

Beheerscyclus Meet- en regelprotocol Havenmond over het jaar 2024



Vorbereiding: Well Engineering Partners B.V.,
Hoogeveen

Auteur: ir. T.A. Chorus

Versie: 1.1

Publicatiedatum: 31 april 2025

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



Inhoud

1	Inleiding	1
2	Productiecijfers	2
3	Holruimtemetingen	2
4	Bodemdalingsmetingen	2
5	Pleistocene bodemdalingssnelheden	5
6	Toetsing belasting aan de gebruikruimte kombergingsgebied	9
7	Toetsing bodemdalingsprognose	11
8	Zoutproductie met 'Hand aan de kraan'	11
9	Actualisering dalingsprognose	12
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 waterpasmeting meetnet Harlingen-West	17
e)	Gemeten- en gemodelleerde bodembeweging vergelijking	19
f)	Gemodelleerde bodembeweging september 2024 en januari 2025	20
g)	Komvorm parameter vergelijking	21
h)	Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling januari 2025	22
i)	Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling Havenmond over zichtperiode van 50 jaar	23
j)	Overzicht belasting kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep	24
k)	Volumebalans	25

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 Klimaat en Groene Groei (KGG).

Naar aanleiding van de in september 2024 uitgevoerde meetcampagne (ref. 3) wordt de beheerscyclus, omschreven in het Meet- en regelprotocol, voor de derde 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. Ook worden dagelijks monsters van de productiepekel geanalyseerd om accuraat het zoutgehalte vast te stellen. 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. De berekenmethode hiervan is toegelicht in bijlage k). 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/21	jan/22	jan/23	jan/24	jan/25
Cumulatief opgelost zout volume (m ³)	33.496	391.564	864.681	1.377.531	2.018.115
Open caveerne volume (m ³)	23.070	272.067	521.593	745.722	945.811
Gebonden pekel volume in sump (m ³)	477	5.580	12.322	19.630	27.314
Cumulatief convergentie volume (m ³)	9.949	113.917	330.766	612.179	947.624

Het convergentievolume wordt hierbij berekend door het open caveerne volume en het gebonden pekervolume 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 injectie- en productievolumes worden geregistreerd. Echter vanwege het grote volume op lange termijn is deze factor niet te verwaarlozen. Het pekervolume gebonden in de poreuze sump daarentegen, valt niet nauwkeurig vast te stellen en heeft daardoor een relatief grote onzekerheid ($\approx 20\%$). Het open caveervolume wordt indirect berekend met behulp van de volumebalans, zoals omschreven in bijlage k). De volumebalans is in de loop der jaren geijkt aan holruimtemetingen (met name bij caveerne BAS-4) en heeft aangetoond een goede nauwkeurigheid te hebben ($\approx 5\%$). De onzekerheid in het berekende convergentievolume is gelijk aan de som van de onzekerheden van de drie bepalende factoren. Voor het jaar 2024 komt dat neer op 72.734 m³ (7,7%).

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	06/apr/23	05/mrt/24	19/sep/24
Open caveervolume (m ³)	49.546	215.362*	365.078	579.124	767.589	865.121

*: De holruimtemeting van november 2021 was onvolledig. Vanwege de smalle caveervorm was het niet mogelijk om een nauwkeurige meting uit te voeren in het bovenste gedeelte van de caveerne.

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 9 september 2024 tot en met 18 oktober 2025. Daarnaast worden 2 peilmerken nabij de caveerne(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.

In januari 2024 heeft er een grote brand plaatsgevonden bij de opslaglocatie van de GPS-antennes. Hierbij zijn alle antennes en antennemasten verloren gegaan. Antea heeft voor de meetcampagne 2024 nieuwe masten geconstrueerd en nieuwe antennes aangeschaft. De nieuw aangeschafte antennes zijn van hetzelfde merk en type. Daarnaast zijn de masten zo goed als mogelijk gelijk geconstrueerd aan de verloren gegane masten. Desondanks was er een correctie nodig om een goede overeenkomst te krijgen tussen de nieuwe GNSS metingen en de metingen van voorgaande jaren. De GNSS metingen zijn met -10,8mm gecorrigeerd zodat de GNSS metingen op het land overeenkomen met de waterpasmetingen op dezelfde plekken. De continu metingen CGPS01 en CGPS02 zijn onaangetast gebleven.

Naast de periodieke GNSS metingen wordt ook jaarlijks een nauwkeurigheds-waterpasmeting van het meetnet Harlingen-West uitgevoerd. Dit meetnet bestaat uit 81 peilmerken in Harlingen stad en het buitengebied. De metingen zijn uitgevoerd in oktober 2024. In deze meetcampagne zijn 20 nieuwe peilmerken opgenomen in het meetnet. Daarnaast zijn er 2 vervallen en waren er 4 niet meetbaar en/of bereikbaar. Als gevolg is er data van 75 meetpunten beschikbaar, afkomstig van de waterpasmeetcampagne Harlingen-West 2024. Als aansluitpunt voor het meetnet wordt 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. De nulmeting van dit peilmerk is vastgesteld in de waterpasmeting Leeuwarden-West van 2021 (ref. 6).

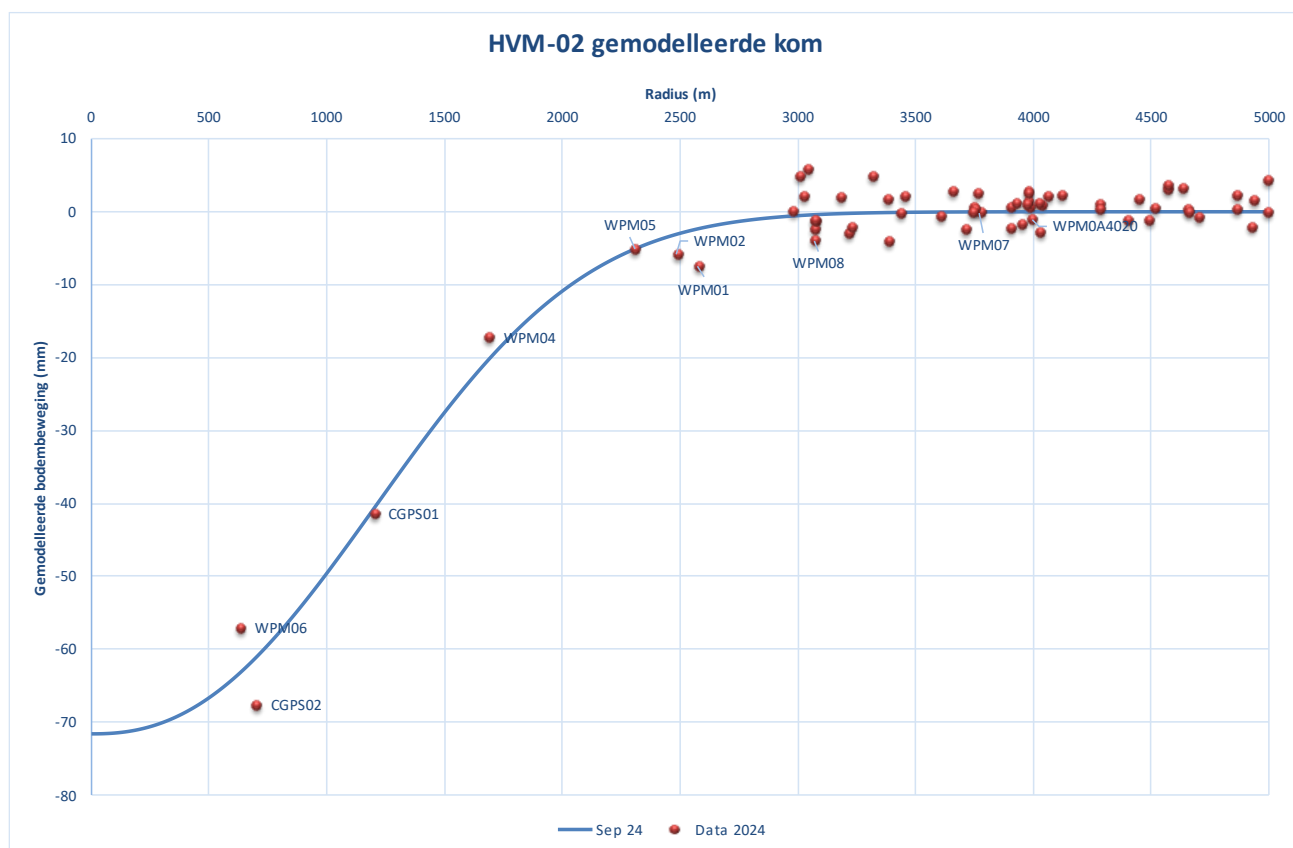
Gecombineerd geven de 'Wad' meetcampagne en het meetnet van Harlingen-West 87 datapunten voor het jaar 2024. Overzichtskaarten van de meetnetten en bijbehorende resultaten zijn gepresenteerd in bijlage b). De continue GNSS-monitoring van meetpunten CGPS01 en CGPS02 is gepresenteerd in bijlage c).

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 = 155.190 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	Totaal gemeten daling t.o.v. Sep/20				
		X	Y	HVM-02	Sep-20	Sep-21	Sep-22	Sep-23	Sep-24
		(m)	(m)	(m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Zweins	000A2760	169.295	578.595	14.203	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WPM0A4020	000A4020	156.616	576.535	3.993	0,0	-0,7	-2,1	-2,4	-1,0
WPM01	11004	156.079	582.682	2.575	0,0	-1,8	-5,9	-5,1	-7,5
WPM02	12004	152.764	580.803	2.485	0,0	-5,0	-7,7	-8,1	-5,9
WPM04	14004	153.573	579.786	1.687	0,0	-2,7	-9,6	-14,0	-17,2
WPM05	15004	153.548	578.643	2.308	0,0	-2,9	-7,2	-4,7	-5,2
WPM06	16004	155.635	579.816	632	0,0	-4,0	-19,0	-36,6	-57,1
WPM07	000A02908	157.038	576.976	3.772	0,0	-1,3	-2,8	-1,8	-0,2
WPM08	000A02907	157.894	578.812	3.069	0,0	-0,7	-2,9	-2,3	-4,0
CGPS01	ARP CGPS01	154.273	579.494	1.198	0,0	0,4	-14,1	-19,8	-41,4
CGPS02	ARP CGPS02	155.110	580.960	700	0,0	-1,8	-23,6	-37,2	-67,6

De gemeten bodembeweging gedurende de 'Wad' meetcampagne varieert tussen de 67,6 mm en 0,2 mm daling ten opzichte van start zoutwinning. De meetpunten op land, gemeten gedurende de waterpasmeting in Harlingen-West variëren tussen de 4,1 mm daling en 5,7 mm stijging, met een gemiddelde stijging van 0,6 mm ten opzichte van start zoutwinning. De bodemdalingsskom van de zoutwinning blijft hiermee in 2024 vrijwel geheel buitendijks.



Figuur 1: Gemeten- en gemodelleerde Pleistocene bodembeweging september 2024 ten opzichte van start zoutwinning

Zoals gepresenteerd in Tabel 3, bijlage d) en Figuur 1, laten meetpunten die op een afstand van 3000m of meer van het komcentrum HVM-02 liggen vrijwel geen bodemdaling zien ten opzichte van start zoutwinning. Er zijn een aantal peilmerken die dalingen of stijgingen tonen die buiten het verwachtingspatroon liggen. De grootste uitschieter is peilmerk CGPS02 die een daling van 67,6mm meet op een afstand van 700m aan de noordkant van het komcentrum HVM-02. Dit terwijl peilmerk WPM06 een daling van 57,1mm meet op een afstand van 632m aan de zuidoostkant van het komcentrum. Deze twee peilmerken, die het dichtst bij het HVM-02 komcentrum liggen, laten daardoor een onderling verschil van 10,5 mm zien. Tijdens de meetcampagne van 2023 zat er slechts 0,6mm verschil tussen de meetpunten. Deze twee meetpunten hebben veel invloed op de diepte van het gemodelleerde komcentrum. Aangezien met de huidige dataset niet uitgesloten kan worden welke van de 2 peilmerken een buitenligger is, houdt de gemodelleerde kom, waarvan de parameters verder worden toegelicht in hoofdstuk 5, zo veel mogelijk rekening met beide punten. De gemodelleerde komvorm ligt tussenin de 2 peilmerken, zoals zichtbaar in Figuur 1.

Peilmerk WPM01 op een afstand van 2575m aan de noordkant van het komcentrum laat een daling van 2,3mm zien ten opzichte van 2023. Dit is meer dan peilmerken WPM02 en WPM05 laten zien. Peilmerk WPM02 op een afstand van 2485m aan de westkant laat een stijging van 2,2mm zien ten opzichte van 2023. Daarnaast laat peilmerk WPM05 aan de zuidwestkant een daling van slechts 0,4mm zien op een afstand van 2308m van het komcentrum. De onderlinge verschillen tussen de peilmerken ten opzichte van start zoutwinning zijn slechts 1 à 2 mm, maar de verschillen ten opzichte van 2023 zijn opmerkelijk. Aankomende jaren zal geëvalueerd worden of er sprake is van een systematische afwijking of dat het een enkele meetfout betreft.

Tot slot in de Harlingen-West waterpas meetcampagne worden dezelfde peilmerken opgemerkt als in 2023. Dit zijn peilmerken 10, D32 en D33 nabij de zeedijk ten noorden van de industriehaven van Harlingen. Deze peilmerken laten een stijging zien van 4,8mm (PM 10), 4,9mm (PM D32) en 5,7mm (PM D33) ten opzichte van start zoutwinning. De bodemstijgingen van deze peilmerken is al sinds 2020 gaande met een gemiddelde van 1,2 – 1,4mm stijging per jaar. Deze stijging wordt niet veroorzaakt door zoutwinning, er zullen externe factoren een rol spelen op dit stuk zeedijk.

5 Pleistocene bodemdalingssnelheden

Aan de hand van de 'Wad' meetcampagne en Harlingen-West waterpasmetingen wordt een passend bodemdaling kommodel gemaakt. Deze bodemdalingskom wordt geoptimaliseerd zodat er een zo goed als mogelijke overeenkomst is tussen de meetdata en de gemodelleerde kom. Met behulp van deze gemodelleerde bodemdalingskom kan de Pleistocene bodemdaling bepaald worden in de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep. De Pleistocene bodemdaling wordt echter vastgesteld per kalender jaar (1 januari). Aangezien de periodieke bodemdalingsmetingen uitgevoerd worden in september moet de passende bodemdalingskom van september vertaald worden in een bodemdalingskom ten tijde van 1 januari. Dit gebeurt aan de hand van het convergentievolume dat berekend is met behulp van de productiecijfers en de volumebalans. De methodiek en bijbehorende resultaten worden omschreven in dit hoofdstuk.

De vorm en omvang van de bodemdalingskom 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

bodemdalingsmetingen. Hierbij wordt het verschil tussen de bodemdalingsmetingen 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 2024 zijn gepresenteerd in Tabel 4. Een visuele vergelijking van de gemeten bodembeweging ten opzichte van de gemodelleerde kom ten tijde van september 2024 is gepresenteerd in Figuur 1. Een vergelijking van alle bodemdalingskommen sinds start zoutwinning Havenmond is gepresenteerd in bijlage e).

Tabel 4. Resultaten kom optimalisatie 2024

HVM-02 Kom parameters	Sep-24	Jan-25
X-coördinaat (m RD)	155.190	155.190
Y-coördinaat (m RD)	580.265	580.265
Gamma	3,14E-08	3,14E-08
Delta	2,356	2,356
W_{max} (mm)	71,5	79,5
Komvolume (m ³)	496.017	551.194
Convergentievolumen (m ³)	852.762	947.624
Komvolume / convergentievolumen (%)	58,2%	58,2%
Kleinste kwadraten afwijking (mm)	2,22	

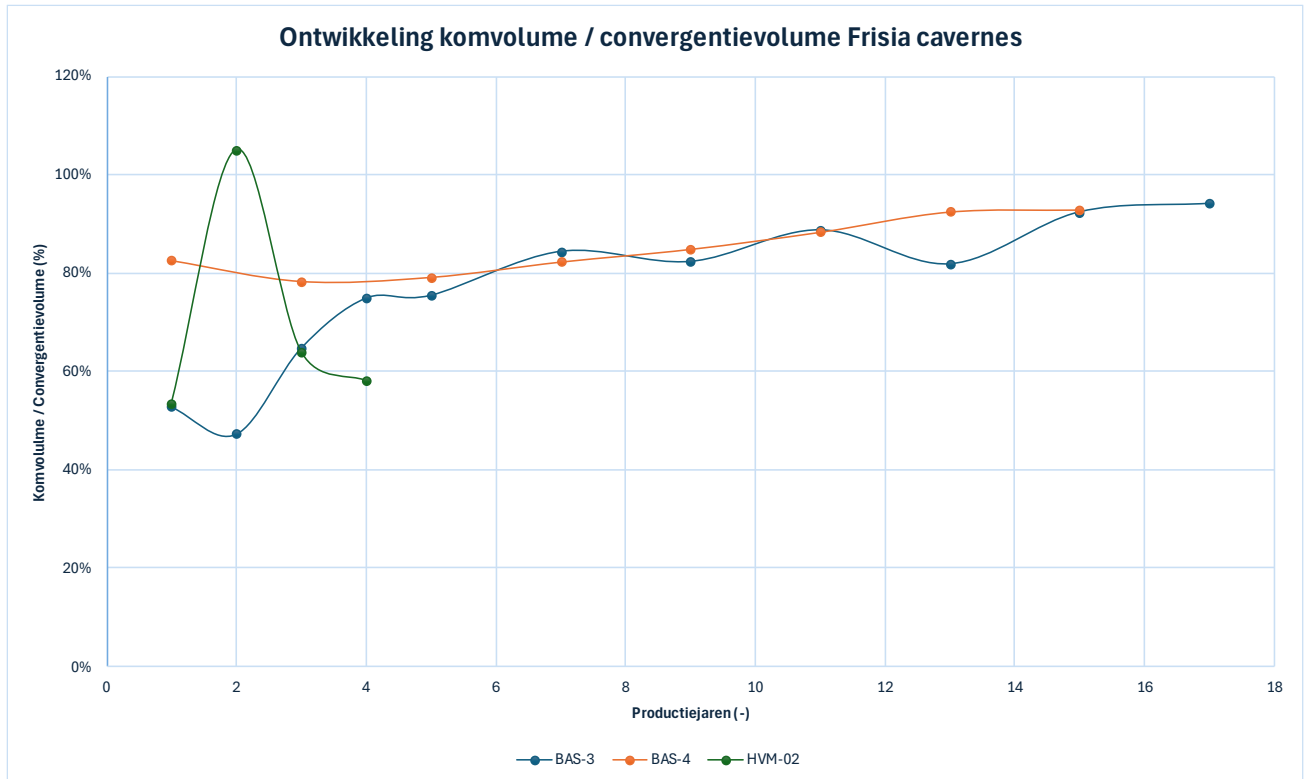
Ten tijde van september 2024 is een komvolume / convergentievolumen verhouding van 58,2% gemeten. Dezelfde komparameters γ en δ , x_0 en y_0 zijn gebruikt om een kom te berekenen ten tijde van januari 2025 met hetzelfde komvolume / convergentievolumen percentage. Het toepassen van deze parameters leidt tot een bodemdalingsskom volume van 551.194 m³ ten tijde van 1 januari 2025. De gemodelleerde bodemdalingsskom ten tijde van de meetcampagne in september 2024 is gevisualiseerd in Figuur 3. De gemodelleerde bodemdalingsskom ten tijde van 1 januari 2025 is gevisualiseerd in bijlage i).

De verhouding tussen het komvolume en het convergentievolumen bouwt langzaam op gedurende de productieperiode van elke Frisia caverne. Op basis van ervaring van Barradeel en Barradeel II loopt deze verhouding op van ca. 50% tot ca. 95%. Gedurende de eerste productiejaar kan vanwege gesteenterek een deel van het convergentievolumen vertraagd gemeten worden aan het Pleistoceen. De ontwikkeling van dit percentage bij HVM-02 is in Figuur 2 gevisualiseerd en vergeleken met cavernes BAS-3 en BAS-4. In 2022 (productiejaar 2) is een ongebruikelijk hoog komvolume / convergentievolumen bepaald (>100%) voor HVM-02. Dat had te maken met de peilmerken op het land die een kleine bodemdaling lieten zien van enkele millimeters. Deze peilmerken in de flanken van de bodemdaling kom hebben veel invloed op het komvolume. In de jaren daarna is geen verdere daling gezien in deze punten, waardoor de 2022 daling hoogst waarschijnlijk toe te schrijven is aan na-zetting effecten van de peilmerken en/of meetfouten. Ter vergelijking: in een bodemdaling kom met een radius van 3500m, zit 67% van het oppervlakte in de flanken tussen 2000 – 3500m vanaf het komcentrum. In het geval van de meting van 2022, zou een na-zetting van de peilmerken van ca. 3mm het verschil uitmaken tussen 105% komvolume / convergentievolumen en 75% komvolume / convergentievolumen. Dit geeft aan dat de bodemdaling in de flanken een grote invloed kan hebben op de komvolume / convergentievolumen verhouding.

Het percentage van 2024 van 58,2% loopt enigszins achter op de ontwikkeling van cavernes BAS-3 en BAS-4 die tussen de 65% en 80% lagen na hetzelfde aantal jaren productie. In hoofdstuk 2 zijn de productiecijfers gepresenteerd waarbij een onzekerheid volume van 72.734 m³ is berekend op het convergentievolumen ten tijde van 1 januari 2025. Daarmee ligt het berekende

convergentievolume tussen de 874.890 m³ en 1.020.359 m³. Dit komt overeen met een komvolume / convergentievolume verhouding tussen de 54,0% en 63,0%.

Zoals in Figuur 1 en bijlage e) gepresenteerd, is er een goede overeenkomst tussen de gemodelleerde bodemdalingssom en de meetpunten. In de meetpunten vanaf 3000m is nog geen duidelijke bodemdalingstrend te herkennen. Het gebrek van een duidelijke bodemdaling trend in de flanken van de bodemdalingssom kan een verklaring geven voor de relatief lage ratio tussen het gemodelleerde komvolume en convergentievolume.



Figuur 2: Overzicht ontwikkeling komvolume / convergentievolume Frisia cavernes

De bodemdalingssom valt in 2 verschillende kombergingsgebieden genaamd Vlie en Marsdiep. Voor deze kombergingsgebieden wordt de Pleistocene bodemdaling snelheid S(J) berekend per jaar J door het komvolume dat binnen het bodemdalingssom ligt te delen door de oppervlakte van dat gebied. De oppervlakte van kombergingsgebied Vlie bedraagt 668 km², die van kombergingsgebied Marsdiep 712 km². Tabel 5 geeft een overzicht van de komvolumes en bodemdalingssnelheden per kombergingsgebied.

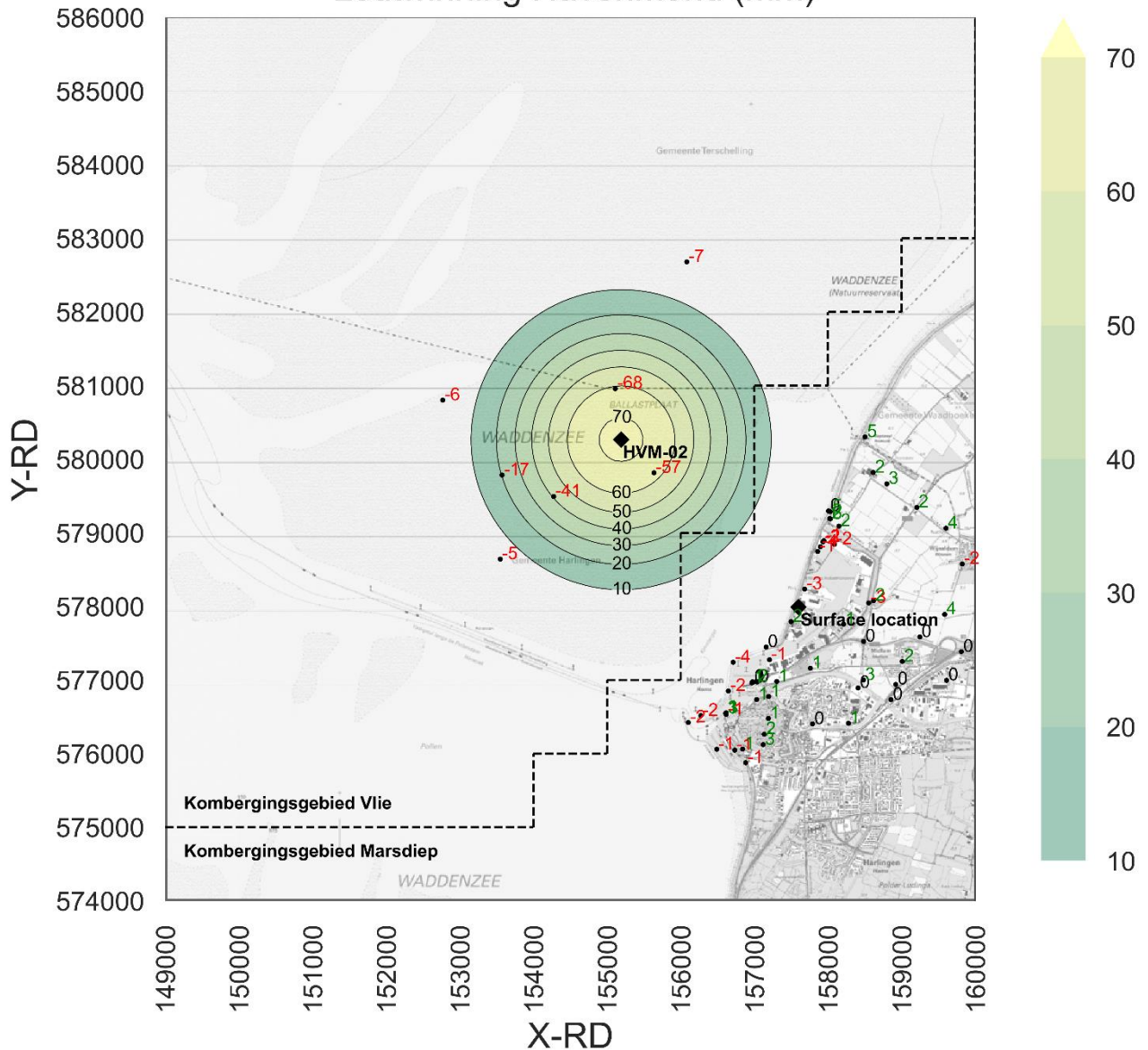
Tabel 5. Bodemdaling snelheden per kombergingsgebied voor het jaar 2024

Kombergingsgebied	Komvolume 01-Jan-2024	Komvolume 01-Jan-2025	Bodemdaling snelheid 2024	
	m ³	m ³	m3/jaar	mm/jaar
Vlie	363.236	530.146	166.910	0,25
Marsdiep	24.945	20.757	-4.188	-0,01
Vaste land	3.727	291	-3.436	n.v.t.
Totaal	391.909*	551.194	159.286	

*: I.v.m. een gecorrigeerd datapunt, een verschil van -1.185 m³ ten opzichte van de cijfers gepresenteerd in 2023.

Het bulk van het bodemdaling volume (96%) valt onder het kombergingsgebied Vlie. Het kombergingsgebied heeft een bodemdaling snelheid van 0,2mm in het jaar 2024. Tabel 5 laat zien dat er in 2024 minder bodemdaling meetbaar is onder het vaste land en Marsdiep te opzichte van 2023. Vanwege de zeer geringe bodemdaling zijn de randen van het bodemdalingsgebied gevoelig voor jaarlijkse variaties in de meetdata. Deze variaties hebben minder invloed op de belasting aangezien daarbij gekeken wordt naar een 6-jarlijks gemiddelde bodemdaling snelheid van een kombergingsgebied, zoals beschreven in onderstaand hoofdstuk 6.

Gemodelleerde contourenkaart Pleistoceen bodemdaling Sep-2024 zoutwinning Havenmond (mm)



Figuur 3. Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling september 2024 met gemeten bodemdaling/stijging ten opzichte van start zoutwinning

6 Toetsing belasting aan de gebruikruimte kombergingsgebied

De belasting van de gebruikruimte $B(J)$ 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 gebruikruimte G van het betreffende kombergingsgebied te blijven. De gebruikruimte 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 2024. Vanaf 2024 tot en met 2029 neemt de zeespiegelstijging toe van 3,60 mm/jaar in 2024 tot 3,85 mm/jaar in 2029 (beleidsscenario (ref. 4)). Gaswinning uit het Zuidwal-gasveld is in begin 2021 stilgelegd. Wel is er nog sprake van na-ijlende bodemdaling afkomstig van de gaswinning. De verwachte na-ijlende bodemdaling snelheid is in 2024 vanuit Vermilion Energy gedeeld met Frisia Zout en wordt meegenomen in de belasting van het kombergingsgebied Vlie. De na-ijlende bodemdaling snelheid van gaswinning is 0,09 mm/jaar in 2024. Deze bodemdaling snelheid neemt geleidelijk af naar 0,01 mm/jaar in 2049.

Een overzicht waarin de belasting in 2024 is berekend voor kombergingsgebied Vlie is gegeven in Tabel 6 en voor kombergingsgebied Marsdiep in Tabel 7.

Tabel 6. Belasting kombergingsgebied Vlie 2024

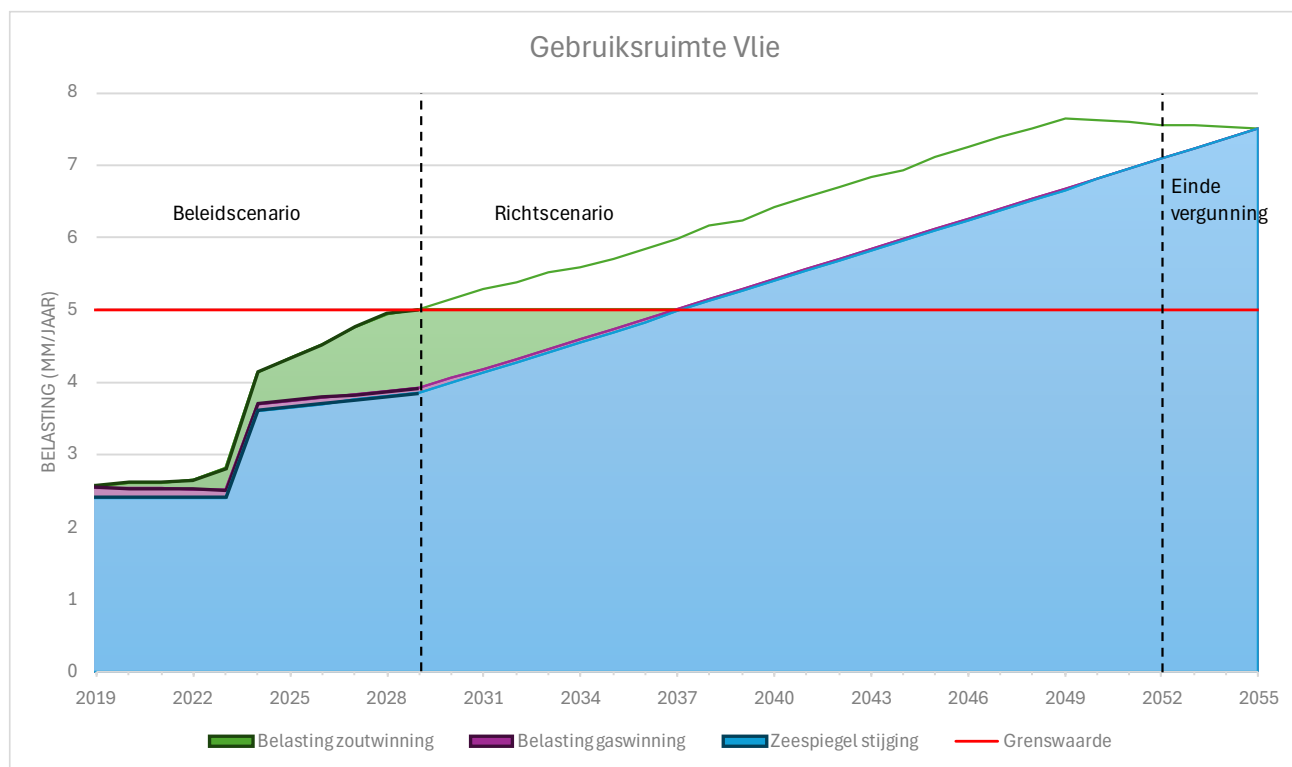
Kombergingsgebied Vlie			(J-3)	(J-2)	(J-1)	(J)	(J+1)	(J+2)
Jaar	J	-	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Meegroeivermogen	M	mm/jaar	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Zeespiegelstijging	Z_{rZSS}	mm/jaar	2,40	2,40	2,40	3,60	3,65	3,70
Gebruikruimte	G	mm/jaar	2,60	2,60	2,60	1,40	1,35	1,30
Bodemdalingsnelheid gaswinning	S_{gas}	mm/jaar	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08
Belasting gaswinning	B_{gas}	mm/jaar	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08
Bodemdalingsnelheid zoutwinning	S_{zout}	mm/jaar	0,07	0,38	0,08	0,25	0,98	0,88
Belasting zoutwinning	B_{zout}	mm/jaar	0,09	0,13	0,30	0,44	0,59	0,74
Belasting totaal	B	mm/jaar	0,21	0,25	0,40	0,54	0,68	0,82

Tabel 7. Belasting kombergingsgebied Marsdiep 2024

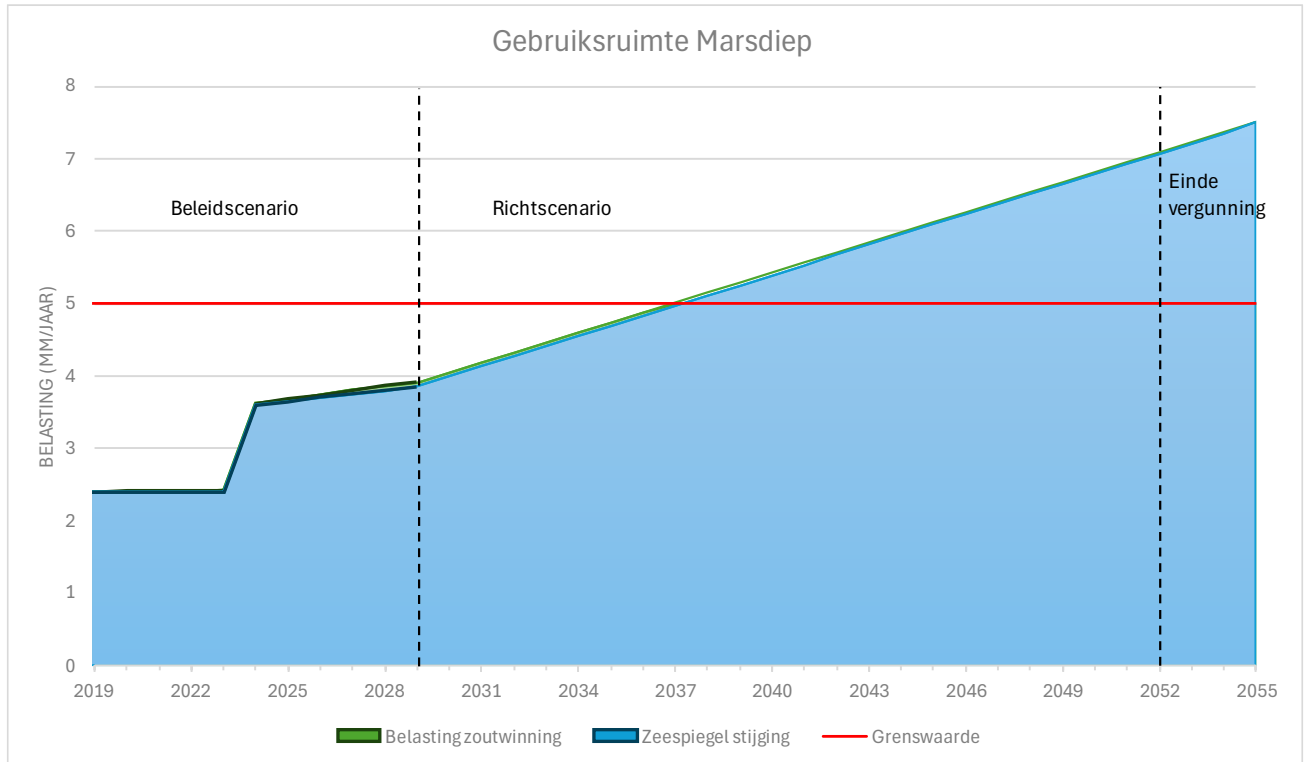
Kombergingsgebied Marsdiep			(J-3)	(J-2)	(J-1)	(J)	(J+1)	(J+2)
Jaar	J	-	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Meegroeivermogen	M	mm/jaar	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Zeespiegelstijging	Z _{rZSS}	mm/jaar	2,40	2,40	2,40	2,40	3,60	3,65
Gebruiksruimte	G	mm/jaar	2,60	2,60	2,60	2,60	1,40	1,35
Bodemdalingsnelheid zoutwinning	S _{zout}	mm/jaar	0,01	0,03	-0,01	-0,01	0,08	0,05
Belasting zoutwinning	B _{zout}	mm/jaar	0,01	0,00	0,02	0,03	0,03	0,04

Gebaseerd op het productiescenario van het winningsplan Havenmond (ref. 5) wordt een inschatting gemaakt van toekomstige belastingen. Voor dalingsprognoses wordt rekening gehouden met een komvolume / convergentievolume verhouding van 100%, oftewel: $V_{kom} = V_{con}$. In andere woorden: de geïnduceerde bodemdaling uit zich gelijk in bodemdaling meetbaar aan het oppervlak. De resulterende gebruiksruimte figuren zijn gepresenteerd in Figuur 4 en Figuur 5.

Na 2029 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 2029 (3,85 mm/jaar) en 2050 (6,80 mm/jaar). Er worden hieraan geen rechten dan wel plichten aan ontleend. De belasting aan de hand van het winningsplan is inzichtelijk gemaakt met de groene lijn in Figuur 4 en Figuur 5. Afhankelijk van de ontwikkeling van de zeespiegelstijging past Frisia Zout de productie aan om binnen de gebruiksruimte te blijven. Deze vorm van zoutproductie met 'Hand aan de kraan' wordt toegelicht in hoofdstuk 8.



Figuur 4. Gebruiksruimte Vlie. Inschatting gebruiksruimte na 2029



Figuur 5. Gebruiksruimte Marsdiep. Inschatting gebruiksruimte na 2029

7 Toetsing bodemdalingsprognose

De bodemdalingskomvorm kan getoetst worden aan de komparameters omschreven in de actualisatie van het winningsplan voor winningsvergunning ‘Havenmond’ (ref. 5). De geoptimaliseerde komparameters γ en δ van $3,14E^{-08}$ en 2,356 respectievelijk wijken in 2024 af van de standaard komparameters van $1,33E^{-06}$ en 1,841. De geoptimaliseerde komparameters zorgen voor een smallere bodemdalingskom. Een vergelijking tussen de geoptimaliseerde bodemdalingskom en een bodemdalingskom met standaard komparameters ten tijde van september 2024 is gevisualiseerd in bijlage g). De standaard komparameters passen beter bij peilmerken WPM02 en WPM02, maar geven een grotere afwijking met peilmerken WPM04 en WPM05. De kleinste kwadraten afwijking is 13% hoger met het toepassen van de standaard komparameter set, waardoor er wordt vastgehouden aan de geoptimaliseerde komparameter set met de minimale kleinste kwadraten afwijking.

Het berekende convergentievolumen en gemeten Pleistocene bodemdalingsvolumen kan daarnaast vergeleken worden met de meest recente bodemdaling prognose uit de actualisatie van het winningsplan Havenmond. Daarin werd een bodemdaling volume van 173.951 m^3 voor het jaar 2024 verwacht. Daadwerkelijk gemeten bodemdaling ligt daar dichtbij met 159.286 m^3 in 2024.

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. Met de gemeten bodemdaling tot en met 2024, en de productieplannen zoals gepresenteerd in de actualisatie van het winningsplan Havenmond, blijft de belasting van de kombergingsgebieden binnen de gebruiksruimte.

Naar verwachting wordt in medio 2025 de HVM-01 put in productie genomen. Op dat moment wordt zoutwinning verdeeld over zowel HVM-01 als HVM-02. Als gevolg daarvan zal het caverne volume

van HVM-02 afnemen en gaat het volume van HVM-01 groeien. Het krimpen van de HVM-02 caveerne zal additionele bodemdaling veroorzaken. De snelheid en hoeveelheid waarop dit terug krimpen kan gebeuren in de aankomende jaren, hangt af van de ontwikkeling van de zeespiegelstijging en de daaruit volgende gebruiksruimte na 2029. Het gevolg van het krimpen van de cavernes is dat er minder openstaand volume in de ondergrond zal achterblijven na stop zoutwinning. Bij HVM-02 is een caveerne volumereductie van circa 20% per jaar gepland, mits er voldoende gebruiksruimte beschikbaar is hiervoor. De snelheid van de volumereductie kan gestuurd worden met behulp van de gekozen productiesnelheden en met behulp van een choke aan het oppervlakte. Beiden hebben invloed op de cavernedruk en daarmee ook op de caveerneconvergentie. Ook voor de andere Havenmond cavernes is een caveernevolumevermindering tot onder de 375.000 m³ per caveerne gepland, mits er een andere caveerne in parallelle productie aanwezig is en mits er voldoende gebruiksruimte beschikbaar is.

Naar verwachting zal de jaarlijkse zoutproductie gaan toenemen nadat HVM-01 in productie wordt genomen. De bovenstaande verwachtingen zijn meegenomen in de actualisatie van het winningsplan en tevens in dit document, zie Tabel 6 en Figuur 4.

9 Actualisering dalingsprognose

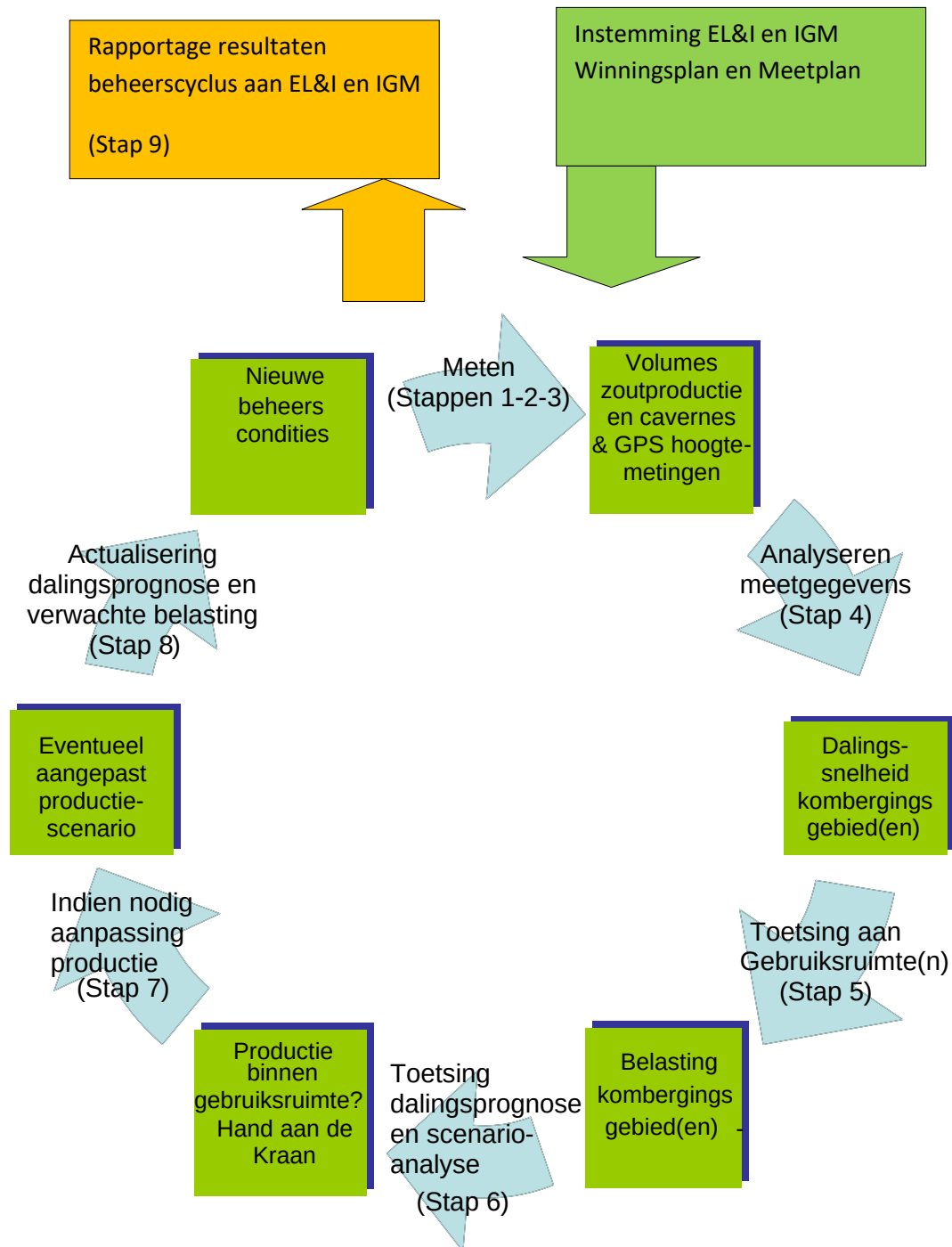
Aan de hand van de actualisatie van het winningsplan Havenmond is er een nieuwe dalingsprognose. In Figuur 4 en Figuur 5 zijn de lange termijn belastingen van de kombergingsgebieden gepresenteerd aan de hand van de huidig gemeten bodemdaling en winningsplannen. In bijlage i) is de uiteindelijke Pleistocene bodemdaling gepresenteerd, gebaseerd op de maximale productiecijfers gepresenteerd in de actualisatie van het winningsplan en de tot op heden behaalde productiecijfers.

10 Referenties

1. Meet- en regelprotocol zoutwinning 'Havenmond' in de Waddenzee v.3.2, Frisia Zout B.V., 12 december 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 2024, Antea Group, 20 januari 2025
4. Vaststelling veilige gebruiksruimte gas- en zoutwinning onder de Waddenzee (Gebruiksruimtebesluit), Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 25 april 2024
5. Actualisatie winningsplan voor winningsvergunning 'Havenmond' v1.2, Frisia Zout B.V., 8 november 2024
6. Meetregister bij het meetplan Leeuwarden West; Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing 2021, Antea group, 10 maart 2022

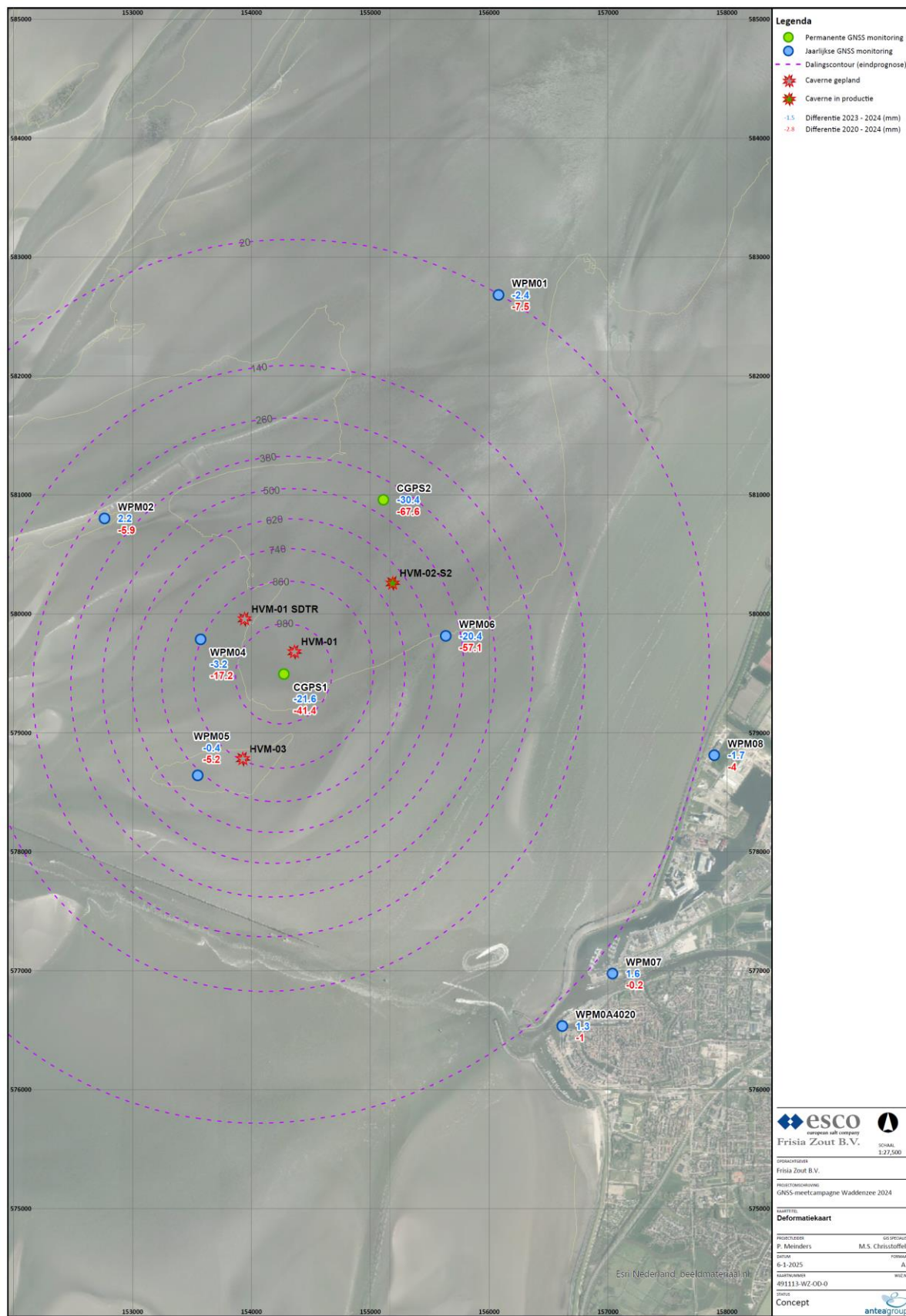
11 Bijlagen

a) Meet- en regelprotocol Havenmond



Figuur 6: Beheerscyclus Meet- en Regelprotocol Havenmond

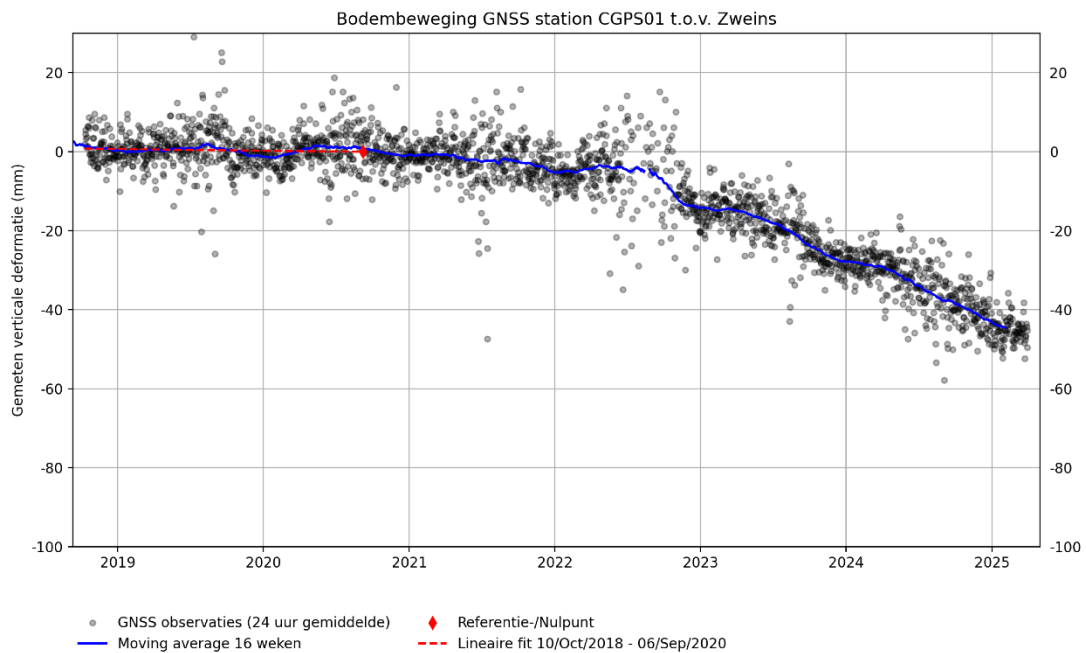
b) Overzichtskaarten meetnetten zoutwinning Waddenzee



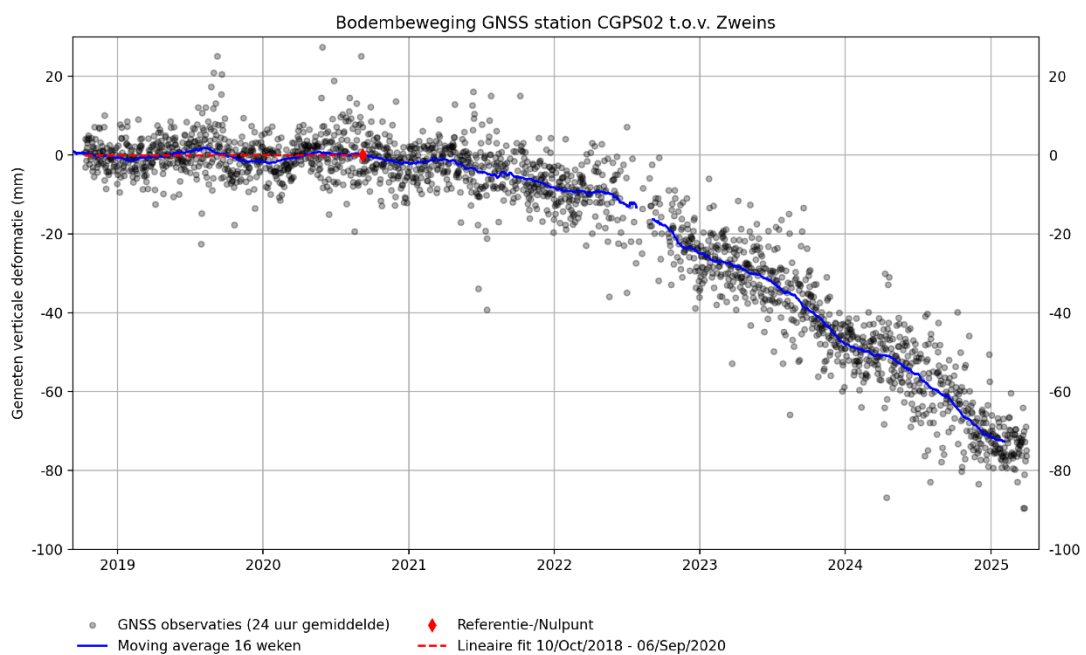
Figuur 7: GNSS 'Wad' Meetcampagne resultaten 2024 (ref. 3)



c) Continu GNSS-monitoring grafieken



Figuur 9: Bodembeweging GNSS station CGPS01



Figuur 10: Bodembeweging GNSS station CGPS02

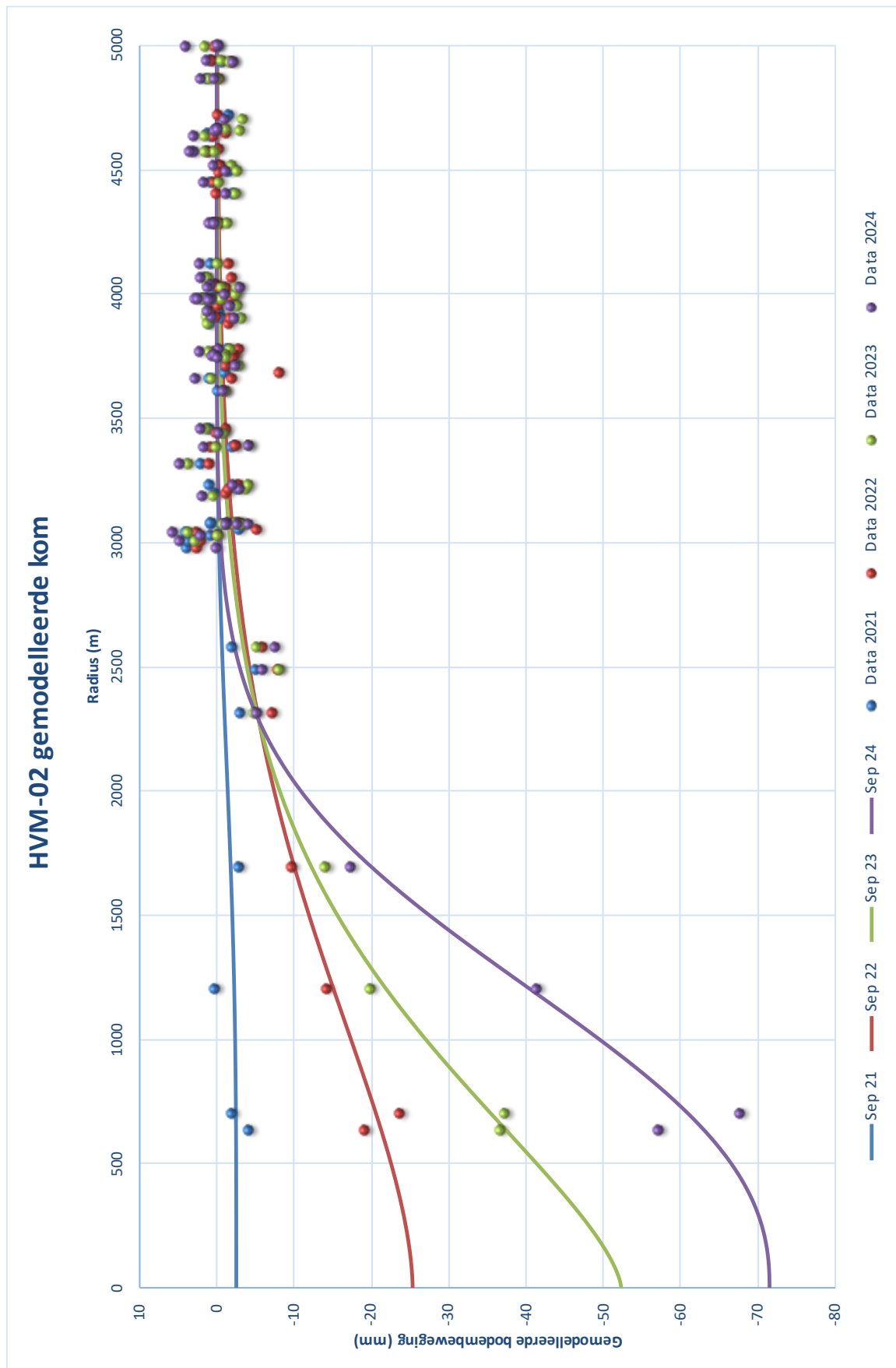
d) Overzicht jaarlijkse waterpasmeting meetnet Harlingen-West

Peilmerk	Coördinaten		Afstand tot komcentrum	Totaal gemeten hoogte t.o.v. Sep/20				
	X (m)	Y (m)		Sep-20 (mm)	Sep-21 (mm)	Sep-22 (mm)	Sep-23 (mm)	Sep-24 (mm)
00010	158.503	580.302	3.313	0,0	2,2	1,1	3,7	4,8
00014	158.862	580.020	3.680	0,0	-0,9	-8,0		
00015	159.203	579.347	4.116	0,0	0,8	-1,4	-0,1	2,3
00020	159.582	577.894	4.991	0,0	-0,1	0,3	1,6	4,2
00021	160.107	578.342	5.280	0,0	-0,8	-2,0	0,1	2,2
00022	159.606	577.486	5.217	0,0	-1,1	-0,8	1,0	
00023	160.113	578.534	5.218	0,0	-0,4	-1,2	0,9	2,1
00029	158.146	579.092	3.180	0,0	0,4	-1,2	0,5	2,0
00030	158.612	579.820	3.450	0,0	1,0	-1,2	1,4	2,1
00040	158.275	576.414	4.934	0,0	0,8	0,7	-0,5	1,5
00041	157.788	576.404	4.653	0,0	1,2	-1,2	-3,0	0,3
00045	157.682	578.237	3.213	0,0	-2,6	-1,5	-3,7	-3,0
00046	157.496	577.793	3.380	0,0	-1,9	0,9	0,1	1,8
00047	157.157	577.450	3.434	0,0	-0,7	0,2	-0,7	-0,2
00065	158.406	576.894	4.659	0,0	0,1	-0,4	-1,1	0,0
00107	157.029	576.736	3.979	0,0	0,3	-1,1	-0,4	0,7
00326	157.843	578.770	3.045	0,0	-2,7	-5,1		
00327	157.929	578.879	3.069	0,0	0,9	-3,0	-3,1	-2,5
00328	157.941	578.896	3.072	0,0	0,8	-2,7	-2,4	-1,3
00329	156.963	576.964	3.747	0,0	0,0	-2,1	-1,1	0,6
00330	156.974	576.967	3.749	0,0	-0,4	-2,2	-1,2	0,3
00332	156.972	576.976	3.740	0,0	-0,7	-2,1	-1,2	0,0
03024	162.120	578.350	7.189					0,0
03026	162.123	578.336	7.196					0,0
03027	162.147	578.334	7.219					0,0
03034	162.000	577.750	7.259					0,0
03035	162.030	578.210	7.142					0,0
03036	162.030	578.220	7.139					0,0
03042	157.203	577.277	3.602	0,0	-0,1	-0,9	-0,9	-0,7
04031	158.005	579.298	2.975	0,0	3,9	2,7		0,1
04032	158.029	579.287	3.002	0,0	3,8	2,1	2,8	4,9
04033	158.032	579.189	3.038	0,0	4,1	2,6	3,8	5,7
000A2748	159.809	577.387	5.442		0,0	0,0	0,0	0,0
000A2750	162.135	578.334	7.208					0,0
000A2760	169.295	578.595	14.203	0,0	0,0			
000A2907	157.858	578.747	3.069	0,0	-1,0	-1,5	-0,7	-1,1
000A2908	157.023	576.980	3.762	0,0	-0,2	0,3	1,1	2,4
000A4020	156.613	576.552	3.976	0,0	1,2	-1,6	2,0	2,8
000A5020	156.611	576.553	3.974		0,0		0,4	1,3
005D0003	157.117	576.124	4.635	0,0	-0,2	-0,4	-1,9	0,5
005D0004	159.818	578.578	5.006	0,0	0,9	0,5	-0,3	1,8
005D0005	158.018	579.194	3.105	0,0	0,6	-0,3	-1,3	1,0

Peilmerk	Coördinaten		Afstand tot komcentrum	Totaal gemeten hoogte t.o.v. Sep/20				
	X (m)	Y (m)		Sep-20 (mm)	Sep-21 (mm)	Sep-22 (mm)	Sep-23 (mm)	Sep-23 (mm)
005D0007	157.303	576.983	3.903	0,0	0,0	0,1	1,4	0,7
005D0012	159.007	577.253	4.861	0,0	1,4	-0,2	1,1	2,2
005D0015	158.757	578.751	3.874	0,0	1,0	-1,4	1,2	
005D0017	158.796	579.667	3.655	0,0	1,0	-1,9	0,6	2,8
005D0037	157.117	576.124	4.568	0,0	1,2	1,2	0,4	3,0
005D0040	159.818	578.578	4.926	0,0	-0,6	-1,9	-1,7	-2,1
005D0057	158.018	579.194	3.024	0,0	0,9	0,0	0,0	2,1
005D0059	159.700	577.440	5.321		0,0	-1,4	0,2	
005D0066	157.760	577.160	4.031	0,0	0,2	0,3	1,3	0,8
005D0067	158.482	577.525	4.283	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3
005D0068	156.880	575.879	4.700	0,0	-1,5	-0,1	-3,3	-0,9
005D0070	158.210	577.760	3.923	0,0	-0,3	0,8	1,2	1,2
005D0072	156.614	576.558	3.971	0,0	1,0	-1,8	0,8	1,0
005D0074	158.614	578.079	4.062	0,0	1,6	-1,8	1,2	2,1
005D0081	156.630	576.560	3.975	0,0	1,7		-0,6	
005D0082	158.478	577.003	4.631	0,0	0,8	0,5	1,6	3,1
005D0083	158.087	578.846	3.225	0,0	1,0	-2,8	-4,1	-2,1
005D0087	158.550	578.050	4.024	0,0	0,1	-1,1	-2,6	-2,9
005D0089	159.608	576.998	5.494					0,0
005D0095	156.727	576.050	4.486	0,0	-1,4			
005D0096	156.487	576.060	4.400	0,0	-2,0	0,1	-2,4	-1,2
005D0097	156.100	576.424	3.947	0,0	-1,9	0,0	-2,6	-1,7
005D0098	156.269	576.517	3.900	0,0	-0,6	-1,7	-3,1	-2,2
005D0099	156.643	576.853	3.709	0,0	-1,0	-1,2	-2,7	-2,4
005D0100	156.710	577.241	3.384	0,0	-2,3	-2,4	-4,0	-4,1
005D0101	157.192	576.776	4.022	0,0	0,3	-0,3	-0,6	1,2
005D0112	156.610	576.550	3.977			-0,5	1,7	2,5
005D0113	156.733	576.050	4.488			-0,2	-2,6	-1,1
005D0114	159.600	579.062	4.571			-0,2	1,5	3,5
005D0115	159.245	577.585	4.860				0,0	0,4
005D0116	158.855	576.733	5.090					0,0
005D0117	158.919	576.943	4.994					0,0
005G0007	161.400	577.510	6.793					0,0
005G0145	162.180	578.510	7.206					0,0
005G0179	161.800	578.460	6.852					0,0
005G0205	162.030	577.510	7.374					0,0
005G0206	160.685	577.433	6.181					0,0
005G0219	162.190	578.390	7.246					0,0
005G0266	160.320	578.680	5.369					0,0
005G0287	161.676	578.481	6.726					0,0
005G0297	160960	578680	5.983					0,0
005G0310	160.138	577.393	5.721					0,0

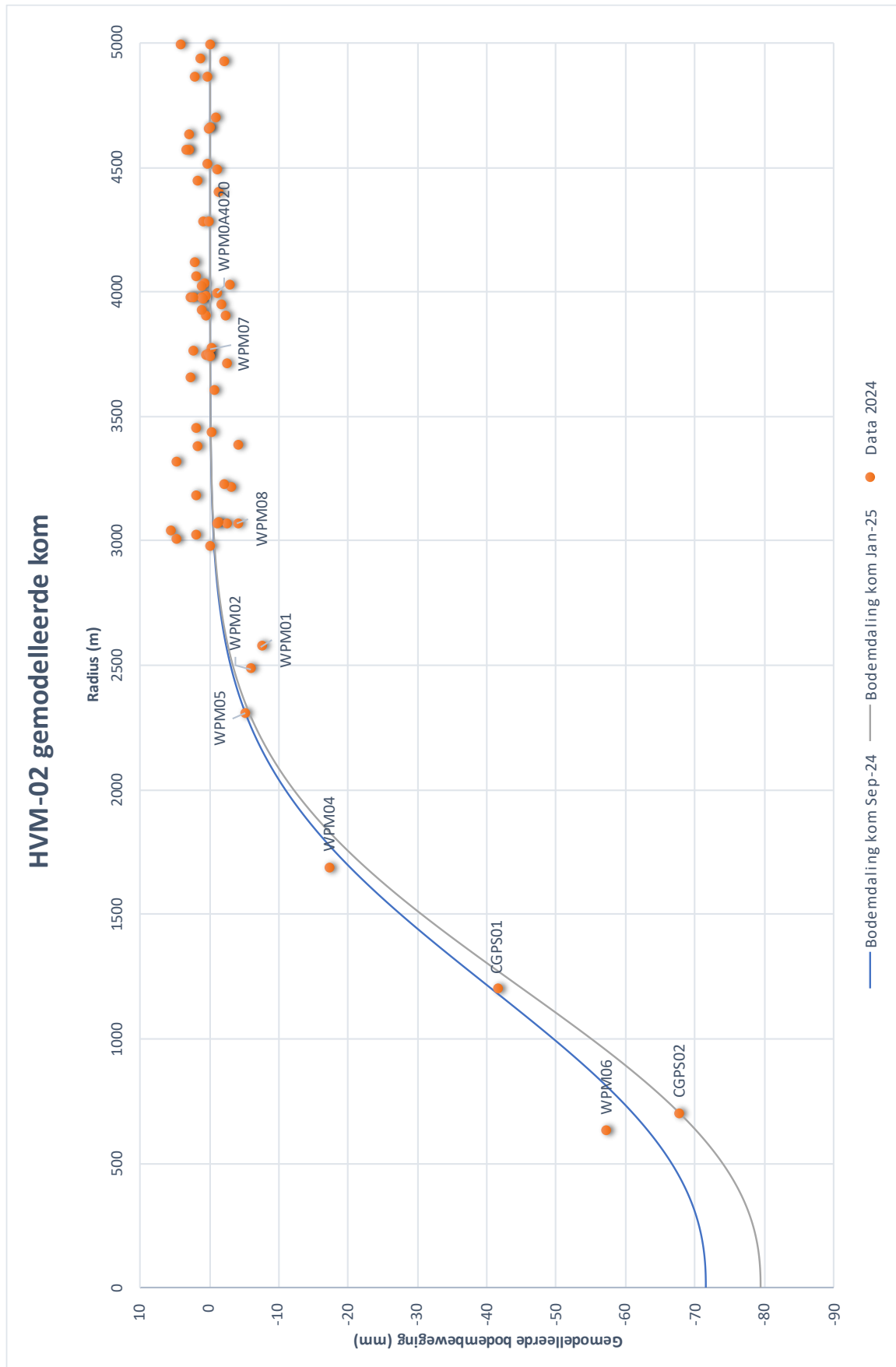
Figuur 11: Differenties waterpasmeting Harlingen-West

e) Gemeten- en gemodelleerde bodembeweging vergelijking



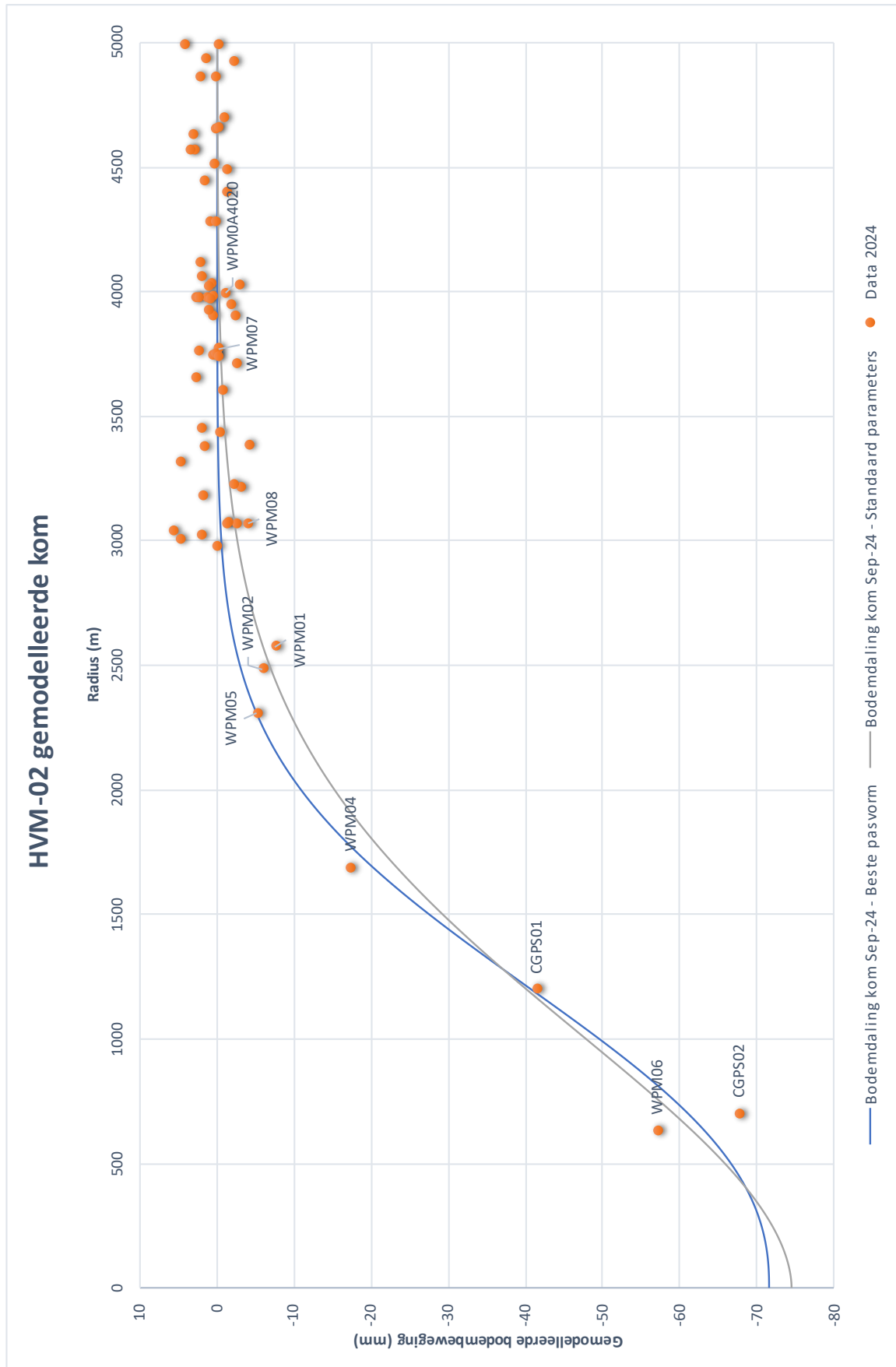
Figuur 12: Ontwikkeling gemiddelde bodembeweging kom HVM-02

f) Gemodelleerde bodembeweging september 2024 en januari 2025



Figuur 13: Gemodelleerde bodemdaling kom september 2024 en januari 2025

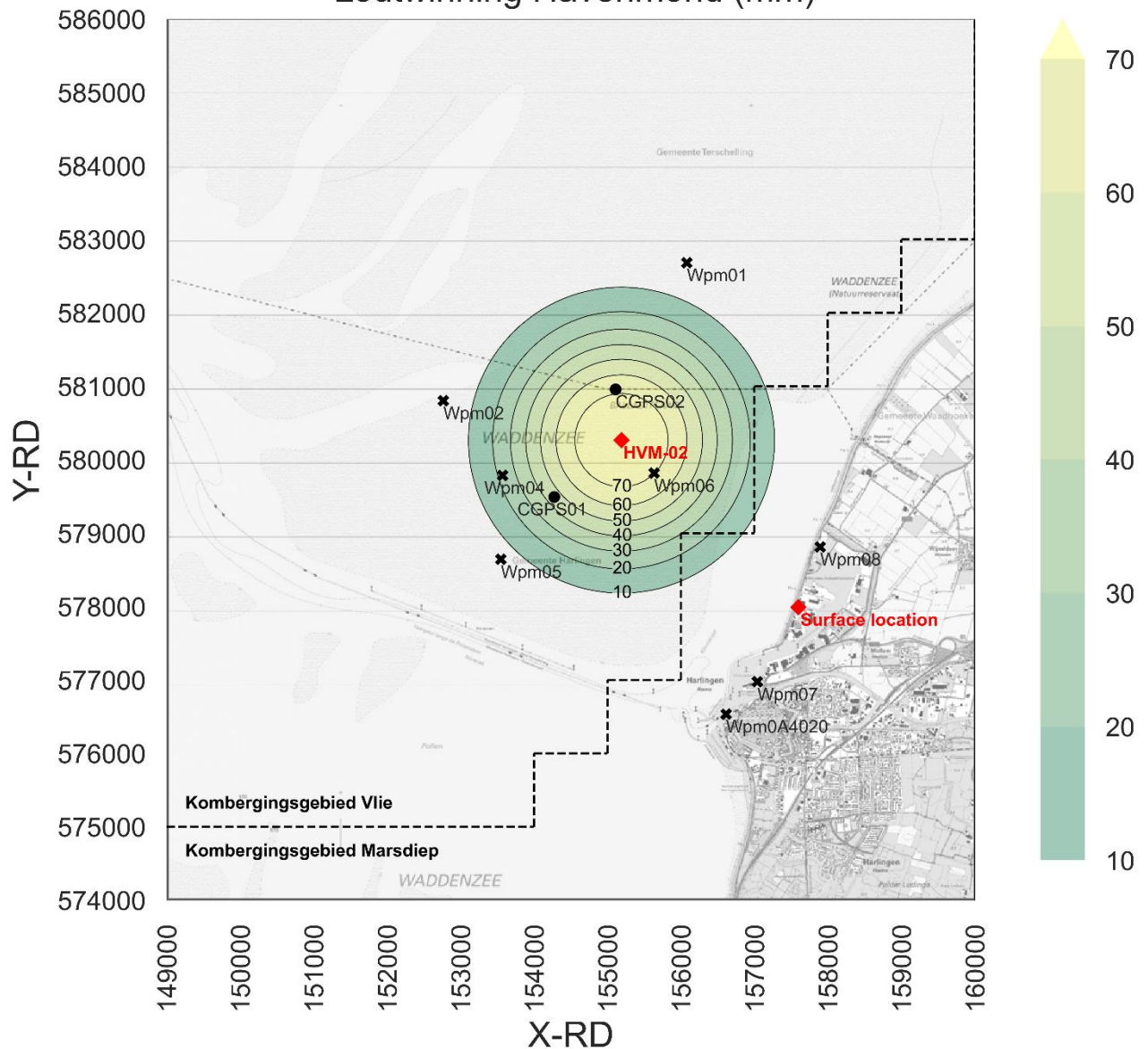
g) Komvorm parameter vergelijking



Figuur 14: Gemodelleerde bodemdaling kom september 2024. Standaard parameters vergeleken met beste pasvorm

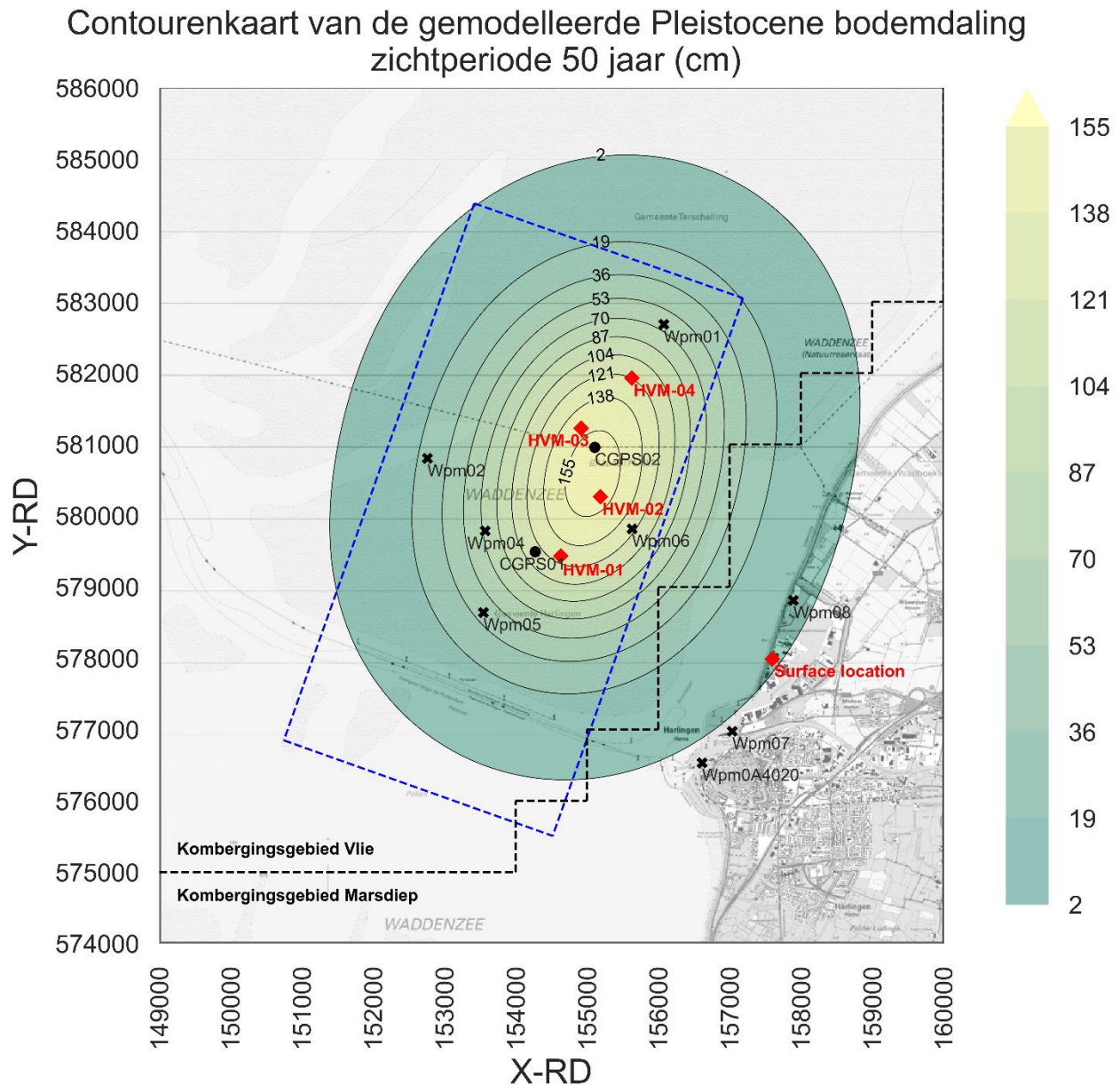
h) Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling januari 2025

Gemodelleerde contourenkaart Pleistoceen bodemdaling Jan-2025 zoutwinning Havenmond (mm)



Figuur 15: Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling januari 2025

i) **Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling Havenmond over zichtperiode van 50 jaar**



Figuur 16: Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling over zichtperiode van 50 jaar gebaseerd op de maximale productiecijfers gepresenteerd in de actualisatie van het winningsplan.

j) Overzicht belasting komborgingsgebieden Vlie en Marsdiep

Jaar	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	
Convergentie volume																																	
Zoutwinning (m3/jaar)	5324	55.641	286.841	44.102	159.286	594.065	332.778	361.324	579.614	535.506	450.442	398.840	374.957	426.390	382.684	341.875	1.481	1.787	1.177	847	828	824	821	819	819	814	812	809	809	805	802	800	
HVM-02																																	
HVM-01						124.051	293.713	317.376	342.338	343.283	342.552	341.263	340.833	275.348	288.937	470.908	375.567	359.475	402.521	360.577	313.968	1.256	1.581	1.035	793	786	783	781	776	774	771		
HVM-03																69.810	126.943	322.136	286.465	288.556	490.716	391.725	403.697	338.950	321.008	313.696	311.010	300.431	300.133	304.982	316.542	312.522	
HVM-04																				73.935	123.970	289.725	344.249	361.461	365.729	367.055	366.794	366.977	332.390	325.569	322.494		
Cumulatief	5.324	55.641	286.841	44.102	159.286	718.116	626.191	678.701	921.952	878.769	792.994	740.103	715.791	701.738	671.621	882.593	503.992	683.399	690.163	648.979	884.247	517.675	695.835	685.052	684.081	681.025	679.661	677.815	677.700	659.953	643.686	636.587	
Convergentie volume																																	
omborgingsgebied																																	
Vlie (m3/jaar)																																	
Gewinning	84.991	78.184	72.126	66.537	61.543	56.614	52.227	48.181	44.563	40.994	37.819	34.887	32.270	29.685	27.384	25.263	23.367	21.495	19.829	18.293	16.921	15.564	14.359	13.247	12.251	11.272	10.387	9.590	8.873	8.161	8.161		
Zoutwinning	4.783	49.990	256.131	52.331	166.910	653.314	586.027	635.592	862.404	822.218	742.311	693.041	670.394	656.578	628.682	629.677	473.075	651.949	657.453	619.639	848.091	502.055	676.358	666.611	665.889	662.986	661.683	659.896	659.787	641.236	628.389	619.488	
Cumulatief Vlie	89.774	128.174	328.257	118.867	228.453	709.928	638.654	683.773	906.967	863.212	780.130	727.928	702.664	686.263	656.066	854.940	501.442	673.444	677.282	637.932	865.012	517.619	690.717	679.858	678.140	674.258	672.080	669.486	666.660	646.397	634.550	627.649	
Bedrijfsomvang																																	
omborgingsgebied																																	
Vlie (mm/jaar)																																	
Gewinning	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
Zoutwinning	0.01	0.07	0.38	0.08	0.25	0.98	0.88	0.95	1.29	1.23	1.11	1.04	1.00	0.98	0.94	1.24	0.72	0.98	0.98	0.93	1.27	0.75	1.01	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.96	0.94	0.93		
Cumulatief Vlie	0.13	0.19	0.49	0.18	0.54	1.06	0.96	1.02	1.36	1.29	1.17	1.09	1.05	1.03	0.98	1.28	0.75	1.01	1.01	0.95	1.29	0.77	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01	1.00	0.97	0.95	0.94		
Belasting																																	
omborgingsgebied																																	
Vlie (mm/jaar)																																	
Gewinning	0.13	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
Zoutwinning	0.08	0.09	0.13	0.30	0.44	0.59	0.74	0.83	1.07	1.08	1.10	1.11	1.05	1.05	0.99	0.98	0.97	0.96	1.02	0.94	0.99	0.99	1.00	0.96	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.78	0.62		
Cumulatief Vlie	0.21	0.21	0.25	0.40	0.54	0.68	0.82	1.01	1.14	1.15	1.16	1.16	1.10	1.10	1.03	1.02	1.01	1.00	1.05	0.97	1.01	1.02	1.02	1.02	0.98	1.01	1.01	1.00	0.99	0.98	0.79	0.63	
Convergentie volume																																	
omborgingsgebied																																	
Marsdiep (m3/jaar)																																	
Zoutwinning	505	5.283	24.465	-5.308	-4.188	57.712	36.334	39.390	54.416	51.695	46.313	43.003	41.480	41.267	39.236	48.375	23.722	28.855	29.991	27.828	33.269	14.506	18.140	17.203	16.979	16.839	16.782	16.729	16.723	16.528	16.136	15.953	
Cumulatief Marsdiep	505	5.283	24.465	-5.308	-4.188	57.712	36.334	39.390	54.416	51.695	46.313	43.003	41.480	41.267	39.236	48.375	23.722	28.855	29.991	27.828	33.269	14.506	18.140	17.203	16.979	16.839	16.782	16.729	16.723	16.528	16.136	15.953	
Bedrijfsomvang																																	
omborgingsgebied																																	
Marsdiep (mm/jaar)																																	
Zoutwinning	0.00	0.01	0.04	-0.01	-0.01	0.09	0.05	0.06	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02		
Cumulatief Marsdiep	0.00	0.01	0.04	-0.01	-0.01	0.09	0.05	0.06	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02		
Belasting																																	
omborgingsgebied																																	
Marsdiep (mm/jaar)																																	
Zoutwinning	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03		
Cumulatief Marsdiep	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03		

Figuur 17: Overzicht belasting komborgingsgebieden Vlie en Marsdiep aan de hand van het optimale zoutwinningsscenario gepresenteerd in het winningsplan. Afhankelijk van de ontwikkeling van de zeespiegelstijging past Frisia Zout de productie aan om binnen de gebruiksruimte te blijven.

k) 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 caverne dient meegenomen te worden in de berekeningen van het open caverne volume. Het resultaat is een berekend caverne 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:

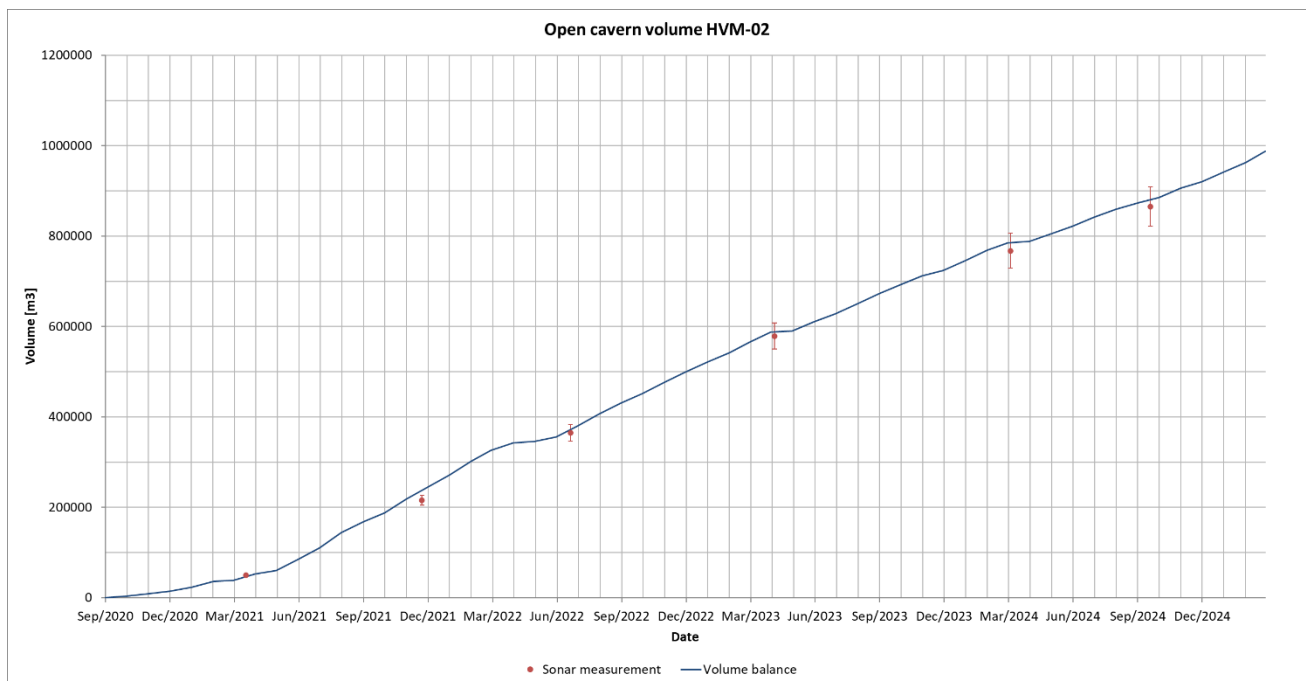
$$V_{cav.open} = \sum \left(\Delta V_{water.in} \cdot \left(1 + \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} \right) - \Delta V_{pekel.uit} - \Delta V_{water.in} \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} \vartheta_{onoplosbaar} \varphi \right)$$

Waarin $V_{cav.open}$ het open cavernevolumen 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 pekels, $\vartheta_{onoplosbaar}$ de volumefractie onoplosbaar materiaal in het Zechstein zout en φ de porositeit van de sump na het compacteren.

Het convergentievolumen wordt op eenzelfde manier berekend door het totale cavernevolumen, bestaande uit het open cavernevolumen en het pekervolumen gebonden in de sump, af te trekken van het totale volume opgelost zout, zowel in de productiestroom als in de caverne.

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

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



Figuur 18: Volumebalans HVM-02 t/m maart 2025. *Sonar 2021 onvolledige meting