

Beheerscyclus Meet- en regelprotocol Havenmond over het jaar 2022



Vorbereiding: Well Engineering Partners B.V.,
Hoogeveen

Auteur: ir. T.A. Chorus

Versie: 1.2

Publicatiedatum: 28 april 2023

Goedkeuring: J. Jansen, Frisia Zout B.V.
R. Mastaler, Frisia Zout B.V.



Inhoud

1	Inleiding	1
2	Productiecijfers	2
3	Holruimte metingen	2
4	Bodemdalingsmetingen.....	3
5	Pleistocene bodemdalingssnelheden	5
6	Toetsing belasting aan de gebruikruimte kombergingsgebied	8
7	Toetsing bodemdalingprognose	10
8	Zoutproductie met 'Hand aan de kraan'.....	11
9	Actualisering dalingsprognose	11
10	Referenties	12
11	Bijlagen	13
a)	Meet- en regelprotocol Havenmond	13
b)	Overzichtskaarten meetnetten zoutwinning Waddenzee	14
c)	Continu GNSS-monitoring grafieken	16
d)	Overzicht jaarlijkse waterpasmetering meetnet Harlingen-West	17
e)	Gemeten- en gemodelleerde bodembeweging vergelijking	19
f)	Gemodelleerde bodembeweging ten opzichte van eind zoutwinning HVM-02 prognose	20
g)	Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling september 2022.....	21
h)	Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling Havenmond eind zoutwinning	22
i)	Volumebalans	23

1 Inleiding

Volgens het Meet-en regelprotocol zoutwinning Havenmond (ref.1) actualiseert Frisia de bodemdalingsprognoses na elke periodieke GNSS-meetcampagne en waterpassing en in elk geval elke twee jaar, voor een zichtperiode van minimaal 50 jaar. De resultaten worden gerapporteerd en ter beschikking gesteld aan de Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) en het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK).

Naar aanleiding van de in september 2022 uitgevoerde meetcampagne (ref.3) wordt de beheerscyclus, omschreven in het Meet- en regelprotocol, voor de tweede keer uitgevoerd. De deelprocessen (stappen) van deze beheerscyclus zullen in dit rapport worden doorlopen.

De cyclus staat afgebeeld in bijlage a). Het Meet- en regelprotocol heeft betrekking op het winningsplan 'Havenmond'.

2 Productiecijfers

Frisia beschikt over injectie- en productiedata afkomstig van moderne, gekalibreerde debietmeters per caveerne. Uit deze meetgegevens kan men het geproduceerde zoutvolume en een volumebalans bepalen. Aan de hand van deze volumebalans kan, als alternatief voor holruimtemetingen, het caveerne- en convergentievolume berekend worden. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van relevante volumes van de HVM-02 caveerne.

Tabel 1. Berekend convergentievolume op 1 januari per jaartal

HVM-02	jan/20	jan/21	jan/22	jan/23
Opgelost zout volume (m ³)	0	35.106	401.075	862.117
Open caveerne volume (m ³)	0	25.813	299.956	574.116
Gebonden pekkel volume in sump (m ³)	0	737	8.423	12.285
Convergentie volume (m ³)	0	8.553	92.697	275.716

Het convergentievolume wordt hierbij berekend door het open caveerne volume en het gebonden pekkelvolume in de sump af te trekken van het totale opgeloste zoutvolume (ref. 2).

Onzekerheid wat betreft het opgeloste zoutvolume is zeer klein ($\approx 1\%$) vanwege het nauwkeurige data-acquisitiesysteem waarbij drukken, temperaturen, injectie- en productievolumes worden geregistreerd. Echter vanwege het grote volume op lange termijn is deze factor niet te verwaarlozen. Het pekkelvolume gebonden in de poreuze sump daarentegen, valt niet nauwkeurig vast te stellen en heeft daardoor een relatief grote onzekerheid ($\approx 20\%$). Het open caveernevolume wordt indirect berekend met behulp van de volumebalans, zoals omschreven in appendix 11i), en is in de loop der jaren geijkt aan holruimtemetingen (met name bij caveerne BAS-4) en heeft aangetoond een goede nauwkeurigheid te hebben ($\approx 5\%$). In de groeifase van de caveerne kan deze onzekerheid echter groter uitvallen ($\approx 10\%$), zoals ook duidelijk wordt in hoofdstuk 3. In de toekomst wanneer het caveerne volume gestabiliseerd is, kan dit percentage echter worden teruggebracht naar 3% tot 5% onzekerheid. De onzekerheid in het berekende convergentievolume is gelijk aan de som van de onzekerheden van de drie bepalende factoren. Voor het jaar 2022 komt dat neer op 68.490 m³ (24,8%).

3 Holruimtemetingen

In operationele cavernes worden holruimtemetingen verricht volgens het door SodM vastgestelde meetplan. Dit gebeurt ten minste wanneer het convergentievolume sinds de laatste holruimtemeting met 200.000 m³ is toegenomen. Tabel 2 geeft een overzicht van de holruimtemetingen van de HVM-02 caveerne.

Tabel 2. Overzicht holruimtemetingen

HVM-02	19/mrt/21	23/nov/21	21/jun/22
Open caveerne volume (m ³)	49.546	215.362*	365.078

*: De holruimtemeting van november 2021 was onvolledig. Vanwege de smalle caveernevorm was het niet mogelijk om een nauwkeurige meting uit te voeren in het bovenste gedeelte van de caveerne. De verwachting is dat het daadwerkelijke caveernevolume op dat moment ca. 21% hoger lag dan tabel 3 aangeeft.

In juni 2022 is de volledige caveerne gemeten. Het gemeten volume in 2022 was echter ca. 11% lager dan het berekende volume met behulp van de volume balans. Tijdens de volgende holruimtemeting zal worden geanalyseerd of het een eenmalige meetfout betreft, of een systematische afwijking. Ook wordt in samenwerking met het meetbedrijf gekeken of de

nauwkeurigheid van de metingen vergroot kan worden. De relatief smalle caverne vorm in het bovenste gedeelte van de caverne, kan bijdragen aan de meetfout aangezien de echo's hier slecht te interpreteren zijn. Naarmate de caverne breder wordt zal de relatieve nauwkeurigheid verbeteren.

4 Bodemdalingsmetingen

Pleistocene bodembeweging in de Waddenzee wordt met behulp van GNSS-techniek gemeten aan de hand van in het Pleistoceen gefundeerde peilmerken op diverse representatieve locaties. De periodieke metingen vinden plaats gedurende de jaarlijkse 'Wad' meetcampagne. Voor deze meetcampagne worden 5 clusters van meetpunten in de Waddenzee en 3 clusters van meetpunten op het land gemeten. De 'Wad' meetcampagne is uitgevoerd in de periode van 5 september 2022 tot en met 18 oktober 2022. Daarnaast worden 2 peilmerken nabij de caverne(s) continu gemeten, deze hebben een signaleringsfunctie om tijdig afwijkingen ten opzichte van de verwachte bodemdaling te kunnen detecteren. Zowel de periodieke als de continu GNSS metingen worden berekend ten opzichte van het referentiepeilmerk Zweins (000A2760). Peilmerk Zweins ligt op ca. 14 km afstand van het Havenmondwinningsgebied en wordt beschouwd als een meetpunt dat buiten het gebied van beïnvloeding van bodemdaling door gas- of zoutwinning ligt.

Naast de periodieke GNSS metingen wordt ook jaarlijks een nauwkeurigheds-waterpasmeting van het meetnet Harlingen-West uitgevoerd. Dit meetnet bestaat uit 59 peilmerken in Harlingen stad en het buitengebied. De Harlingen-West waterpasmetingen zijn uitgevoerd in de periode van 21 oktober 2022 tot en met 8 december 2022. Als aansluitpunt voor het meetnet is peilmerk 000A2748 gebruikt dat op ca. 5,4 km afstand ligt van het komcentrum van HVM-02 en daarmee ook buiten het beïnvloedingsgebied van bodemdaling door zoutwinning ligt. Dit is een nieuw aansluitpunt ten opzichte van de eerste 3 waterpasmetingen. Uit vergelijk van de resultaten met het meetnet Leeuwarden-West 2021 is gebleken dat dit nieuwe aansluitpunt met 2 mm is gedaald in 2021 ten opzichte van 2019. Hiervoor is gecorrigeerd in revisie 1 van het Antea rapport (ref. 3). Bij voorkeur is het aansluitpunt echter stabiel, Antea zal bij de volgende herhalingsmeting bekijken of peilmerk 00A2748 als aansluitpunt kan blijven dienen of dat er een alternatief gezocht moet worden.

Gecombineerd geven de 'Wad' meetcampagne en het meetnet van Harlingen-West 70 meetpunten die geanalyseerd worden in deze beheerscyclus van 2022. Een overzichtskaart van de meetnetten en bijbehorende resultaten is zichtbaar in bijlage b). De continue GNSS-monitoring van meetpunten CGPS1 en CGPS2 is gepresenteerd in bijlage c).

In Tabel 3 is een overzicht gegeven van de berekende differenties van de 'Wad' meetcampagne. Hierbij is de Pleistocene bodemdaling ten opzichte van start zoutwinning in september 2020 berekend. De afstanden van de peilmerken tot het huidig gemodelleerde komcentrum van HVM-02 (X = 155.193 m RD, Y = 580.265 m RD) zijn weergegeven in de tabel. In bijlage d) is een overzicht gepresenteerd van de berekende differenties van de waterpasmeting van het meetnet Harlingen-West.

Tabel 3. Differenties 'Wad' meetcampagne

Locatie	Peilmerk	Coördinaten		Afstand tot komcentrum Sep/22	Totaal gemeten hoogte t.o.v. Sep/20		
		X (m)	Y (m)		HVM-02 (m)	Sep/20 (mm)	Sep/21 (mm)
Zweins	000A2760	169.406	578.653	14.311	0,0	0,0	0,0
WPM0A4020	000A4020	156.616	576.535	3.998	0,0	-0,7	-2,1
WPM01	11004	156.079	582.682	2.573	0,0	-1,8	-5,9
WPM02	12004	152.764	580.803	2.480	0,0	-5,0	-7,7
WPM04	14004	153.573	579.786	1.684	0,0	-2,7	-9,6
WPM05	15004	153.548	578.643	2.308	0,0	-2,9	-7,2
WPM06	16004	155.635	579.816	638	0,0	-4,0	-19,0
WPM07	000A02908	157.038	576.976	3.777	0,0	-1,3	-2,8
WPM08	000A02907	157.894	578.812	3.075	0,0	-0,7	-2,9
CGPS01	ARP CGPS01	154.273	579.494	1.198	0,0	0,4	-14,1
CGPS02	ARP CGPS02	155.110	580.960	695	0,0	-1,8	-23,6

De gemeten bodembeweging gedurende de 'Wad' meetcampagne en de waterpasmeting in Harlingen-West varieert tussen de 23,6 mm daling en 2,7 mm stijging ten opzichte van start zoutwinning. Hiervan dalen de meetpunten op zee tussen de 23,6 en 5,9 mm, met een gemiddelde daling van 12,4 mm. De meetpunten op land variëren tussen de 8,0 mm daling en 2,7 mm stijging, met een gemiddelde daling van 0,9 mm ten opzichte van start zoutwinning. De bodemdalingskom van de zoutwinning blijft hiermee in 2022 grotendeels buitendijks.

Er zijn een aantal peilmerken die dalingen of stijgingen tonen die buiten de verwachtingen liggen. De grootste uitschieters zijn peilmerken 14, 4031, 4032 en 4033, allen op het land aan de noordkant van het Harlingen-West meetnet. Peilmerk 14 is de grootste uitschieter die een bodemdaling van 8,0 mm laat zien in september 2022 ten opzichte van start zoutwinning. Tijdens de vorige meetcampagne in september 2021 was dit slechts 0,9 mm daling. Peilmerk 14 ligt op een afstand van 3,7 km van HVM-02 en ligt daarmee op de rand van de huidige invloedsfeer. Dichtbijgelegen peilmerken 10, 30, 5D7 en 15 bevestigen dit met bodembewegingen van slechts 1,4 mm daling tot 1.1 mm stijging. Deze peilmerken liggen op 1,5 – 2 km afstand van de oude Frisia productielocatie BAS-123. Echter aangezien het om een enkel peilmerk gaat dat zakt in deze regio, met een afwijking van 7 tot 9 mm ten opzichte van nabij gelegen peilmerken, worden ook invloeden van de oude Barradeel cavernes zoals naar verwachting uitgesloten. Er kan geconcludeerd worden dat de daling in dit peilmerk veroorzaakt wordt door andere factoren dan zoutwinning.

Peilmerken 4031, 4032 en 4033 liggen nabij de zeedijk ten noorden van de industriehaven van Harlingen. Deze peilmerken laten een stijging tussen de 2,1 en 2,7 mm zien ten opzichte van start zoutwinning dat buiten het verwachtingspatroon van 2,0 tot 2,2 mm daling ligt. Deze bodemstijgingen waren ook al aanwezig tijdens de meetcampagne van september 2021, waarbij de gemeten waarden tussen de 3,8 en 4,1 mm lagen ten opzichte van start zoutwinning. Het betreft hier dus een eenmalige stijging tussen 2020 en 2021, gedurende de aankomende beheerscycli zal worden geanalyseerd of deze meetpunten stabiliseren.

Meetpunt WPM02 aan de noordwest kant van het meetgebied op het Wad is in de voorgaande beheerscyclus van 2021 benoemd als uitschieter. Dit meetpunt had een afwijking van 4,4 mm ten opzichte van de gemodelleerde bodemdalingskom. In 2022 wijkt dit punt nog steeds af, maar lijkt zich te stabiliseren. De afwijking ten opzichte van de gemodelleerde bodemdalingskom in 2022 (zie

hoofdstuk 5) is verminderd naar 3,3 mm. Het lijkt hier een initiële na-zetting van het meetpunt te betreffen, of externe effecten zoals bodemdaling veroorzaakt door gaswinning van het Zuidwal-veld dat in 2021 is gestopt.

Na-zettings effecten, waarbij een nieuw aangebracht peilmerk in de eerste tijdperiode daalt door bijvoorbeeld inklinking, speelt in de eerste jaren van de beheerscycli een relatief grote rol. Tussen 2019 en 2020, de periode voor start zoutwinning, was er sprake van een gemiddelde daling van 2,3 mm in alle meetpunten in het Harlingen-West meetnet met een maximale daling van 9,1 mm. Hiervoor is een eenmalige correctie uitgevoerd door alle bodembewegingen te berekenen ten opzichte van 2020, het start jaar van de zoutwinning in Havenmond. De verwachting is echter dat sommige meetpunten nog niet volledig gestabiliseerd waren in dat jaar. Verdere na-zetting van peilmerken, in de ordergrootte van enkele millimeters, heeft dus invloed op de gemodelleerde zoutwinning bodemdalingsskom zoals omschreven in volgend hoofdstuk. Deze enkele millimeters zullen op de lange termijn weinig effect hebben op de nauwkeurigheid van de meetresultaten, echter in deze beginjaren waarbij ook de bodemdaling veroorzaakt door zoutwinning in de ordergrootte van enkele millimeters tot centimeters zit, zal dit wel een merkbare invloed hebben.

5 Pleistocene bodemdalingssnelheden

De Pleistocene bodemdalingssnelheid $S(J)$ van een kombergingsgebied kan op twee manieren bepaald worden. Bij de eerste methode wordt de bodemdalingssnelheid berekend met behulp van het convergentievolumen op basis van de productiecijfers en holruimtemetingen. Bij de tweede methode wordt de bodemdalingssnelheid berekend aan de hand van een kommodel dat met behulp van de periodieke bodemdalingssmetingen is geoptimaliseerd. De Pleistocene bodemdaling $S(J)$ wordt bepaald per 1 januari van elk kalenderjaar. Omdat de periodieke metingen uitgevoerd zijn in september van het kalender jaar, geeft een combinatie van beide methoden het beste resultaat. Hierbij wordt een kommodel geoptimaliseerd ten tijde van de periodieke metingen, en worden de geoptimaliseerde komparameters toegepast om een kommodel te maken met het convergentievolumen op 1 januari.

De vorm en omvang van de bodemdalingsskom van een convergerende caverne kan worden beschreven met een cirkel symmetrisch Gaussisch model (ref. 2) volgens:

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

In deze formule is $w(x, y)$ de daling op locatie (x, y) , w_{max} de maximum bodemdaling in het centrum (x_0, y_0) van de dalingskom, γ (gamma) een empirische parameter die de afvlakking van de kom bepaalt, δ (delta) een empirische parameter die de steilheid van de kom bepaalt en r de horizontale afstand van een willekeurige positie (x, y) tot het centrum van de kom (x_0, y_0) . Optimalisatie vindt plaats door komparameters w_{max} , γ en δ , x_0 en y_0 te berekenen met de kleinste kwadraten rekenmethode waardoor er een 'best fit' ontstaat van het kommodel ten opzichte van de bodemdalingssmetingen. Hierbij wordt het verschil tussen de bodemdalingssmetingen en de gemodelleerde kom geminimaliseerd. Op dit moment is alleen HVM-02 aanwezig en in productie en wordt er dus slechts 1 kom gemodelleerd.

De resultaten van de HVM-02 kom optimalisatie met behulp van de meetgegevens van september 2022 is gepresenteerd in Tabel 4. Dezelfde komparameters γ en δ , x_0 en y_0 zijn gebruikt om een kom te berekenen ten tijde van januari 2023 met hetzelfde komvolumen / convergentie volumeperscentage als gevolg. Een visuele vergelijking van de gemeten bodembeweging ten opzichte van de gemodelleerde kom is gepresenteerd in bijlage e).

Tabel 4. Resultaten kom optimalisatie 2022

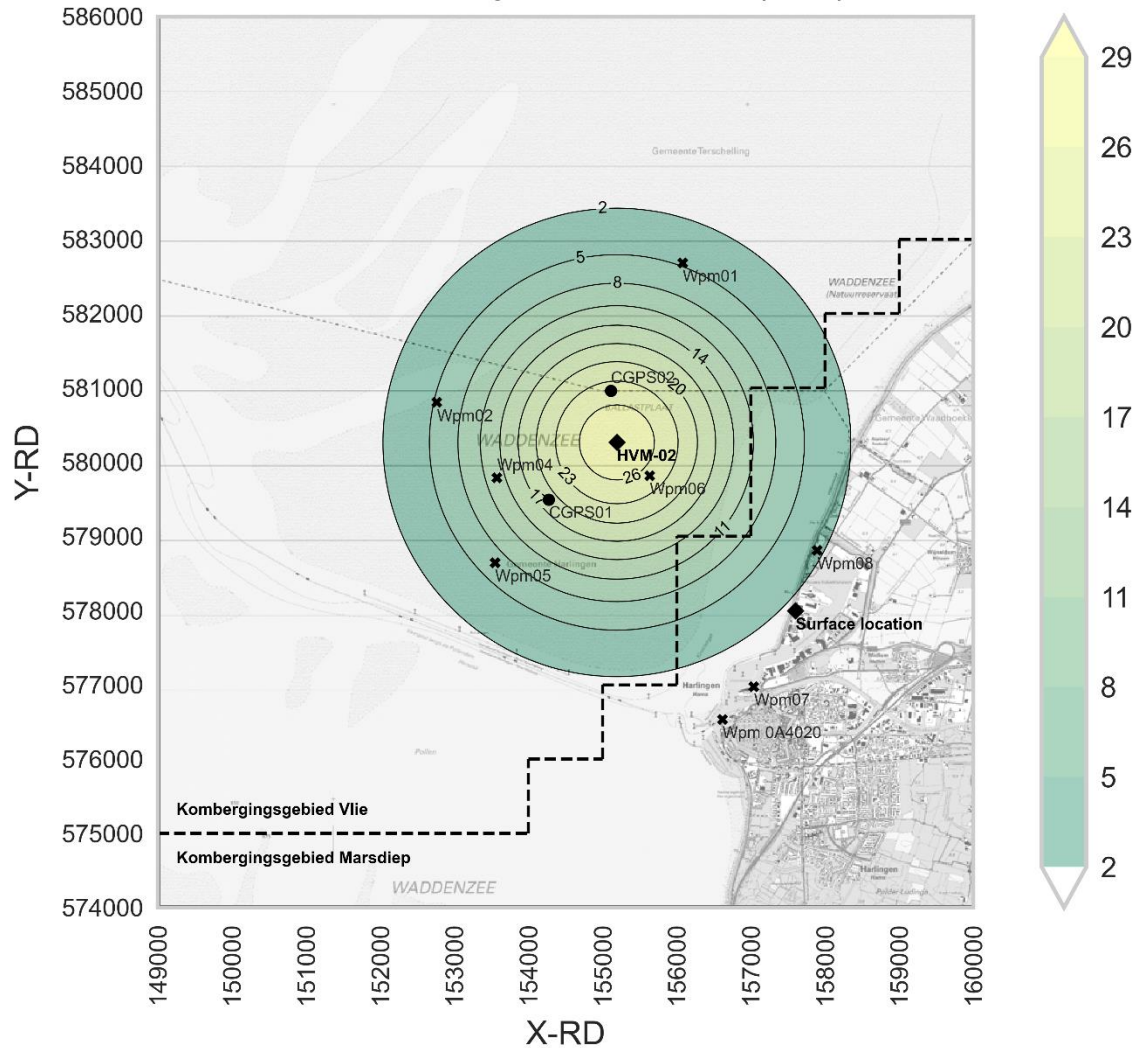
HVM-02 Kom parameters	Sep-22	Jan-23
X-coördinaat (m RD)	155.193	155.193
Y-coördinaat (m RD)	580.265	580.265
Gamma	4,91E-07	4,91E-07
Delta	1,924	1,924
W_{\max} (mm)	23,6	28,1
Komvolume (m ³)	273.314	325.433
Convergentie volume (m ³)	231.559	275.716
Daling / convergentie volume (mm/m ³)	1,02E-04	1,02E-04
Komvolume / convergentie volume (%)	118,0%	118,0%
Kleinste kwadraten afwijking (mm)	1,82	

Zoals gepresenteerd in Tabel 4 is het volume van de gemodelleerde kom groter dan het convergentie volume. Dat wil zeggen dat de gemodelleerde bodemdaling op basis van alle meetpunten groter is dan de berekende bodemdaling op basis van de productie cijfers. Dit ligt buiten het verwachtingspatroon van een ratio van ca. 90 tot 100% komvolume ten opzichte van het convergentie volume.

In hoofdstuk 2 zijn de productiecijfers gepresenteerd waarbij een onzekerheid volume van 68.490 m³ is berekend op het convergentie volume ten tijde van 1 januari 2023. Daarmee ligt het convergentie volume tussen de 207.226 m³ en 344.206 m³. Het gemodelleerde komvolume valt binnen dit bereik. Daarnaast is de verwachting dat na-zettings effecten zoals omschreven in hoofdstuk 4 een belangrijke oorzaak zijn van het vergrootte komvolume. Met name de meetpunten op het land die buiten, of op de rand van, de bodemdalingsskom van HVM-02 liggen zullen vanwege na-zettings effecten de gemodelleerde bodemdalingsskom breder maken dan de daadwerkelijke bodemdalingsskom veroorzaakt door zoutwinning.

In deze beheerscyclus zal worden vastgehouden aan de uitkomst van de metingen en de bijbehorende gemodelleerde bodemdalingsskom. De toepassing van het 118,0% komvolume / convergentie volume verhouding op de productiecijfers van 2022 (zie Tabel 1) resulteert in een bodemdalingsskom volume van 325.433 m³ ten tijde van 1 januari 2023. De gemodelleerde bodemdalingsskom ten tijde van 1 januari 2023 is gevisualiseerd in Figuur 1 onderstaand. De gemodelleerde bodemdalingsskom ten tijde van de meetcampagne in september 2022 is gepresenteerd in bijlage 11g).

Gemodelleerde contourenkaart Pleistoceen bodemdaling Jan-2023 zoutwinning Havenmond (mm)



Figuur 1. Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling 1 januari 2023

De bodemdaling komt valt in 2 verschillende koberginggsgebieden genaamd Vlie en Marsdiep. Voor deze koberginggsgebieden wordt de Pleistocene bodemdaling snelheid $S(J)$ berekend per jaar J door het komvolume dat binnen het bodemdalingsgebied ligt te delen door de oppervlakte van dat gebied. De oppervlakte van koberginggsgebied Vlie bedraagt 668 km^2 , die van koberginggsgebied Marsdiep 712 km^2 . Tabel 5 geeft een overzicht van de komvolumes en bodemdalingssnelheden per koberginggsgebied.

Tabel 5. Bodemdaling snelheden per koberginggsgebied voor het jaar 2022

Koberginggsgebied	Komvolume 2021	Komvolume 2022	Bodemdaling snelheid 2022	
	m3	m3	m3/jaar	mm/jaar
Vlie	66.556	292.156	225.600	0,34
Marsdiep	5.453	28.297	22.844	0,03
Vaste land	650	4.980	4.330	n.v.t.
Totaal	72.659	325.433	252.774	

6 Toetsing belasting aan de gebruiksruimte kombergingsgebied

De belasting van de gebruiksruimte $B(J)$ van een kalenderjaar J wordt gedefinieerd als:

$$B(J) = \frac{S(J-3) + S(J-2) + S(J-1) + S(J) + S(J+1) + S(J+2)}{6}$$

Hierbij worden de toekomstige dalingssnelheden $S(J+1)$ en $S(J+2)$ ontleend aan de bodemdalingsprognose gebaseerd op de actueel geldige productieprognose. Voor deze bodemdalingsprognose wordt $V_{\text{kom}} = V_{\text{con}}$ gehanteerd.

De belasting door zoutwinning en gaswinning dient binnen de beschikbare gebruiksruimte G van het betreffende kombergingsgebied te blijven. De gebruiksruimte G wordt gedefinieerd door het meegroeivermogen M van het kombergingsgebied en de relatieve zeespiegelstijging Z_{rZSS} als:

$$G(J) = M - Z_{rZSS}(J)$$

Het meegroeivermogen M voor zowel kombergingsgebied Vlie als kombergingsgebied Marsdiep is vastgesteld op 5 mm/jaar. Voor zeespiegelstijging wordt er rekening gehouden met 2.4 mm/jaar tot 2026 (beleidsscenario), toenemend tot 4.5 mm/jaar in 2050 (richtscenario) (ref.4). Gaswinning uit het Zuidwal-gasveld is in begin 2021 stilgelegd. Tot en met 2020 was er sprake van een gaswinning bodemdaling snelheid van 0.42 mm/jaar in kombergingsgebied Vlie (ref.5). Na-ijlende bodemdaling is voor enkele jaren verwacht, alhoewel de kwantiteit daarvan nog onbekend is bij Frisia. Op dit moment geldt er nog een reservering voor toekomstige gaswinning onder het kombergingsgebied Vlie.

Een overzicht waarin de belasting in 2022 is berekend voor kombergingsgebied Vlie is gegeven in Tabel 6 en voor kombergingsgebied Marsdiep in Tabel 7. In deze overzichten wordt een inschatting gemaakt van na-ijlende gaswinning bodemdaling. Aangezien de belasting wordt berekend aan de hand van een 6-jaarlijks gemiddelde is er in 2019 al sprake van een zoutwinning belasting terwijl in 2020 pas de productie gestart is.

Tabel 6. Belasting kombergingsgebied Vlie 2022

Kombergingsgebied Vlie			(J-3)	(J-2)	(J-1)	(J)	(J+1)	(J+2)
Jaar	J	-	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Meegroeivermogen	M	mm/jaar	5	5	5	5	5	5
Zeespiegelstijging	Z_{rZSS}	mm/jaar	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Gebruiksruimte	G	mm/jaar	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Bodemdalingsnelheid gaswinning	S_{gas}	mm/jaar	0,42	0,42	0,28*	0,14*	0*	0*
Belasting gaswinning	B_{gas}	mm/jaar	0,40	0,35	0,28	0,21	0,14	0,07
Bodemdalingsnelheid zoutwinning	S_{zout}	mm/jaar	0	0	0,10	0,34	0,25	0,36
Belasting zoutwinning	B_{zout}	mm/jaar	0,02	0,07	0,11	0,18	0,28	0,38
Belasting totaal	B	mm/jaar	0,41	0,42	0,39	0,39	0,42	0,45

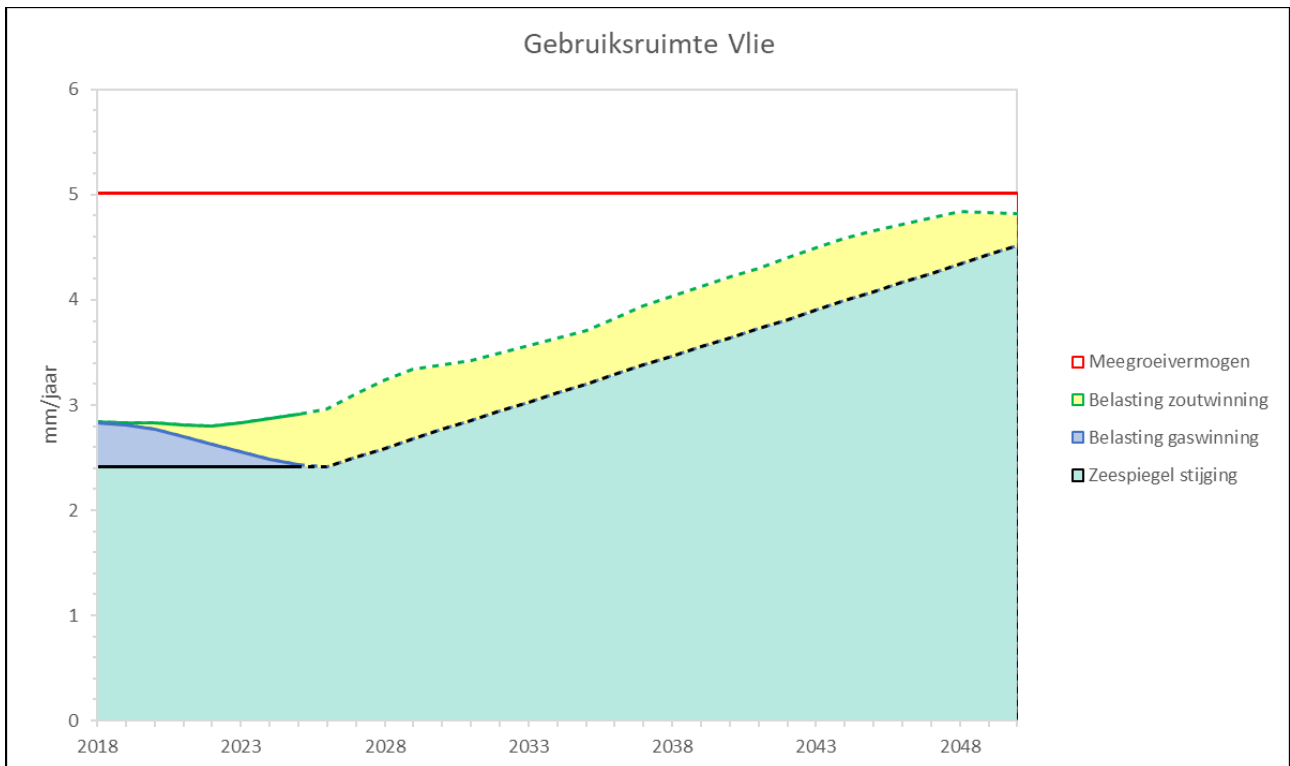
*: Inschatting na-ijlende gaswinning bodemdaling

Tabel 7. Belasting kombergingsgebied Marsdiep 2022

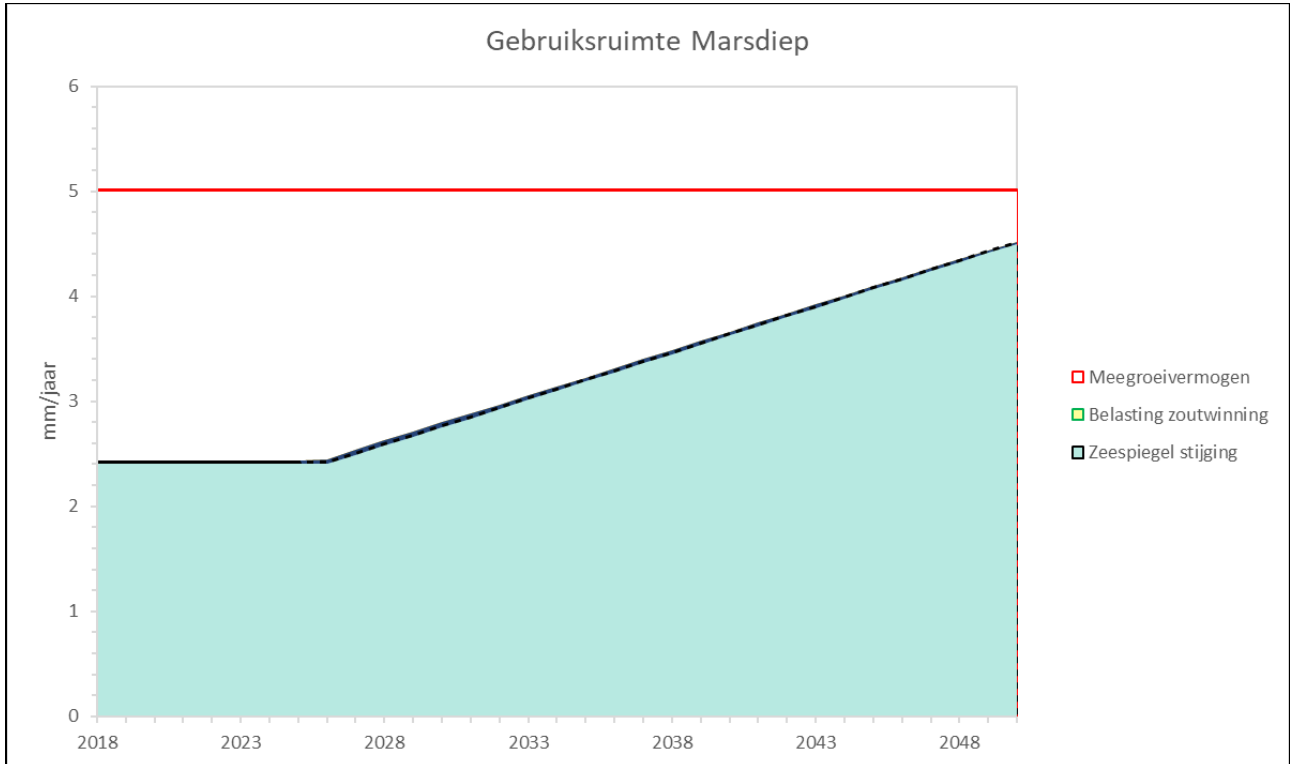
Kombergingsgebied Marsdiep			(J-3)	(J-2)	(J-1)	(J)	(J+1)	(J+2)
Jaar	J	-	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Meegroeivermogen	M	mm/jaar	5	5	5	5	5	5
Zeespiegelstijging	Z _{rZSS}	mm/jaar	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Gebruiksruimte	G	mm/jaar	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Bodemdalingsnelheid	S	mm/jaar	0	0	0,01	0,03	0,02	0,04
Belasting	B	mm/jaar	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03

Gebaseerd op het productiescenario van het winningsplan Havenmond kan ook een schatting gemaakt worden van de toekomstige belastingen. Hierbij wordt de start van de winning, ten opzichte van het winningsplan (ref.6), naar 2020 verzet. Ook is HVM-02 als eerste in productie genomen in plaats van HVM-01, zijn de nieuwste inzichten qua caveerne volume ontwikkeling meegenomen en zijn de locaties van HVM-02 en HVM-01 aangepast aan de huidige situatie / planning. Zoals omschreven in hoofdstuk 5 wordt voor dalingsprognoses rekening gehouden met $V_{\text{kom}} = V_{\text{con}}$. De resulterende gebruiksruimte figuren zijn gepresenteerd in Figuur 2 en Figuur 3.

Na 2026 is er sprake van een richtscenario waarbij nog geen gebruiksruimte is vastgesteld. Wel kan er een inschatting gemaakt worden van de gebruiksruimte door middel van een lineaire stijging van de verwachte zeespiegelstijging tussen 2026 (2,4 mm/jaar) en 2050 (4,5 mm/jaar). Er worden hieraan geen rechten dan wel plichten aan ontleend.



Figuur 2. Gebruiksruimte Vlie. Inschatting gebruiksruimte na 2026 (stippellijnen)



Figuur 3. Gebruiksruimte Marsdiep. Inschatting gebruiksruimte na 2026 (stippellijnen)

7 Toetsing bodemdalingsprognose

De bodemdalingskomvorm kan getoetst worden aan de kom parameters omschreven in de technische bijlage van het Meet- en regelprotocol. De geoptimaliseerde kom parameters γ en δ van $4,91E^{-07}$ en 1,924 respectievelijk liggen nabij de komparameters omschreven in Meet- en regelprotocol van $4,35E^{-07}$ en 1,960. De bodemdalingskomvorm voldoet daarmee aan de verwachtingen. De geoptimaliseerde kom parameters zorgen voor een iets bredere bodemdalingskom. Dit zal zoals in hoofdstuk 5 omschreven is gedeeltelijk veroorzaakt zijn door het groot aantal meetpunten dat op de rand van of buiten de huidige bodemdalingskom ligt waarin nog geen duidelijke bodemdalingstrend zichtbaar is.

Het gemeten Pleistocene bodemdalingsvolume kan daarnaast vergeleken worden met de bodemdalingsprognose uit het winningsplan Havenmond. Wanneer de start van zoutwinning wordt verzet naar 2020 in plaats van 2015, zoals aangegeven in het winningsplan, zou in 2021 een Pleistocene bodemdaling van 30 mm plaatsvinden in het diepste punt met een komvolume van ca. 294.273 m^3 . In 2022 zou dit toegenomen zijn tot een daling van 55 mm, equivalent aan een komvolume van ca. 540.325 m^3 . De daadwerkelijk gemeten bodemdaling zit daar flink onder met komvolumes van 72.658 m^3 in 2021 en 325.433 m^3 in 2022.

Zoals omschreven in de voorgaande beheerscyclus van 2021 heeft dit verschil met name te maken met de cavernegroei snelheid. In het winningsplan is een simplificatie van de cavernegroei toegepast waarbij het cavernevolume lineair groeit. In werkelijkheid groeit de caveer het snelst gedurende de eerste productie jaren waarna een stabiel cavernevolume bereikt wordt. Wanneer het cavernevolume groeit, neemt het convergentievolume minder snel toe. Dit heeft als gevolg dat de bodemdaling snelheid lager zal liggen in het begin van de productieperiode van een caveer dan aan het eind. In het geval van HVM-02 is dit effect vergroot aangezien dit de enige caveer is binnen het Havenmondgebied dat momenteel ontwikkeld wordt. Hierdoor groeit de caveer relatief snel met een lagere bodemdalingssnelheid tot gevolg. Wanneer een tweede caveer in productie wordt genomen zal de productie verdeeld worden over beide cavernes en zal het cavernevolume van HVM-02 stabiliseren of zelfs afnemen, met een hogere bodemdalingssnelheid tot gevolg. Deze

effecten hebben echter weinig effect op de bodemdaling belasting, aangezien dit over een 6 jaarlijks gemiddelde wordt berekend. Deze inzichten zijn meegenomen in Figuur 2 en Figuur 3 in hoofdstuk 6.

8 Zoutproductie met ‘Hand aan de kraan’

Volgens het ‘Hand aan de kraan’ principe zal Frisia de zoutwinning verminderen bij een dreigende overschrijding van de gebruiksruimte. Hierbij hoort een remwegscenario waarmee de bodemdalingssnelheid en de belasting van het kombergingsgebied tijdig wordt gereduceerd om binnen de vastgestelde gebruiksruimte te blijven. Op basis van hoofdstukken 6 en 7 kan het volgende worden geconcludeerd:

- De gemeten en gemodelleerde bodemdaling blijft in 2022 binnen de gebruiksruimte van kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep.
- In kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep is voldoende gebruiksruimte beschikbaar voor voortzetting van de zoutwinning.
- Er zijn op dit moment geen benodigdheden om het productiescenario aan te passen.

9 Actualisering dalingsprognose

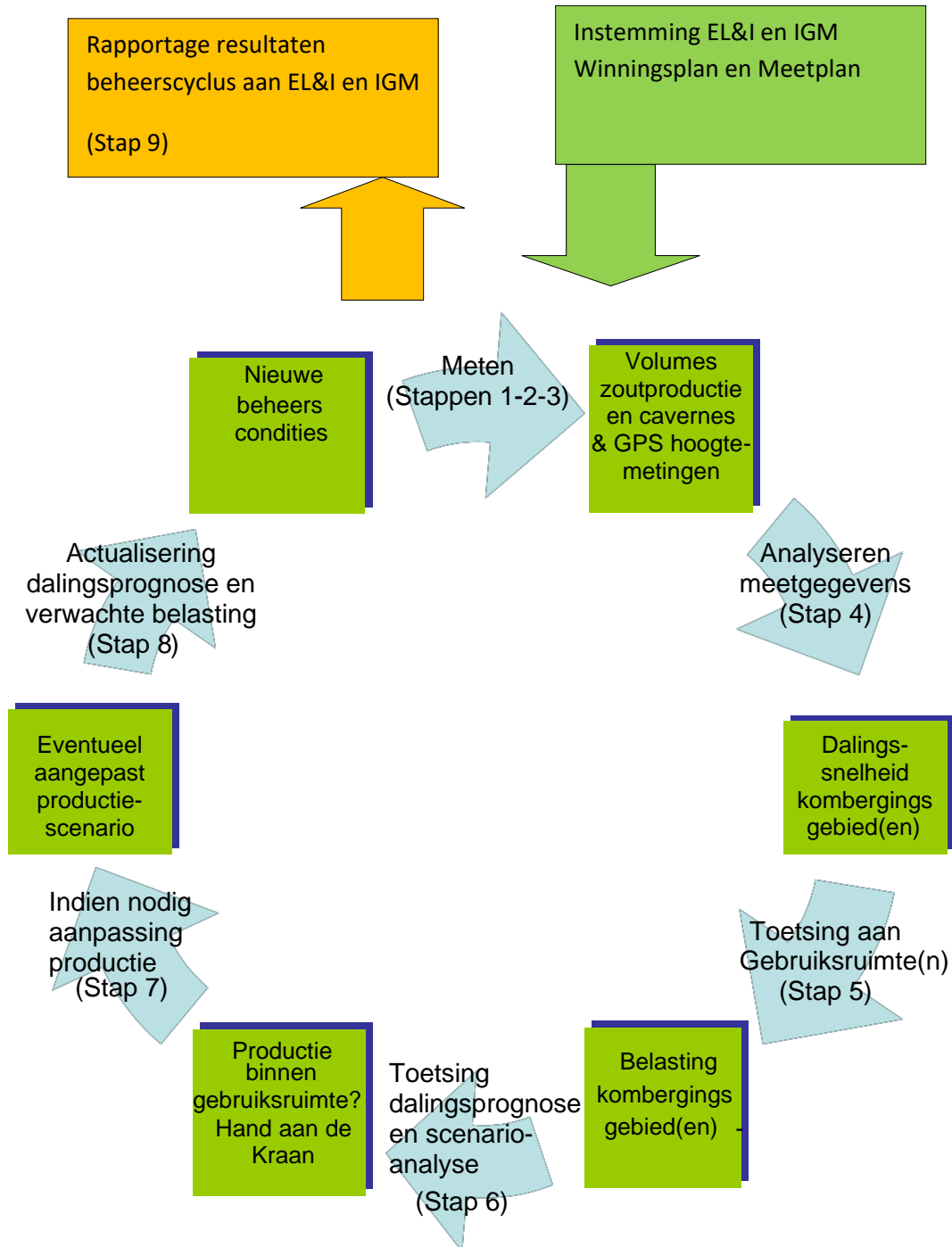
Er zijn geen nieuwe vervolgsenario's voor zoutproductie vastgesteld. De lange termijn belasting van de kombergingsgebieden is gegeven in Figuur 2 en Figuur 3. In bijlage h) is de finale Pleistocene bodemdaling gepresenteerd, gebaseerd op het winningsplan, de productiecijfers tot heden en de nieuwste inzichten qua caverne volume ontwikkeling.

10 Referenties

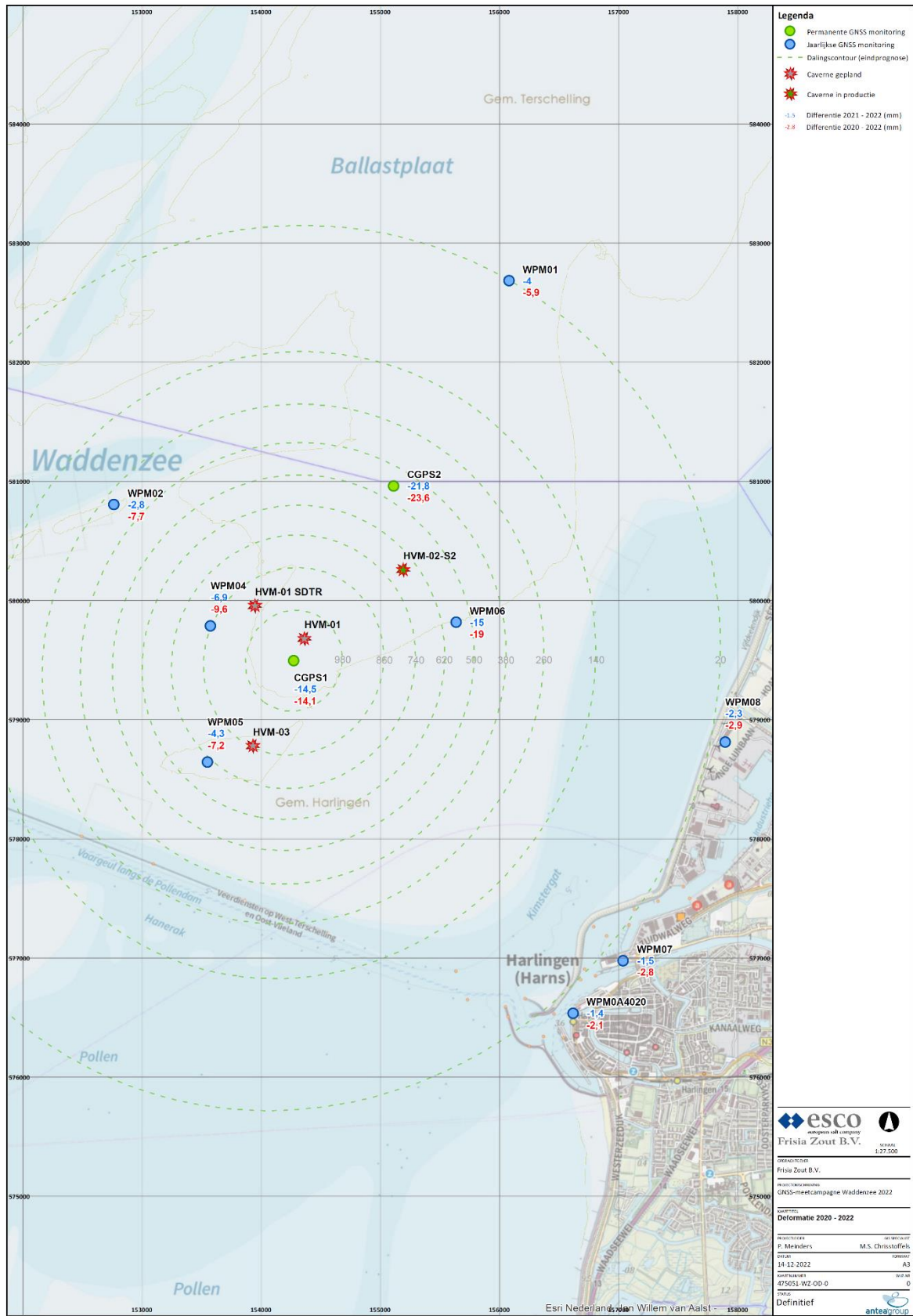
1. Meet- en regelprotocol zoutwinning 'Havenmond' in de Waddenzee v.2, Frisia Zout B.V., 18 oktober 2012
2. Technische Bijlage bij Meet- en regelprotocol zoutwinning 'Havenmond' v.3.3, Frisia Zout B.V., 11 November 2015
3. Monitoring bodemdaling zoutwinning Waddenzee Jaarrapportage 2022 revisie 01, Antea Group, 26 januari 2023
4. Advies beleids- en richtscenario relatieve zeespiegelstijging Waddenzee, Universiteit Utrecht, 18 december 2020
5. Bodemdaling statusrapport 2020 – Drenthe Overijssel Friesland versie 1.1, Vermilion Energy Netherlands B.V., 1 juli 2020
6. Winningsplan voor winningsvergunning 'Havenmond' v.4 Final, Frisia Zout B.V., 16 maart 2012

11 Bijlagen

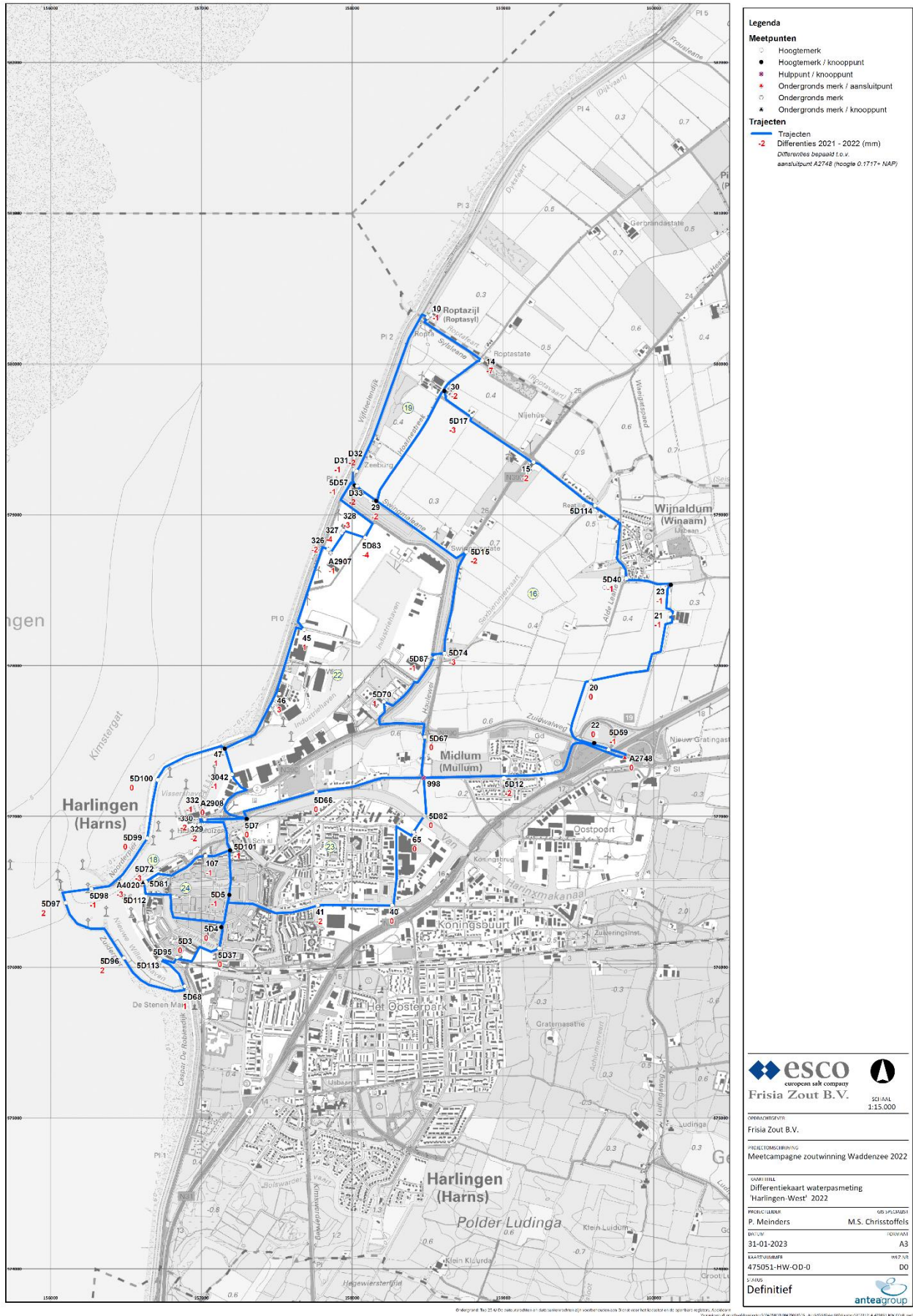
a) Meet- en regelprotocol Havenmond



b) Overzichtskarten meetnetten zoutwinning Waddenzee

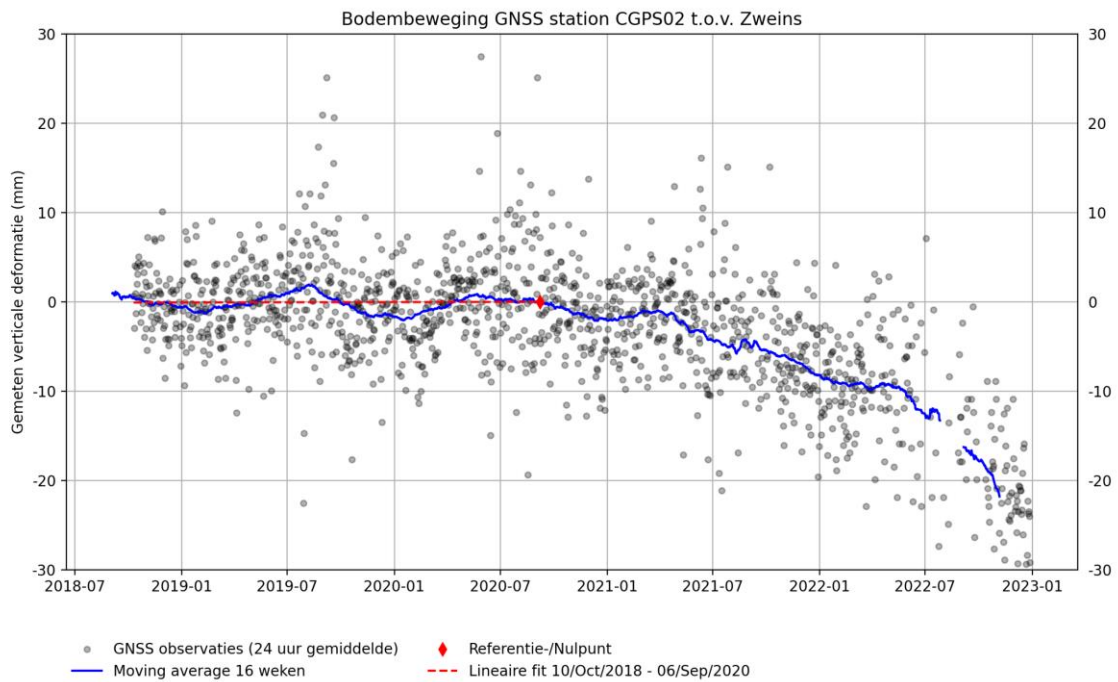
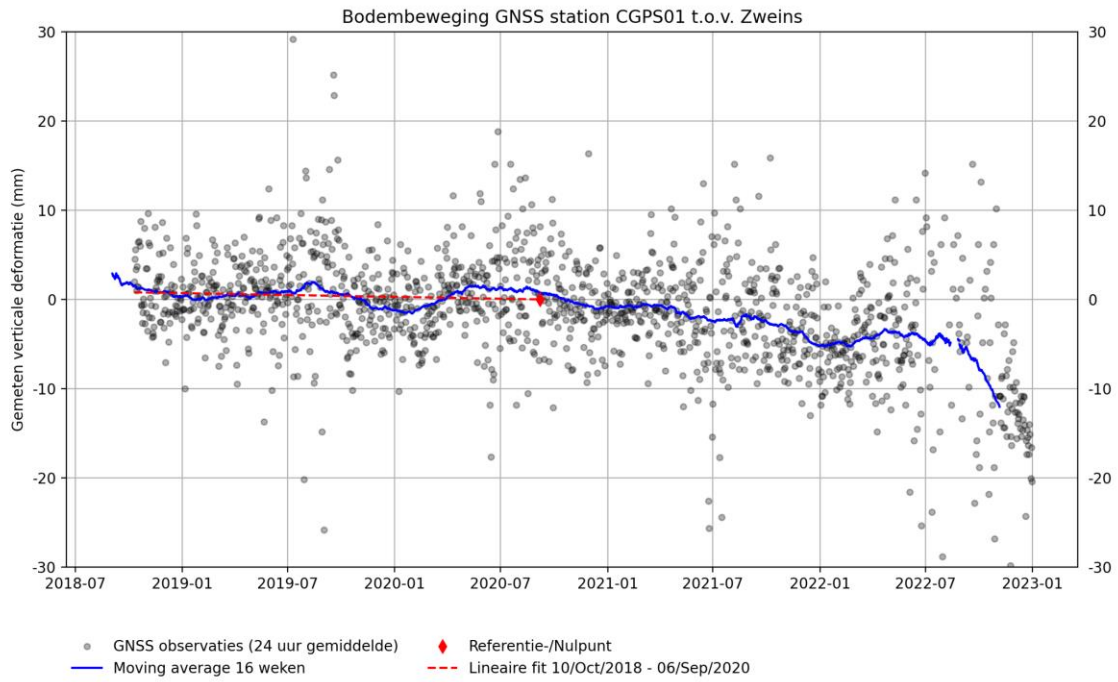


Figuur 4: GNSS 'Wad' Meetcampagne resultaten 2022 (ref.3)



Figuur 5: Waterpasmeting meetnet Harlingen-West resultaten 2022 (ref.3)

c) Continu GNSS-monitoring grafieken

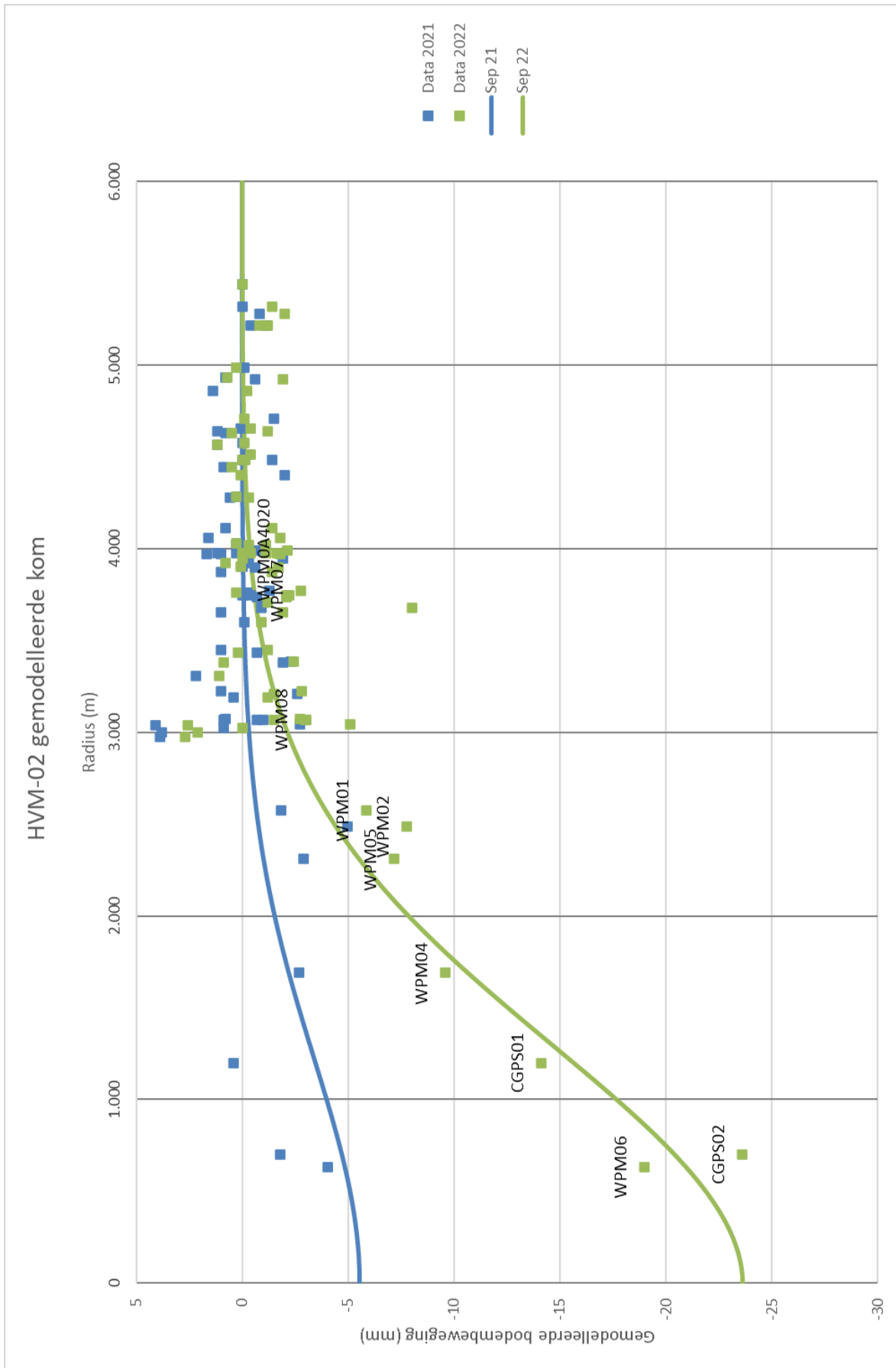


d) Overzicht jaarlijkse waterpasmeting meetnet Harlingen-West

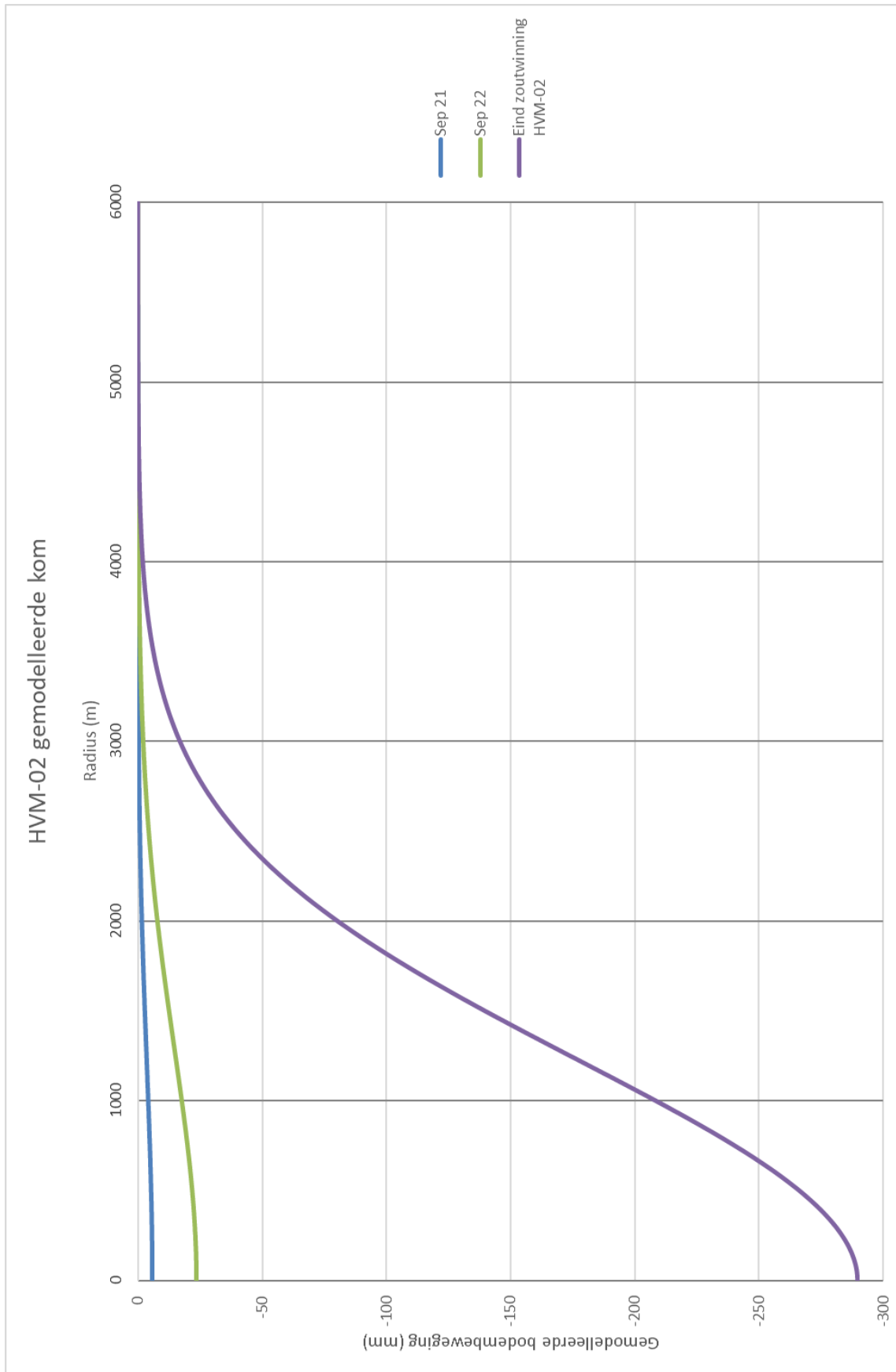
Peilmerk	Coördinaten		Afstand tot komcentrum Sep/22	Totaal gemeten hoogte t.o.v. Sep/20		
	X (m)	Y (m)		HVM-02 (m)	Sep/20 (mm)	Sep/21 (mm)
0000010	158.500	580.308	3.314	0,0	2,2	1,1
0000014	158.862	580.020	3.684	0,0	-0,9	-8,0
0000015	159.203	579.347	4.121	0,0	0,8	-1,4
0000020	159.582	577.894	4.996	0,0	-0,1	0,3
0000021	160.107	578.342	5.285	0,0	-0,8	-2,0
0000022	159.606	577.486	5.223	0,0	-1,1	-0,8
0000023	160.113	578.534	5.223	0,0	-0,4	-1,2
0000029	158.160	579.092	3.198	0,0	0,4	-1,2
0000030	158.612	579.820	3.455	0,0	1,0	-1,2
0000040	158.265	576.408	4.938	0,0	0,8	0,7
0000041	157.771	576.407	4.647	0,0	1,2	-1,2
0000045	157.682	578.237	3.218	0,0	-2,6	-1,5
0000046	157.517	577.812	3.387	0,0	-1,9	0,9
0000047	157.157	577.450	3.440	0,0	-0,7	0,2
0000065	158.406	576.894	4.664	0,0	0,1	-0,4
0000107	157.029	576.736	3.984	0,0	0,3	-1,1
0000326	157.843	578.770	3.050	0,0	-2,7	-5,1
0000327	157.929	578.879	3.075	0,0	0,9	-3,0
0000328	157.941	578.896	3.078	0,0	0,8	-2,7
0000329	156.963	576.964	3.752	0,0	0,0	-2,1
0000330	156.974	576.967	3.755	0,0	-0,4	-2,2
0000332	156.972	576.976	3.745	0,0	-0,7	-2,1
0003042	157.203	577.277	3.608	0,0	-0,1	-0,9
0004031	158.005	579.298	2.981	0,0	3,9	2,7
0004032	158.029	579.287	3.008	0,0	3,8	2,1
0004033	158.032	579.189	3.043	0,0	4,1	2,6
000A2748	159.809	577.387	5.448		0,0	0,0
000A2760	157.858	578.747	3.075	0,0	0,0	
000A2907	157.023	576.980	3.767	0,0	-1,0	-1,5
000A2908	156.613	576.552	3.981	0,0	-0,2	0,3
000A4020	156.610	576.550	3.982	0,0	1,2	-1,6
000A5020	156.838	576.063	4.518		0,0	
005D0003	157.133	576.266	4.451	0,0	-0,2	-0,4
005D0004	157.187	576.478	4.286	0,0	0,9	0,5
005D0005	157.303	576.983	3.908	0,0	0,6	-0,3
005D0007	159.007	577.253	4.867	0,0	0,0	0,1
005D0012	158.757	578.751	3.879	0,0	1,4	-0,2
005D0015	158.795	579.657	3.660	0,0	1,0	-1,4
005D0017	157.117	576.124	4.573	0,0	1,0	-1,9

Peilmerk	Coördinaten		Afstand tot komcentrum Sep/22	Totaal gemeten hoogte t.o.v. Sep/20		
	X (m)	Y (m)	HVM-02 (m)	Sep/20 (mm)	Sep/21 (mm)	Sep/22 (mm)
005D0037	159.818	578.578	4.931	0,0	1,2	1,2
005D0040				0,0	-0,6	-1,9
005D0057	158.018	579.194	3.029	0,0	0,9	0,0
005D0059	159.700	577.440	5.327		0,0	-1,4
005D0066	157.760	577.160	4.036	0,0	0,2	0,3
005D0067	158.482	577.525	4.289	0,0	0,3	0,3
005D0068	156.890	575.870	4.717	0,0	-1,5	-0,1
005D0070	158.210	577.760	3.929	0,0	-0,3	0,8
005D0072	156.614	576.558	3.976	0,0	1,0	-1,8
005D0074	158.614	578.079	4.068	0,0	1,6	-1,8
005D0081	156.632	576.562	3.979	0,0	1,7	
005D0082	158.478	577.003	4.637	0,0	0,8	0,5
005D0083	158.087	578.846	3.231	0,0	1,0	-2,8
005D0087	158.550	578.050	4.030	0,0	0,1	-1,1
005D0095	156.727	576.050	4.491	0,0	-1,4	
005D0096	156.487	576.060	4.405	0,0	-2,0	0,1
005D0097	156.100	576.424	3.952	0,0	-1,9	0,0
005D0098	156.269	576.517	3.905	0,0	-0,6	-1,7
005D0099	156.643	576.853	3.714	0,0	-1,0	-1,2
005D0100	156.710	577.241	3.389	0,0	-2,3	-2,4
005D0101	157.192	576.776	4.028	0,0	0,3	-0,3
005D0112	156.610	576.550	3.982			-0,4
005D0113	156.720	576.050	4.489			-0,1
005D0114	159.610	579.060	4.586			-0,1

e) Gemeten- en gemodelleerde bodembeweging vergelijking

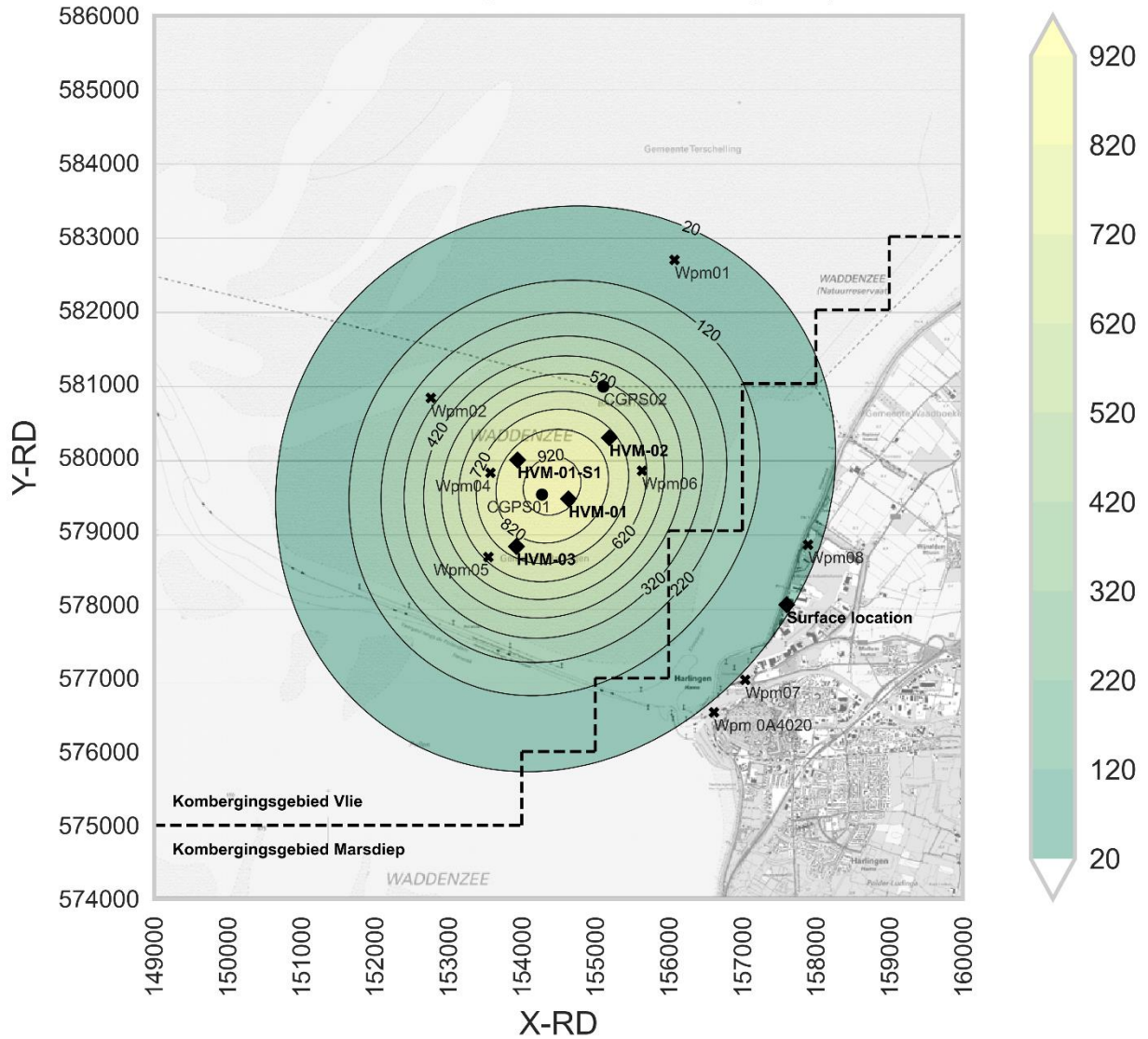


f) Gemodelleerde bodembeweging ten opzichte van eind zoutwinning HVM-02 prognose



h) Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling Havenmond eind zoutwinning

Gemodelleerde contourenkaart Pleistoceen bodemdaling eind zoutwinning Havenmond (mm)



i) Volumebalans

In 2016 is Frisia Zout overgestapt van de zogenaamde waterbalans, zoals omschreven in de Technische bijlage Meet- en regelprotocol Havenmond (ref.2), naar een volumebalans. In deze nieuwe bereken methode wordt niet alleen gekeken naar de in- en uitstroom van water, maar ook naar het volume zout in oplossing. Wanneer steenzout oplost in water, neemt het volume van de vloeistof toe. Dit volume opgelost zout in de caveerne kan niet genegeerd worden in de berekeningen van het open caveerne volume. Het resultaat is een berekend caveerne volume wat circa 1/7^e keer groter is dan berekend met de oude waterbalans. Ook zijn onoplosbare bestanddelen van het Zechstein zout meegenomen in de volumebalans.

Waterbalans:

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

Volumebalans:

$$V_{cav.open} = \sum \left(\Delta V_{water.in} \cdot \left(1 + \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} \right) - \Delta V_{pekel.uit} - \Delta V_{water.in} \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} \vartheta_{onoplosbaar} \varphi \right)$$

Waarin $V_{cav.open}$ het open caveernevolume is dat meetbaar is met holruimte metingen, $V_{water.in}$ het geïnjecteerde volume water, S_{NaCl} de pekelsaturatie, ρ_{NaCl} de dichtheid van het zout, $V_{pekel.uit}$ het geproduceerde volume pekelsaturatie, $\vartheta_{onoplosbaar}$ de volumefractie onoplosbaar materiaal het Zechstein zout en φ de porositeit van de sump na compactie.

Het convergentie volume wordt op dezelfde manier berekend door het totale caveerne volume, bestaande uit het open caveerne volume en het pekelsaturatie volume gebonden in de sump, af te trekken van het totale volume opgelost zout, zowel in de productiestroom als in de caveerne.

$$V_{cav} = \sum \left(V_{cav.open} + \Delta V_{water.in} \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} \vartheta_{onoplosbaar} \varphi \right)$$

$$V_{con} = \sum \left((\Delta V_{pekel.uit} + \Delta V_{cav}) \cdot \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} - V_{cav} \right)$$