

Bodemdalingsmonitor 2022 **Kustfundament en getijdenbekkens**

Overzicht onderzoek 2018-2021



Bodemdalingsmonitor 2022 Kustfundament en getijdenbekkens
Overzicht onderzoek 2018-2021

Auteur(s)
Marc Hijma

Bodemdalingsmonitor 2022 Kustfundament en getijdenbekkens

Overzicht onderzoek 2018-2021

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Rena Hoogland
Referenties	n.v.t.
Trefwoorden	Bodemdaling, geologie, kust, modelleren, monitoring, GNSS, zoutwinning, gaswinning

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	10-11-2022
Projectnummer	11208035-003
Document ID	11208035-003-ZKS-0003
Pagina's	26
Classificatie	
Status	concept Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Auteur(s)

	Marc Hijma	

Onderstaande tabel is niet voor publicatie

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
0.1	Marc Hijma	Henk Kooi	Bob Hoogendoorn

Samenvatting

In het gehele kustfundament en in de getijdenbekkens vindt bodemdaling plaats en deze draagt bij aan relatieve zeespiegelstijging (de som van absolute zeespiegel- en bodembewegingen). Relatieve zeespiegelstijging leidt tot verhoogde overstromingsrisico's en het is daarom van nationaal belang om relatieve zeespiegelstijging te monitoren en de bijdrage van bodemdaling aan deze stijging te kwantificeren. Bodemdaling binnen het kustfundament en de getijdenbekkens wordt veroorzaakt door geologische bodembewegingen en door menselijk ingrepen, met name door het winnen van gas. In eerdere rapporten zijn de verschillende componenten van beide typen bodemdaling benoemd en hun bijdragen, inclusief onzekerheden, gekwantificeerd (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b; Hijma & Van Onselen, 2019; 2020; Hijma, 2021). Het onderzoek wordt uitgevoerd binnen de *Bodemdalingsmonitor* van het KPP-project 'Beheer en onderhoud van de Nederlandse kust' (BenO Kust).

Onderliggend rapport geeft een samenvattend overzicht van de resultaten van het onderzoek dat de laatste jaren is uitgevoerd binnen de *Bodemdalingsmonitor*. Het geeft de meest actuele stand van zaken omtrent de geologische bodemdaling en de daling door het winnen van delfstoffen. Daarnaast geeft het per beheergebied binnen het kustfundament en de getijdenbekkens de snelheid van bodemdaling en de bijbehorende bodemdalingsvolumes. Het laat zien dat:

- De geologische bodemdaling in Nederland hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door tektonische en glacio-isostatische bodemdaling, waarbij de laatste vorm dominant is. De geologische bodemdaling neemt toe van zuidwest naar noordoost, van ongeveer 2 tot 6 cm/eeuw. Gemiddeld over het aandachtsgebied gaat het om $3,4 \pm 1,7$ mil. m³ bodemdalingsvolume per jaar.
- De bodemdaling door winning in het kustfundament en getijdenbekkens hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door gaswinning. Ten westen van Harlingen is in de Waddenzee recent zoutwinning gestart die uiteindelijk tot meerdere decimeters lokale bodemdaling leidt.
- De komende 30 jaar minder bodemdaling door winning zal optreden dan in de afgelopen 30 jaar, de afname bedraagt ongeveer 12%. De komende 30 jaar bedraagt het gemiddelde bodemdalingsvolume door winning van gas, zoput en olie in het aandachtsgebied $1,3 \pm 0,6$ mil. m³ per jaar, met grote verschillen per deelgebied.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Geologische bodemdaling	7
2.1	Tektonische bodemdaling	7
2.2	Glacio-isostatische bodemdaling	7
2.3	Kaart van geologische bodemdaling	8
3	Bodemdaling door winning	10
3.1	Bodemdaling door winning: laatste 30 jaar	10
3.2	Bodemdaling door winning: komende 30 jaar	10
3.3	Bodemdaling door zoutwinning ten westen van Harlingen	12
4	Bodemdalingsvolumes: een actualisatie	15
5	Conclusies	23
	Referenties	24

1 Inleiding

De zeespiegel langs de gehele Nederlandse kust stijgt en een deel van die stijging wordt veroorzaakt door bodemdaling. De bijdrage van bodemdaling wordt al decennia onderzocht (zie bijvoorbeeld Jelgersma, 1961; Lorenz et al., 1991; Barends et al., 2008), maar sinds 2017 ook binnen het KPP Programma B&O Kust van RWS-WVL¹ waarbij specifiek de bodemdaling van het kustfundament en de getijdenbekkens geanalyseerd wordt (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b; Hijma & Van Onselen, 2019; 2020; Hijma, 2021). Het achterliggende hoofddoel is om onderbouwde berekeningen van het volumeverlies door bodemdaling in deze gebieden te kunnen maken, zodat de hoeveelheden sediment in deze gebieden beter beheerd kunnen worden. Bij het onderzoek naar bodemdaling wordt onderscheid gemaakt tussen geologische bodemdaling (gemiddeld 25% van de totale relatieve zeespiegelstijging) en daling door delfstofwinning.

In 2019 is voor het eerst gepubliceerd over bodemdaling van het kustfundament en de getijdenbekkens onder de noemer van de *Bodemdalingsmonitor*, in analogie met de reeds bestaande *Zeespiegelmonitor* (Baart et al., 2018; in 2023 verschijnt een update van de Zeespiegelmonitor) die zich richt op de actuele zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Tot de jaarlijkse werkzaamheden voor de Bodemdalingsmonitor behoren het integreren van nieuwe ontwikkelingen omtrent dit onderwerp en regelmatig overleg met experts van instituten en universiteiten. Daarnaast worden alle of - afhankelijk van prioriteiten - een aantal van de aanbevelingen uit het voorgaande rapport uitgevoerd. Dit betekent dat elk jaar verschillende onderzoeken en analyses zijn uitgevoerd en gerapporteerd, maar ook dat deze informatie over meerdere rapporten is verspreid. In overleg met de opdrachtgever is daarom gekozen om in 2022 onder andere een rapport te schrijven dat deze informatie samenvat, waar noodzakelijk wel geactualiseerd naar de huidige stand van zaken.

Het voorliggende rapport presenteert in hoofdstuk 2 met een korte toelichting de kaart voor geologische bodemdaling, in hoofdstuk 3 gevolgd door de kaart met bodemdaling door het winnen van delfstoffen. In dit hoofdstuk komt ook het meest recente inzicht omtrent de bodemdaling door zoutwinning bij de Ballastplaat aan bod. Hoofdstuk 4 gaat vervolgens in op de bodemdalingsvolumes die het gevolg zijn van deze twee typen bodemdaling.

In 2022 verschijnt ook een ander rapport (Nougues & Hijma, 2022) binnen de *Bodemdalingsmonitor*, dat rapport gaat specifiek in op het gebruik van GNSS-meetpunten voor het monitoren van bodemdaling.

¹ Kennis Primaire Processen Programma Beheer & Onderhoud Kust van Rijkswaterstaat-Water, verkeer en leefomgeving. Dit programma wordt in een samenwerking tussen RWS-WVL en Deltares uitgevoerd.

2 Geologische bodemdaling

De bijdrage van geologische bodemdaling aan relatieve zeespiegel langs de Nederlandse kust wordt binnen de *Bodemdalingsmonitor* berekend door het sommeren van de tektonische en glacio-isostatische bodembeweging, de belangrijkste componenten van geologische bodemdaling. Hieronder worden deze componenten van geologische bodemdaling kort toegelicht, gevolgd door een kaart met de geologische bodemdaling in Nederland voor een periode van 100 jaar. De gemiddelde snelheid van geologische bodemdaling wordt constant beschouwd op een schaal van eeuwen, dus de geologische bodemdaling in de laatste 100 jaar is identiek aan de geologische bodemdaling in de komende 100 jaar.

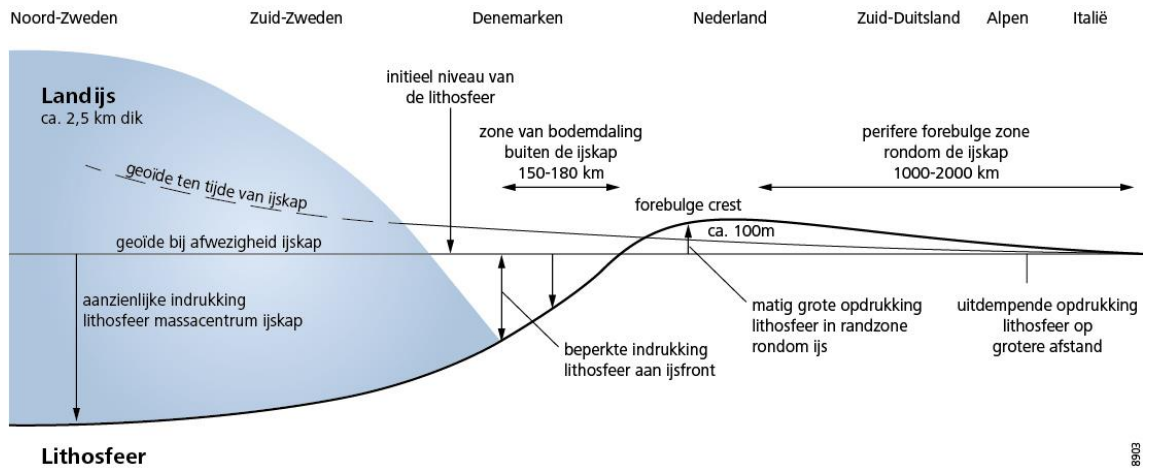
2.1 Tektonische bodemdaling

Tektonische bodemdaling is het gevolg van beweging langs breuken. De kaart uit Kooi et al. (1998) van tektonische bodembeweging vormt de basiskaart voor deze component. Deze toont de gemiddelde tektonische bewegingssnelheid in Nederland voor de afgelopen 2.5 miljoen jaar en aangenomen wordt dat deze snelheid nog steeds representatief is. De snelheden zijn in het algemeen laag, minder dan 1 cm/eeuw en langs de randen van de Nederland gaat het zelfs om een lichte bodemstijging. De onzekerheid rondom de tektonische bodembeweging is lastig te bepalen. Binnen de *Bodemdalingsmonitor* wordt een (arbitraire) onzekerheid van $\pm 50\%$ aangehouden. Meer achtergrond bij tektonische bodemdaling is te vinden in Hijma & Kooi (2018b).

2.2 Glacio-isostatische bodemdaling

Isostasie heeft betrekking op het drijvend-evenwicht van aardplaten. Aardplaten drijven op heet en enigszins vloeibaar (viskeus) gesteente van de aardmantel, vergelijkbaar met het drijven van een hele grote rubberen matras in het zwembad. Als er een gewicht op de matras wordt gelegd, bijvoorbeeld een bal, buigt deze onder invloed van het gewicht lokaal iets door en zakt de matras onder de bal dus in. In een zone daarom heen komt de matras juist iets omhoog en het onderliggende water wordt verplaatst tot er een nieuw evenwicht is. Het evenwicht wordt in dit voorbeeld snel bereikt, omdat het water heel vloeibaar is, snel aan de kant gaat, de bal licht van gewicht is en het gebied dat inzakt klein is. Als het gewicht wordt weggehaald buigt de matras weer terug en stroomt er onder de matras water toe. Hetzelfde principe is van toepassing op aardplaten. Het water moet dan worden vervangen door stroperig/taai mantelgesteente dat heel langzaam stroomt en het gewicht van de bal door dat van grote pakketten sediment (zand en slib), ijskappen en (zee)water.

In Nederland speelt momenteel vooral de isostatische aanpassing aan het verdwijnen van het ijs uit de laatste ijstijd nog een grote rol. Figuur 2-1 laat deze invloed conceptueel zien. De linkerkant van het figuur toont de 2.5 km dikke ijskap in Scandinavië en hoe deze de lithosfeer indrukt. Op zekere afstand van de ijskap komt de lithosfeer juist omhoog door de elasticiteit van de lithosfeer. Deze opdrukking wordt in het Engels de *forebulge* genoemd en Nederland lag tijdens de piek van de laatste ijstijd dichtbij het hoogste punt van deze *forebulge*. De kam van de *forebulge* wordt vaak net ten noorden van Nederland gemodelleerd en het grootste gedeelte van Nederland lag daarmee op de zuidflank van de *forebulge*. Na het verdwijnen van de ijskap veert de lithosfeer ter plaatse van de ijskap weer terug en zakt de *forebulge* in (zie bijvoorbeeld Vink et al., 2007). Omdat de mantel sterk viskeus is duurt dit aanpassingsproces duizenden jaren en speelt dit momenteel nog steeds een rol.



Figuur 2-1 Voorbeeld van de werking van glacio-isostasie. Onder de ijskap wordt de lithosfeer in de mantel gedrukt en mantelmateriaal stroomt zijwaarts en duwt daar de lithosfeer omhoog. De ontstane bult wordt de forebulge genoemd. Tijdens en na het afsmelten van de ijskap draait dit proces om en stort de forebulge in en veert de lithosfeer ter plaatse van de voormalige ijskap omhoog (uit Stouthamer et al., 2020).

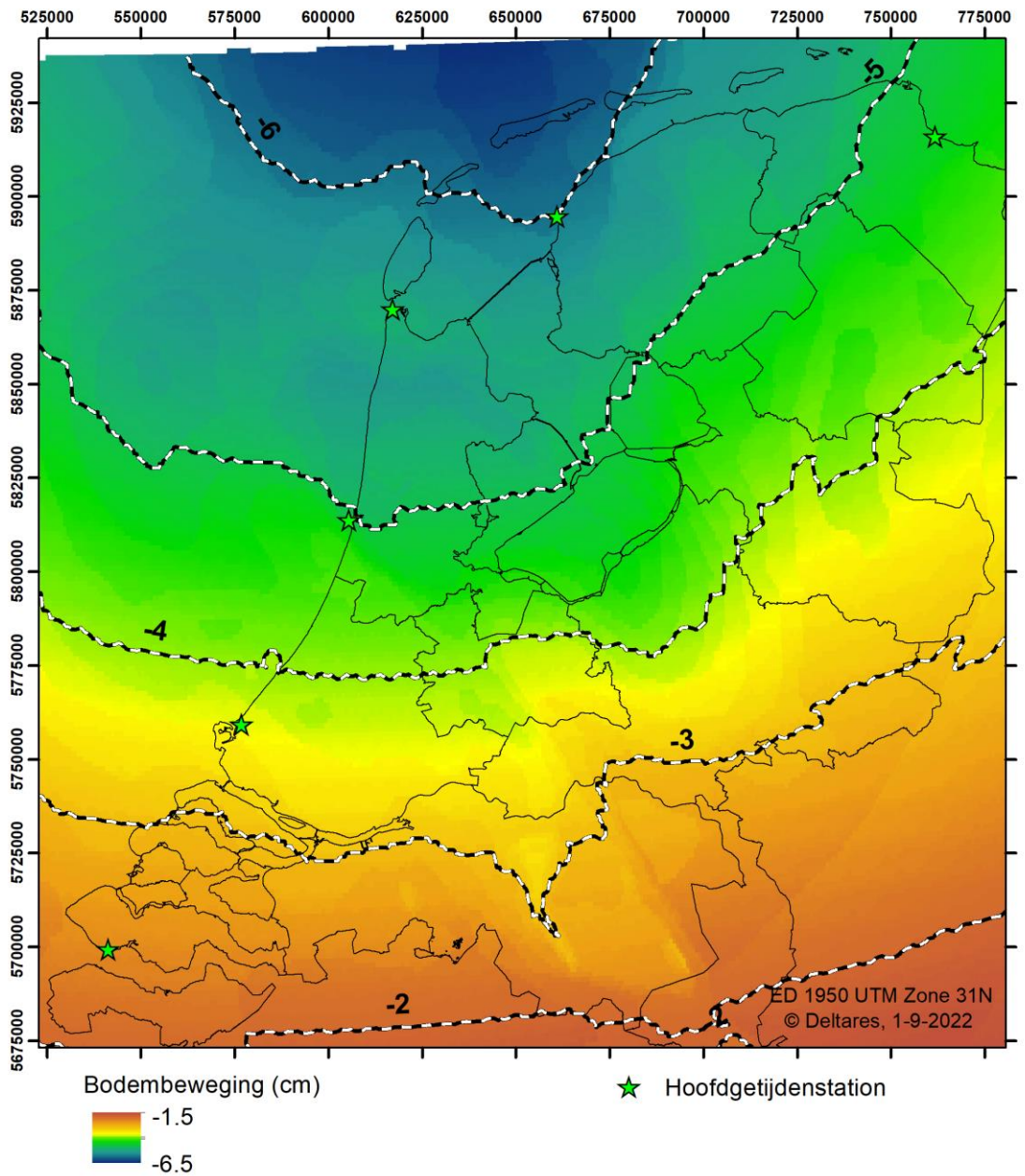
De modellen die veranderingen in het isostatisch evenwicht door water en ijs modelleren worden meestal aangeduid met glacio-isostatische aanpassingsmodellen oftewel GIA-modellen. Er zijn tal van GIA-modellen beschikbaar, allemaal met hun eigen configuratie van eigenschappen van de lithosfeer en de mantel en met hun eigen ijskapmodellen. Binnen de *Bodemdalingsmonitor* wordt samengewerkt met verschillende partners om de modellen voor Nederland steeds te verbeteren. Op dit moment wordt gebruikt gemaakt van een modeluitkomst van het NIOZ (verkregen via Paolo Stocchi). De onzekerheid rondom de gebruikte GIA-basiskaart kan op dit moment alleen geschat worden. In Hijma & Kooi (2018a) is de onzekerheid omtrent GIA meegenomen door een GIA-grafiek te presenteren die het bereik aan uitkomsten gaf van verschillende GIA-modellen. De verschillen tussen de modellen lieten zien dat het, net als bij tektonische bodemdaling, verstandig is om rekening te houden met een onzekerheid (variatiecoëfficiënt) van 50%.

Bovenstaande isostatische processen zijn nog een gevolg van de laatste ijstijd, maar ook tegenwoordig vinden er veranderingen plaats in de verdeling van water en ijs. Hierbij heeft met name het afsmelten van Groenland mogelijk een relevant isostatisch effect op Nederland. In 2020 is geconcludeerd dat het meenemen van deze recente isostatische effecten niet leidt tot een betere match tussen de gemodelleerde bodemdaling en de gemeten bodemdaling op basis van GNSS-stations. Vooral nog wordt dit effect daarom niet meegenomen.

2.3 Kaart van geologische bodemdaling

Figuur 2-2 geeft de meest recente kaart van geologische bodemdaling binnen de *Bodemdalingsmonitor*. Er is een duidelijke trend zichtbaar van zuid naar noord, met minder bodemdaling in het zuiden (rond 2 cm/eeuw) en meer in het noorden (rond 6 cm/eeuw). Deze trend wordt bepaald door glacio-isostatische bodemdaling, terwijl de meer lokale/regionale afwijkingen van de hoofdtrend het gevolg zijn van tektonische bodembewegingen langs breuken.

Gemodelleerde geologische bodembeweging per 100 jaar



Figuur 2-2 Gemodelleerde geologische bodemdaling voor een periode van 100 jaar. Voor geheel Nederland wordt bodemdaling gemodelleerd, toenemend van zuid naar noord van 2 tot 6 cm/eeuw. De zwart-witte lijnen zijn contourlijnen van geologische bodemdaling.

3 Bodemdaling door winning

In de *Bodemdalingsmonitor*-rapporten van 2018 zijn overzichten gegeven van de bodemdaling als gevolg van de winning van gas, olie, zout en water (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b). De bodemdaling door het winnen van water bleek niet relevant voor het kustfundament en is daarna niet meer meegenomen. In het rapport van 2021 is een actualisatie gegeven voor de verwachte bodemdaling tot 2050 vanwege het beschikbaar komen van nieuwe modelresultaten voor verschillende gasvelden (Groningen, Zuidwal, Bergen, Ameland) en de start van de zoutwinning bij de Ballastplaat ten westen van Harlingen. De historische bodemdaling voor winning bleef hierbij ongewijzigd. Hieronder worden eerst de meest recente kaarten voor de bodemdaling voor winning in de laatste 100 jaar en komende 30 gepresenteerd. Daarna wordt kort ingegaan op de situatie bij de Ballastplaat.

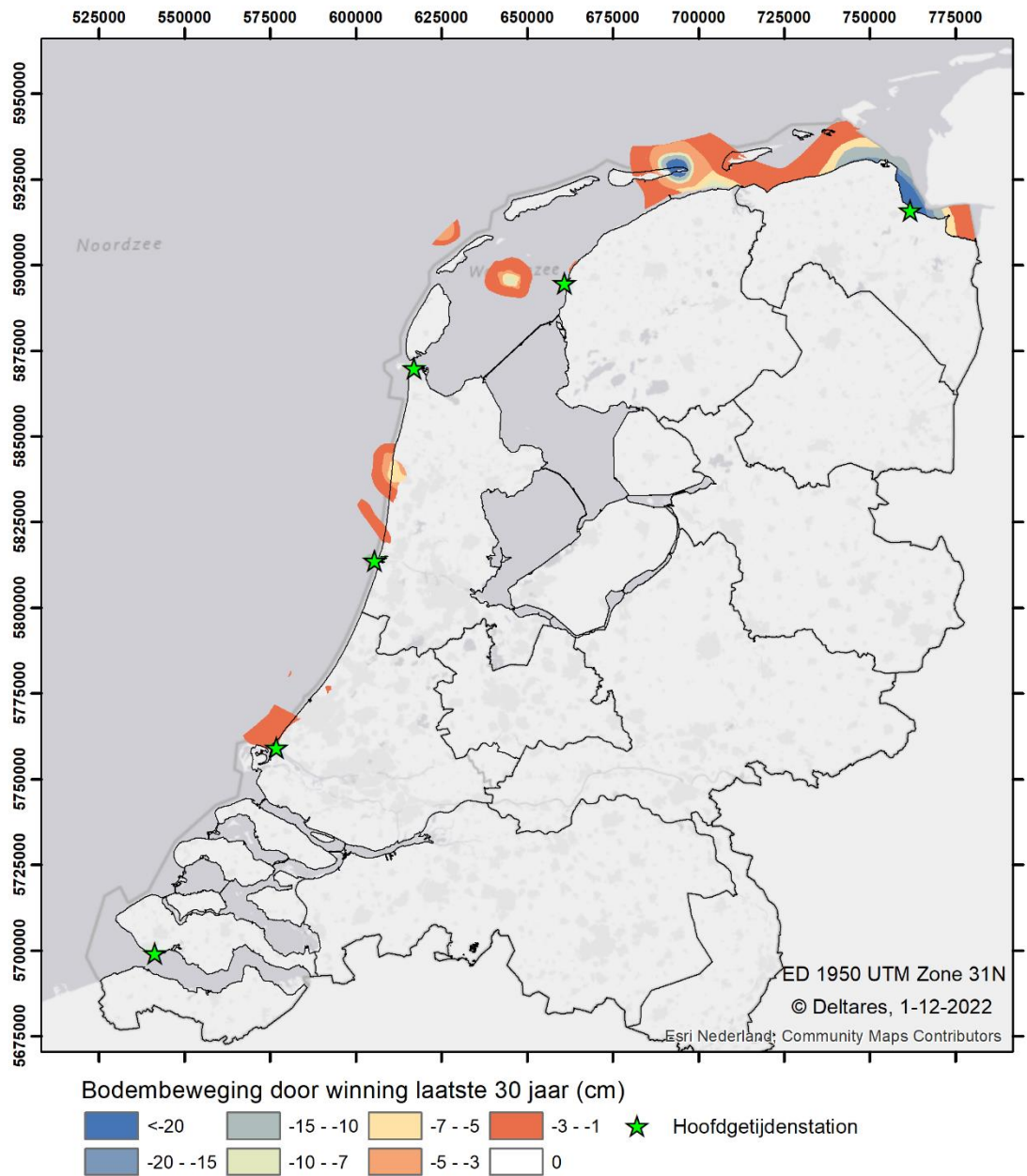
3.1 Bodemdaling door winning: laatste 30 jaar

In Hijma & Kooi (2018b) is deze kaart voor het eerst getoond en deze wordt hier ongewijzigd overgenomen (Figuur 3-1). In lijn met Hijma en Kooi (2018a) wordt de onzekerheid (variatiecoëfficiënt) rondom de bodemdalingsgetallen voor het historisch verleden op $\pm 25\%$ geschat. Ook al is deze kaart oorspronkelijk opgesteld voor de periode 1987-2017, de kaart wordt ook representatief geacht voor de laatste 30 jaar, omdat gewerkt is met een legenda-indeling in klassen en ook omdat de bodemdaling door winning in de laatste 5 jaar grotendeels binnen de spreiding van $\pm 25\%$ valt. Door de start van de zoutwinning bij de Ballastplaat zal deze kaart zeer binnenkort niet meer representatief zijn voor de laatste 30 jaar en zal een nieuwe kaart opgesteld moeten worden.

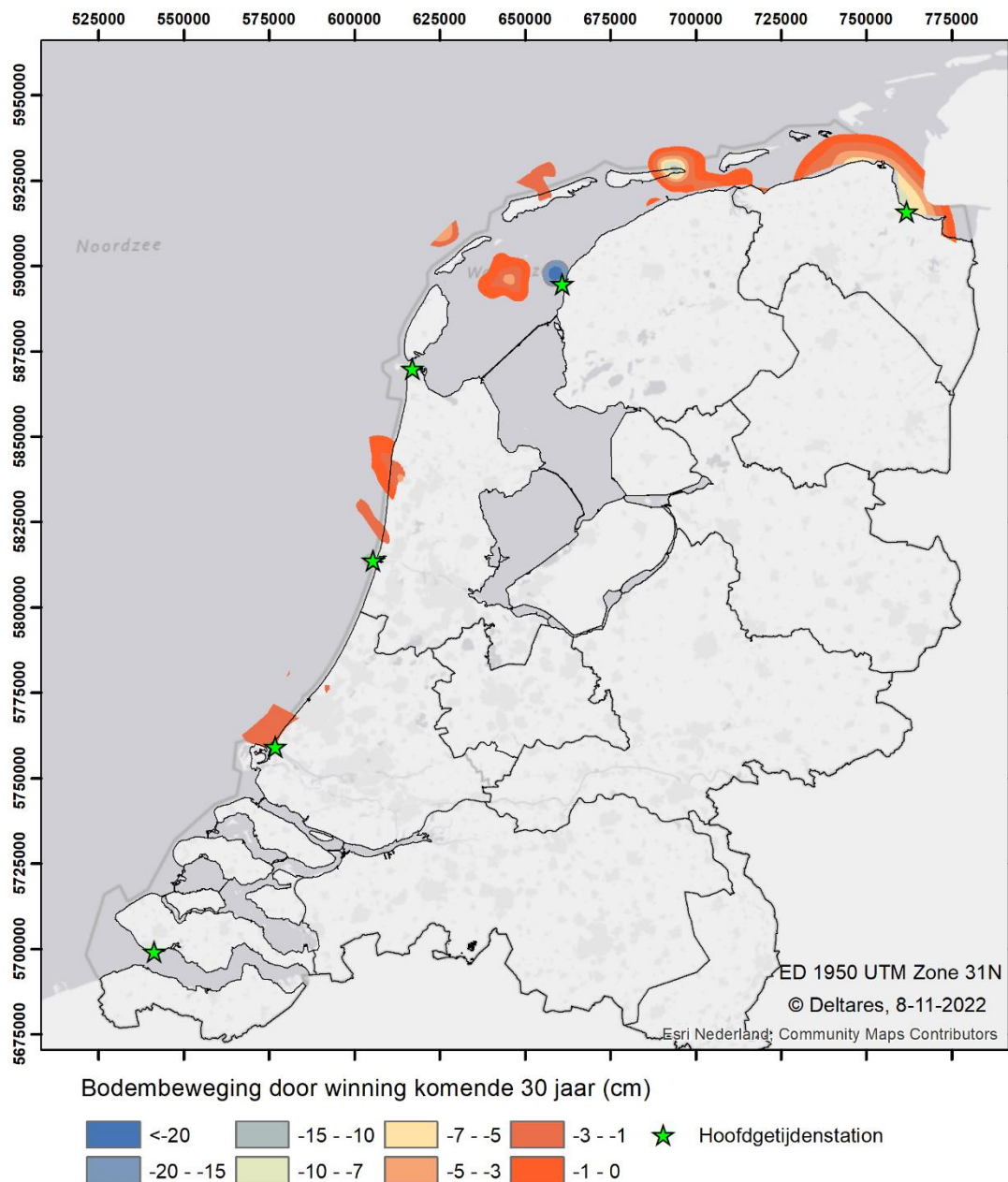
3.2 Bodemdaling door winning: komende 30 jaar

In Hijma (2021) zijn voor verschillende regio's van Nederland nieuwe kaarten gepubliceerd voor ruwweg de komende 30, maar niet voor het gehele kustfundament en de getijdenbekkens. Figuur 3-2 doet dit wel en laat zien dat de bodemdaling in de komende 30 jaar in het algemeen minder zal zijn dan in de afgelopen 30 jaar. Dit is een gevolg van verminderde gaswinning, waardoor op de meeste locaties nog slechts enkele centimeters bodemdaling verwacht wordt. Rondom Ameland en het Groninger gasveld kan nog wel tot rond 10 cm aanvullende bodemdaling optreden. De onzekerheid rondom deze getallen is groter dan voor de afgelopen 30 jaar, omdat deze getallen alleen gebaseerd zijn op modellering en omdat winningsplannen nog kunnen wijzigen. In lijn met Hijma en Kooi (2018a) wordt de onzekerheid (variatiecoëfficiënt) rondom de bodemdalingsgetallen voor de komende 30 jaar daarom op $\pm 50\%$ geschat.

Ten westen van Harlingen zal juist veel meer bodemdaling gaan optreden als gevolg van de zoutwinning bij de Ballastplaat. In de volgende paragraaf wordt daar in meer detail op ingegaan.



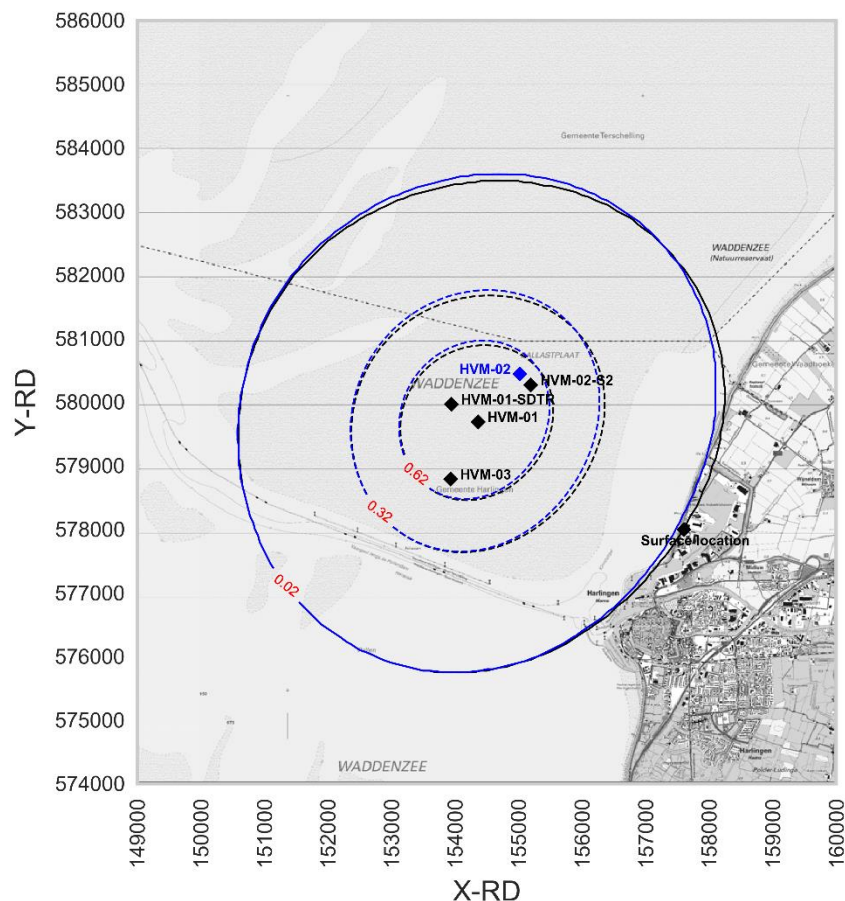
Figuur 3-1 Bodembeweging door winning van gas, olie en zout in de laatste 30 jaar.



Figuur 3-2 Bodembeweging door winning van gas, olie en zout voor de komende 30 jaar.

3.3 Bodemdaling door zoutwinning ten westen van Harlingen

Ten westen van Harlingen, onder de Ballastplaat in winningsgebied Havenmond, wordt sinds 7 september 2020 zout gewonnen. In totaal zal over een periode van ongeveer 40 jaar 32 Mton (steen)zout gewonnen gaan worden uit vier cavernes. Hierbij zal veel bodemdaling optreden, naar verwachting tot 92 cm in het centrum van de bodemdalingsschotel die reikt tot aan Harlingen (Figuur 3-3) en een bodemdalingsvolume heeft van $12,81 \pm 6,41$ mln.m³ (Hijma, 2021).

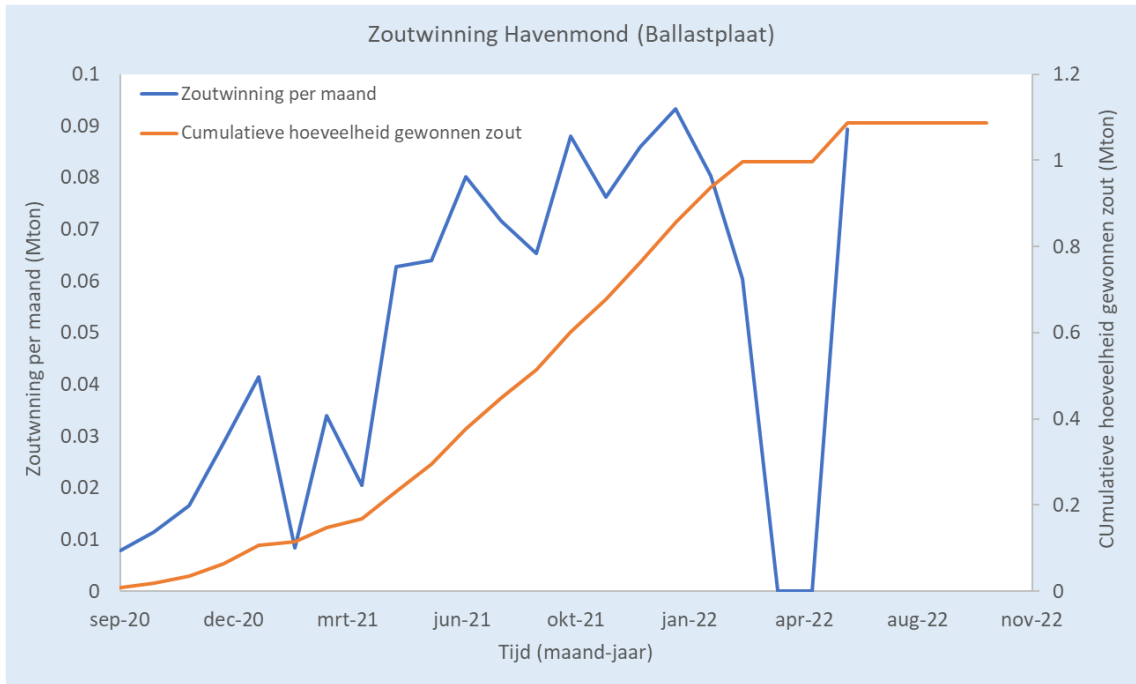


Figuur 3-3 Verwachte bodemdaling door de winning van zout ten westen van Harlingen (Bron: email Jeroen Jansen, Esco-Salt).

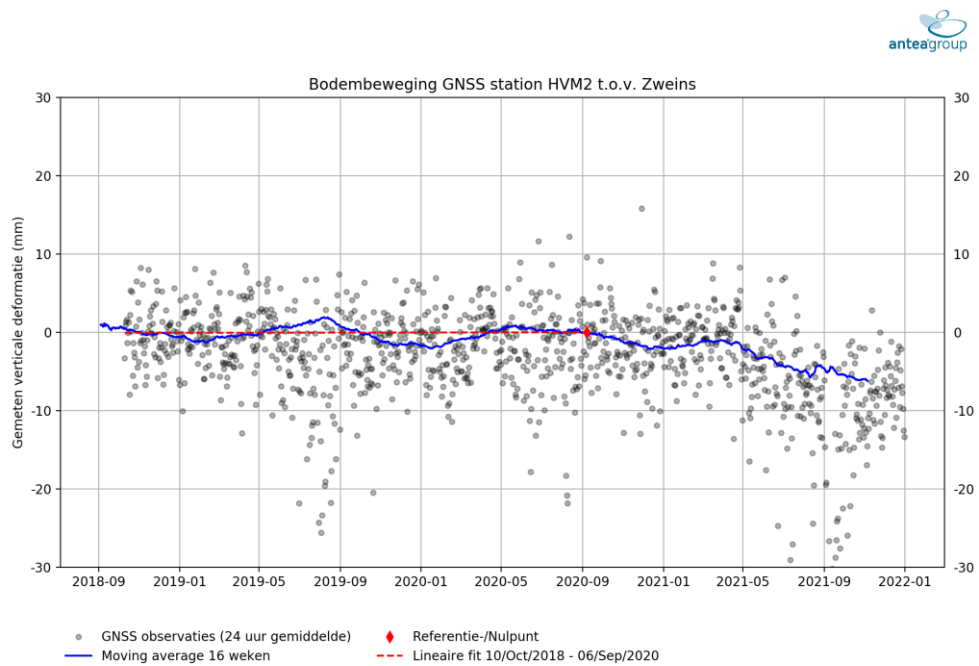
Volgens modellen (Cleveringa & Grasmeijer, 2010) zal deze bodemdaling gecompenseerd worden door sedimentatie en zullen er geen morfologische veranderingen optreden als gevolg van de winning. Deze veranderingen worden jaarlijks gemonitord, maar omdat de zoutwinning pas net gestart is zullen eventuele effecten nog niet zichtbaar zijn. In de periode tot eind 2021 zijn in ieder geval geen afwijkende morfologische veranderingen opgetreden (Arcadis, 2022).

Sinds september 2020 is de productie geleidelijk toegenomen tot circa 0,08-0,09 Mton per maand (Figuur 3-4). Er is nu in totaal iets meer dan 1 Mton gewonnen, er volgt dus nog 31 Mton. De bodemdaling die dit veroorzaakt leidt momenteel dus niet tot morfologische veranderingen aan het oppervlak, maar is wel meetbaar middels twee permanente GNSS-stations die gefundeerd staan in Pleistocene afzettingen binnen de dalingschotel (tot ongeveer -25 m NAP). Deze stations, in combinatie met GNSS-metingen op het wad en waterpasmetingen, worden jaarlijks gebruikt om de mate van bodemdaling vast te stellen. De stations zijn ruim voor de start van de zoutwinning geïnstalleerd, zodat het mogelijk is om de bodemdalingssnelheid vóór en ná de start van de winning te analyseren.

De permanente stations laten duidelijk de bodemdaling door zoutwinning zien: in de periode voor de zoutwinning waren de stations nagenoeg stabiel, terwijl sinds de bodemdaling de stations dalen met snelheden van 2,5-4,5 mm/jaar oftewel 25-45 cm/eeuw (Figuur 3-5). De verwachte geologische bodemdaling is 6 cm/eeuw, dus de snelheid van bodemdaling is 4-7,5 keer toegenomen.



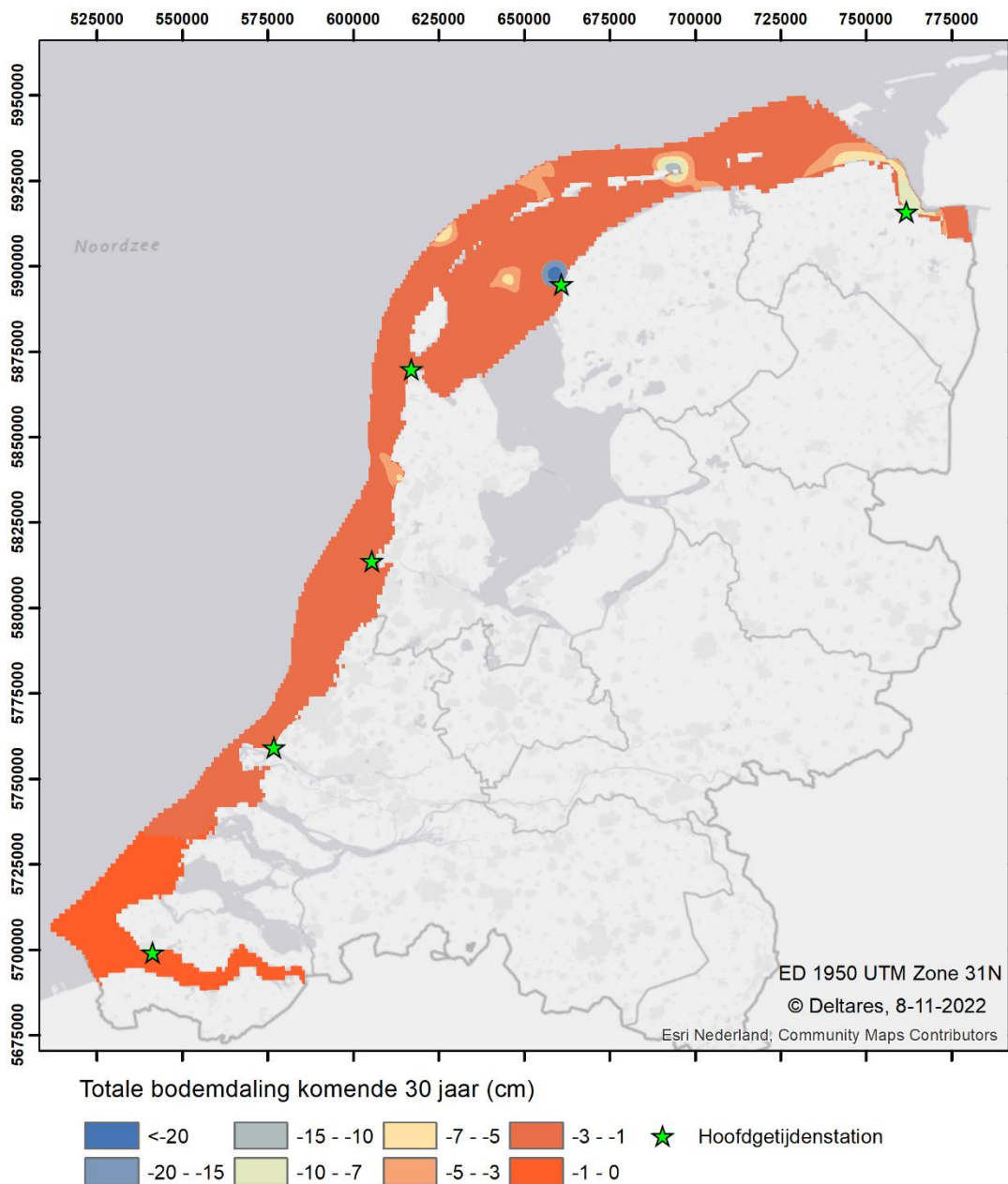
Figuur 3-4 Productiecijfers van de zoutwinning bij de Ballastplaat (Cijfers verkregen via NLOG).



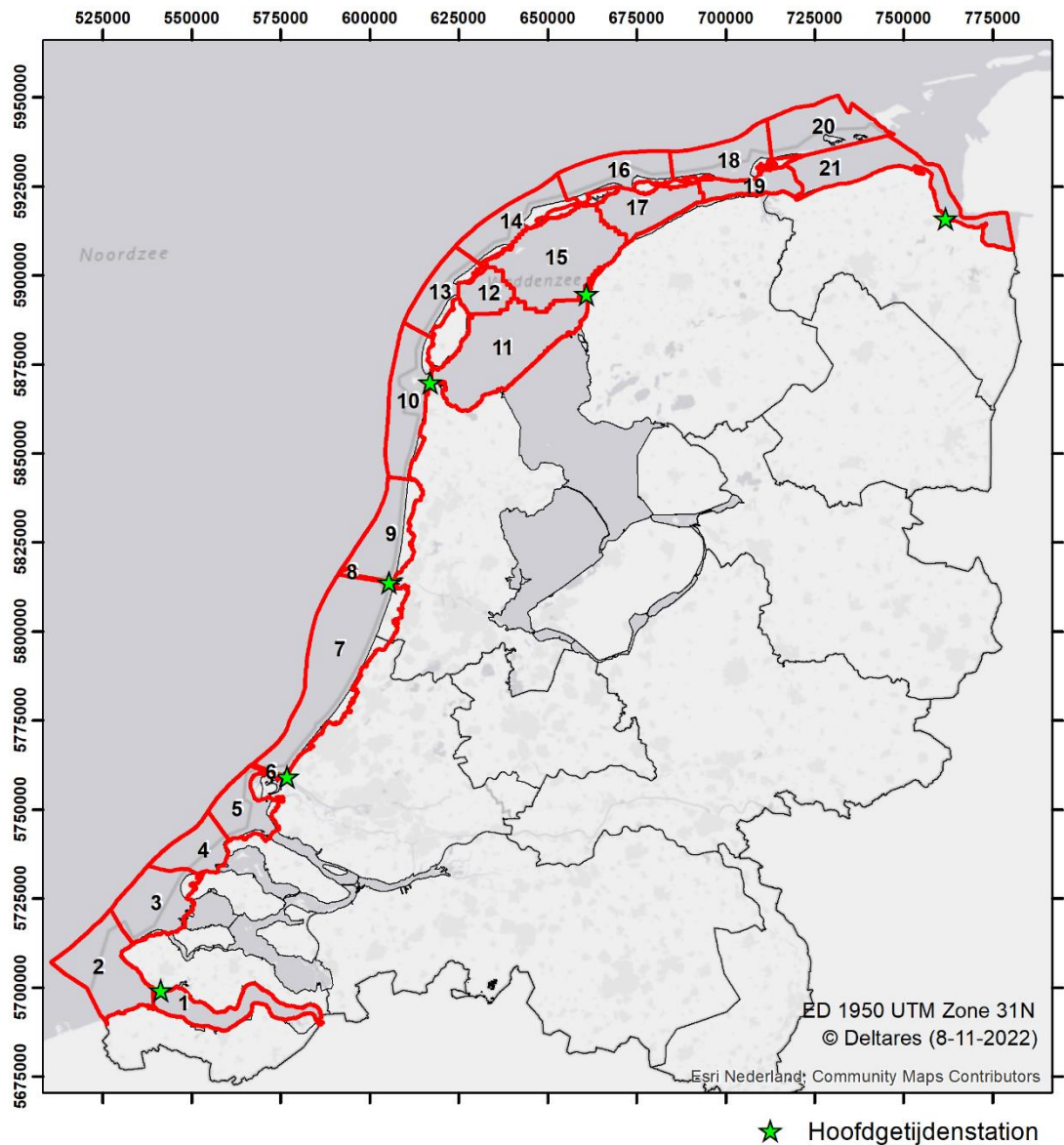
Figuur 3-5 Bodembeweging GNSS station HVM2 (Antea Group, 2022).

4 Bodemdalingenvolumes: een actualisatie

In eerdere rapporten zijn per kustdeelsysteem de bodemdalingenvolumes gegeven, zowel in tabellen als in kaartvorm. De volumes zijn hierbij opgesplitst naar volumes als gevolg van geologische bodemdaling en als gevolg van delfstofwinning. Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van de meest recente tabellen en kaarten. Hieronder wordt eerst een kaart getoond met de totale bodemdaling in het kustfundament, feitelijk een optelsom van de geologische bodemdaling en de daling door winning (Figuur 4-1). Vervolgens wordt ingegaan op de getallen per deelgebied (Figuur 4-2).

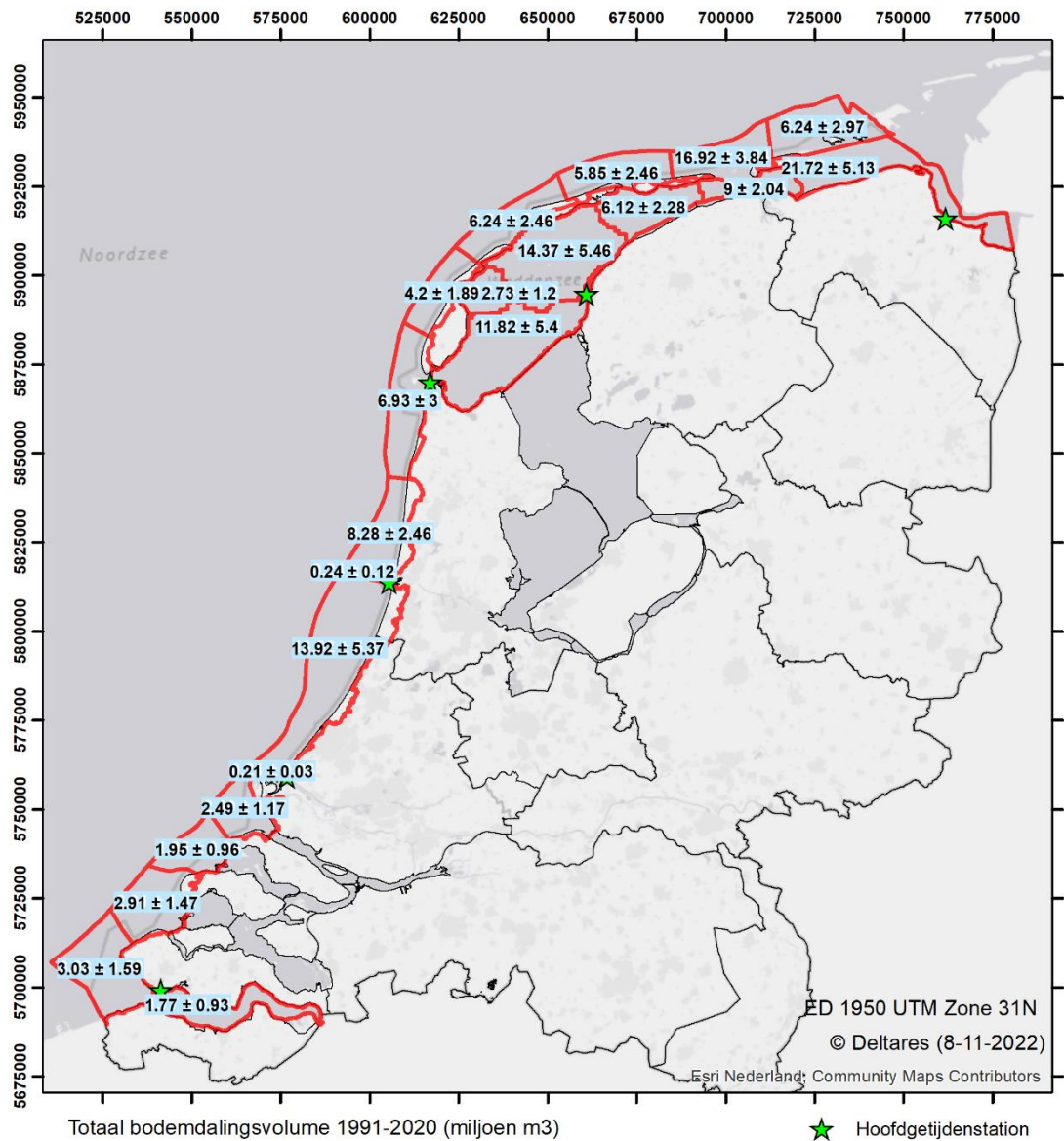


Figuur 4-1 Totale bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens voor de komende 30 jaar als gevolg van geologische bodemdaling en daling door het winnen van delfstoffen.



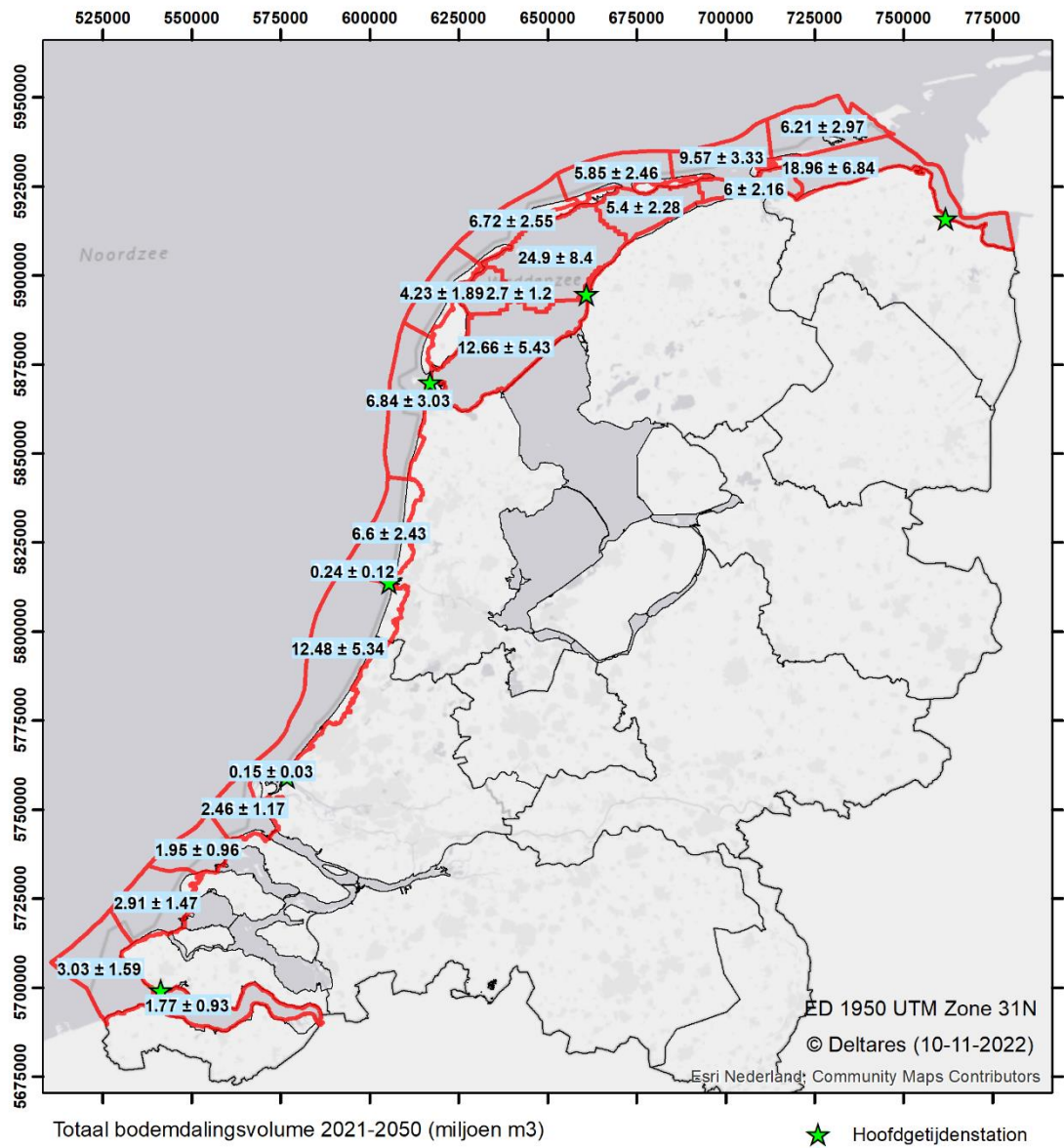
Figuur 4-2 Kaart met de deelgebieden voor kustonderhoud, zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat. Deze nummering wordt gebruikt in onderstaande tabellen, waar ook de naam van elk deelgebied getoond wordt.

Figuur 4-3 toont de totale bodemdalingsvolumes voor de afgelopen 30 jaar, dit omvat dus zowel geologische bodemdaling als bodemdaling door winning. De deelsystemen verschillen sterk in grootte, waardoor een onderlinge vergelijking van de volumes geen direct relevante informatie geeft over de snelheid van bodemdaling in de gebieden. De bodemdalingen nemen in het algemeen toe richting het noorden, dit komt doordat de geologische bodemdaling in het noorden sterker is. De grotere volumes in het noorden worden verder veroorzaakt door de gasvelden Zuidwal, Ameland en Groningen.



Figuur 4-3 Het totale opgetreden bodemdalingsvolume per deelgebied in de laatste 30 jaar

Figuur 4-4 laat de totale bodemdalingsvolumes zien voor de komende 30 jaar. Het geologische bodemdalingsvolume is voor deze periode identiek aan die van 1991-2020 en verschillen tussen beide kaarten komen door verschillen in bodemdaling door winning. In het algemeen is er een behoorlijke afname waarneembaar in het totale volume ten opzichte van de afgelopen 30 jaar, doordat de grootste daling door gaswinning in veel gebieden achter de rug is. Nabij Terschelling wordt een kleine toename verwacht, maar de grootste toename vindt plaats in deelgebied 15 (Vlie binnen) waar vorig jaar gestart is met zoutwinning en veel bodemdaling verwacht wordt. De onzekerheden zijn wel fors groter dan voor de laatste 30 jaar, omdat de reeds opgetreden daling door winning redelijk goed bekend is (onzekerheid van $\pm 25\%$), terwijl de nog komende bodemdaling door winning uiteraard minder goed bekend is (onzekerheid van $\pm 50\%$).



Figuur 4-4 Het totale verwachte bodemdalingenvolume per deelgebied in de komende 30 jaar.

Onderstaande tabellen geven per deelgebied de uitgesplitste bodemdalingsgetallen. De eerste twee tabellen geven per deelgebied in cm de daling door tektoniek, isostasie en winning, maar ook de gemiddelde bodembewegingsnelheid per jaar. De daarop volgende tabellen laten de bodemdalingsvolumes zien per deelgebied, uitgesplitst naar de bijdrage van geologische bodemdaling en daling door winning.

Tabel 4.1 Bodembewegingsgetallen voor de deelgebieden voor de periode 1991-2020. De eerste drie kolommen geven de beweging per aspect in deze periode, de laatste kolom de snelheid van de totale bodemweging per jaar in deze periode.

Deelgebied	Gemiddelde tektonische bodembeweging (cm)	Gemiddelde GIA-bodem-beweging (cm)	Gemiddelde bodembeweging door winning (cm)	Gemiddelde bodembewegings snelheid (cm/yr)
1991-2020				
Westerschelde (1)	0.02	-0.72	0.00	-0.02
Westerschelde delta (2)	0.03	-0.75	0.00	-0.02
Oosterschelde delta (3)	0.01	-0.84	0.00	-0.03
Grevelingen delta (4)	-0.01	-0.91	0.00	-0.03
Haringvliet delta (5)	-0.04	-0.98	-0.03	-0.03
Maasgeul (6)	0.00	-0.86	-1.72	-0.09
Zuid-Holland (7)	-0.10	-1.18	-0.27	-0.05
IJgeul (8)	-0.19	-1.30	0.00	-0.05
Noord-Holland (9)	-0.21	-1.34	-0.84	-0.08
Zeegat van Texel (10)	-0.14	-1.50	-0.10	-0.06
Marsdiep binnen (11)	-0.13	-1.56	-0.02	-0.06
Eierlandse Gat binnen (12)	-0.16	-1.63	-0.06	-0.06
Eierlandse Gat (13)	-0.13	-1.62	-0.06	-0.06
Vlietroom (14)	-0.21	-1.67	-0.26	-0.07
Vlie binnen (15)	-0.19	-1.64	-0.36	-0.07
Amelander Zeegat (16)	-0.19	-1.70	-0.16	-0.07
Amelander Zeegat binnen (17)	-0.12	-1.65	-0.46	-0.07
Friesche Zeegat (18)	-0.05	-1.65	-4.08	-0.19
Friesche Zeegat binnen (19)	-0.04	-1.62	-4.14	-0.19
Eems Dollard (20)	-0.04	-1.61	-0.04	-0.06
Eems Dollard binnen (21)	-0.01	-1.52	-2.95	-0.15

Tabel 4.2 Bodembewegingsgetallen voor de deelgebieden voor de periode 2021-2050. De eerste drie kolommen geven de beweging per aspect in deze periode, de laatste kolom de snelheid van de totale bodemweging per jaar in deze periode.

Deelgebied	Gemiddelde tektonische bodembeweging (cm)	Gemiddelde GIA-bodem-beweging (cm)	Gemiddelde bodembeweging door winning (cm)	Gemiddelde bodembewegings -snelheid (cm/yr)
2021-2050				
Westerschelde (1)	0.02	-0.72	0.00	-0.02
Westerschelde delta (2)	0.03	-0.75	0.00	-0.02
Oosterschelde delta (3)	0.01	-0.84	0.00	-0.03
Grevelingen delta (4)	-0.01	-0.91	0.00	-0.03
Haringvliet delta (5)	-0.04	-0.98	-0.01	-0.03
Maasgeul (6)	0.00	-0.86	-0.86	-0.06
Zuid-Holland (7)	-0.10	-1.18	-0.11	-0.05
IJgeul (8)	-0.19	-1.30	0.00	-0.05
Noord-Holland (9)	-0.21	-1.34	-0.36	-0.06
Zeegat van Texel (10)	-0.14	-1.50	-0.08	-0.06
Marsdiep binnen (11)	-0.13	-1.56	-0.14	-0.06
Eierlandse Gat binnen (12)	-0.16	-1.63	-0.04	-0.06
Eierlandse Gat (13)	-0.13	-1.62	-0.06	-0.06
Vlietroom (14)	-0.21	-1.67	-0.42	-0.08
Vlie binnen (15)	-0.19	-1.64	-1.96	-0.13
Amelander Zeegat (16)	-0.19	-1.70	-0.15	-0.07
Amelander Zeegat binnen (17)	-0.12	-1.65	-0.21	-0.07
Friesche Zeegat (18)	-0.05	-1.65	-1.57	-0.11
Friesche Zeegat binnen (19)	-0.04	-1.62	-2.26	-0.13
Eems Dollard (20)	-0.04	-1.61	-0.03	-0.06
Eems Dollard binnen (21)	-0.01	-1.52	-2.38	-0.13

Tabel 4.3 Bodemdalingenvolumes voor de deelgebieden voor de periode 1991-2020

Deelgebied	Geologisch bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³)	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (mln.m ³)	Totaal bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³)
1991-2020			
Westerschelde (1)	1.77 ± 0.93	0 ± 0	1.77 ± 0.93
Westerschelde delta (2)	3.03 ± 1.59	0 ± 0	3.03 ± 1.59
Oosterschelde delta (3)	2.91 ± 1.47	0 ± 0	2.91 ± 1.47
Grevelingen delta (4)	1.95 ± 0.96	0 ± 0	1.95 ± 0.96
Haringvliet delta (5)	2.43 ± 1.17	0.06 ± 0.02	2.49 ± 1.17
Maasgeul (6)	0.06 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.21 ± 0.03
Zuid-Holland (7)	11.52 ± 5.34	2.43 ± 0.61	13.92 ± 5.37
IJgeul (8)	0.24 ± 0.12	0 ± 0	0.24 ± 0.12
Noord-Holland (9)	5.37 ± 2.34	2.91 ± 0.73	8.28 ± 2.46
Zeegat van Texel (10)	6.54 ± 3.00	0.39 ± 0.1	6.93 ± 3
Marsdiep binnen (11)	11.67 ± 5.4	0.15 ± 0.03	11.82 ± 5.4
Eierlandse Gat binnen (12)	2.64 ± 1.20	0.09 ± 0.02	2.73 ± 1.2
Eierlandse Gat (13)	4.08 ± 1.89	0.15 ± 0.04	4.20 ± 1.89
Vlietroom (14)	5.49 ± 2.46	0.75 ± 0.19	6.24 ± 2.46
Vlie binnen (15)	12.03 ± 5.43	2.34 ± 0.59	14.37 ± 5.46
Amelander Zeegat (16)	5.43 ± 2.46	0.45 ± 0.11	5.85 ± 2.46
Amelander Zeegat binnen (17)	4.83 ± 2.25	1.29 ± 0.32	6.12 ± 2.28
Friesche Zeegat (18)	4.98 ± 2.43	11.94 ± 2.99	16.92 ± 3.84
Friesche Zeegat binnen (19)	2.58 ± 1.26	6.42 ± 1.61	9.00 ± 2.04
Eems Dollard (20)	6.09 ± 2.97	0.15 ± 0.04	6.24 ± 2.97
Eems Dollard binnen (21)	7.41 ± 3.69	14.31 ± 3.58	21.72 ± 5.13
Totaal	103.08 ± 12.71	43.89 ± 5.07	146.94 ± 13.68

Tabel 4.4 Bodemdalingenvolumes voor de deelgebieden voor de periode 2021-2050.

Deelgebied	Geologisch bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³)	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (mln.m ³)	Totaal bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³)
2021-2050			
Westerschelde (1)	1.77 ± 0.93	0 ± 0	1.77 ± 0.93
Westerschelde delta (2)	3.03 ± 1.59	0 ± 0	3.03 ± 1.59
Oosterschelde delta (3)	2.91 ± 1.47	0 ± 0	2.91 ± 1.47
Grevelingen delta (4)	1.95 ± 0.96	0 ± 0	1.95 ± 0.96
Haringvliet delta (5)	2.43 ± 1.17	0.03 ± 0.03	2.46 ± 1.17
Maasgeul (6)	0.06 ± 0.03	0.09 ± 0.04	0.15 ± 0.03
Zuid-Holland (7)	11.52 ± 5.34	0.96 ± 0.48	12.48 ± 5.34
IJgeul (8)	0.24 ± 0.12	0 ± 0	0.24 ± 0.12
Noord-Holland (9)	5.37 ± 2.34	1.23 ± 0.63	6.60 ± 2.43
Zeegat van Texel (10)	6.54 ± 3.00	0.3 ± 0.15	6.84 ± 3.03
Marsdiep binnen (11)	11.67 ± 5.40	0.99 ± 0.51	12.66 ± 5.43
Eierlandse Gat binnen (12)	2.64 ± 1.20	0.06 ± 0.03	2.70 ± 1.20
Eierlandse Gat (13)	4.08 ± 1.89	0.15 ± 0.09	4.23 ± 1.89
Vlietroom (14)	5.49 ± 2.46	1.23 ± 0.63	6.72 ± 2.55
Vlie binnen (15)	12.03 ± 5.43	12.87 ± 6.45	24.9 ± 8.40
Amelander Zeegat (16)	5.43 ± 2.46	0.42 ± 0.21	5.85 ± 2.46
Amelander Zeegat binnen (17)	4.83 ± 2.25	0.57 ± 0.30	5.40 ± 2.28
Friesche Zeegat (18)	4.98 ± 2.43	4.59 ± 2.31	9.57 ± 3.33
Friesche Zeegat binnen (19)	2.58 ± 1.26	3.42 ± 1.77	6.0 ± 2.16
Eems Dollard (20)	6.09 ± 2.97	0.12 ± 0.06	6.21 ± 2.97
Eems Dollard binnen (21)	7.41 ± 3.69	11.55 ± 5.79	18.96 ± 6.84
Totaal	103.08 ± 12.71	38.67 ± 9.22	141.63 ± 15.67

De volgende twee tabellen geven per deelgebied het bodemdalingsvolume per jaar, uitgesplitst naar geologische bodemdaling, daling door winning en de totale bodemdaling. Ook maken de tabellen onderscheid in de volumes voor de getijdenbekkens en het kustfundament.

Tabel 4.5 Jaarlijks gemiddelde bodemdalingsvolumes voor de periode 1991-2020

Gebied	Geologisch bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³ , gem. per jaar)	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (mln.m ³ , gem. per jaar)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³ , gem. per jaar)
1991-2020			
Westerschelde (1)	0.059 ± 0.031	0 ± 0	0.059 ± 0.031
Westerschelde delta (2)	0.102 ± 0.053	0 ± 0	0.101 ± 0.053
Oosterschelde delta (3)	0.097 ± 0.049	0 ± 0	0.097 ± 0.049
Grevelingen delta (4)	0.065 ± 0.032	0 ± 0	0.065 ± 0.032
Haringvliet delta (5)	0.081 ± 0.039	0.002 ± 0.001	0.083 ± 0.039
Maasgeul (6)	0.002 ± 0.001	0.004 ± 0.001	0.007 ± 0.002
Zuid-Holland (7)	0.384 ± 0.178	0.081 ± 0.02	0.464 ± 0.187
IJgeul (8)	0.008 ± 0.004	0 ± 0	0.008 ± 0.004
Noord-Holland (9)	0.179 ± 0.078	0.097 ± 0.024	0.276 ± 0.088
Zeegat van Texel (10)	0.218 ± 0.100	0.013 ± 0.003	0.231 ± 0.102
Marsdiep binnen (11)	0.389 ± 0.180	0.004 ± 0.001	0.394 ± 0.180
Eierlandse Gat binnen (12)	0.088 ± 0.040	0.003 ± 0.001	0.091 ± 0.040
Eierlandse Gat (13)	0.136 ± 0.063	0.005 ± 0.001	0.140 ± 0.063
Vlietstroom (14)	0.183 ± 0.082	0.025 ± 0.006	0.208 ± 0.085
Vlie binnen (15)	0.401 ± 0.181	0.078 ± 0.020	0.479 ± 0.188
Amelander Zeegat (16)	0.181 ± 0.082	0.015 ± 0.004	0.195 ± 0.082
Amelander Zeegat binnen (17)	0.161 ± 0.075	0.042 ± 0.011	0.204 ± 0.079
Friesche Zeegat (18)	0.166 ± 0.081	0.398 ± 0.100	0.564 ± 0.145
Friesche Zeegat binnen (19)	0.086 ± 0.042	0.214 ± 0.054	0.300 ± 0.073
Eems Dollard (20)	0.203 ± 0.099	0.005 ± 0.001	0.208 ± 0.099
Eems Dollard binnen (21)	0.247 ± 0.123	0.477 ± 0.119	0.724 ± 0.192
Getijdenbekkens	1.431 ± 0.716	0.818 ± 0.205	2.249 ± 0.745
- Waddenzee	- 1.372 ± 0.686	- 0.818 ± 0.205	- 2.190 ± 0.716
- Westerschelde	- 0.059 ± 0.031	- 0 ± 0	- 0.059 ± 0.031
Kustfundament	2.005 ± 1.003	0.645 ± 0.161	2.650 ± 1.016
Kustfundament en getijdenbekkens	3.436 ± 1.718	1.463 ± 0.366	4.899 ± 1.757

Tabel 4.6 Jaarlijks gemiddelde bodemdalingsvolumes voor de periode 2021-2050.

Gebied	Geologisch bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³ , gem. per jaar)	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (mln.m ³ , gem. per jaar)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (mln.m ³ , gem. per jaar)
2021-2050			
Westerschelde (1)	0.059 ± 0.031	0 ± 0	0.059 ± 0.03
Westerschelde delta (2)	0.102 ± 0.053	0 ± 0	0.101 ± 0.053
Oosterschelde delta (3)	0.097 ± 0.049	0 ± 0	0.097 ± 0.049
Grevelingen delta (4)	0.065 ± 0.032	0 ± 0	0.065 ± 0.032
Haringvliet delta (5)	0.081 ± 0.039	0.001 ± 0.001	0.082 ± 0.039
Maasgeul (6)	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.005 ± 0.002
Zuid-Holland (7)	0.384 ± 0.178	0.033 ± 0.017	0.416 ± 0.184
IJgeul (8)	0.008 ± 0.004	0 ± 0	0.008 ± 0.004
Noord-Holland (9)	0.179 ± 0.078	0.041 ± 0.021	0.22 ± 0.087
Zeegat van Texel (10)	0.218 ± 0.1	0.01 ± 0.005	0.228 ± 0.102
Marsdiep binnen (11)	0.389 ± 0.18	0.033 ± 0.017	0.422 ± 0.195
Eierlandse Gat binnen (12)	0.088 ± 0.04	0.002 ± 0.001	0.090 ± 0.04
Eierlandse Gat (13)	0.136 ± 0.063	0.005 ± 0.003	0.141 ± 0.064
Vlietstroom (14)	0.183 ± 0.082	0.041 ± 0.021	0.224 ± 0.093
Vlie binnen (15)	0.401 ± 0.181	0.429 ± 0.215	0.83 ± 0.374
Amelander Zeegat (16)	0.181 ± 0.082	0.014 ± 0.007	0.195 ± 0.084
Amelander Zeegat binnen (17)	0.161 ± 0.075	0.019 ± 0.01	0.180 ± 0.08
Friesche Zeegat (18)	0.166 ± 0.081	0.153 ± 0.077	0.319 ± 0.134
Friesche Zeegat binnen (19)	0.086 ± 0.042	0.117 ± 0.059	0.200 ± 0.079
Eems Dollard (20)	0.203 ± 0.099	0.004 ± 0.002	0.207 ± 0.099
Eems Dollard binnen (21)	0.247 ± 0.123	0.385 ± 0.193	0.632 ± 0.259
Getijdenbekkens	1.431 ± 0.716	0.985 ± 0.493	2.416 ± 0.869
- Waddenzee	- 1.372 ± 0.686	- 0.985 ± 0.493	- 2.357 ± 0.845
- Westerschelde	- 0.059 ± 0.031	- 0 ± 0	- 0.059 ± 0.031
Kustfundament	2.005 ± 1.003	0.304 ± 0.152	2.309 ± 1.014
Kustfundament en getijdenbekkens	3.436 ± 1.718	1.289 ± 0.645	4.725 ± 1.835

Tabel 4.7 ten slotte geeft de bodemdaling voor de locaties van de verschillende getijdenstations, wederom uitgesplitst naar geologische bodemdaling en daling door winning. Er zijn twee stations die met zekerheid beïnvloed worden door daling door winning, dat zijn Delfzijl en Hoek van Holland. De daling bij Delfzijl is naar verwachting de komende 30 jaar veel kleiner dan in de afgelopen 30 jaar. De daling door winning bij Hoek van Holland is beperkt, maar maakt toch zo'n 50% uit van de totale bodemdaling. Station Harlingen ligt slechts enkele tientallen meters buiten de gemodelleerde bodemdalingsschotel van de zoutwinning bij de Ballastplaat. Een kleine verschuiving van die schotel (niet ondenkbaar), zal leiden tot extra bodemdaling bij Harlingen. Uiteraard zal dit gemonitord worden.

Tabel 4.7 Bodemdaling bij de hoofdgetijdenstations, uitgesplitst naar geologische bodemdaling en de bodemdaling door winning (gas, olie, zout), voor de periodes 1991-2020 en 2021-2050.

Station	Geologische bodemdaling		Bodemdaling door winning		Totale bodemdaling	
	1991-2020 (cm)	2021-2050 (cm)	1991-2020 (cm)	2021-2050 (cm)	1991-2020 (cm)	2021-2050 (cm)
Delfzijl	1.4 ± 0.7	1.4 ± 0.7	12.0 ± 3.0	4.0 ± 2.0	13.4 ± 3.1	5.4 ± 2.1
Harlingen	1.8 ± 0.9	1.8 ± 0.9	0	0	1.8 ± 0.8	1.8 ± 0.9
Den Helder	1.6 ± 0.8	1.6 ± 0.8	0	0	1.6 ± 0.8	1.6 ± 0.8
IJmuiden	1.5 ± 0.7	1.5 ± 0.7	0	0	1.5 ± 0.7	1.5 ± 0.7
Hoek van Holland	1.1 ± 0.5	1.1 ± 0.5	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.5	2.1 ± 0.6	2.1 ± 0.7
Vlissingen	0.7 ± 0.4	0.7 ± 0.4	0	0	0.7 ± 0.4	0.7 ± 0.4

5 Conclusies

Dit rapport geeft een samenvattend overzicht van het onderzoek dat de laatste jaren is uitgevoerd binnen de *Bodemdalingsmonitor*. Het geeft de meest actuele stand van zaken omtrent de geologische bodemdaling en de daling door het winnen van delfstoffen. Daarnaast geeft het per beheergebied binnen het kustfundament en de getijdenbekkens de snelheid van bodemdaling en de bijbehorende bodemdalingsvolumes. Het laat zien dat:

- De geologische bodemdaling in Nederland hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door tektonische en glacio-isostatische bodemdaling, waarbij de laatste vorm dominant is. De geologische bodemdaling neemt toe van zuidwest naar noordoost, van ongeveer 2 tot 6 cm/eeuw. Gemiddeld over het aandachtsgebied gaat het om $3,4 \pm 1,7$ mil. m³ bodemdalingsvolume per jaar.
- Ten westen van Harlingen is in de Waddenzee recent zoutwinning gestart die uiteindelijk tot meerdere decimeters lokale bodemdaling leidt. De komende 30 jaar er minder bodemdaling door winning zal optreden dan in de afgelopen 30 jaar, de afname bedraagt ongeveer 12%. De komende 30 jaar bedraagt het gemiddelde bodemdalingsvolume door winning in het aandachtsgebied $1,3 \pm 0,6$ mil. m³ per jaar.

Referenties

- Antea Group, 2022. Monitoring bodemdaling zoutwinning Waddenzee - Jaarrapportage 2021, Antea Group rapport 0468107.100.
- Arcadis, 2022. Monitoring situatie 2021 bodemligging studiegebied zoutwinning Waddenzee, Arcadis rapport C03081.000369 / D10007501:72.
- Baart, F. et al., 2018. Zeespiegemonitor 2018 - De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust, Deltares report 11202193-000-ZKS-0004.
- Barends, F.B.J., Dillingh, D., Hanssen, R., Van Onselen, K. (Eds.), 2008. Bodemdaling langs de Nederlandse kust: Case Hondsbossche en Pettemer zeewering. Delft University Press.
- Cleveringa, J., Grasmeijer, B., 2010. Meegroei-vermogen en grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee, Alkyon rapport A2062.
- Hijma, M.P., Kooi, H., 2018a. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11200538-008-ZKS-0001.
- Hijma, M.P., Kooi, H., 2018b. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2) - Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden, Deltares report 11202190-001-ZKS-0001_v1.0.
- Hijma, M.P., Van Onselen, E., 2019. Bodemdalingsmonitor 2019 - Kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11203683-002-ZKS-0017.
- Hijma, M.P., Van Onselen, E., 2020. Bodemdalingsmonitor 2020 - Kustfundament en de getijdenbekkens - Vergelijk met GNSS-data, Deltares report 11205236-002-ZKS-0004.
- Hijma, M.P., 2021. Bodemdalingsmonitor 2021 - Kustfundament en de getijdenbekkens - Actualisatie bodemdalingsvolumes, Deltares report 11206794-003-ZKS-0002.
- Jelgersma, S., 1961. Holocene sea-level changes in The Netherlands. Mededelingen Geologische Stichting, 7, 1-101.
- Kooi, H., Johnston, P., Lambeck, K., Smither, C., Ronald, M., 1998. Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands. Tectonophysics, 299 (4), 297-316.
- Lorenz, G.K. et al., 1991. Heden en Verleden — Nederland naar Beneden??? - Interim rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland, Rijkswaterstaat, Delft/Rijswijk en Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Nougues, L., Hijma, M.P., Erkens, G., 2022. Bodemdalingsmonitor 2022 - Fundering en geologie bij GNSS-stations, Deltares report 11208035-003-ZKS-xxx.
- Stouthamer, E., Cohen, K.M., Hoek, W.Z., 2020. De vorming van het land: geologie en geomorfologie. Perspectief Uitgevers, 8e geheel herziene druk, Utrecht.

Vink, A., Steffen, H., Reinhardt, L., Kaufmann, G., 2007. Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quaternary Science Reviews*, 26 (25-28), 3249-3275.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl