

Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Water & Maritime

Aan: Nobian
Van: 5.1.2.e
Datum: 10 februari 2025
Kopie: Click to enter "CopyTo"
Ons kenmerk: 123-RHD-XX-XX-ME-X-0003
Classificatie: Projectgerelateerd
Gecontroleerd door: 5.1.2.e

Onderwerp: Impact doordringen pekels Zuidwending

1 Inleiding

Probleemstelling

Nobian wint pekels uit de cavernes bij Zuidwending. Na het beëindigen van de pekelswinning worden de cavernes afgesloten. Nobian is voornemens de cavernes, na een periode waarin de cavernes de tijd krijgen om op temperatuur te komen (de zogenaamde soft shut-in), hard af te sluiten, een zogenaamde hard shut-in. Bij een hard shut-in bouwt zich druk op in de caverne, waardoor de bodemdaling beperkt en (zeer) sterk vertraagd wordt. Er bestaat een zeer kleine kans dat door deze drukopbouw na verloop van tijd een barst ontstaat in het steenzout en de caprock (zogenaamde hydraulische fractuur). In geval van een hydraulische fractuur kan er een kortdurende pekelsuitstroom naar bovenliggende lagen (de overburden) optreden. Een groep experts, het Cavern Closure Consortium (CCC), heeft berekend dat in een realistisch scenario 540 m³ aan pekels de caverne kan verlaten, in een meer conservatief (waarbij met een grotere uitstroom wordt gerekend) scenario 3300 m³ en in een worstcase scenario 8600 m³. De vraag is hoe deze pekelsvolumes zich verder kunnen verspreiden in de lagen boven de caprock (de overburden).

Op basis van deze probleemstelling heeft Nobian aan RHDHV opdracht gegeven om de effecten van pekelsindringing op de watervoerende lagen boven de caprock (de overburden) te analyseren en waar mogelijk te kwantificeren.

Doel

Dit memo beschrijft aan de hand van conceptuele modelberekeningen de mogelijke effecten van het doordringen van het pekelswater in de overburden. In het bijzonder op de grondwaterstijghoogten¹ en chlorideconcentraties in het diepere grondwater (dieper dan 60 meter onder maaiveld). Hiervoor zijn verschillende scenario's doorgerekend, waarin onderscheid is gemaakt naar:

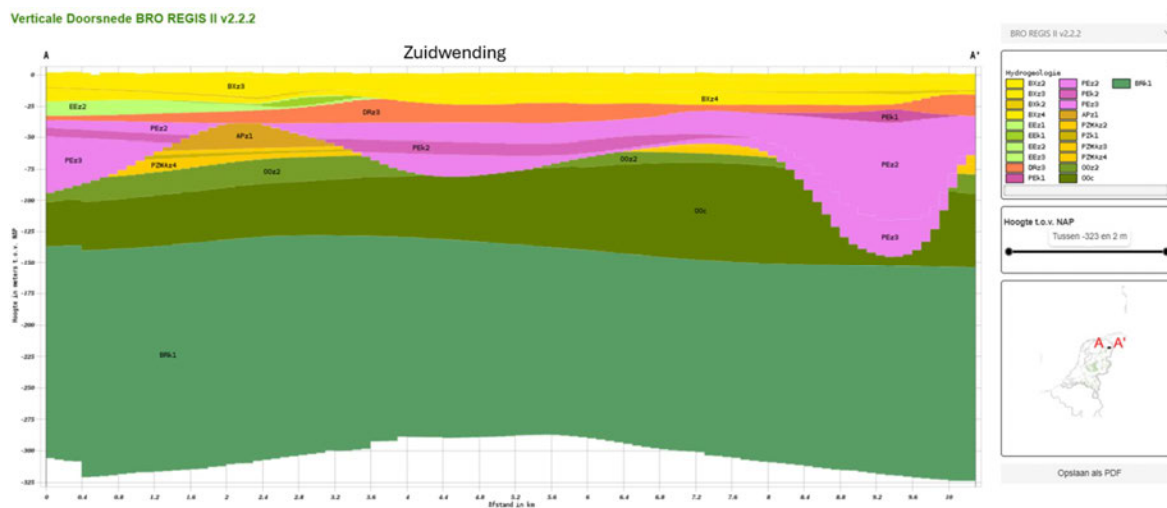
- Verschillende dieptes van indringen: Indringing pekels onder de diepere kleilaag (Formatie van Breda, op circa 120-130 m onder maaiveld) en indringing pekels tot in de zandlaag boven de diepere kleilaag (Formatie van Peize; Peizezanden, op circa 60-70 m onder maaiveld).
- Verschillende volumes pekelswater.
- Wel en geen grondwateronttrekking in de nabije omgeving (op 1 km afstand). Deze onttrekking is nu niet aanwezig, maar op 1 km afstand vanaf de noordelijke rand van het Zuidwending begint een zoekgebied voor een mogelijke toekomstige onttrekking (ASV; aanvullende strategische voorraad).

¹ De hoogte ten opzichte van een referentieniveau (NAP) tot waar het grondwater op een bepaalde diepte stijgt wanneer er een peilbuis met een filter op die diepte zou staan.

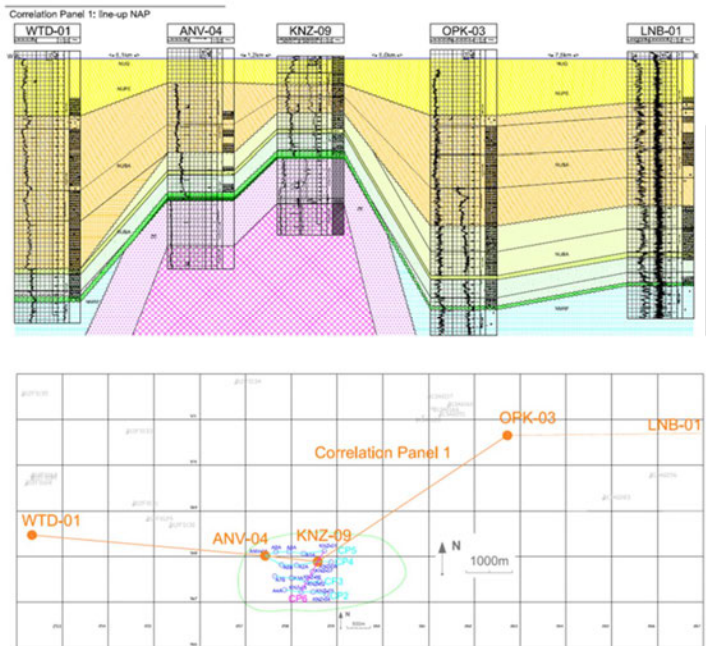
2 Uitgangspunten

2.1 Schematisatie ondergrond

Een belangrijk onderdeel van het conceptuele model is de opbouw van de ondergrond. Voor de omgeving van Zuidwending is de schematische opbouw van de ondergrond verkregen uit de ondergrondmodellen van REGIS-II (zie Figuur 2-1). In de ondiepere ondergrond (tot 80-100 m) zitten verschillende zandpakketten (PEz2 en PEz3, Formatie van Peize ofwel Peizezanden), met daartussen vaak een laag Peeloklei (Peeloklei1 en Peeloklei2). Daaronder (tot 300 m) zitten respectievelijk het Oosterhoutcomplex (OOz2 en OOC) en de Formatie van Breda (klei, BRk1). Verschillende tunneldalen (Peizezand) doorsnijden deze lagen.

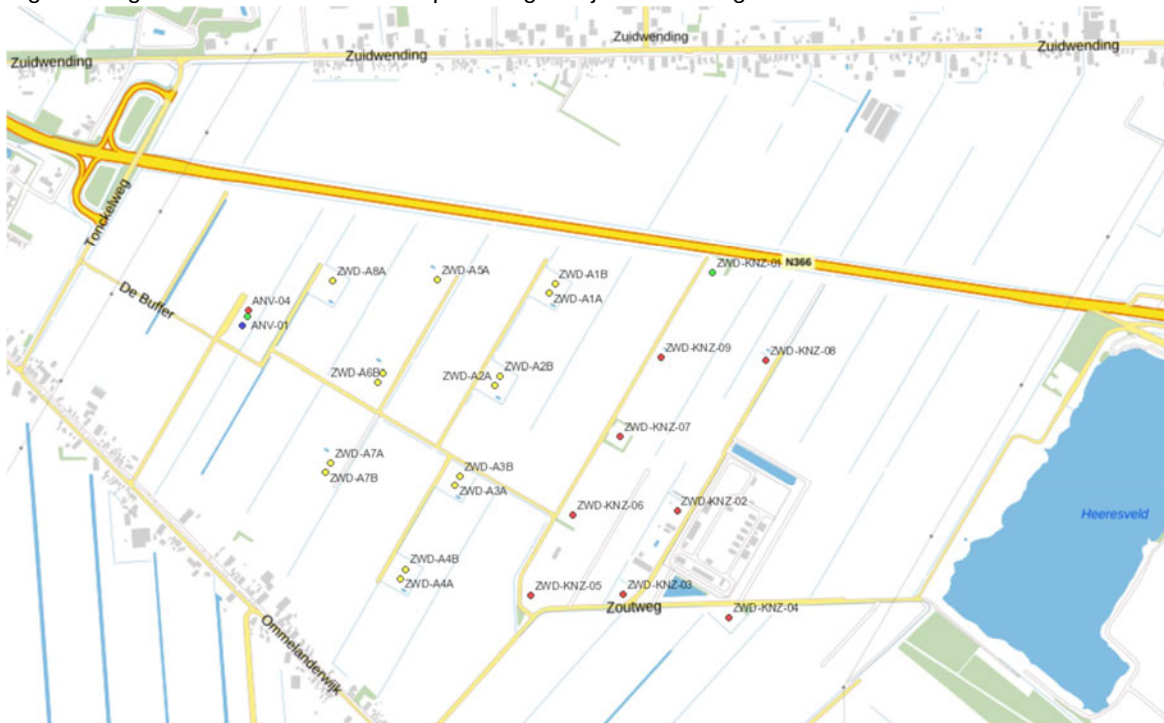


In en rondom de zoutcavernes bij Zuidwending heeft Nobian in het verleden diverse boringen uitgevoerd, veelal in de zoektocht naar zout of andere delfstoffen. Deze diepe boringen laten specifiek ter hoogte van Zuidwending een beduidend ander beeld van de ondergrond zien dan het REGIS-II model (zie Figuur 2-2). Ter plaatse van de zoutwinning bij Zuidwending begint het Zechstein een stuk ondieper, en ook de daarboven liggende lagen zijn daardoor (deels) een stuk dunner ontwikkeld.



Figuur 2-2. Dwarsdoorsnede bij Zuidwending op basis van diepe boringen.

Figuur 2-3 geeft de locaties van de diepe boringen bij Zuidwending weer.



Figuur 2-3. Locatie diepe boringen bij Zuidwending (bron: www.nlog.nl)

De focus van deze boringen lag op de diepere lagen (Zechstein en daaronder), maar de boorbeschrijvingen geven ook informatie over de lagen daarboven. Twee voorbeelden van

boorbeschrijvingen zijn hieronder weergegeven (Figuur 2-4). Een verdere beschouwing van deze boringen is opgenomen in bijlage 1.

ZUIDWENDING-A3B

Formatie			
Op grond van een nauwkeurige analyse van het beorgruis komt men tot de volgende stratigrafische indeling:			
0	- 8 mtr.	Zand, zeer grof tot fijn, kleihoudend, veen.	KWAARTAIR
8	- 51 mtr.	Zand, zeer grof tot fijn, kleihoudend, Fijn grind en veen.	
51	- 69 mtr.	Klei, kleisteen, klei en sterk afwisselend zandgehalte.	
69	- 118 mtr.	Klei, grijsgroen, zand, fijnsandig, kalkhoudend	TERTIAIRE (Pliocene- Mioceen?)
118	- 130 mtr.	Klei.	
130	- 135 mtr.	Klei, donkergrijze kalkhoudend met gips.	
135	- 171 mtr.	Gipsaard	ZECHSTEIN
171	- ? mtr.	Steenrest	

ZUIDWENDING-A3B

from [m MD]	to [m MD]	Stratigraphy / Lithology
0.0	126.5	Upper North Sea Group
0.0	34.0	Sand, fine to coarse grained.*
34.0	35.5	Gravel.*
35.5	75.0	Sand, fine to coarse grained.*
75.0	(80.0)	Clay.*
(80.0)	126.5	Clay, grey, unconsolidated, containing fine-grained, quartz sand, fossil debris and accessory pyrite and mica; increasingly sandy and glauconitic, greenish to dark green ('greensand') below 120 m.
126.5	1,300.0 (TD)	Zechstein Group
126.5	181.5	Zechstein Caprock Formation
126.5	169.0	Gypsum, white and opaque to milky and translucent, medium to coarse crystalline, platy; accessory clay-stone.
169.0	181.5	Anhydrite, white to light grey, occasionally transparent, microcrystalline to fine crystalline, and gypsum, white, as above; accessory claystone.
181.5	1,300.0 (TD)	Z2 (Stassfurt) Formation
181.5	1,300.0 (TD)	Halite, colourless to white, transparent to milky, medium to coarse crystalline; anhydrite, white to light grey, microcrystalline to fine crystalline.

* Lithological description of succession from 0.0 to 80.0 m based on Drilling Engineering Weekly Report of 14. Week from 11/04/2006.

Figuur 2-4. Voorbeelden van boorbeschrijvingen van diepe boringen bij Zuidwending.

De diepe boringen bij Zuidwending geven de volgende inzichten:

- Bij Zuidwending ligt het Zechstein een stuk dicht bij het oppervlak (circa 130 m -mv) dan dat REGIS-II doet vermoeden (volgens REGIS-II reikt de Bredaklei tot circa 300 m -mv). Dit beeld is consistent in alle boringen. Ter plaatse van Zuidwending zit er een fout in de diepe schematisatie van de ondergrond van REGIS-II. Aangenomen wordt dat ter plaatse van Zuidwending het Zechstein op 130 m -mv begint.
- Boven het Zechstein ligt een dikkere kleilaag. De beschrijving van deze kleilaag verschilt van "donkere grauwgrijze/groene compacte klei" tot "klei met zandlagen en fossielen". Aangenomen wordt dat de kleilaag op circa 70 m -mv begint en doorloopt tot aan het Zechstein (130 m -mv). Wat betreft samenstelling van de klei wordt aangenomen dat deze de eigenschappen heeft van Bredaklei/Oosterhoutcomplex met relatief hogere verticale weerstanden en lagere horizontale weerstand (anisotropie). Dit omdat de meerderheid van de boringen het voorkomen van zand(lagen) in de klei vermeldt (zie ook bijlage 2).
- Van maaiveld tot aan de top van de Potklei/Bredaklei bestaat de ondergrond voornamelijk uit zand met één of meerdere scheidende kleilagen. Aangenomen wordt dat van maaiveld tot 70 m - mv de bodem bestaat uit zand, met een kleilaag tussen de 40 – 60 m-mv (Peeloklei).

Buiten het gebied Zuidwending, d.w.z. in het omliggende gebied waar de zoutkoepel ontbreekt, is aangenomen dat de REGIS-II schematisatie wel correct is.

Bovenstaande aannames zijn vertaald in een conceptueel model van de ondergrond, waarbij het gebied rond Zuidwending is verdeeld in 3 zones (Figuur 2-5).



Figuur 2-5. Ruimtelijke indeling conceptuele schematisatie ondergrond.

Voor de onderscheiden zones Zone 1 (Z1 in onderstaande tabel), Zone 2 (Z2) en Zone 3 (Z3) is uitgegaan van de volgende laagopbouw:

Laag	Top	Bot	Z1	Z2	Z3
1	0	30	Zand	Zand	Zand
2	30	40	Zand	Zand	PK2
3	40	60	PK2	PK2	Zand
4	60	70	Zand	Zand	Zand
5	70	80	OOc	OOc	OOc
6	80	90	OOc	OOc	OOc
7	90	100	OOc	OOc	OOc
8	100	110	OOc	Breda	OOc
9	110	120	OOc	Breda	OOc
10	120	130	OOc	Breda	OOc
11	130	200	Breda	Krijt	Breda

Voor de voorkomende geologische formaties is uitgegaan van de volgende horizontale doorlatendheid (k_h) en verticale doorlatendheid (k_v):

Type	k_h	k_v	k_h bandbreedte REGIS-II	k_v bandbreedte REGIS-II
Zand	10	10	5.2 ($\sigma=1.9$) - 20 ($\sigma=11$)	
PK2	0.001	0.001		0.0019 ($\sigma=0.001$)
OOc	3	0.02	2.9 ($\sigma=1.5$)	0.016 ($\sigma=0.0072$)
Breda	3	0.005		0.002 ($\sigma=0.001$)
Krijt	0.00001	0.00001	Laag niet in REGIS	Laag niet in REGIS

De gekozen k_h - en k_v -waarden zijn in lijn met de bandbreedtes die in REGIS-II worden gegeven voor dit gebied (laatste 2 kolommen in bovenstaande). Voor de Bredaklei is de horizontale doorlatendheid niet

gegeven. Deze is bewust wel aan formatie toegekend (en hoog gekozen; vergelijkbaar met de k_h van Oosterhoutcomplex). Dit om een pekerverdeling in de klei te kunnen simuleren. Indien de klei toch een veel lagere horizontale doorlatendheid heeft, zal de drukopbouw dusdanig hoog zijn, dat de fracture zich mogelijk zal doorzetten tot in de bovenliggende zandlaag (dit is ook een van de doorgerekende scenario's).

Verder is voor de verschillende lagen uitgegaan van de volgende waarden voor de elastische bergingscoëfficiënten.

Laag	Top	Bot	SC1
1	0	30	0.0073194
2	30	40	0.0002331
3	40	60	0.0007448
4	60	70	0.000157
5	70	80	0.0001437
6	80	90	0.0001332
7	90	100	0.0001245
8	100	110	0.0001173
9	110	120	0.0001112
10	120	130	0.0001059
11	130	200	0.004459

1 km ten noorden van Zuidwending begint het zoekgebied voor een ASV (Aanvullende Strategische (grondwater)Voorraad). Hier zou mogelijk in de toekomst een grondwaterwinning kunnen komen die beïnvloed kan worden bij pekelindringing. Om de effecten van een winning op het grondwater en het peketransport realistisch te kunnen berekenen is in het conceptuele model noordelijk van de stippellijn in Figuur 2-5 de Peelklei in laag 3 vervangen door zand. Deze aanpassing is in het conceptuele model doorgevoerd om een realistische onttrekking/verlagingscontour te kunnen simuleren in geval van een veronderstelde grondwateronttrekking aan de zuidelijke rand van het ASV-gebied (het zoekgebied van deze ASV begint op circa 1 km ten noorden van Zuidwending). Het maakt de winning deels freatisch, wat past bij de werkelijke situatie als op die locatie in het ASV-gebied grondwater gewonnen zou worden. REGIS laat ook zien dat de Peelklei grotendeels ontbreekt in de zone van enkele kilometers ten noorden van Zuidwending waar een ASV in de toekomst kan gaan komen.

2.2 Modelaanpak

Om de effecten van verschillende scenario's met pekelindringing in de overburden te analyseren en te kwantificeren, is voor het gebied zoals weergegeven in Figuur 2-5 het volgende conceptuele grondwatermodel opgebouwd:

- Modflow-6 model met variabele dichtheid en stoftransport;
 - Stoftransport advectioneel en dichtheidsstroming (geen dispersie);
 - Extent van het model is 20 bij 20 km;
 - Resolutie van het model is 100x100 m;
 - Initiële conditie van 0 voor zowel de stijghoogte in de verschillende lagen als de initiële chlorideconcentratie;
 - Er wordt gerekend met een in de tijd constante elastische berging. In werkelijkheid zal de indringing van pekel onder hoge druk gepaard gaan met vervorming van de ondergrond. Dit zal leiden tot een hogere bergingscoëfficiënt en een veel lagere druk dan wordt berekend. De verplaatsing van de pekel in de eerste periode na de gebeurtenis wordt daarmee worst-case berekend.
 - Vlakdekkend topsysteem (peil = 0, bodem = -5, weerstand = 100 dagen, infiltratiefactor = 1);
 - Bodem aan de hand van opbouw zoals beschreven in Paragraaf 2.1 van dit memo;
 - Model is tijdsafhankelijk doorgerekend (lange periode tot wel 200 jaar met dagelijkse tijdstappen).
 - o Op T=2-5 wordt pekelwater met een concentratie van 320 gram/liter toegevoegd (over 4 tijdstappen van één dag).
 - Variant 1: 3500 m³ (825 m³ per dag).
 - Variant 2: 8600 m³ (2150 m³ per dag).
 - Er zijn twee scenario's onderscheiden voor wat betreft de diepte van pekelindringing:
 - o Boven het Zechstein (onderin de Bredaklei; modellaag 10 op 120-130 m -mv)
 - o Boven de klei (in Peizezanden; modellaag 4 op 60-70 m -mv).
 - Er wordt met en zonder grondwateronttrekking gerekend (om het effect van een eventuele ASV te kunnen meenemen). Voor de grondwateronttrekking zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:
 - o Locatie grondwateronttrekking op 1 km noordelijk van de pekelindringing (dit komt bij benadering overeen met de zuidelijke rand van het mogelijke ASV-gebied Veendam).
 - o Onttrekkingsvolume van de grondwateronttrekking bedraagt 1 miljoen m³/jaar.
- Aan de scenario's met een onttrekking is ook een natuurlijk verhang van 0.15 m/km toegevoegd. Dit verhang komt uit het grondwatermodel dat voor de vergunningaanvraag voor Zuidwending is gemaakt en komt daarmee overeen met het daadwerkelijke berekende natuurlijke stijghoogteverhang ter plaatse van de zoutwinning.

Het gekozen uitgangspunt voor scenario's met een grondwateronttrekking op 1 km afstand is conservatief omdat:

- Het nog de vraag is of er in het ASV-gebied Veendam daadwerkelijk een grondwateronttrekking komt (dit wordt op het moment van schrijven nog onderzocht).
- Als de grondwateronttrekking in het ASV-gebied Veendam er komt is de kans beperkt dat deze op de zuidelijke grens van het ASV-gebied, zo dichtbij Zuidwending komt te liggen. Het is eerder te verwachten dat een eventuele grondwaterwinning meer noordelijk komt te liggen, bijvoorbeeld in de omgeving van de eerdere grondwaterwinning Kibbelgaarn (enkele kilometers verder naar het noorden).
- De grondwateronttrekking is verondersteld op één punt. In werkelijkheid is een ruimtelijke spreiding te verwachten.

Verder gaat het om een conceptueel model, waarbij de schematisatie van de ondergrond vooral is gebaseerd op het gebied Zuidwending. De ondergrond van het omliggende gebied en het

oppervlaktewatersysteem zijn op een simpele wijze geschematiseerd (passend bij de scope van dit onderzoek). Het effect van de onttrekking is vooral beoordeeld op de resulterende verlagingcontour (verhang in stijghoogte – deze is ook bij de resultaten gepresenteerd), en of deze representatief is voor hetgeen je bij een onttrekking op die locatie zou verwachten.

2.3 Overige uitgangspunten m.b.t. uitredend pekewater

- Blanket vloeistof wordt gebruikt om de uitloging van de cavernes gecontroleerd te laten verlopen. Na de winning, en ruim voor afsluiten, wordt het volledig afgelaten uit de put. In de praktijk blijft tot circa 10 m³ achter in de caveerne vanwege ruwheid van het dak en impregnatie van blanket vloeistof in het zoutdak. Dit beperkte restvolume, in de orde van grootte van enkele ppm's van het totale caveerne volume, wordt aangenomen als niet beschikbaar voor vrije uitstroom tot boven het zout in het geval van optreden van een hydraulic fracture en pekelindringing. Het volume stroomt immers nu ook niet uit, terwijl de gerealiseerde put en caveerne dit niet verhinderen.
- Caprock zit boven de zoutdome. Als conservatieve aanname wordt de caprock boven de zoutdome aangenomen als deel van de zoutformatie. In deze laag met een dikte van ruim 50 meter zijn tijdens het boren van 2 van de 9 Nobian zoutwinningsputten echter spoelingsverliezen van circa 30 m³ waargenomen, hetgeen duidt op aanzienlijke permeabiliteit en porositeit. Omdat de permeabiliteit en porositeit op basis van deze beperkte gegevens niet kwantitatief kunnen worden ingeschat, is ervoor gekozen deze buiten beschouwing te laten en de caprock als zout te behandelen. Dit is een worstcase aanname omdat er hierdoor mee gerekend wordt dat een eventuele hydraulic fracture volledig door de caprock heen zal gaan (zonder uitstroom van pekela of drukverlies in de caprock).
- Uittreden pekela uit de caveerne in relatie tot indringing pekela in de overburden – de input voor de modellering van de mogelijke effecten van indringing in de overburden (boven de caprock) komt van het Cavern Closure Consortium (CCC). Het CCC heeft berekend dat in een realistisch scenario 540 m³ de caveerne kan verlaten, in een meer conservatief scenario (waarbij een gerekend wordt met een grotere hoeveelheid uitstromende pekela) 3300 m³ en in een worstcase scenario 8600 m³. Deze volumes zijn gebaseerd op het geplande eindvolume van de cavernes, zoals voorzien aan het eind van de aangevraagde winning (2035 in het winningsplan van Nobian, 2040 in de berekening van CCC). Voor de modellering van de effecten van binnendringen van pekela in de overburden, is de worst case aanname gehanteerd dat het volume dat uittreedt uit de caveerne volledig binnendringt in de overburden. In werkelijkheid zal slechts een beperkt deel van het uit de caveerne uittredende volume pekela daadwerkelijk de overburden bereiken. Omdat dit deel -met de kennis van nu- niet gekwantificeerd kon worden, is voor deze worstcase aanname gekozen en zijn daarbij het conservatieve en het worstcase uittredingsscenario doorgerekend. In de doorrekening van het conservatieve scenario is uitgegaan van een pekela volume van 3500 m³, iets meer dan de 3300 m³ zoals afgeleid door CCC.

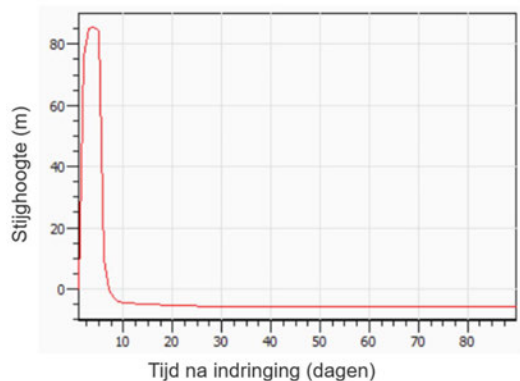
3 Resultaat

3.1 Effect pekelindringing op stijghoogte (drukvoortplanting)

In dit onderzoek zijn de effecten van de pekelindringing op de stijghoogte onderzocht. De stijghoogte is de hoogte ten opzichte van een referentieniveau (NAP) tot waar het grondwater op een bepaalde diepte stijgt wanneer er een peilbuis met een filter op die diepte zou staan. Een stijghoogte die tijdelijk hoger is dan het bovenliggende maaiveld (wat bij pekelindringing gebeurt) betekent niet dat er een tijdelijke grondwaterfontein aan maaiveld ontstaat. Door stijghoogteverschillen gaat het grondwater stromen, waardoor de druk in tijd en ruimte uitvlakt. Deze stroming wordt geremd door weerstand in de ondergrond.

3.1.1 Indringing van 3500 m³ onder de kleilaag

- Bij initiële pekelindringing neemt de stijghoogte toe tot maximaal 85 meter (Figuur 3-1).
- Deze stijghoogteverhoging plant zich voort in de ruimte, en is ook in de bovenliggende zandlaag waarneembaar (Figuur 3-2).
- Na initiële verhoging neemt de stijghoogte met tijd en ruimte snel af. Na 90 dagen is de berekende verhoging nergens meer groter dan 5 cm.
- De reden dat de stijghoogteverhoging in de zandlaag (laag 3) in noordelijke richting is afgetopt is dat daar de weerstand in de ondergrond (Peeloklei; laag 3) ontbreekt.



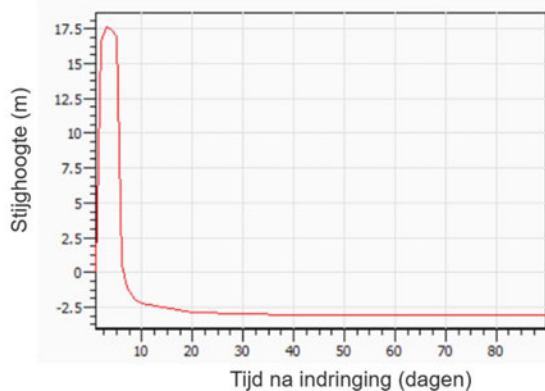
Figuur 3-1. Verloop stijghoogte in cel pekelindringing.



Figuur 3-2. Ruimtelijk verloop stijghoogte bij pekelindringing.

3.1.2 Indringing van 3500 m³ boven de kleilaag

- Bij initiële pekelindringing neemt de stijghoogte toe tot maximaal 18 meter (Figuur 3-3).
- Deze stijghoogteverhoging plant zich voort in de ruimte (Figuur 3-4).
- Na initiële verhoging neemt de stijghoogte met tijd en ruimte snel af. Na 90 dagen is de berekende verhoging nergens meer groter dan 5 cm.
- De reden dat de stijghoogteverhoging in de zandlaag (laag 3) in noordelijke richting is afgetopt is dat daar de weerstand in de ondergrond (Peeloklei; laag 3) ontbreekt.



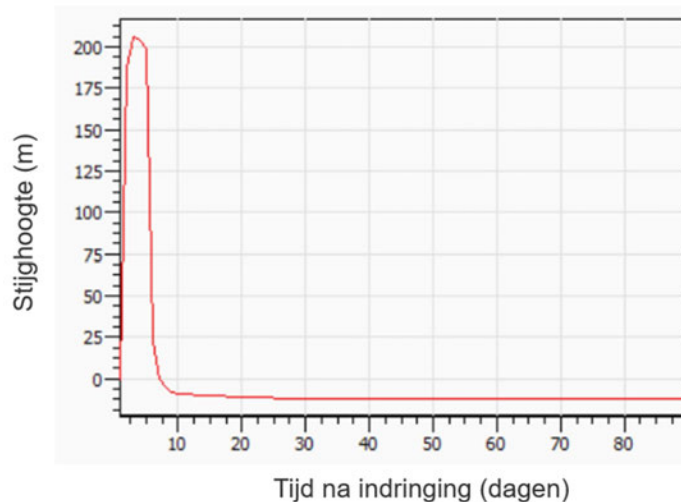
Figuur 3-3. Verloop stijghoogte in cel pekelindringing.



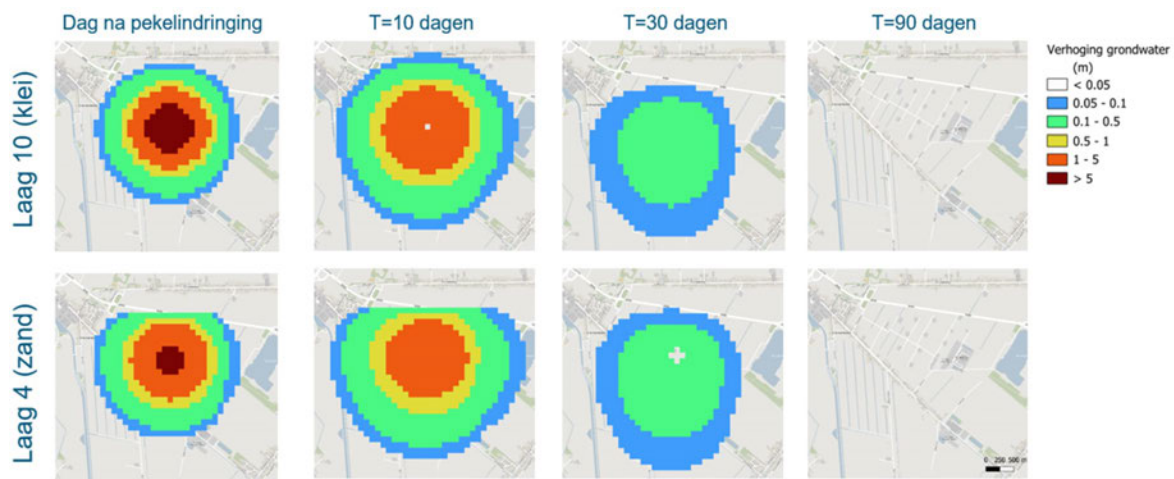
Figuur 3-4. Ruimtelijk verloop stijghoogte bij pekelindringing.

3.1.3 Indringing van 8600 m³ onder de kleilaag

- Bij initiële pekelindringing neemt de stijghoogte toe tot maximaal circa 205 meter op de locatie van de pekelindringing (Figuur 3-5).
- Deze stijghoogteverhoging plant zich voort in tijd en ruimte, en is ook waarneembaar in bovenliggende zandlaag (Figuur 3-6).
- Na initiële verhoging neemt de stijghoogte met tijd en ruimte snel af. Na 90 dagen is de berekende verhoging nergens meer groter dan 5 cm.
- De reden dat de stijghoogteverhoging in de zandlaag (laag 3) in noordelijke richting is afgetopt is dat daar de weerstand in de ondergrond (Peelklei; laag 3) ontbreekt.



Figuur 3-5. Verloop stijghoogte in cel pekelindringing.

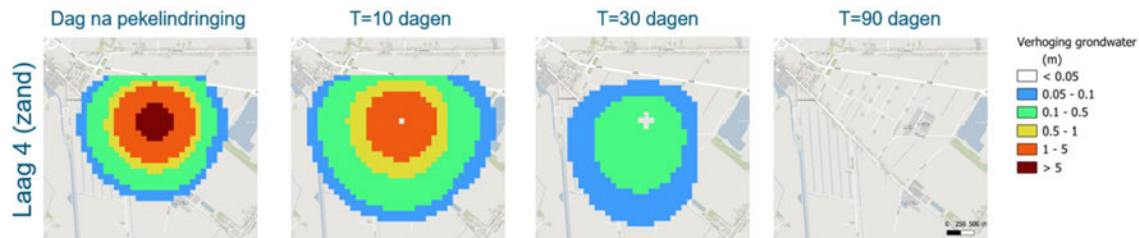


Figuur 3-6. Ruimtelijk verloop stijghoogte bij pekelindringing.

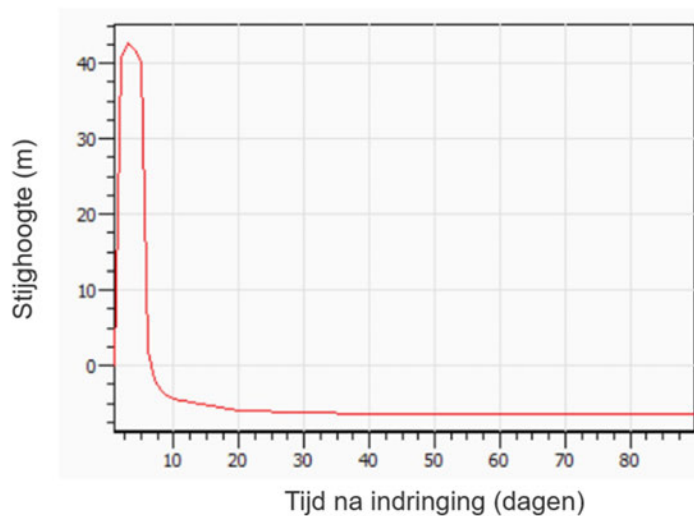
3.1.4 Indringing van 8600 m³ boven de kleilaag

- Bij initiële pekelindringing neemt de stijghoogte toe tot maximaal circa 43 meter op de locatie van de pekelindringing (Figuur 3-7).

Deze stijghoogteverhoging plant zich voort in tijd en ruimte (



- Figuur 3-8).
- Na initiële verhoging neemt de stijghoogte met tijd en ruimte snel af. Na 90 dagen is de berekende verhoging nergens meer groter dan 5 cm.
- De reden dat de stijghoogteverhoging in de zandlaag (laag 3) in noordelijke richting is afgetopt is dat daar de weerstand in de ondergrond (Peeloklei; laag 3) ontbreekt.



Figuur 3-7. Verloop stijghoogte in cel pekelindringing.



Figuur 3-8. Ruimtelijk verloop stijghoogte bij pekelindringing.

3.1.5 Resumé

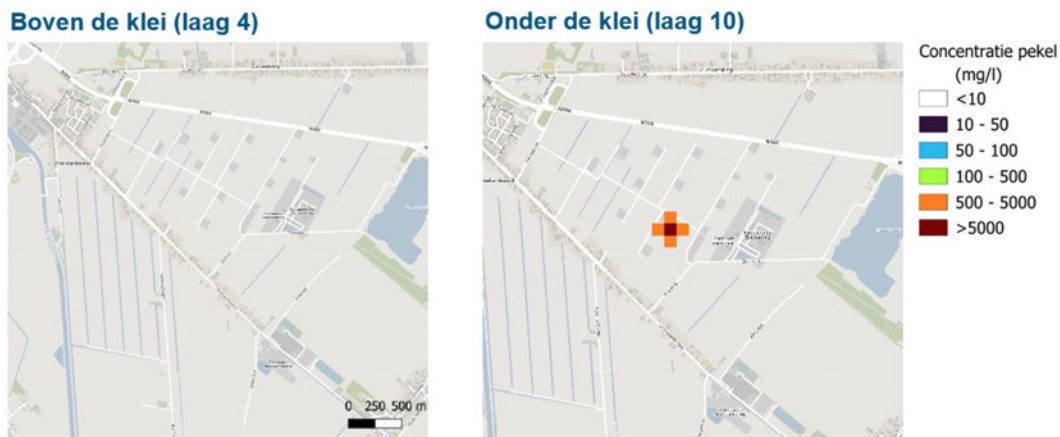
In ieder scenario zorgt pekelindringing voor een verhoging van de berekende stijghoogte (druk golf). Deze verhoging is initieel hoog t.o.v. van de omliggende stijghoogte vooral ter plaatse van de pekelindringing (18 – 205 meter; afhankelijk van het scenario). Door de verhoging gaat het grondwater stromen om weer in evenwicht te komen. Dit evenwicht wordt in alle scenario's relatief snel bereikt (30-90 dagen).

3.2 Berekende verspreiding van pekel in het grondwater vanuit de doorbraaklocatie zonder onttrekking of natuurlijke gradient

In dit onderzoek zijn de effecten van de pekelindringing op de pekelconcentraties in het grondwater onderzocht. De snelste verplaatsing treedt op tijdens de drukgolf die ontstaat na pekelindringing, als de gradiënten in het grondwater het grootst zijn (advectief transport). Als na maximaal 90 dagen de stijghoogte weer in evenwicht is wordt enkel nog het transport door dichtheidsverschillen berekend (zout water is zwaarder dan zoet water). Dit transport is traag en kan zowel in de horizontale als verticale richting (naar beneden) plaatsvinden. Hieronder zijn voor de verschillende scenario's de berekende pekelconcentraties na 10 jaar weergegeven. In dit scenario is nog niet gerekend met een natuurlijke gradiënt in het grondwater of een eventuele gradiënt in het grondwater door een onttrekking (dit is wel gedaan in hoofdstuk 3.3).

3.2.1 Indringing van 3500 m³ onderste kleilaag (geen onttrekking)

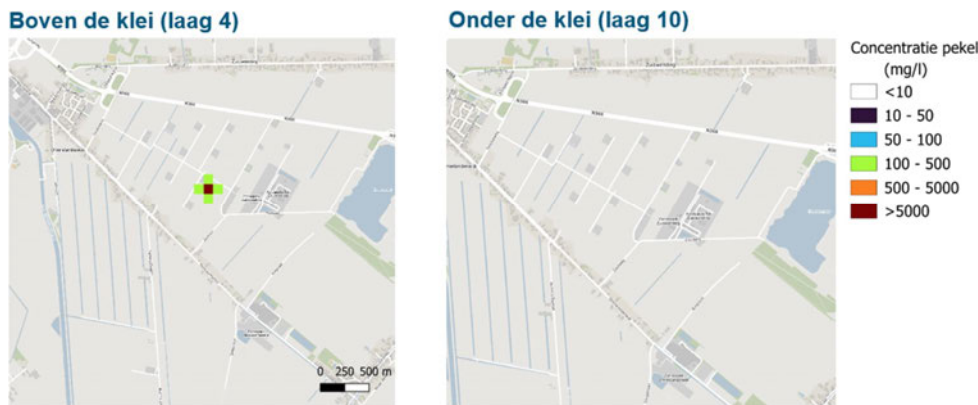
- De pekelconcentratie in de onderste kleilaag (laag 10; 120-130 m -mv) is na 10 jaar nog steeds het hoogst in de cel van indringen (Figuur 3-9).
- Alleen in de direct naastgelegen cellen van dezelfde laag (100 m afstand) wordt na 10 jaar een verhoogde chlorideconcentratie (>10 mg/l) berekend.
- In de bovenliggende zandlaag worden geen verhoogde chlorideconcentraties (>10 mg/l) berekend.



Figuur 3-9. Ruimtelijke verbreiding pekelconcentratie 10 jaar na indringen.

3.2.2 Indringing van 3500 m³ boven de kleilaag (geen onttrekking)

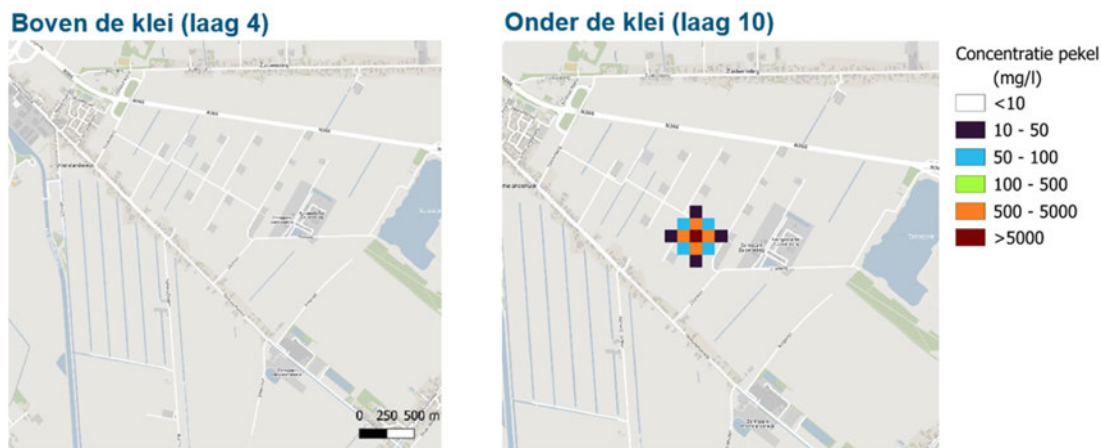
- De pekelconcentratie in het zand (laag 4; 60-70 m -mv) is na 10 jaar nog steeds het hoogst in de cel van indringen (Figuur 3-10).
- Alleen in de naastgelegen cellen van dezelfde laag (200 m afstand) wordt na 10 jaar een verhoogde chlorideconcentratie (>10 mg/l) berekend.
- Onder in de onderliggende kleilaag worden na 10 jaar geen verhoogde chlorideconcentratie (>10 mg/l) berekend.



Figuur 3-10. Ruimtelijke verbreiding pekelconcentratie 10 jaar na indringen.

3.2.3 Indringing van 8600 m³ onder de kleilaag (geen onttrekking)

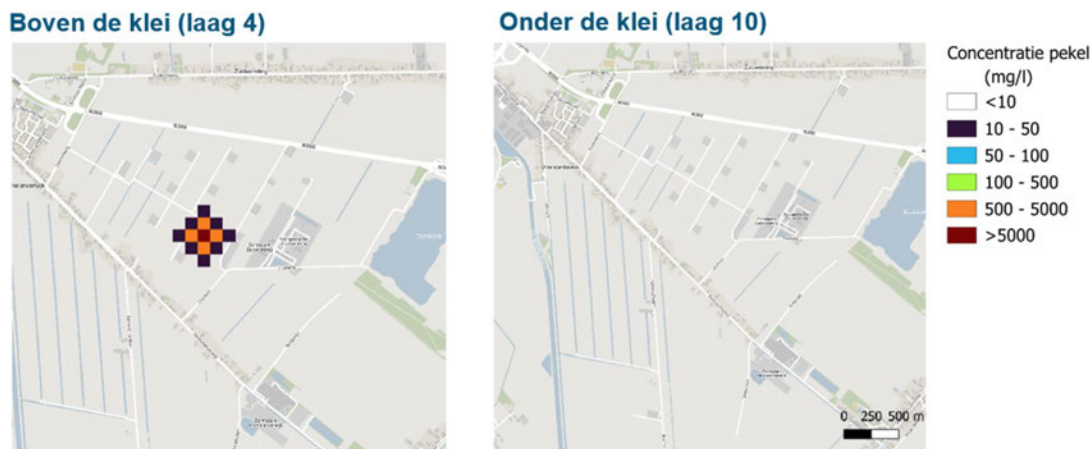
- De pekelconcentratie in de onderste kleilaag (laag 10; 120-130 m -mv) is na 10 jaar nog steeds het hoogst in de cel van indringen (Figuur 3-11).
- Alleen in de naastgelegen cellen (200 m afstand) wordt na 10 jaar een verhoogde chlorideconcentratie (>10 mg/l) berekend.
- In de bovenliggende zandlaag worden geen verhoogde chloride concentratie (>10 mg/l) berekend.



Figuur 3-11. Ruimtelijke verbreiding pekelconcentratie 10 jaar na indringen.

3.2.4 Indringing van 8600 m³ boven de kleilaag (geen onttrekking)

- De pekelconcentratie in het zand (laag 4; 60-70 m -mv) is na 10 jaar nog steeds het hoogst in de cel van indringen (Figuur 3-12).
- Alleen in de naastgelegen cellen (200 m afstand) wordt na 10 jaar een verhoogde chlorideconcentratie (>10 mg/l) berekend.
- Onder in de onderliggende kleilaag worden na 10 jaar geen verhoogde chloride concentratie (>10 mg/l) berekend.



Figuur 3-12. Ruimtelijke verbreiding pekelconcentratie 10 jaar na indringen.

3.2.5 Resumé

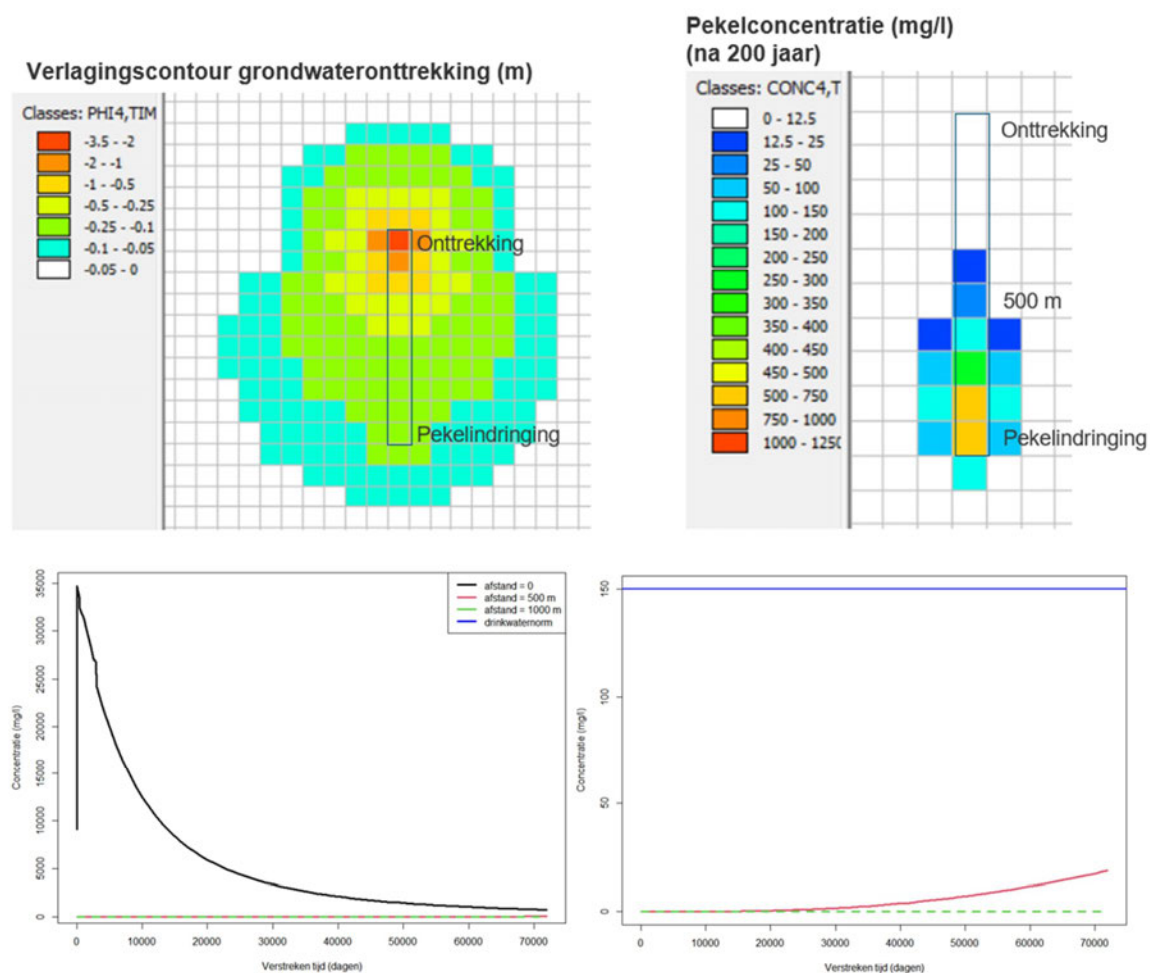
In ieder scenario zorgt pekelintringing voor een verhoogde pekelconcentratie in de cel van indringen. Vandaaruit verspreidt de pekel zich naar de onderliggende en naastgelegen cellen. De meeste verspreiding vindt plaats gedurende de eerste fase door het advectieve transport bij de drukgolf als gevolg van de pekelintringing. Daarna is de verspreiding traag en wordt deze gedreven door het dichtheidsverschil tussen de pekel en het zoete grondwater. Na 10 jaar worden verhoogde pekelconcentraties berekend op 100-200 meter afstand van het punt van pekelintringing (in alle scenario's).

3.3 Berekende verspreiding van pekel in het grondwater vanuit de doorbraaklocatie met onttrekking en natuurlijke gradiënt

In hoofdstuk 3.2 is de pekелverplaatsing zonder gradiënt in het grondwater berekend. In werkelijkheid is sprake van een natuurlijke gradiënt in het grondwater waardoor de pekel zich kan verplaatsten (0.15 m/km ter plaatse van Zuidwending, van zuid naar noord). Daarnaast zou er 1 km noordelijk van Zuidwending een ASV kunnen komen die deze gradiënt versterkt. De effecten van het natuurlijke verhang en de door een onttrekking gecreëerde gradiënt in het grondwater op de verplaatsing van de pekel zijn in deze paragraaf onderzocht.

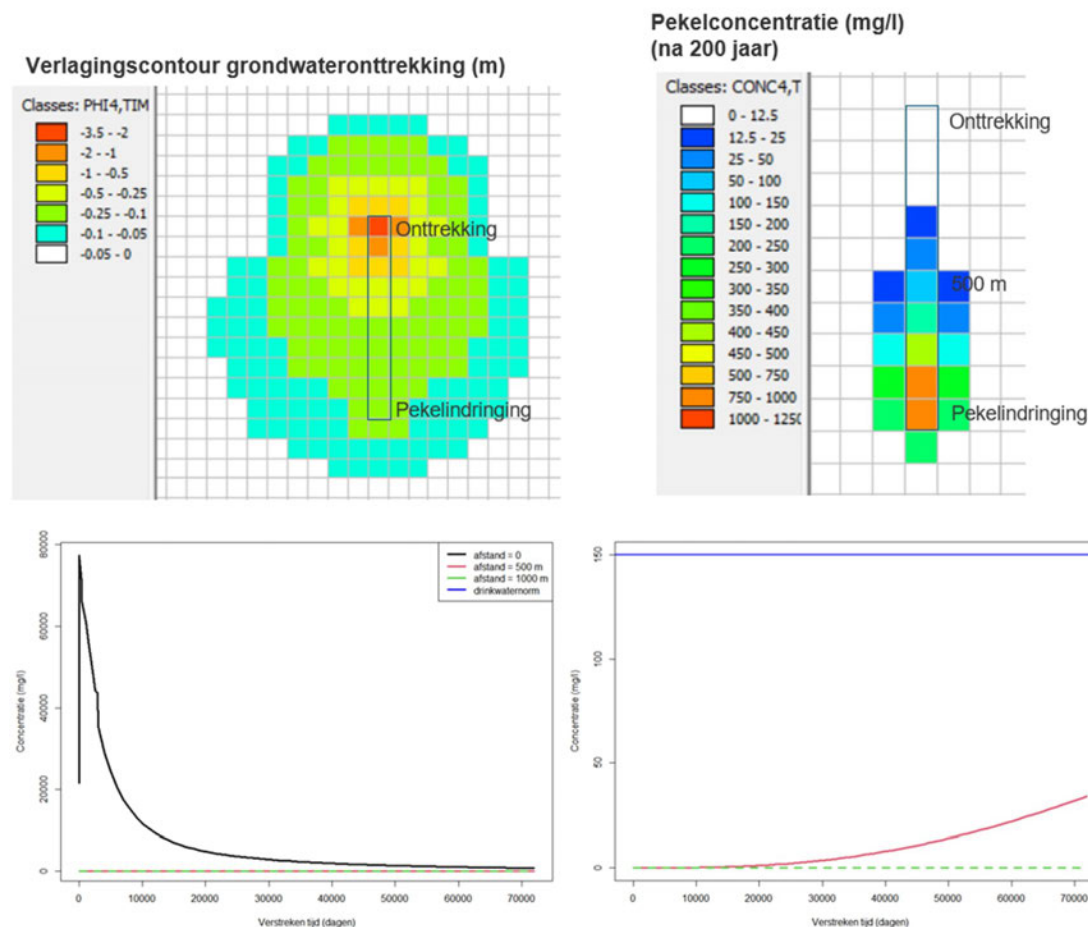
3.3.1 Indringing van 3500 m³ boven de kleilaag

- Het natuurlijke verhang in het grondwater (0.15 m/km in noordelijke richting) en een onttrekking 1 km noordelijk van de pekelindringing zorgt voor een gradiënt in het grondwater. Bij pekelindringing in de zandlaag zorgen het natuurlijke verhang en de onttrekking ervoor dat het pekelschijfje zich zeer langzaam richting de onttrekking gaat verplaatsen (onderstaande figuren).
- De pekelverplaatsing is traag. Na 200 jaar is de pekelconcentratie op 500 m afstand richting de onttrekking 19 mg/liter en op 1 km afstand richting de onttrekking 0.003 mg/liter. Deze blijft hiermee ruim onder de drinkwaternorm (150 mg/l).
- De piekconcentratie neemt daarmee ook sterk af met de afstand (factor 10⁶ verschil tussen de initiële concentratie bij indringen en de concentratie die de onttrekkingsputten na 200 jaar bereikt).



3.3.2 Indringing van 8600 m³ boven de kleilaag

- Het natuurlijke verhang in het grondwater (0.15 m/km in noordelijke richting) en een onttrekking 1 km noordelijk van de pekelindringing zorgt voor een gradiënt in het grondwater. Bij pekelindringing in de zandlaag zorgen de natuurlijke gradiënt en onttrekking ervoor dat het pekel zich zeer langzaam richting de onttrekking gaat verplaatsen (onderstaande figuren).
- De pekelverplaatsing is traag. Na 200 jaar is de pekelconcentratie op 500 m afstand richting de onttrekking 35 mg/liter en op 1 km afstand richting de onttrekking 0.006 mg/liter. Deze blijft hiermee ruim onder de drinkwaternorm (150 mg/l).
- De piekconcentratie neemt daarmee ook sterk af met de afstand (factor 10⁶ verschil tussen de initiële concentratie bij indringen en de concentratie die de onttrekkingsputten na 200 jaar bereikt).



3.3.3 Resumé

Pekelindringing zorgt voor een verhoogde pekelconcentratie in de cel van indringen. Vandaar verspreidt de pekel zich naar de onderliggende en naastgelegen cellen (advectief transport en dichtheidsstroming). Een grondwateronttrekking zorgt voor een gradiënt in het grondwater. Deze gradiënt zorgt ervoor dat de pekel zich extra gaat verplaatsen. Dit proces is erg langzaam. Na 200 jaar concentratie is de berekende concentratie op 500 m afstand 18-34 mg/l en de concentratie op 1000 m afstand (punt van de onttrekking) 0.003-0.006 mg/l. Deze concentraties liggen ruimschoots onder deze drinkwaternorm van 150 mg/l.

4 Conclusies

In geval van een hydraulic fracture zou er een pekелuitstroom gedurende 4 dagen naar bovenliggende lagen (de overburden) kunnen optreden. Met een conceptueel grondwatermodel zijn de effecten van deze pekелuitstroom op stijghoogte en chloride verplaatsing berekend. De conclusies van deze berekeningen zijn als volgt.

- Pekelindringing zorgt op 120-130 m -mv (scenario 1) / 60-70 m -mv (scenario 2) voor een verhoging van de berekende stijghoogte (druk-golf) op de plek van pekelindringing, die:
 - o Initieel hoog is t.o.v. van de omliggende stijghoogte (vooral ter plaatse van de pekelindringing) waardoor er tijdelijk veel grondwaterstroming is.
 - o In tijd en ruimte snel afneemt
- De fracture en daardoor veroorzaakte druk-golf brengt pekелwater in de ondergrond.
 - o De initiële druk-golf zorgt er voor dat pekел zich rondom het uitstroompunt in een straal van enkele honderden meters verspreidt (advectief transport; vooral in horizontale richting). Dit vindt plaats direct na de pekelindringing en loopt door over een tijdspanne van 30-90 dagen.
 - o Daarna wordt nog een beperkte pekелverplaatsing berekend door dichtheidsstroming. Deze verloopt zeer traag (en is binnen de beschouwde tijdspanne ook verwaarloosbaar ten opzichte van het advectieve transport bij pekelindringing).
- Een onttrekking en het natuurlijke verhang in grondwater zorgt voor een gradiënt in het grondwater waardoor de pekел zich gaat verplaatsen.
 - o De pekелverplaatsing is traag. Na 200 jaar is de pekелconcentratie op 500 m afstand richting de onttrekking 18-35 mg/liter en op 1 km afstand richting de onttrekking 0.003-0.006 mg/liter. Deze blijft daarmee ruim onder de drinkwaternorm van 150 mg/liter.
 - o De piekconcentratie neemt daarmee ook sterk af met de afstand (factor 10^6 verschil tussen de initiële concentratie bij indringen en de concentratie die de ontrekkingsputten na 200 jaar bereikt).

In het conceptuele model zijn de volgende conservatieve aannames gecombineerd:

- Geen pekелopname door de caprock; het volledige pekелvolume en de daarmee samenhangende druk-golf wordt zonder reductie doorgezet tot boven de caprock.
- Geen lokale vervorming van de ondergrond als gevolg van de hoge druk bij pekelindringing.
- Hoge volumes pekелwater (conservatief resp. worst case berekening door CCC).
- Een grondwateronttrekking op geringe afstand van de pekelindringing (1 km), op de meest zuidelijke rand van het ASV-zoekgebied.

Zelfs met deze combinatie van conservatieve aannames blijven de effecten van een eventuele doorbraak verwaarloosbaar klein. Dit geldt zowel voor de drukverplaatsing als voor de verspreiding van de pekел vanaf de doorbraaklocatie.

Bijlage 1 – interpretatie diepe boringen nlog.nl

Locatie	Interpretatie uit boorbeschrijving.	Letterlijke beschrijving onderste kleilaag
ZWD-A8	Zand (0-50), klei (50-70) Zand (70-100), klei (100-145), zand (greensand, 145-155)	Clay, grey, soft, sand, colourless clear to milky white, yellowish, fine to medium grained, partly coarse grained, subangular to rounded, moderately sorted; accessoric: fossils (shell fragments, often foraminifera), pyrite, mica.
ZWD-A7	Zand (0-43 m), Zandige klei (43-75 m), Zand (75-88), Klei (88-130 m), zand (greensand, 130-146)	greenish-grey, plastic clay with fine-grained quartz sand weakly consolidated, fine grained glauconitic sandstone (greensand; 130.0 to 146.0 m)
ZWD-A6	Zand (0-40), klei (40-50), zand (50-60), klei (60-)	Clay, grey, unconsolidated, containing fine-grained, quartz sand, fossil debris and accessory pyrite and mica. Clay, grey, unconsolidated, containing fine-grained, glauconitic quartz sand ('greensand').
ZWD-A5	Zand (0-35 m), klei (35-45 m), zand (45-65 m), 60 klei en zand afgewisseld (65-140)	Clay, grey; sand, clear to milky white, partly yellowish or reddish, fine to medium grained, subangular to rounded, moderately sorted; accessoric: mica.
ZWD-A4	0-80 m zand met af en toe klei, 76-135 m klei met af en toe zand	The lower half is dominated by greenish-grey plastic clay with fine-grained quartz sand and occasional mica, pyrite, and fossil debris
ZWD-A3	0-75 zand, 75-126.4	Clay, grey, unconsolidated, containing fine-grained, quartz sand, fossil debris and accessory pyrite and mica; increasingly sandy and glauconitic, greenish to dark green ('greensand') below 120 m.
ZWD-A2	Zand (0-75), klei (75-117.5)	Below 85.0 m MD the lithology is greenish-grey plastic clay with fine to medium-grained quartz sand and occasional mica, pyrite, and fossil debris. Greensand last 10 m
ZWD-A1	Zand (0-40), klei (40-55), zand (55-70), Klei (70-120)	Clay, grey; sand, clear to milky white, partly yellowish or reddish, fine to medium grained, subangular to rounded, moderately sorted; accessoric: mica.
ZWD-KNZ5	Zand (0-45), zand en klei (45-75), klei (75-150)	Klei, grijsgroen, zwak fijn zandig, sterk kalkhoudend.

ZWD-KNZ6	Zand (0-55), klei (55-129)	Kleisteen, grijsgroene klei, grijze klei.
ZWD-KNZ7	Vergelijkbaar met KNZ6	Vergelijkbaar met KNZ6
ZWD-KNZ9	Zand (0-33), klei (33-44), zand (44-49), klei (49-58), zand (58-70), klei (70-120)	Greenisch-grey.
ZWD-KNZ1	Zandige klei (0-55), klei (55-132)	Donkere grauwgrijze compacte klei
ZWD-KNZ8	Zand (0-50), klei (50-54), zand (54-63), klei (63-116)	Greenisch clay with some peat.very sticky.
ZWD-KNZ2	Vergelijkbaar met KNZ5	Vergelijkbaar met KNZ5
ZWD-KNZ4	Zand (0-45), klei bruin (45-85), klei donkergroen (85-118), klei donkergrijs (118-139).	Donkergroen/donkergrijs, kalkhoudend, enkele zandsteenbankjes.