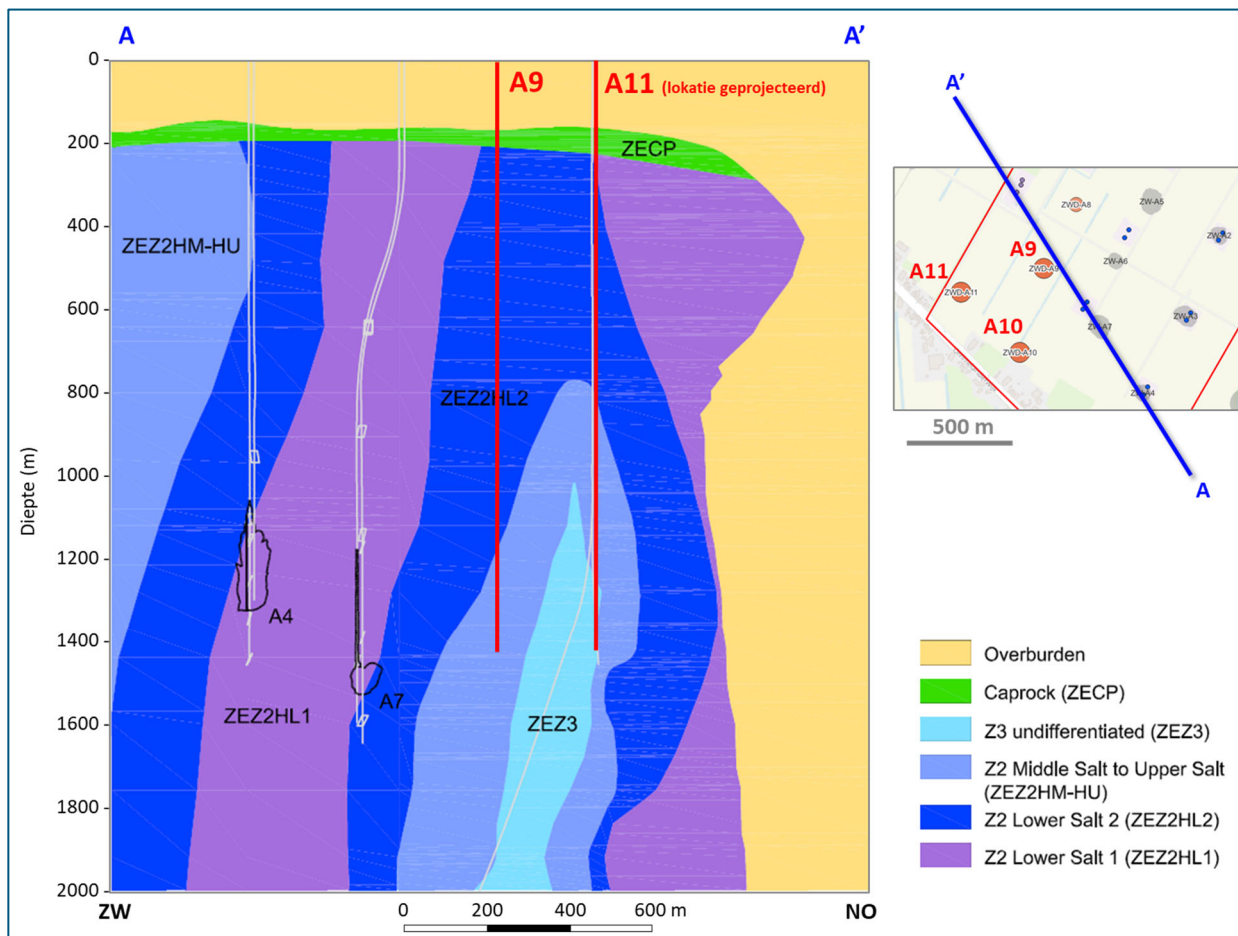
In Figuur 3-3 is de ligging van de HyStock cavernes aangegeven ten opzichte van Veendam, Nieuwe Pekela en de doorgaande wegen.



Figuur 3-1: 3D weergave van het zoutkussen bij Zuidwending (DEEP, 2012)

HyStock is gepland in het noordelijk deel van dit zoutkussen, in de buurt van de bestaande energiebuffer en de negen bestaande Nobian cavernes. Voor de bestaande energiebuffer is een opslagvergunning verleend (Uitbreiding Adolf van Nassau II) aan de Gasunie.

Kennis van de interne structuur van de Zuidwending- zoutpijler is voornamelijk gebaseerd op de correlatie van meetgegevens van geboorde putten, omdat de seismische data hiervoor een te lage resolutie heeft (DEEP.KBB, 2012). Op basis van deze correlatie is vast komen te staan dat de Zuidwending- zoutpijler intern is opgebouwd uit een geplooide opeenvolging van verschillende pakketten die onderdeel uitmaken van het Zechstein zout (Z2 en Z3 in Figuur 3-2).



Figuur 3-2: Doorsnede Zuidwending-zoutpijler nabij beoogde locaties HyStock opslagcavernes (DEEP.KBB, 2012).

Met het uitvoeren van de evaluatieboringen bij de well pads ZWD-A9 en ZWD-A11 (zie Figuur 2-3 en paragraaf 3.5) zal er meer informatie voorhanden komen over de opbouw van de Zuidwending-zoutpijler op de beoogde locatie van de HyStock-opslagcavernes. Deze nieuwe informatie kan aanleiding geven tot een verfijning van het ondergrondmodel van Figuur 3-2. De uitvoering van deze boringen is voorzien in 2025 en maakt geen onderdeel uit van dit milieueffectrapport (separaat aangevraagd en vergund).

In Figuur 3-2 is ook goed te zien hoe de zogenaamde Zechstein caprock (afkorting: ZCEP) de bovenkant van de zoutpijler vormt. Caprock wordt gevormd door suberosie en erosie (uitloging) van Zechstein evaporieten. De samenstelling hangt af van de onoplosbare en minder oplosbare gesteenten die achterbleven na oplossing van het zout. Hierboven bevindt zich nog een bijna 200 m dikke laag ongeconsolideerde kleien en zanden uit het Neogeen en het Kwartair (aangegeven als 'overburden' in Figuur 3-2).

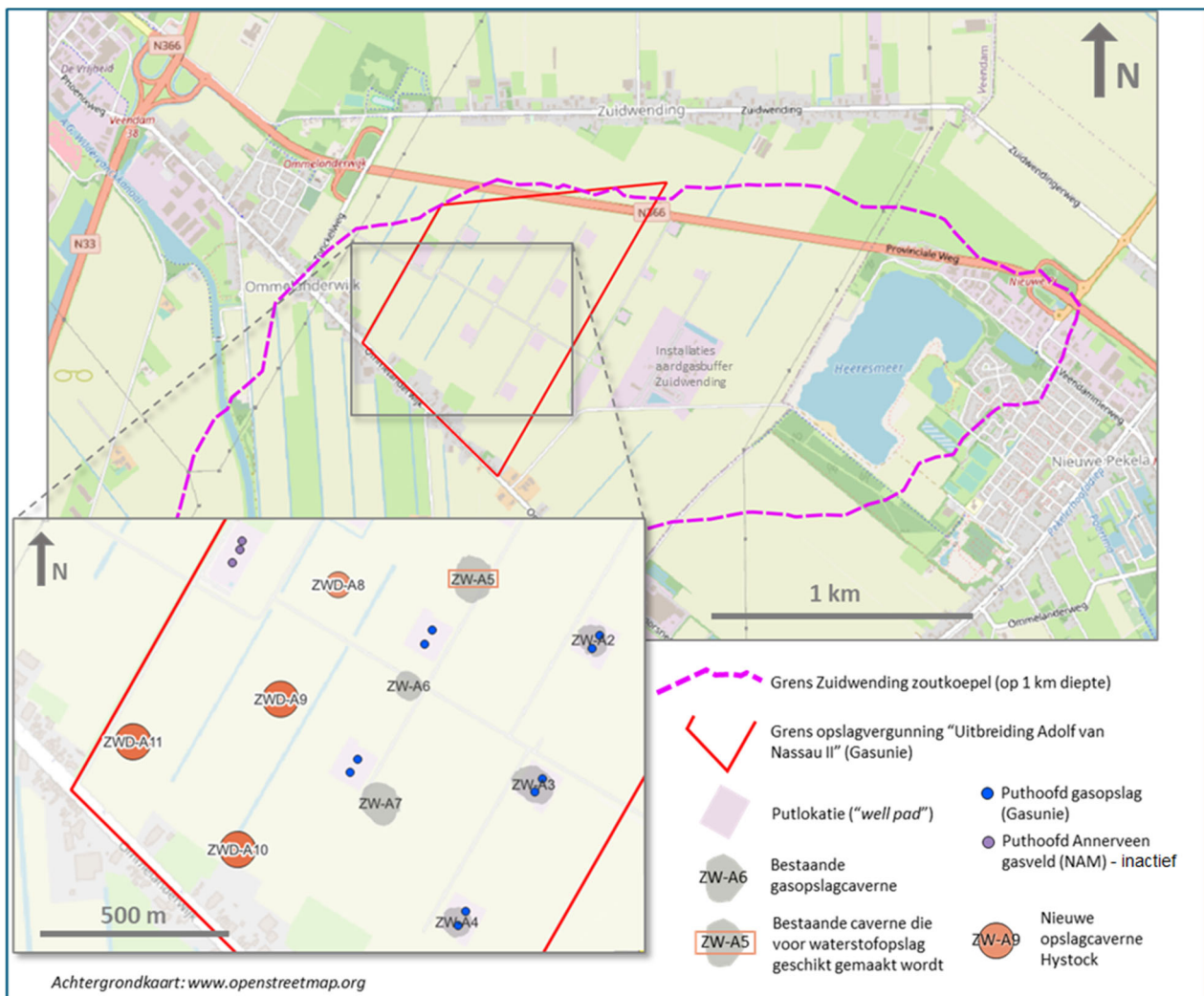
Het HyStock-project voorziet in het realiseren van een totaal opslagvolume voor waterstof van 4 miljoen m³. Reden om in de toekomst A8 te ontwikkelen als kleinere opslagcaverne, kan zijn dat één van de beoogde andere cavernes (ZWD-A9, ZWD-A10 of ZWD-A11, naast de reeds bestaande ZWD-A5) minder groot ontwikkeld kan worden dan 1 miljoen m³. Kerngegevens van de cavernes staan in Tabel 3-1. De bestaande caverne (ZWD-A5) wordt voor de opslag van waterstof geschikt gemaakt.

Tabel 3-1: Gegevens van de HyStock cavernes

Caverne	Diepte tot cavernedak (m)	Max. hoogte boven sump (m)	Max. breedte (m)	Volume (m ³)	Opmerking
ZWD-A5	1.140	370	84	1.000.000	Bestaande caverne
ZWD-A8*	1.270	200	50	Nog te bepalen	Put geboord, nog niet geloofd
ZWD-A9	1.150	300	80	1.000.000	Nieuwe locatie
ZWD-A10	1.150	300	80	1.000.000	Nieuwe locatie
ZWD-A11	1.150	300	80	1.000.000	Nieuwe locatie

*) Het realiseren van caverne ZWD-A8 is een optie als het volume van de andere vier cavernes achterblijft bij de voorgenomen totale opslagcapaciteit van 4 miljoen m³.

Figuur 3-3 zoomt in op de ligging van de cavernes binnen het Zuidwending gebied. Er is een verschil in locatie tussen de bovengrondse well pads (Figuur 2-3) en de positie in de ondergrond van de uit te logen cavernes (Figuur 3-3). Dit verschil laat zich verklaren door vanaf de boorlocatie (of well pad) schuin of gedevierd te boren. Hoe dieper de boring, hoe groter de (theoretische) afstand tussen well pad en caverne kan zijn.



Figuur 3-3: Locatie van de HyStock cavernes in Zuidwending.

3.2 Ontwerp zoutcavernes

De cavernes die ten behoeve van het HyStock-project worden aangelegd, worden specifiek ontworpen voor de opslag van waterstof. Het meest opvallende verschil met conventionele productiecavernes is het kleinere volume. Deze bedraagt voor de voorgenomen cavernes A9, A10 en A11 en voor de bestaande caveerne A5, zo'n 1.000.000 m³ (Tabel 3-1). Conventionele zoutproductiecavernes in het Zuidwending-veld kunnen echter tot 6 keer zo groot zijn en liggen minder diep, hierdoor zijn deze ongeschikt voor waterstofopslag (S. F. Van Gessel et al., 2022)

Door opslagcavernes kleiner en dieper te maken, is er een veel grotere geomechanische stabiliteit. Dit is noodzakelijk omdat tijdens de opslagfase de druk in de caveerne gedurende tientallen jaren cyclisch zal variëren. Daarnaast vormt het geplande caveernevolume een operationeel optimum. De caveerne is zo groot genoeg om voldoende opslag- en levercapaciteit te bieden, zonder dat er te veel kussengas nodig is om het drukbereik in de caveerne binnen de gewenste operationele grenzen te houden.

De cavernes worden zodanig ten opzichte van elkaar gepositioneerd dat ze te allen tijde stabiel zijn en de bodemdaling beperkt blijft. Daarnaast moeten de cavernelocaties ook passen in de bovengrondse functies.

De diameter van de geplande cavernes A9, A10 en A11 bedraagt 70 m. Er wordt echter binnen een diameter van 90 m rekening gehouden met de gesteentemechanische effecten van de waterstofopslag (de zgn. 'rock mechanical envelope'). Er is bovendien bij de plaatsing van de cavernes een bufferzone van 150 m rondom het hart van de caveerne gedefinieerd (100 m in het geval van de kleinere caveerne A8). Hierdoor bedraagt de afstand tussen de middelpunten van aangrenzende opslagcavernes minimaal 300 m.

Er is een gesteentemechanisch computermodel van de voorgenomen HyStock-cavernes en het omliggende gebied opgesteld, waarmee de gevolgen van verschillende opslagscenario's zijn gemodelleerd (Dieter Brückner et al., 2022). Hierbij is komen vast te staan dat, binnen het gestelde drukbereik (84 tot 198 bar WHP) en voor verschillende opslag- en onttrekkingsfases, de opslag van waterstof veilig kan geschieden. Het ontwerp van zowel individuele cavernes als het gehele HyStock-veld bevestigt de structurele (geomechanische) integriteit van de waterstofopslag.

Met het oog op bovenstaande, zijn de bestaande conventionele productiecavernes van Nobian niet geschikt als opslagcavernes. Deze bestaande cavernes zijn te groot en het (veld)ontwerp is niet afgestemd op de functie van cyclische waterstofopslag.

De zoutwinning door Nobian vindt plaats aan de hand van een aantal – met het Staatstoezicht op de Mijnen afgestemde - uitgangspunten die veilige en duurzame zoutwinning borgen. Deze uitgangspunten zijn gebaseerd op kennis en ervaring die gedurende vele decennia van zoutwinning zijn verkregen. Voor Zuidwending worden vergelijkbare uitgangspunten toegepast, te weten:

- Stabiele en integere cavernes: het ontwerp wordt gesteentemechanisch doorgerekend op basis van resultaten van onderzoek aan kernmateriaal,
- Lifecycle benadering: het ontwerp wordt voorafgaand aan de winning doorgerekend met het oog op een veilige afsluiting en nazorg voor de lange termijn,
- Landschappelijk ingepaste zoutwinningslocaties: inpassing gebeurt in overleg met belanghebbenden zoals omwonenden, landeigenaren, landgebruikers en de gemeente,
- Zorg voor de omgeving: het veldontwerp van cavernes en de winningsactiviteiten worden zo ingericht dat schade (bijvoorbeeld door bodembeweging of lekkage) wordt voorkomen.
- Beheersing van effecten: mogelijke effecten en de wijze waarop deze worden beperkt worden door onafhankelijke deskundigen beoordeeld.

- Gecontroleerde winning: monitoring van onder andere bodem- en grondwaterkwaliteit, bodemdaling, bodemtrillingen, productieparameters, niveaumeting afdekgas of vloeistof, caverneontwikkeling (sonar) om tijdig afwijkingen te signaleren en zo nodig maatregelen te nemen. Nobian doorloopt voor al deze metingen steeds 'plan-do-check-act' cycli om de zoutwinning gedurende de gehele levenscyclus van het veld gecontroleerd te laten verlopen.

3.3 Ontwikkeling van individuele cavernes

Cavernes worden gefaseerd uitgeloozd op basis van diepte, van diep naar ondiep. Na het maken van een boorgat blijft het diepste gedeelte van het boorgat zonder verbuizing achter, het zogeheten 'open hole'. Dit is het dieptebereik waar een caverne gevormd kan worden. Hierin worden drie concentrische buizen afgehangen met verschillende diepten, de zogeheten "uitloogverbuizingen". Daardoor wordt het mogelijk om in één boorgat verschillende vloeistoffen aanwezig te hebben. Doorgaans wordt de binnenste buis ('binnenste uitloogverbuizing') gebruikt om pekels op te pompen. De buis die daar omheen zit ('buitenste uitloogverbuizing') wordt gebruikt om zoet water in te pompen, via de annulaire ruimte tussen de binnenste en de buitenste uitloogverbuizing.

Om te zorgen dat dit proces gecontroleerd verloopt, wordt bij reguliere zoutwinning gebruik gemaakt van een afdekvloeistof (HVO - Hydrotreated Vegetable Oil). Door het gebruik van de afdekvloeistof wordt het dak van de caverne afgeschermd, wordt het uitloggen van steenzout in verticale richting verhinderd en wordt het uitloggen van steenzout in horizontale richting bevorderd. De afdekvloeistof zelf heeft drie belangrijke eigenschappen:

- Het mengt niet met water/pekels,
- Heeft een lagere dichtheid dan water waardoor het blijft drijven op water/pekels in de caverne,
- Steenzout lost er niet in op.

Met het oog op het maken van voor waterstofopslag geschikte cavernes wordt gekozen voor het toepassen van een dekengas in plaats van een dekenvloeistof. Deze keuze wordt gemaakt om te voorkomen dat koolwaterstoffen uit de vloeistof (hoe gering ook) zich vermengen met het opslagmedium (waterstof).

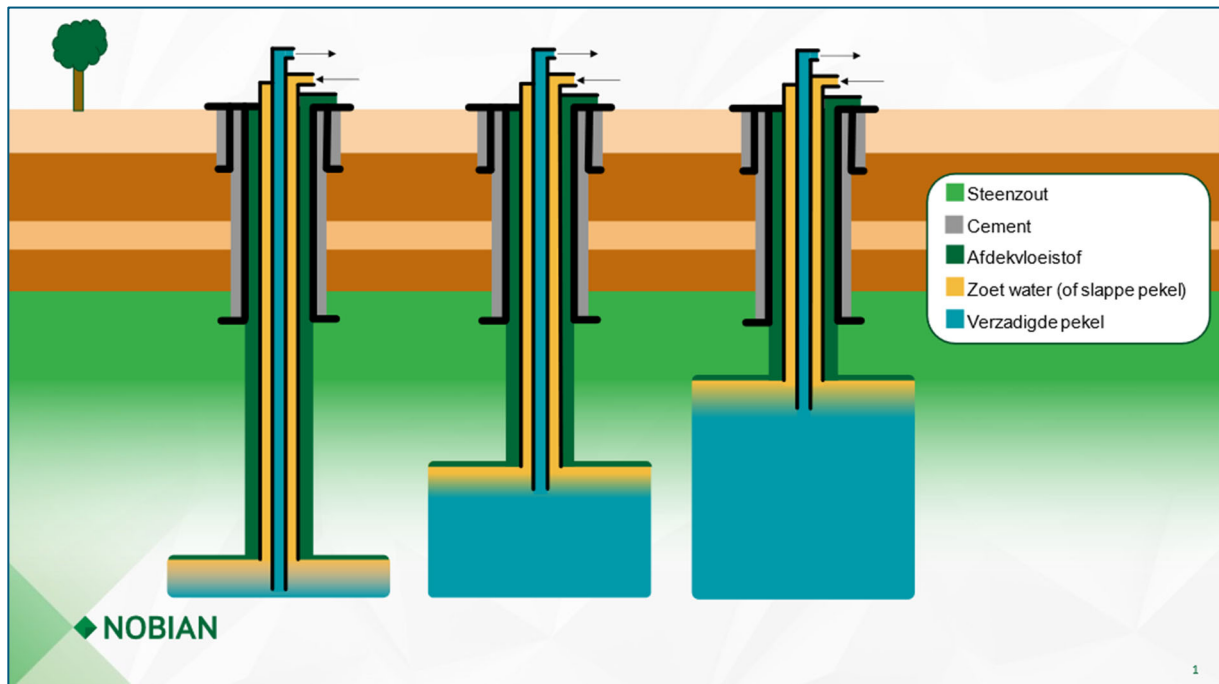
Als dekengas wordt stikstofgas (N₂) gebruikt¹, hetgeen voor circa 79% deel uitmaakt van onze atmosfeer en volledig onschadelijk is.

De diepte waarop uitlogging plaatsvindt, wordt bepaald door:

- De diepte van het scheidingsvlak tussen de pekels en de dekenvloeistof/dekengas,
- De afhangdiepte van de uitloogverbuizing.

Door beide in de loop van tijd stapsgewijs op te trekken, wordt het gehele dieptebereik van de caverne uitgeloozd (Figuur 3-4).

¹ Niet te verwarren met NO_x en NH₃ dat verantwoordelijk is voor stikstofdepositie op Natura2000 gebieden.

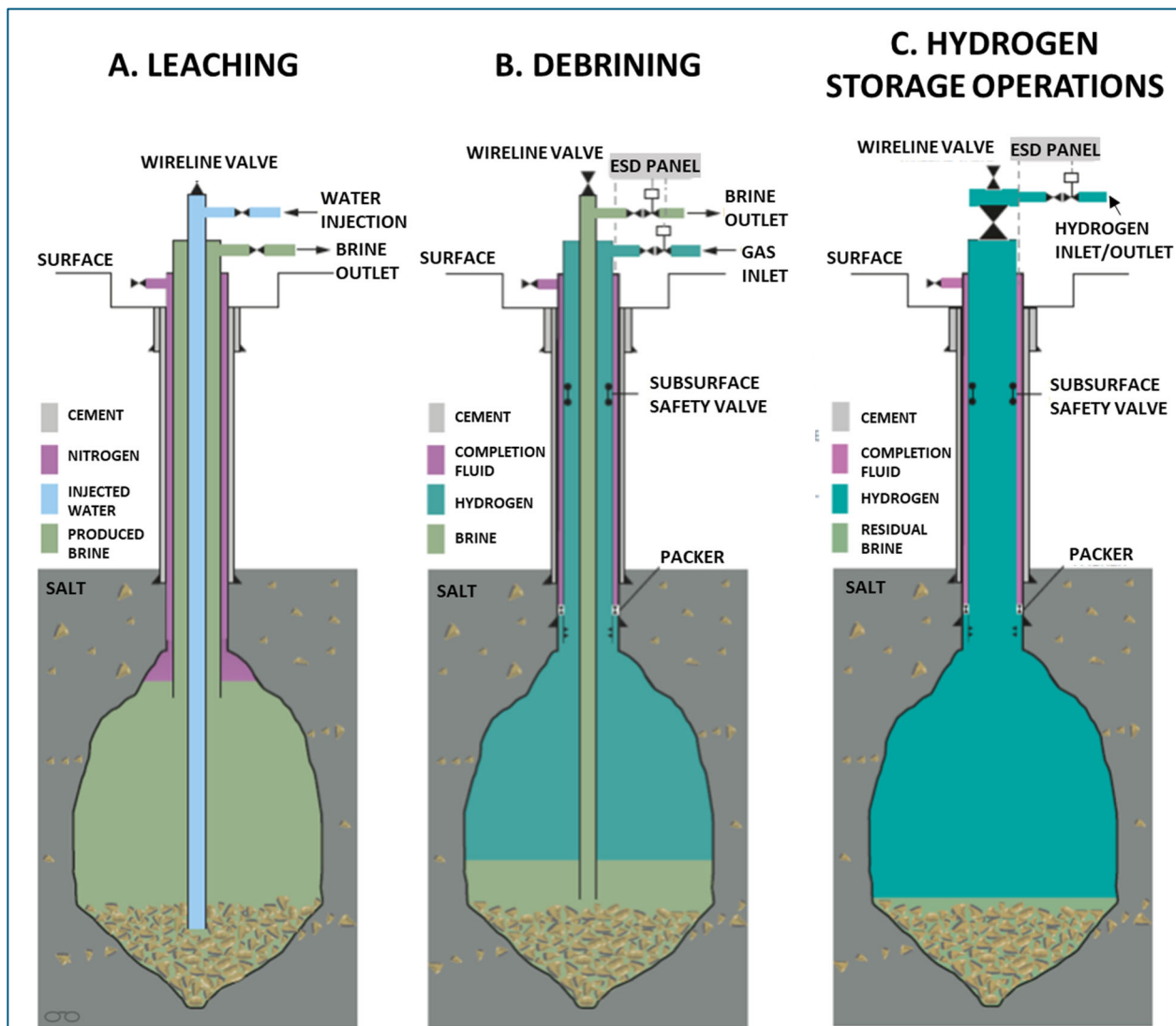


Figuur 3-4: Schematische weergave van cavernewerking door de tijd.

De belangrijkste stappen in het gereed maken van een caverne voor de opslag van waterstof zijn weergegeven in Figuur 3-5. Nadat de winning van zout is beëindigd, is de caverne volledig gevuld met pekelt (A. 'Leaching' in Figuur 3-5).

Als de caverne aan de vooraf opgestelde specificaties voor waterstofopslag voldoet, kan worden overgegaan naar de fase waarin waterstof de pekelt in de caverne vervangt. Hieraan voorafgaand wordt de vorm en afmeting van de caverne nauwkeurig vastgesteld door middel van een sonarmeting.

Door de caverne met waterstof te vullen en onder druk te zetten, wordt de aanwezige pekelt uit de caverne geperst. Dit proces gaat door tot alle pekelt uit de caverne is verdreven (B. 'Debrining' in Figuur 3-5). Hierna wordt de uitloogverbuizing uit de put gebouwd en kan de caverne voor opslagoperaties gereed worden gemaakt (C. 'Hydrogen Storage Operations' in Figuur 3-5). Anders dan afgebeeld bij (A) is de 'brine outlet' bij de zoutwinning door Nobian altijd de binnenste buis, welke boven in de caverne wordt afgehangen.



Figuur 3-5: Belangrijkste stappen in het gereed maken van een caveerne voor de opslag van waterstof.

3.4 Zoutkruip en bodemdaling

Steenzout heeft bijzondere eigenschappen. Onder de hoge druk en temperatuur die in de diepe ondergrond heersen gedraagt steenzout zich plastisch, waardoor het heel langzaam kan vloeien of kruipen. Bij zoutcavernes treedt na verloop van tijd volumeverlies op, omdat de druk in de caveerne lager is dan de spanning van de bovenliggende gesteentelagen. Er ontstaat 'zoutkruip' door plastische vervorming van het steenzout. Bij deze zoutkruip beweegt het omringende zout naar de caveerne en wordt deze heel langzaam ingedrukt en dus iets kleiner. Dit verschijnsel heet convergentie. Deze volumeverliezen worden via de bovenliggende gesteentelagen naar de oppervlakte overgebracht, en manifesteert zich aan het maaiveld als bodemdaling.

Deze bodemdaling als gevolg van de zoutwinning en de toekomstige opslag van waterstof verloopt traag en gaat ook lang door. Deze bodemdaling kan effect hebben op het oppervlaktewater- en grondwatersysteem, op de integriteit van gebouwen en infrastructuur, en op de riolering. Hiervoor zijn effectstudies uitgevoerd. Het is voor belanghebbenden van belang dat het volumeverlies van cavernes en dus de bodemdaling beperkt blijft.

Het mechanisme achter bodemdaling en verschillende bodemdalingsscenario's worden in meer detail beschreven in hoofdstuk 0.

3.5 Evaluatieboringen Zuidwending

Om voldoende geologische informatie te verkrijgen op de locatie van de voorgenomen opslagcavernes, worden een aantal putten geboord. De eerste twee hiervan (ZWD-A9A² en ZWD-A11A) worden als zogenaamde evaluatieboringen uitgevoerd. Dit betekent dat er uitgebreide boorgatmetingen worden uitgevoerd. Tussentijdse analyse van de meetgegevens laat aanpassingen in de precieze locatie en diepte van de daaropvolgende boringen toe. Ook worden in deze putten gesteentekernen van de zoutlaag geboord. Met deze gesteentekernen ontstaat een zeer gedetailleerd beeld van de samenstelling van het zout op die locatie. Dit kernmateriaal wordt gebruikt voor laboratoriumproeven naar chemische samenstelling en gesteentemechanisch gedrag. Deze putten worden tot een diepte van 1600 m geboord.

Na een positief resultaat van de metingen en na het verkrijgen van de noodzakelijke vergunningen worden de evaluatieputten geschikt gemaakt voor de waterstofopslag.

Voor de daadwerkelijke waterstofopslag is het nodig een extra diepboring te plaatsen bij ZWD-A9 en ZWD-A11 (naast de bestaande) en twee diepboringen bij ZWD-A10.

3.6 Seismisch onderzoek

Een overzicht van geïnduceerde seismische gebeurtenissen (aardbevingen) in de periode 15/6/2012 t/m 31/12/2023 is weergegeven in Figuur 3-6. Deze gegevens zijn grotendeels afkomstig uit het landelijke seismografische netwerk (KNMI, 2024) Hierbij valt op te merken dat er zich rond de zoutwinning in Zuidwending slechts een zeer gering aantal seismische gebeurtenissen hebben voorgedaan. Dit staat in contrast met het centrale en noordelijke deel van de provincie Groningen (bovenin Figuur 3-6), waar een veel grotere dichtheid aan bevingen is te zien.

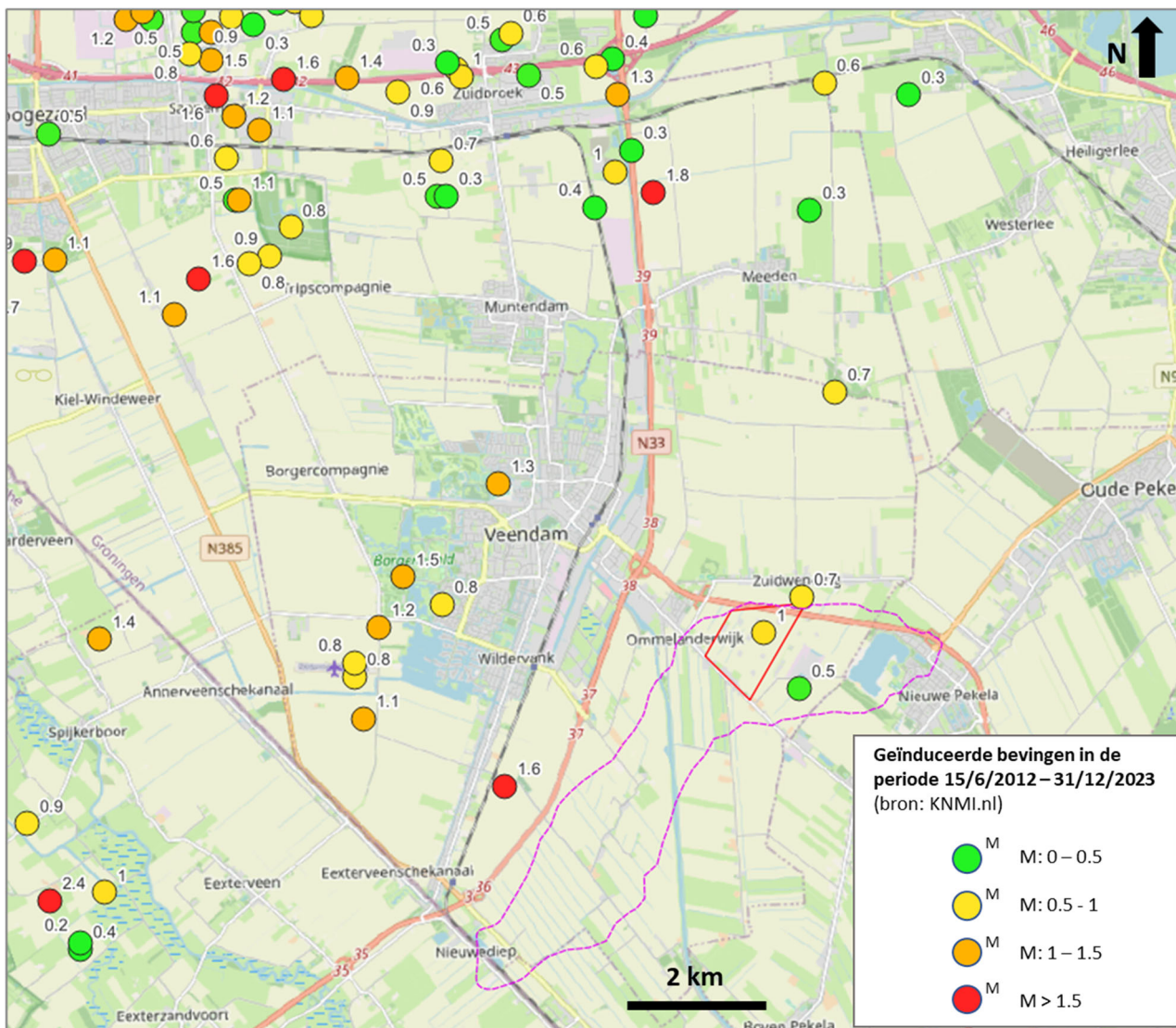
Nobian heeft sinds 2019 een micro-seismisch meetnet in het gebied actief. Dit meetnet functioneert in algemene zin hetzelfde als het landelijke seismische meetnet van het KNMI, maar omdat het een lokaal systeem is staan de sensoren dichter bij elkaar en kunnen er lagere magnitude micro-seismische trillingen opgevangen worden. Het is een fijnmaziger netwerk dan dat van het KNMI.

Gebleken is dat dit Nobian meetnet in staat is om een magnitude vanaf $M = -0.7$ te detecteren tussen de stations (sensoren van het meetnet) in. Met het meetnet is kan de locatie van de trilling bepaald worden, zodat bekeken kan worden of er een verband is met een bepaalde caveerne.

Ter vergelijking, voor heel Nederland is de ondergrens (of gevoeligheid) tussen de $M = 1.5$ en $M = 2.0$. In Groningen (waar het landelijke meetnet vanwege de voormalige gaswinning sterk verdicht is) is die gevoeligheid $M = 0.5$.

Het Nobian meetnet heeft niet als doel om uitspraken te kunnen doen in gevallen van schade door seismiciteit. Het is primair ingericht om de stabiliteit van de cavernes te monitoren. Nobian deelt de ruwe, onverwerkte metingen met het KNMI, die daar op onafhankelijk wijze gebruik van kan maken. De meetresultaten van het Nobian micro-seismisch meetnet zijn publiekelijk beschikbaar in de vorm van kwartaalrapporten (Nobian, 2024b). Er zijn tot op heden geen aanwijzingen dat bij de zoutwinning en/of de aardgasbuffer significante bodemtrillingen zijn opgetreden. Tot op heden geregistreerde trillingen zijn niet voelbaar en leiden niet tot schade.

² Op iedere well pad worden voor de waterstofopslag twee putten gerealiseerd: een A en een B put.



Figuur 3-6: Aardbevingen in de omgeving van Zuidwending (KNMI).

3.7 Bodemdalingsmetingen

Tijdens en na afloop van de zoutwinning en opslag vindt monitoring plaats om het optreden van bodembeweging (in dit geval bodemdaling en trillingen) vast te stellen. Het monitoren van de bodemdaling wordt beschreven in het meetplan dat ingediend wordt bij het Ministerie van KGG. Het Ministerie moet het meetplan goedkeuren. Bodemtrillingen, met name in de gesteentelagen boven het zout, worden geregistreerd door het micro-seismisch meetnetwerk (zie par. 3.6).

Het doel van monitoring is om vast te stellen of bodembeweging optreedt en, zo ja, in welke mate. Monitoring wordt op de volgende wijze uitgevoerd:

- Door middel van metingen aan het niveau van het maaiveld (waterpassing),
- Voorafgaand aan het boren wordt een eerste waterpassing gedaan ('nulmeting'). Het resultaat daarvan is het startpunt voor de bodemdaling ten gevolge van HyStock,
- Na start van de zoutwinning en gedurende de waterstofopslag vinden periodiek waterpasmetingen plaats,

- Deze metingen worden uitgevoerd volgens een meetplan dat zich richt tot buiten de verwachte omtrek van het bodemdalingsgebied,
- Voorafgaand aan het boren wordt een micro-seismisch meetnetwerk geïnstalleerd waarmee direct de metingen van start gaan (par. 3.6),
- Deze meetresultaten worden tijdens de zoutwinning met de prognose vergeleken en vormen een validatie van het gesteentemechanisch model. Afhankelijk van de mate van afwijking kan bijgestuurd worden door:
 - De dikte van het zoutdak aan te passen.
 - De diameter van de caverne aan te passen.
 - De onderlinge afstand tussen de cavernes aan te passen.
- Op basis van de meetgegevens wordt de prognose geactualiseerd en zo nodig wordt het meetplan bijgesteld.

Aanvullend op de waterpassingen heeft Nobian ook historische INSAR³ gegevens ingekocht voor het gebied Zuidwending. Daarmee wordt de natuurlijke bodembeweging in het gebied bepaald vóór aanvang van de zoutwinning en de waterstofopslag. Tijdens de zoutwinning en de waterstofopslag worden actuele INSAR gegevens ingewonnen om de bodembeweging in de periode tussen de momenten van waterpassing te kunnen volgen. Door de bodembeweging met twee verschillende methoden te monitoren, wordt de betrouwbaarheid vergroot. In feite vindt op deze wijze een continue evaluatie plaats.

³ INSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar. Satellieten registreren beelden van het aardoppervlak, en deze beelden worden gecombineerd om een breed gebied te tonen, langzame verplaatsingspatronen op de grond. InSAR is een beproefde techniek om grondbewegingen in kaart te brengen met behulp van radarbeelden van satellieten in een lage baan om de aarde.

4 Kennis over opslag van waterstof

In dit hoofdstuk wordt de bestaande kennis over ondergrondse waterstofopslag beschreven. Dit omvat zowel praktijkervaring als wetenschappelijke kennis.

4.1 Ervaring met waterstofopslag in het buitenland

In deze paragraaf zijn bestaande waterstofopslagprojecten beschreven, de lessen die hieruit kunnen worden getrokken en de mogelijke verschillen met het HyStock project.

Het opslaan van waterstof in cavernes gebeurt sinds 1970 op enkele locaties in het buitenland. Voorbeelden hiervan zijn de opslagen in Teesside in de UK en in Texas in de VS. Deze ondergrondse waterstofopslagen zijn tientallen jaren geleden aangelegd als (seizoens-)zekering in de toevoer van waterstof naar de chemische industrie. In Tabel 4-1 zijn de beschreven waterstofcavernes en fysieke eigenschappen opgesomd.

Tabel 4-1: Kenmerken van bekende waterstofopslagen in zoutcavernes (TNO, 2022)

Item	Spindletop (VS)	Clemens Dome (VS)	Moss Bluff (VS)	Teesside (VK)
Operator	Air Liquide	Chevron Phillips	Praxair	Sabic Petrochemicals
Geologie	Zoutpijler	Zoutpijler	Zoutpijler	Zoutkussen
Actief sinds	2016	1983	2007	1972
Geom. Vol. (m ³)	906.000	580.000	566.000	3* 70.000
Gem. Diepte (m)	1.340	1.000	1.200	365
Druk bereik (bar)	68-202	70-137	55-152	45
Werkvolume (10 ⁶ m ³)	92.6	27.3	41.5	9.12
Nader contact	Ja	Ja	Nee	Nee

Gasunie heeft gekeken naar waterstofopslagen in zoutcavernes in het buitenland met als doel om kennis te vergaren over het ontwerp en het opereren van een waterstofopslag. Door Gasunie is een bezoek gebracht aan Air Liquide waterstofopslag bij Spindletop, Beaumont Texas. Daarnaast is door Gasunie gesproken met Chevron Phillips Clemens Terminal in Sweeny, Texas, waar sinds 1983 waterstof wordt opgeslagen in zoutcavernes. Praxair, met een waterstofopslagcaverne bij Houston, Texas, gaf geen respons. Een andere bekende waterstofopslag is die bij Teesside in de UK. Vanwege de wisselende respons op informatieverzoeken varieert de hoeveelheid informatie die per opslag wordt beschreven. Over de opslagen in Moss bluff en Teesside is geen aanvullende informatie beschikbaar gesteld anders dan weergegeven in Tabel 4-1.

De gegevens die openbaar gedeeld worden verschillen sterk tussen de verschillende waterstofopslagen, en zijn vaak erg beperkt. Ook is er een zeer beperkte respons geweest op informatieverzoeken. Uiteindelijk is alleen aanvullende en relevante informatie verkregen over de waterstofopslag Spindletop, Texas, in de Verenigde Staten. Deze is hieronder beschreven.

Waterstofopslag Spindletop, Texas, Verenigde Staten

Air Liquide exploiteert een waterstofopslag bij Spindletop. Bij het bezoek is informatie verkregen over de zoutformatie, uitgevoerde materiaaltesten met het oog op het ontwerp en de betrokken partijen voor modellering (thermodynamisch en gesteentemechanisch). Er is gesproken over de uitvoering van en gebruikte materialen bij de afwerking van de put (cementatie, casings, tubing, strings, last cemented casing, wellhead, valves, elastomers). De samenstelling van enkele zelf ontwikkelde materialen is niet door Air Liquide werd gedeeld. Technische gegevens zijn gedeeld in Tabel 4-1.

Op deze locatie zijn tijdens normale bedrijfsomstandigheden zijn geen problemen geconstateerd. De hoeveelheid vocht is zeer klein. Een les is dat de caverne niet te lang in een rustperiode (tussen zoutwinning en het gebruik als waterstofopslag) met alleen pekkel moet verkeren. De suggestie is gedaan om het proces van debrining (vervangen van pekkel door waterstof) zo snel mogelijk na het beëindigen van de zoutwinning te starten.

Er zijn geen lekkages geconstateerd bij de well head. Om lekkages te voorkomen is in het ontwerp uitgegaan van een minimum aan flenzen en daar waar mogelijk gelaste verbindingen. Conform de USA standaard is de well head uitgevoerd met één afsluiting ('barrier'). Gedurende de operationele fase zijn geen problemen met de integriteit van de put geconstateerd.

Er zijn dagelijkse inspectieronden. Elk jaar wordt een corrosie-inspectie van de buizen uitgevoerd. Omdat er geen regelgeving voor sonaronderzoeken bestaat, is daartoe geen poging ondernomen. Een volledige sonar kan alleen worden uitgevoerd wanneer de debrining string uit de cavernes wordt verwijderd. De haalbaarheid daarvan in een waterstofopslag is nog een vraagteken. Vanwege de lage stroomsnelheden en eigenschappen van waterstof vindt er geen erosie monitoring plaats.

Met betrekking tot het drukmanagement worden de annuli gemonitord. De A-annulus is in gebruik voor productie. Voor het injecteren van waterstof wordt gebruik gemaakt van een 4-traps compressor. Er is een koelunit is geïnstalleerd om expanderende waterstof te koelen.

Verschillen tussen HyStock en bestaande waterstofcavernes

Op basis van de kennis en ervaring met bestaande waterstofcavernes is er verschil tussen de aanpak en werkwijze in de VS en/of VK en in Nederland (Tabel 4-2), en is er een aantal mogelijk relevante aandachtspunten. De voornaamste bron van informatie betreft het bezoek aan de locatie Spindleton, VS.

Tabel 4-2: Vergelijk VS/UK praktijk met die van HyStock en beoordeling.

Item	VS en/of VK	Nederland - HyStock	Conclusie verschil t.a.v. veiligheid en milieu
Aantal barrières	Eén	Twee	Extra barrière bij HyStock is veiliger.
Surface Controlled Subsurface Safety Valve	Nee	Ja	Belangrijke extra veiligheidsmaatregel
Well head / X-mass tree	Opbouw met hanging string	Opbouw met lower master valve, upper master valve en top valve: 3 barrières.	VS/UK opbouw met hanging string geeft maar 1 barrière. Uitvoering bij HyStock met 3 barrières is significante veiligheidsmaatregel.
Productie annulus	A-annulus (1 barrière)	Productie tubing (2 barrières)	Extra barrière bij HyStock is veiliger.

Item	VS en/of VK	Nederland - HyStock	Conclusie verschil t.a.v. veiligheid en milieu
Type afsluiters	'gate afsluiters'	'bolafsluiters'	'Gate afsluiters' hebben smering en putdruk nodig om in hun zitting te worden geduwd om af te dichten. Gate afsluiters zijn 100% gasdicht tot een diameter van 6 inch. Diameter afdichting bij Hystock betreft 9 en 11 inch. Bolafsluiters zijn vetvrij en dichten ook 100% af, zelfs als er geen drukverschil aanwezig is.
Verbinding tussen casings	gelast	geschroefd	Gelaste casing geeft meer fracture potentieel in vergelijking met geschroefd.
Type cement	Overeenkomstig		Geen
MIT-test	Met stikstof	Met stikstof gevolgd door test met waterstof	Gelet op molecuulgrootte van H ₂ en de grotere kans op ontsnapping is uitvoering van een H ₂ MIT test een extra verzekering.

Het voornaamste verschil tussen de bestaande waterstof cavernes en het HyStock project is de voorgenomen cyclus van injectie en onttrekking. De bestaande ondergrondse waterstofopslagen zijn tientallen jaren geleden aangelegd als zekering in de toevoer van waterstof naar de chemische industrie. Deze bestaande cavernes opereren lang-cyclisch ofwel op lange termijn c.q. seizoens-basis. Ervaringen met lang-cyclische opslagcavernes voor waterstof op industriële schaal hebben bewezen dat zuivere waterstof effectief en veilig kan worden opgeslagen in zoutcavernes (S. Van Gessel et al., 2023). HyStock is voornemens de waterstof cavernes te opereren middels kort-cyclische injectie en onttrekking. Hierin wisselen injectie en onttrekking elkaar sneller af. Op deze manier kan de waterstofopslag als buffer op een waterstofnetwerk worden gebruikt. Hoewel dit de eerste kort-cyclisch opererende opslagcaverne voor waterstof zal zijn, heeft Gasunie veel ervaring met de kort-cyclische opslag van gas in cavernes, namelijk bij de aardgasbuffer Zuidwending.

4.2 Fysische en chemische aspecten van de waterstofopslag

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van onderzoeken naar de relevante fysische en chemische aspecten van ondergrondse waterstofopslag in zoutcavernes. Gasunie heeft hiertoe een aantal onderzoeken ingezet, veelal zodat de specifieke context van de cavernes bij Zuidwending in detail kan worden meegenomen. Deze onderzoeken zijn waar mogelijk aangevuld met meer algemeen, 'peer-reviewed', academische literatuur. Ter indicatie van de verhouding tussen verschillende bronnen is, in toevoeging aan de referentielijst, een opsomming van de gebruikte bronnen in dit hoofdstuk gemaakt in Tabel 4-3.

Tabel 4-3: Gebruikte bronnen

Titel	Auteur(s)	Type literatuur
Risk Assessment of the Large-Scale Hydrogen Storage in Salt Caverns	M. Portarapillo, A. Di Benedetto	Peer-reviewed
Enabling Large-Scale Hydrogen Storage in Salt Caverns: Recent Developments Technical Conference Paper, 2022	A. Réveillère, et al.	Peer-reviewed
Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects	R. Tarkowski	Peer-reviewed
Rock mechanical verification of operation parameters for the gas storage cavern Zuidwending A5 – Salt dome Zuidwending	D.-P. Dieter Brückner, et al.	Ingezet door Gasunie
Hydrogen anhydrite interactions, 2023	S. Ziegenbalg, G. Ziegenbalg	Ingezet door Gasunie

Titel	Auteur(s)	Type literatuur
Behaviour of anhydrite in a salt cavern upon hydrogen storage – literature assessment	S. Jansen, J. Gerritse	Ingezet door Gasunie
The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria	G. Muyzer, A.J.M. Stams	Peer-reviewed
Microbial hydrogen consumption leads to a significant pH increase under high-saline-conditions: implications for hydrogen storage in salt caverns	N. Dopffel, et al.	Peer-reviewed
Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues	V. Reitenbach, et al.	Peer-reviewed
Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir	A. Amid, et al.	Peer-reviewed
Underground hydrogen storage: A comprehensive review	D. Zivar, et al.	Peer-reviewed
Identification and quantification of risks of subsurface hydrogen storage in salt caverns	R.M. Groenenberg, et al.	Ingezet door Gasunie
Underground Hydrogen Storage Technology Monitor Report	S. van Gessel, et al.	Non-academisch rapport
Eindrapport pilotproject “Testen van opslag waterstof in zoutcaverne ter flexibilisering van duurzaam energiesysteem”	TNO, EnergyStock	Ingezet door Gasunie
Well Report Zuidwending A8A, Hydrogen Storage Demonstration Phase	DEEP.KBB	Ingezet door Gasunie

4.2.1 Permeabiliteit van zoutcavernes en lekdichtheid put

Permeabiliteit zoutcavernes

De ondoordringbaarheid van zoutlagen voor waterstof en de structurele integriteit van cavernes zijn van cruciaal belang voor de opslag van waterstof in zoutcavernes. Op dit gebied is veel vergelijkbare ervaring opgedaan met de opslag van aardgas in zoutcavernes. Het is bekend dat zoutlagen niet permeabel zijn voor aardgas, en dat structurele integriteit van cavernes intact blijft over lange perioden van cyclische opslag van aardgas.

Uit aanvullend onderzoek blijkt dat de permeabiliteit van zoutlagen voor waterstof niet significant verschilt met de permeabiliteit voor aardgas (Réveillère et al., 2022; Tarkowski, 2019).

In deze onderzoeken is de permeabiliteit gemeten bij steenzout onder verschillende maten en vormen van stress (isotroop, deviatorisch, axiaal) zoals die ook mogelijk voorkomen in de ondergrond. Eventuele verschillen in de doorlaatbaarheidssnelheden van de gassen door steenzout zijn uitsluitend het gevolg van hun verschillende viscositeit. Daarom geven de resultaten een positieve indicatie dat uitgeloopte zoutcavernes even geschikt zijn voor de opslag van waterstof onder hoge druk als voor de opslag van aardgas, waar ze al decennialang voor gebruikt zijn.

Lekdichtheid put

Omdat waterstofmoleculen kleiner zijn dan methaanmoleculen is er extra zorg vereist rondom lekdichtheid met betrekking tot de cavernes en de afsluitende materialen (par. 5.2). De standaard in de industrie voor het testen van integriteit van de put zijn mechanische integriteitstesten (MITs) (Réveillère, 2023). Hierbij wordt stikstof geïnjecteerd tot beneden het onderste deel van de mantelbuis (LCCS). Hierdoor wordt de pekel in de caverne onder druk gezet. Door het monitoren van het grensvlak tussen de pekel en stikstof, evenals het volume en temperatuur van de stikstof kunnen lekken worden gedetecteerd. De MIT is nauwkeurig tot een ‘minimum detectable leak rate’ (MDLR) van 50 kg stikstof per dag. Als de lekkage lager is dan deze MDLR, wordt dit als acceptabel of ‘lekvrij’ beschouwd. Hoewel er beperkte ervaring is met de opslag van waterstof in zoutcavernes, is de wetenschappelijke consensus (Réveillère, 2023) dat

deze testen ook voldoen om integriteit van de put te testen voor waterstofopslag. Ondanks deze consensus suggereert de literatuur in het kader van het voorzorgsbeginsel het dubbelen van deze test, dan wel de test uit te voeren met waterstof, in toevoeging op de test met stikstof. In lijn met die suggestie wordt de MIT bij HyStock met zowel stikstof als waterstof uitgevoerd.

Op basis van de permeabiliteit van zoutlagen voor waterstof en de structurele integriteit van de put wordt er geen toegenomen risico op lekkages verwacht ten opzichte van aardgas (Réveillère et al., 2022; Tarkowski, 2019). Er is rekening gehouden met deze eigenschappen bij het ontwerp van de zoutcavernes binnen dit project (par. 5.2).

4.2.2 Het gedrag van waterstof

Thermodynamisch gedrag waterstof

Om waterstof veilig te kunnen opslaan zijn de thermodynamische eigenschappen onderzocht. Doordat er veel ervaring is met de ondergrondse opslag van aardgas, worden deze eigenschappen vergeleken met die van aardgas.

Het thermodynamisch gedrag van waterstof in cavernes is vergelijkbaar met dat van aardgas. De temperatuursverandering bij wisselende druk in de cavernes wordt gedecteerd door de arbeid die door of op het gas in de caveerne wordt verricht als er respectievelijk gas wordt onttrokken of wordt opgeslagen. Dit is een polytroop proces waarbij de polytrope index onder andere afhankelijk is van de hoeveelheid energie die wordt uitgewisseld met het steenzout. Deze energie-uitwisseling is afhankelijk van de steenzouttemperatuur. Als er geen energie wordt uitgewisseld is het proces adiabatisch isentroop. Andersom beïnvloedt een wisselende gastemperatuur ook de temperatuur van het steenzout aan de wand van de caveerne. Hierdoor ontstaat een radiaal temperatuurprofiel wat thermische stress in het steenzout tot gevolg heeft. Dit fenomeen is het onderwerp van de thermodynamische studies waarin de koppeling tussen gesteentemechanica en thermodynamica in het gas wordt gemaakt en de integriteit van de caveerne wordt beoordeeld. De studieresultaten van waterstofcavernes zijn vergelijkbaar met die van aardgascavernes. Hierdoor kan worden aangenomen dat waterstofcavernes zich hetzelfde gedragen en de risico's vergelijkbaar zijn.

Oplosbaarheid van waterstof

De oplosbaarheid van waterstof in pekkel wat achterblijft in een caveerne kan relevant zijn in het kader van de efficiëntie van opslag en de eventuele mogelijkheid tot chemische reacties in de vloeibare fase.

HYSYS-simulaties op bases van een *electrolyte NRTL* model laten zien dat de massafractie waterstof in pekkel van 198 bar en 50°C slechts $1,8 \cdot 10^{-8}$ (-) is. De molfractie waterstof is in dat geval $2,6 \cdot 10^{-7}$ (-), wat neerkomt op een waterstofconcentratie van $1,3 \cdot 10^{-5}$ mol/l.

Een kleine rekensom laat zien dat 'waterstofverliezen' door het oplossen in pekkel zeer klein zijn: Veronderstel een hypothetisch groot pekkelvolume van 800.000 m³ met een dichtheid van 1204 kg/m³. Dat komt overeen met $9,63 \cdot 10^8$ kg pekkel. Een massafractie $1,8 \cdot 10^{-8}$ daarvan is waterstof. Dat betekent dat er slechts $9,63 \times 1,8 = 17,3$ kg waterstof oplost, wat neerkomt op ca. 175 m³(n).

De hoeveelheid pekkel die bij HyStock achterblijft in de caveerne na het ontpekelen (verdringen met waterstof) is veel kleiner, en er wordt verwacht dat de caveerne in de loop van de tijd verder droogt doordat waterstof droog wordt geïnjecteerd, en iets vochtiger wordt onttrokken. Er kan worden gesteld dat 'verliezen' in de pekkel verwaarloosbaar klein zijn.

4.2.3 Chemische reacties met waterstof

Reductie van sulfaat door waterstof tot waterstofsulfide

Bij waterstofinjectie kunnen er mogelijk chemische reacties plaatsvinden in de ondergrond. Het materiaal waaruit de wanden van de cavernes voornamelijk bestaan, haliet (NaCl), is inert met waterstof. Er kunnen echter ook dunne lagen anhydriet (CaSO₄) aanwezig in de cavernes. De voornaamste reactie bij opslag in zoutcavernes is de reductie van sulfaat door waterstof tot waterstofsulfide (Dopffel et al., 2023; Jansen & Gerritse, 2023; Laban, n.d.; Muyzer & Stams, 2008; Ziegenbalg & Ziegenbalg, 2023).



Andere mogelijke reacties met waterstof in de ondergrond, zoals methaanvorming, zijn zeer beperkt geacht doordat de beschikbare hoeveelheid koolstof reactant in zoutcavernes verwaarloosbaar klein is (Ziegenbalg & Ziegenbalg, 2023).

Voordat de reductie van sulfaat plaats kan vinden moet het anhydriet eerst oplossen in water, waarbij het sulfaat vrijkomt en beschikbaar komt voor de reactie. De sulfaatreductie wordt derhalve beperkt door de oplosbaarheid van anhydriet. Omdat de pekkel in de cavernes reeds een verzadigde oplossing is, wordt de snelheid waarmee het anhydriet oplost bepaald door de relatieve oplosbaarheid en beschikbaarheid van anhydriet ten opzichte van haliet. De oplosbaarheid van anhydriet is veel lager dan de oplosbaarheid van haliet. De totale beschikbaarheid van anhydriet is ook veel lager dan de beschikbaarheid van haliet; Er is relatief meer haliet aanwezig, de anhydrietlaag bevindt zich boven de pekkel, en bij het oplossen van anhydriet wordt gips gevormd, welke verder oplossen vertraagt. Als gevolg lost er zeer weinig anhydriet op en is er zeer weinig sulfaat beschikbaar voor de reductie door waterstof.

De reductie van sulfaat door waterstof is exotherm. Dat wil zeggen dat er energie vrij komt bij de reactie, en uiteindelijk alle beschikbare sulfaat zal gereduceerd worden tot waterstofsulfide. De reactie heeft echter een hoge activeringsenergie en is dus kinetisch beperkt. Onder de omstandigheden in zoutcavernes, in afwezigheid van katalysator, zal de reactie erg langzaam verlopen. Op basis van literatuuronderzoek en geochemische modellen wordt verwacht dat de reactie dermate langzaam verloopt dat deze verwaarloosbaar is bij beoogd gebruik (Jansen & Gerritse, 2023; Ziegenbalg & Ziegenbalg, 2023). Derhalve kan de thermochemische reductie tot waterstofsulfide niet worden uitgesloten, maar is naar verwachting verwaarloosbaar.

De reductie van sulfaat door waterstof kan microbieel worden gekatalyseerd (Laban, n.d.). Door katalyse wordt de activeringsenergie verlaagd, en kan de reactie veel sneller verlopen. De bestaande literatuur beschrijft deze reactie vrijwel alleen onder omstandigheden die gunstig zijn voor de bacteriële reductie van sulfaat (lage zoutconcentratie, aanwezigheid van (organische) voedingsstoffen, neutrale pH, en temperaturen tussen 0 °C en 80 °C). Vervolgonderzoek is gaande naar de reactie bij hoge zoutconcentratie en afwezigheid van (organische) voedingsstoffen, maar de verwachting is dat deze omstandigheden zeer ongunstig zijn voor microbiële sulfaatreductie (Jansen & Gerritse, 2023). Het is bekend dat enkele soorten microben overleven in halofiele omgeving, maar de activiteit van de microben neemt af of stopt volledig. Ook de aanwezigheid van organische voedingsstoffen is in de literatuur beschreven als beperkende factor voor de reductie van sulfaat. Zoutcavernes, in contrast tot poreuze media, hebben een beperkt oppervlak aan vaste stoffen. Hierdoor hebben bacteriën beperkt oppervlak om reacties tussen water en mineralen te laten plaatsvinden, wat tevens leidt tot een afname in chemische reacties in de cavernes.

Samengenomen is het milieu in zoutcavernes ongunstig voor de microbisch gekatalyseerde reductie van sulfaat. Derhalve kunnen microbiële reductie tot waterstofsulfide niet worden uitgesloten, maar is naar verwachting verwaarloosbaar.

Mitigerende maatregelen

Omdat er een bovengrens zit aan het gehalte H_2S dat in de waterstof aanwezig mag zijn (3 ppm), monitort EnergyStock het H_2S gehalte en neemt zo nodig maatregelen om het gehalte te verlagen.

Onder andere IBZ-Salzchemie heeft onderzocht hoe ongewenste reacties kunnen worden voorkomen en hoe ongewenste reactieproducten kunnen worden verwijderd (Ziegenbalg & Ziegenbalg, 2023). Het voorkomen van de reactie van sulfaat met waterstof is gebaseerd op het ongeschikt maken van het milieu voor microbiële sulfaatreductie. In de beoogde situatie is het milieu reeds ongeschikt, en het verder ongeschikt maken is niet praktisch in de beoogde situatie.

Er bestaan ook methoden om ongewenst waterstofsulfide te verwijderen, bijvoorbeeld door het te scheiden met behulp van zogenaamde scavengers (Laban, n.d.). Inzet hiervan is nog niet besloten, en zal afhankelijk zijn van de aanwezigheid van waterstofsulfide, welke wordt gemonitord in de beoogde situatie.

5 Risico's

Dit hoofdstuk beschrijft de risico's en bijbehorende mitigatieopties die gepaard gaan met zoutwinning en grootschalige opslag van waterstof in zoutcavernes.

In paragraaf 5.1.2 worden de risico's samenhangend met zoutwinning tot en met harde afsluiting van de cavernes aan de orde gesteld en behandeld. Hierbinnen is ook aandacht geschonken aan de opslag van waterstof.

Meer specifiek zijn de risico's die verband houden met de waterstofopslag in de daaropvolgende paragrafen 5.1 en 5.2 beschreven. Om deze risico's te inventariseren heeft Gasunie een aantal onderzoeken ingezet. Op deze wijze wordt zoveel als mogelijk rekening gehouden met de specifieke omstandigheden van de cavernes bij Zuidwending. Deze onderzoeken zijn waar mogelijk aangevuld met eerder onderzoek (Giesberts et al., 2018), en 'peer-reviewed' academische literatuur, waaronder (Amid et al., 2016; Portarapillo & Di Benedetto, 2021; Reitenbach et al., 2015; Tarkowski, 2019; Zivar et al., 2021).

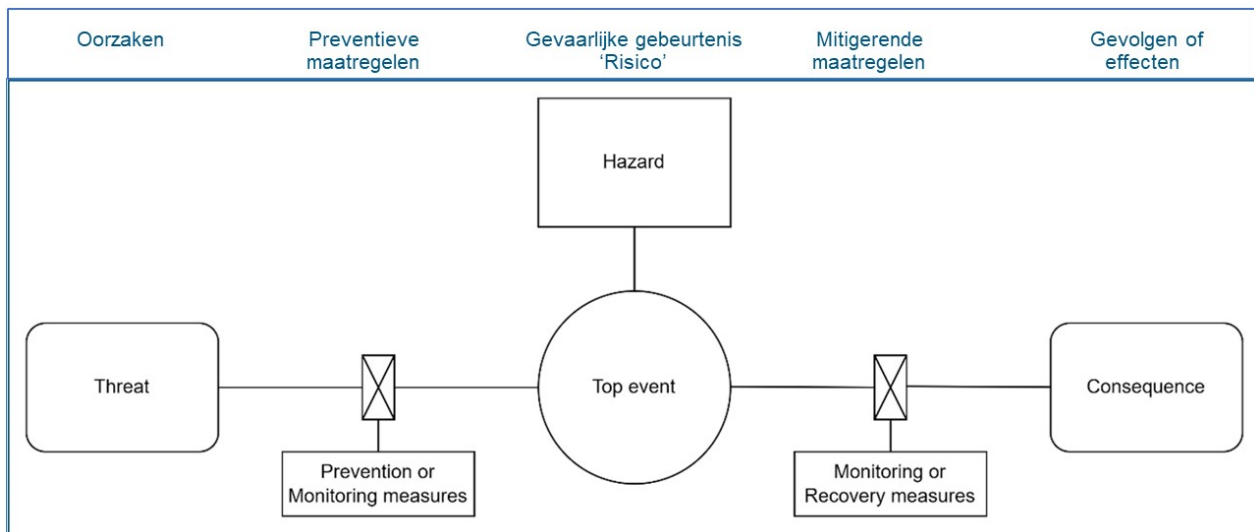
De risicoanalyse in deze paragrafen is gebaseerd op de BowTies zoals opgesteld door TNO (Groenenberg et al., 2021), en aangevuld met andere studies. De verschillende studies beschrijven in grote lijnen dezelfde risico's en mitigatieopties, maar richten zich vaak op specifieke risico's, mitigatieopties, of hanteren een andere methode voor risicoanalyse. In dit hoofdstuk wordt de structuur van de BowTie methode aangehouden.

De BowTie analyse in deze paragrafen is gebaseerd op een geschetst ontwerp voor de opslag van waterstof in zoutcavernes op basis van discussies met projectpartners, waaronder EnergyStock, welke zo goed mogelijk aansluit bij het uiteindelijk ontwerp (Groenenberg et al., 2021). De analyse en onderliggende modellen zijn niet generiek, en kunnen andere resultaten geven wanneer deze worden toegepast op een specifieke locatie, afhankelijk van de lokale context en ontwerp van caveerne en put. Deze context is wel meegenomen in het ontwerp van de caveerne en put, en keuze voor materialen en technieken.

5.1 BowTie risicoanalyse

5.1.1 BowTie methode

Een BowTie analyse beschrijft een mogelijk gevaarlijke situatie (Hazard), en identificeert vervolgens de gebeurtenis of het moment waarbij de controle wordt verloren (Top event). Voorafgaand aan dit top event zijn er risico's (Threats) die tot het top event leiden en bestaan er mogelijke gevolgen (Consequences) nadat het top event heeft plaatsgevonden. Mitigatie van risico's en gevolgen worden beschreven in de vorm van maatregelen. De maatregelen kunnen enerzijds preventief of monitorend van aard zijn om het verlies van controle te voorkomen. Anderzijds kunnen maatregelen monitorend of herstellend zijn om schadelijke gevolgen te beperken of te herstellen wanneer men toch de controle verliest. Deze elementen worden schematisch weergegeven in de vorm van een BowTie diagram (Figuur 5-1).



Figuur 5-1: Notatie BowTie diagram

De grootschalige opslag van waterstof in een zoutcaverne is in deze analyse gedefinieerd als gevaarlijke situatie. De gebeurtenis waarbij controle wordt verloren, het top event, is de lekkage van waterstof. De lekkage kan plaatsvinden in de boven- of ondergrond, met beiden een eigen risicoprofiel. Deze deelstudie is gericht op de ondergrond, en derhalve zullen alleen de ondergrondse lekkage, of gebeurtenissen die waarbij de oorzaken of gevolgen zich afspelen in de ondergrond, in dit hoofdstuk worden beschreven.

5.1.2 BowTie analyse zoutwinning

Risico's

Met betrekking tot de levenscyclus van HyStock is een template Risicosturing voor Zuidwending samengesteld. Deze bestaat uit een structuur met de 6 stappen van risicogestuurd werken. Deze risicostappen komen terug in alle gangbare benaderingen voor risicomanagement. Door deze stappen expliciet en gestructureerd te doorlopen voor de mogelijke risico's gedurende de levenscyclus van de zoutwinning, met mogelijke gevolgen voor omgeving en/of bodem ontstaat:

- Inzicht in de aard en omvang van de risico's en onderliggende onzekerheden.
- Inzicht in de noodzaak en mogelijkheden voor het al dan niet treffen van (aanvullende) maatregelen om deze risico's adequaat te beheersen (op een haalbare en acceptabele wijze voor zowel het bevoegd gezag als andere stakeholders).

De risicoanalyse sluit aan bij de BowTie-systematiek en doorloopt de volgende 6 stappen:

- Risicostap 1: Doelen bepalen
- Risicostap 2: Risico's identificeren
- Risicostap 3: Risico's classificeren
- Risicostap 4: Omgaan met risico's
- Risicostap 5: Risicomaatregelen evalueren
- Risicostap 6: Risicorapportage.

Bij het inventariseren zijn de volgende activiteiten en/of objecten zijn in ogenschouw genomen: waterwinning, warmte- en koude opslag, geothermie, zoutwinning door derden, gaswinning, gasopslag, oppervlaktewater, natuur en cultuurhistorisch erfgoed. In Tabel 5-1 zijn de onderzochte risico's

weergegeven. Hierbij geldt dat individuele risico's gevolgen kunnen hebben voor meerdere belanghebbenden.

Tabel 5-1: Overzicht van de onderzochte risico's in de risicoanalyse.

Categorie	Risico
Verontreiniging ontstaan op grote diepte bedreigt significant het milieu en de natuurlijke hulpbronnen:	1. Lekkage uit een caveerne, gedurende de productiefase.
	2. Lekkage in een boorput (HVO-blanket)
	3. Lekkage in een boorput (N ₂ -blanket)
	4. Lekkage als gevolg van casing overstretching (HVO-blanket)
	5. Lekkage als gevolg van casing overstretching (N ₂ -blanket)
Ondiepe verontreiniging bedreigt significant het milieu en de mens:	6. Lekkage in het leidingnetwerk
	7. Lekkage in het pompstation
Bedreiging potentieel kwetsbare receptor:	8. Op korte afstand van de locatie (ondergrondse gasopslag Energystock) door laterale lekstroom
	9. Op korte afstand van de locatie (industriële waterwinning) door lekkage in caveerne (gedurende de productiefase)
	10. Binnen redelijke afstand (1-5 km) van de locatie (oppervlaktewater) door lekkage in caveerne systeem (gedurende de productiefase)
Overig:	11. Bodemdaling buiten vergunde contouren
	12. Bedreiging van de eigen bedrijfsactiviteiten door bodemdaling buiten vergunde contouren, met name pompstation en leidingnetwerk
	13. De gebruikte materialen zijn niet afdoende voor het verkrijgen van een vergunning voor H ₂ -opslag
	14. De caveerne is niet geschikt bevonden voor het verkrijgen van een vergunning voor H ₂ -opslag
	15. Geen strikte eisen vergunning H ₂ -opslag
	16. Ontstaan van negatieve publieke opinie, bijvoorbeeld als gevolg van berichtgeving in de regionale of de landelijke media of aandacht op politieke agenda
	17. Onduidelijkheid over schadeafhandeling als gevolg van "stacked mining"
	18. Bedreiging van de bereikbaarheid en veiligheid van de omgeving als gevolg van het (periodiek) intensieve transport ten behoeve van de zoutwinning
	19. Veroorzaken van (– periodieke –) overlast (geluid, licht) voor de leefomgeving
<i>N.B. Voor het ministerie van KGG is nog een aanvullend risico meegenomen: politieke verantwoordelijkheid voor het optreden van mogelijke gezondheidsschade als gevolg van geaccumuleerde risico's.</i>	

De risico's uit Tabel 5-1 zijn gegroepeerd per thema. Omdat ze voor verschillende belanghebbenden zijn bepaald, kunnen risico's met hetzelfde thema, verschillende kans/effectscores hebben in de risicomatrices.

Vervolgens zijn risico's benoemd en gescoord (kans x effect), rekening houdend met de (doelen en belangen van de) betrokken stakeholder. Dit levert een risicotabel op waarin voor een aantal gebeurtenissen de kans en het gevolg als groot is geclassificeerd. Na toepassing van preventieve en correctieve maatregelen, ontstaat een risicomatrix voor de zoutwinning bij Zuidwending voor het H₂-max veldontwerp.

Elk geïdentificeerd risico voor een stakeholder is vervolgens aan de hand van de risicostappen beoordeeld. Er blijkt dat door het toepassen van preventieve en correctieve maatregelen een groot deel van de risico's volledig teniet zijn gedaan, acceptabel zijn of maximaal gereduceerd. In de effectenanalyse gebiedsontwikkeling Zuidwending (Nobian, 2024a) is aangegeven hoe de risico's per belanghebbende zijn beoordeeld en zijn teruggebracht.

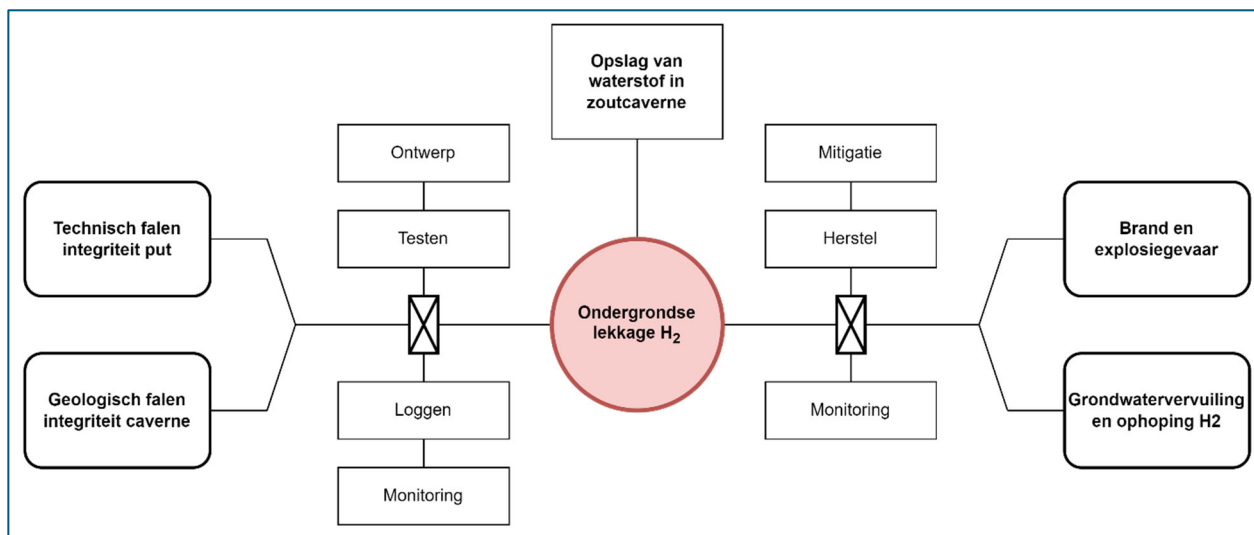
Maatregelen bij zoutwinning Nobian

Tijdens de fase van zoutwinning zijn de externe risico's beperkt door de hoge drukleidingen ondergronds aan te leggen en de putten af te schermen met locatiebeveiliging.

De integriteit van de pijpleidingen wordt gecontroleerd en onderhouden overeenkomstig het Pipeline Integrity Management System (PIMS) van Nobian. De ontwikkeling van de cavernes gedurende de uitloofphase wordt gecontroleerd uitgevoerd volgens het Cavern Stability and Integrity Management System (CSIMS). Hiermee worden de cavernes gedurende de uitloofphase stabiel en integer gehouden. Door deze zorgsystemen worden de risico's voor omwonenden, gebouwen en infrastructuur zo veel mogelijk geminimaliseerd.

5.1.3 BowTie analyse grootschalige waterstofopslag in een zoutcaverne

Mogelijke risico's die kunnen leiden tot lekkage zijn met name het falen van de technische integriteit van de put, en het falen van geologische integriteit van de caverne. Deze risico's zijn te beperken doormiddel van de juiste technisch ontwerp (incl. materiaalkeuze en operationele omstandigheden), testen, loggen en monitoring. Mogelijke gevolgen van ondergrondse lekkage zijn explosiegevaar en grondwatervervuiling. Maatregelen om deze gevolgen te beperken zijn gebaseerd op mitigatie, monitoring, en herstel (Figuur 5-2).



Figuur 5-2: BowTie analyse ondergrondse lekkage waterstof (gebaseerd op (Groenenberg et al., 2021))

Per risico of gevolg zijn maatregelen te treffen. Veel van deze maatregelen zijn breder effectief dan slechts één enkele risico of gevolg. In onderstaande paragrafen worden de belangrijkste maatregelen besproken.

Risico's die kunnen leiden tot ondergrondse lekkage van waterstof

De risico's kunnen worden onderverdeeld in put-gerelateerd en caverne-gerelateerd. Put-gerelateerde risico's volgen deels uit de stress door interactie van de put met de gassen en vloeistof die daar doorheen worden getransporteerd. Contact met waterstof kan leiden tot verbrozing van de materialen van de put.

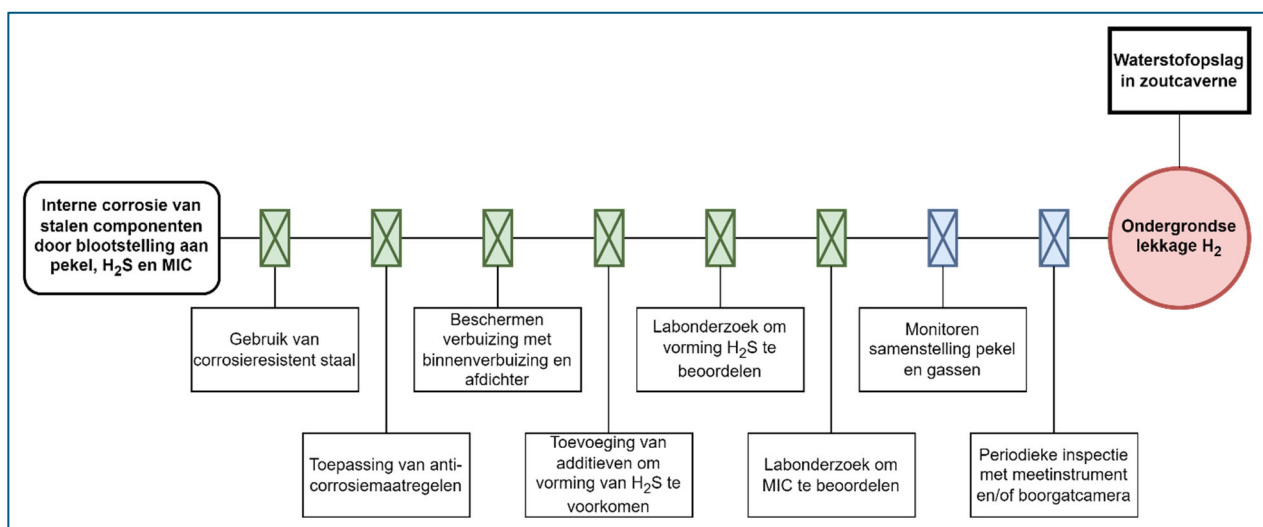
Staal kan corroderen door contact met pekkel, waterstofsulfide en microbiologische reacties in de put, maar ook door externe oorzaken. Materialen waaruit de put is opgebouwd zijn ook onderhevig aan degradatie door andere oorzaken zoals fysieke en thermische stress, bijvoorbeeld als gevolg van het cyclisch vullen en onttrekken van waterstof waardoor druk en temperatuur veranderen. Dit heeft invloed op het cement en de behuizing, packer en LCCS - diepte punt van de mantelbuis in het boorgat. Ten slotte moeten de verbindingen tussen de verschillende onderdelen van de put waterstof dicht zijn, en blijven. De risico's voor de integriteit van de put volgen voor een deel uit de fysische en chemische aspecten van de opslag van waterstof, deze zijn in paragraaf 4.2 uitgebreid besproken.

Overige maatregelen zijn gestoeld op het technisch ontwerp die deze stress kan weerstaan, materiaalkeuze die resistent is tegen invloeden van waterstof en corrosieve stoffen, en testen, monitoring en controle. Deze zijn besproken in paragraaf 5.2.

Caverne-gerelateerde risico volgt uit de geologie en interactie met de opslag. De kans bestaat dat er foutgevoelige lagen, of lagen met verhoogde porositeit de caverne doorkruisen. Delen van het dak kunnen instorten. De waterstof zou in de wand van de caverne kunnen doordringen. Boringen in het gebied van de opslag kunnen tot integriteitsverlies leiden. Falende apparatuur of overdruk kan leiden tot schade aan de caverne. En zeer lage temperaturen (door het onttrekken van waterstof) kan leiden tot het falen van apparatuur.

De risico's voor de integriteit van de caverne volgen deels uit de fysische en chemische aspecten van de opslag van waterstof; deze zijn hoofdstuk 4 uitgebreid besproken. Om risico's te minimaliseren is de geologie in kaart gebracht, en op basis hiervan is het technisch ontwerp opgesteld, zoals beschreven in hoofdstuk 3. Materiaalkeuze is overwogen om overdruk en materiaal falen te voorkomen. Er worden testen uitgevoerd om de integriteit te bevestigen, en worden temperatuur en druk strikt gemonitord en gecontroleerd. Dit is in meer detail besproken in paragraaf 5.2.

Een voorbeeld van een van deze risico's is de interne corrosie van stalen componenten door blootstelling aan pekkel, waterstofsulfide en microbiologische corrosie (Figuur 5-3).



Figuur 5-3: BowTie diagram dat risico op interne corrosie en bijbehorende maatregelen beschrijft.

Bij dit risico zijn acht maatregelen geïdentificeerd om te voorkomen dat dit risico tot lekkage van waterstof leidt. Hiervan zijn er zes preventief, en twee gebaseerd op het monitoren van operatie. De preventieve maatregelen kunnen onderdeel zijn van het ontwerp (inclusief materiaalselectie en operationeel

management), zoals (1) de toepassing van corrosieresistent staal en (2) anti-corrosiemaatregelen, (3) het beschermen van de verbuizing met binnenverbuizing en afdichter en (4) de toevoeging van additieven om de vorming van waterstofsulfide te voorkomen. Andere preventieve maatregelen staan in het kader van verder onderzoek of testen zoals laboratoriumonderzoek om het risico op de vorming van waterstofsulfide of microbiologische corrosie beter te beoordelen. Er zijn ook monitoringsgerichte maatregelen zoals (7) het monitoren van de samenstelling van pekels en gassen en (8) het periodiek inspecteren met een meetinstrument en/of boorgatcamera.

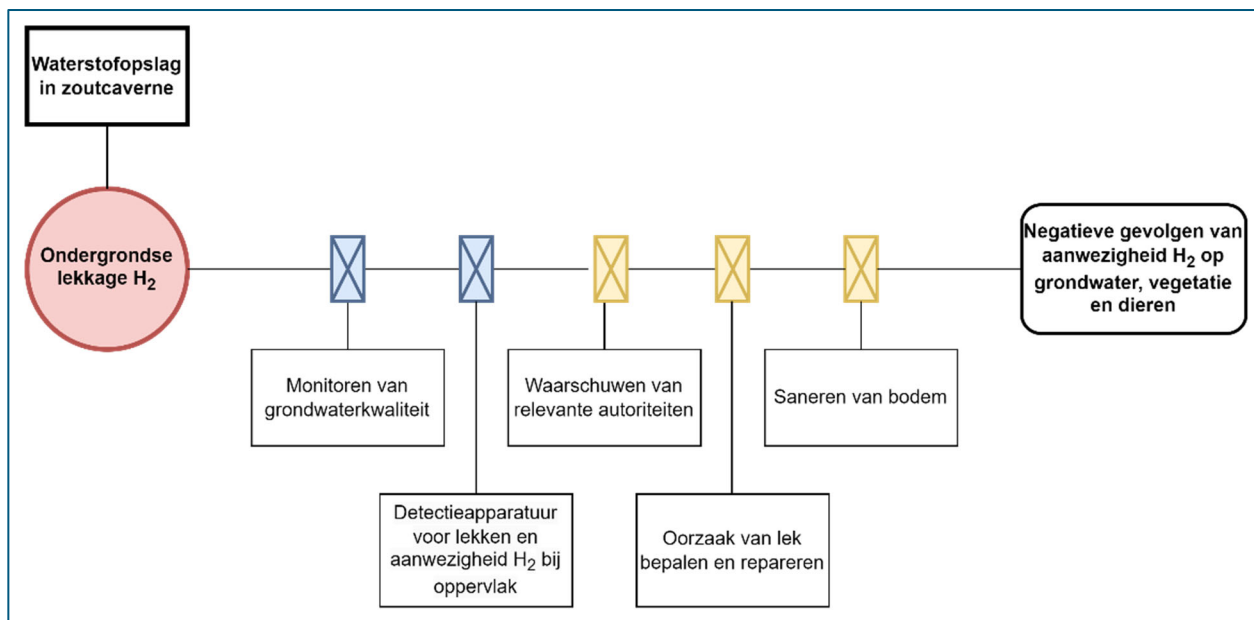
Gevolgen van ondergrondse lekkage van waterstof

In de BowTie analyse zijn slechts 2 mogelijke gevolgen van ondergrondse lekkage van waterstof geïdentificeerd:

- Aanwezigheid waterstof in (ondiepe) grondwater,
- Ophoping van waterstof in de (ondiepe) ondergrond met explosiegevaar.

De kans op deze gevolgen en de impact ervan worden als minder waarschijnlijk en minder gevaarlijk beschouwd ten opzichte van de gevolgen van lekkage bij de bovengrond. De verklaring daarvoor is dat de gelekte waterstof eerst door de deklaag naar de ondiepe ondergrond moet migreren en sterk verdund raakt om tot deze gevolgen te leiden. Door bij HyStock sterk de nadruk te leggen op een integer systeem, met meerdere onafhankelijke barrières, worden deze gevolgen voorkomen.

Een voorbeeld van een mogelijk gevolg nadat er ondergrondse lekkage van waterstof heeft plaatsgevonden zijn negatieve gevolgen van de aanwezigheid van waterstofgas op het grondwater, vegetatie en dieren (Figuur 5-4).



Figuur 5-4: BowTie diagram met mogelijk negatieve gevolgen waterstoflekkage en mitigerende maatregelen.

Om te voorkomen dat lekkage van waterstof kan hiertoe kan leiden zijn er vijf maatregelen geïdentificeerd. Twee hiervan zijn gericht op monitoring, namelijk (1) het monitoren van de druk en temperatuur en (2) het gebruik van detectieapparatuur voor lekkage en aanwezigheid van waterstofgas bij het oppervlak. Drie maatregelen zijn gericht op herstel en mitigatie, namelijk (3) het waarschuwen van relevante autoriteiten bij een lek, (4) de oorzaak van het lek vinden en repareren en (5) het saneren van de bodem.

Er wordt opgemerkt dat maatregelen gevolgen van ondergrondse lekkage van waterstof bij het opstellen in een theoretisch kader zijn besproken waarbij alle denkbare opties zijn genoemd. In de praktijk zullen sommige hiervan niet toepasbaar zijn vanwege de minieme impact van gevolgen of haalbaarheid van de maatregelen. Dit is bijvoorbeeld van toepassing op herstelmaatregel 18c 'saneren van bodem' bij waterstoflekkage.

Er zijn in totaal zestien risico's geïdentificeerd die kunnen leiden tot ondergrondse lekkage van waterstof, waarvan negen put-gerelateerd en zeven caverne-gerelateerd. Er zijn slechts twee mogelijke gevolgen van ondergrondse lekkage van waterstof geïdentificeerd. De risico's en mogelijke gevolgen zijn opgesomd in Tabel 5-2. Een gedetailleerde beschrijving van ieder van de risico's is te vinden in (Groenenberg et al., 2021), waarbij de nummering van de risico's en gevolgen in beide documenten overeenkomen.

Tabel 5-2: Risico's op en gevolgen van ondergrondse lekkage waterstof.

#	Put-gerelateerde risico's
1	Verbrozing putmaterialen door H ₂
2	Interne corrosie van staal door blootstelling door pekkel, H ₂ S en MIC
3	Verbindingen niet H ₂ -dicht
4	Mechanisch falen van de verbuizing
5	Slechte binding en/of kwaliteit cement
6	Cement degradatie
7	Integriteits falen van de LCCS
8	Integriteits falen van afdichter
9	Degradatie van materialen door kalkafzetting
#	Caverne-gerelateerde risico's
10	Externe corrosie van verbuizing
11	Fouten of lekken in gesteentelaag die kruist met caverne
12	Instorting dak van caverne
13	Doordringen van H ₂ in cavernewand
14	Verlies van integriteit vanwege booractiviteiten
15	Overdruk door storing in apparatuur
16	Falen of storing in apparatuur of componente door zeer lage temperaturen
#	Mogelijke gevolgen van ondergrondse lekkage van waterstof
17	Explosie van H ₂ door ophoping in ondiepe ondergrond
18	Negatieve milieueffecten door aanwezigheid van H ₂ in grondwater

De bijbehorende maatregelen zijn opgesomd in Tabel 5-3 voor put-gerelateerde risico's, in Tabel 5-4 voor caverne-gerelateerde risico's, en in Tabel 5-5 voor mogelijke gevolgen. De nummering hiervan is overeenkomstig met de nummering in Tabel 5-2, waaraan een lettercode is toegevoegd. Sommige maatregelen zijn effectief als barrière bij meerdere risico's of gevolgen. Indien dit het geval is, wordt de lettercode overgeslagen, en wordt gerefereerd naar de eerste keer dat de maatregel beschreven is. Bijvoorbeeld lettercode 3d is overgeslagen, hierbij wordt gerefereerd naar maatregel 1d. Een gedetailleerde beschrijving van alle maatregelen is te vinden in (Groenenberg et al., 2021) onder de overeenkomstige lettercode.

Tabel 5-3: Put-gerelateerde maatregelen om ondergrondse lekkage van waterstof te voorkomen

#	Maatregel	Categorie	Subcat.
1a	Gebruik van austenitisch staal met gepaste hardheid	Preventie	Ontwerp
1b	Voorkomen van beschadiging aan oxide coating	Preventie	Ontwerp
1c	Druk en temperatuur binnen veilige limieten houden om mechanische stress te voorkomen	Preventie	Ontwerp
1d	Druk en temperatuur monitoren	Monitoring	Monitoring
2a	Toepassing van corrosieresistent staal	Preventie	Ontwerp
2b	Toepassing van anti-corrosiemaatregelen	Preventie	Ontwerp
2c	Bescherming van buitenste verbuizing met binnenverbuizing en afdichter	Preventie	Ontwerp
2d	Periodieke inspectie met inspectie instrument en/of boorgatcamera	Monitoring	Loggen
2e	Monitoring van samenstelling van pekelen en gassen	Monitoring	Monitoring
2f	Laboratoriumonderzoek om het risico op H ₂ S vorming te beoordelen	Preventie	Testen
2g	Laboratoriumonderzoek om het risico op MIC te beoordelen	Preventie	Testen
2h	Toevoeging van additieven om H ₂ S vorming te voorkomen	Preventie	Ontwerp
3a	Gebruik van gelaste verbindingen	Preventie	Ontwerp
3b	Testen van lassen voor plaatsen in verbuizing	Preventie	Testen
3c	Minimaliseren van verticale stress op verbuizing	Preventie	Ontwerp
3e	Uitvoeren van mechanische integriteitstest	Preventie	Testen
4a	Toepassing van bestaande ontwerpstandaarden	Preventie	Ontwerp
5a	Gebruik van flexibel cement	Preventie	Ontwerp
5b	Testen van cement	Preventie	Testen
5c	Stimuleren van natuurlijke afsluitende eigenschappen haliet	Preventie	Ontwerp
5e	Loggen van de cementverbinding	Monitoring	Loggen
6f	Monitoren van chemische condities boorgat	Monitoring	Monitoring
7f	Uitloggen van 'nek' in de caverne	Preventie	Ontwerp
8s	Gebruik van waterstof-resistente materialen in afdichter	Preventie	Ontwerp

#	Maatregel	Categorie	Subcat.
8b	Gewicht onder afdichter vergroten	Preventie	Ontwerp
8c	Voorkomen van glijden van afdichter	Preventie	Ontwerp
9a	Maatregelen om schaalvorming te voorkomen	Preventie	Ontwerp
9b	Periodiek verwijderen van schaal	Preventie	Ontwerp
9c	Monitoren van prestaties injectie en onttrekking	Monitoring	Monitoring

Tabel 5-4: Caverne-gerelateerde maatregelen om ondergrondse lekkage van waterstof te voorkomen

#	Maatregel	Categorie	Subcat.
10a	Vooraf locatie karakteriseren	Preventie	Ontwerp
10c	Implementatie van meervoudige barrières tegen lekkage	Preventie	Ontwerp
10e	Gebruik detectieapparatuur voor lekken en aanwezigheid van H ₂	Monitoring	Monitoring
11a	Geologie in kaart brengen	Preventie	Ontwerp
11b	Vermijden of minimaliseren van aanwezigheid fouten en andersoortige, kruisend gesteentelagen	Preventie	Ontwerp
11c	Natuurlijke afsluiting door haliet	Preventie	Ontwerp
11d	Dieper boren	Preventie	Ontwerp
11e	Open boorgat sectie testen door op druk brengen	Preventie	Testen
12b	Criteria voor geomechanische caverne stabiliteit aanhouden	Preventie	Ontwerp
12d	Monitoren op micro-seismische activiteit	Monitoring	Monitoring
12e	Periodieke meting met sonar	Monitoring	Monitoring
13a	Beoordelen van permeatie tijdens karakteriseringsfase	Preventie	Ontwerp
14a	Zorgvuldige locatiekeuze	Preventie	Ontwerp
14b	Boren van één boorgat per boorplatform	Preventie	Ontwerp
14c	Monitoren van richtingbepalende metingen tijdens boren	Monitoring	Monitoring
15a	Veiligheidsmarges bij maximale operationele druk	Preventie	Ontwerp
15b	Installatie van betrouwbare veiligheidskleppen	Preventie	Ontwerp
15c	Monitoren van positie van kleppen	Monitoring	Monitoring
15d	Monitoren van druk, temperatuur en stroomsnelheden	Monitoring	Monitoring
15e	Periodiek het functioneren van veiligheidskleppen testen	Monitoring	Monitoring
16a	Kwantificeren van adiabatiscie expansie effecten en veiligheidsmarges definiëren	Preventie	Ontwerp
16b	Beheren en afstellen van druk, injectietemperatuur en stroomsnelheden om adiabatiscie expansie te beperken	Preventie	Ontwerp

16c	Absorberen en controleren van expansie effecten door veiligheidskleppen te gebruiken	Preventie	Ontwerp
-----	--	-----------	---------

Tabel 5-5: Maatregelen om gevolgen van ondergrondse lekkage van waterstof te voorkomen of mitigeren

#	Maatregel	Categorie	Subcat.
17a	Voorkomen van ophoping van H ₂ bij het oppervlak	Herstel	Mitigatie
17b	Monitoring van druk en temperatuur	Monitoring	Monitoring
17c	Gebruik van detectieapparatuur voor lekkage en aanwezigheid waterstof bij het oppervlak	Monitoring	Monitoring
18a	Waarschuwen van (drinkwater) autoriteiten	Herstel	Mitigatie
18b	Lek vinden en repareren	Herstel	Herstel
18c	Saneren van bodem	Herstel	Herstel
18d	Monitoring van grondwaterkwaliteit	Monitoring	Monitoring

5.1.4 Conclusies BowTie analyse waterstofopslag

Met de BowTie analyse zijn risico's in kaart gebracht die de integriteit van de waterstofopslag in gevaar kunnen brengen, evenals mogelijke gevolgen bij lekkage van waterstof. Op basis van het aantal risico's per onderdeel van het waterstofopslagsysteem is geconcludeerd dat de put het meest kritieke onderdeel van het opslagsysteem is (Groenenberg et al., 2021).

Er zijn 23 risico's geïdentificeerd, waarvan er 16 kunnen leiden tot ondergrondse lekkage van waterstof, en 7 met het vrijkomen van waterstof aan het oppervlak als mogelijk gevolg.

Een pilotfase kan helpen om voor een deel van de risico's het risiconiveau te beoordelen. Zoals het oplossen van waterstof in pekkel dat naar het oppervlak stroomt tijdens het debrinen, het voorkomen van zeer lage temperaturen bij het onttrekken van waterstof of de aanwezigheid van biologische en chemische reacties die leiden tot het vormen van waterstofsulfide. Een mogelijke pilot is in aanvulling op eerder studies (zoals beschreven in hoofdstuk 4), en kan aanvullende zekerheid bieden over deze risico's. Ditzelfde geldt voor enkele mitigatieopties zoals een MIT test, de methode van uitloggen, en alle mitigatieopties gerelateerd aan de keuze van materialen en technieken, welke ook zijn beschreven in paragraaf 5.2. Een pilot op kleine schaal kan ervaring bieden onder gecontroleerde omstandigheden met significant lagere risico's in vergelijking met de volledige schaal van het HyStock project. Dit is vanwege het veel lagere volume waterstof dat wordt gebruikt, en doordat de test in isolatie kan worden uitgevoerd bij een puthoofd op significante afstand van verdere infrastructuur en bovengrondse installaties. Daarom heeft EnergyStock in 2021-2022 een demonstratieproject uitgevoerd. Dit vond plaats bij boorgat A8 en had betrekking op materialen en technieken onder operationele omstandigheden. In dit geval is A8 als een heel kleine waterstofcaverne beschouwd. Hierop is verder ingegaan in paragraaf 5.2.

Gevolgen van lekkage van waterstof in de ondergrond zijn volgens de BowTie Analyse beperkt tot vervuiling van (ondiep) grondwater en ophoping van waterstof in de ondergrond met explosiegevaar. De kansen hierop, en impact ervan, worden beschouwd als kleiner dan mogelijke bovengrondse gevolgen. Maatregelen om de gevolgen van lekkage te beperken omvatten onder meer het minimaliseren van de aanwezigheid van mensen en dieren in de omgeving van het terrein, het uitvoeren van plannen voor het reageren op noodsituaties en het voorkomen dat lekkage daadwerkelijk brand en/of explosie veroorzaakt. Door onafhankelijk barrières op te stellen wordt het risico op lekkage van waterstof verder verkleint.

Verder wordt er aanbevolen om de effecten van langdurige blootstelling van materialen en wanden aan waterstof, interacties van waterstof met de omgeving, de invloed van kort-cyclische drukverandering op de integriteit van de zoutlaag te onderzoeken. Deze zijn verder besproken in hoofdstukken 3, 4 en 5.

Ook is geconcludeerd dat een volledige kwantitatieve risicoanalyse uitgevoerd dient te worden. (Groenenberg et al., 2021). Hierbij moet gebruik gemaakt worden van modellen die specifiek geschikt zijn bevonden voor toepassingen met waterstof en waarbij de resultaten uit de BowTie-analyse gebruik kunnen worden bij het definiëren van de faalscenario's. Voor HyStock is een QRA uitgevoerd (deel 1 MER paragraaf 7.10).

5.2 Materialen en technieken

Energystock kiest ervoor de in de ondergrondse aardgasopslag (UGS) gebruikte en bewezen technieken, standaarden en technologieën (waar mogelijk) toe te passen voor de ondergrondse opslag van waterstof (UHS). Bij de ondergrondse opslag van waterstof worden materialen toegepast die geschikt zijn voor waterstof. Er wordt hierbij rekening gehouden met de invloed die waterstof of andere aanwezige stoffen op de materialen en constructie kan hebben. In een door EnergyStock en TNO uitgevoerde pilotproject (TNO & EnergyStock, 2022) is de juistheid van deze keuze onderzocht. Door het pilotproject is relevante praktijkervaring opgedaan met het veilig opereren van een waterstofopslag-systeem.

In het uitgevoerde demonstratieproject (DEEP.KBB, 2023) is de integriteit van de aangebrachte ondergrondse laatst gecementeerde casing (LCCS) aangetoond door middel van lekdichtheids testen. Deze testen zijn uitgevoerd op de beoogde maximaaldruk van de cavernes, rekeninghoudend met een drukgradient van 0,18 bar/m. Na het inbouwen van de waterstof completion (wellhead/X-mass tree packer, subsurface safety valve en tubing) zijn hier eveneens testen mee uitgevoerd op de beoogde maximaaldruk. Bij al deze testen is er geen drukverhoging in de annulus tussen de productiebuisk en de laatste gecementeerde verbuizing waargenomen. Ook zijn er geen afwijkende waarnemingen bij de putkelder en wellhead/X-mass tree geconstateerd.

Bij de aanleg van de putten van de bestaande opslagcavernes op Zuidwending zijn na het cementatie proces en het uitharden van het cement logs uitgevoerd om de binding tussen verbuizing/cement/formatie, micro annuli en de dichtheid van het cement aan te tonen. Na het pilotproject is dit bovenstaande nogmaals uitgevoerd ter vergelijking, waarbij geen afwijkingen zijn waargenomen.

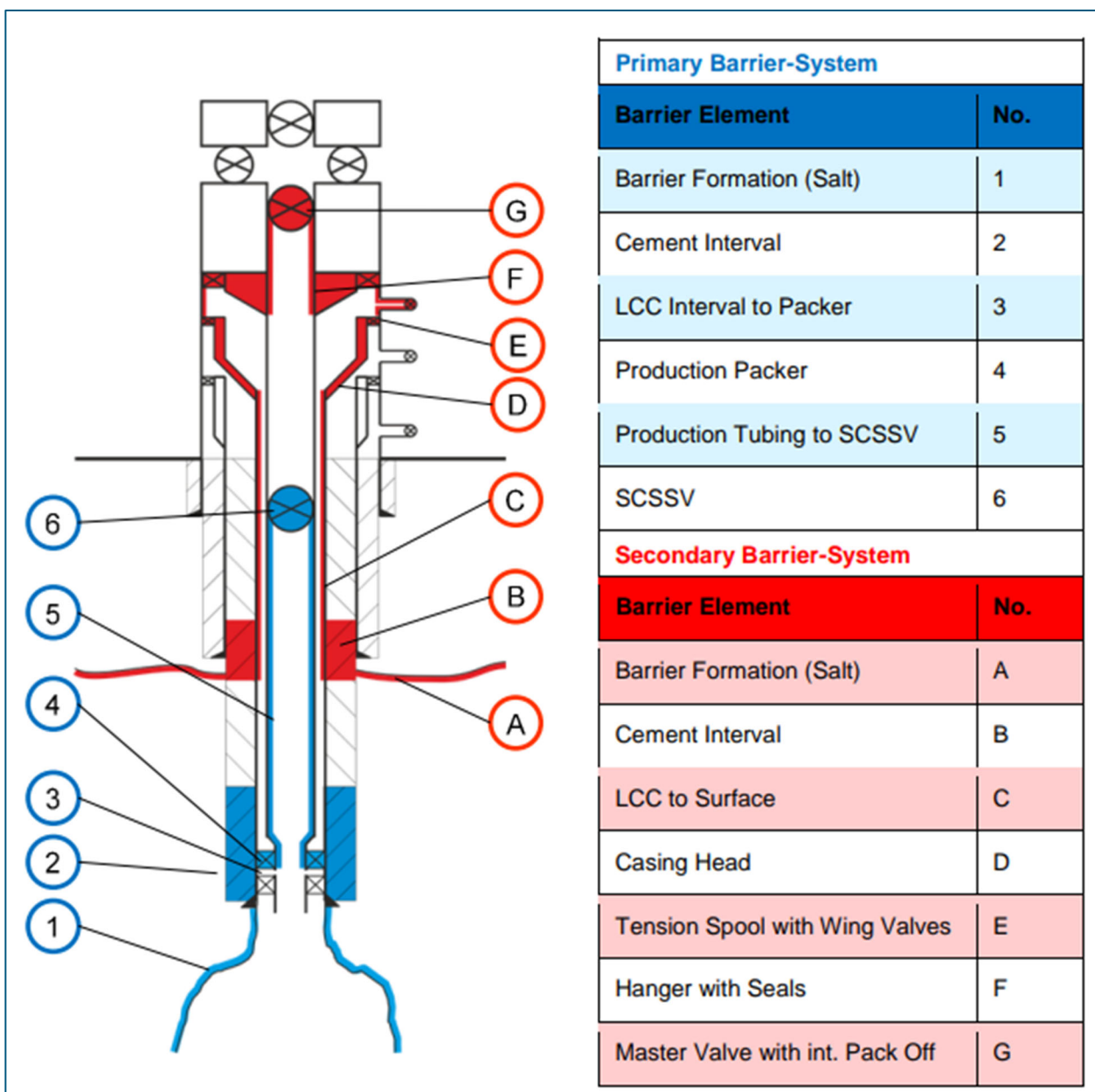
De gebruikte materialen zijn verzameld om testen te ondergaan naar het effect van waterstof. Ten aanzien van het veilig opereren (snubbing) van een onder hoge druk staande waterstofput is een aangepast blow out preventer concept (BOP) bedacht en met succes geïmplementeerd. Door het hanteren van drukcycli is de operationele fase van de waterstofopslag op realistische wijze gesimuleerd. De cycli resulteren in temperatuur- en drukveranderingen. Er zijn een reeks lektesten op gemonteerde ondergrondse veiligheidskleppen uitgevoerd. Omdat waterstof een aanzienlijk lagere dichtheid kent dan aardgas, is een aangepast criterium vastgesteld. De uitgevoerde TM-SCSSV-testen⁴ tonen zeer lage lekkagepercentages, zelfs bij grote drukverschillen.

Naast de in-situ testen van de ondergrondse apparatuur, is in de demonstratiefase van de waterstofopslag de putkop getest. De uitgevoerde testen laten zien dat de gebruikte putkopcomponenten geschikt zijn voor waterstofopslag. Verder is in de demonstratiefase de drukontwikkeling bij de druk-afdichtingen van de productiehanger onderzocht. De waargenomen drukopbouw vergt nader onderzoek.

⁴ Testen op 'Tubing mounted surface controlled subsurface safety valve' (op buizen gemonteerde oppervlaktegestuurde ondergrondse veiligheidsklep).

Tijdens de proef is een bio-sampling apparaat in de put geïnstalleerd om duidelijkheid te krijgen over de vorming van bijvoorbeeld waterstofsulfide (H₂S) door microben of bacteriën die waterstof omzetten. Er zijn geen aanwijzingen voor de aanwezigheid van H₂S. Gerelateerde analyses lopen nog. Met het demonstratieproject is aangetoond dat voldaan kan worden aan de Nederlandse veiligheidsnormen en voorschriften voor aardgasopslag in zoutcavernes en dat de toegepaste barrières en gerelateerde eisen geschikt zijn voor ondergrondse waterstofopslag.

Het pilotproject heeft betrekking gehad op boring A8a op Zuidwending (DEEP.KBB, 2023; Gasunie, 2021). Daarbij is uitgegaan van een putontwerp op basis van de door ISO 16530-01 opgestelde en geadviseerde richtlijnen. De richtlijnen baseren zich op een ontwerp waarin altijd twee fysieke barrières (primair en secundair) aanwezig zijn om ongecontroleerde uitstroom van het medium (waterstof) te voorkomen in de ondergrond of aan het oppervlak. De fysieke barrières zijn weergegeven in Figuur 5-5.



Figuur 5-5: Primaire and secondaire barrière.

5.2.1 Integriteitseisen voor SECE's (componenten en barrières)

'Safety and Environmental Critical Elements' (SECE's) slaat op die delen van de installatie, inclusief geautomatiseerde systemen, die tot doel hebben het voorkomen of beperken van de gevolgen van een incident of het falen van een barrière met als mogelijk gevolg een incident. Behalve SECE's zijn er parameters die een indicatie kunnen zijn van degradatie (of uiteindelijk falen) van een SECE (barrière), of kunnen leiden tot falen van een barrière. Zoals bijvoorbeeld een (te) geringe sump diepte, annulaire druk verandering of drukopbouw in het puthoofd.

De integriteitseisen zijn voor iedere caverne en put opgesteld (Tabel 5-6). Deze integriteitseisen worden gebruikt als referentie bij de beoordeling van de resultaten van monitoring, testen en controle van caverne en put.

Tabel 5-6: Integriteitseisen voor SECE.

Cavern & Well component and barrier element Acceptance Criteria			
Safety Environmental Critical Element (SECE)			
NOTE: MAASP, Minimum Allowable Annulus Pressure and trigger pressure are separately specified per well			
	Safety Environmental Critical Element (SECE)	Acceptance criteria	controle frequency
cavern	cavern sump ²⁾ (higher than previously)	Results of each survey to be compared to the design by IFG and any previous survey. Any differences to be evaluated. Be aware of measurement accuracy of tools. For the cavern neck bore the minimum diameter to in in line with with the last casing diameter.	3 yr
	cavern contour (SONAR)	The idea behind this is that tools should be able to pass through.	9yr
sub surface	SC-SSV leak test	API RP 14B	annually a leak test
	SC-SSV function test	API RP 14B,	3 mnd function test
	controline leak	no leak	
	annulaire drukken ²⁾	ref document wrt MAASP and alarm setting	continuously
	packer - casing leak	no leak	
	packer - tubing leak (anchor seal)	no leak	
	9% tubing leak	no leak	
13% casing leak (production csg)	no leak		
Surface	external leak (audible and or visual)	Gas < 20% LEL at 0.1 m from leak Liquid < 4 drops per minute	
	tree cap (bonnet)	Ref. Oil & Gas UK Well Life Cycle Integrity	
	stempackings	Guidelines issue 3 March 2016. par 4.5	
	SSV (Surface Safety Valve)	API RP 14H, API 14C (closing time ≤ 45 sec)	
	LMV leak	API RP 14H	
	hydraulic wing valve (ESD)	API RP 14H	
	kill wing valve	API RP 14H	
	swab valve	API RP 14H	
	side outlet A annulus	no leak	10 min test every 6 mnd ¹⁾
	side outlet B annulus	no leak	10 min test every 6 mnd ¹⁾
	18% external corrosion in well cellar	minimum wall thickness ref API Bul. 5C2, 5C3	3 yr
	13% hanger seal	no leak	3 yr
	9% hanger seal	no leak	3 yr
	SC-SSV controline feed through	no leak	3 yr
	voids in tubing hanger housing ²⁾	pressure built-up yes/no depending on design	3 yr
	voids in wellhead ²⁾	pressure built-up yes/no depending on design	3 yr
	instrument lines	no leak	
hydraulic lines	no leak		
ESD actie	execution according Shut Down matrix		

5.2.2 Cavern & Well Integrity Categorization Model

Een definitieve beoordeling van het integriteitsniveau van een put of caverne wordt bepaald met het Cavern & Well Integrity Categorization Model, waarbij het noodzakelijk kan zijn aanvullend onderzoek te initiëren. Voor een gebalanceerde integriteitsbeoordeling worden voorbeelden uit het model beschouwd en de integriteitshistorie meegewogen. Het volledige 'Cavern & Well Integrity Categorization Model' is bijgevoegd als bijlage. Een uitsnede van de beginselen is weergegeven in Figuur 5-5 .

	fundamentals of a category			
	Green	Yellow	Orange	Red
principle	healthy cavern & well, no or minor issues	One well barrier degraded, the other intact. Cavern aspects on a kind of convergence/degradation trend but still stability expected and no leaks to other layers or to surface.	One barrier failure and the other is intact, or a single failure in cavern and or well may lead to a leak to surface.	One barrier failure and the other is degraded/not verified, or leak to surface. Serious doubts about cavern stability.
associated risk	Identical or comparable to the risk associated with an identical new cavern & well with a design in compliance with all regulations and cavern design.	Incremental but acceptable risk which is not negligible compared to the risk associated with an identical cavern & well with design in compliance with all regulations and cavern design.	Associated risk which is higher than the risk associated with an identical new cavern & well with design in compliance with all regulations and cavern design.	Unacceptable and considerably higher than the risk associated with an identical new cavern & well and design in compliance with all regulations.
compliance with regulations (degradation, corrosion, etc.)	The well is in full compliance with the double barrier philosophy and the cavern meets the design limits and stability criteria. But it does not necessarily mean that the well has a history without failures or leaks, or that the WBEs fulfil all acceptance criteria (described in the latest revision of NORSOK D-010).	Although a cavern and or well categorized as Yellow has an increased risk, its condition is within regulations and the cavern meets the stability criteria and there are no leaks to other layers or to surface.	Typically the well will be outside the regulations and potentially the cavern stability is compromised.	Typically the well will be outside regulations and the cavern is very near the design limits of stability and or leaks to other layers or to surface.
risk of dual barrier failure in a well and unacceptable stability of the cavern	It should also be noted that even if the well has a history without any leaks or failures and the WBEs fulfil all acceptance criteria (described in NORSOK D-010). The well should not be categorized as Green if conditions exist which constitute a considerable threat to both barriers and risk of dual failures is present and or the cavern stability is at risk.	It should also be noted that even if the well has a history without any leaks or failures and the WBEs fulfil all acceptance criteria (described in NORSOK D-010). The well may fall within the Yellow category if conditions exist which constitutes a threat to both barriers and risk of dual failures is present and or the cavern stability is at risk.		A well should fall within the Red category if at least one WBE in a barrier envelope has failed and at least one WBE in the other barrier envelope has also failed or is regarded as degraded or not verified (e.g. Exposed to pressure outside verified design limit or evidence of corrosion or any other form of degradation) There are serious doubts about cavern stability.
Typical Actions	Typically a cavern and or well categorized as Green will not require any repairs or mitigating measures (in addition to the ones that may already be performed and implemented)		Repairs and/or mitigations will be required before the cavern & well can be put into normal operation, but the cavern & well will still have an intact barrier/stability and there will usually not be an immediate need for action.	Repairs and/or mitigations will be required before the cavern & well can be put into operation and there will usually be an immediate and urgent need for action.

Figuur 5-6: Cavern & Well Integrity Categorization Model.

5.2.3 Operationele omstandigheden

Geomechanisch gezien kan waterstofopslag op dezelfde wijze opereren als aardgasopslag in cavernes qua druk- en temperatuurregime (zie ook paragraaf 4.2.2). De impact op de spanningsverdeling in omliggend gesteente is niet exact identiek als bij aardgas, maar doorstaat de vergelijking in het geval van toegepaste debieten bij HyStock.

Om de integriteit van de caverne bij kort-cyclische waterstofopslag verder te onderzoeken zijn er simulaties uitgevoerd. Hieruit blijkt dat caverne A5 voldoet voor de opslag van waterstof (Dieter Brückner et al., 2022). Hierbij zijn hoge debieten afgewisseld met stilstandsfasen door de ontwikkeling van de infiltratiezone (percolatie) en plastische vervormingen te bestuderen.

Simulaties bij A5 binnen het drukbereik van 198 en 84 bar laten zien dat langdurige kort-cyclische volumestromen in een continue modus of in een zogenaamde stopmodus geen significante verschillen in de toestand van het gesteente veroorzaken. Dit wordt benadrukt door vergelijking van (rek)vervormingen, effectieve trekspanningen en de spanningssituatie bij maximale gasdruk. Als minimumdruk in de caverne moet 84 bar worden aangehouden en als debiet een maximumwaarde van 5.430.000 Nm³/d.

Een waterstofopslagcyclus wordt gedefinieerd als één omzet van het werkgasvolume. Het werkgasvolume kan worden bepaald uit de gasvoorraad bij maximale druk minus de gasvoorraad bij minimale druk. Naar aanleiding van de resultaten van de simulaties zijn er de volgende aanbevelingen voor het in werking hebben van meerdere waterstofopslagcavernes:

- Injectie-/onttrekkingssnelheden tot 444.000 Nm³/h zijn tijdelijk mogelijk, wanneer het dagelijkse totaalvolume niet groter is dan 5,43 miljoen Nm³,

De te hanteren maximale volumes en debieten zijn bepaald gelet op een maximaal toegestane jaarlijkse convergentie (zowel absoluut in m³, als relatief in %) van de cavernes.

Merk op dat de waarden van deze simulatie indicatief zijn, en daadwerkelijke operationele waarden hier enigszins van kunnen afwijken.

6 Bodemdaling

In dit hoofdstuk worden scenario's voor bodemdaling in het kader van het HyStock project besproken.

Bij zoutcavernes treedt na verloop van tijd volumeverlies op, omdat de druk in de caveerne lager is dan de spanning van de bovenliggende gesteentelagen. Er ontstaat 'zoutkruip' door plastische vervorming van het steenzout. Zoutkruip verkleint het volume van een caveerne, dit heet ook wel convergentie. Deze volumeverliezen worden via de bovenliggende gesteentelagen naar de oppervlakte overgebracht, waar een bodemdalingskom ontstaat.

Deze bodemdaling als gevolg van de zoutwinning en de toekomstige opslag van waterstof verloopt traag en gaat ook lang door. Om deze reden zijn bodemdalingsprognoses uitgevoerd voor verschillende zichtjaren tot het jaar 2250. De effecten zijn bepaald op basis van de door DEEP.KBB berekende bodemdaling. In dit hoofdstuk wordt het mechanisme van bodemdaling, de geschetste scenario's, en bijbehorende berekende bodemdaling besproken.

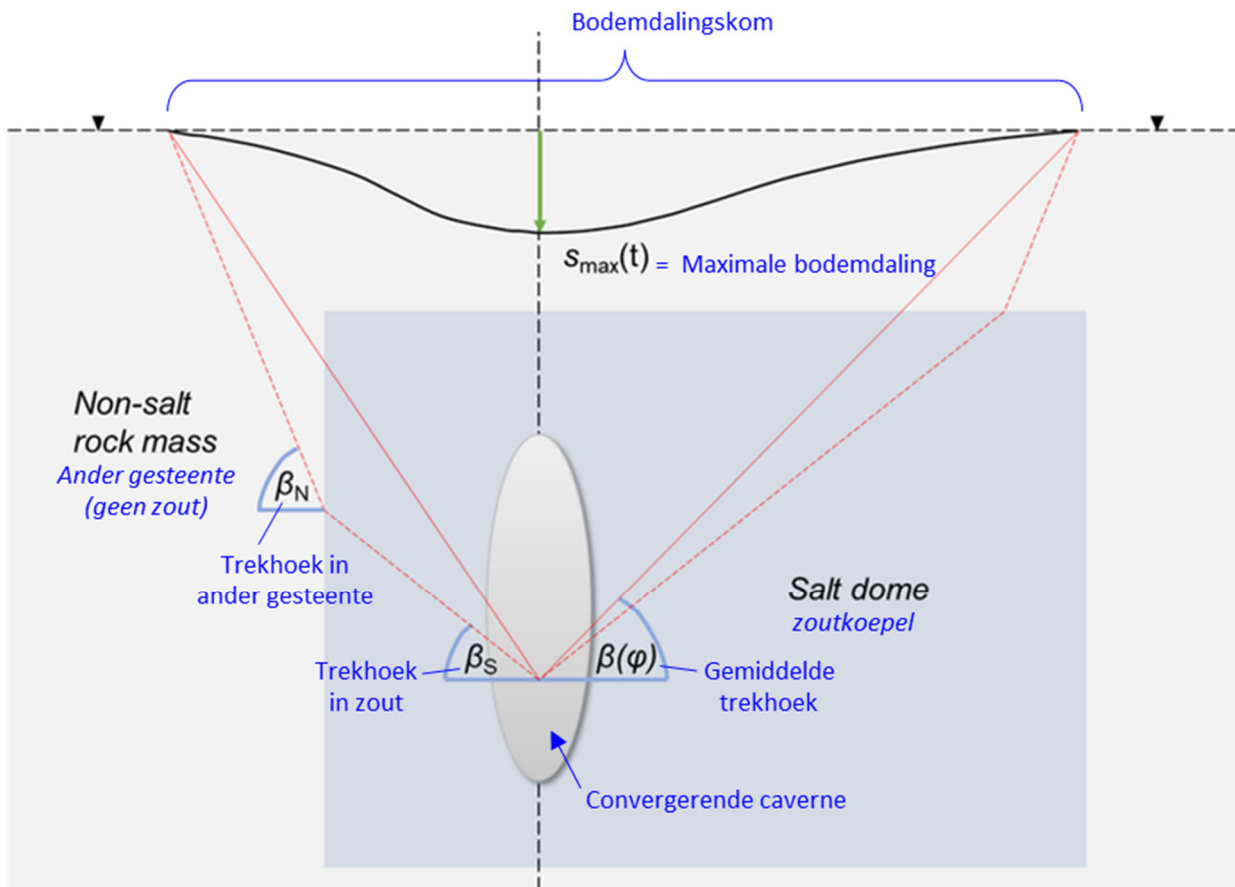
6.1 Mechanisme bodemdaling

De convergentiesnelheid van een caveerne is sterk afhankelijk van de druk in de caveerne. Een lagere cavernedruk betekent sneller volumeverlies. Dit is met name het geval tijdens de zoutproductie-fase (caverneontwikkeling) en de waterstofopslag-fase, waarbij de convergentiesnelheid in de orde van 0,1 – 1 % volumeverlies per jaar is. Deze bandbreedte is het gevolg van verschillen in cavernedruk veroorzaakt door verschillen in cavernetypes en van het gebruik van de caveerne. Zo hebben de huidige pekercavernes van Nobian een groter dieptebereik, waardoor het drukverschil onderin de caveerne groter is, en er dus meer zoutkruip optreedt. Gasopslagcavernes hebben kleiner dieptebereik en hebben een lager volume ten opzichte van pekercavernes. Door de opslag van waterstof kan de spanningstoestand in de caveerne alsnog tot een hogere convergentiesnelheid leiden binnen dit bereik van 0,1 – 1 % volumeverlies per jaar.

Wanneer cavernes zijn afgesloten, bevatten ze - naar verwachting - verzadigde pekels. De cavernedruk neemt na het afsluiten door zoutkruip toe tot een bepaalde evenwichtswaarde. In de bodemdalingsprognose wordt uitgegaan van de situatie dat de cavernes blijven convergeren. De convergentiesnelheid zal in deze fase echter zeer laag zijn, vanwege het evenwicht bij hoge druk. Hiervoor zijn indicatieve waarden gehanteerd in de orde van 0,01 – 0,1 % volumeverlies per jaar; een factor 10 lager.

In het gebied boven de caveerne vormt zich geleidelijk over een periode van vele tientallen jaren een bodemdalingskom (Figuur 6-1). Voor de duidelijkheid is in dit figuur de bodemdaling extreem uitvergroot.

Het verschil tussen het diepste punt van de kom en de rand neemt in de tijd langzaam toe. De kom strekt zich aan het maaiveld uit over enkele kilometers. Het verschil tussen het diepste punt en de rand is zodanig klein dat de optredende helling niet zichtbaar is in het landschap. De invloedssfeer aan de oppervlakte van de convergentie wordt bepaald door de sterkte van het naast- en bovenliggende gesteente. Deze wordt uitgedrukt in een zogenaamde 'trekhoek' (angle of draw). Hierbij worden verschillende trekhoeken veronderstelt voor de zoutkoepel en het naast- en omliggende gesteente. Zoals genoemd is de convergentie is ook afhankelijk van de druk in de caveerne. Bij hogere druk in de caveerne, neemt de convergentie af. De snelheid waarmee het volume van de cavernes afneemt als gevolg van zoutkruip wordt de convergentiesnelheid genoemd.



Figuur 6-1: Relatie tussen convergentie van caverne en grootte bodemdalingskom (Buzogany, 2023).

Om de effecten op lange en zeer lange termijn van zoutwinning en waterstofopslag in het gebied verder te onderzoeken heeft een wetenschappelijk consortium, waaraan ook Nobian en EnergyStock deelnemen, de kruipeigenschappen van het steenzout opnieuw laten bepalen. Dit geschiedt op basis van wetenschappelijk onderzoek van het 'Cavern Closure Consortium' (CCC). Voorts richt de KEM-17 studie (Kennis Effecten Mijnbouw) zich op de lange termijnrisico's rondom het afsluiten van cavernes. Uitkomst van het CCC onderzoek is een aanpassing van de voor bodemdalingsprognoses gebruikte kruipwet van het zout, welke via een formule beschrijft hoe snel het zout vervormt bij een bepaalde temperatuur, korrelgrootte en het spanningsverschil.

In het gesteentemechanische model (Dieter Brückner et al., 2022) zijn variabelen als de temperatuur in de caverne, de dikte, diepte en samenstelling van de zoutlaag, de dichtheden en sterkte-eigenschappen van de bovenliggende gesteente- en bodemlagen en de gesteentelaag direct onder de zoutafzetting opgenomen.

Voor de bepaling van de convergentiesnelheid is rekening gehouden met de afmetingen en diepte van de cavernes en hun onderlinge ligging. Druk en temperatuur worden hierbij meegenomen.

De snelheid waarmee de bodemdaling optreedt is afhankelijk van de materiaaleigenschappen van het steenzout. Steenzout vervormt doorgaans op plastische wijze in de ondergrond, dit is ook de reden dat er zoutpijlers of zoutkussens ontstaan. De snelheid waarmee het zout vervormt hangt af van de temperatuur (en dus de diepte), maar ook het spanningsverschil. Deze hangt af van de caverndruk en de spanning in het steenzout als gevolg van het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen.

Het model voor bodemdalingsprognose is geschikt om het vervormingsmechanisme dat bij relatief hoge verschillen optreedt, te gebruiken. Dit mechanisme heet 'dislocation creep'. Wanneer cavernes echter afgesloten zijn, kan door kruip de druk in de cavernes oplopen, tot een moment waarop de spanningstoestand in de cavernewand dusdanig wordt dat er een ander vervormingsmechanisme dominant wordt: 'pressure solution creep'. Ook dit wordt meegenomen in het model voor bodemdalingsprognose.

Bij 'dislocation creep' vervormen de zoutmineralen plastisch over de gehele structuur. Bij 'pressure solution creep' gebeurt dit langs de randen van de individuele mineralen, waardoor er een sterke afhankelijkheid is van de grootte van de zoutkristallen. Hiervoor bestaan inschattingen op basis van boorkernen, maar de exacte verdeling in de ondergrond blijft een inschatting. Bodemdaling wordt veroorzaakt door samendrukking (convergentie) van cavernes. De drijvende kracht achter de convergentie is het drukverschil tussen het medium in de cavernes en het omliggende gesteente. Wanneer de cavernes afgesloten zijn, zal de pekdruk oplopen. De convergentiesnelheid neemt af, omdat er in de afgesloten cavernes drukopbouw plaatsvindt die weerstand biedt aan de druk van het omliggende gesteente. Er ontstaat - na verloop van tijd - een evenwicht tussen de druk in de cavernes en de druk van de omliggende gesteentelagen. In die evenwichtssituatie vindt nog maar een uiterst beperkte bodemdaling plaats. De convergentie zal hierdoor steeds langzamer verlopen. Daardoor neemt ook de snelheid van de bodemdaling steeds verder af.

Naast de stabiliteit van een individuele cavernes, is bodemdaling afhankelijk van de onderlinge afstanden tussen cavernes en de ontwikkeling van de cavernes in de tijd. Bij de door DEEP.KBB berekende bodemdaling rekening gehouden met gestapelde mijnbouweffecten. Gestapelde mijnbouw omvat de bodemdaling veroorzaakt door alle mijnbouwactiviteiten in en rondom Zuidwending: de gevolgen van de (beëindigde) gaswinning, de zes bestaande cavernes van de aardgasbuffer en de negen bestaande Nobian cavernes. Deze bodemdaling als gevolg van bestaande mijnbouwactiviteiten vormt de autonome ontwikkeling of referentie, deze zijn verder beschreven paragraaf 6.2.

6.2 Beschrijving bodemdaling scenario's

Voor de studie naar bodemdaling is een model gehanteerd. Er is daarin - naast de autonome ontwikkeling - rekening gehouden met projecten die in voorbereiding zijn, maar waarvan de komst nog niet zeker is en (daarom) nog niet vergund zijn. Het veldontwerp omvat het maximale aantal cavernes dat binnen Zuidwending gerealiseerd kan worden en heeft de naam H2-max. Het veldontwerp H2-max is een model waarmee de bodemdaling in de toekomst bij de komst van een maximaal aantal cavernes is berekend. Als er in de toekomst nieuwe cavernes (naast de bestaande cavernes en de HyStock cavernes) worden gepland, is met de berekening van DEEP.KBB (veldontwerp H2-max) nu al duidelijk wat de bodemdaling zal zijn.

Door in de studie naar bodemdaling uit te gaan van het model met veldontwerp H2-max wordt zo goed als mogelijk de verwachte bodemdaling in beeld gebracht afhankelijk van de ontwikkelingen.

De autonome ontwikkeling bestaat uit:

- De (beëindigde) aardgaswinning,
- De aanwezige negen zoutcavernes van Nobian,
- De aanwezige met aardgas gevulde cavernes van EnergyStock.

De autonome ontwikkeling vormt het referentiescenario. Het HyStock scenario bestaat uit het referentiescenario aangevuld met de ontwikkeling van HyStock. Het H2-max scenario omvat:

- Het referentiescenario aangevuld met HyStock,

- Zuidwending oost: 9 cavernes (elk 1 miljoen m³) geschikt voor energieopslag en 1 caveerne voor naverzadiging (> 1 miljoen m³),
- Zuidwending oost energieopslag: 4 cavernes van elk 1 miljoen m³ geschikt voor energieopslag.

Door uit te gaan van de toetsing van het H2-max scenario wordt rekening gehouden met het HyStock scenario. Als blijkt dat de effecten van de Zuidwending bodemdaling (H2-max) kunnen worden gemitigeerd dan wel geen grenswaarden overschrijden, dan zijn de effecten veroorzaakt door HyStock altijd aan de veilige kant. Een overzicht van de scenario's zijn weergegeven in Figuur 6-2.



Figuur 6-2: Onderscheiden scenario's in bodemdalingsstudie.

6.3 Berekenende bodemdaling

In Tabel 6-1 zijn de uitgangspunten en de uitkomsten van de bodemdalingberekening weergegeven voor H2-max, Referentiesituatie met HyStock en HyStock alleen. Op basis van de berekeningen per scenario (conservatief en verwacht) zijn voor ieder zichtjaar contourenafbeeldingen gemaakt. Dit betreft Figuur 6-3 tot en met Figuur 6-16.

Tabel 6-1: Uitgangspunten en uitkomsten voor H2-max, Referentiesituatie met HyStock en HyStock alleen.

Kenmerken	Variant					
	H2-max		Referentiesituatie + HyStock		HyStock alleen	
Veldontwerp						
Uitgangspunten						
Mijnbouwactiviteiten	Gestapeld				Projectbijdrage	
Type afsluiting caverne einde levensduur	Hard shut-in					
Gemiddelde bodemdalingssnelheid (in mm/jaar) in periode voorafgaand aan zichtjaar*:	Conservatief	Verwacht	Conservatief	Verwacht	Conservatief	Verwacht
2075	14,2	6,5	9,9	4,2	1,4	0,8
2100	7,4	3,2	5,8	2,4	0,5	0,3
2125	4,4	1,5	4,0	1,4	0,1	0,0
2150	4,2	1,4	3,9	1,3	0,1	0,0
2200	4,1	1,4	3,8	1,3	0,1	0,0
2250	4,0	1,4	3,7	1,3	0,1	0,0
Bodemdaling (in m) in centrum van kom per zichtjaar**:	Conservatief	Verwacht	Conservatief	Verwacht	Conservatief	Verwacht
2050	0,64	0,36	0,52	0,31	0,07	0,04
2075	0,99	0,53	0,76	0,41	0,11	0,06
2100	1,18	0,61	0,91	0,47	0,12	0,06
2125	1,29	0,64	1,01	0,51	0,12	0,06
2150	1,39	0,68	1,11	0,54	0,12	0,07
2200	1,60	0,75	1,30	0,61	0,13	0,07
2250	1,80	0,82	1,48	0,67	0,13	0,07

* Aangezien de bodemdalingssnelheid afneemt met de tijd, zal deze in het zichtjaar zelf iets lager zijn dan het gemiddelde van de periode ervoor.

** N.B: de bodemdaling door verschillende varianten vindt plaats op verschillende plaatsen in het gebied. De waarden voor verschillende varianten kunnen derhalve niet opgeteld worden.

De bodemdalingssnelheid verschilt per fase. Tijdens de zoutwinning en de waterstofopslag is sprake van een andere cavernedruk dan na afsluiten. Dit leidt tot verschillen in convergentiesnelheid en daarmee tot een andere bodemdalingssnelheid. Hierbij is de volgende fasering in de tijd aangehouden:

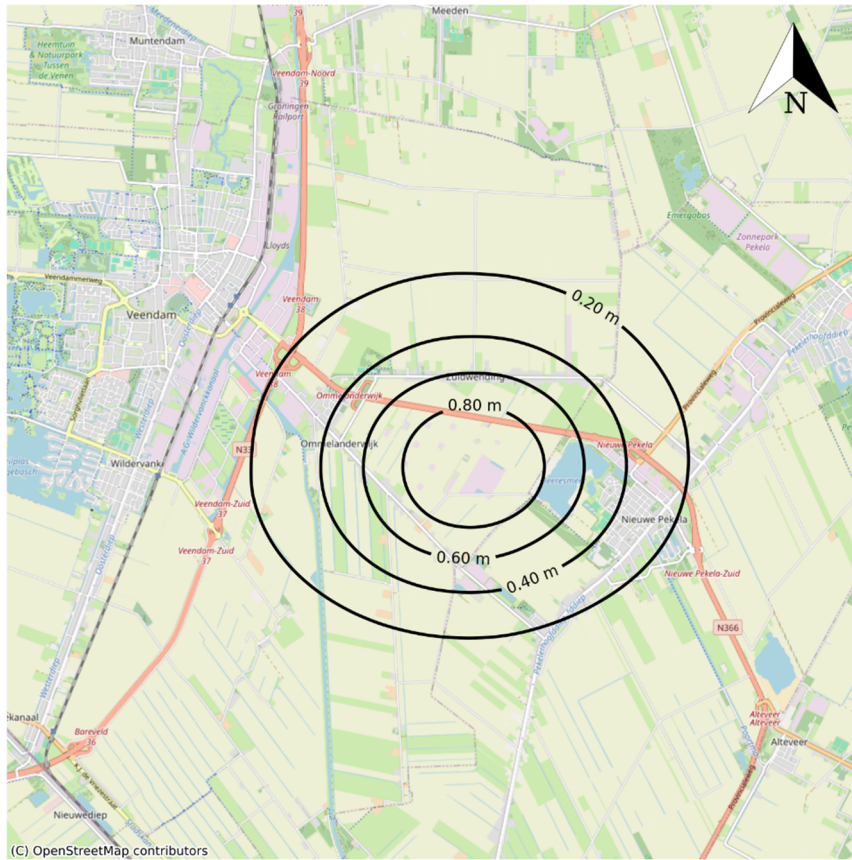
- Voor 2050 wordt ervan uitgegaan dat de pekelcavernes in Zuidwending in een rustfase verkeren voorafgaand aan permanente afsluiting. Alle opslagcavernes voor waterstof zijn in bedrijf.
- Rond het jaar 2100 is de waterstofopslag tot een eind gekomen. De opslagcavernes worden met pekel gevuld en komen in een rustfase.
- Tussen 2125 en 2250 zijn alle in Zuidwending aanwezige cavernes permanent afgesloten.



Figuur 6-3: Conservatief berekende bodemdaling in 2050, H2-max.

Figuur 6-4: Verwachte bodemdaling in 2050, H2-max.

Zuidwending, 2075, conservatieve scenario, hard shut-in
 Bodemdalingskaart gestapelde mijnbouwactiviteiten

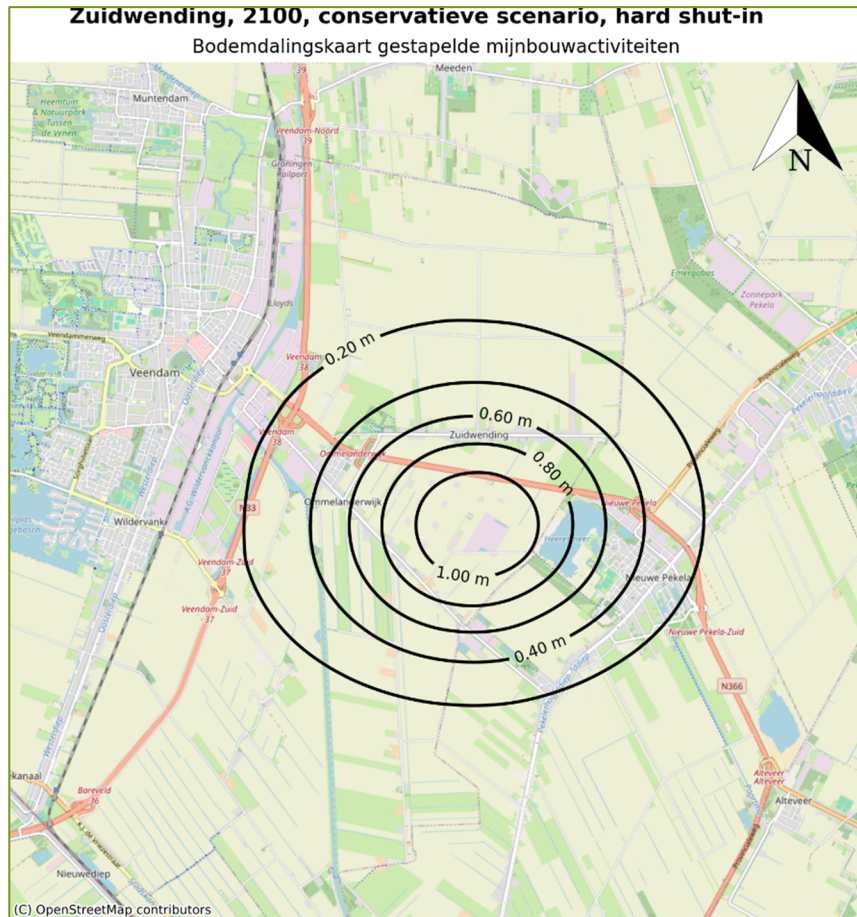


Figuur 6-5: Conservatief berekende bodemdaling in 2075, H2-max.

Zuidwending, 2075, verwachte scenario, hard shut-in
 Bodemdalingskaart gestapelde mijnbouwactiviteiten



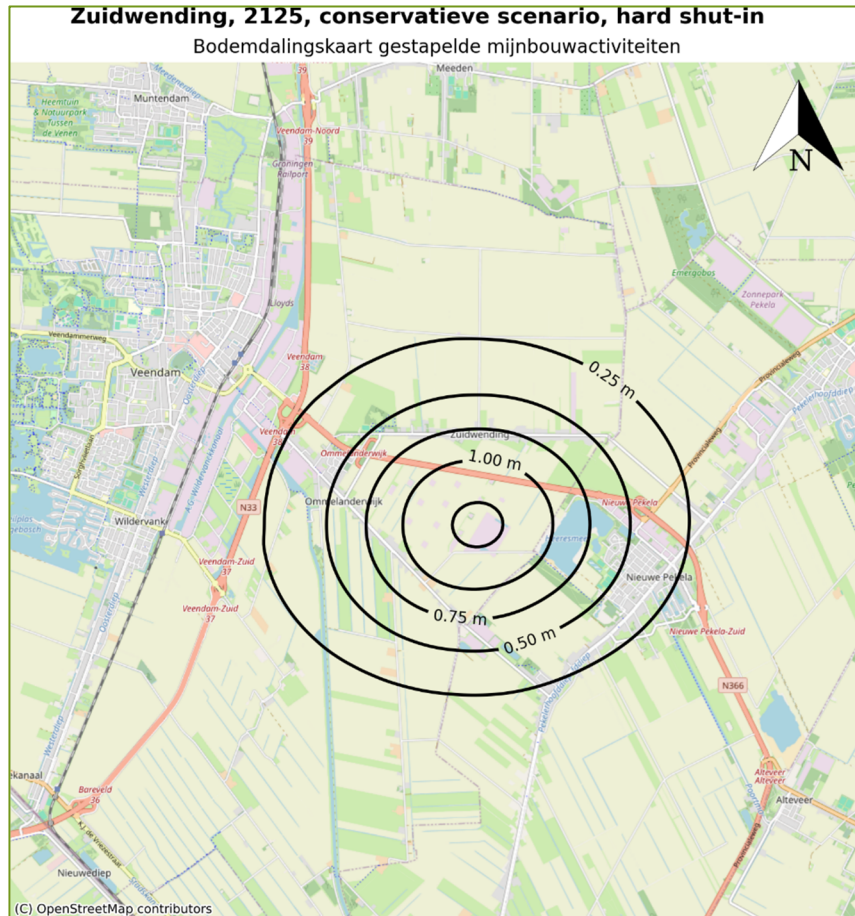
Figuur 6-6: Verwachte bodemdaling in 2075, H2-max.



Figuur 6-7: Conservatief berekende bodemdaling in 2100, H2-max.



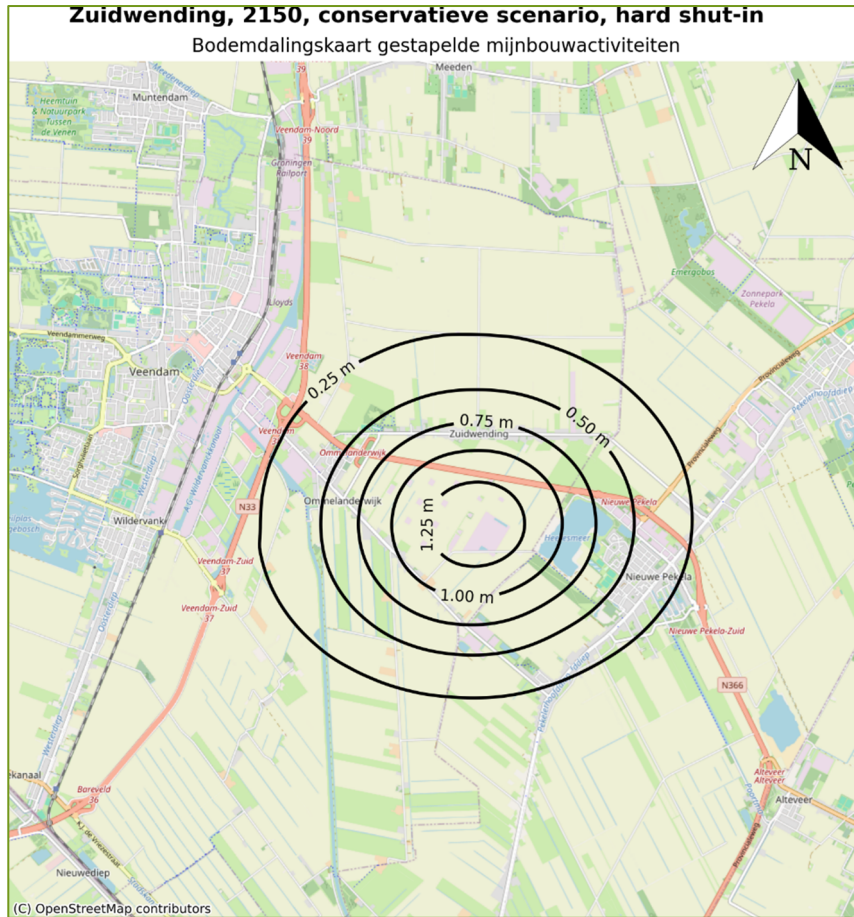
Figuur 6-8: Verwachte bodemdaling in 2100, H2-max.



Figuur 6-9: Conservatief berekende bodemdaling in 2125, H2-max.



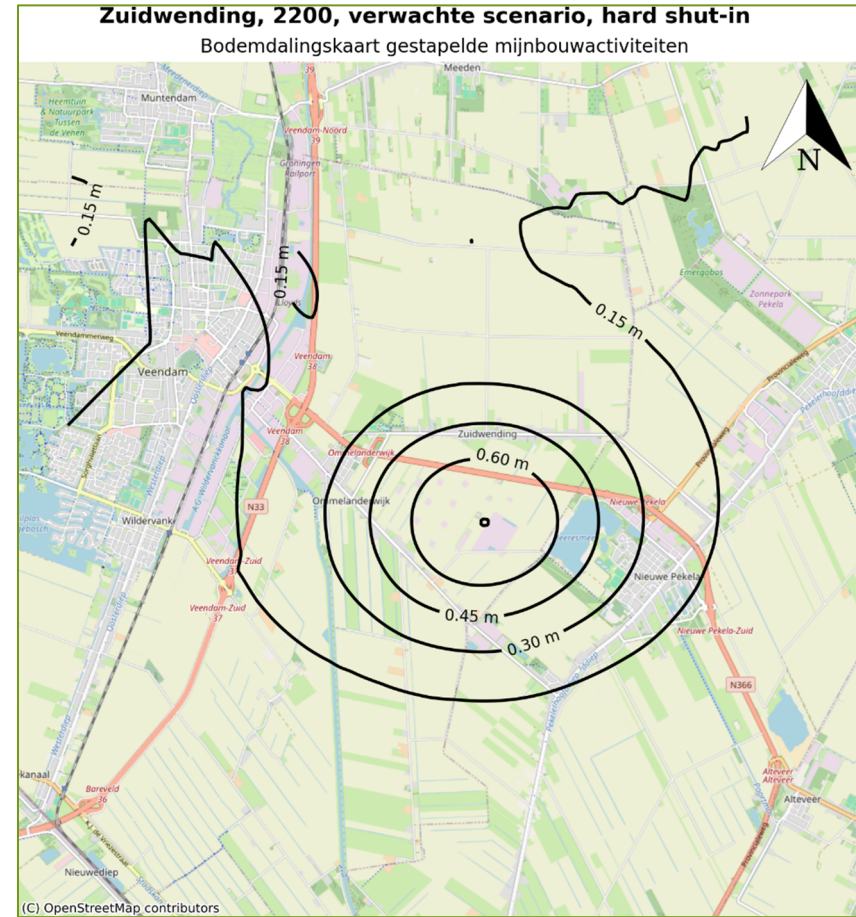
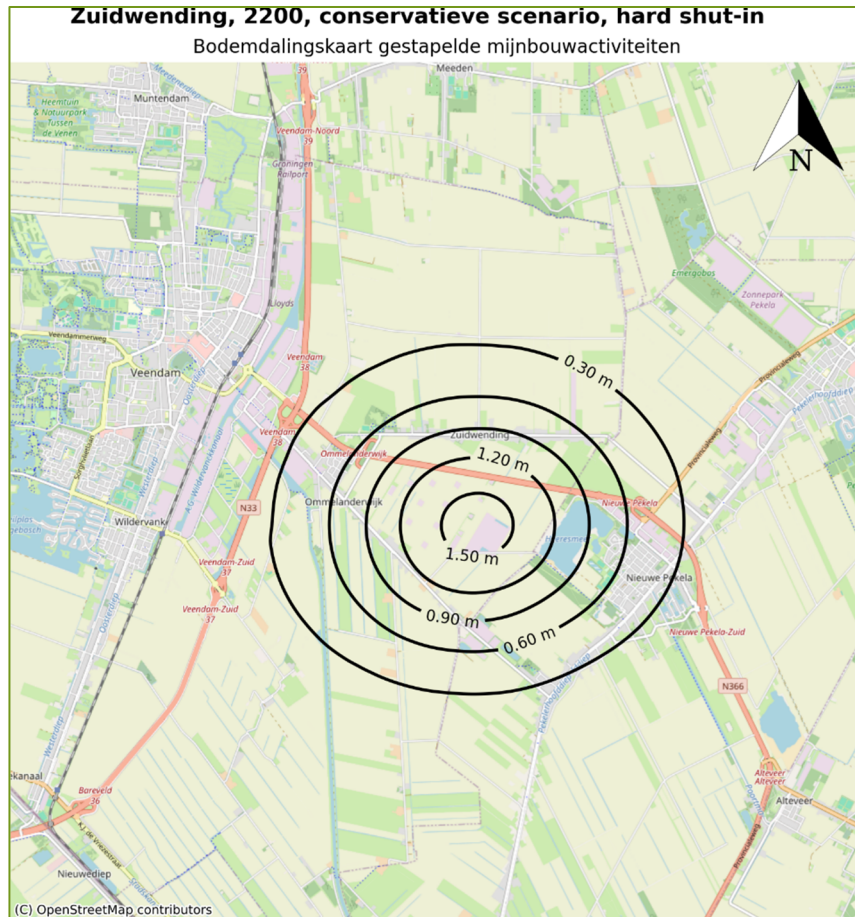
Figuur 6-10: Verwacht bodemdaling in 2125, H2-max.



Figuur 6-11: Conservatief berekende bodemdaling in 2150, H2-max.

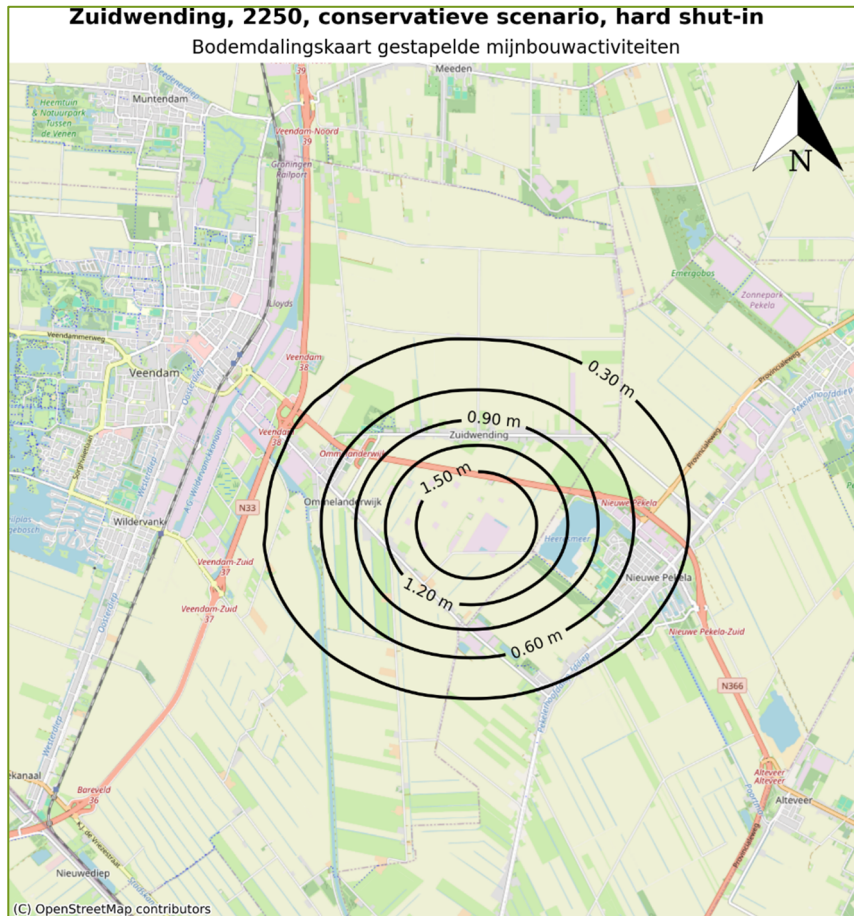


Figuur 6-12: Verwachte bodemdaling in 2150, H2-max.



Figuur 6-13: Conservatief berekende bodemdaling in 2200, H2-max.

Figuur 6-14: Verwachte bodemdaling in 2200, H2-max.



Figuur 6-15: Conservatief berekende bodemdaling in 2250, H2-max.

Figuur 6-16: Verwachte bodemdaling in 2250, H2-max.

7 Afsluiten van een caverne

7.1 Inleiding

De eigenaar van de opslagcavernes ('operator') blijft na afronding van de opslagfase voor lange periode verantwoordelijk voor de cavernes en de nadelige mijnbouweffecten die op kunnen treden. Deze fase in de levenscyclus van het HyStock-project ligt nog ver in de toekomst, omdat de voorgenomen opslagfase (na afronding van de uitloging van de cavernes) 40 jaar zal duren. Er wordt op dit moment al onderzoek gedaan naar insluiting van cavernes en de voorzieningen die getroffen moeten worden om eventuele nadelige effecten te kunnen opvangen en monitoren.

Een gedetailleerde beschrijving van die monitoring, de mogelijke risico's en hoe hiermee omgegaan wordt (mitigatie) is beschreven in het zogenaamde 'Cavern Stability and Integrity Management System'. Dit Nobian management systeem vormt de leidraad voor de afsluiting van de HyStock-opslagcavernes.

De periode na de waterstofopslag wordt onderverdeeld in drie fasen:

- De thermische evenwichtsfase,
- De abandonneringsfase,
- De nazorgfase.

Deze fase worden hieronder in meer detail beschreven.

7.2 Thermisch evenwicht

Na afloop van de opslagfase wordt de caverne opnieuw met pekkel (of met zeewater als er geen pekkel beschikbaar is) gevuld. De exacte temperatuur van deze vloeistof is nog niet bekend, maar zal aanzienlijk lager zijn dan die van het omringende zout. Door het inbrengen van de pekkel koelen de steenzout wanden van de caverne af. Doordat de warmtestroom vanuit de diepere aarde door blijft gaan, zal de pekkel in de caverne opwarmen. Als de pekkel opwarmt neemt het in volume toe. Hierdoor neemt de pekeldruk toe. Als in de tussentijd de druk te hoog wordt, wordt deze verlaagd door een geringe hoeveelheid pekkel uit de caverne te laten. Deze wijze van insluiten wordt "soft shut-in" genoemd. De maximale toelaatbare druk wordt bepaald op basis van het diepste punt van de gecementeerde verbuizing ('last cemented casing shoe' of LCCS). Doorgaans wordt een maximale drukgradiënt van 0,18 bar per meter aangehouden.

Naarmate de temperatuur van de pekkel in de caverne dichterbij de temperatuur van het omringende steenzout komt, neemt de druktoename steeds verder af. Na verloop van tijd is er sprake van een thermisch evenwicht. Scenario's van het Cavern Closure Consortium (CCC) gaan voor hard shut-in uit van een temperatuurverschil van 3 of van 5 graden met het omringende zout.

7.3 Afsluiting

Nadat is vastgesteld dat de cavernes veilig en verantwoord permanent afgesloten kunnen worden, wordt overgegaan tot abandonnering. Deze wijze van afsluiten staat ook als "hard shut-in" bekend. Hierbij is er geen mogelijkheid meer om de druk in de caverne te beïnvloeden, en daarom moet onderzoek (en metingen) in de vorige fasen (met name thermisch evenwicht) hebben aangetoond dat de verwachte toekomstige evenwichtsdruk in de caverne veilig is.

De cavernes worden permanent afgesloten volgens de bepalingen in de mijnbouwwet (en onderliggend -besluit en -regeling). Dit houdt in het kort in dat alle verplaatsbare verbuizingen die nog in de put hangen (de verbuizing om te spoelen tegen kristallisatie) uit de put gehaald worden. Vervolgens wordt er in de laatst gecementeerde verbuizing een permanente afsluiting geplaatst middels een 'mechanische plug' met minimaal 50 m cement er boven. Dit cement zit ter hoogte van een ondoordringbare (sluit-) laag met voldoende sterkte zodat de afsluiting in de ondergrond zich uitstrekt over de volledige doorsnede van de put en alle annulaire ruimten. Bovenin de boorput (dicht bij het maaiveld) zal een top afsluiting middels cement worden geplaatst en zal de put tot >3 m onder het maaiveld worden verwijderd.

7.4 Nazorg en monitoring

Wanneer de cavernes niet langer toegankelijk zijn, zal er nog actief gemonitord worden op mijnbouweffecten. De geologische processen in de ondergrond gaan immers door, waardoor de cavernes in de ondergrond nog langzaam verder krimpen. Na afsluiting zal nog bodemdaling plaatsvinden. De mate van bodemdaling neemt geleidelijk af tot vrijwel 'nul', omdat de kruipnelheid van het zout door de oplopende cavernedruk afneemt.

Alle monitoring zoals beschreven in paragraaf 3.6 en 3.7 is ook van toepassing nadat de mijnbouwactiviteiten zijn gestaakt, voor zover mogelijk en tot een bepaalde tijd nadat de cavernes permanent afgesloten zijn. Zo is monitoring van de cavernedruk niet langer mogelijk als de cavernes permanent afgesloten zijn, en hetzelfde geldt voor het uitvoeren van sonarmetingen. Exacte plannen worden gemaakt op basis van actuele risico-inventarisaties en worden in de meetplannen opgenomen.

Referenties

- Amid, A., Mignard, D., & Wilkinson, M. (2016). Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(12), 5549–5558. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.02.036>
- Brückner, D., & Brandt, M. (2023). *Rock Mechanical Service for Hydrogen Storage at Zuidwending Site*.
- Buzogany, R. (2023). *Memo to Nobian, Project No. 5238-88882467*. DEEP.KBB.
- Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L., & Fan, J.-X. (2013). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Ep. 36. In *ICS* (pp. 199–204).
- DEEP.KBB. (2012). *Supplement Report to the Digital Geological 3D Model of the North-Western Part of the Zuidwending Salt Dome (DEEP project No. 5220-880388)*.
- DEEP.KBB. (2023). *Well Report Zuidwending A8A, Hydrogen Storage Demonstration Phase*.
- Dieter Brückner, Matthias Brandt, Dipl-Phys, & Michael Guenther. (2022). *Rock mechanical verification of operation parameters for the gas storage cavern Zuidwending A5 – Salt dome Zuidwending, The Netherlands*. www.ifg-leipzig.de
- Dopffel, N., Mayers, K., Kedir, A., Alagic, E., An-Stepec, B. A., Djurhuus, K., Boldt, D., Beeder, J., & Hoth, S. (2023). Microbial hydrogen consumption leads to a significant pH increase under high-saline-conditions: implications for hydrogen storage in salt caverns. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37630-y>
- Gasunie. (2017). *Instemming Wijziging Opslagplan Zuidwending, Aanvraag*.
- Gasunie. (2021). *Waterstoffestproject boorgat A8 Zuidwending*.
- Giesberts, M., Bakker, E., & Holleman, E. (2018). *Risicoanalyse mogelijke gevolgen van lekkage van waterstof uit een zoutcaverne*.
- Groenenberg, R. M., Wildenborg, A. F. B., Belfroid, S., Hulsbosch-Dam, C. E. C., Brunner, L. G., Van Unen, M., & Hegen, D. (2021). *Identification and quantification of risks of subsurface hydrogen storage in salt caverns*. www.tno.nl
- Jansen, S., & Gerritse, J. (2023). *Behaviour of anhydrite in a salt cavern upon hydrogen storage – literature assessment*.
- KNMI. (2024). *Dataset Aardbevingscatalogus*. KNMI.
- Laban, M. P. (n.d.). *Hydrogen storage in salt caverns Chemical modelling and analysis of large-scale hydrogen storage in underground salt caverns*. <http://repository.tudelft.nl/>
- Muyzer, G., & Stams, A. J. M. (2008). The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology* 2008 6:6, 6(6), 441–454. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1892>
- Nobian. (2024a). *Effectenanalyse gebiedsontwikkeling Zuidwending*.
- Nobian. (2024b). *Nobian Actualiteiten en Werkzaamheden*. <https://www.nobian.com/nl/zoutwinning/groningen/werkzaamheden/actualisatie-winningsplan-zuidwending>.
- Portarapillo, M., & Di Benedetto, A. (2021). Risk Assessment of the Large-Scale Hydrogen Storage in Salt Caverns. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2856, 14(10), 2856. <https://doi.org/10.3390/EN14102856>
- Reitenbach, V., Ganzer, L., Albrecht, D., & Hagemann, B. (2015). Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 6927–6937. <https://doi.org/10.1007/S12665-015-4176-2/METRICS>
- Réveillère, A. (2023). *The development of the concern for tightness in the salt cavern industries, of accurate tightness test techniques and of the concept of Mechanical Integrity Tes*.
- Réveillère, A., Fournier, C., & Karimi-Jafari, M. (2022). *Enabling Large-Scale Hydrogen Storage in Salt Caverns: Recent Developments Technical Conference Paper*. www.solutionmining.org
- Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 86–94. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.01.051>
- TNO, & EnergyStock. (2022). *Eindrapport pilotproject “Testen van opslag waterstof in zoutcaverne ter flexibilisering van duurzaam energiesysteem.”*

- Trusheim, F. (1960). Mechanism of Salt Migration in Northern Germany. *AAPG Bulletin*, 44(9), 1519–1540. <https://doi.org/10.1306/0BDA61CA-16BD-11D7-8645000102C1865D>
- Van Gessel, S. F., Groenenberg, R. M., Juez-Larré, J., & Dalman, R. A. F. (2022). *Underground hydrogen storage in salt caverns in the Netherlands-Storage performance and implications for geomechanical stability*.
- Van Gessel, S., Yuste Fernández, C., Fournier, C., & Geostock. (2023). *Underground Hydrogen Storage Technology Monitor Report*. Deltares.
- Wong, T. E., Batjes, D. A. J., & de Jager, J. (2007). *Geology of The Netherlands*. Royal academy of arts and science.
- Ziegenbalg, S., & Ziegenbalg, G. (2023). *Hydrogen anhydrite interactions -DRAFT*.
- Zivar, D., Kumar, S., & Foroozesh, J. (2021). Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45), 23436–23462. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.08.138>

Bijlage: Cavern & Well Integrity Categorization Model

Cavern & Well Integrity Categorization Model				
This concept is based on Norwegian Oil & Gas Association recommended guidelines for Well Integrity nr 117.8-11-2017				
Note: for a balanced judgement when using this categorization model it is required that more than one example is taken into account.				
fundaments of a category				
	Green	Yellow	Orange	Red
principle	healthy cavern & well, no or minor issues	One well barrier degraded, the other intact. Cavern aspects on a kind of convergence/degradation trend but still stability expected and no leaks to other layers or to surface.	One barrier failure and the other is intact, or a single failure in cavern and or well may lead to a leak to surface.	One barrier failure and the other is degraded/not verified, or leak to surface. Serious doubts about cavern stability.
associated risk	Identical or comparable to the risk associated with an identical new cavern & well with a design in compliance with all regulations and cavern design.	Incremental but acceptable risk which is not negligible compared to the risk associated with an identical cavern & well with design in compliance with all regulations and cavern design.	Associated risk which is higher than the risk associated with an identical new cavern & well with design in compliance with all regulations and cavern design.	Unacceptable and considerably higher than the risk associated with an identical new cavern & well and design in compliance with all regulations.
compliance with regulations (degradation, corrosion, etc.)	The well is in full compliance with the double barrier philosophy and the cavern meets the design limits and stability criteria. But it does not necessarily mean that the well has a history without failures or leaks, or that the WBEs fulfil all acceptance criteria (described in the latest revision of NORSOK D-010).	Although a cavern and or well categorized as Yellow has an increased risk, its condition is within regulations and the cavern meets the stability criteria and there are no leaks to other layers or to surface.	Typically the well will be outside the regulations and potentially the cavern stability is compromised.	Typically the well will be outside regulations and the cavern is very near the design limits of stability and or leaks to other layers or to surface.
risk of dual barrier failure in a well and unacceptable stability of the cavern	It should also be noted that even if the well has a history without any leaks or failures and the WBEs fulfil all acceptance criteria (described in NORSOK D-010). The well should not be categorized as Green if conditions exist which constitute a considerable threat to both barriers and risk of dual failures is present and or the cavern stability is at risk.	It should also be noted that even if the well has a history without any leaks or failures and the WBEs fulfil all acceptance criteria (described in NORSOK D-010). The well may fall within the Yellow category if conditions exist which constitutes a threat to both barriers and risk of dual failures is present and or the cavern stability is at risk.		A well should fall within the Red category if at least one WBE in a barrier envelope has failed and at least one WBE in the other barrier envelope has also failed or is regarded as degraded or not verified (e.g. Exposed to pressure outside verified design limit or evidence of corrosion or any other form of degradation) There are serious doubts about cavern stability.
Typical Actions	Typically a cavern and or well categorized as Green will not require any repairs or mitigating measures (in addition to the ones that may already be performed and implemented)		Repairs and/or mitigations will be required before the cavern & well can be put into normal operation, but the cavern & well will still have an intact barrier/stability and there will usually not be an immediate need for action.	Repairs and/or mitigations will be required before the cavern & well can be put into operation and there will usually be an immediate and urgent need for action.

sustained casing pressure	categorization w.r.t. sustained casing pressure			
	Green	Yellow	Orange	Red
Leaks through barriers	None; and planned maintenance is timely performed.	None; and planned maintenance is not performed timely.		
HC in annulus	None; unless intentionally placed there	Yes		
Annulus pressure	Below defined limits; and regular monitoring is performed.	Maintained below defined pressure limits in a controlled manner.		Above defined limits; and no regular monitoring is performed.
Leak into annulus	Within acceptance criteria	Within acceptance criteria	Outside acceptance criteria and very frequent bleeding or topping up required.	Outside acceptance criteria and or bleeding / topping up is an almost continuous process.

Examples for wells	category			
	Green	Yellow	Orange	Red
Well with failed SC-SSV (DHSV)	If an appropriate subsurface controlled DHSV or plug is installed and has taken over the WBE function previously fulfilled by the SC-SSSV.			Unacceptable leak rate.
Well with failed SSV	Meets acceptance criteria wrt leak rate and Shutdown Matrix.			Unacceptable leak rate and does not act in line with Shutdown Matrix.
Well with leaking completion string and/or casing	A well with leaking completion string and/or casing functioning as WBE can fall within the Green category if all leaks have been eliminated in an appropriate manner (leak tight), e.g. by straddle or patch, or if an ASV is available above the completion string leak(s) to take over WBE function previously held by the production packer.	A well with failed completion string and/or casing functioning as WBE can fall within the Yellow category if all leaks have been reduced or minimized from unacceptable to acceptable leak rate in an appropriate manner (leak rate within acceptance criteria), e.g. by straddle or patch.		
Well with leaking casing	A well with leaking casing functioning as WBE can fall within the Green category if another well barrier envelope fulfilling criteria, can replace the leaking casing.	A well with failed casing functioning as WBE can fall within the Yellow category if another well barrier envelope fulfilling criteria, can replace the leaking casing.	A well with one failed barrier and leaking casing functioning as WBE in the other barrier can fall within the Orange category if another well barrier envelope fulfilling criteria of the Green category can replace the leaking casing.	

Examples for wells	category			
	Green	Yellow	Orange	Red
Well with failed Christmas tree valve.	A well with failed Christmas tree valve(s) can fall within the Green category if the Christmas tree system still fulfils WBE function.	A well with failed Christmas tree valve(s) can fall within the Yellow category if compensating measures let other valve(s) take over the WBE function.	A well with failed primary barrier and leaking Christmas tree valve(s) functioning as WBE can fall within the Orange category if Christmas tree system fulfils the WBE function.	
Well with failed annulus valve (side outlet)	A well with a failed annulus valve functioning as WBE can fall within the Green category if another valve is available to take over WBE function.			If not green.
Well with leaking production packer element	A well with a leaking production packer element can fall within the Green category if the leak has been sealed off in an appropriate manner (leak tight), e.g. by cement or similar.	A well with a failed production packer element can fall within the Yellow category if the leak has been sealed off in an appropriate manner (leak rate within acceptance criteria), e.g. by cement or similar.		
Well with completion string leak above SC-SSSV	A well with a completion string leak above the SC-SSSV can fall within the Green category if the tubing above the SC-SSSV is not a part of the barrier envelope and the leak is not effecting or leading to degradation of any WBE. Additional mitigating measures may also be required (e.g. increased test frequency)	A well with a tubing leak above the SC-SSSV can be categorized as Yellow if the tubing above the SC-SSSV is not a part of the barrier envelope but the leak is effecting or leading to degradation of any WBE.		
Well with leaking tubing hanger neck seal	A well with a leaking tubing hanger neck seal can fall within the Green category if the leak rate is within acceptance criteria and the void exposed to pressure due to the leak is capable of taking over WBE function.			
Well with leaking tubing hanger seal	A well with a leaking tubing hanger seal can fall within the Green category if the leak rate is within acceptance criteria and the void exposed to pressure due to the leak is capable of taking over WBE function.			

Examples for wells	category			
	Green	Yellow	Orange	Red
Well with casing head leak	A well with internal leaks in casing head can fall within the Green category if the leak is not through a barrier.			
Well with control line leak	A well with leaking control line(s) can fall within the Green category if 2 barrier envelopes are still intact (eg. control line leak(s) are located between primary and secondary barrier envelope).	A well with leaking control line(s) can be categorized as Yellow if leak(s) are through established barrier.		
Well with risk of dual barrier failures	A well where there is considerable risk of dual barrier failures (typically SC-SSSV and Christmas tree valves) due to phenomena such as scale, erosion, corrosion, asphaltene, wax or similar should not be placed within the Green category.	A well where there is considerable risk of dual barrier failures (typically DHSV and Christmas tree valves) due to phenomena such as scale, erosion, corrosion, asphaltene, wax or similar can be placed within the Yellow category.		
Annulus barrier	The well can fall within the Green category if the cement can be documented as a qualified WBE or the cement is replaced with another WBE.	The well can fall within the Yellow category if the cement requires mitigating actions to be documented as a qualified WBE		
Crossflow			A well with confirmed uncontrolled crossflow will fall within the Orange category if there is no potential for breaching to surface.	A well with confirmed uncontrolled crossflow will fall within the Red category if there is potential for breaching to surface.
Leak to surface				A well with recordable and reportable uncontrolled leak to surface should fall within the Red category.
Well subject to permanent abandonment operations	A well undergoing permanent abandonment operations can fall within the Green category when permanent well barriers are positioned at a depth where formation integrity is higher than potential pressure below well barrier. A crossflow might be categorized as green, only if in accordance with design.	A well undergoing permanent abandonment operations can fall within the Yellow category if potential for undesirable crossflow, but not breaching to surface.	A well undergoing permanent abandonment operations can fall within the Orange category if potential for undesirable future crossflow and potential for breaching to surface. Mitigations and/or repair is required.	
Examples for caverns	category			
	Green	Yellow	Orange	Red
Increased subsidence at surface	Subsidence within the limits set in the permit. Stresses on the last cemented casing serie within the design limits.	Trend of the subsidence over time approaching in the very near future the limits set in the permit. Trend of increasing stresses in the last cemented casing approaching the maximum allowable in the very near future.		Subsidence has reached the limits set by the permit. Stresses in the last cemented casing has reached the design limit.
Increased sump level (higher)	A cavern can classified as green if the cavern wall does not show any gross irregularities	gross irregularities (wall and roof) but still cavern stability	serious doubts about cavern stability under investigation.	unacceptable conditions
cavern wall contour increased and/or gross irregularities.	the cavern may categorized as Green if wall and roof are still within design contour.	cavern wall and roof approaching the limits of the contour.	If there are any signs of reducing stability in the near future due to wall and roof are at the limits of the contour.	If there is any serious doubt w.r.t. the stability
cavern wall decreased (convergence)	the cavern may categorized as Green if - surface subsidence within limits - cavern wall and roof are within design considerations - cavern stability still present	If there is any signs of reducing stability in the near future. Surface subsidence approaching the limits set by the permit.		If there is any serious doubt w.r.t. the stability. The limit of the surface subsidence is reached or will reach in the very near future.
cavern neck diameter decreased	cavern neck in line with last casing serie and able to pass tools through.	difficult to pass through tools or there is a reasonable chance that they will get stuck		unable to pass through so that sump measurements and sonar's cannot be performed, survey tools get stuck
cavern Operating Envelop.	Cavern is operated within the limits of the Operating Envelop.	cavern operated outside the Operating Envelop for a prolonged period.		The cavern pressure is below or above the design limits and/or the limits set by the permit
Instability in neighbouring caverns	a potential instability of a cavern will not influence other caverns	increased alertness due to a likely instability of cavern influencing other cavern(s)	Serious doubts about stability of neighbouring caverns	a confirmed risk that a chain of cavern failures is likely to take place