

**FRISIA Zout B.V.**  
**Informatie Bodemdaling door Zoutwinning**  
**v.3.0**



Auteurs: T.W. Bakker en  
AJHMDuquesnoy

Kenmerk: Bodemdaling FRISIA

Versie: 3.0

Publicatiedatum: 1 juli 2010

Goedkeuring: L. Mulder – Frisia Zout B.V.



## Inhoud

1	Inleiding.....	1
2	Oorzaak van bodemdaling .....	1
3	Zoutkruip .....	3
4	Bodemdaling .....	3
5	Metten van bodemdaling.....	4
5.1	Waterpassingen .....	4
5.2	GPS metingen .....	4
6	Analyseprocedure .....	7
7	Kwaliteit en voorspelbaarheid .....	10
8	Bewaking bodemdaling winningvergunning Oost .....	10
9	Bewaking bodemdaling winningvergunning Havenmond .....	11
10	Conclusies .....	14
11	Referenties.....	15

## 1 Inleiding

Frisia wint steenzout op grote diepte (ca. 3000 m) door middel van oplosmijnbouw. Daarbij wordt via een boorput water in de zoutlaag gepompt. Het aanwezige zout lost op in het water, waardoor verzadigde pekels ontstaat en een met pekels gevulde holruimte (caverne). De pekels wordt geproduceerd door verdringing met injectiewater. Het winnen van het zout gebeurt bij een pekeldruk (cavernedruk) die ver beneden de druk in het omringende zoutgesteente, de lithostatische druk, ligt. Dit drukverschil leidt via het verschijnsel zoutkruip en caverneconvergentie uiteindelijk tot een daling van het Pleistoceen en het maaiveld. Dit rapport gaat in op de oorzaken, de analyse, de voorspelbaarheid en beheersbaarheid van het fenomeen 'bodemdaling door zoutwinning'.

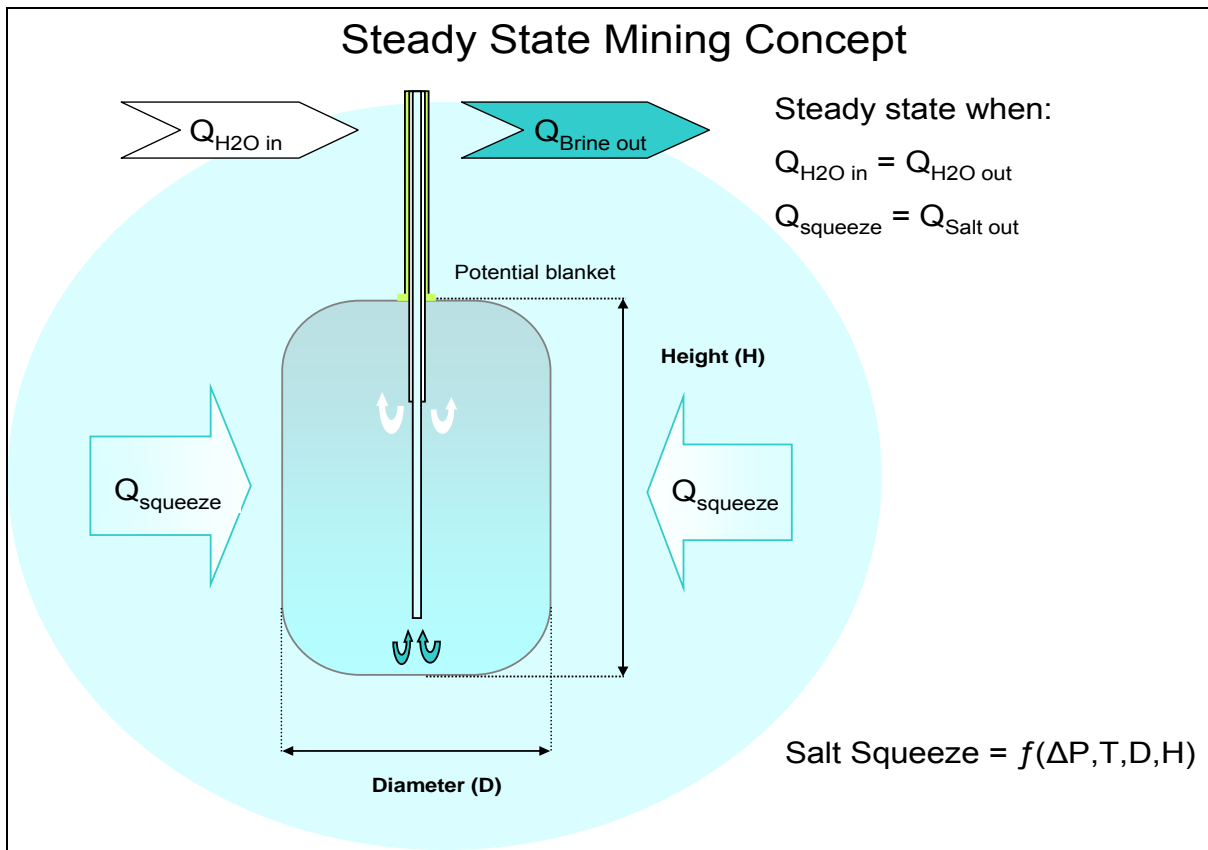
Tevens wordt beschreven hoe de meting en bewaking van bodemdaling in de nieuwe wingebieden Havenmond en Oost plaats zal vinden.

## 2 Oorzaak van bodemdaling

Tijdens de winningfase heerst er in de caverne een drukregime, dat wordt bepaald door de diepte, de dichtheid van de vloeistoffen en de verhouding tussen injectie- en productievolume. De laagst mogelijke druk in de caverne is gelijk aan de gewichtskolom van pekels. Verzadigde pekels heeft een soortelijk gewicht van ca.  $1200 \text{ kg/m}^3$ , zodat op een referentie diepte van 3000 m de 'hydrostatische' pekeldruk ca 360 bar bedraagt. De hoogste druk in de caverne wordt bepaald door de gesteentedruk. De gemiddelde gesteentedichtheid van het 3000 m dikke gesteente- en grondpakket is ongeveer  $2150 \text{ kg/m}^3$ , wat een lithostatische druk in de zoutlaag van 645 bar op 3000 m diepte oplevert. De werkelijke druk in de caverne ligt tussen beide bovengenoemde drukken in, afhankelijk van de productieomstandigheden.

Tijdens pekelsproductie ligt de druk een tiental bar boven de statische pekeldruk om stromingsverliezen in de verbuizing te compenseren. Gedurende productiestops loopt de cavernedruk op en tendert naar de gesteentedruk. Gedurende de actieve mijnfase heerst er dus een groot drukverschil (een onderdruk) van ongeveer 260 bar op 3000 m diepte tussen de pekeldruk en de druk in het zout. Omdat steenzout een plastisch materiaal is, vooral bij de hoge temperaturen van ongeveer  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  ter plaatse, komt een volumestroom van zout in de richting van de caverne op gang en treedt er verkleining van de caverne, de zgn. caverneconvergentie, op. Door het actieve mijnen wordt de verkleining geheel of deels teniet gedaan door het oplossen van het 'ingestroomde' zout. Doordat het zoete injectiewater kouder is dan de temperatuur van de zoutlagen, is de temperatuur in een actieve caverne ca  $60^\circ\text{C}$ .

In de bestaande cavernes is geconstateerd dat na verloop van 2 tot 3 jaar een dynamische balans ontstaat tussen de zoutkruip en de verwijdering van zout door oplossen. Het actieve cavernevolumen is dan min of meer constant. Bij voldoende winhoogte levert dit een stabiele cavernegeometrie op, die jarenlang gehandhaafd kan worden. FRISIA noemt dit 'steady state' oplosmijnbouw. Hierdoor kan in vergelijking met ondieper gelegen cavernes veel meer zout gewonnen worden, terwijl het actieve volume van de cavernes beperkt blijft tot typisch  $400.000 \text{ m}^3$  tot  $750.000 \text{ m}^3$  bij looggebieden van  $200 \text{ m}^3$  tot  $400 \text{ m}^3$  per uur. Tevens kan het ondergrondse volume gestuurd worden door het toepassen van tegendruk op de pekeluitstroom van enkele tientallen bar. Dit kan wenselijk zijn voor het vergroten van de verblijfstijd van de pekels in de caverne om de zoutverzadiging van de pekels te verbeteren. Als er tegendruk gehouden wordt op de uitstroom groeit de caverne en, als de tegendruk verminderd wordt, verkleint de caverne wederom. Het cavernevolumen wordt bij voorkeur gehandhaafd op een niveau dat bij maximaal loogdebiet een goede zoutverzadiging verkregen wordt. In de onderstaande figuur is het principe getoond.



Het netto resultaat van het actieve mijnen is een ondergrondse afname van het zoutvolume rondom de caveerne door zoutkruip, die zich laat afschatten door het gewonnen zoutvolume te verminderen met het open caveerne volume en het zoutvolume dat in de ondergrondse pekel is opgelost. De netto ondergrondse volumeafname leidt tot bodemdaling.

FRISIA wint zout uit vlakliggende zoutlagen in het Zechstein, die zich uitstrekken over het gehele bestaande gebied en de geplande uitbreidingen in de winningsgebieden Havenmond en Oost. Bij de uitbreiding van FRISIA's winning van het Barradeel gebied (cavernes BAS 1 en 2) naar het Barradeel II gebied (cavernes BAS 3 en 4) is de laterale continuïteit bevestigd in zowel de zoutlagen als de deklagen. Tevens wordt er bij BAS 3 en 4 een dalingsgedrag gemeten dat sterk overeenkomt met het gedrag van BAS 1 en 2. Daarom stelt FRISIA, gezien de grote geologische overeenkomsten van de zoutlagen en deklagen, dat het dalingsgedrag geconstateerd in de huidige cavernes met een hoge mate van zekerheid geëxtrapoleerd kan worden naar de geplande cavernes in de winningsgebieden Havenmond en Oost.

Na afsluiting van de caveerne stijgt de druk in de pekelgevulde caveerne van hydrostatisch naar lithostatisch. Die drukstijging wordt voornamelijk veroorzaakt door expansie van de pekel door temperatuurverhoging en door caveerneverkleining als gevolg van zoutkruip waardoor de onderdruk in de caveerne minder wordt en het kruipproces vertraagt. Dit proces vermindert de bodemdaling zeer sterk en stopt de daling nagenoeg geheel zodra de cavernedruk de lithostatische druk, die rondom de caveerne heerst, bereikt. Dit proces is duidelijk aangetoond in het geval van de ingesloten caveerne BAS-2 in de periode 2004-2009 (ref.1).

De bodemdaling in de huidige winningsgebieden van FRISIA is vrijwel jaarlijks gemeten door middel van secundaire nauwkeurigheidswaterpassingen. Daarmee zijn in de loop der tijd de oppervlakte-effecten van de ondergrondse volumevermindering goed vastgelegd en bestudeerd.

### 3 Zoutkruip

Zoals uit het voorgaande blijkt is het kruipgedrag van het zout uiterst belangrijk in de context van bodemdaling. FRISIA heeft over het kruipgedrag in detail gepubliceerd in het rapport 'Update Subsidence Analysis & Forecastv.10.5' (ref.2, Engelstalig).

Het kruipgedrag van het zout als functie van de drukverschillen  $\sigma$  in het zout wordt goed beschreven door de volgende **kruipformule**:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} + A_2 \sigma^{n_2}$$

Grootheid	Beschrijving	Eenheid
$\dot{\varepsilon}$	Eendimensionale kruip	[dag] <sup>-1</sup>
$\sigma$	Verschil tussen cavernedruk en gesteentedruk	[MPa]
$A_1$	Parameter van de niet-lineaire kruip	[MPa <sup>-n<sub>1</sub></sup> ] [dag] <sup>-1</sup>
$A_2$	Parameter van de lineaire kruip	[MPa <sup>-n<sub>2</sub></sup> ] [dag] <sup>-1</sup>
$n_1$	Exponent van de niet lineaire kruip	□
$n_2$	Exponent van de lineaire kruip	□

Bij grote verschillen tussen de lithostatische druk en de cavernedruk, dus in de actieve mijnfase is de tweede term dominant, waarbij  $n_2 = 3.6$  een goede beschrijving geeft voor de FRISIA condities. Dit kruipmechanisme is het gevolg van vervorming van de zoutkristallen, de zgn. dislocatiekruip.

De eerste term met  $n_1 = 1$  wordt zichtbaar bij kleine drukverschillen, dus na de actieve mijnfase. Dit kruipmechanisme is het gevolg van een oploseffect op de kristalvlakken waarbij aan de hogedruk zijde zout in oplossing gaat, via het kristalwater getransporteerd wordt en zich weer afzet aan de lagedruk zijde, het zgn. 'pressure solution creep' proces. De sterkte van dit proces is zeer afhankelijk van de gemiddelde kristal grootte van het zout en de hoeveelheid kristalwater. Het proces is zo langzaam dat het in het laboratorium niet goed te meten is en de sterkte van deze term,  $A_1$ , kon tot op heden in het veld niet precies worden vastgesteld.

Door de massieve zoutkruip ontstaat er een drukverlaging of depressie in het zout rond de caverne. In de depressie ondergaat het zout deels een decompactie. Bij het insluiten van de caverne na de actieve mijnfase verdwijnt de depressie door recompactie van het zout, de drukverschillen worden kleiner, waardoor de lineaire kruip in de latere fase dominant kan worden en zelfs tot het omhoogkomen van het diepste punt van de dalingskom kan leiden, de zgn. 'rebound'. Deze theorie is door TNO gepostuleerd in een SMRI publicatie (ref.3). Het zoutvolume voor de recompactie en rebound komt uit de verre omgeving van de caverne en kan tot marginale herverdeling van volume in de dalingskom leiden, zoals enkele millimeters meer daling op de rand van de dalingskom. Studie van dit effect gedurende 5 jaar na het insluiten van caverne BAS 2 heeft uitgewezen dat lineaire kruip in veel zwakkere mate optreedt dan aangegeven in de TNO publicatie of mogelijk zelfs geheel afwezig is.

### 4 Bodemdaling

Bestudering van de meetresultaten uit de jaarlijkse waterpassingen (ref.4) heeft uitgewezen dat de bodemdaling kom die veroorzaakt wordt door gelokaliseerde onttrekking van zoutvolume in de diepe ondergrond goed beschreven wordt met een rotatiesymmetrische Gaussische kom. Hierbij is de volgende **bodemdalingsformule** van toepassing:

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

Grootheid	Beschrijving	Eenheid
$w(x, y)$	Daling op willekeurig punt (x,y)	[cm]
$w_{\max}$	Diepste punt dalingskom	[cm]
$\gamma$	Gamma, dimensieloze parameter voor de breedte van de kom	[]
$r$	Horizontale afstand van een punt (x,y) tot het centrum van de kom	[m]
$\delta$	Delta, dimensieloze parameter voor de steilheid van de kom	[]
$\chi$	Factor die aangeeft hoeveel daling er plaatsvindt in het diepste punt per volume eenheid convergentie	[cm/m <sup>3</sup> ]
$V_{\text{con}}$	Volumevermindering in de ondergrond (convergentie)	m <sup>3</sup>

De formule stelt ons in staat om de dalingskom zo goed mogelijk aan te passen aan de dalingsgegevens met een 'best fit' methode zonder dat er iets bekend hoeft te zijn over de convergentie. FRISIA heeft over de laatste jaren een steeds nauwkeuriger methode ontwikkeld om de komfactoren te bepalen uit de waterpassingen.

Met een integratiemethode kan het volume van de dalingskom bepaald worden. De vergelijking tussen het volume van de dalingskom en de uit de zoutbalans berekende convergentie levert een controle op van de 'best fit' komparameters. Het volume van de 'best fit'-kom blijkt een waarde van 95% van het convergentievolume te hebben met een marge van een paar procent.

Voor het Havenmondgebied zal het niet mogelijk zijn om een dicht meetnet in te richten; daarom zal het volume van de buitendijkse dalingskom vastgesteld worden als zijnde 95% van de berekende caverneconvergentie. Deze volumeschatting wordt dan gebruikt als een additioneel gegeven voor het vaststellen van de dalingskom in het buitendijkse gebied. In het hoofdstuk meetplannen wordt nader ingegaan op het voorgestelde meetsysteem voor de buitendijkse ontwikkeling van de dalingskom.

## 5 Meten van bodemdaling

### 5.1 Waterpassingen

FRISIA meet bodemdaling door middel van nauwkeurigheidswaterpassingen die meestal uitgevoerd worden in de maand september, zodra de daling in het diepste punt naar verwachting met 2 cm of meer is toegenomen. Dit komt neer op een jaarlijkse meting als er actief gemijnd wordt en een lagere frequentie na beëindiging van de actieve winning.

FRISIA heeft voor het gecombineerde Barradeel en Barradeel II winningsgebied een doelmatig meetnet ingericht met ca. 300 vaste peilmerken (PM's), dat de dalingskommen van alle cavernes geheel bestrijkt inclusief het direct omliggende, niet door zoutwinning beïnvloede gebied. FRISIA heeft sinds het begin van de zoutwinning in 1996 twaalf waterpasrondes gemaakt, waarvan de meeste het gehele beïnvloede gebied bestreken hebben.

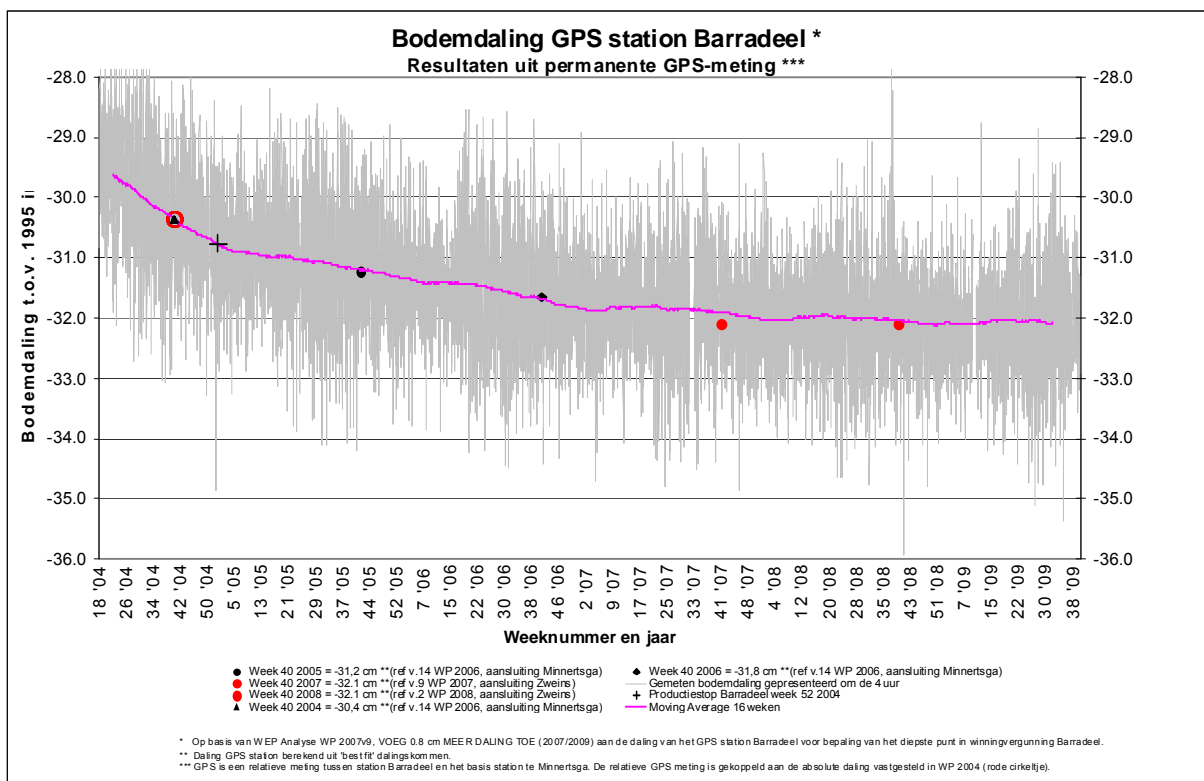
### 5.2 GPS metingen

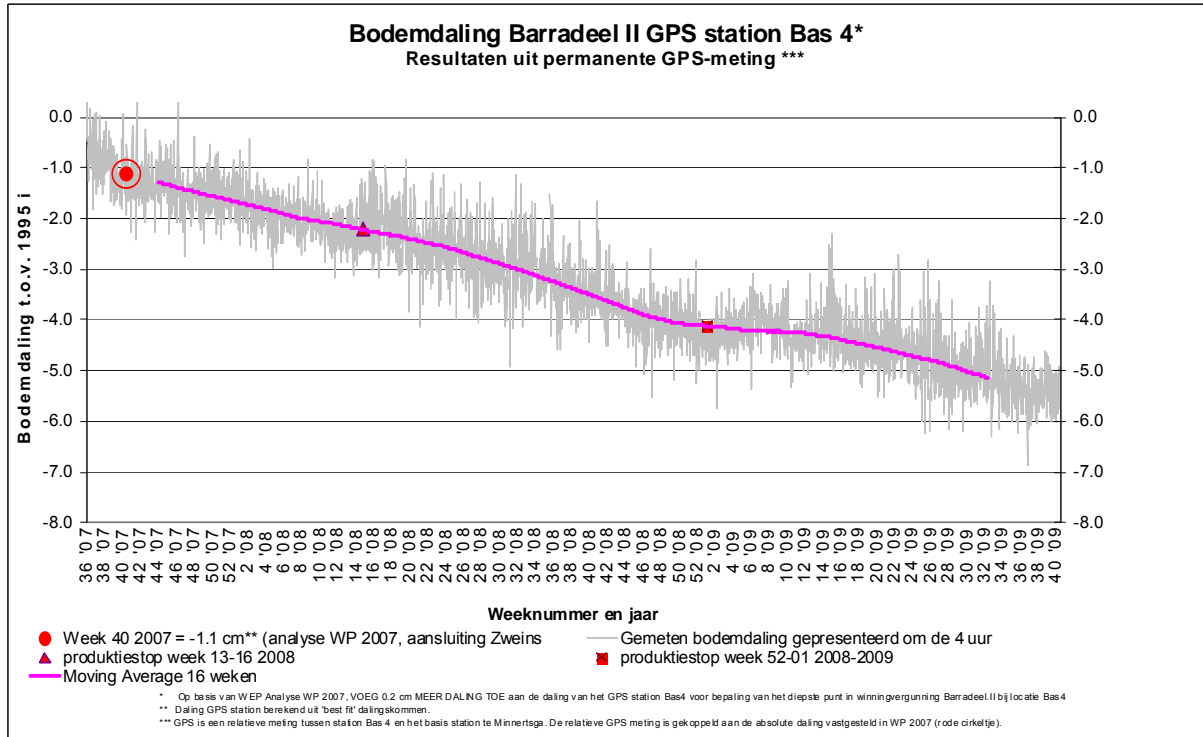
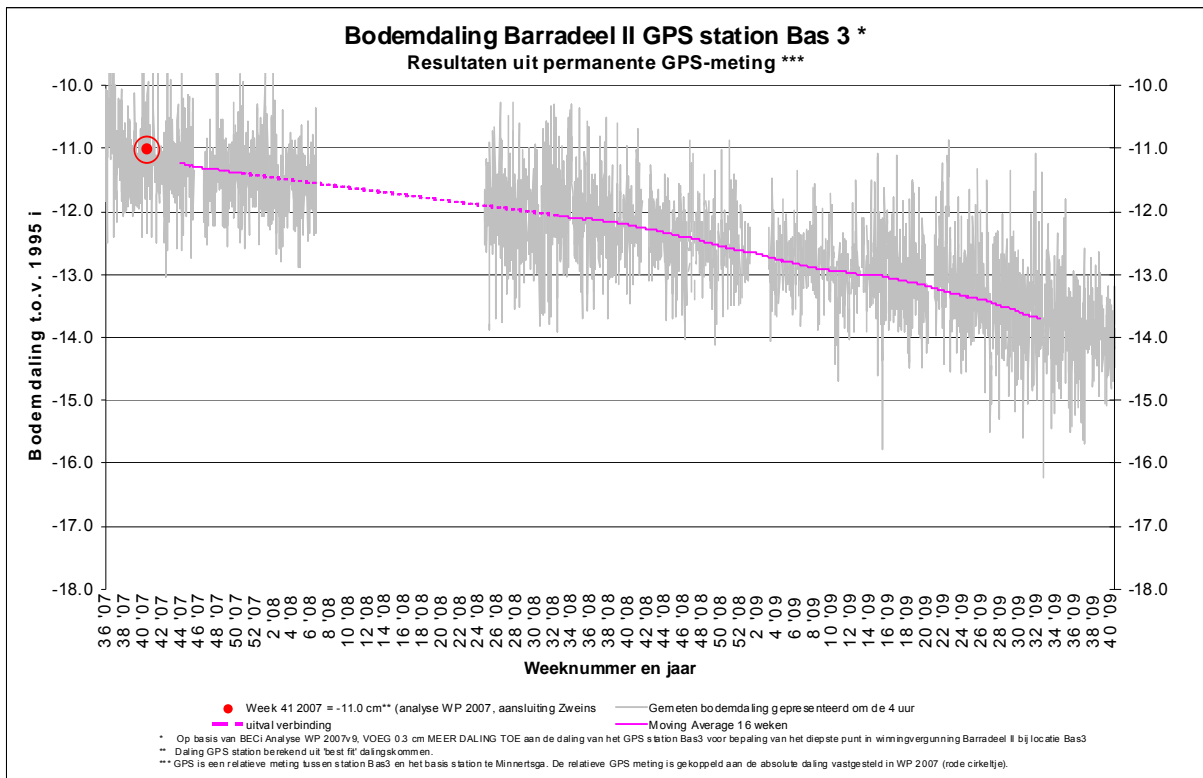
Naast de nagenoeg jaarlijkse waterpassingen voert FRISIA continue metingen uit met drie differentiële GPS stations. Met 'differential' GPS wordt alleen het hoogteverschil gemeten tussen de stations. De individuele metingen tonen een spreiding van enkele centimeters. Door het middelen

van de metingen over tijd worden trendlijnen bepaald die op mm niveau nauwkeurig zijn. FRISIA past trendlijnen toe op basis van voortschrijdende gemiddelden met een periode van 16 weken. De GPS metingen tonen de ondergrondse volumeveranderingen in 'real time', waarbij effecten zoals productievariaties en het op grootte sturen van cavernevolumen direct gemeten kunnen worden.

Sinds april 2004 staat er een GPS basisstation in Minnertsga en een meetstation op de BAS 1/2/3 winlocatie (B123 GPS Station). Het basisstation staat in een stabiel gebied dat niet door zoutwinning en/of gaswinning beïnvloed wordt. Het B123 GPS station staat dicht bij het diepste punt van de Barradeel dalingskom. In 2007/2008 zijn er ook GPS stations geplaatst nabij de diepste punten van de BAS 3 en BAS 4 dalingskommen.

De geactualiseerde resultaten sinds het begin van de GPS tot eind september 2009 zijn getoond op de onderstaande drie grafieken. De lichtgrijze gebieden tonen de spreiding van de individuele metingen en de rode lijnen zijn de trendlijnen van het 16-weeks voortschrijdende gemiddelde.





De bovenste grafiek toont de daling van het B123 GPS station. Dit station staat enkele honderden meters verwijderd van het diepste punt van de BAS 1-2 kom. In de periode 2007/2009 moet er 0,8 cm daling toegevoegd worden voor het bepalen van het diepste punt ten gevolge van zoutwinning



in de Barradeel en Barradeel II winninggebieden. De trendlijn toont aan dat sinds de productiestop in eind 2004 de bodemdaling nagenoeg gestopt is.

Het BAS3 GPS meetstation staat ook enkele honderden meters (ca 200 m) verwijderd van het diepste punt van de schotel. De BAS 3 GPS metingen zijn begonnen toen er reeds 11 cm daling was ter plekke van het station en er ontbreken enkele maanden van de metingen door een technische storing van het station. In de periode 2007/2009 moet er 0,3 cm daling toegevoegd worden om de daling in het diepste punt te bepalen.

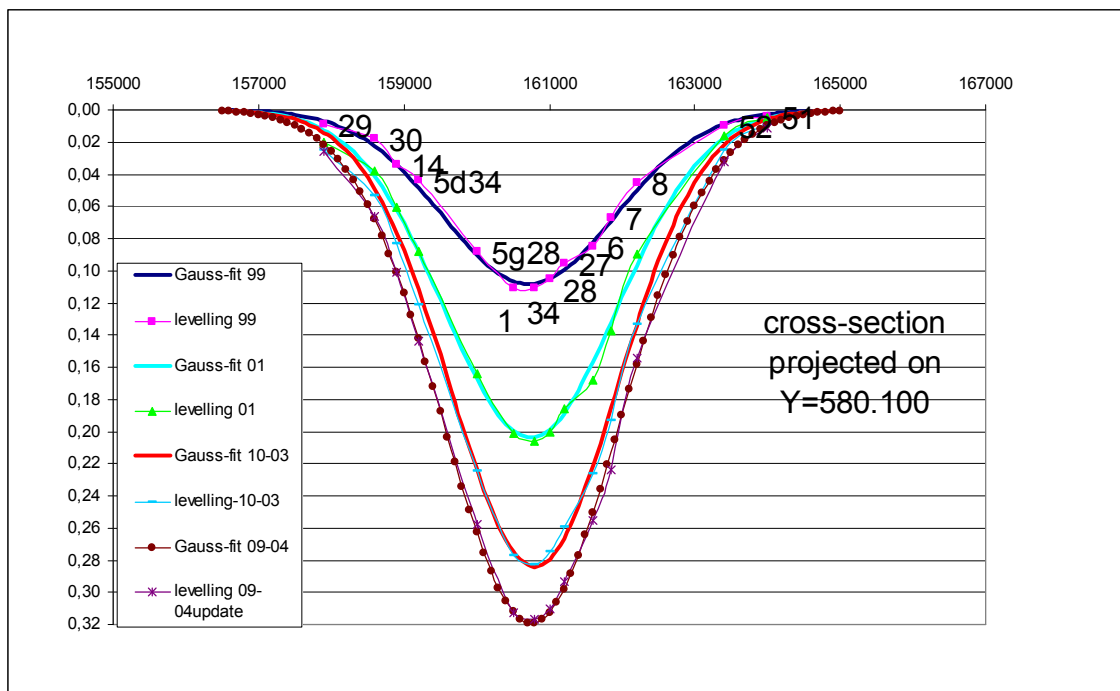
De GPS resultaten kunnen direct gekoppeld worden aan gebeurtenissen met betrekking tot de mijnbouwoperaties. Zo wordt sinds medio 2009 het cavernevolumen van BAS 3 bewust verkleind om de cavernevorm te verbeteren, hetgeen duidelijk zichtbaar is op de GPS trendlijn. De BAS 4 caverne levert op het moment nagenoeg al het zout voor de fabriek, waardoor daar de daling in de laatste maanden sterker doorzet.

In het continue karakter van de GPS metingen schuilt zeer veel informatie, die bij conventioneel jaarlijks waterpassen in het geheel niet geregistreerd wordt.

De frequente waterpassingen in combinatie met continue GPS metingen hebben ervoor gezorgd dat het dalingsgebied met betrekking tot de zoutmijnbouw van FRISIA uitermate goed beschreven is. Dit heeft FRISIA in staat gesteld om de dalingsprocessen goed te analyseren en te vertalen in accurate voorspellingen.

## 6 Analyseprocedure

In de periode 1999-2004 werden voor elke waterpassing dezelfde 14 'monitoring' peilmerken gebruikt om de ontwikkeling van de BAS 1&2 dalingskom te beschrijven. De gemeten daling bij deze punten werd gematched met een gaussische kom. De ontwikkeling van de kom met deze methode is samengevat in de onderstaande grafiek:



bron: Update Subsidence FRISIA 10.5

Tot 2004 werd de daling vergeleken met een aantal referentiepunten buiten het door zoutmijnbouw beïnvloede gebied. Deze aanpak werd verlaten in 2004 bij de introductie van GPS. Het basisstation (referentie) voor GPS werd ingericht in Minnertsgea en om een eenduidige vergelijking mogelijk te maken tussen GPS en de waterpasgegevens werden de waterpassingen voortaan alleen aangesloten op het referentiepeilmerk Minnertsgea (5G117).

Deze analysemethode werd, met instemming van Staatstoezicht op de Mijnen, tot 2006 voldoende nauwkeurig geacht voor de beschrijving van de dalingseffecten. In 2006 begon de BAS 3 kom zich te ontwikkelen en begon de BAS 1&2 kom in de buurt te komen van het toegestane maximum van 35 cm bodemdaling in het diepste punt minus een productieruimte van enkele centimeters. Ook was er een noodzaak om de invloed van de gaswinning van Vermilion nauwkeuriger in kaart te brengen.

Na de waterpassing in 2006 is er een analysemethode ontwikkeld die het maximale aantal beschikbare peilmerken zonder invloed van de naburige gaswinning gebruikt om tot de beste passing (best fit) te komen van de komparameters met de dalingsgegevens. De 'best fit' is gebaseerd op de methode van de kleinste gemiddelde kwadraten van de verschillen tussen de gemeten en de gemodelleerde peilmerkdaling. Peilmerken waarvan de gemeten daling meer dan 13 mm afweek van de berekende 'best fit' komdaling werden uitgesloten, gebaseerd op de methode beschreven in bijlage 7 (Iteratieve voorwaartse modellering) van het Jaarverslag Staatstoezicht op de Mijnen 2007. Zodoende werd een klein aantal peilmerken uitgesloten, die in de detailverslagen benoemd zijn.

Aan peilmerken die in het verleden voor het eerst ingemeten zijn op het moment dat er al sprake was van zoutdaling (zgn. secundaire peilmerken) is een 'nulhoogte' toegekend die volgt uit de 'best fit' dalingskom op het moment van inmeten; deze methode is bij het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) bekend als de 'glijdende peilmerk inschakeling'.

De uitwerking van de 2006 en voorgaande waterpassingen, met de nieuwe methode leverde het volgende resultaat op:

B 12 Bowl		Centre 2006 survey:			X=	160,774	Y=	580,040				
		Sep-97	May-98	Jul-99	Sep-00	Sep-01	Sep-02	Feb-03	Sep-03	Sep-04	Sep-05	Sep-06
Gamma		4.50E-07	4.24E-07	4.24E-07	4.24E-07	4.24E-07	4.28E-07	4.31E-07	4.25E-07	4.10E-07	4.08E-07	4.08E-07
Delta		1.983	1.970	1.972	1.978	1.972	1.970	1.970	1.971	1.969	1.967	1.965
z max	cm	2.4	4.5	10.6	15.9	19.9	23.4	25.7	27.6	31.1	31.9	32.4
Conv	m3			1,006,569	1,515,997	1,952,649	2,392,599	2,627,227	2,831,967	3,155,565	3,256,826	3,296,395
dz/dV	m/m3	0.00E+00	0.00E+00	1.06E-07	1.05E-07	1.02E-07	9.76E-08	9.76E-08	9.76E-08	9.87E-08	9.81E-08	9.83E-08

B 3 Bowl		Centre 2006 survey:			X=	163,068	Y=	581,210				
		Sep-97	May-98	Jul-99	Sep-00	Sep-01	Sep-02	Feb-03	Sep-03	Sep-04	Sep-05	Sep-06
Gamma											4.34E-07	4.15E-07
Delta											2.045	2.020
Zmax	cm										2.3	5.3
Conv	m3										206,946	454,256
dz/dV	m/m3										1.10E-07	1.176E-07

Dalingsparameters van BAS1-2, and BAS 3 from all available surveys, referentie Minnertsgea, bron: Update Subsidence Analysis & Forecast FRISIA v.10.5

De tabel laat aan de hand van de vrijwel constante waarden van de komparameters in de tijd zien dat de kommen zich stabiel en gelijkmatig ontwikkelen, op een wijze die goed te correleren is met de daadwerkelijke mijnbouwactiviteit en de GPS gegevens.

Vanaf 2007 is het aansluitpunt van het meetnet op instructie van SodM verlegd van Minnertsgea naar Zweins om een directe vergelijking mogelijk te maken met de bodemdalinggegevens van de aangrenzende Vermilion gaswinning. Dit leverde kleine modelmatige verschillen op van de orde van

enkele mm's die de voorgaande meetserie verstoorde op een manier die niet goed te verklaren was met de daadwerkelijke mijnactiviteit en de GPS gegevens. Zie het rode stipje dat onder de GPS trendlijn van het Barradeel station 'uitvalt' in september 2007.

De resultaten van de waterpassingen sinds de aansluiting op Zweins zijn samengevat in de volgende tabel. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de waterpassing in 2008 slechts het BAS 1&2 komgebied goed bestreekt. De komparameters van Kom BAS 3 /September 08 zijn onder voorbehoud gegeven (grijs gekleurde vakje).

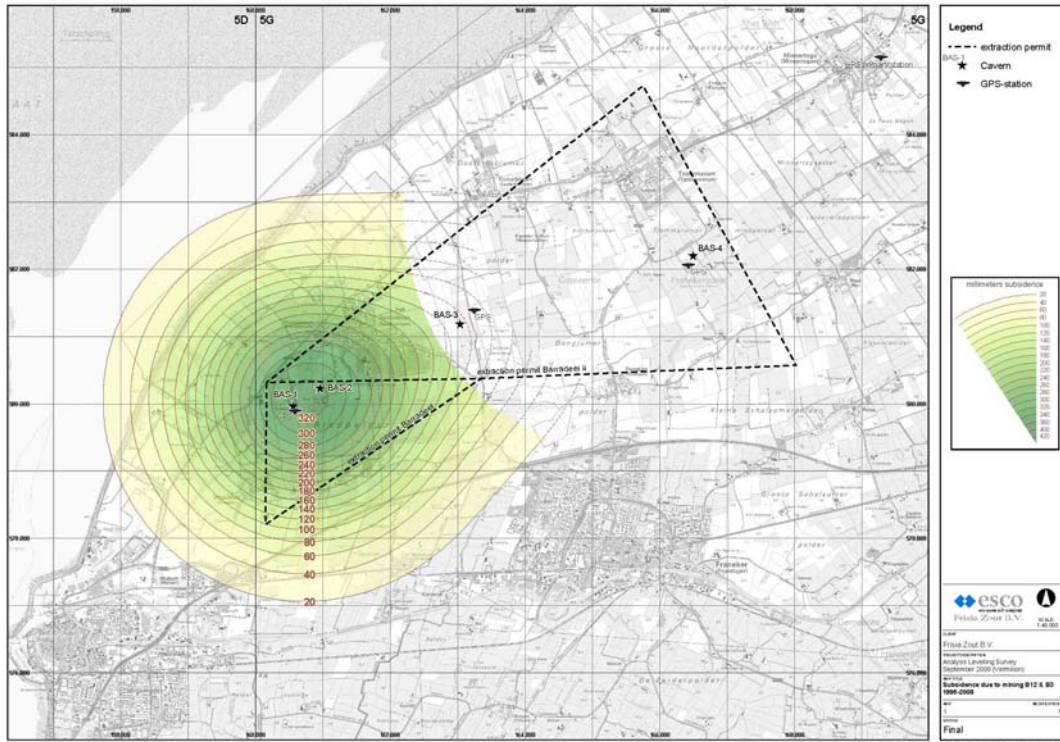
Waterpassing september 2007		Kom BAS 1-2	Kom BAS 3	Kom BAS 4
	Eenheid	Sep-07	Sep-07	Sep-07
X Coördinaat kom centrum	m	160,733	163,101	166,475
Y Coördinaat kom centrum	m	580,056	581,177	582,194
Kom factor gamma		4.07E-07	4.35E-07	4.35E-07
Kom factor delta		1.964	2.007	2.007
Maximale diepte kom centrum	mm	-326	-73	-13
Overlap andere kommen	mm	-3	-40	0
Totale daling kom centrum	mm	-329	-113	-13

Waterpassing september 2008		Kom BAS 1-2	Kom BAS 3	Kom BAS 4
	Eenheid	Sep-08	Sep-08	Sep-08
X Coördinaat kom centrum	m	160,733	163,101	
Y Coördinaat kom centrum	m	580,056	581,177	
Kom factor gamma		4.07E-07	4.35E-07	
Kom factor delta		1.967	1.998	
Maximale diepte kom centrum	mm	-324	-85	
Overlap andere kommen	mm	-4	-38	
Totale daling kom centrum	mm	-329	-122	

*Komvorm parameters per jaar voor de dalingskommen van BAS-1&2, BAS-3 en BAS 4, gebaseerd op een statistische analyse van de beweging van 175 peilmerken (WP 2007) en 92 peilmerken (WP 2008), bron: Actualisatie Bodemdaling Zoutwinning september 2008.*

Onderstaand is een contourenkaart getoond van de bodemdaling door zoutwinning in 2008. Vanwege een beperkte dekking van de waterpassing 2008 zijn alleen de contouren volledig, die samenhangen met de zoutwinning uit de vergunning Barradeel (cavernes BAS 1 en 2). In het noordoostelijke deel van de schotel is nog juist de invloed zichtbaar van de zoutwinning uit caverne BAS 3 (vergunning Barradeel II).

In de uitwerking van de meetgegevens van de waterpassing 2009, die wel het volledige productiegebied van BAS 1 t/m 4 heeft bestreken, zullen de effecten van de aansluiting op Zweins in meer detail geanalyseerd worden.



## 7 Kwaliteit en voorspelbaarheid

De kwaliteit van het meetnet in de bestaande winning, de frequentie van waterpassen en de beschikbaarheid van continue GPS gegevens nabij de diepste punten van de dalingskommen maken het mogelijk om met grote nauwkeurigheid de dalingseffecten ten gevolge van de zoutwinning te meten.

Onafhankelijke evaluaties door derden (refs.5 en 6) hebben bevestigd dat de precisie van de bodemdalingmetingen in het Frisia meetnet zeer goed is en dat de evaluatiemethode van de metingen betrouwbaar is. Daardoor is het ook mogelijk om bodemdaling met millimeter-nauwkeurigheid te voorspellen uit de toegepaste modellen voor zoutkruip en bodemdaling.

## 8 Bewaking bodemdaling winningvergunning Oost

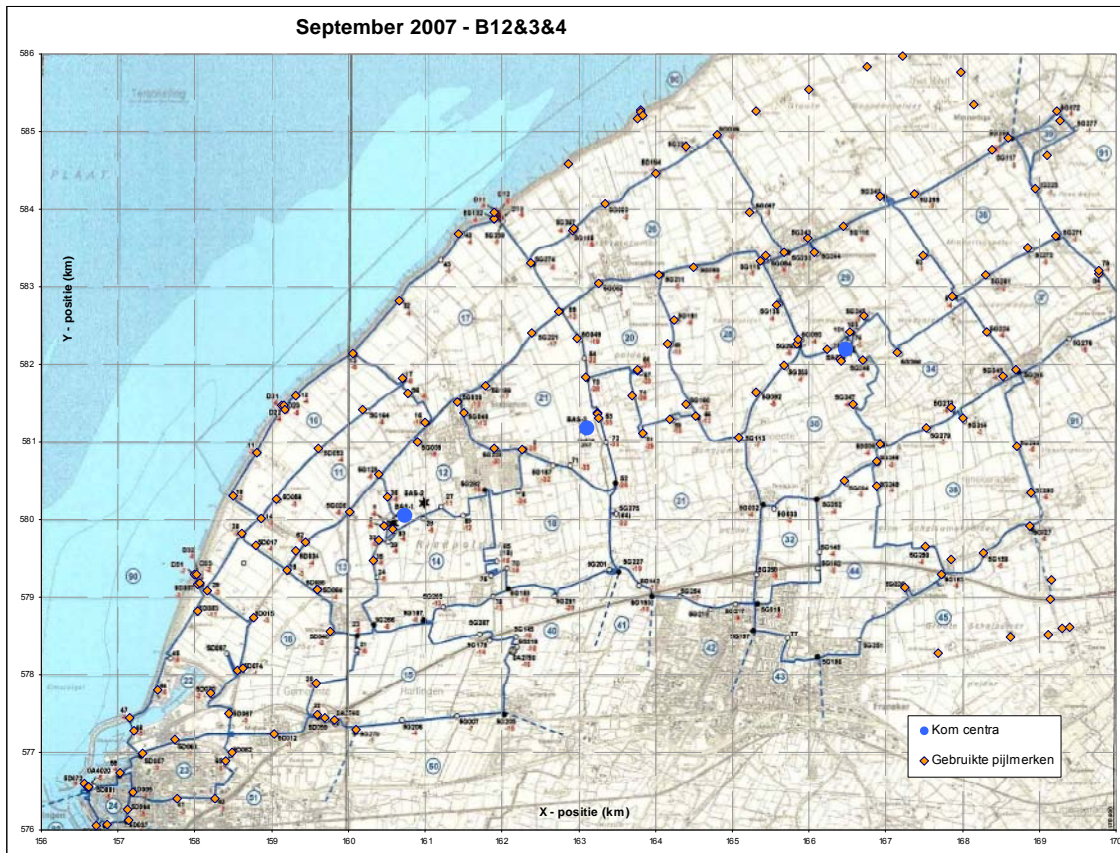
Voor het gebied Oost zal een meetnet ingericht worden dat kwalitatief goed vergelijkbaar zal zijn met het bestaande meetnet, dat in onderstaande figuur getoond is (meetnet september 2007). Het meetnet krijgt een omvang, die de gehele verwachte kom en het direct aansluitende, ongestoorde gebied zal beslaan. Het meetnet zal ingemeten worden voordat er enige daling door zoutwinning optreedt, de nulmeting.

Tevens zal er een goed gefundeerd GPS station geplaatst worden nabij het diepste punt. Indien er meer cavernes worden aangelegd in gebied Oost zal boven elke caverne een GPS station geplaatst worden.

Zodra er meer dan 2 cm daling in het diepste punt opgetreden is zal in september van het desbetreffende jaar een waterpassing uitgevoerd worden. In combinatie met continue GPS meting



zal hiermee dezelfde meetkwaliteit bereikt worden als voor de bestaande winning. De verwachte nauwkeurigheid zal in de orde van enkele millimeters zijn.



## 9 Bewaking bodemdaling winningvergunning Havenmond

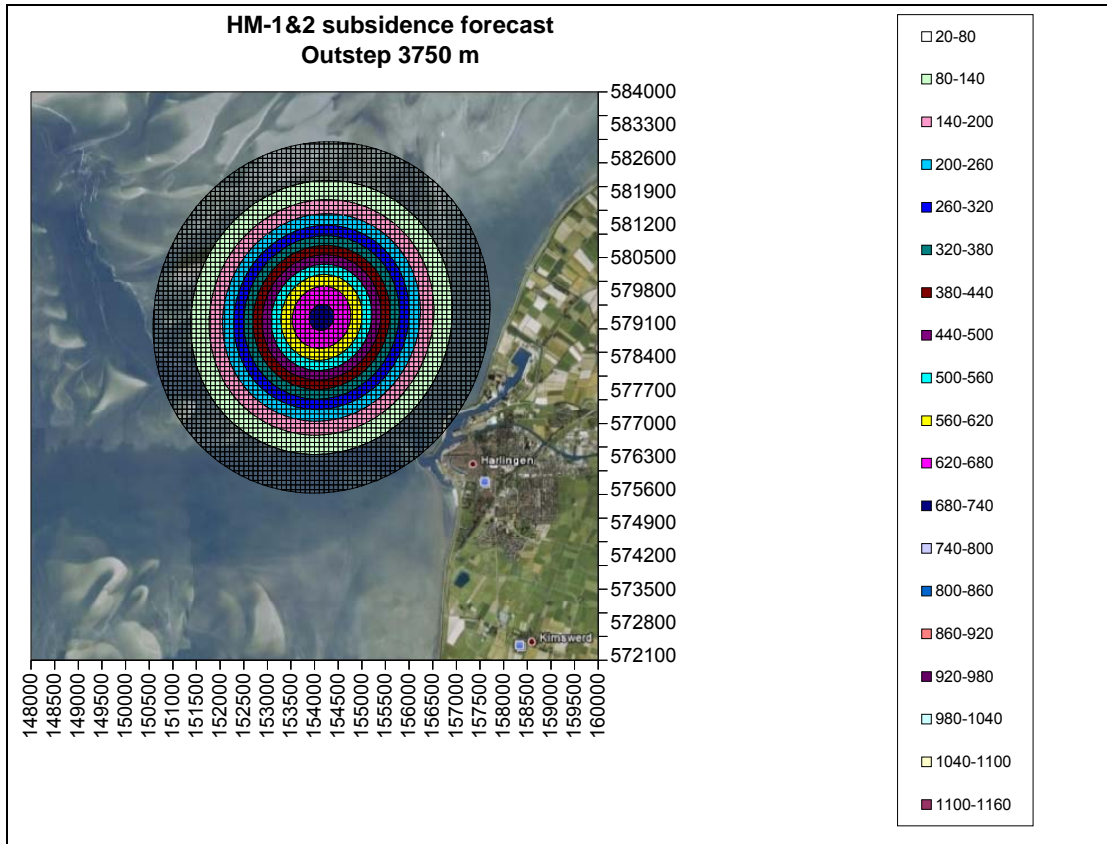
In het buitendijkse gebied zal het niet mogelijk zijn om een conventioneel meetnet in te richten. Het regelmatig verrichten van waterpassingen zal een ongewenste verstoring teweeg brengen op de wadplaten en conventionele meetactiviteiten zullen verstoord worden door de getijdenbewegingen.

Hierbij komt dat de voornaamste uitkomst van het meten van de daling het geschatte komvolume en de ontwikkeling van volume over tijd zal zijn, omdat dit de basis is voor het vaststellen van de zandsuppletievolumes en de benutting van de gebruiksruimte. Tevens zal het mogelijk moeten zijn om 'met de hand aan de kraan' te kunnen winnen, om te voorkomen dat de gebruiksruimte overschreden wordt. Een andere belangrijke uitkomst van de metingen zal het bewaken van daling op de zeedijk zijn.

De eisen aan de nauwkeurigheid voor het vaststellen van de dalingkom buitendijks zijn iets minder stringent dan op land, zolang het komvolume goed bepaald kan worden. De ligging van de contourlijnen hoeft buitendijks niet met mm nauwkeurigheid vastgesteld te worden, omdat er geen infrastructurele herstelmaatregelen nodig zijn.

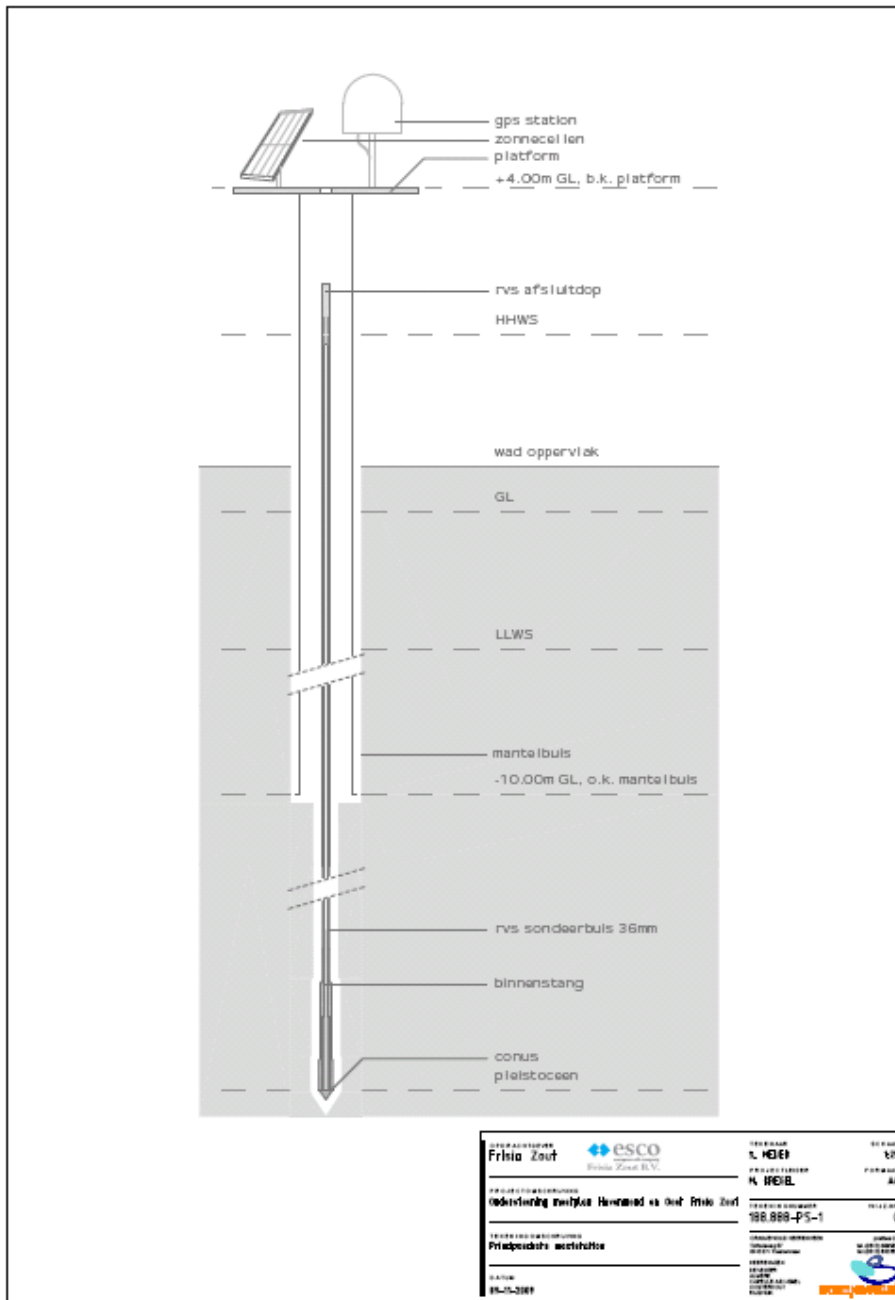
Voorkeursalternatief VKA 66/33 (ref.7) bestaat uit twee cavernes in het buitendijkse gebied die ca 3750 m verwijderd liggen van de oppervlaktelocatie op het FRISIA fabrieksterrein en een onderlinge

afstand hebben van ca 1000 m. Het samengestelde effect van de twee dalingskommen zal een ietwat pseudo-elliptische dalingskom zijn. Met de ervaring die opgedaan is in de bestaande winning kan het dalingseffect goed voorspeld worden. In onderstaande figuur is een dalingsprognose getoond na 20 miljoen ton zoutproductie uit de twee cavernes.



Met een goede continue meting nabij het diepste punt van de verwachte kom en een continue meting ca halverwege de rand van de kom kan de ontwikkeling van de verwachte kom goed gemeten worden. Het voordeel van continue metingen is dat men onverwachte ontwikkelingen in de bodemdaling of het uitvallen van het meetstation onmiddellijk opmerkt, zodat onmiddellijk maatregelen genomen kunnen worden. Als het station onverhoopt enkele weken niet in bedrijf is, kan men op betrouwbare wijze een extrapolatie maken op basis van de actuele mijnoperaties.

Op grond van de bovenstaande overwegingen heeft FRISIA gekozen voor een bewakingssysteem dat gebaseerd is op twee continu metende GPS 'meetpalen' die ontworpen zijn voor de klimatologische omstandigheden op het wad, inclusief mogelijke ijsgang. Één station zal geplaatst worden nabij het verwachte diepste punt van de dalingskom en een andere station halverwege dit diepste punt en de verwachte rand van de dalingskom om de komvorm goed te kunnen vastleggen. De meetpalen worden voorzien van een vrijstaande peilstang naar het Pleistoceen, waarmee de beweging van het Pleistoceen gemeten kan worden t.o.v. een GPS hoogterefentie, die gekoppeld wordt aan het NAP niveau. De stations zullen ca 1 jaar voor de aanvang van daling geplaatst worden voor een nulmeting over de gehele cyclus van de vier seizoenen. De constructie van een dergelijke meetpaal is in onderstaande figuur getoond



**Constructietekening van een meetpaal**

FRISIA zal in de actieve mijnfase jaarlijkse zgn. holruimte metingen in de cavernes uitvoeren om in combinatie met de gebruikelijke vastlegging van de hoeveelheid zout die uit elke caveerne gewonnen wordt een nauwkeurig bepaling te krijgen van het convergentievolume. Het op deze wijze bepaalde convergentievolume zal de basis vormen voor de berekening van het komvolume, waarbij een ratio van 95% wordt gebruikt, zoals die bij de bestaande winning vastgesteld is. De komparameters zullen bepaald worden door middel van het afstemmen van het model op de GPS data.

Daarnaast zal daling op de zeedijk bewaakt worden met conventioneel waterpassen zodra de dalingskom 'in de buurt' komt van de zeedijk. Aangezien de Havenmond caveerne zich eerst moet

ontwikkelen, wordt dat moment verwacht 2 tot 3 jaar na het begin van de zoutproductie uit Havenmond. Het meetnet om de daling van de zeedijk te bewaken vormt feitelijk onderdeel van het meetnet van de dalingskom van de cavernes BAS 1 en 2 (Barradeel meetnet). De zeedijk wordt dus ook regelmatig gemeten door de bewakingsverplichting van de BAS 1-2 kom.

## 10 Conclusies

- Een goed meetnet en een hoge frequentie van waterpassen heeft FRISIA in staat gesteld om de effecten aan de oppervlakte als gevolg van volumevermindering in de ondergrond met een hoge nauwkeurigheid te beschrijven en te analyseren.
- Informatie uit de bestaande winning stelt FRISIA in staat om met goede nauwkeurigheid de dalingseffecten van de voorgenomen winning te voorspellen.
- Deze kennis wordt ingezet om in het Havenmondgebied een modern bewakingssysteem op te zetten dat een minimale verstoring op het wad veroorzaakt



## 11 Referenties

1. Abandonment of an extremely deep cavern at Frisia Salt, H. van Hekeren et al., SMRI Krakow Spring Conference, April 2009.
2. Update Subsidence Analysis & Forecast, v10.5, Esco Frisia Zout B.V., 13 May 2007.
3. Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution mining. The Barradeel case, J.N. Breunese et al, SMRI Chester (UK) Fall Conference, October 2003.
4. Analysis of Levelling Survey September 2006 v.3, Esco Frisia Zout B.V., 13 May 2007.
5. PS-InSAR-analyse van de bodemdaling in Noordwest-Friesland, TNO Bouw en Ondergrond, rapport TNO-034-UT-2009-02318/A, 24 november 2009.
6. Bodemdalingsanalyse NW-Friesland 1988-2007, Precisie en betrouwbaarheid uit geodetische metingen, A.P.E.M. Houtenbos, april 2008.
7. Milieueffecten continuering van de zoutwinning in noordwest Fryslân, Deel A (concept), Arcadis, november 2009.