

**Technische Bijlage  
bij  
Meet- en regelprotocol zoutwinning 'Havenmond'  
v.3.2**



Vorbereiding: Frisia Zout B.V. en  
Well Engineering Partners B.V., Hoogeveen

Auteurs ir. E.R. de Lange  
dr.ir. A. Duquesnoy

Versie: 3.2

Publicatiedatum: 14 december 2012

Goedkeuring: ir. E.R. De Lange, Mining Manager Frisia  
D. van Tuinen, Director Frisia



## Inhoud

1	Inleiding.....	3
2	Zoutwinning en bodemdaling.....	4
3	Methode Frisia bodemdalingprognoses.....	5
4	Bepaling belasting kombergingsgebieden door zoutwinning.....	7
5	Zoutproductie en waterbalans .....	9
6	Holruimtemetingen .....	10
7	Meting van bodemdaling .....	10
8	Bodemdalingsprognoses .....	11
9	Onzekerheidsanalyse .....	13
10	Referenties.....	16
	Bijlage 1: Ligging van vergunninggebied Havenmond.....	17
	Bijlage 2: Stratigrafie van het Zechstein zoutpakket in Havenmond .....	18
	Bijlage 3: Stationaire winning van steenzout uit een caveerne .....	19
	Bijlage 4: Tabellen met resultaten bodemdalingsmodellering Barradeel en Barradeel II voor de periode 1999-2011 .....	20
	Bijlage 5: Posities van de permanente en mobiele GPS stations in Havenmond, de waterpasnetwerken op land en de verwachte Pleistocene bodemdaling na 32 miljoen ton zoutproductie uit vier Havenmond cavernes.....	21
	Bijlage 6: Havenmond productieplanning per caveerne per jaar.....	23
	Bijlage 7: Tabel prognose Pleistocene bodemdaling voor winningsplan Havenmond (zonder en met cavernegroei) .....	24
	Bijlage 8: Prognose toename Pleistocene bodemdaling Havenmond (diepste punt) voor vier scenario's met cumulatieve zoutproductie van 32 miljoen ton .....	25
	Bijlage 9: Zeespiegelstijgingssnelheid kombergingsgebied Vlie .....	26
	Bijlage 10: Ontwikkeling gebruiksruimten kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep .....	27
	Bijlage 11: Bodemdaling GPS station Barradeel (cavernes BAS-1 en BAS-2) .....	28
	Bijlage 12: Grensgebieden Vlie & Marsdiep met gridcellen 50 x 50m.....	29

## 1 Inleiding

Op 2 januari 2012 heeft de minister van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I, thans EZ) de winningsvergunning Havenmond verleend (besluit met kenmerk ETM/EM/11110679 ) aan Frisia Zout B.V., hierna Frisia genoemd. De ligging van Havenmond is getoond in bijlage 1. Het vergunningsgebied Havenmond ligt geheel binnen het kombergingsgebied Vlie van de Waddenzee, maar raakt tevens aan het kombergingsgebied Marsdiep. De zoutwinning geschiedt op basis van een door de minister van EL&I goed te keuren winningsplan.

Voordat de winning van zout onder de Waddenzee kan beginnen moet Frisia aantonen dat wordt voldaan aan het criterium genoemd in de Planologische Kernbeslissing Derde Nota Waddenzee, deel 4 (verder de Pkb genoemd), namelijk dat er wetenschappelijk gezien redelijkerwijs geen twijfel bestaat dat er geen schadelijke gevolgen zijn voor de natuur- en landschapswaarden van de Waddenzee.

Frisia heeft een Meet-en regelprotocol Havenmond opgesteld (ref.1) ten genoegen van de Inspecteur-generaal der Mijnen (IGM). Het protocol beschrijft een beheerscyclus, die Frisia periodiek en stapsgewijze volgt om ervoor te zorgen dat in de Waddenzee de door de winning te verwachten bodemdaling op het Pleistocene niveau binnen de vastgestelde gebruiksruimte(n) van de betrokken kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep blijft.

Het nu voorliggende rapport vormt de Technische Bijlage bij het Meet- en regelprotocol Havenmond. Het bevat de volgende onderwerpen:

1. de toegepaste techniek om het zout te winnen,
2. de methoden om de bodemdaling op Pleistoceen niveau als gevolg van de zoutwinning betrouwbaar te voorspellen,
3. de metingen van cavernegroei
4. de bodemdalingsmetingen,
5. een onzekerheidsanalyse van de bodemdaling aan de hand van verschillende productiescenario's en
6. de verwachte bodemdaling na afsluiting van de Havenmond cavernes.

## 2 Zoutwinning en bodemdaling

Frisia wint op land in vergunninggebied Barradeel sinds 1995 en in vergunninggebied Barradeel II sinds 2003 steenzout (haliet) op een diepte van 2,5 tot 3 km door middel van oplosmijnbouw, waardoor zij een jarenlange ervaring heeft opgebouwd met diepe zoutwinning. De zoutwinning in het winningsgebied Havenmond zal op identieke wijze plaatsvinden. Via een boorput injecteert men warm, zoet condensaat water in de zoutlaag. In de top van de Stassfurt zoutlaag, waaruit Frisia het zout wint, bevindt zich een ongeveer 60 m dikke carnalliethoudende zoutlaag (zie bijlage 2). Voor het behouden van de juiste pekelsamenstelling voor de zoutproductie van Frisia mag een operationele caveerne niet in contact komen met deze carnalliethoudende zoutlaag. In het zoutvoorkomen ontstaan holten (cavernes), die met verzadigde pekkel zijn gevuld. De pekkel in de caveerne heeft een lagere temperatuur dan het omringende zout. Ter beheersing van de ontwikkeling van de hoogte van een caveerne wordt met behulp van dieselolie een zogenaamde 'oliespiegel' in het dak van de caveerne aangebracht. De olie drijft op de pekkel en vormt een in water onoplosbare laag, die de zoutoplossing in zijwaartse en neerwaartse richting dwingt. Het zout heeft een gemiddelde zuiverheid van 95%. De onoplosbare bestanddelen (circa 5%) vallen neer op de bodem van de caveerne en vormen daar een los gepakte hoop (de 'sump') met een geschatte porositeit van 25 à 35% na compactie.

In de cavernes heerst tijdens de winning een veel lagere druk dan in het omringende steenzout. Vanwege de hoge temperatuur van het steenzout op die diepte (circa 110 °C) is het zout enigszins vloeibaar. Als gevolg van het grote drukverschil over de cavernewand kan het zout gemakkelijk naar de cavernes vloeien (kruipen). De zoutkruip veroorzaakt samendrukking van de cavernes (convergentie). Na enkele jaren ontstaat een dynamisch evenwicht, waarbij het volume aan opgelost zout gelijk is aan het volume van de zoutkruip naar de cavernes. Deze productiefase wordt de 'stationaire' winningfase genoemd en het proces is op caverneniveau getoond in bijlage 3. De bovenliggende gesteentelagen vullen het ondergrondse volumetekort op, dat veroorzaakt wordt door het zout dat de cavernes instroomt, door instantane elastische vervorming, waardoor vrijwel gelijktijdig bodemdaling optreedt.

De vanwege de zoutwinning in Havenmond verwachte bodemdaling op Pleistoceen niveau manifesteert zich vrijwel geheel buitendijks. Als de belasting door bodemdaling van de beide kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep binnen de vastgestelde gebruiksruimten blijft wordt door natuurlijke sedimentatie de dalingskom meteen opgevuld. Ondanks een daling van de ondergrond zal er geen werkelijke daling van de wadbodem plaatsvinden. De positionering van de cavernes is zo gekozen dat op land (de kuststrook) de daling van de waterkerende zeedijk zo beperkt mogelijk wordt gehouden.

Na afloop van de actieve winningfase wordt een caveerne afgesloten en stijgt de pekeldruk in de caveerne als gevolg van zoutkruip en pekelopwarming. De caveerneconvergentie neemt zeer sterk af, waardoor de bodemdaling vrijwel tot stilstand komt. Er zijn aanwijzingen uit bepaalde modelstudies dat de bodemdaling in het diepste punt van de kom zelfs kan terugveren ('rebound'). Sinds oktober 2004 voert Frisia op land in de Barradeel caveerne BAS-2 een lange-termijn insluittest uit om de processen met betrekking tot een afgesloten caveerne nauwkeurig te volgen. Tot nu toe is het optreden van rebound bij caveerne BAS-2 niet waargenomen, hoewel de pekeldruk in de caveerne al vrijwel gelijk is aan de gesteentedruk in het omringende zout (ref.2).

### 3 Methode Frisia bodemdalingprognoses

#### **Uitgangspunten**

De methode, die Frisia toepast om bodemdalingprognoses op te stellen tijdens de operationele winningsfase en na afloop van de winning, is gebaseerd op een aantal uitgangspunten (ref.2). De belangrijkste uitgangspunten zijn:

- Het mogelijke terugveren van bodemdaling (rebound) vanwege lineaire zoutkruip wordt niet meegenomen in de prognoses.
- Na harde afsluiting van een caveerne neemt de caveerneconvergentie meteen zeer sterk af en komt de bodemdaling praktisch tot stilstand. Er treedt geen significante nadijende bodemdaling op en de dalingsnelheid is verwaarloosbaar (zichtperiode van meer dan 50 jaar).
- De vorm en het volume van de dalingkommen boven de cavernes kan men aan de hand van periodieke (semi- permanente) GPS-metingen, aangevuld met waterpassingen op en rond de Waddenzeedijk, modelleren met eenvoudige cirkelsymmetrische Gauss-krommen.

#### **Bodemdalingprognoses**

Vanwege een jarenlange ervaring met diepe cavernes hanteert Frisia een pragmatische methode om de caveerneconvergentie en de daardoor veroorzaakte bodemdaling te bepalen. Tijdens de actuele fase van de zoutwinning wordt voor de berekening van de caveerneconvergentie gebruik gemaakt van productiegegevens en volumebalansen en van de resultaten van holruimtemetingen. In geval van toekomstige zoutproductie wordt de caveerneconvergentie bepaald aan de hand van de productieplanning en een beredeneerde schatting van het pekervolume in de caveerne gedurende een stationaire winningperiode. In het kombergingsgebied Vlie worden de vorm en omvang van de dalingskom van een enkelvoudige caveerne bepaald met een Gaussisch kommodel, dat geijkt wordt met behulp van de resultaten van continue en periodieke GPS metingen aan op het Pleistoceen gefundeerde peilmerken. Door superpositie van de bodemdaling per caveerne wordt de samengestelde totale dalingkom verkregen. Bij deze methode van modellering wordt geen rekening gehouden met rebound. Na de operationele fase worden de cavernes hard ingesloten met een bepaald open restvolume aan pekels en treedt een fase in van verwaarloosbare bodemdaling. Dit betreft zowel het volume van de bodemdaling als de bodemdalingssnelheid in het kombergingsgebied.

Het convergentievolume  $V_{con}$  van een caveerne wordt als volgt bepaald:

$$V_{con} = V_{zout.prod} + V_{zout.cav.pekel} - (V_{cav.open} + V_{por.gebonden}),$$

waarin:

$V_{zout.prod}$  = cumulatieve zoutproductie, in  $m^3$  (met s.g. zout = 2,16 ton/ $m^3$ ),

$V_{zout.cav.pekel}$  = zoutvolume in de caveernepekels, gelijk aan 1/7 deel van het caveernevolume, in  $m^3$ ,

$V_{cav.open}$  = open caveernevolume, zoals gemeten met holruimtemetingen (zie Hoofdstuk 6) of bepaald uit een input/output volumebalans ('waterbalans', zie Hoofdstuk 5) of geschat op basis van toekomstige stationaire zoutwinning, in  $m^3$ ,

$V_{por.gebonden}$  = de in de porositeit van de 'sump' gebonden pekels, in  $m^3$ .

Uitgaande van een zoutzuiverheid van gemiddeld 95% (5% onoplosbare bestanddelen) en een standaard porositeit van de 'sump' van gemiddeld 30% (na compactie door zoutkruip) wordt het volume van de gebonden pekels als volgt berekend:

$$V_{por.gebonden} = 0,05 \times 0,3 \times (V_{zout.prod} + V_{zout.cav.pekel}).$$

Omdat  $V_{zout.prod} \gg V_{zout.cav.pekel}$  mag men aannemen:  $V_{por.gebonden} \sim 0,015 V_{zout.prod}$

Na enkele productie jaren blijken in het geval van de Barradeel cavernes de oplosnelheid van het zout en de toevloei van zout naar de cavernes vrijwel gelijk te zijn. Het totale vrije en gebonden pekervolume in de cavernes neemt bij deze stabiele zoutproductie niet of nauwelijks meer toe. In deze 'stationaire' winningfase (zie bijlage 3) is de toename van  $V_{con}$  vrijwel gelijk aan het volume van de momentane zoutproductie.

De vorm en omvang  $w(x,y)$  van de bodemdalingkom van een convergerende caveerne met de as van de caveerne op de positie  $(x_0, y_0)$  wordt beschreven met een eenvoudig cirkelsymmetrisch Gaussisch model (refs.3, 4) volgens:

$$w(x, y) = w_{max} \exp(-\gamma r^\delta) = \chi V_{con} \exp(-\gamma r^\delta)$$

In het eerste deel van deze formule is  $w_{max}$  de maximum bodemdaling in het centrum  $(x_0, y_0)$  van de dalingskom;  $\gamma$  is een variabele, die de afvlakking van de kom bepaalt;  $\delta$  is een variabele, die de steilheid van de kom bepaalt;  $r$  is de horizontale afstand van de positie  $(x, y)$  tot het centrum van de kom. Dit kommodel kan men met berekeningen optimaal passend maken aan de hoogteverschillen verkregen uit periodieke en permanente GPS metingen. Door het herhaaldelijke variëren van de waarden voor de komvariabelen  $(x_0, y_0, \gamma, \delta$  en  $w_{max})$  kan men een optimale passing bereiken, waarbij de hoogteverschillen tussen de individuele peilmerken en het kommodel tot een gemiddeld kleinste kwadraten restwaarde zijn gereduceerd. De aanpassing is optimaal als de gemiddelde restwaarde kleiner is dan de meetruis.

In het tweede deel van de formule is  $V_{con}$  het volume van de caveerneconvergentie. De factor  $\chi$  is een evenredigheidsconstante, die de verhouding aangeeft tussen het convergentievolume op caverneniveau en het diepste punt van de dalingskom aan het Pleistoceen.

In de tabellen van bijlage 4 zijn alle numerieke resultaten van de Gaussische modellering sinds juli 1999 voor de winningsvergunningen Barradeel en Barradeel II gepresenteerd (ref.5). Uit de tabellen volgt dat de vormparameters van de dalingskommen vrijwel constant zijn gedurende de zoutproductie. Voor rebound en komverflakking en verbreding zijn tot nu toe geen significante aanwijzingen gevonden. De factor  $\chi$  (aangeduid in de tabellen als 'mm/m<sup>3</sup> conv') is een evenredigheidsconstante, die de verhouding aangeeft tussen het convergentievolume op caverneniveau en de daling in het diepste punt van de dalingskom aan maaiveld. In het winningsgebied Barradeel blijkt de factor  $\chi$  behoorlijk constant te zijn. Er is geen significante neerwaartse trend waarneembaar. Na enkele jaren stabiliseert de factor op circa 9,5 à 10 cm daling in het diepste punt per miljoen m<sup>3</sup> caveerneconvergentie. Een ander belangrijk praktijkgegeven is de verhouding  $\psi$  (aangeduid in de tabellen als 'bowl/conv') tussen het caveerneconvergentievolume en het volume van de dalingskom aan maaiveld. In het winningsgebied Barradeel ligt deze verhouding gemiddeld over de tijd stabiel op 95%, ofwel:  $V_{kom} = 0,95 \cdot V_{con}$ .

Het Gaussische model zal ook worden gebruikt in Havenmond om de Pleistocene bodemdaling te voorspellen. In het geval van Havenmond gaat Frisia bij het opstellen van dalingprognoses op basis van productiescenarios bij voorkeur uit van de verhouding  $V_{kom} = V_{con}$ . Het volume van de bodemdalingkom kan niet groter worden dan het volume van de caveerneconvergentie.

## 4 Bepaling belasting kombergingsgebieden door zoutwinning

Door de zoutwinning in Havenmond treedt bodemdaling op in de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep. Het doel van het Meet- en regelprotocol Havenmond is om zorg te dragen dat de belasting (B) van een betrokken kombergingsgebied als gevolg van de Pleistocene bodemdalingssnelheid (S), veroorzaakt door de zoutwinning in Havenmond, binnen de gebruiksruimte (G) blijft en zal blijven. Er wordt hierbij rekening gehouden met reserveringen in de gebruiksruimte voor overige delfstofwinning, zoals gaswinning in het gebied.

De belasting van een kombergingsgebied is gedefinieerd als de over 6 jaar gemiddelde waarde van de Pleistocene bodemdalingssnelheid (periode tot 3 jaar terug en 3 jaar vooruit). De Pleistocene bodemdalingssnelheid  $S(J)$  van een kombergingsgebied op 1 januari van het kalenderjaar J kan op twee manieren worden bepaald, waarvoor holruimtemetingen en hoogteverschilmetingen aan vaste peilmerken essentiële informatie leveren. Deze metingen worden uitgevoerd volgens een meetplan, conform de artikelen 30 en 33, Mijnbouwbesluit. Het meetplan wordt door Frisia jaarlijks geactualiseerd en ter instemming ingediend bij de IGM. In het meetplan worden zowel de ruimtelijke bedekking van de peilmerken als ook de frequentie van de metingen en de toegepaste meettechnieken beschreven (refs.6, 7).

Methode 1:  $S(J)$  wordt bepaald uit de caverneconvergentie per jaar  $\Delta V_{con}$  met behulp van de verhouding  $\Delta V_{kom} = \Delta V_{con}$  en een Gaussische kommodel  $\Delta w(x, y, J)$  volgens:

$$\Delta w(x, y, J) = \chi \cdot \Delta V_{con}(J) \cdot \exp(-\gamma r^\delta),$$

waarin:  $\Delta V_{con}(J) = \Delta V_{zout.prod} + \Delta V_{zout.cav.pekel} - (\Delta V_{cav.open} + \Delta V_{por.gebonden})$ ,

met:

$\Delta V_{zout.prod}$  = jaarlijkse zoutproductie, in m<sup>3</sup>/jaar (met s.g. zout = 2,16 ton/m<sup>3</sup>),

$\Delta V_{zout.cav.pekel}$  = toename zoutvolume in de cavernepekel, gelijk aan 1/7 deel van de toename van het cavernevolumen, in m<sup>3</sup>/jaar,

$\Delta V_{cav.open}$  = toename van het open cavernevolumen, zoals gemeten met holruimtemetingen of bepaald uit een input/output volumebalans ('waterbalans') of geschat op basis van toekomstige stationaire zoutwinning, in m<sup>3</sup>/jaar,

$\Delta V_{por.gebonden}$  = toename van de in de porositeit van de 'sump' gebonden pekel, in m<sup>3</sup>/jaar.

De optimale waarden voor de komvariabelen ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $\gamma$  en  $\delta$ ) blijken in de winningsvergunningen Barradeel en Barradeel II in de loop der tijd vrijwel constant te zijn. Voor Havenmond worden deze parameters vooralsnog eveneens constant verondersteld, met  $\gamma = 4,35 \cdot 10^{-7}$  en  $\delta = 1,96$ .

Het bodemdalingsgebied wordt opgedeeld in gridcellen met standaardafmetingen van 50x50 m<sup>2</sup>. Er wordt vastgesteld welke gridcellen in het kombergingsgebied Vlie liggen en welke cellen in het kombergingsgebied Marsdiep. Nu kan men per kombergingsgebied de bodemdalingssnelheid S berekenen volgens

$$S(J) = \sum_{n=1}^k \frac{(\Delta w(x, y, J))_n \cdot ((x_n - x_{n-1}) \cdot (y_n - y_{n-1}))}{O} \dots (mm/ \text{jaar})$$

met: k = aantal gridcellen in een kombergingsgebied met bodemdaling  $\geq 1$  mm, en  
 O = oppervlakte van het betreffende kombergingsgebied.



De oppervlakte van kombergingsgebied Vlie bedraagt 668 km<sup>2</sup> en van Marsdiep 712 km<sup>2</sup> (refs.8, 9).

Methode 2: S(J) kan men ook bepalen met behulp van periodieke GPS-metingen aan diep-gefundeerde peilmerken, die representatief zijn gepositioneerd in de dalingskom, die door de zoutwinning ontstaat. Men kan een Gaussische kommodel  $\Delta w(x, y, J)$  maximaal passend maken aan de jaarlijkse hoogteverschillen verkregen uit de periodieke GPS-metingen door optimalisatie van de komparameters ( $x_0, y_0, \gamma, \delta$  en  $\Delta w_{max}$ ). Voor toekomstige jaren heeft men geen GPS meetgegevens ter beschikking. In dat geval kan men voor de volgende drie jaar vormvastheid van de dalingskom veronderstellen en de toename van het komvolume bepalen uit een op basis van de verwachte zoutproductie berekende toename  $\Delta w_{max} = X \cdot \Delta V_{con}$  van de daling in het diepste punt van de dalingskom.

$$\Delta w(x, y, J) = \Delta w_{max}(J) \cdot \exp(-\gamma r^\delta) = \chi \cdot \Delta V_{con}(J) \cdot \exp(-\gamma r^\delta)$$

Per kombergingsgebied wordt de bodemdalingssnelheid weer berekend volgens:

$$S(J) = \sum_{n=1}^k \frac{(\Delta w(x, y, J)_n * ((x_n - x_{n-1}) * (y_n - y_{n-1})))}{O} \dots (mm/ \text{jaar})$$

met: k = aantal gridcellen in een kombergingsgebied met bodemdaling  $\geq 1$  mm, en  
 O = oppervlakte van betreffende kombergingsgebied.

Met behulp van de bovenstaande twee methodes kan men  $S_{Vlie}(J)$  en  $S_{Marsdiep}(J)$  bepalen over een periode van 6 jaar om tot de belasting van de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep te komen. Op 1 januari van kalenderjaar J is de belasting B(J) gedefinieerd als:

$$B(J) = \frac{S(J-3) + S(J-2) + S(J-1) + S(J) + S(J+1) + S(J+2)}{6} \dots (mm/ \text{jaar})$$

De belasting door zoutwinning dient binnen de beschikbare gebruikruimte G van het betreffende kombergingsgebied te blijven. De gebruikruimte G is het meegroeivermogen M van het kombergingsgebied, verminderd met de belasting van dat meegroeivermogen door (autonome) relatieve zeespiegelstijging  $Z_{rZSS}$ . De snelheid aan het begin van kalenderjaar J van de relatieve zeespiegelstijging  $Z_{rZSS}(J)$  is vastgelegd in een scenario (refs.9, 11). Een herziening van dit zeespiegelstijgingsscenario vindt 5-jaarlijks plaats. Het lange-termijn meegroeivermogen M voor zowel Vlie als Marsdiep is vastgesteld op 5 mm/jaar. Derhalve geldt voor de gebruikruimten van Vlie en Marsdiep op 1 januari van kalenderjaar J:

$$G(J) = 5 - Z_{rZSS}(J) \quad (mm/jaar).$$

Vervolgens kan men controleren of de vastgestelde belasting door zoutwinning past binnen de beschikbare gebruikruimten. Er wordt hierbij rekening gehouden met reserveringen R(J) in de gebruikruimten Vlie en Marsdiep voor overige delfstofwinning, zoals gaswinning in het gebied.

Toetsen:  $B_{Vlie}(J) < G(J) - R_{Vlie}(J)$  en  $B_{Marsdiep}(J) < G(J) - R_{Marsdiep}(J)$  ?



## 5 Zoutproductie en waterbalans

Frisia beschikt op uurbasis over de injectie- en productievolumes per caverne. Eenmaal per dag (einde van de middag) wordt de pekconcentratie gemeten. Uit deze meetgegevens kan men het geproduceerde volume zout en een waterbalans bepalen. Met deze getallen kan men een schatting maken van het totale pekvolume aanwezig in de caverne. Het cavernevolumen  $V_{cav}$  wordt bepaald uit de gegevens per uur ( $\Delta V$ -waarden) door sommatie van de verschillen tussen het volume water, dat in de caverne geïnjecteerd wordt, en het volume water, dat in de vorm van pek uit de caverne geproduceerd wordt. De waterbalans ziet er als volgt uit:

$$V_{cav} = \sum (\Delta V_{water, in} - \Delta V_{water, uit}),$$

waarin:  $\Delta V_{water, uit} = \Delta V_{pek, uit} - \Delta V_{zout, prod}$ , zodat:

$$V_{cav} = \sum (\Delta V_{water, in} + \Delta V_{zout, prod} - \Delta V_{pek, uit}).$$

In bovenstaande berekening is geen rekening gehouden met het systematische volumeverlies, dat optreedt wanneer men zout oplost in water. Indien men zoet water maximaal verzadigt met zout heeft de pek een volume dat ongeveer 5% kleiner is dan de som van de samenstellende volumes zoet water en zout. Het uit de waterbalans berekende cavernevolumen wordt dus overschat. Naarmate de tijd verstrijkt wordt de afwijking tussen het berekende cavernevolumen en het feitelijke volume groter. Door de term  $\Delta V_{pek, uit}$  in de formule voor  $V_{cav}$  met een factor 1,05 te vermenigvuldigen kan men dit systematische effect compenseren.

Andere foutenbronnen, wat kan leiden tot overschatting of onderschatting van het cavernevolumen, zijn meetfouten van de debietmeters, die de vloeistofstroom eenmaal per uur meten, en verstoorde waterbalansen vanwege het naverzadigen in een andere caverne van de onderverzadigde pek afkomstig uit een nieuwe caverne tijdens de aanloopfase.

Het uit de waterbalans berekende cavernevolumen bevat ook de pek, die gebonden zit in de sump. Dit volume wordt als volgt berekend (zie hoofdstuk 3):  $V_{por, gebonden} \sim 0,015 V_{zout, prod}$ . Het gebonden pekvolume is klein ten opzichte van het open cavernevolumen, ook als in de stationaire winningfase het open cavernevolumen bij toenemende cumulatieve zoutproductie ongeveer constant blijft.

Uit het cavernevolumen en de zoutproductie kan men de toename van het convergentievolumen van een caverne over een periode  $\Delta t$  als volgt berekenen:

$$\Delta V_{con}(\Delta t) = V_{zout, prod}(t + \Delta t) - V_{zout, prod}(t) - \{V_{cav}(t + \Delta t) - V_{cav}(t)\}.$$

Als voor een bepaalde caverne uit een vergelijking van de zoutproductie en de waterbalans een toename van het convergentievolumen  $\Delta V_{con}(\Delta t)$  sinds de laatste holruimtekening van meer dan 200.000 m<sup>3</sup> resulteert, wordt er in het volgende kwartaal een volledige holruimtekening uitgevoerd. In de stationaire winningsfase komt een convergentievolumen van 200.000 m<sup>3</sup> overeen met een zoutproductie van circa 430.000 ton. De waterbalans wordt zodoende periodiek gecontroleerd en, indien nodig, gecorrigeerd aan de hand van de resultaten van holruimtekeningen.

## 6 Holruimtemetingen

De vorm en het volume van de open, met pekkel gevulde ruimte van de caverne kan men meten met behulp van akoestische holruimtemetingen (sonar echometing). De bodem van de caverne wordt gevormd door een poreuze 'sump'. Het volume van de gebonden pekkel, die zich in de sump bevindt, kan men niet met sonar metingen bepalen. Het gebonden pekkelvolume is klein vergeleken met het open volume. Uit de sonar metingen berekent men met een nauwkeurigheid van circa 5% het openstaande volume van een caverne.

Een belangrijke functie van de metingen is het volgen van de vormontwikkeling van de bovenzijde van de caverne. Hieruit kan men afleiden of het oliekussen de uitloging van zout naar boven volgens plan afremt, of de cavernehals en het cavernedak de gewenste vorm hebben en of er nog voldoende zoutbuffer tussen cavernedak en de erboven gelegen carnalliethoudende zoutlaag erboven aanwezig is. De frequentie van de holruimtemetingen wordt vastgelegd in een jaarlijks bij de IGM in te dienen meetplan, conform artikel 33, Mijnbouwbesluit.

In operationele cavernes verricht men jaarlijks holruimtemetingen in delen van de caverne (meestal dakbereik) of in de gehele caverne. Als voor een bepaalde caverne uit een vergelijking van de zoutproductie en de waterbalans een toename van het convergentievolume sinds de laatste holruimtemeting van meer dan 200.000 m<sup>3</sup> resulteert, wordt er in het volgende kwartaal een volledige holruimtemeting uitgevoerd. Voordat een caverne definitief wordt afgesloten verricht men, indien technisch mogelijk, nog een eindmeting, waarbij de caverne in zijn geheel gemeten wordt.

De holruimtemetingen hebben een nauwkeurigheid van ongeveer 5%. De gemeten open cavernevolumes kunnen dus 5% groter of kleiner zijn dan waarmee gerekend is voor de bepaling van de caverneconvergentie en bodemdaling. Het maximale effect hiervan op de bodemdaling kan bepaald worden aan de hand van de verwachte eindvolumes van de Havenmond cavernes. Het verwachte eindvolume bedraagt ongeveer 1.000.000 m<sup>3</sup> per caverne. Dit volume vertaalt zich via de factor  $\chi$  (zie Hoofdstuk 3) in 5 mm onzekerheid in bodemdaling per caverne. De cavernes liggen in elkaars invloedssfeer. Als in de ene caverne het feitelijke volume groter is dan gemeten en in een andere caverne juist het omgekeerde het geval is, middelt de genoemde onzekerheid waarschijnlijk nog enigszins over het caverneveld uit.

## 7 Meting van bodemdaling

### ***Permanente en periodieke GPS metingen Havenmond***

Het meten van de bodemdaling als gevolg van zoutwinning in Havenmond wordt uitgevoerd volgens een jaarlijks bij de IGM in te dienen meetplan, conform artikel 30, Mijnbouwbesluit. De bodemdaling in de Waddenzee zal worden gemeten op het Pleistocene niveau met behulp van in het Pleistoceen gefundeerde diepe peilmerken op diverse representatieve locaties. De meeste peilmerken worden periodiek gemeten door middel van een jaarlijkse meetcampagne met mobiele GPS stations. Twee peilmerken vlak boven de cavernes worden continu gemeten met vaste GPS stations door middel van differentiële GPS metingen naar de referentiestations Barradeel en Zweins. De continue metingen hebben een signaleringsfunctie om eventuele afwijkingen van de verwachte bodemdalingssnelheid snel te kunnen detecteren. Het totale aantal meetposities op het wad is vanwege de lokale omstandigheden noodgedwongen beperkt, maar voldoende in aantal om periodiek de vormvastheid van de cumulatieve dalingsschotel te controleren.

De coördinaten van het referentiestation Zweins worden jaarlijks geijkt vanuit het nationale GPS netwerk van 06-GPS en met Geo++ software nauwkeurig bepaald. De ruwe GPS waarnemingen hebben een standaard afwijking van enige centimeters. Uit deze metingen worden trendlijnen berekend op basis van voortschrijdende gemiddelden over een periode van 16 weken (8 weken terug en 8 weken vooruit). De trendlijnen zijn op millimeterniveau nauwkeurig en lopen 8 weken achter op de actuele waarnemingen.

Daarnaast wordt er op de kuststrook vijfjaarlijks gewaterpast in een netwerk van vaste peilmerken ter bewaking van de Waddenzeedijk. De deformatiemeting wordt uitgevoerd met tweede orde waterpassingen volgens Rijkswaterstaat normen, die zijn gepubliceerd in 'Specificaties van de doorgaande waterpassing instandhouding NAP-net'. Op de kaart van bijlage 5 is de infrastructuur van de peilmerken op het Wad en op land getoond.

De precisie van de trendlijnen uit de differentiële GPS metingen en van de tweede orde waterpassing ligt in dezelfde orde van grootte en bedraagt ongeveer 3 mm. Vanwege zich over vele jaren voortzettende meetreeksen van GPS waarnemingen en waterpassingen zal een eventuele systematische fout in een van de twee meetssystemen ongetwijfeld aan het daglicht treden. Dit verhoogt de betrouwbaarheid van de metingen.

Sinds 2007 is het aansluitpunt van het waterpasmeetnet het ondergrondse merk OA 2760 (Zweins). De hoogte van dat merk is vastgelegd met een nauwkeurigheid van circa 3 millimeter.

## 8 Bodemdalingsprognoses

Vanuit een boorlocatie op land ten noorden van de zoutfabriek van Frisia, worden gefaseerd vier sterk gedeveerde boringen verricht naar het centrale deel van het vergunninggebied Havenmond. De voorlopige RD coördinaten van de boorlocatie zijn:  $X = 157.610$  en  $Y = 578.000$ . Op de kaart van bijlage 5 zijn de ondergrondse posities van het middelpunt van de cavernes weergegeven. De cumulatieve bodemdalingkom, die door de convergerende Havenmond cavernes wordt veroorzaakt, zal een vorm hebben die vrijwel gelijk is aan die van de in elkaars nabijheid liggende cavernes BAS-1 en BAS-2. De betrouwbaarheid van de theoretische dalingsmodellen is in de praktijk van de productie uit de cavernes BAS-1 t/m 4 voldoende aangetoond. Na ongeveer 3 - 4 jaar winning zal de caverneconvergentie gelijk zijn aan de oplosnelheid van het zout ('stationaire winningfase'). De resulterende Pleistocene bodemdaling is goed te voorspellen, omdat de vorm van de kom behoorlijk vast ligt en de inhoud van de kom rechtstreeks door het volume geproduceerd zout bepaald wordt. Praktijkervaring met zoutwinning onder stationaire omstandigheden leert dat elke 100.000 m<sup>3</sup> geproduceerd steenzout uit een bepaalde caveerne een bodemdaling van 0,95 à 1 cm boven die caveerne veroorzaakt.

### **Standaardscenario**

Met als uitgangspunt de huidige productieplanning uit het winningsplan Havenmond (ref.10) is de te verwachten bodemdaling berekend. De productieplanning op jaarbasis en per caveerne is afgebeeld in de figuur van bijlage 6. Het zout heeft een soortelijk gewicht van 2,16 ton/m<sup>3</sup>. De prognose op basis van het winningsplan wordt het standaardscenario genoemd. In bijlage 5 is de verwachte Pleistocene bodemdalingkom na afloop van 32 miljoen ton zoutproductie uit vier cavernes getoond. De bodemdalingkom is het cumulatieve eindresultaat van vier onderling verschoven bodemdalingkommen na afloop van 8 miljoen ton zoutproductie per caveerne. Elke caveerne heeft een openstaand eindvolume van 1 miljoen m<sup>3</sup>. De cumulatieve daling in het diepste punt bedraagt 103 cm en het totale komvolume is 10,8 miljoen m<sup>3</sup>.

In de tabel van bijlage 7 is het standaardscenario volgens het huidige winningsplan op jaarbasis uitgewerkt. De te verwachten Pleistocene bodemdaling in cm/jaar is gespecificeerd voor het diepste punt van de cumulatieve dalingskom voor twee varianten. In de tabel is geen rekening gehouden met het feit dat de dalingskommen van de cavernes op enige afstand van elkaar liggen, waardoor de gezamenlijke dalingskom afvlakt. Het totale dalingscijfer is de directe som van de bijdragen van de vier cavernes en is daardoor circa 5% groter dan berekend wordt met niet-samenvallende cavernepositities. In de eerste variant ontstaat er tijdens de zoutproductie geen openstaand cavernevolumen. In de tweede variant neemt het openstaande cavernevolumen lineair met de tijd toe tot een eindvolume van 1 miljoen m<sup>3</sup> per caverne. In de figuur van bijlage 8 is de jaarlijkse ontwikkeling van de cumulatieve bodemdaling in het diepste punt weergegeven voor de twee varianten.

De variant zonder groei van het cavernevolumen geeft de maximaal mogelijke bodemdaling aan als gevolg van de zoutproductie ('worst case' scenario), maar heeft alleen werkelijkheidswaarde voor het geval dat de cavernes na productiebeëindiging met een minimaal eindvolume verlaten zouden moeten worden. Bovendien zal in de praktijk de bodemdaling in afwijking van de rekenvariant met cavernegroei aanvankelijk minder dan lineair toenemen met het productievolumen aan steenzout, doordat het cavernevolumen vooral groeit gedurende de beginfase van de productie en vervolgens in de stationaire winningfase stabiliseert. De Pleistocene bodemdaling zal waarschijnlijk niet meteen na productiestart waarneembaar zijn. Vanuit ervaring op land wordt met circa 2 jaar vertraging rekening gehouden, voordat Pleistocene bodemdaling door zoutwinning significant waarneembaar wordt.

#### **Minimum en maximum scenario's**

Naast het standaardscenario zijn ook een minimum en een maximum productiescenario bestudeerd. In het minimum scenario wordt jaarlijks 0,82 miljoen ton zout gewonnen en in het maximum scenario is dat 1,5 miljoen ton. Ook bij deze scenario's is uitgegaan van een cumulatieve zoutproductie van 32 miljoen ton en wordt een openstaand eindvolume van 1 miljoen m<sup>3</sup> per caverne verondersteld. In bijlage 8 is de jaarlijkse ontwikkeling van de cumulatieve bodemdaling in het diepste punt weergegeven voor deze scenario's. Na beëindiging van de productie worden de cavernes hard afgesloten en vindt er geen toename van de bodemdaling meer plaats, zoals aangegeven door de horizontale lijnen in de figuur van bijlage 8.

#### **Belasting gebruiksruimten door zoutwinning**

De bodemdaling manifesteert zich vrijwel volledig buitendijks. De daling van een deel van de waterkerende dijk zelf blijft beperkt tot enkele centimeters. De dalingskom in de Waddenzee bevindt zich binnen de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep. Vanwege het voorzorgsbeginsel wordt bij de richtscenario's voor de gebruiksruimten uitgegaan van de zeespiegelstijging en gerelateerde zeespiegelstijgingsnelheid volgens het high IPCC scenario (80 cm stijging in een eeuw). Er treedt een afnemende trend op in de beschikbare gebruiksruimten. In bijlage 9 is de verwachte zeespiegelstijgingsnelheid getoond voor het hoge stijgingsscenario.

Uitgaande van de laatste herziening van het beleidsscenario voor de zeespiegelstijgingsnelheid ten behoeve van gaswinning onder de Waddenzee (ref 11), is in bijlage 10 getoond hoe volgens de richtscenario's de gebruiksruimten van de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep zich in de loop van de tijd verkleinen en eind 2036 tot nul gereduceerd zijn. Er is rekening gehouden met de gaswinning uit het veld Zuidwal en de eventuele toekomstige gaswinning uit het Pollendam veld met respectievelijk 0,12 mm/jaar en 0,10 mm/jaar, dus in totaal 0,22 mm/jaar, over de gehele lengte van de gebruiksruimte. Het is momenteel onbekend of en zo ja hoeveel gebruiksruimte in kombergingsgebied Marsdiep vanwege bodemdaling door gaswinning gereserveerd moet worden. In de figuren 1 en 2 van bijlage 10 is de benutting van de gebruiksruimten van respectievelijk Vlie en Marsdiep door de toekomstige zoutwinning van Frisia

voor het standaardscenario met cavernegroei in beeld gebracht (refs.12, 14). Volgens het huidige winningplan Havenmond start de zoutproductie in 2015. Zoals figuur 1 aangeeft past het standaardscenario tot ongeveer het jaar 2028 geheel binnen het richtscenario voor de gebruiksruimte van kombergingsgebied Vlie. Vervolgens dient naar huidige inzichten de zoutproductie in de periode 2029 – 2036 naar nul afgebouwd te worden. Uit figuur 2 van bijlage 10 blijkt dat de zoutwinning verwaarloosbare gebruiksruimte vergt in het kombergingsgebied Marsdiep. Afhankelijk van het vastgestelde beleidsszenario voor de zeespiegelstijgingssnelheid kan het zijn dat ook na 2036 zout productie mogelijk is binnen de gebruiksruimten.

## 9 Onzekerheidsanalyse

De onzekerheidsanalyse concentreert zich op factoren en omstandigheden, die rechtstreeks van invloed zijn op de benutting van de gebruiksruimten van de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep. De dalingsprognoses zijn aan de conservatieve kant, omdat de caverneconvergentie volledig wordt vertaald in Pleistocene bodemdaling. Naar huidige inzichten is de beschikbare gebruiksruimte van Vlie voor de zoutwinning begin 2034 ten einde, afhankelijk van de ontwikkeling van gaswinningsinvloeden en in zeespiegelstijgingsszenario. De bodemdaling door zoutwinning in het kombergingsgebied Marsdiep is gekoppeld aan de zoutwinning in Vlie, zodat ook in Marsdiep de benutting van de gebruiksruimte begin 2034 stopt.

### ***Ontwikkeling open cavernevolumes***

Een belangrijke factor, die van invloed is op de benutting van de gebruiksruimte en op het winbare steenzoutvolume, is de groei van het openstaande cavernevolumen tijdens productie. Als men rekening houdt met openstaande cavernevolumes is het bodemdalingvolume bij identieke productiehoeveelheden significant kleiner. Gezien de nagestreefde hoge productiesnelheid groeit een producerende cavernen binnen enkele jaren naar een 'steady state' volume van ongeveer 1 miljoen m<sup>3</sup>. In de beginperiode blijft de bodemdaling dus ver achter bij het volume van het aan de ondergrond onttrokken zout. De cavernes zijn gevuld met verzadigde pekkel, waarin ongeveer 1/7 deel van het zoutlichaam zit opgelost, waar zich nu de cavernen bevindt. Aan elke cavernen wordt dus 6/7 deel, ofwel 857.150 m<sup>3</sup> zout (1.855.715 ton), onttrokken zonder dat die hoeveelheid op dat moment bijdraagt aan bodemdaling. In geval van 32 miljoen ton zoutwinning uit vier cavernes met elk een eindvolume van 1 miljoen m<sup>3</sup> draagt dus een geproduceerd zoutvolume van in totaal circa 3,4 miljoen m<sup>3</sup> niet bij aan de bodemdaling. Met cavernegroei kan men bij een gelijke belasting van het kombergingsgebied dus meer zout produceren.

Aan het begin van 2034 is volgens het standaardscenario 19,08 miljoen ton zout, ofwel 8,84 miljoen m<sup>3</sup> gewonnen, waarbij het cumulatieve cavernevolumen is gegroeid tot 2,5 miljoen m<sup>3</sup> (zie bijlage 7). Aan de cavernes is 6/7 deel, ofwel 2,14 miljoen m<sup>3</sup> zout, onttrokken zonder bodemdaling. Het volume van de Pleistocene bodemdalingsschotel bedraagt dan 6,34 miljoen m<sup>3</sup> (-28%) en de daling in het diepste punt is ongeveer 63 cm (voor 'worst case' zonder cavernegroei circa 88 cm).

### ***Zoutproductie met de 'Hand aan de kraan'***

Volgens het 'Hand aan de kraan' principe zal Frisia de zoutwinning verminderen bij een dreigende overschrijding van een of beide gebruiksruimten. Tot dit principe hoort ook een remwegscenario waarmee wordt bereikt dat, indien de productie wordt gereduceerd of gestopt, de (naijende) bodemdalingssnelheid en de belasting van het kombergingsgebied dusdanig reduceren dat deze ook binnen de aansluitende richtscenario's voor de gebruiksruimten blijven. In de praktijk van de zoutwinning in het winningsgebied Barradeel is aangetoond, dat de bodemdaling vrijwel meteen tot stilstand komt indien de zoutproductie wordt beëindigd. In de



figuur van bijlage 11 is het resultaat van de continue GPS metingen van de bodemdaling op de locatie Barradeel boven de cavernes BAS-1 en BAS-2 getoond. De GPS metingen tonen duidelijk aan dat de bodemdaling vrijwel onmiddellijk stopt als de zoutwinning beëindigd wordt en de cavernes onder hoge druk worden achtergelaten. In de eerste tabel van bijlage 4 is deze conclusie getalsmatig onderbouwd in de laatste twee regels.

### ***Bodemdaling na abandonnering van de Havenmond cavernes***

Door langdurige injectie van grote hoeveelheden relatief koud water is de temperatuur van de pekels in een caveerne en die van de omringende zoutwanden aan het einde van de actieve productiefase lager dan de oorspronkelijke temperatuur op die diepte. In de beginfase van de afsluiting van een diep gelegen caveerne wordt de drukopbouw in de caveerne overheerst door de zoutkruip. Zodra de cavernedruk in de buurt van de lokale lithostatische druk komt, is het drukverhogende effect van zoutkruip sterk verminderd. De stijging van de cavernedruk als gevolg van een geleidelijke temperatuurverhoging van de ingesloten pekels is minder dominant, maar houdt wel tientallen jaren aan. Door de zoutkruip en thermische expansie ontstaat er overtollig pekelsvolume in de caveerne. Onder bijna lithostatische druk sijpelt de overtollige pekels via kristalvlakken geleidelijk weg in het omringende zoutgesteente, vooral in opwaartse richting omdat daar de lithostatische druk lager wordt. Dit indringings- en weglekproces wordt permeatie of migratie genoemd.

Uit modellering van het permeatieproces (ref.13, basismodel Barradeel) blijkt dat het duizenden jaren duurt voordat een caveerne door zoutkruip volledig is dichtgedrukt. De carnalliethoudende zoutlaag, de anhydrietlaag en de honderden meters dikke Leine steenzoutlaag boven de caveerne verhinderen dat er in korte tijd een grote hoeveelheid pekels kan weglekken naar de veel poreuzere, vloeistofdoorlatende deklagen boven het Leine zout (zie stratigrafie bijlage 3). In het basismodel is een niet-lineair zoutkruipmechanisme toegepast. Voor een caveerne met een pekelsvolume van circa 450.000 m<sup>3</sup> bedraagt de pekelspermeatie in de beginfase ongeveer 90 m<sup>3</sup> per jaar. Volgens het model treedt er pas bodemdaling op circa 1000 jaar na definitieve afsluiting van een caveerne. Het potentieel aan bodemdaling als gevolg van het volledig dichtdrukken van een caveerne bedraagt in het diepste punt van de dalingskom maximaal 1 cm per 100.000 m<sup>3</sup> dichtgedrukt volume. Dit volledig dichtdrukken neemt duizenden jaren in beslag.

Lineaire zoutkruip versnelt het permeatie- en migratieproces aanzienlijk. In geval van lineaire zoutkruip bedraagt in de beginfase de permeatie ongeveer 1000 m<sup>3</sup> per jaar voor een lage lineaire kruipvariant en 5000 m<sup>3</sup> per jaar voor een hoge lineaire kruipvariant. In dit laatste geval wordt de caveerne in ongeveer 500 jaar geheel dichtgedrukt en bedraagt de naijlende bodemdaling als gevolg van permeatie ongeveer 2,5 cm in de eerste 100 jaar na afsluiting. Er treedt echter ook een ander verschijnsel op, rebound, dat de naijlende bodemdaling als gevolg van permeatie (meer dan) compenseert. Het zout kruipt vanaf kilometers afstand naar de verdwijnende caveerne en de bodemdaling wordt over een veel groter gebied gespreid dan nu het geval is. Per saldo levert de hoge lineaire kruipvariant ondanks een hoge permeatiesnelheid (en naijlende bodemdaling) al meteen na abandonnering een significante rebound op. Dit fenomeen wordt echter niet door de huidige praktijkresultaten bij de BAS cavernes ondersteund.

In het winningsgebied Havenmond liggen de cavernes ongeveer 300 m dieper (hogere druk en temperatuur) en de cavernevolumes zijn ongeveer tweemaal zo groot. Naar verwachting worden de beschreven permeatieprocessen hierdoor met een factor 3 à 4 versneld, maar ook dan duurt het honderden jaren, voordat naijlende bodemdaling gaat optreden.

Tenslotte is het hoogst onwaarschijnlijk dat de boorput na definitieve afsluiting een lekpad vormt naar hoger gelegen gesteentelagen. Gedurende de winningperiode raakt het gecementeerde traject van de boorput in het zout geheel omsloten door kruipend zout. De stalen verbuizing van de boorput is goed bestand tegen de maximale druk van het kruipende zout. De binnenkant van

de mantelverbuizing wordt tijdens het definitief verlaten van de boorput effectief afgesloten met mechanische pluggen en met cementkolommen in overeenstemming met geldende regelgeving op dit gebied. Aldus zal geen lekpad bestaan langs de binnenkant of de buitenkant van de boorput.

### ***Samenvatting onzekerheden in standaard dalingsprognose***

In de huidige standaard dalingsprognose Havenmond zitten de volgende onzekerheden, die voornamelijk van invloed zijn op het convergentievolume en dus op het volume van de dalingskom:

- Vertragingsduur van de waarneembare bodemdaling aan het Pleistocene oppervlak
- Volumeontwikkeling van de cavernes (cavernegroei) gedurende de productietijd
- Volume zoutproductie kan per jaar per caverne verschillen naar gelang caverneoperatie en zoutafzet of de eventuele in werking treding van het 'Hand aan de kraan' principe
- Na abandonnering van de cavernes zijn mate en tijdsduur van permeatieprocessen en naitjende bodemdaling afhankelijk van het overheersende type zoutkruipmechanisme.

Volgens de huidige ervaringen met dit type zoutwinning ligt de vorm van de dalingskom over de tijd nagenoeg geheel vast. Gezien de kleine standaarddeviatie van de GPS metingen zullen eventuele (plaatselijke) systematische afwijkingen van enkele centimeters tussen meting en prognose zeker gedetecteerd worden.

### ***Eindopmerking***

De geplande zoutproductie bedraagt 32 miljoen ton uit vier cavernes. Er is een bodemdalingprognose voor de eindsituatie na 32 miljoen ton zoutproductie met cavernegroei opgesteld, waarvan de contourenkaart in bijlage 5 is getoond. Volgens de productieplanning loopt de Havenmond productie door tot 2046. Echter, naar huidige inzichten loopt de gebruiksruimte voor Frisia van het kombergingsgebied Vlie tot maximaal het jaar 2034. Volgens de productieplanning van bijlage 7 is in dat jaar circa 19 miljoen ton zout gewonnen met een Pleistocene bodemdaling in het diepste punt van circa 63 cm (met cavernegroei). Een belangrijk aspect is dat zodra men stopt met actieve zoutwinning uit de cavernes en deze op hoge druk brengt de bodemdaling ook vrijwel meteen stopt.

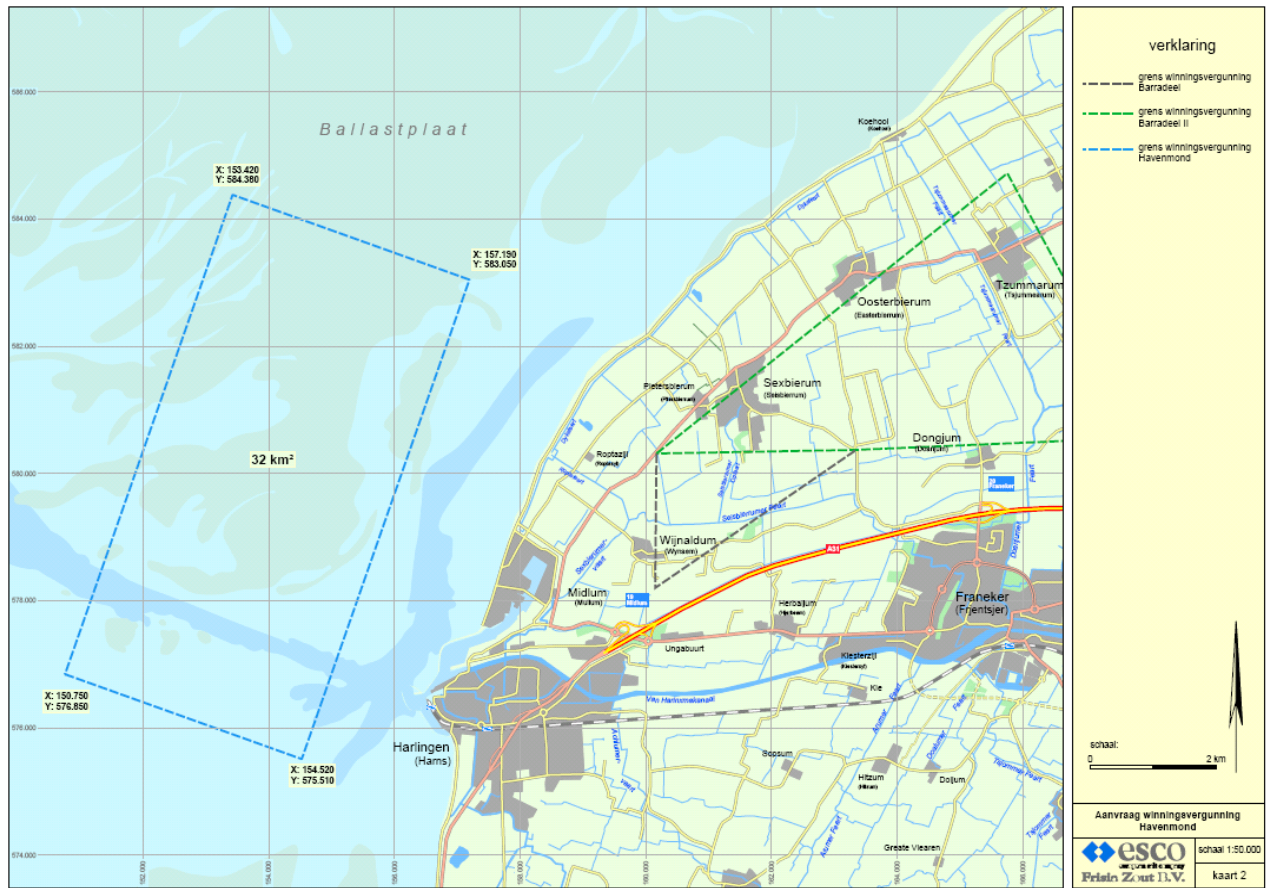
Of het eindjaar 2046 nog haalbaar is hangt volledig af van de ontwikkeling van de zeespiegelstijging. De toekomst zal uitwijzen of de geplande productie gehaald gaat worden door een verlengde gebruiksruimte na 2034 of door een verhoogde productie (binnen de gebruiksruimte) in de periode 2015-2034. Elke vijf jaar vindt er een formele evaluatie van de zeespiegelstijging en herziening van het zeespiegelstijgingsscenario plaats, op basis waarvan Frisia een nieuw productiescenario vaststelt, dat past binnen de resterende gebruiksruimte.



## 10 Referenties

1. Meet- en regelprotocol zoutwinning 'Havenmond' in de Waddenzee v.2, Frisia Zout B.V., 18 oktober 2012.
2. Bodemdalingprognoses en beheersing bodemdaling – Technische Bijlage bij Meet- en regelprotocol winningplan 'Barradeel II', Frisia Zout B.V., juni 2012.
3. Predictable and manageable subsidence above deep salt caverns, Fokker et al., SMRI Conference San Antonio (TX, USA), October 2000.
4. Aspects of deep salt mining – Salt mining by Frisia Zout, Fokker et al., SMRI Conference Bad Ischl (Austria), October 2002.
5. Bodemdaling door zoutwinning in de Barradeel en Barradeel II winningvergunningen, gebaseerd op de nauwkeurigheidswaterpassing van november 2011 en de GPS meetresultaten tot 15 februari 2012, Frisia Zout B.V., 3 mei 2012 (versie 3).
6. Meetplan Winningsgebied Havenmond, rev.3, Frisia Zout B.V., 14 maart 2012.
7. Bijlage: Toelichting Meetplan Havenmond, rev. 06, 29 feb 2012.
8. Het meegroeivermogen van de Westelijke Waddenzee, Deltares 1202685-000, 12 augustus 2010.
9. Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee, Alkyon, Emmeloord, juli 2010.
10. Winningsplan voor winningsvergunning 'Havenmond', Revision v.4 Final, Frisia Zout B.V., 9 oktober 2012.
11. Advies actualisering beleidscenario zeespiegelstijging voor bepaling gebruiksruimte voor gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, TNO, brief van 12 juni 2011 met kenmerk AGE 11-10.044.
12. Gebruiksruimte productiebandbreedte, Memo Arcadis, Divisie Water.
13. Frisia cavern abandonment BAS-3, Final, Frisia Zout B.V., 24 december 2010.
14. Ruimte voor zoutwinning Komberging Vlie, Adviesrapport TNO Bouw en Ondergrond, TNO Bouw en Ondergrond, 07 september 2010

## Bijlage 1: Ligging van vergunninggebied Havenmond

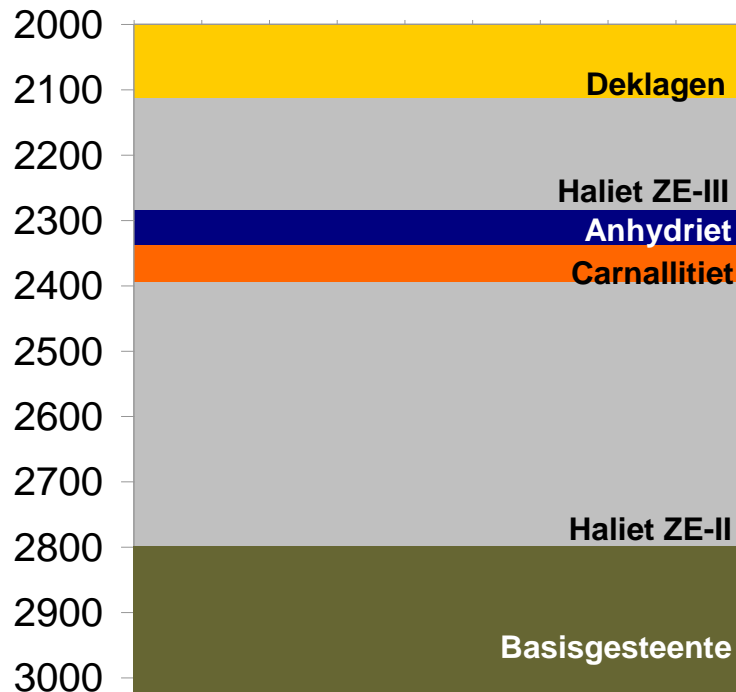


Het gebied van de winningvergunning 'Havenmond' is geheel buitendijks gelegen voor de kust van Harlingen in de gemeenten Harlingen en Terschelling en wordt omsloten door de punten:

- A: X = 154.520 Y = 575.510
- B: X = 157.190 Y = 583.050
- C: X = 153.420 Y = 584.380
- D: X = 150.750 Y = 576.850

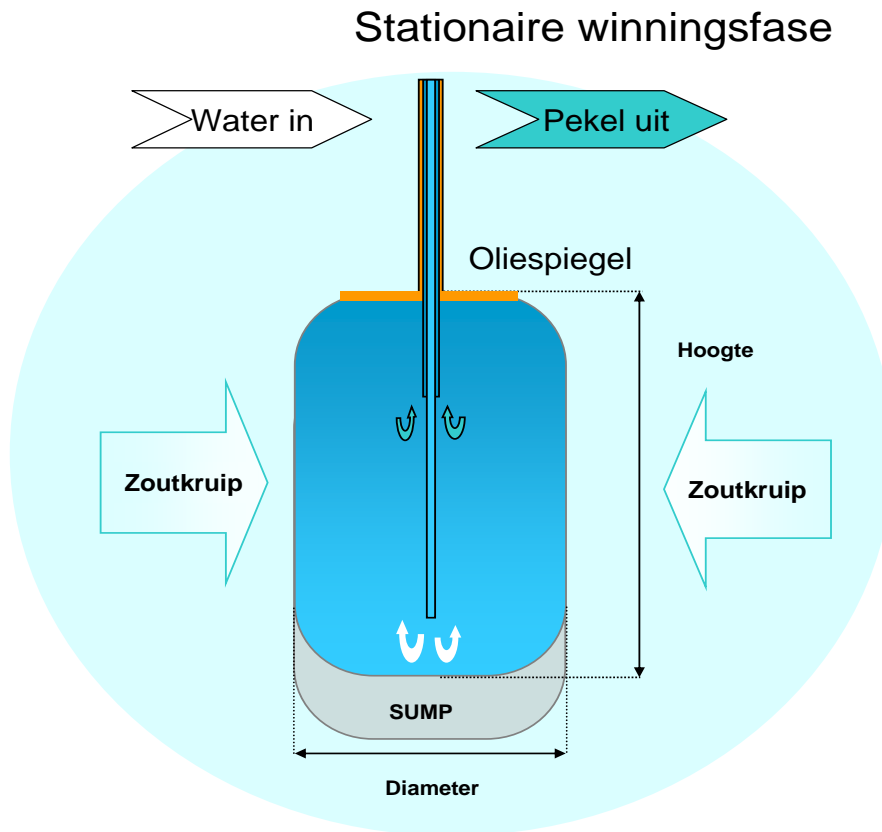
Het gebied heeft een oppervlakte van 32 km<sup>2</sup> (blauw gestippelde rechthoekige gebied).

## Bijlage 2: Stratigrafie van het Zechstein zoutpakket in Havenmond



De diepte op de linkeras is aangegeven in m TVD en is representatief voor winningvergunning Barradeel II. In winningvergunning Havenmond ligt de bodem van de zoutlaag ongeveer op 3250 m diepte, dus ongeveer 450 m dieper dan in de figuur is aangeduid. Het steenzout wordt gewonnen uit de Haliet ZE-II laag, die Stassfurt genoemd wordt. De steenzoutlaag Haliet ZE-III wordt Leine zout genoemd. Hieruit wint Frisia geen zout. De carnalliethoudende zoutlaag wordt als Carnallitiet aangeduid.

### Bijlage 3: Stationaire winning van steenzout uit een caverne



## Bijlage 4: Tabellen met resultaten bodemdalingsmodellering Barradeel en Barradeel II voor de periode 1999-2011

Samengestelde BAS-1-2 kom																
Periode	aug-96	sep-97	mei-98	jul-99	sep-00	sep-01	sep-02	feb-03	sep-03	sep-04	sep-05	sep-06	sep-07	jul-08	sep-09	nov-11
x-coordinaten	160.654	160.705	160.725	160.706	160.739	160.754	160.737	160.758	160.776	160.769	160.779	160.733	160.733	160.733	160.733	160.733
y-coordinaten	579.999	580.036	580.051	580.067	580.061	580.049	580.051	580.042	580.041	580.046	580.030	580.056	580.056	580.056	580.056	580.056
gamma	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07	4,07E-07
delta	1,981	1,963	1,967	1,982	1,990	1,987	1,980	1,975	1,973	1,976	1,967	1,973	1,965	1,968	1,964	1,962
w_max	3,5	27,1	47,6	108,2	159,5	198,9	233,4	258,2	279,7	310,0	320,9	319,9	326,3	324,8	325	328
volume m <sup>3</sup>	31.308	278.697	472.961	959.705	1.330.543	1.700.289	2.096.302	2.408.081	2.655.405	2.877.867	3.191.301	3.028.972	3.284.565	3.211.036	3.306.238	3.406.541
conv m <sup>3</sup>				1.006.569	1.515.997	1.952.649	2.392.599	2.627.227	2.831.967	3.246.896	3.332.653	3.374.391	3.396.652	3.424.304	3.428.369	3.471.792
mm/m <sup>3</sup> conv				1,07E-04	1,05E-04	1,02E-04	9,76E-05	9,83E-05	9,88E-05	9,55E-05	9,63E-05	9,48E-05	9,61E-05	9,48E-05	9,49E-05	9,46E-05
bowl/conv				95%	88%	87%	88%	92%	94%	89%	90%	97%	94%	96%	98%	
Overlap van bas-12	-4	-27	-48	-108	-159	-199	-233	-258	-280	-310	-321	-320	-326	-325	-325	-328
Overlap van VAC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Overlap van bas-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	-4	-5	-7
Overlap van bas-3 SDTR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Overlap van bas-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOM	-4	-27	-48	-108	-159	-199	-233	-258	-280	-310	-321	-321	-329	-329	-330	-335
Gemodelleerde GPS daling			-47	-106	-156	-195	-229	-253	-273	-303	-314	-314	-322	-321	-322	-326
Gemeten GPS daling										-304	-312	-318	-319	-320	-322	-322

Kom BAS-3																
Periode	aug-96	sep-97	mei-98	jul-99	sep-00	sep-01	sep-02	feb-03	sep-03	sep-04	sep-05	sep-06	sep-07	jul-08	sep-09	nov-11
x-coordinaten											163.031	163.101	163.101	163.101	163.101	163.101
y-coordinaten											581.155	581.177	581.177	581.177	581.177	581.177
gamma											4,30E-07	4,30E-07	4,35E-07	4,35E-07	4,35E-07	4,35E-07
delta											2,071	2,049	2,010	1,9993	2,004	1,995
w_max											23,8	55,4	75,1	85,6	102	115
volume m <sup>3</sup>											103.884	281.844	503.579	621.929	714.250	863.763
conv m <sup>3</sup>											260.481	512.152	693.445	778.840	927.368	1.004.798
mm/m <sup>3</sup> conv											9,14E-05	1,08E-04	1,08E-04		1,10E-04	1,15E-04
bowl/conv											40%	55%	73%	77%	86%	
Overlap van bas-12											-44	-33	-39	-37	-39	-42
Overlap van VAC											0	0	0	0	0	0
Overlap van bas-3											-24	-55	-75	-86	-102	-115
Overlap van bas-3 SDTR											0	0	0	0	0	0
Overlap van bas-4											0	0	0	0	0	-1
SOM											-68	-89	-114	-123	-142	-158
Gemodelleerde GPS daling											-50	-77	-101	-100	-129	-144
Gemeten GPS daling															-131	-142

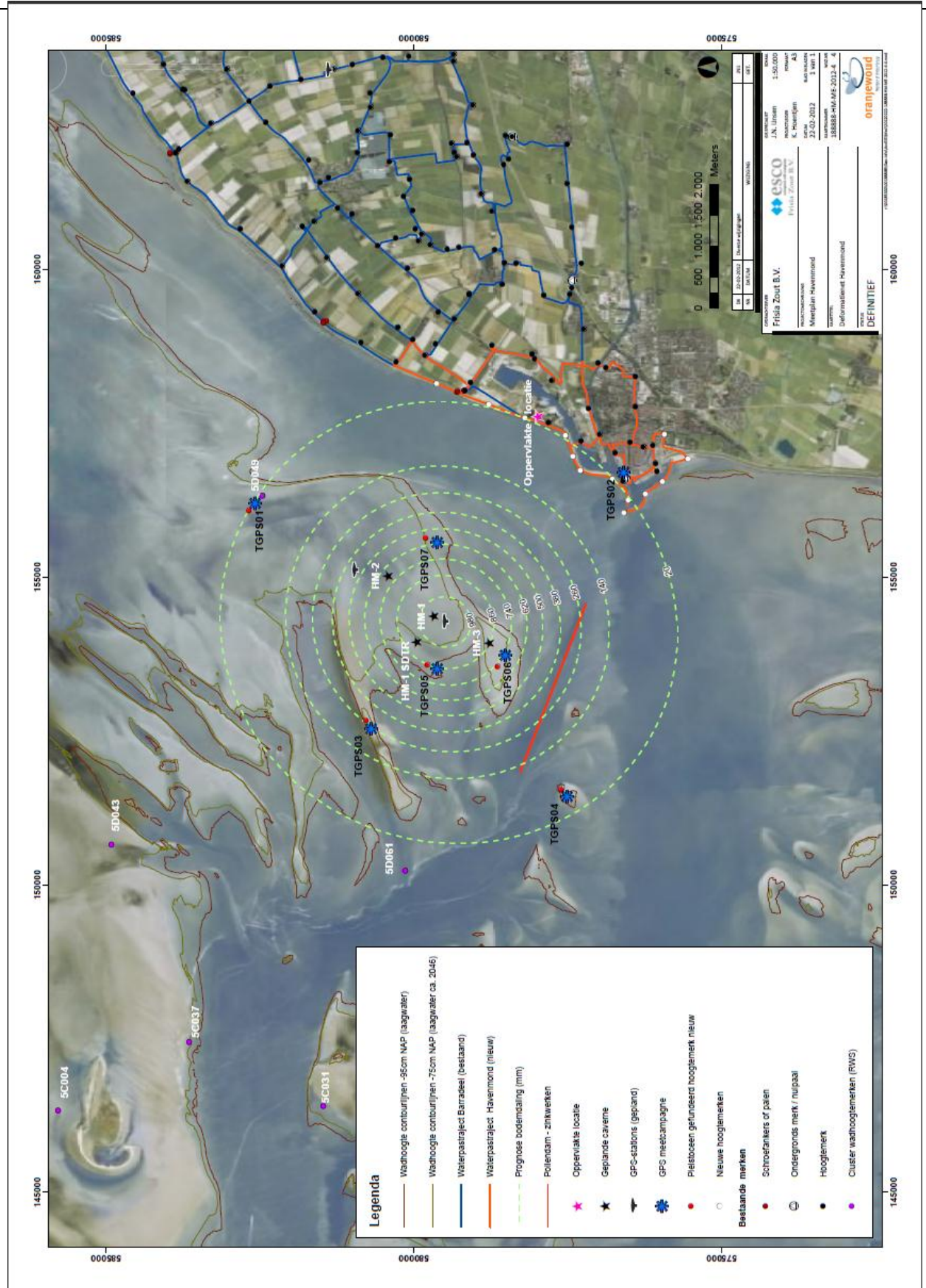
Kom BAS-4																
Periode	aug-96	sep-97	mei-98	jul-99	sep-00	sep-01	sep-02	feb-03	sep-03	sep-04	sep-05	sep-06	sep-07	jul-08	sep-09	nov-11
x-coordinaten													166.475		166.475	166.458
y-coordinaten													582.194		582.194	582.068
gamma													4,35E-07		4,35E-07	4,35E-07
delta													2,010		2,004	1,996
w_max													13,2		63,2	124,1
volume m <sup>3</sup>													88.840		443.128	920.308
conv m <sup>3</sup>													162.400		622.924	1.240.699
mm/m <sup>3</sup> conv													8,14E-05		1,01E-04	1,00E-04
bowl/conv													55%		71%	74%
Overlap van bas-12													0		0	0
Overlap van VAC													0		0	0
Overlap van bas-3													0		0	-1
Overlap van bas-3 SDTR													0		0	0
Overlap van bas-4													-13		-63	-124
SOM													-13		-64	-125
Gemodelleerde GPS daling													-13		-63	-125
Gemeten GPS daling													-10		-57	-115

## **Bijlage 5: Posities van de permanente en mobiele GPS stations in Havenmond, de waterpasnetwerken op land en de verwachte Pleistocene bodemdaling na 32 miljoen ton zoutproductie uit vier Havenmond cavernes**

Vanuit een boorlocatie ten noorden van de zoutfabriek van Frisia, worden gefaseerd vier sterk gedeveerde boringen verricht naar het centrale deel van het vergunninggebied Havenmond. De ondergrondse positie van het middelpunt van een caverne is weergegeven door een zwarte ster.

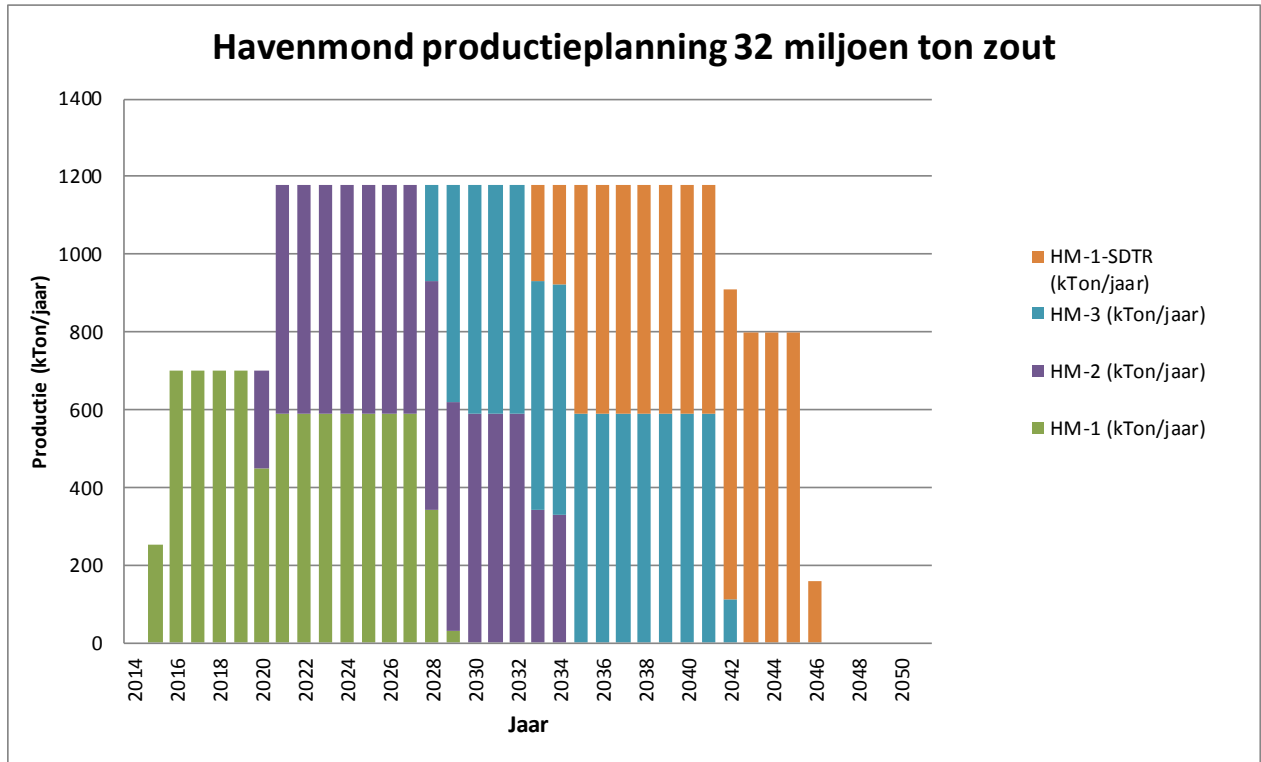
De getoonde bodemdalingkom (in mm) is het cumulatieve eindresultaat van vier onderling verschoven bodemdalingkommen na afloop van 8 miljoen ton zoutproductie per caverne. Elke caverne heeft een openstaand eindvolume van 1 miljoen m<sup>3</sup> en een dalingskom met een maximum daling van 275 mm (komparameters:  $\gamma = 4,35 \cdot 10^{-7}$  en  $\delta = 1,96$ ). De cumulatieve daling in het diepste punt bedraagt 103 cm en het totale komvolume is 10,8 miljoen m<sup>3</sup>.







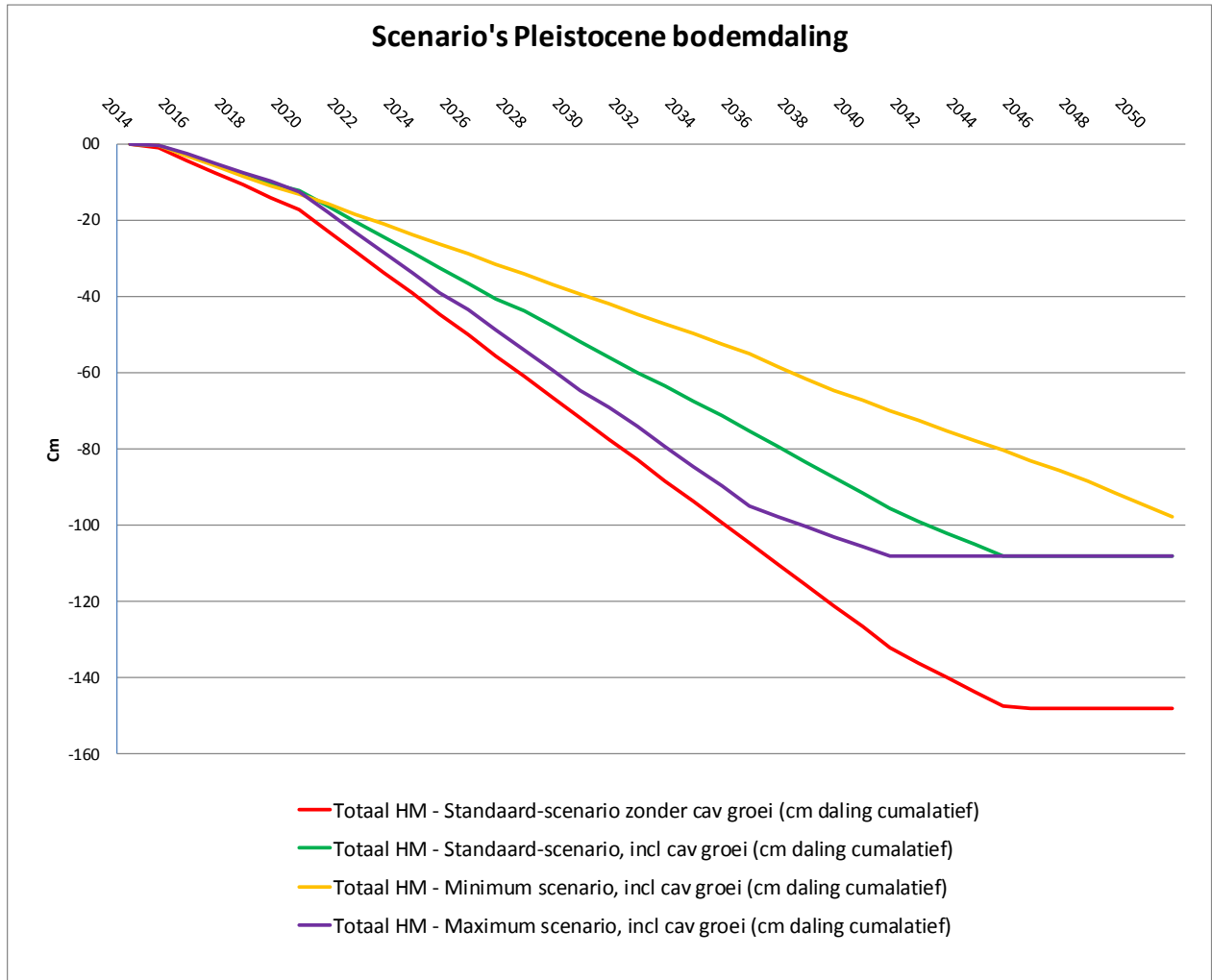
## Bijlage 6: Havenmond productieplanning per caverne per jaar



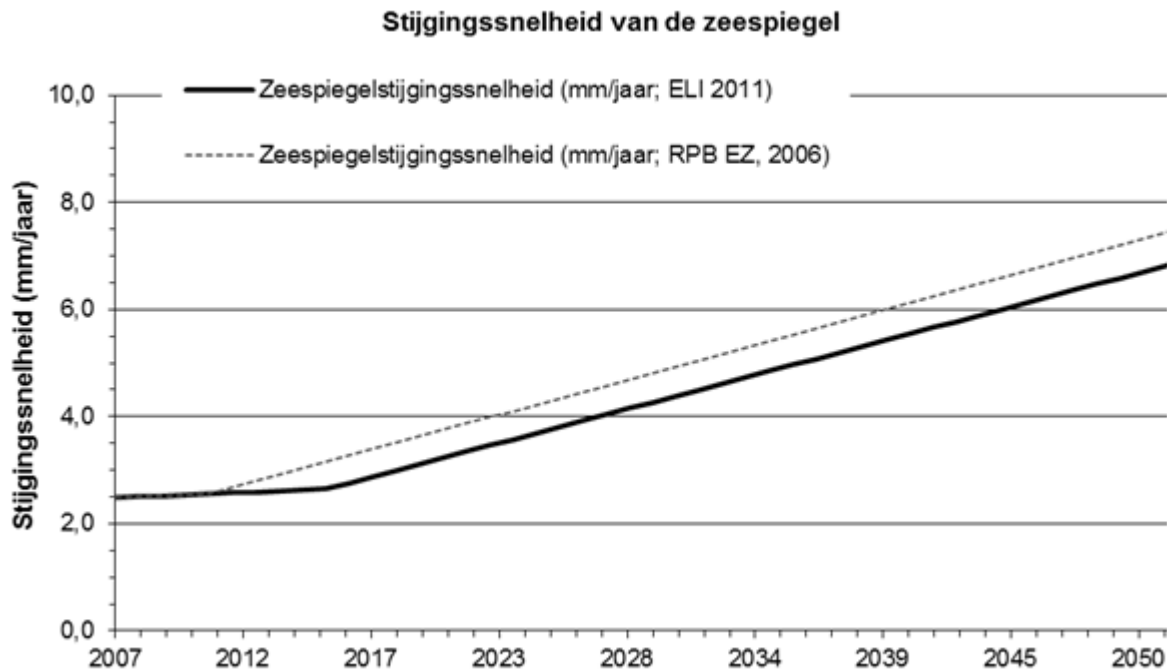
In de periode 2015 – 2046 is in totaal 32 miljoen ton zoutproductie uit Havenmond gepland. De geplande zoutproductie per caverne bedraagt 8 miljoen ton zout.



### Bijlage 8: Prognose toename Pleistocene bodemdaling Havenmond (diepste punt) voor vier scenario's met cumulatieve zoutproductie van 32 miljoen ton

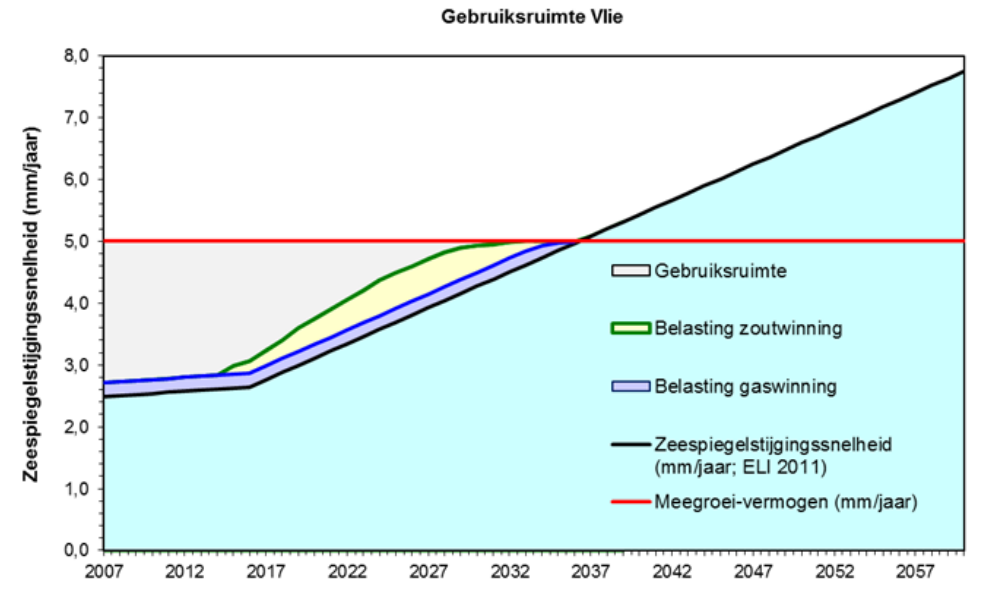


## Bijlage 9: Zeespiegelstijgingsnelheid kombergingsgebied Vlie

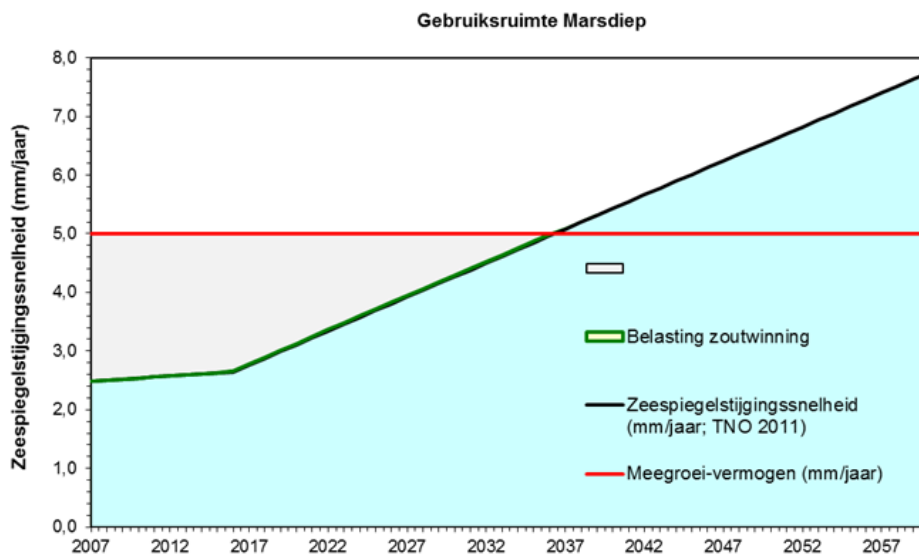


Zowel het oude als het nieuwe stijgingsnelheidsscenario (TNO, ref.11) zijn weergegeven. In het nieuwe scenario is het knikpunt waarbij er een versnelling optreedt opgeschoven van 2011 naar 2016. Verder is de acceleratie waarmee na 2016 wordt gerekend afgenomen van  $0,019 \text{ mm}/(\text{jaar})^2$  naar  $0,016 \text{ mm}/(\text{jaar})^2$

## Bijlage 10: Ontwikkeling gebruiksruidten kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep



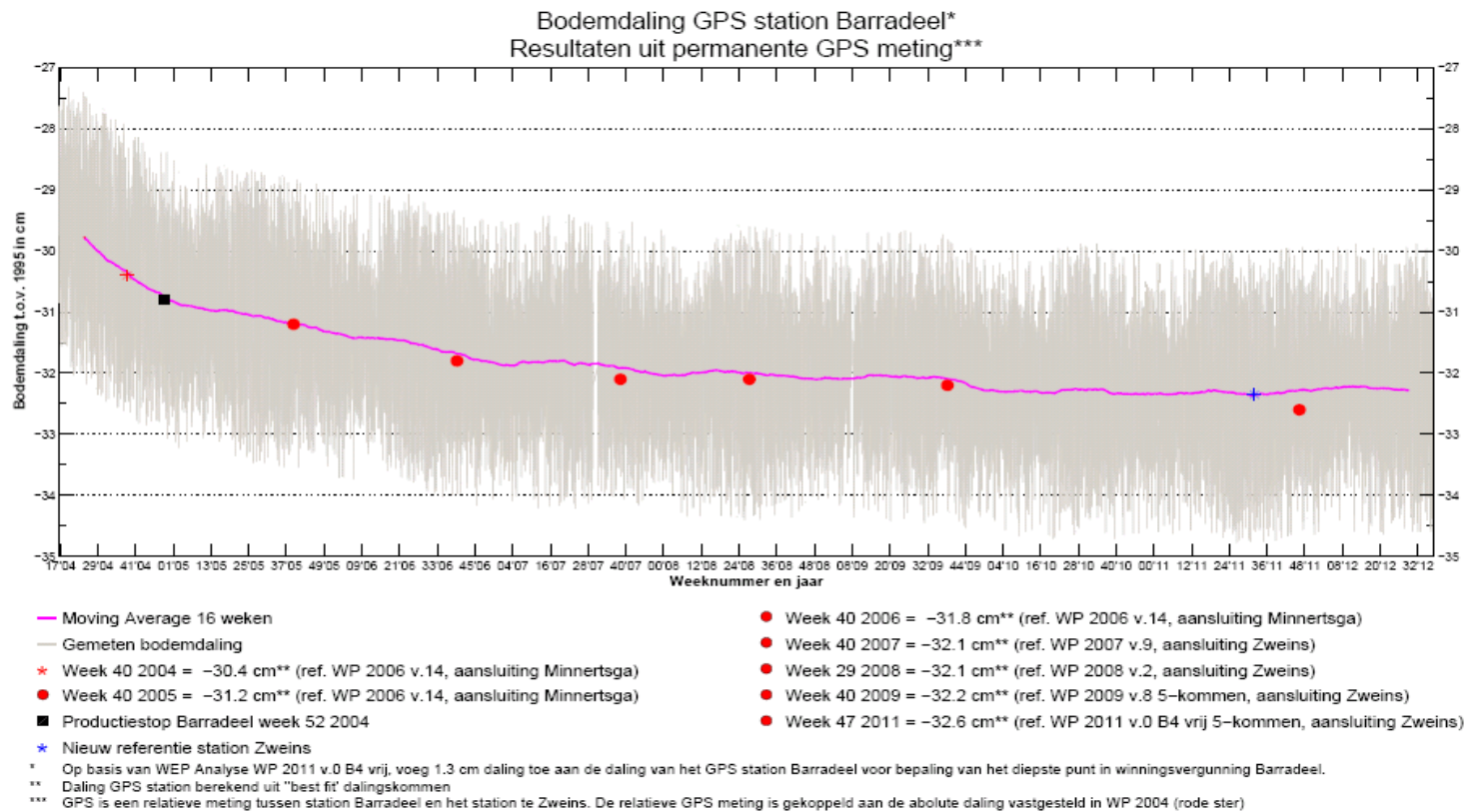
Figuur 1: Gebruiksruimte kombergingsgebied Vlie, uitgaande van een meegroeivermogen van 5 mm/jaar en het nieuwe TNO-scenario voor zeespiegelstijging. Over de gehele lengte van de gebruiksruidten is rekening gehouden met een belasting van 0,22 mm/jaar vanwege de bestaande gaswinning Zuidwal (0,12 mm/jaar) en mogelijk toekomstige Pollendam (0,10 mm/jaar). De verwachte belasting van de gebruiksruidten door de toekomstige zoutwinning van Frisia is door de groene lijn aangegeven (periode 2015-2034). Hierbij over 6 jaarlijks gemiddeld volgens protocol.



Figuur 2: Gebruiksruimte kombergingsgebied Marsdiep, uitgaande van een meegroeivermogen van 5 mm/jaar en het nieuwe TNO-scenario voor zeespiegelstijging. De toekomstige zoutwinning van Frisia belast het kombergingsgebied naar verwachting nauwelijks (groene lijn).

## Bijlage 11: Bodemdaling GPS station Barradeel (cavernes BAS-1 en BAS-2)

Sinds eind 2004 is caverne BAS-2 definitief ingesloten (einde zoutproductie) en sinds september 2008 is ook caverne BAS-1 onder hoge druk ingesloten. Vanaf dat moment is de bodemdaling door zoutwinning uit Barradeel duidelijk tot stilstand gekomen.



## Bijlage 12: Grensgebieden Vlie & Marsdiep met gridcellen 50 x 50m

