Beheerscyclus Meet- en regelprotocol Havenmond over het jaar 2023

Voorbereiding: Well Engineering Partners B.V., Hoogeveen

Auteur: ir. T.A. Chorus

Versie: 1.1

Publicatiedatum: 30 april 2024

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 3
5 Pleistocene bodemdalingssnelheden 4
6 Toetsing belasting aan de gebruiksruimte kombergingsgebied 7
7 Toetsing bodemdalingsprognose 9
8 Zoutproductie met ‘Hand aan de kraan’ 10
9 Actualisering dalingsprognose 10
10 Referenties 10
11 Bijlagen 12
a) Meet- en regelprotocol Havenmond 12
b) Overzichtskaarten meetnetten zoutwinning Waddenzee 13
c) Continu GNSS-monitoring grafieken 15
d) Overzicht jaarlijkse waterpasmeting meetnet Harlingen-West 16
e) Gemeten- en gemodelleerde bodembeweging vergelijking 18
f) Komvorm parameter vergelijking 19
g) Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling januari 2024 20
h) Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling Havenmond eind zoutwinning 21
i) Volumebalans 22

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 2023 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 caverne. 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 caverne- en convergentievolume berekend worden. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van relevante volumes van de HVM-02 caverne.

Tabel 1. Berekend convergentievolume op 1 januari per jaartal

HVM-02	jan/20	jan/21	jan/22	jan/23	jan/24
Opgelost zout volume (m^3)	0	33.496	391.561	864.673	1.377.523
Open caverne volume (m^3)	0	23.070	272.046	521.534	745.660
Gebonden pekel volume in sump (m^3)	0	477	5.580	12.322	19.630
Convergentie volume (m^3)	0	9.949	113.935	330.817	612.233

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

Onzekerheid wat betreft het opgeloste zoutvolume is zeer klein (≈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 pekelvolume gebonden in de poreuze sump daarentegen, valt niet nauwkeurig vast te stellen en heeft daardoor een relatief grote onzekerheid (≈20%). Het open cavernevolume wordt indirect berekend met behulp van de volumebalans, zoals omschreven in bijlage i). De volumebalans is in de loop der jaren geijkt aan holruimtemetingen (met name bij caverne BAS-4) en heeft aangetoond een goede nauwkeurigheid te hebben (≈5%). De onzekerheid in het berekende convergentievolume is gelijk aan de som van de onzekerheden van de drie bepalende factoren. Voor het jaar 2023 komt dat neer op 54.984 m^3 (9,0%).

In de Beheerscyclus van 2022 (ref. 8) is aangegeven dat het gemeten caverne volume ca. 11% lager lag dan het destijds berekende cavernevolume met behulp van de volumebalans. Aan de hand daarvan is onderzocht of dit een eenmalige meetfout betrof, of dat er sprake was van een systematische afwijking. Aan de hand van de holruimtemetingen van 2023 en 2024 (zie Tabel 2) kon vastgesteld worden dat het een systematische afwijking betrof. In een verdere analyse is vastgesteld dat een van de productie debietmeters een afwijking van ca. 0,9% heeft. Dit had als gevolg dat het cavernevolume te hoog werd berekend en het convergentievolume evenredig te laag werd berekend. Dit is inmiddels gecorrigeerd waardoor de cijfers in Tabel 1 licht afwijken van de voorheen gepresenteerde resultaten. Deze aanpassingen vallen binnen het onzekerheidsvolume die destijds gepresenteerd zijn. Met de uitgevoerde correctie is er een goede overeenkomst tussen de gemeten cavernevolumes gedurende de holruimtemetingen en de berekende cavernevolumes in de volumebalans (zie Figuur 6 in bijlage i)).

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 m^3 is toegenomen. Tabel 2 geeft een overzicht van de holruimtemetingen van de HVM-02 caverne.

Tabel 2. Overzicht holruimtemetingen

HVM-02	19/mrt/21	23/nov/21	21/jun/22	06/apr/23	05/mrt/24
Open cavernevolume (m³)	49.546	215.362*	365.078	579.124	767.589

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

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 4 september 2023 tot en met 9 oktober 2023. 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 nauwkeurigheids-waterpasmeting van het meetnet Harlingen-West uitgevoerd. Dit meetnet bestaat uit 60 peilmerken in Harlingen stad en het buitengebied. De Harlingen-West waterpasmetingen zijn uitgevoerd in oktober 2023. Daarnaast zijn er in januari 2024 nog enkele controlemetingen uitgevoerd. Als aansluitpunt voor het meetnet is peilmerk 000A2748 gebruikt dat op ca. 5,5 km afstand ligt van het komcentrum van HVM-02 en daarmee ook buiten het beïnvloedingsgebied van bodemdaling door zoutwinning ligt. De hoogte van dit peilmerk is vastgesteld in de waterpasmeting Leeuwarden-West van 2021 (ref. 7).

Gecombineerd geven de ‘Wad’ meetcampagne en het meetnet van Harlingen-West 70 meetpunten die geanalyseerd worden in deze beheerscyclus van 2023. Overzichtskaarten van de meetnetten en bijbehorende resultaten zijn gepresenteerd 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 = 155.198 m RD, Y = 580.384 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/23	Totaal gemeten daling t.o.v. Sep/20			
		X (m)	Y (m)	HVM-02 (m)	Sep/20 (mm)	Sep/21 (mm)	Sep/22 (mm)	Sep/23 (mm)
Zweins	000A2760	169.406	578.653	14.381	0,0	0,0	0,0	0,0
WPM0A4020	000A4020	156.616	576.535	4.057	0,0	-0,7	-2,1	-2,4
WPM01	11004	156.079	582.682	2.562	0,0	-1,8	-5,9	-5,1
WPM02	12004	152.764	580.803	2.407	0,0	-5,0	-7,7	-8,1
WPM04	14004	153.573	579.786	1.632	0,0	-2,7	-9,6	-14,0
WPM05	15004	153.548	578.643	2.288	0,0	-2,9	-7,2	-4,7
WPM06	16004	155.635	579.816	712	0,0	-4,0	-19,0	-36,6
WPM07	000A02908	157.038	576.976	3.843	0,0	-1,3	-2,8	-1,8
WPM08	000A02907	157.894	578.812	3.151	0,0	-0,7	-2,9	-2,3
CGPS01	ARP CGPS01	154.273	579.494	1.173	0,0	0,4	-14,1	-19,8
CGPS02	ARP CGPS02	155.110	580.960	654	0,0	-1,8	-23,6	-37,2

De gemeten bodembeweging gedurende de ‘Wad’ meetcampagne varieert tussen de 37,2 mm en 1,8 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 3,8 mm stijging, met een gemiddelde daling van 0,3 mm ten opzichte van start zoutwinning. De bodemdalingskom van de zoutwinning blijft hiermee in 2023 vrijwel geheel buitendijks.

Zoals gepresenteerd in Tabel 3 en bijlage d) laten een groot deel van de meetpunten geen of weinig additionele bodemdaling zien in 2023 ten opzichte van 2022. In de beheerscyclus van 2022 zijn na-zetting effecten van peilmerken besproken, waarbij een nieuw aangebracht peilmerk in de eerste jaren kan dalen door externe factoren zoals bijvoorbeeld inklinking. Van de ‘Wad’ meetcampagne zijn met name peilmerken WPM0A4020, WPM01, WPM02, WPM05, WPM07 en WPM08 hier goede voorbeelden van. Deze peilmerken laten met name een daling tussen 2020 en 2022 zien, maar geen of weinig daling tussen 2022 en 2023. Deze punten liggen grotendeels buiten, of op de rand, van de invloedsfeer van de HVM-02 bodemdaling (>2,5 km afstand van het komcentrum).

Er zijn een aantal peilmerken die dalingen of stijgingen tonen die buiten de verwachtingen liggen. De grootste uitschieters zijn peilmerken 10, D32 en D33, allen op het land aan de noordkant van het Harlingen-West meetnet, nabij de zeedijk ten noorden van de industriehaven van Harlingen. Deze peilmerken laten een stijging tussen de 2,8 en 3,8 mm zien ten opzichte van start zoutwinning, dit terwijl een daling van 1,0 tot 1,6 mm verwacht is op deze locaties. De bodemstijgingen van deze peilmerken zijn ook al waargenomen tijdens de voorgaande meetcampagnes, met name tijdens de meetcampagne van 2021. Peilmerken D32 en D33 stabiliseren zich en laten slechts 0,7 tot 1,2 mm stijging zien in het afgelopen jaar. Peilmerk 10 daarentegen is 2,6 mm gestegen ten opzichte van de vorige meetcampagne.

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:

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

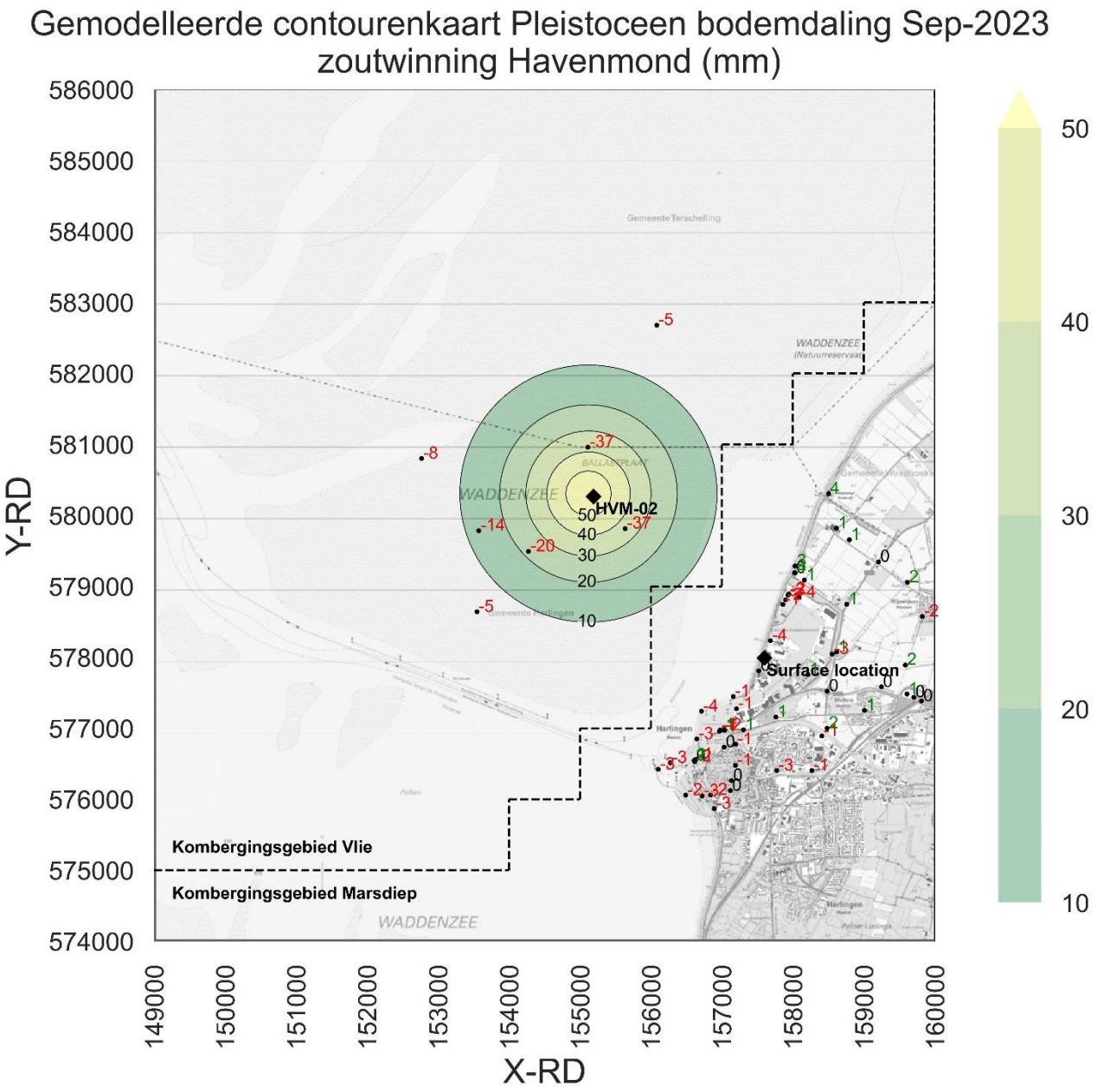
In deze formule is $w(x,y)$ de daling op locatie (x,y), w_{max} de maximum bodemdaling in het centrum (x_0, y_0) van de dalingskom, γ (gamma) een empirische parameter die de afvlakking van de kom bepaalt, δ (delta) een empirische parameter die de steilheid van de kom bepaalt en *r* de horizontale afstand 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 2023 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 2024 met hetzelfde komvolume / convergentievolume percentage. Een visuele vergelijking van de gemeten bodembeweging ten opzichte van de gemodelleerde kom is gepresenteerd in bijlage e).

Tabel 4. Resultaten kom optimalisatie 2023

HVM-02 Komparameters	Sep-23	Jan-24
X-coördinaat (m RD)	155.120	155.120
Y-coördinaat (m RD)	580.307	580.307
Gamma	8,89E-05	8,89E-05
Delta	1,321	1,321
W_{max} (mm)	60,0	68,7
Komvolume (m^3)	343.295	393.094
Convergentievolume (m^3)	534.673	612.233
Daling- / convergentievolume (mm/m^3)	1,12E-04	1,12E-04
Komvolume / convergentievolume (%)	64,2%	64,2%
Kleinste kwadraten afwijking (mm)	1,86	

De verhouding tussen het komvolume en het convergentievolume ligt tijdens de productie periode typisch, op basis van ervaring van Barradeel en Barradeel II, tussen de 80% en 95%. Voor lange termijn dalingsprognoses wordt een verhouding van 100% aangehouden waarbij $V_{kom} = V_{con}$. Gedurende de eerste productie jaren kan het percentage echter lager liggen, vanwege gesteenterek kan een deel van het convergentievolume vertraagd gemeten worden aan het maaiveld. Ten tijde van september 2023 is een komvolume / convergentievolume verhouding van 64,2% gemeten. Het toepassen van deze komvolume / convergentievolume verhouding op het convergentievolume ten tijde van 1 januari 2024 (zie Tabel 1), leidt tot een bodemdalingskom volume van 393.094 m^3. De gemodelleerde bodemdalingskom ten tijde van de meetcampagne in september 2023 is gevisualiseerd in Figuur 1. De gemodelleerde bodemdalingskom ten tijde van 1 januari 2024 is gevisualiseerd in bijlage h).



Figuur 1. Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling september 2023 met gemeten bodemdaling/stijging ten opzichte van start zoutwinning

Zoals gepresenteerd in Tabel 4 is het volume van de gemodelleerde bodemdalingskom lager dan het convergentievolume. Dat wil zeggen dat het volume van de best passende (kleinste kwadraten afwijking) gemodelleerde bodemdaling kom lager is dan de berekende bodemdaling op basis van de productiecijfers. In hoofdstuk 2 zijn de productiecijfers gepresenteerd waarbij een onzekerheid volume van 54.984 m^3 is berekend op het convergentievolume ten tijde van 1 januari 2024. Daarmee ligt het berekende convergentievolume tussen de 557.249 m^3 en 667.217 m^3. Het gemodelleerde komvolume van 393.094 m^3 valt buiten dit bereik.

Zoals in bijlage e) en Figuur 1 te zien is, is er een goede overeenkomst tussen de gemodelleerde bodemdalingskom en de meetpunten op het wad. In de meetpunten vanaf 3 km (op het land) is nog geen duidelijke bodemdalingstrend te herkennen in het Harlingen-West meetnet. Een aantal meetpunten laten enkele millimeters stijging zien, terwijl andere meetpunten enkele millimeters

daling laten zien. Het gebrek van een duidelijke bodemdaling trend in de flanken van de bodemdalingskom (2.5 – 3.5 km) kan een verklaring geven voor de relatief lage ratio tussen het gemodelleerde komvolume en convergentievolume. Op een schaal van enkele millimeters kunnen externe factoren relatief veel impact hebben. Zolang het bodemdalingsvolume klein blijft en er nog geen duidelijke bodemdaling plaatsvindt in het bulk van de meetpunten (op land), zal het lastig zijn om een goede overeenkomst te vinden tussen het berekende convergentievolume en het best passende, gemodelleerde, komvolume.

Naarmate er meer bodemdaling meetbaar is, zal het mogelijk worden om een goede komvorm te passen in zowel het komcentrum als op de komflanken. Externe factoren en/of ruis effecten in de meetdata zullen relatief minder invloed gaan hebben op de resultaten. Hierdoor is ook een betere overeenkomst te verwachten tussen het komvolume en het convergentie volume. De lage komvolume / convergentievolume verhouding van 64,2% die in deze Beheerscyclus is vast gesteld, wordt om deze redenen met name toegeschreven aan het gebrek van meetbare bodemdaling in de komflanken.

De bodemdalingskom 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 bodemdalingsgebied ligt te delen door de oppervlakte van dat gebied. De oppervlakte van kombergingsgebied Vlie bedraagt 668 km^2, die van kombergingsgebied Marsdiep 712 km^2. Tabel 5 geeft een overzicht van de komvolumes en bodemdalingssnelheden per kombergingsgebied.

Tabel 5. Bodemdaling snelheden per kombergingsgebied voor het jaar 2023

Kombergingsgebied	**Komvolume 01-Jan-2023**	**Komvolume 01-Jan-2024**	**Bodemdaling snelheid 2023**	
	m3	m3	m3/jaar	mm/jaar
Vlie	292.156	366.199	74.043	0,1
Marsdiep	28.297	22.736	-5.561	-0,0
Vaste land	4.980	4.158	-822	n.v.t.
Totaal	**325.443**	**393.094**	**67.661**	

Aan de hand van Tabel 5 is duidelijk dat er ten opzichte van 2022 geen sprake is van additionele bodemdaling onder het vaste land en Marsdiep. Er is zelfs een zeer lichte stijging te zien in zowel Marsdiep als onder het vaste land. De redenen hiervoor zijn toegelicht in bovenstaande paragrafen, waarbij benadrukt is dat er nog geen sprake is van een duidelijke bodemdaling trend in de flanken van de bodemdaling kom. Onder andere vanwege deze mogelijke jaarlijkse variaties, wordt er gekeken naar een 6-jaarlijks gemiddelde belasting van een kombergingsgebied, zoals beschreven in onderstaand hoofdstuk 6.

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 $V_{kom} = V_{con}$ 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 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. Er was sprake van een reservering van 0,42 mm/jaar bodemdaling snelheid voor gaswinning onder het kombergingsgebied Vlie. Van toekomstige gaswinning onder het Vlie is echter geen sprake meer. In 2018 was de gemiddelde daling snelheid uit gaswinning slechts 0.035 mm/jaar (ref. 5).

Een overzicht waarin de belasting in 2023 is berekend voor kombergingsgebied Vlie is gegeven in Tabel 6 en voor kombergingsgebied Marsdiep in Tabel 7.

Tabel 6. Belasting kombergingsgebied Vlie 2023

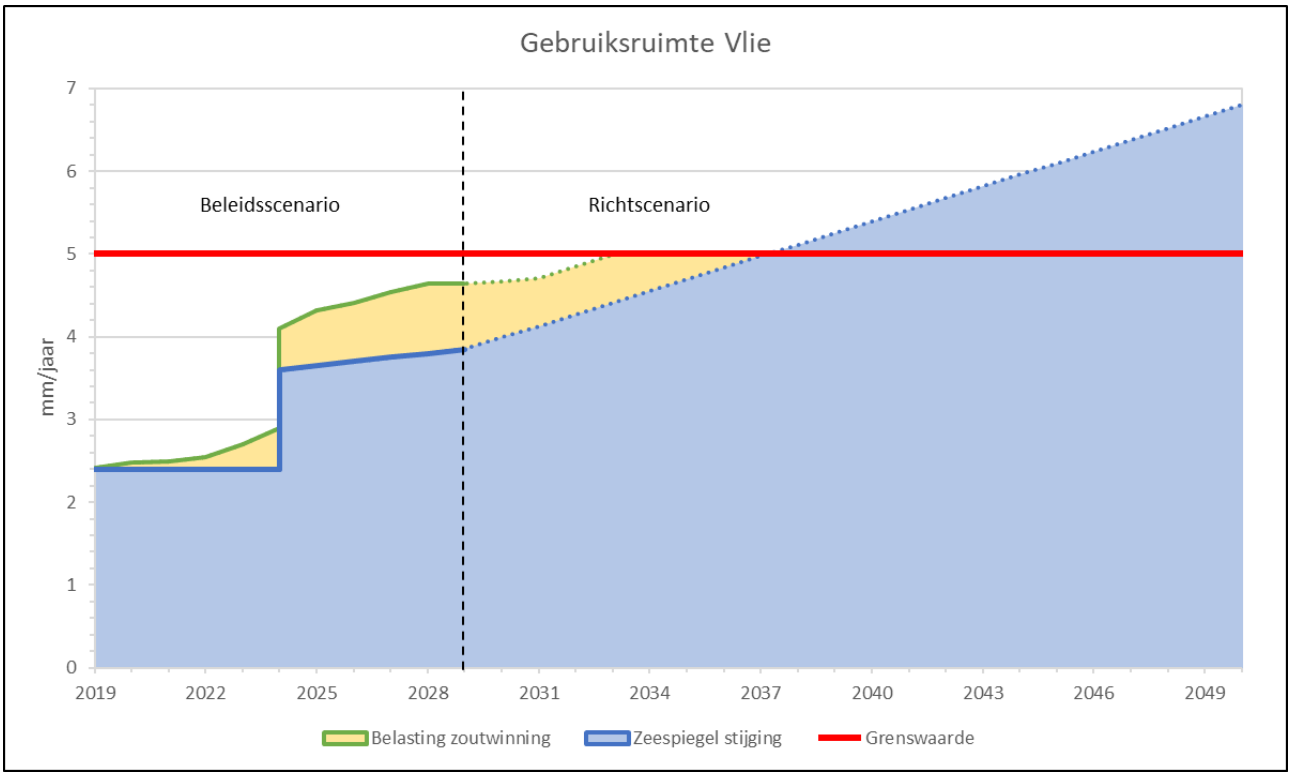
Kombergingsgebied Vlie			(J-3)	(J-2)	(J-1)	(J)	(J+1)	(J+2)
Jaar	J	-	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Meegroeivermogen	M	mm/jaar	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Zeespiegelstijging	Z_{rZSS}	mm/jaar	2,4	2,4	2,4	2,4	3,6	3,7
Gebruiksruimte	G	mm/jaar	2,6	2,6	2,6	2,6	1,4	1,3
Bodemdalingssnelheid zoutwinning	S	mm/jaar	0	0,1	0,3	0,1	0,3	0,9
Belasting zoutwinning	B	mm/jaar	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,7

Tabel 7. Belasting kombergingsgebied Marsdiep 2023

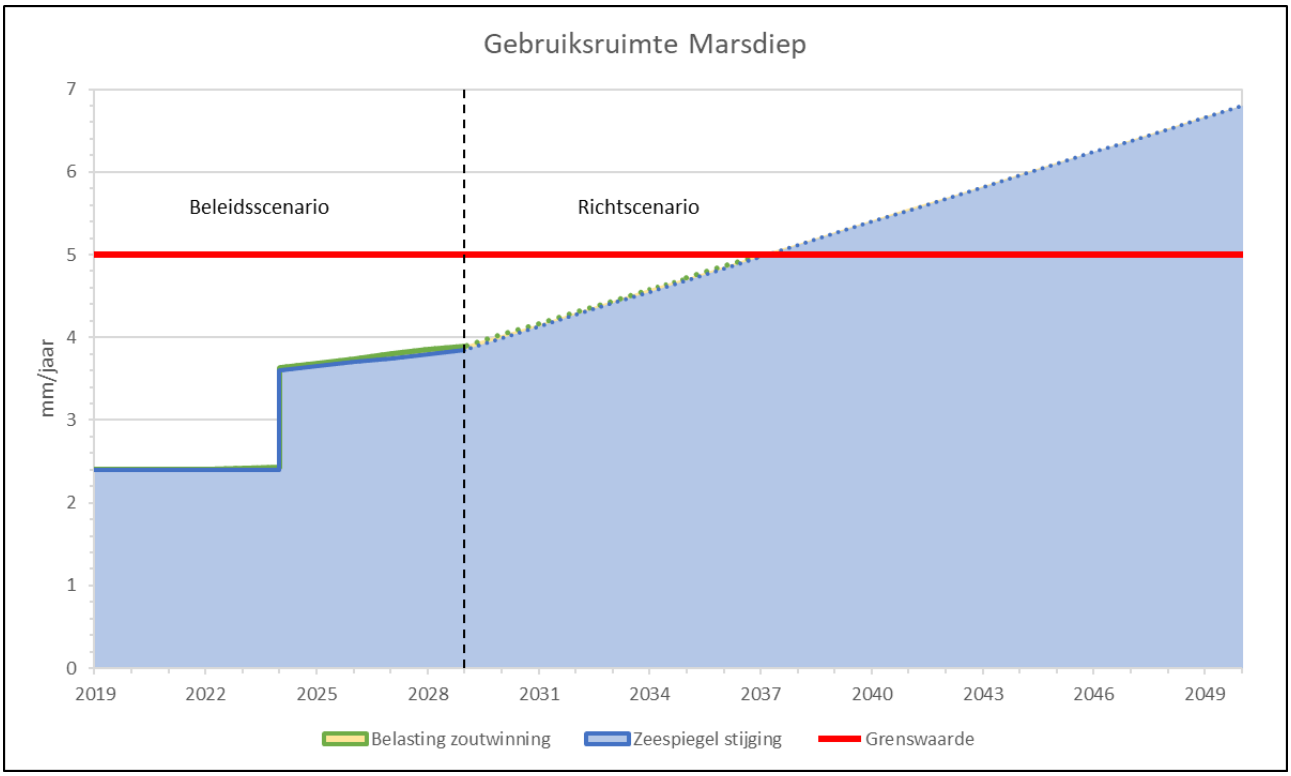
Kombergingsgebied Marsdiep			(J-3)	(J-2)	(J-1)	(J)	(J+1)	(J+2)
Jaar	J	-	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Meegroeivermogen	M	mm/jaar	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Zeespiegelstijging	Z_{rZSS}	mm/jaar	2,4	2,4	2,4	2,4	3,6	3,7
Gebruiksruimte	G	mm/jaar	2,6	2,6	2,6	2,6	1,4	1,3
Bodemdalingssnelheid zoutwinning	S	mm/jaar	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Belasting zoutwinning	B	mm/jaar	0,0	0,0	0,0	**0,0**	0,0	0,0

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 en is rekening gehouden met de nieuwste inzichten qua productiecijfers gedurende de beleidsscenario periode. Tot slot 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 $V_{kom} = V_{con}$. De resulterende gebruiksruimte figuren zijn gepresenteerd in Figuur 2 en Figuur 3.

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.



Figuur 2. Gebruiksruimte Vlie. Inschatting gebruiksruimte na 2029 (stippellijnen)



Figuur 3. Gebruiksruimte Marsdiep. Inschatting gebruiksruimte na 2029 (stippellijnen)

7 Toetsing bodemdalingsprognose

De bodemdalingskomvorm kan getoetst worden aan de komparameters omschreven in de technische bijlage van het Meet- en regelprotocol. De geoptimaliseerde komparameters γ en δ van $8{,}89E^{-05}$ en 1,325 respectievelijk wijken in 2023 af van de standaard komparameters omschreven in

Meet- en regelprotocol van 4,35E^{-07} en 1,960. De geoptimaliseerde komparameters zorgen voor een smallere en diepere bodemdalingskom. Een vergelijk tussen de geoptimaliseerde bodemdalingskom en een bodemdalingskom met standaard kom parameters ten tijde van september 2023 is gevisualiseerd in bijlage f). Het gevolg is een komcentrum dat circa 2 cm dieper ligt, terwijl de kom randen enkele millimeters minder dalen. De ontwikkeling van de komvorm wordt in de gaten gehouden. De geoptimaliseerde komvorm van 2022 lag wel binnen het verwachtingspatroon, het kan daarom een eenmalige afwijking betreffen.

Het berekende convergentievolume en gemeten Pleistocene bodemdalingsvolume kan daarnaast vergeleken worden met de bodemdaling prognose uit de technische bijlage van het Meet- en regelprotocol. Wanneer de start van zoutwinning wordt verzet naar 2020 in plaats van 2015, zou in 2023 een convergentie volume van ca. 802.250 m^3 worden verwacht. Dit zou leiden tot een bodemdalingskom met in het diepste punt een Pleistocene bodemdaling van 80 mm. De daadwerkelijke bodemdalingscijfers liggen lager met een convergentievolume van 612.223 m^3, een gemeten komvolume van 393.094 m^3 en een diepste punt van 69 mm respectievelijk. Hiermee valt het berekende convergentievolume en de gemeten bodemdaling lager uit dan de gepresenteerde cijfers in de technische bijlage van het Meet- en regelprotocol. Dit heeft zoals in de Beheerscyclus van 2022 omschreven met name te maken met de caverne groei periode waarin HVM-02 zich momenteel in bevindt. In het technische bijlage van het Meet- en regelprotocol is een lineaire groei van de caverne gepresenteerd. In werkelijkheid groeit de caverne met name de eerste 5 jaar van de productie tijd, waarna het cavernevolume stabiel blijft. Wanneer het cavernevolume groeit, neemt het convergentievolume minder snel toe. Hierdoor ligt het daadwerkelijke convergentievolume, en bijbehorend bodemdalingsvolume, momenteel lager dan het gepresenteerde convergentievolume in de technische bijlage van het Meet- en regelprotocol.

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 2023 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 vervolgscenario’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 en de productiecijfers tot heden.

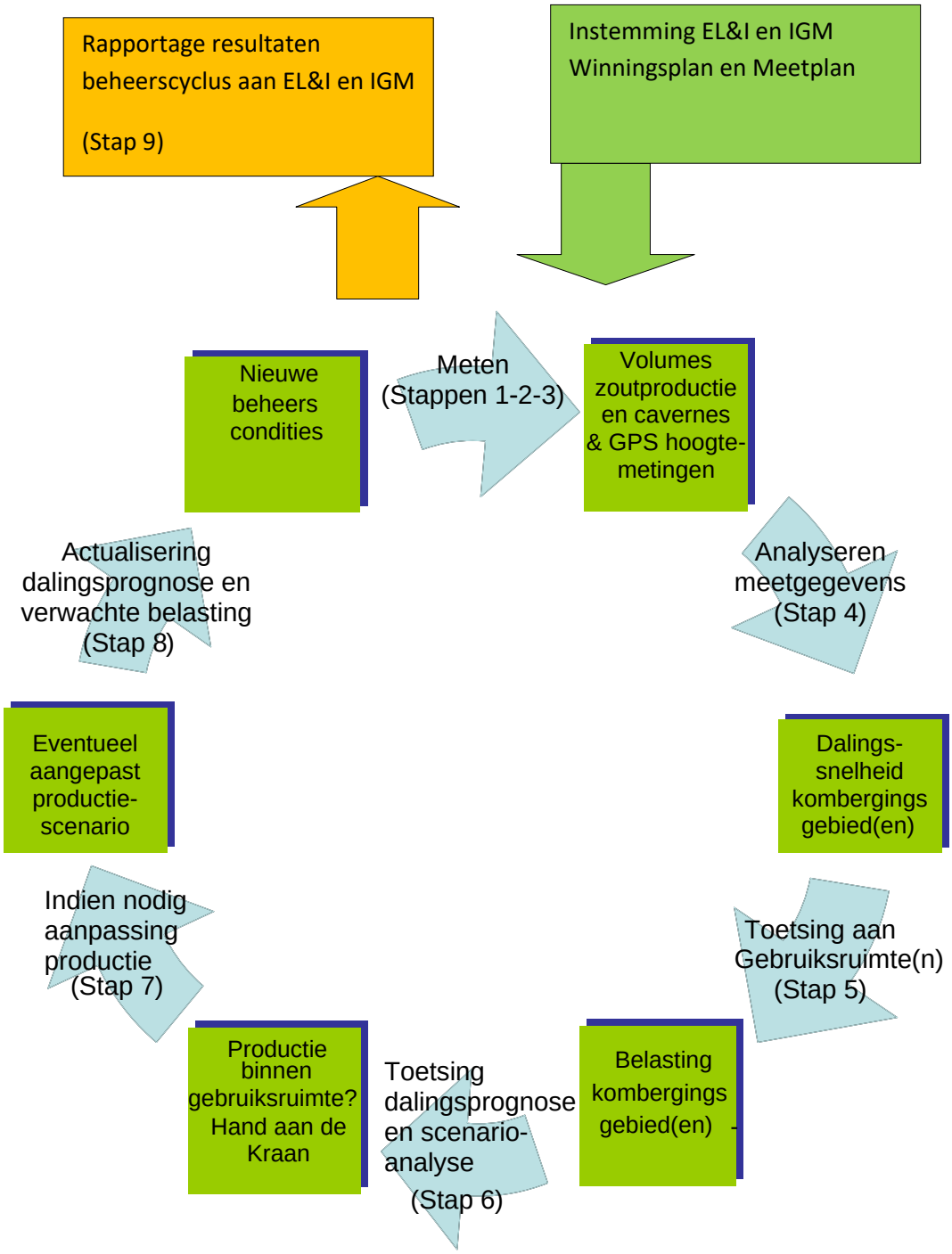
10 Referenties

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 2023, Antea Group, 24 januari 2024

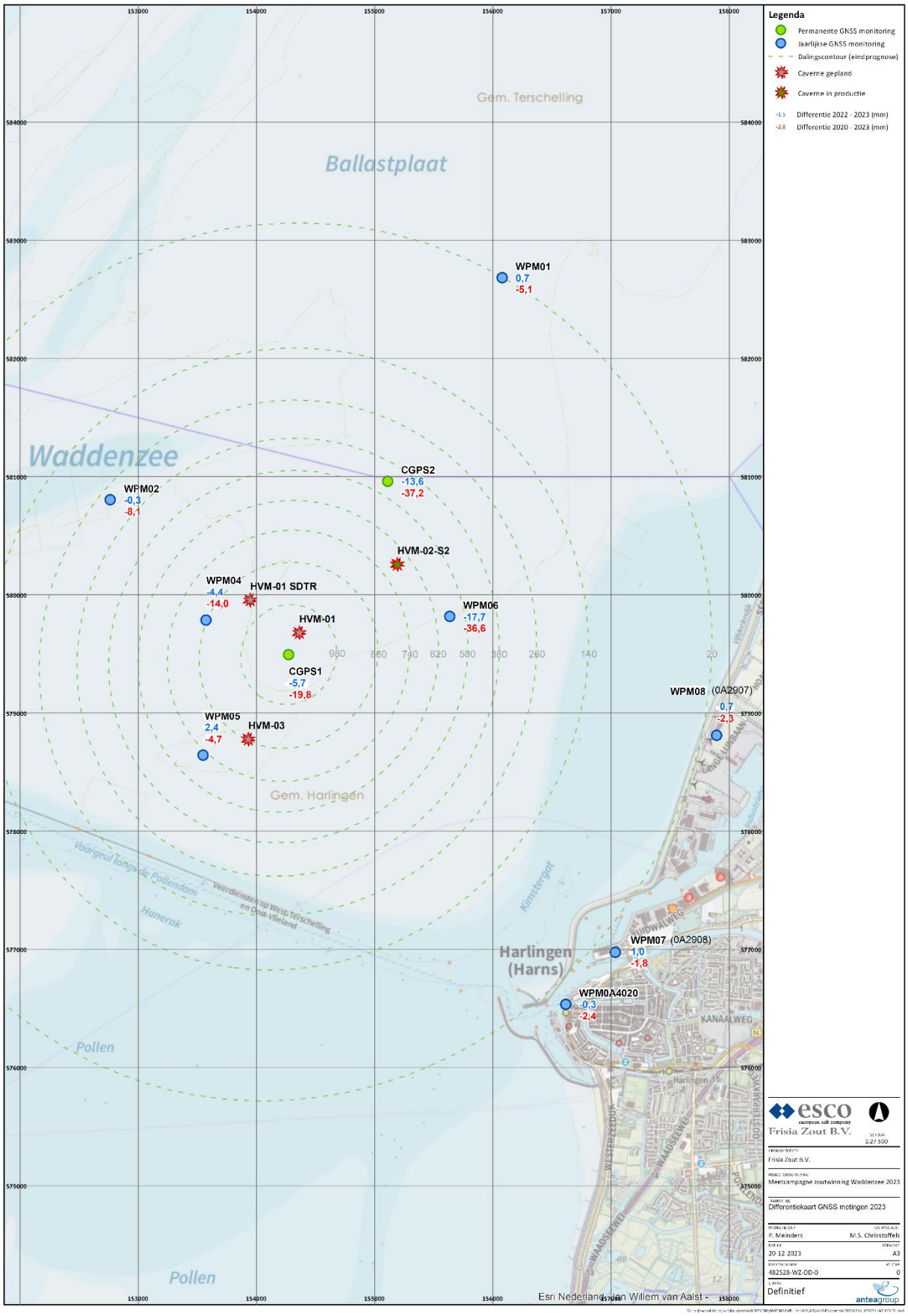
4. Vaststelling veilige gebruiksruimte gas- en zoutwinning onder de Waddenzee (Gebruiksruimtebesluit), Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 25 april 2024
5. Zuidwal Winningsplan Aanpassing versie 3.0, Vermilion Energy Netherlands B.V., 16 november 2018
6. Winningsplan voor winningsvergunning ‘Havenmond’ v.4 Final, Frisia Zout B.V., 16 maart 2012
7. Meetregister bij het meetplan Leeuwarden West; Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing 2021, Antea group, 10 maart 2022
8. Beheerscyclus Meet- en regelprotocol Havenmond over het jaar 2022, Well Engineering Partners B.V., 28 april 2023

11 Bijlagen

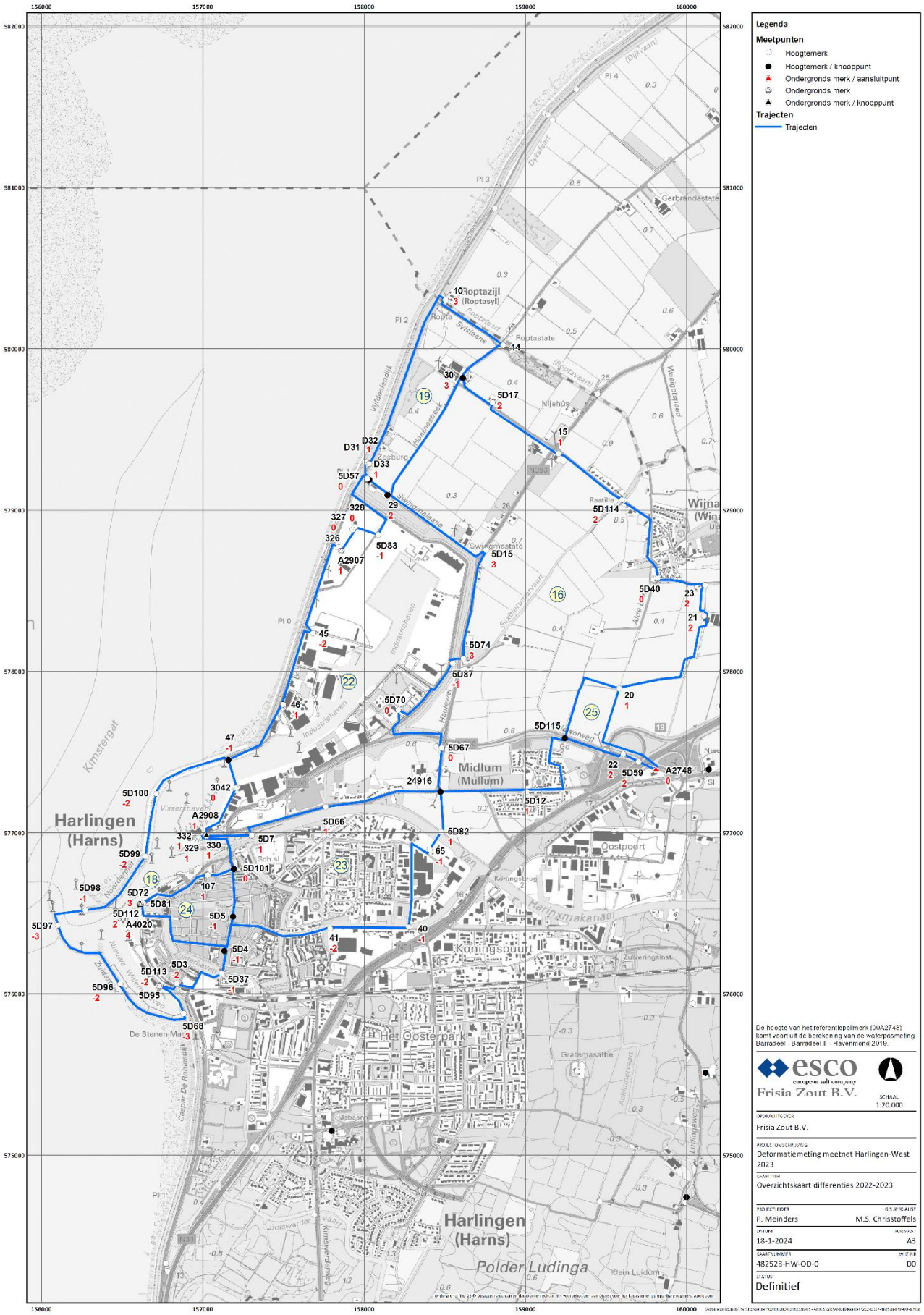
a) Meet- en regelprotocol Havenmond



b) Overzichtskaarten meetnetten zoutwinning Waddenzee

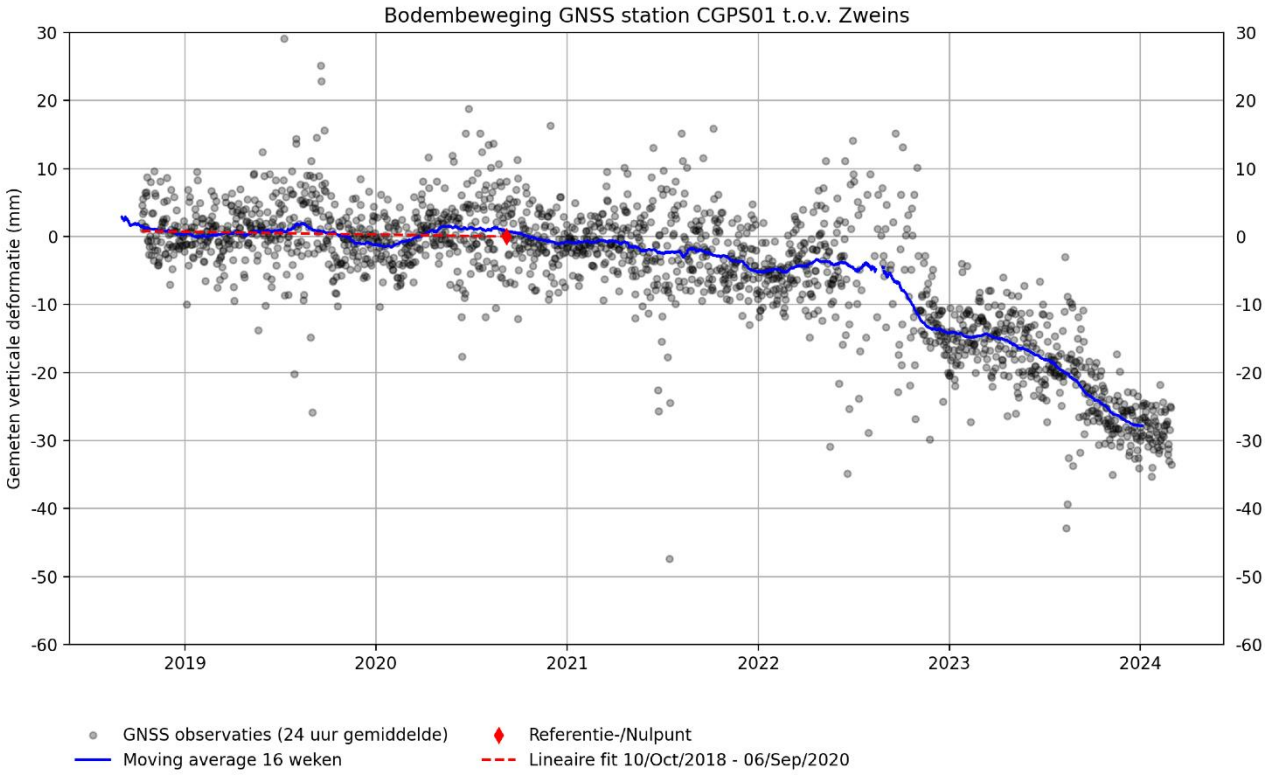


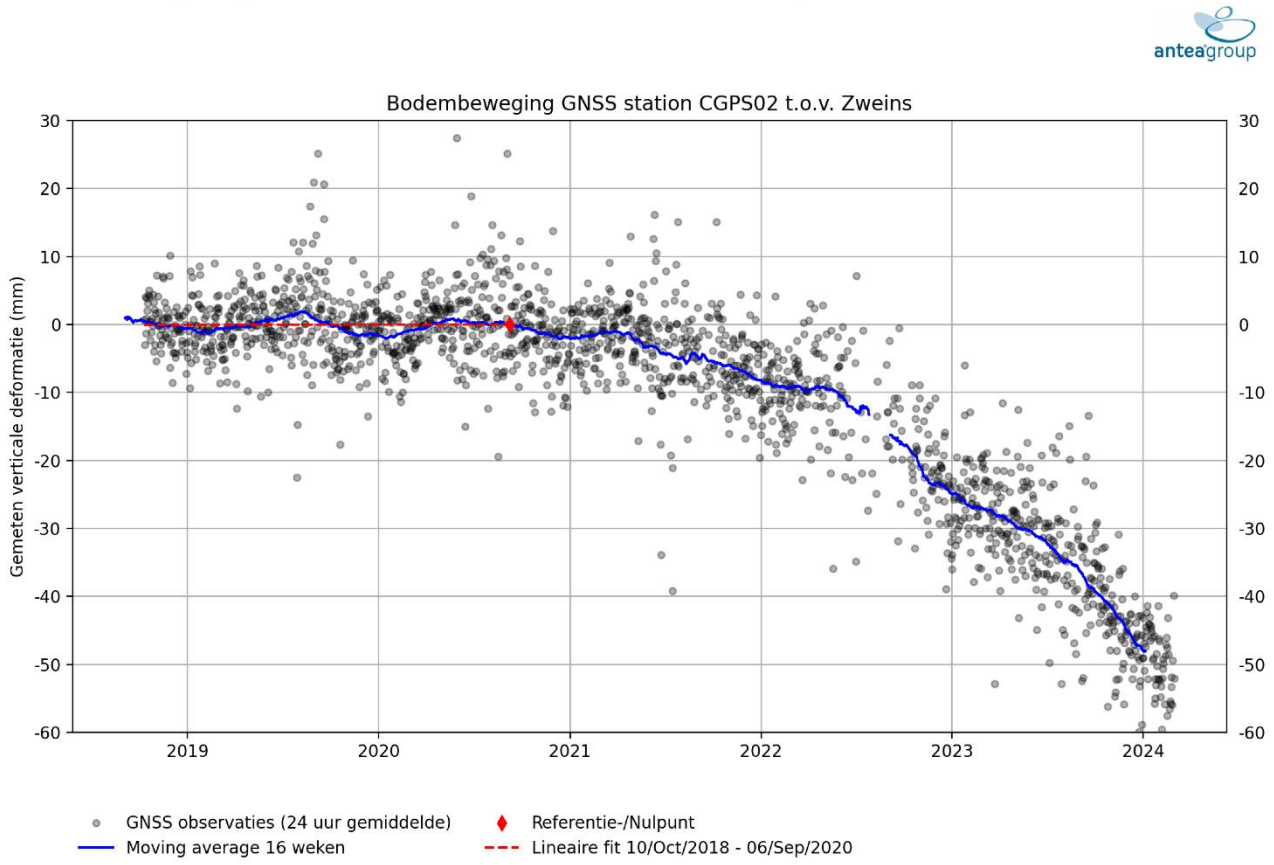
Figuur 4: GNSS 'Wad' Meetcampagne resultaten 2023 (ref. 3)



Figuur 5: Waterpasmeting meetnet Harlingen-West resultaten 2023 (ref. 3)

c) Continu GNSS-monitoring grafieken



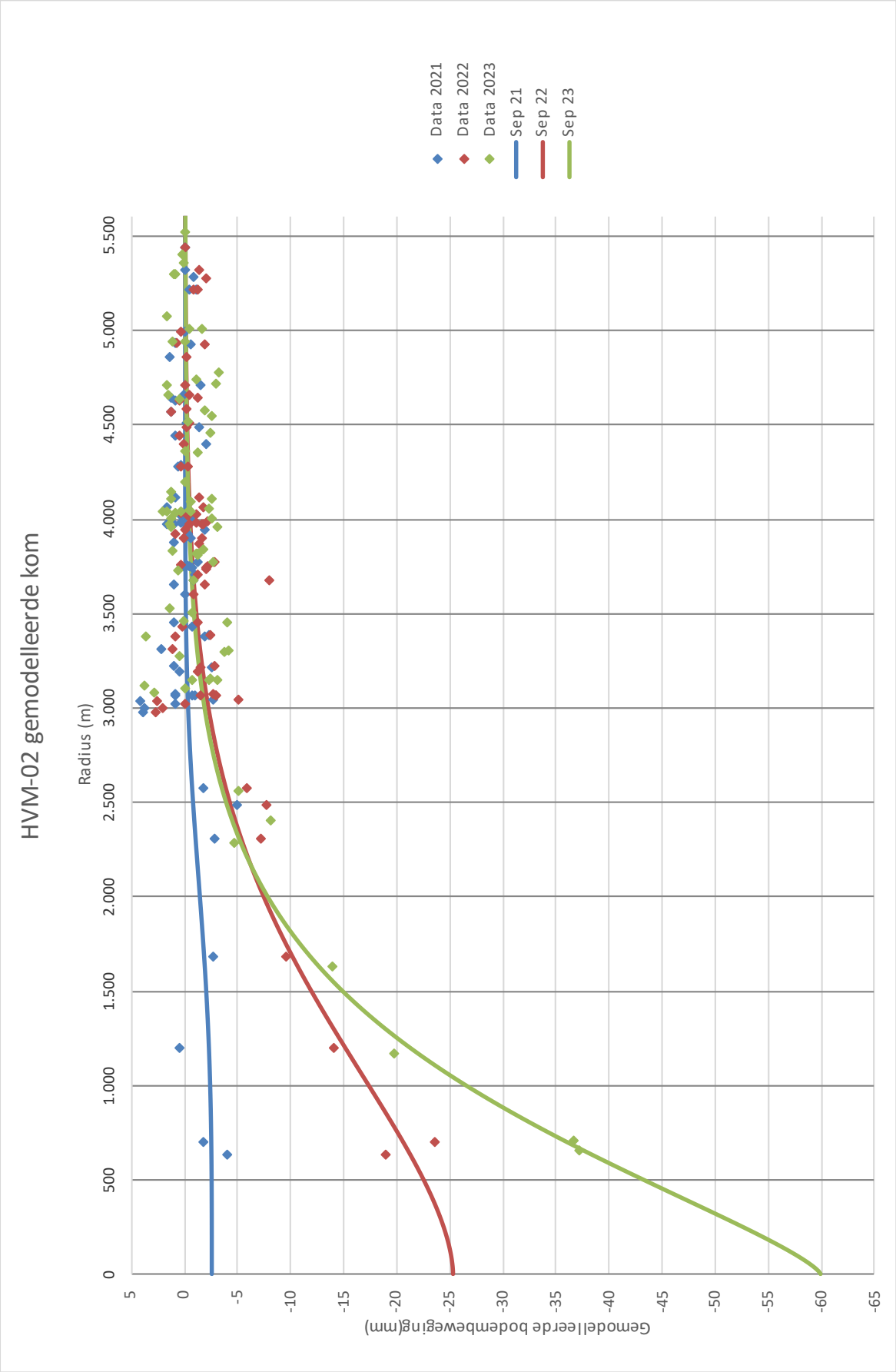


d) Overzicht jaarlijkse waterpasmeting meetnet Harlingen-West

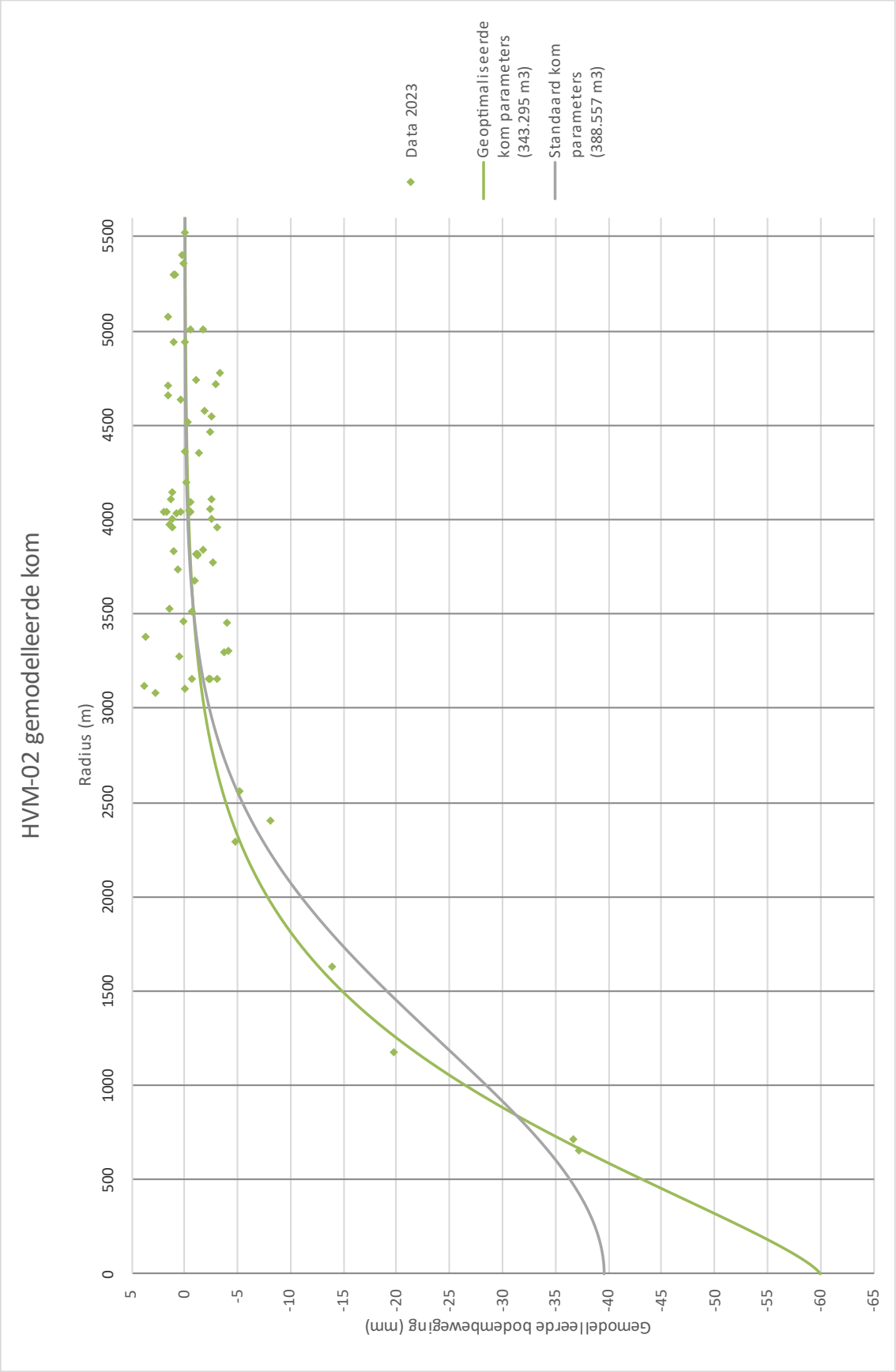
Peilmerk	Coördinaten		Afstand tot komcentrum Sep/23	Totaal gemeten hoogte t.o.v. Sep/20			
	X (m)	Y (m)	HVM-02 (m)	Sep/20 (mm)	Sep/21 (mm)	Sep/22 (mm)	Sep/23 (mm)
0000010	158.500	580.308	3.381	0,0	2,2	1,1	3,7
0000014	158.862	580.020	3.753	0,0	-0,9	-8,0	
0000015	159.203	579.347	4.195	0,0	0,8	-1,4	-0,1
0000020	159.582	577.894	5.073	0,0	-0,1	0,3	1,6
0000021	160.107	578.342	5.361	0,0	-0,8	-2,0	0,1
0000022	159.606	577.486	5.299	0,0	-1,1	-0,8	1,0
0000023	160.113	578.534	5.299	0,0	-0,4	-1,2	0,9
0000029	158.160	579.092	3.274	0,0	0,4	-1,2	0,5
0000030	158.612	579.820	3.526	0,0	1,0	-1,2	1,4
0000040	158.265	576.408	5.009	0,0	0,8	0,7	-0,5
0000041	157.771	576.407	4.716	0,0	1,2	-1,2	-3,0
0000045	157.682	578.237	3.294	0,0	-2,6	-1,5	-3,7
0000046	157.517	577.812	3.460	0,0	-1,9	0,9	0,1
0000047	157.157	577.450	3.509	0,0	-0,7	0,2	-0,7
0000065	158.406	576.894	4.738	0,0	0,1	-0,4	-1,1
0000107	157.029	576.736	4.049	0,0	0,3	-1,1	-0,4
0000326	157.843	578.770	3.127	0,0	-2,7	-5,1	
0000327	157.929	578.879	3.151	0,0	0,9	-3,0	-3,1
0000328	157.941	578.896	3.154	0,0	0,8	-2,7	-2,4
0000329	156.963	576.964	3.818	0,0	0,0	-2,1	-1,1
0000330	156.974	576.967	3.820	0,0	-0,4	-2,2	-1,2
0000332	156.972	576.976	3.810	0,0	-0,7	-2,1	-1,2
0003042	157.203	577.277	3.677	0,0	-0,1	-0,9	-0,9
0004031	158.005	579.298	3.056	0,0	3,9	2,7	
0004032	158.029	579.287	3.083	0,0	3,8	2,1	2,8
0004033	158.032	579.189	3.119	0,0	4,1	2,6	3,8
000A2748	159.809	577.387	5.524		0,0	0,0	0,0
000A2760	157.858	578.747	14.278	0,0	0,0		
000A2907	157.023	576.980	3.151	0,0	-1,0	-1,5	-0,7
000A2908	156.613	576.552	3.833	0,0	-0,2	0,3	1,1
000A4020	156.610	576.550	4.041	0,0	1,2	-1,6	2,0
000A5020	156.838	576.063	4.042		0,0		0,4
005D0003	157.133	576.266	4.578	0,0	-0,2	-0,4	-1,9
005D0004	157.187	576.478	4.514	0,0	0,9	0,5	-0,3
005D0005	157.303	576.983	4.351	0,0	0,6	-0,3	-1,3
005D0007	159.007	577.253	3.976	0,0	0,0	0,1	1,4
005D0012	158.757	578.751	4.943	0,0	1,4	-0,2	1,1
005D0015	158.795	579.657	3.956	0,0	1,0	-1,4	1,2
005D0017	157.117	576.124	3.732	0,0	1,0	-1,9	0,6

Peilmerk	Coördinaten		Afstand tot komcentrum Sep/23	Totaal gemeten hoogte t.o.v. Sep/20			
	X (m)	Y (m)	HVM-02 (m)	Sep/20 (mm)	Sep/21 (mm)	Sep/22 (mm)	Sep/23 (mm)
005D0037	157.117	576.124	4.635	0,0	1,2	1,2	0,4
005D0040	159818	578578	5.006	0,0	-0,6	-1,9	-1,7
005D0057	158.018	579.194	3.105	0,0	0,9	0,0	0,0
005D0059	159.700	577.440	5.403		0,0	-1,4	0,2
005D0066	157.760	577.160	4.108	0,0	0,2	0,3	1,3
005D0067	158.482	577.525	4.364	0,0	0,3	0,3	0,0
005D0068	156.890	575.870	4.777	0,0	-1,5	-0,1	-3,3
005D0070	158.210	577.760	4.004	0,0	-0,3	0,8	1,2
005D0072	156.614	576.558	4.035	0,0	1,0	-1,8	0,8
005D0074	158.614	578.079	4.144	0,0	1,6	-1,8	1,2
005D0081	156.632	576.562	4.039	0,0	1,7		-0,6
005D0082	158.478	577.003	4.711	0,0	0,8	0,5	1,6
005D0083	158.087	578.846	3.307	0,0	1,0	-2,8	-4,1
005D0087	158.550	578.050	4.106	0,0	0,1	-1,1	-2,6
005D0095	156.727	576.050	4.550	0,0	-1,4		
005D0096	156.487	576.060	4.461	0,0	-2,0	0,1	-2,4
005D0097	156.100	576.424	4.004	0,0	-1,9	0,0	-2,6
005D0098	156.269	576.517	3.960	0,0	-0,6	-1,7	-3,1
005D0099	156.643	576.853	3.775	0,0	-1,0	-1,2	-2,7
005D0100	156.710	577.241	3.453	0,0	-2,3	-2,4	-4,0
005D0101	157.192	576.776	4.094	0,0	0,3	-0,3	-0,6
005D0112	156.610	576.550	4.042			-0,5	1,7
005D0113	156.720	576.050	4.548			-0,2	-2,6
005D0114	159.610	579.060	4.660			-0,2	1,5
005D0115	159.245	577.585	4.942				-0,1

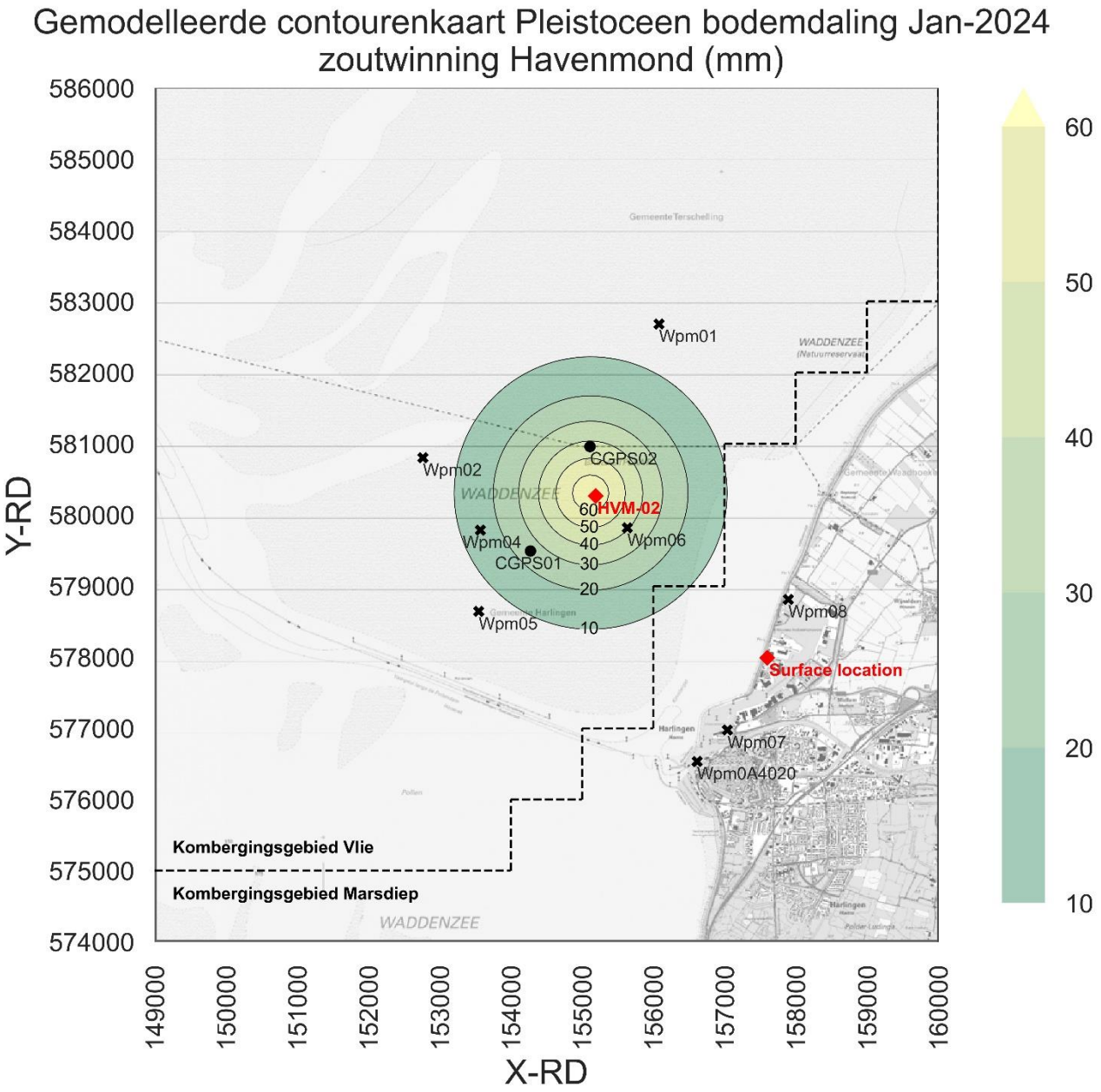
e) Gemeten- en gemodelleerde bodembeweging vergelijking



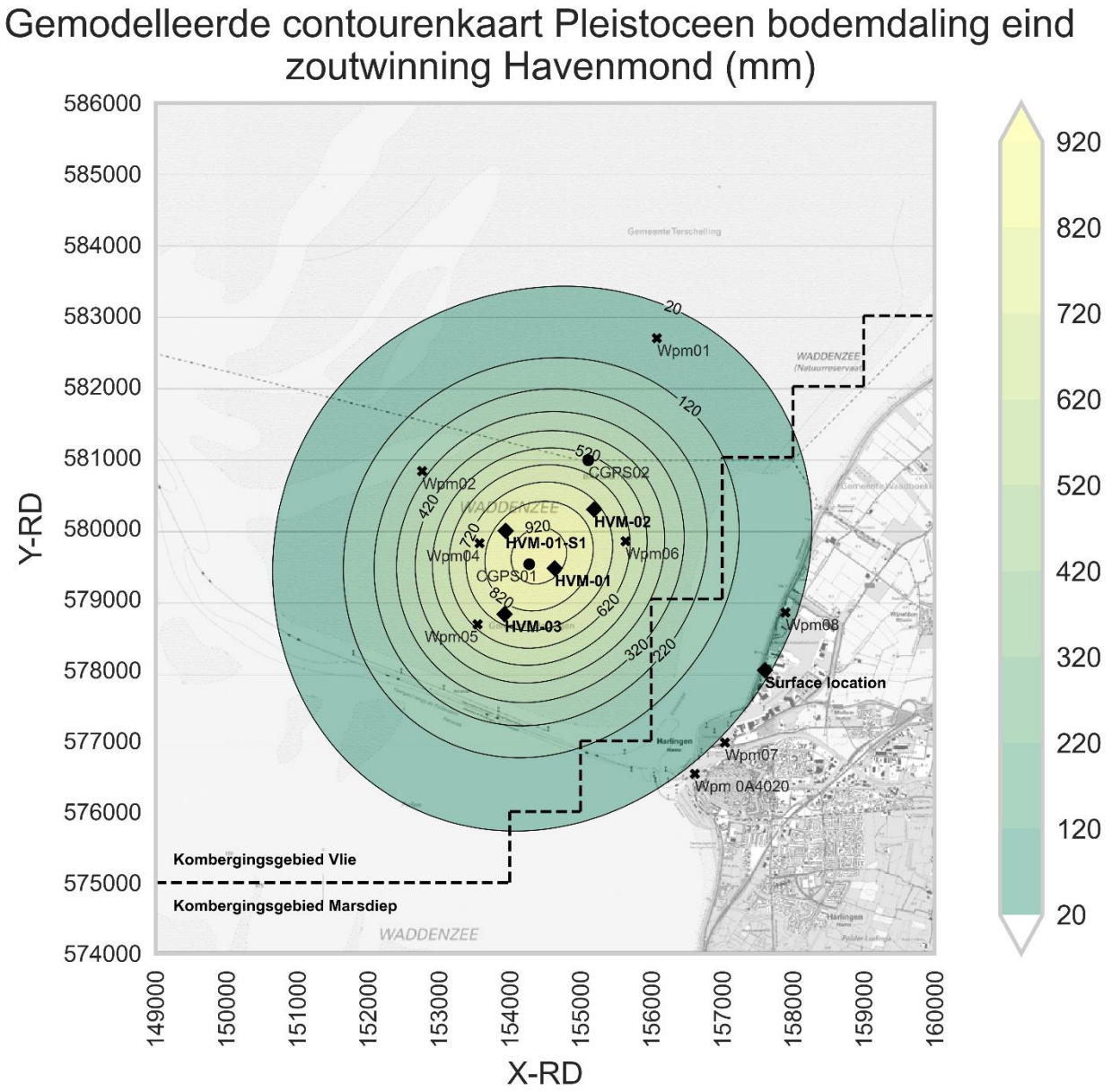
f) Komvorm parameter vergelijking



g) Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling januari 2024



h) Gemodelleerde Pleistocene bodemdaling Havenmond eind zoutwinning



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 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:

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

Volumebalans:

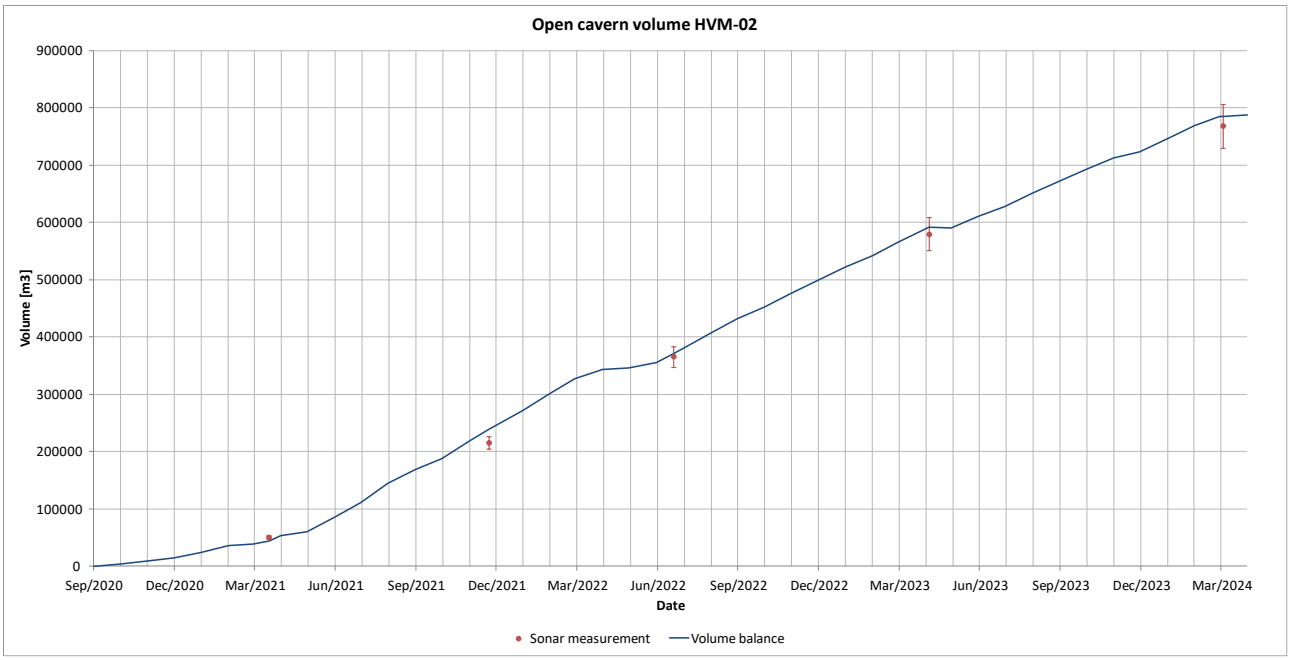
$$V_{cav.open} = \sum \left(\Delta V_{water.in} \cdot \left(1 + \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}}\right) - \Delta V_{pekel.uit} - \Delta V_{water.in} \frac{S_{NaCl}}{\rho_{NaCl}} \vartheta_{onoplosbaar} \varphi\right)$$

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

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

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

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



*Figuur 6: Volumebalans HVM-02 t/m maart 2024. *Sonar 2021 onvolledige meting*