

# **Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2)**

Een update, case IJmuiden en kwantificering





# **Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2)**

Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden

11202190-001



**Titel**

Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2)

<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
11202190-001	11202190-001-ZKS-0001	59

**Trefwoorden**

Zeespiegelstijging, gaswinning, tektoniek, isostasie, bodemdaling, kustfundament

**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). In de huidige rekenregel voor het vaststellen van het suppletievolume wordt gerekend met de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging voor Nederland op basis van de zes hoofdgetijdenstations (circa 19 cm/eeuw). De relatieve stijging verschilt per station en varieert tussen de 13 (Harlingen) en 23 (Hoek van Holland) cm/eeuw. Een mogelijke oorzaak voor deze verschillen betreft ruimtelijke verschillen in bodemdaling.

In de nieuwe rekenregel voor het suppletievolume is bodemdaling opgenomen als een aparte term. Hiermee wordt het mogelijk om ruimtelijke verschillen in bodemdaling direct mee te nemen in het vaststellen van het suppletievolume en dit leidt tot een betere onderbouwing van het benodigde regionale suppletievolume. Om de nieuwe rekenregel te implementeren, is een goed beeld van de bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens gewenst. In Hijma en Kooi (2018) is een ruimtelijk en kwantitatief overzicht gemaakt van de bijdrage van de verschillende bodemdalingscomponenten. Hierbij is onderscheid gemaakt in geologische bodemdaling en daling veroorzaakt door menselijke activiteiten.

De geologische bodemdaling wordt veroorzaakt door glacio-isostasie (GIA), autocompactie en tektoniek, waarbij de bijdrage van autocompactie verwaarloosbaar klein is. Bodemdaling door menselijke activiteiten treedt vooral op bij de winning van olie, gas, zout en grondwater, waarbij de bijdrage van de laatste component nader onderzocht is in dit rapport. Het blijkt dat de grondwateronttrekking bij IJmuiden waarschijnlijk geleid heeft tot 3-5 cm bodemdaling tussen 40-50 jaar geleden. Sindsdien is de bodemdaling gestopt en mogelijk vindt er zelfs een geringe bodemstijging plaats. De huidige bijdrage van grondwateronttrekkingen aan bodembeweging in het kustfundament is zeer gering.



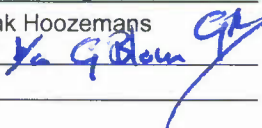
De kern van het huidige rapport is een verantwoording bij de oplevering van nieuwe bodemdalingskaarten van het kustfundament en de getijdenbekkens, waarbij de onzekerheden zijn gekwantificeerd. De basis voor het kunnen maken van deze kaarten is gelegd door het werk beschreven in een eerder beschreven rapport (Hijma & Kooi, 2018). De kaartjes die in dat rapport staan zijn door het verschijnen van de nieuwe kaarten in het huidige rapport verouderd en aanbevolen wordt de kaarten uit het huidige rapport te gebruiken in afgeleide memo's en presentaties. De nieuwe kaarten zijn steeds geldig voor drie periodes: laatste 100 jaar, laatste 30 jaar en heden tot 2050. De kaarten zullen naar verwachting in de toekomst geüpdatet kunnen worden naar aanleiding van veranderingen in de ligging van actieve gas-, olie- en zoutvelden, maar ook door verandering in de productie per wingebed. Daarnaast zullen nieuwe inzichten in GIA ook leiden tot veranderingen in het gemodelleerde regionale patroon van geologische bodemdaling en kunnen dus ook kaarten van reeds opgetreden bodemdaling veranderen. Deze actualisaties kunnen dan verschijnen binnen de voorgestelde bodemdalingsmonitor. Omdat actualisaties voorzien worden is de productie van de bodemdalingskaarten digitaal zo opgezet, dat nieuwe kaarten eenvoudig gemaakt kunnen worden.

**Titel**  
Bodemdaling in het kustfundament en de  
getijdenbekkens (deel 2)

**Project**  
11202190-001

**Kenmerk**  
11202190-001-ZKS-0001

**Pagina's**  
54

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Dec. 2018	Marc Hijma		Gilles Erkens		Frank Hoozemans	
		Henk Kooi					

**Status**  
definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Bodemdaling door grondwateronttrekking: casus IJmuiden</b>	<b>11</b>
2.1	Achtergrond	11
2.2	Analyse	11
2.2.1	Gegevens over de onttrekking	11
2.2.2	Informatie over stijghoogte uit waarnemingen	12
2.2.3	Aanpak van de bodemdalingsmodellering	13
2.2.3.1	Software: iMOD SUB-CR	13
2.2.3.2	Basis grondwatermodel	13
2.2.3.3	Aanpassingen	14
2.2.4	Berekende geschiedenis van de stijghoogte	15
2.2.5	Berekende bodemdaling	17
2.3	Discussie	19
<b>3</b>	<b>Digitale bodemdalingskaart van het kustfundament en de getijdenbekkens</b>	<b>21</b>
3.1	Geologische bodemdaling	21
3.1.1	Tektoniek	21
3.1.2	Glacio-isostasie	23
3.1.2.1	Zeespiegeldatabase	23
3.1.2.2	GIA-kaarten Nederland	26
3.1.3	Totaalkaart geologische bodembeweging: 30 en 100 jaar	28
3.2	Bodemdaling door winning	29
3.2.1	1917-2017	30
3.2.2	1987-2017	31
3.2.3	2018-2050	32
3.3	Bodemdalingscomponenten en onzekerheden	33
3.4	Totale bodembeweging door geologische processen en winning	33
3.4.1	1917-2017	33
3.4.2	1987-2017	34
3.4.3	2018-2050	38
3.5	Bodembeweging per kustbeheerdeelgebied	40
<b>4</b>	<b>Discussie</b>	<b>51</b>
4.1	Algemeen	51
4.2	Bodemdaling na 2050	51
4.3	Gebruik van bodemdalingsvolumes in de rekenregel	52
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>55</b>
5.1	Conclusies	55
5.2	Aanbevelingen	56
	<b>Referenties</b>	<b>59</b>





## 1 Inleiding

In 2019 zal een nieuwe rekenregel ingevoerd worden voor de bepaling van de benodigde hoeveelheid suppletiezand langs de Nederlandse kust en in de getijdenbekkens. Een aanpassing in de voorgestelde rekenregel (Van der Spek et al., 2015; Lodder, 2016) ten opzichte van de huidige rekenregel is een aparte term voor volumeverlies door bodemdaling. In de huidige rekenregel wordt het volumeverlies door bodemdaling impliciet meegenomen, doordat de gemiddelde relatieve zeespiegel, waaraan bodemdaling bijdraagt, over de zes hoofdstations gebruikt wordt om het suppletievolume te berekenen. Deze landelijk gemiddelde aanpak doet echter geen recht aan de regionale verschillen die bestaan in bodemdaling als gevolg van regionale verschillen in geologische bodemdaling en lokale tot regionale winning van gas, olie, zout en water.

In Hijma & Kooi (2018) worden de voor het kustfundament en zeespiegelstijging relevante bodemdalingscomponenten uitgebreid besproken en zo goed mogelijk gekwantificeerd. Met betrekking tot de geologische bodemdaling zijn tektoniek en glacio-isostasie (GIA) de belangrijkste processen en gezamenlijk leiden zij tot bodemdalingssnelheden van 3-8 cm/eeuw, waarbij de snelheid toeneemt van zuid naar noord. Veel grotere snelheden, oplopend tot meer dan 100 cm/eeuw, worden gemeten ter plaatse van grootschalige winning van gas, olie en zout. In het vorige rapport wordt verder aangegeven dat de bijdrage van grootschalige grondwateronttrekking aan bodemdaling nog onbekend is, waarbij met name de onttrekking nabij IJmuiden aandacht verdient. Verdere aanbevelingen zijn dat bodemdaling gerichter gemonitord zou moeten worden, de onzekerheid die er bestaat over de bijdrage van GIA verkleind zou moeten worden en dat de bestaande zeespiegelmonitor uitgebreid zou moeten worden met een bodemdalingsmonitor.

Het huidige rapport voert enkele van deze aanbevelingen uit. Er is ondermeer getracht zoveel mogelijk informatie te verzamelen over de situatie bij IJmuiden om berekeningen te kunnen uitvoeren die gebruikt kunnen worden om de ordegrrootte aan opgetreden en verwachte bodemdaling in te schatten (H2). Daarnaast is met verschillende GIA-modellereurs samengewerkt om te komen tot verbeterde inschattingen van de bijdrage van deze component (§3.1.2.). De kern van dit rapport is echter een verantwoording bij de oplevering van bodemdalingskaarten van het kustfundament en de getijdenbekkens, omdat deze gebruikt zullen worden bij het vaststellen van de suppletiebehoefte. Er worden hierbij steeds voor drie periodes kaarten opgeleverd: laatste 100 jaar, laatste 30 jaar en heden tot 2050. De basis voor het kunnen maken van deze kaarten is gelegd door het werk beschreven in Hijma & Kooi (2018). ***De kaartjes die in dat rapport staan zijn door het verschijnen van de nieuwe kaarten in het huidige rapport verouderd en aanbevolen wordt de kaarten uit het huidige rapport te gebruiken in afgeleide memo's en presentaties.***

De getoonde kaarten zullen naar verwachting in de toekomst regelmatig geactualiseerd kunnen worden naar aanleiding van veranderingen in de ligging van actieve gas-, olie- en zoutvelden, maar ook door verandering in de productie per wingebied. Daarnaast zullen nieuwe inzichten in isostatische bewegingen ook leiden tot veranderingen in het regionale patroon van geologische bodemdaling. Deze actualisaties kunnen dan verschijnen binnen de voorgestelde bodemdalingsmonitor. Omdat actualisaties voorzien worden is de productie van de bodemdalingskaarten digitaal zo opgezet, dat nieuwe kaarten eenvoudig gemaakt kunnen worden.



## 2 Bodemdaling door grondwateronttrekking: casus IJmuiden

### 2.1 Achtergrond

Op het terrein van Tata Steel in Velzen-Noord wordt al ongeveer een halve eeuw grondwater onttrokken dat wordt gebruikt als koelwater voor de productie van staal. Het betreft de grootste grondwateronttrekking in/nabij het kustfundament. Er mag verwacht worden dat de grondwaterstijgthoogteverlaging die door de winning is geïnduceerd bodemdaling heeft veroorzaakt. Omdat de invloed van de winning zich in principe kan uitstrekken tot een vrij grote afstand van de winningslocatie (orde van km's), is een bijdrage aan bodemdaling in het kustfundament door de winning niet uitgesloten.

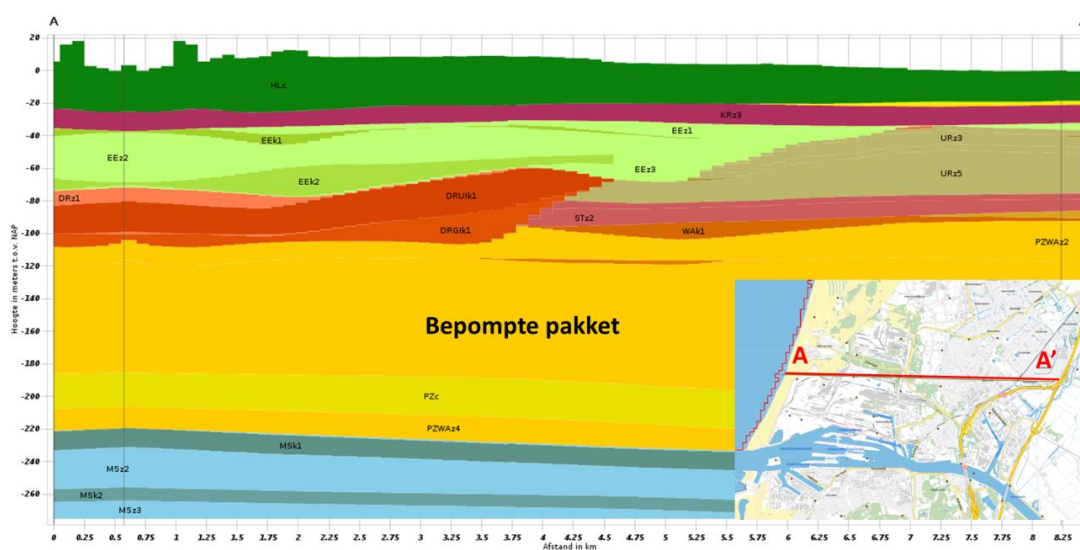
In dit hoofdstuk worden resultaten gepresenteerd van een korte studie naar de grootte en de uitgestrektheid van de bodemdaling die zich mogelijk in het verleden heeft voorgedaan door de winning, en van de verwachte bodemdaling in het verleden en de toekomst.

### 2.2 Analyse

#### 2.2.1 Gegevens over de onttrekking

De onderstaande beschrijving is gebaseerd op informatie van Tata Steel. Daarnaast is informatie over jaarlijkse onttrekkingshoeveelheden gebruikt die is verkregen via de Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied (OD NZKG).

Op het terrein van Tata Steel wordt op dit moment grondwater onttrokken uit 22 onttrekkingsputten. De putten staan verdeeld over het terrein in enkele strengen of raaien die elk ongeveer een kilometer lang zijn (Figuur 2.2). De filters bevinden zich grofweg tussen de 105 en 190 m onder maaiveld. De putten onttrekken brak/zout water uit het 'derde watervoerende pakket' (Regis eenheid PZWAz3: Peize-Waalre zand 3; Figuur 2.1).



Figuur 2.1 West-oost profiel door de onttrekkingslocatie waarin de opbouw van de ondergrond wordt getoond op basis van Regis II v2.2 (TNO-Geologische Dienst van Nederland). Het bepompte pakket is aangegeven. De vroege geschiedenis van onttrekking is niet goed bekend. Volgens dhr. André van der Ploeg van Tata Steel is de onttrekking gestart in 1968. Daarbij was het debiet aanvankelijk enige jaren

(ca. 5 jaar) ongeveer 10 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Rond 1973 is dat verdubbeld naar ca. 20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

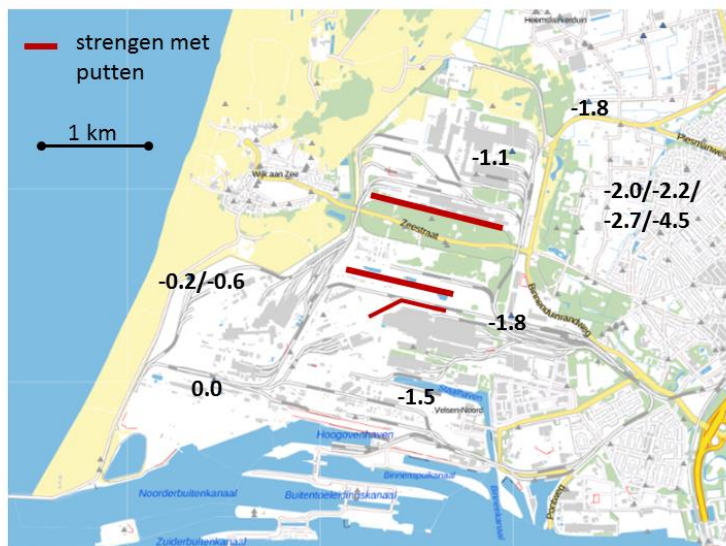
De OD NZKG meldt jaarhoeveelheden sinds 1981:

1981	19,6 miljoen m <sup>3</sup>
1990	19,9 miljoen m <sup>3</sup>
1994	16,6 miljoen m <sup>3</sup>
2016	12,6 miljoen m <sup>3</sup>

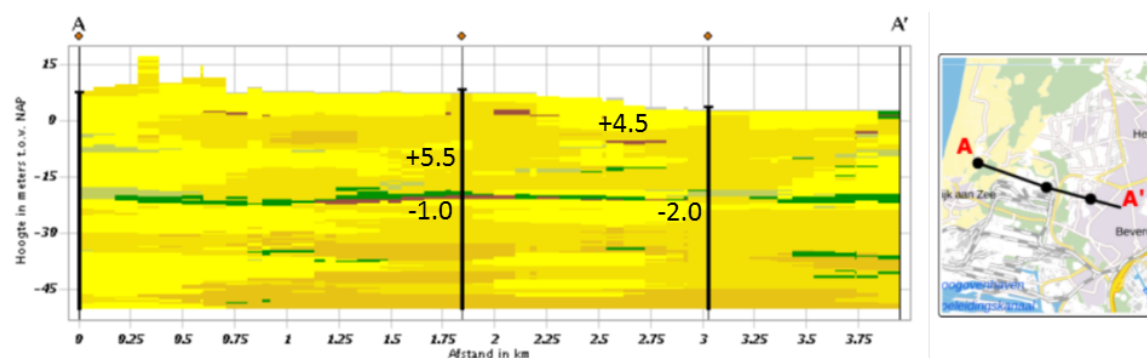
Vanaf begin jaren '90 is de onttrokken hoeveelheid geleidelijk minder geworden. Informatie van Tata Steel voor 2016 wijst op een iets grotere hoeveelheid van 13,2 miljoen m<sup>3</sup>.

## 2.2.2 Informatie over stijghoogte uit waarnemingen

*Figuur 2.2* geeft een beeld van de stijghoogte in het gebied op dieptes van meer dan 50 m -NAP in de periode waarin de onttrekking het grootst was. De laagste waargenomen stijghoogte (-4.5 m NAP) wordt aangetroffen in het onttrekkingspakket op een waarnemingspunt in het westen van Beverwijk. Dit waarnemingspunt bevindt zich op ca. 2 km afstand van de onttrekkingsputten. Helaas is dit de enige waarneming in het onttrekkingspakket. De afname van stijghoogte met de diepte op het waarnemingspunt past in het verwachte beeld van neerwaartse grondwaterstroming richting het onttrekkingspakket. Ook op ondiepere niveaus zijn er sterke aanwijzingen dat de winning neerwaartse grondwaterstroming en stijghoogteverlaging veroorzaakt (*Figuur 2.3*). Op enkele waarnemingspunten is de stijghoogte net onder het Holocene pakket 5 tot 6 m lager dan binnen het Holocene pakket. Dit wijst op een zeer grote hydraulische weerstand van de diepste Holocene afzettingen (o.a. basisveen). Het is niet uitgesloten dat ook andere, relatief ondiepe onttrekkingen bijdragen aan het grote stijghoogteverval.



*Figuur 2.2* Indicatie van de stijghoogte (in m NAP) in 1985 op basis van 7 waarnemingspunten uit Dinoloket. Enkelvoudige waarden geven de stijghoogte op een diepte van ca 50 m -NAP. Strengen van waarden gescheiden door '/' geven waarden voor toenemende dieptes van ca. 50 / 80 / 120 / 150 m -NAP.



Figuur 2.3 Waarden van stijghoogte (in m NAP) in 1985 in en net onder het Holocene pakket langs een profiel dat aan de noordzijde van de onttrekkingen loopt. De achtergrond toont de meest waarschijnlijke lithoklasse uit het ondergrondmodel Geotop (Dinoloket). Donkergroen is klei en bordeauxrood is veen. Een groot stijghoogteverval over de basis van het Holoceen is duidelijk te herkennen.

Op een aantal waarnemingspunten neemt de stijghoogte vanaf het begin van de jaren '90 geleidelijk toe (niet getoond). Deze trend past bij de informatie over de onttrekkingshistorie van de diepe winning.

## 2.2.3 Aanpak van de bodemdalingsmodellering

### 2.2.3.1 Software: iMOD SUB-CR

De modellering is uitgevoerd met SUB-CR, een recent door Deltares ontwikkeld software pakket (Kooi et al., 2018). SUB-CR is onder andere gebruikt in studie van bodemdaling in de Mekong delta, Vietnam (Minderhoud et al., 2017), en in Jakarta, Indonesië (Kooi & Yuherdha, 2017). Om bodemdaling te berekenen wordt SUB-CR gekoppeld aan grondwatermodelleringsoftware. In dit geval is gerekend met iMOD. SUB-CR maakt gebruik van dezelfde bodemmechanische principes en methode als in de geotechniek in Nederland op dit moment worden gehanteerd om zetting door ophogingen te berekenen. Deze methode, die wordt aangeduid met de naam isotachen-methode, beschrijft onder andere compressie door kruip. Kruip speelt vooral een rol in relatief 'slappe' afzettingen als klei en veen.

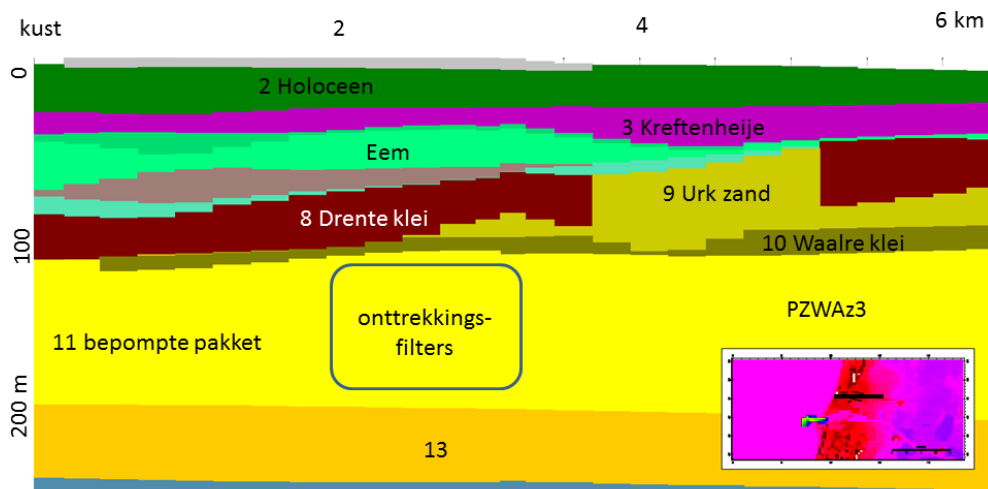
### 2.2.3.2 Basis grondwatermodel

Omdat er geen gedetailleerd lokaal/regionaal grondwatermodel voor het studiegebied beschikbaar was, is een uitsnede van het grondwatermodel van het nationaal hydrologische instrumentarium NHI v3.3.0 gebruikt als basismodel voor de modellering. Dit vrij grove model bevat zeven watervoerende pakketten (WVP's). De invloed van zes tussenliggende slechtdoorlatende lagen (SDL's) is via een weerstand (C-waarde) opgenomen, maar er wordt geen stijghoogte in deze lagen berekend (quasi-3D model). Het basismodel is een stationair grondwatermodel (niet tijdsafhankelijk). WVP's 3 t/m 7 zijn tot enige afstand uit de kust doorgetrokken om een kunstmatig randeffect van de kust te onderdrukken/vermijden. De Tata Steel onttrekking is opgenomen als één onttrekkingspunt (in WVP 6).

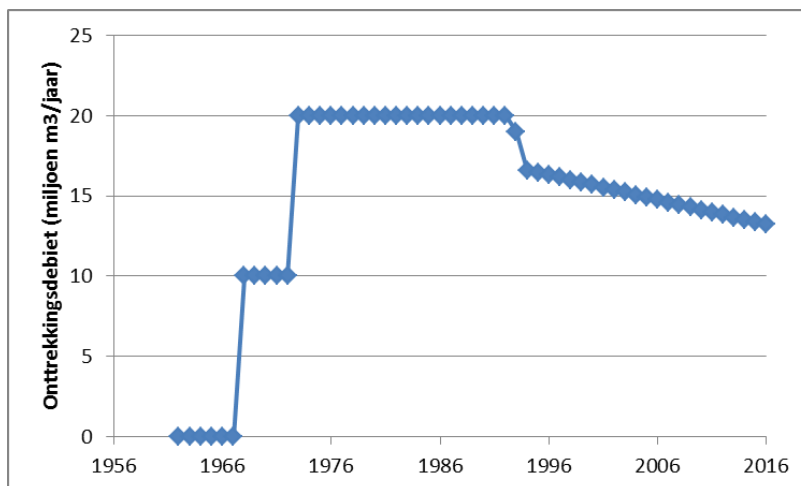
### 2.2.3.3 Aanpassingen

De volgende aanpassingen en checks zijn gedaan aan het basismodel om het geschikt te maken voor bodemdalingsberekeningen:

- SDL's zijn opgenomen als rekenlagen (stijghoogte wordt erin berekend). Dit levert een totaal van 13 modellagen. In dit geval zijn deze lagen niet verder verfijnd en zijn er dus ook 13 rekenlagen.
- Aan elke laag zijn ruimtelijk variërende niveaus van de bovenkant en de onderkant toegekend (TOP's en BOT's). Dit is noodzakelijk om de rol van het 'grondgewicht' te kunnen meenemen en om de verandering van laagdikte door compactie te kunnen berekenen die uiteindelijk resulteert in bodemdaling. Figuur 2.4 toont een west-oost doorsnede van het ondergrondmodel.
- Bij gebrek aan data voor TOP's en BOT's offshore, is daar aan alle lagen een dikte van 10 m toegekend (deze lagen zijn nodig om onshore de stijghoogtes correct uit te rekenen. Offshore is in de huidige aanpak geen bodemdaling uitgerekend.
- Verschillen in berekende stijghoogte tussen het oorspronkelijke quasi-3D model en het nieuwe 3D model zijn visueel geïnspecteerd. De verschillen bleken vrij gering, en omdat deze verschillen van weinig betekenis zijn voor de bodemdalingsberekeningen, is geen poging ondernomen om de modellen 'identiek' te maken.
- De enkelvoudige onttrekkingsbron van Tata Steel in het NHI model is vervangen door 12 bronnen, ruimtelijk verdeeld op basis van informatie van Tata Steel. Hoewel er in werkelijkheid 22 bronnen zijn, zijn 12 modelbronnen ruim voldoende voor de huidige modellering. In de modellering wordt het jaarlijkse onttrekkingsdebiet uniform verdeeld over de 12 bronnen.
- Het stationaire model is aangepast om de tijdsontwikkeling van het grondwatersysteem te berekenen van vóór de onttrekking voor de hoogovens tot 'nu' (1962-2016), waarbij alleen de onttrekkingshistorie op het terrein van Tata Steel varieert in de tijd (Figuur 2.5). Randvoorwaarden zijn constant gehouden, en andere onttrekkingen uitgezet.
- Voor het onttrekkingsdebiet uit 1985 bleek dat zowel het oorspronkelijke NHI model als het aangepaste model, grote afwijkingen opleverden ten opzichte van de waarnemingen, als getoond in Figuur 2.2 en Figuur 2.3. De volgende drie aanpassingen zijn gedaan om een redelijke overeenstemming te krijgen:
  - (1) verlaging van de KD-waarde van het pomppakket (laag 11) met een factor 5;
  - (2) verhoging van de C-waarde van de bovenliggende SDL (laag 10; Waalre klei 1) met een factor 10;
  - (3) verhoging van de C-waarde van SDL 2 (Holoceen) met 5000 dagen.
- Ten slotte is het bodemdalingspakket SUB-CR aan het grondwatermodel gekoppeld, met bijbehorende parametrisatie van de geotechnische eigenschappen van de ondergrond.



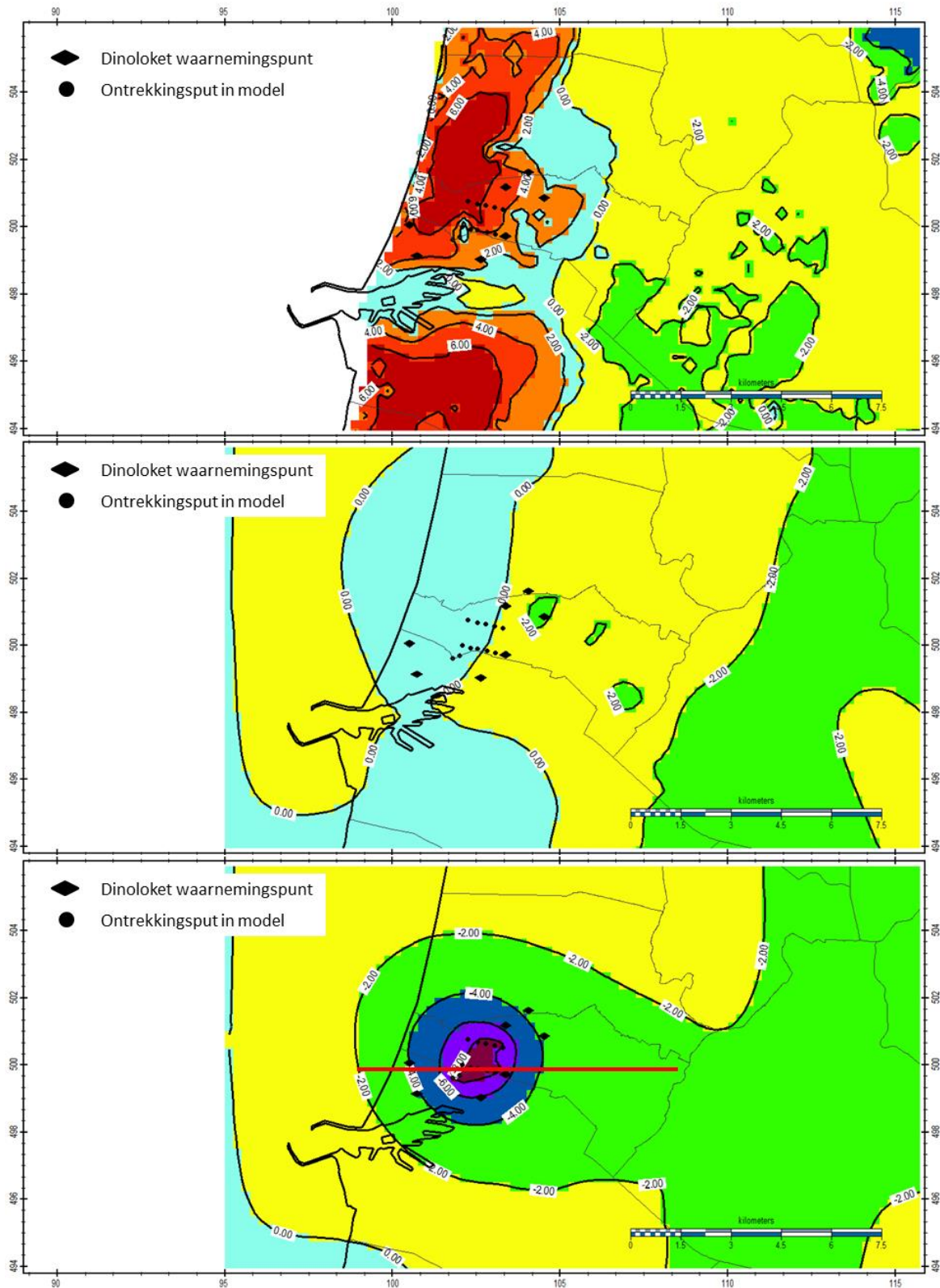
Figuur 2.4 West-oost profiel door het aangepaste ondergrondmodel



Figuur 2.5 Historie van het onttrekkingsdebiet dat is gehanteerd in de modellering.

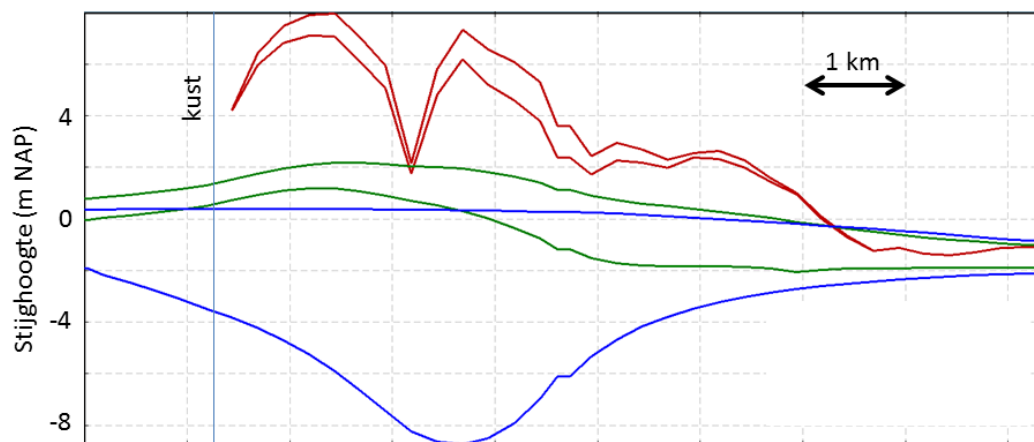
#### 2.2.4 Berekende geschiedenis van de stijghoogte

Figuur 2.6 toont de berekende stijghoogte in 1985 in modellen 1,3 en 11. Figuur 2.7 laat de stijghoogte zien langs een west-oost profiel. In de laatste figuur is ook de stijghoogte zonder aanwezigheid van de onttrekking op het terrein van Tata Steel weergegeven. Het verschil geeft een indruk van de stijghoogteverlaging die door de onttrekking wordt veroorzaakt. Figuur 2.8 geeft ten slotte een beeld van de tijdsontwikkeling van de berekende stijghoogte voor een punt tussen de onttrekkingsputten.

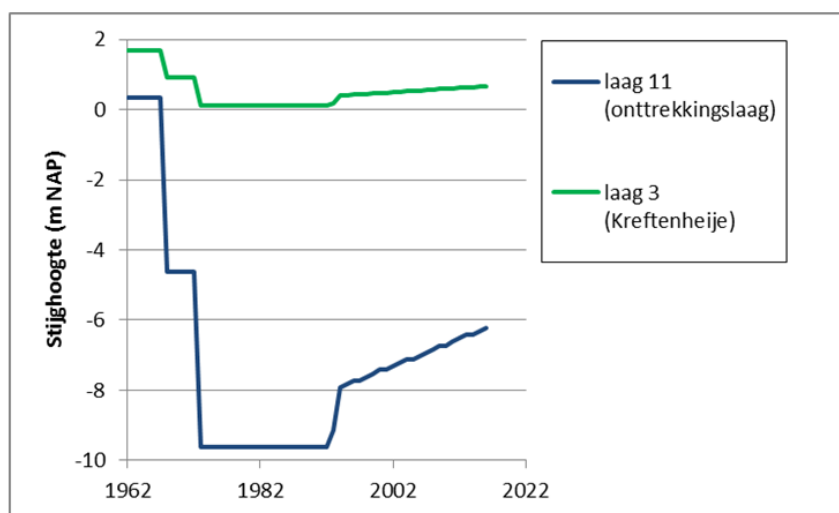


Figuur 2.6 Berekende stijghoogte (m NAP; van boven naar beneden) in lagen 1, 3 en 11 in 1985.





Figuur 2.7 West-oost profiel van de berekende stijghoogte met en zonder de invloed van de onttrekking op het terrein van Tata Steel voor het jaar 1985 voor lagen 1 (rood), 3 (groen) en 11 (blauw). De profiellijn is aangegeven in het onderste paneel in Figuur 2.6.

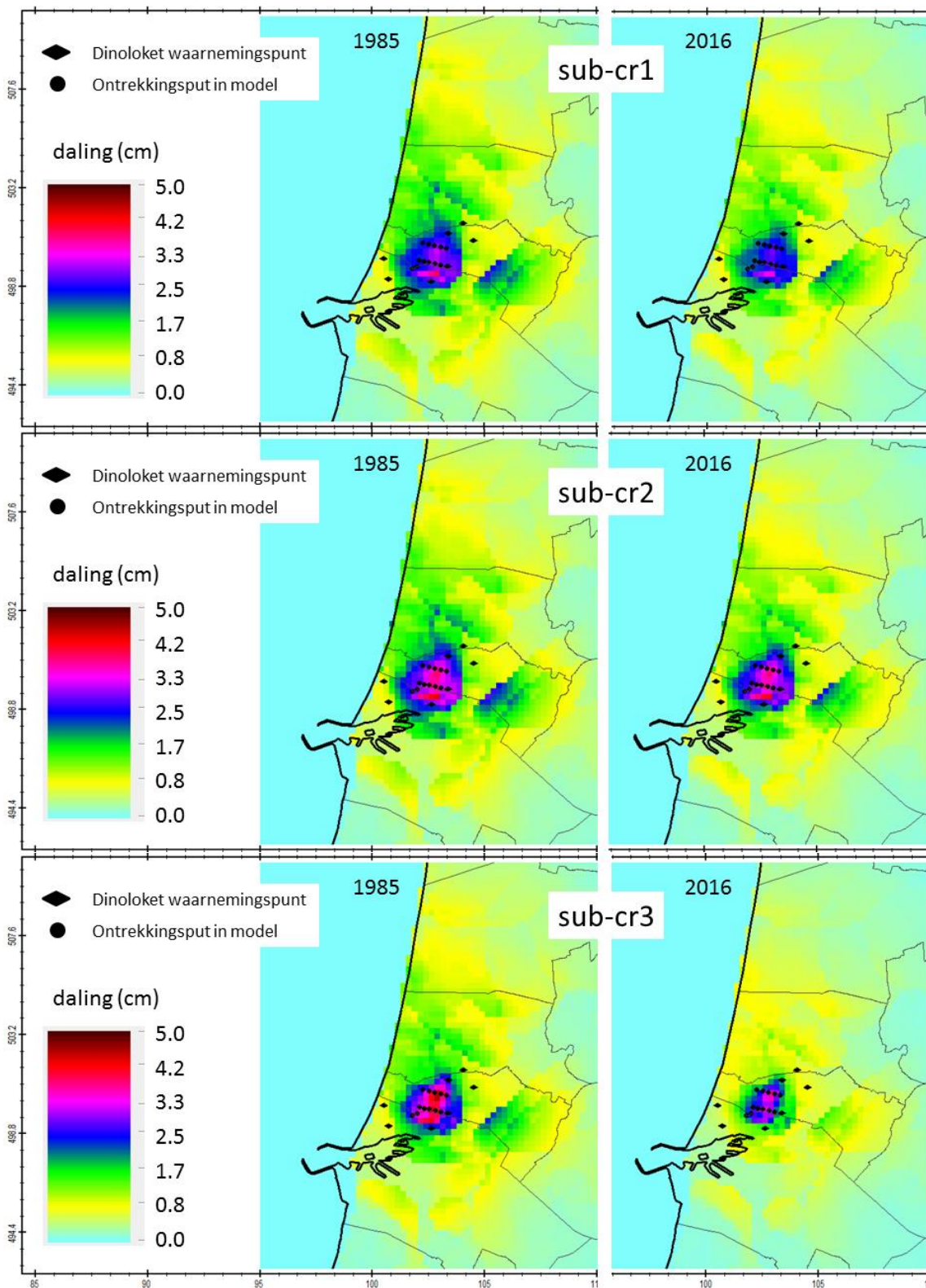


Figuur 2.8 Tijdsreeks van de gemodelleerde stijghoogteontwikkeling voor een locatie tussen de onttrekkingsputten op het terrein van Tata Steel in de onttrekkingslaag (11) en in laag 3, net onder de Holocene deklaag.

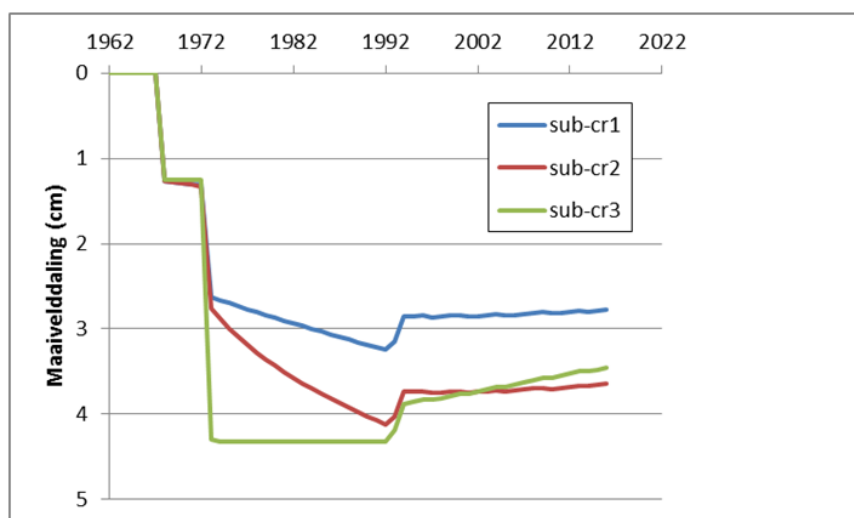
### 2.2.5 Berekende bodemdaling

Omdat er geen informatie is over de geotechnische eigenschappen van de samendrukbare lagen wordt de bodemdaling getoond voor drie berekeningen waarin verschillende aannames zijn gedaan over het mechanisch gedrag van de lagen. Tabel 2.1 geeft een overzicht van gebruikte parameterwaarden. In modellen sub-cr1 en sub-cr2 speelt kruip een rol. In model sub-cr3 is een elastoplastisch samendrukkingsmodel toegepast waarin kruip géén rol speelt. De resultaten geven een indruk van gevoeligheid van de bodemdaling voor onzekerheden in de bodemeigenschappen. Een uitgebreidere analyse is nodig om een meer volledig beeld van de onzekerheid te kunnen geven.

Figuur 2.9 toont de berekende maaiveldddaling veroorzaakt door de onttrekking voor de jaren 1985 en 2016. Figuur 2.10 laat de bijbehorende tijdontwikkeling van maaiveldddaling zien voor een locatie tussen de onttrekkingsputten.



Figuur 2.9 Berekende maaiveldaling in 1985 en in 2016 voor drie verschillende aannames over de eigenschappen van de samendrukbare lagen zoals toegelicht in de hoofdtekst.



Figuur 2.10 Tijdsreeks van de berekende maaiveldddaling voor een locatie tussen de onttrekkingsputten.

Tabel 2.1 Belangrijkste parameterwaarden voor de compactie berekeningen van de drie gebruikte modellen

model	RR	CR	Ca	OCR
sub-cr1	0.03	0.17	0.005	1.55
sub-cr2	0.03	0.17	0.002	1.20
sub-cr3	0.03	0.17	0.000	1.05

laag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
fractie													
samendrukbaar	0	0.	0.0	0.	0.0	0.	0.0	0.	0.0	0.	0.0	0.	0.0
r		3	5	8	5	8	5	8	5	8	5	8	5

### 2.3 Discussie

Op basis van de huidige berekeningen wordt verwacht dat de maximale door de onttrekking veroorzaakte maaiveldddaling in de orde van de 3 tot 5 cm ligt. Onder de duinen van Velzen-Noord en aan de kust is de daling waarschijnlijk niet meer dan ca. 1 cm. Voor de locatie van het hoofdgetijdestation van IJmuiden is de daling naar verwachting hooguit enkele mm.

De gepresenteerde berekeningsresultaten van de maaivelddalingsgeschiedenis door de grondwaterwinning moeten gezien worden als eerste, redelijke schattingen. Veel van de benodigde input voor de berekeningen berust op 'expert judgement' op basis van beperkte informatie. De kans dat de daadwerkelijk opgetreden daling aanzienlijk groter is dan in de huidige berekeningen (b.v. één tot meerdere decimeters), wordt klein geacht, maar kan op dit moment niet volledig worden uitgesloten. De onzekerheid hierover wordt vergroot doordat de waarnemingspunten niet direct naast de onttrekkingsputten staan. Mogelijkheden om hier meer duidelijkheid over te verkrijgen worden onderaan deze discussiesectie besproken.

Sinds de jaren '90 wordt er geleidelijk minder grondwater onttrokken. Hoewel er meer wordt onttrokken dan in de jaren '60 en begin jaren '70, neemt de stijghoogte in de verschillende bodemlagen door de afname van de onttrekking toe. Dit zorgt voor een 'ontlasting' (in tegenstelling tot belasting) van de bodemlagen. Daardoor veroorzaakt de winning naar verwachting al ruime tijd geen bodemdaling meer en is mogelijk sprake van een kleine bodemstijging (*Figuur 2.10*). Een groot deel (orde van 60-90%) van de al veroorzaakte daling is echter permanent van aard. Ook als de winning in de toekomst zou worden gestopt en stijghoogtes uiteindelijk volledig herstellen tot de situatie begin jaren '60 zal een groot deel van de reeds opgetreden daling in stand blijven. Als de winning, na een periode van afname, of volledige stopzetting, weer toeneemt, zal de bodemdaling slechts zeer beperkt toenemen, en treedt er geen verder bodemdaling op als de onttrekkingshoeveelheid ruim onder het maximum van 20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar blijft. Scenarioberekeningen kunnen hier een duidelijker beeld van geven.

Indien het belangrijk is om de huidige schattingen van de bodemdaling verder aan te scherpen kunnen de volgende activiteiten daaraan bijdragen:

- Onderzoek naar de mogelijke bijdrage van kleirijke afzettingen onder het gepompte pakket (specifiek bijdragen door compactie binnen Formatie van Maassluis) door uitbreiding van het ondergrondmodel naar deze lagen. Het huidige model bevat deze diepere lagen niet, maar de onttrekking zal wel tot stijghoogteverlaging hebben geleid in deze lagen.
- Verbetering van de schatting van de ruimtelijke verdeling en diktes van samendrukbare lagen op basis van geologische en geotechnische informatie. Onder andere betrekken van informatie uit ondergrondstudies rond de vergroting van de zeesluis in het Noordzeekanaal.
- Onderzoeken of er aanvullende informatie is (b.v. in archieven van Tata Steel) om de onttrekkingshistorie nauwkeuriger te reconstrueren.
- Bestuderen van onafhankelijke informatie over bodemdaling. Met name NAP hoogteveranderingen van peilmerken in de omgeving en verticale beweging uit InSAR beelden.
- Daarnaast is het aan te raden bodemdaling te gaan monitoren indien de onttrekkingshoeveelheden flink gaan toenemen.

### 3 Digitale bodemdalingskaart van het kustfundament en de getijdenbekkens

In Hijma & Kooi (2018) zijn kaarten gepresenteerd die de bodemdaling voor individuele bodemdalingscomponenten laten zien. Voor de geologische bodemdaling betrof dit kaarten van de daling door autocompactie, tektoniek en isostasie. De bodemdalingskaarten door winning omvatten daling door de winning van gas, olie en zout, maar niet door wateronttrekking. De invloed van deze laatste component op bodemdaling in het kustfundament en in de getijdenbekkens is momenteel verwaarloosbaar, al is rondom het hoogovenscomplex in IJmuiden het maaiveld naar verwachting wel enkele centimeters gedaald in de periode eind jaren '60, begin jaren '70.

Hieronder worden eerst voor zowel de geologische bodemdaling als voor de bodemdaling door winning basiskaarten gepresenteerd. Daarbij wordt stilgestaan bij de totstandkoming en de aanwezige onzekerheden. Vervolgens worden de onzekerheden samengevat in een tabel (§3.3), waarna de totaalkaarten van bodemdaling tussen 1917-2017, 1987-2017 en 2018-2050 besproken worden. Deze kaarten zijn semi-automatisch gemaakt in ArcMap door een samenvoeging van de genoemde basiskaarten. Indien een van de basiskaarten geactualiseerd is kan eenvoudig een nieuwe totaalkaart gemaakt worden. Op basis van deze kaarten zijn per deelgebied van het kustfundament en de getijdenbekkens bodemdalingsvolumes en – snelheden berekend.

#### 3.1 Geologische bodemdaling

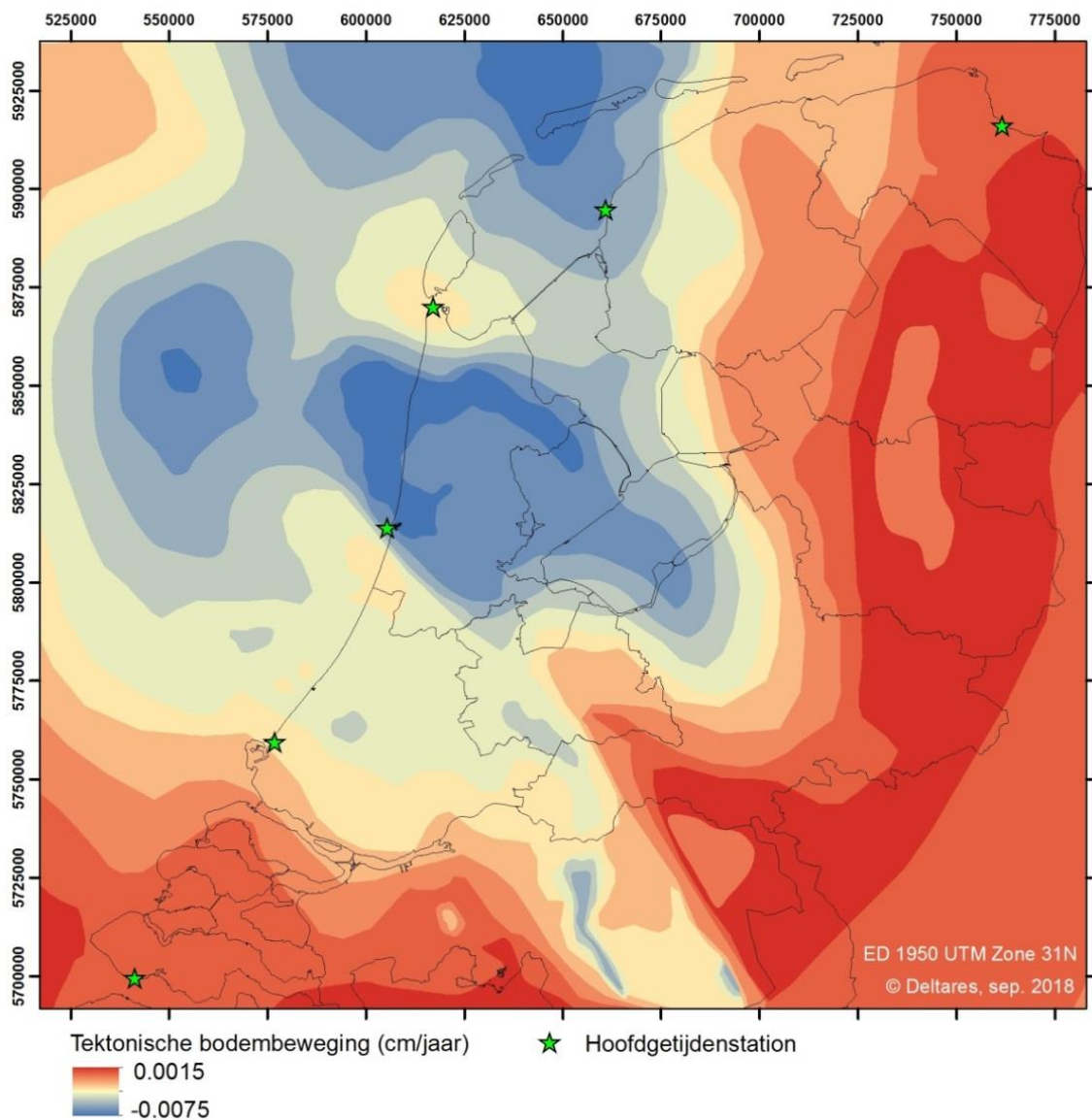
De bijdrage van autocompactie aan bodemdaling is op dit moment zeer gering (Hijma & Kooi, 2018). Er is daarom voor gekozen om deze bijdrage niet op te nemen als basiskaart voor het uitrekenen van de totale bodemdaling, maar alleen de bijdragen van tektoniek en isostasie mee te nemen.

##### 3.1.1 Tektoniek

De kaart uit Kooi et al. (1998) van tektonische bodembeweging vormt de basiskaart voor deze component. Hij toont de gemiddelde tektonische bewegingssnelheid in Nederland voor de afgelopen 2.5 miljoen jaar en is bepaald op basis van de dikte van de Kwartaire afzettingen, de palaeo-waterdiepten waarin de betreffende pakketten zijn afgezet, en correcties voor de invloed van isostatische dalingen en de compactie van diepere lagen die door het gewicht van de afzettingen is veroorzaakt (Hijma & Kooi, 2018). De snelheden zijn in het algemeen laag, minder dan 1 cm/eeuw. De kaart was alleen beschikbaar als plaatje en niet in een digitaal format dat geschikt is voor berekeningen en automatisering. Voor dit rapport is de kaart daarom gedigitaliseerd door de contourlijnen uit de kaart over te trekken. Vervolgens is deze contourenkaart omgezet naar een raster-format met een celgrootte van 50x50 m (Figuur 3.1).

De onzekerheid rondom de tektonische bodembeweging is lastig te bepalen. Allereerst is het een gemiddelde over de laatste 2.5 miljoen jaar, terwijl bekend is dat de snelheid van tektonische beweging over tijdschalen van decennia-eeuwen ordegroottes kan fluctueren.

Maar aangezien daar momenteel geen aanvullende gegevens of metingen over beschikbaar zijn, is het niet mogelijk vast te stellen of in de huidige tijd de snelheid van tektonische bodembeweging significant anders is dan de gemiddelde snelheid over de laatste 2.5 miljoen jaar. De onzekerheid rondom deze gemiddelde snelheid is afhankelijk van onzekerheden rondom de dikte van de Kwartaire afzettingen, de vaststelling van palaeo-waterdiepten, GIA-modellen en compactie. De onzekerheden van deze individuele componenten zullen relatief groot zijn, maar zijn ook onbekend. Het is daarom niet mogelijk om de uiteindelijke onzekerheid rondom de tektonische bodembeweging kwantitatief te bepalen, al mag aangenomen worden dat deze aanzienlijk is. Er is voor gekozen een (arbitraire) onzekerheid (variatiecoëfficiënt) van  $\pm 50\%$  aan te houden.



Figuur 3.1 Tektonische bodembeweging in Nederland (naar Kooi et al., 1998). De groene sterren geven de locaties weer van de hoofdgetijdenstations.

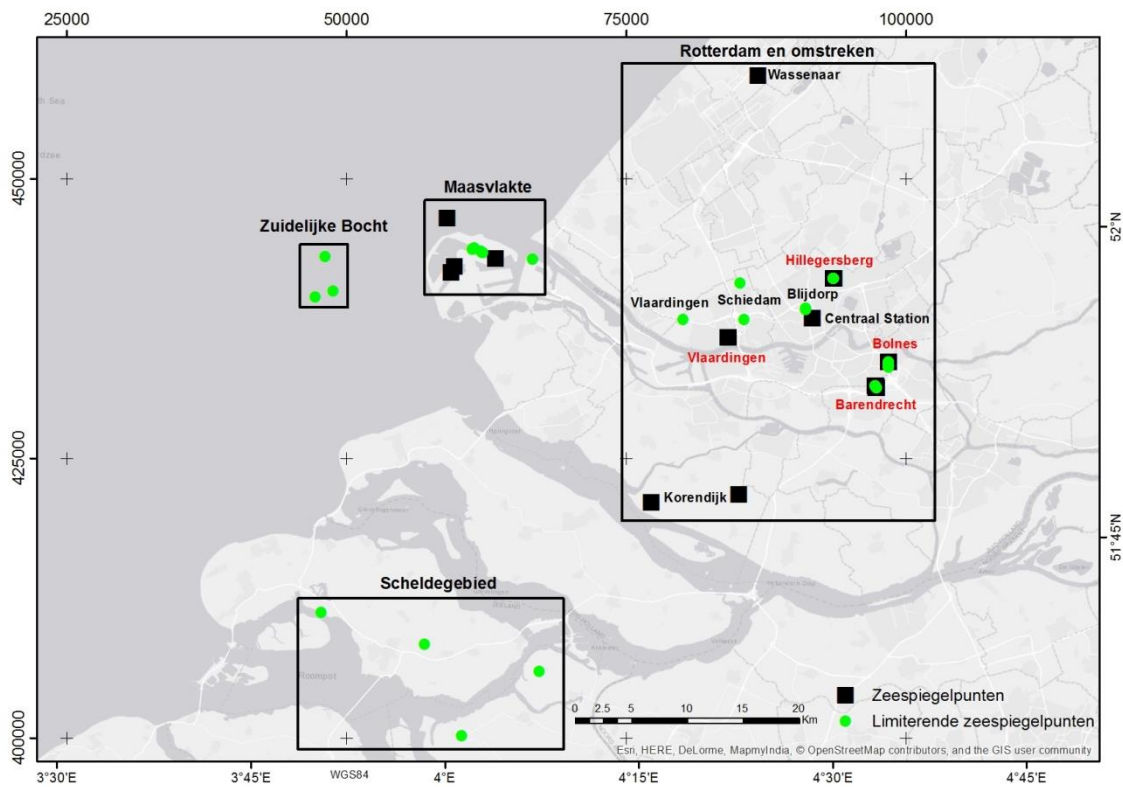
### 3.1.2 Glacio-isostasie

In Hijma & Kooi (2018) zijn de achtergronden bij glacio-isostatische bodembewegingen (GIA) gegeven. In Nederland leiden ze tot bodemdaling. Voor het bepalen van de glacio-isostatische bodembewegingen worden modellen gebruikt die als belangrijkste input hebben 1) de positie, grootte en dikte van ijskappen door de tijd heen en 2) de eigenschappen van de aardmantel (met name dikte en viscositeit). Verder worden zeespiegelgegevens gebruikt om de modellen te kalibreren en/of valideren. Deze gegevens bestaan uit tijd-diepte paren die voor verschillende tijdstippen de relatieve zeespiegelstand geven. De modellen hebben vaak celgroottes van meer dan 100x100 km en Nederland beslaat dus meestal maar enkele cellen. De uitkomsten van de modellen voor Nederland kunnen, afhankelijk van de gebruikte parameters, aanzienlijk variëren. In Hijma & Kooi (2018) is een kaart gepresenteerd, hun Figuur 2.9, met de isostatische bodemdaling voor het kustfundament en de getijdenbekkens. De kaart toont per gebied een bereik aan bodemdaling gebaseerd op twee beschikbare modellen. Het bereik laat zien dat de onzekerheid groot is: voor de kust van Zuid-Holland is het bereik bijvoorbeeld 2-5 cm/eeuw. Aangezien GIA veruit de grootste bijdrage levert aan de geologische bodemdaling is in 2018 nauw samengewerkt met GIA-modellereurs uit Nederland om de onzekerheden beter in beeld te brengen. Deze modellereurs hebben gebruik gemaakt van de zeespiegeldatabase voor Nederland om hun modellen te kalibreren. Deze database is in 2017 ontwikkeld en in 2018 verder aangevuld (zie onder).

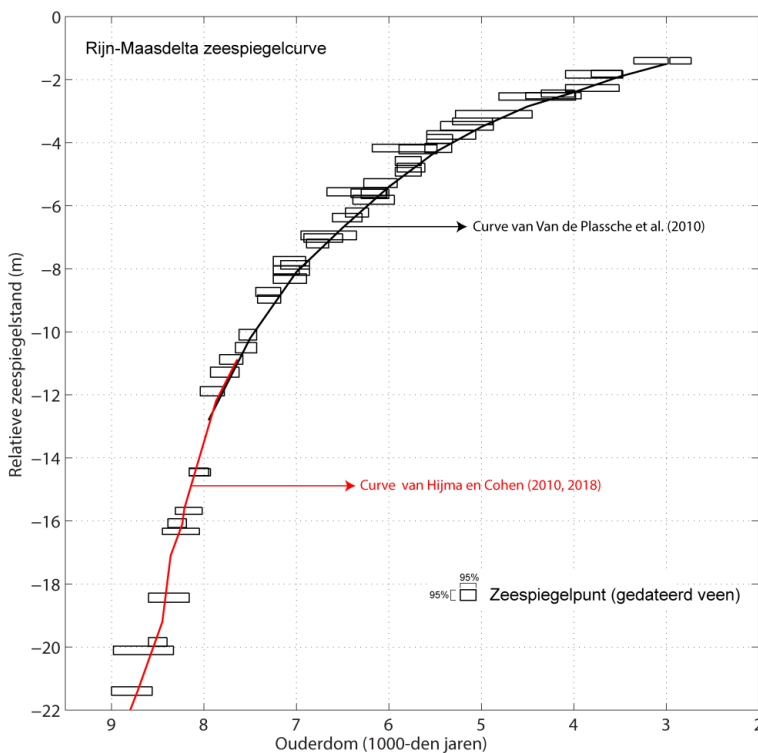
#### 3.1.2.1 Zeespiegeldatabase

In 2017 is gewerkt aan het vervaardigen en publiceren van een zeespiegeldatabase voor de Rijn-Maasdelta. De directe relevantie van deze database voor het KPP programma is dat de database gebruikt wordt voor het verbeteren van de GIA-modellen. Het artikel is eind 2017 ingediend, de reviews zijn verwerkt in april 2018 en het artikel zal eind 2018 verschijnen (Hijma & Cohen, 2018, ter review). De gepubliceerde database omvat hoofdzakelijk punten uit de Rijn-Maasdelta (Figuur 3.2) en laat zien dat in de Rijn-Maasdelta de zeespiegel de laatste 8.500 jaar ongeveer 20 m is gestegen (Figuur 3.3). De zeespiegeldatabase is in 2018 voor dit rapport verder uitgebreid met verschillende punten uit het Noordzeegebied (Figuur 3.4) om de GIA-modellen nog beter te kunnen kalibreren. Het toevoegen van een bepaald punt aan de database omvat niet simpelweg het overtuigen van ouderdom en diepte uit een artikel, maar volgt uit een relatief strikt protocol dat veel aandacht besteed aan de onzekerheid rondom het datapunt (Hijma et al., 2015; Hijma & Cohen, 2018, ter review).

Daarnaast is in 2017 een samenwerking gestart tussen Deltares, het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ), TNO-Geologische Dienst van Nederland (TNO-GDN), Universiteit Utrecht, Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed en Leeds University, met als hoofddoel om nieuwe zeespiegelinformatie uit het Noordzeegebied te verzamelen. Hiertoe is in zowel 2017 als 2018 met het Pelagia onderzoeksschip van het NIOZ geologisch veldwerk op de Noordzee uitgevoerd, waarbij uiteindelijk op verschillende locaties verdrongen landschappen zijn aangeboord (in het bereik -25 tot -63 m NAP). De uitwerking van dit onderzoek loopt nog, maar het onderzoek zal leiden tot vele nieuwe zeespiegelpunten voor het Noordzeebekken (Figuur 3.4). Deze punten kunnen vervolgens weer gebruikt worden voor het verbeteren van GIA-modellen en daarmee uiteindelijk leiden tot betere inschattingen van de bijdrage van GIA aan de huidige bodemdaling in Nederland.

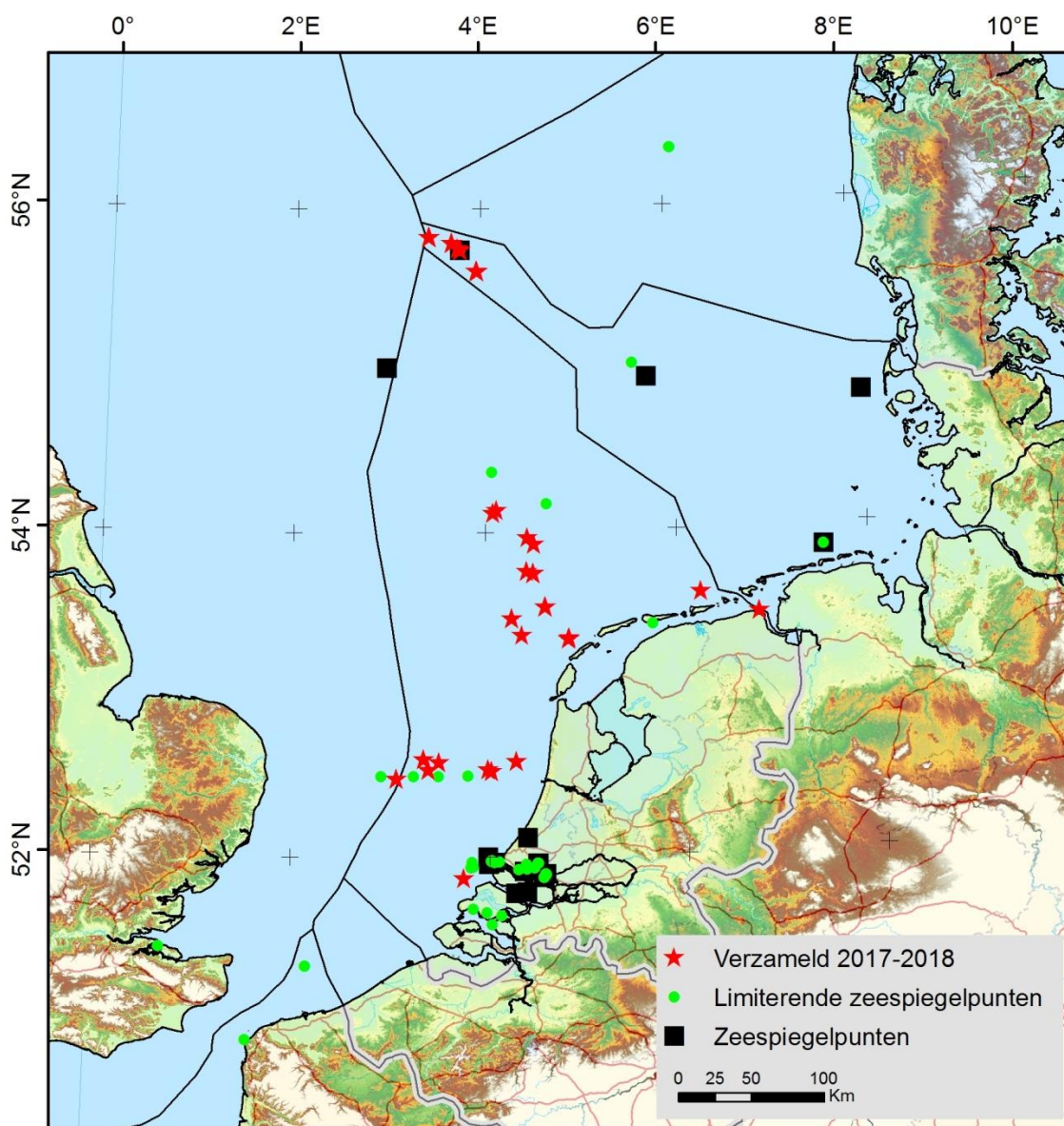


Figuur 3.2 Overzichtskaart van de gebruikte punten in de zeespiegeldatabase (Rijn-Maasgebied). De zeespiegelpunten zijn datapunten die directe informatie geven over vroegere relatieve zeespiegelstanden; de limiterende zeespiegelpunten geven aan dat de relatieve zeespiegel lager dan stond dan een bepaald niveau (naar Hijma & Cohen, 2018, ter review)



Figuur 3.3 Zeespiegelgeschiedenis voor de Rijn-Maasdelta (naar Hijma & Cohen, 2018, ter review).



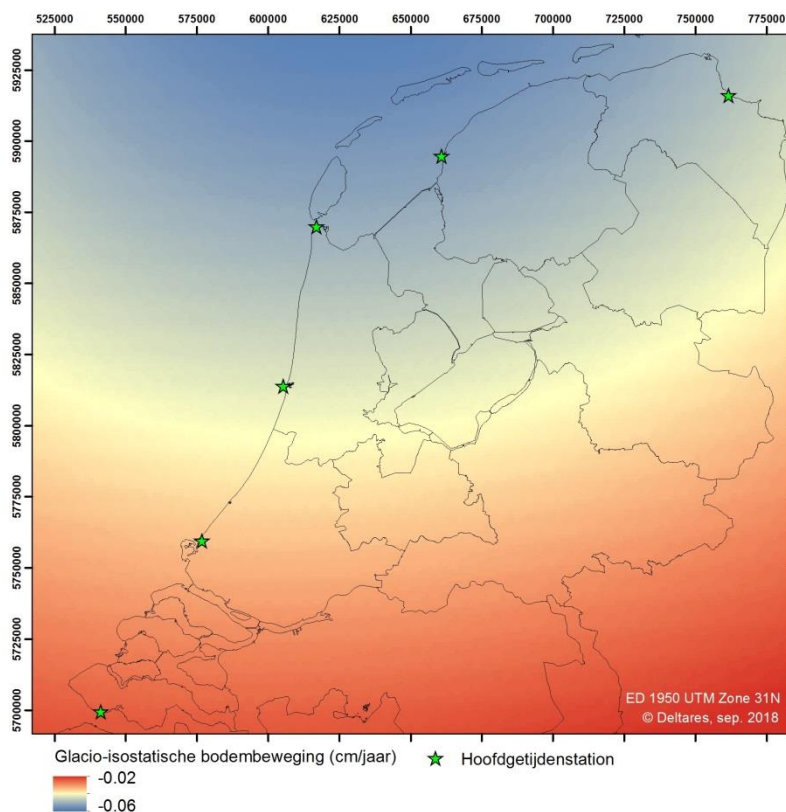


Figuur 3.4 Overzicht van de (limiterende) zeespiegelpunten uit het Noordzeegebied die zijn aangeleverd aan GIA-modellereurs om hun GIA-modellen te verbeteren. De rode sterren laten de locaties zien waar in 2017 en 2018 aanvullende zeespiegelinformatie is verzameld, voornamelijk met het onderzoeksschip Pelagia van het NIOZ.

### 3.1.2.2 GIA-kaarten Nederland

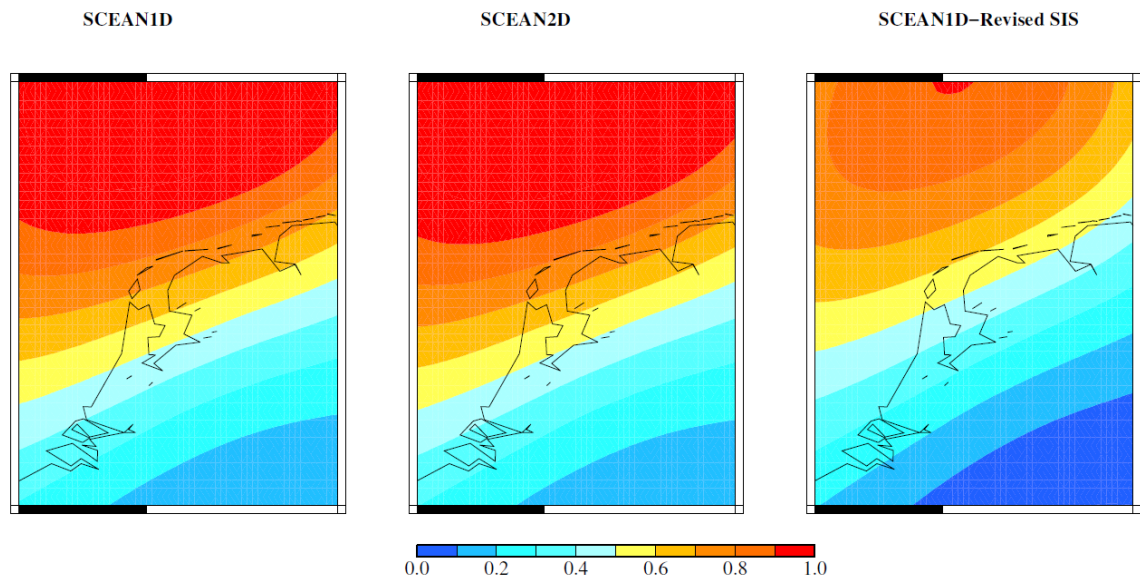
In 2018 is gewerkt met Paolo Stocchi (NIOZ), Sarah Bradley, Wouter van der Wal en Rosalie van Casteren (allen TUDelft) aan het optimaliseren van de GIA-kaarten voor Nederland en het inzichtelijk maken van de onzekerheden. Figuur 3.5 toont de GIA-modelrun die voor dit rapport gebruikt is als basiskaart (aangeleverd door Paolo Stocchi). De modelrun maakt gebruik van het ICE6g model (ijskaphistorie) van Peltier (2015). Zoals eerder aangegeven worden de komende jaren verschillende nieuwe actualisaties verwacht met betrekking tot GIA en kunnen de GIA-basiskaarten aangepast worden.

De onzekerheid rondom de gebruikte GIA-basiskaart kan op dit moment alleen geschat worden. In Hijma & Kooi (2018) is de onzekerheid omtrent GIA meegenomen door een GIA-kaart te presenteren die het bereik aan uitkomsten gaf van verschillende GIA-modellen. De verschillen tussen de modellen konden gerepresenteerd worden door het gemiddelde  $\pm 50\%$ . Er is daarom voor gekozen om voor GIA-modeluitkomsten een variatiecoëfficiënt van 50% aan te houden. De onzekerheid rondom GIA-bewegingen kan in de toekomst verkleind worden door andere een robuuste analyse van metingen van geologische bodemdaling: GIA levert veruit de grootste bijdrage aan geologische bodemdaling en het bodemdalingsspatroon dat uit de analyse volgt zal goeddeels het patroon van GIA zijn. Een andere manier om de onzekerheid te verkleinen is een statistische vergelijking van de resultaten van GIA-modellen voor de laatste 10.000 jaar met zeespiegelpunten voor die periode. Het model dat de opgetreden zeespiegelstijging in de laatste 10.000 jaar het beste beschrijft, zal ook voor de huidige tijd en de toekomst waarschijnlijk het meest betrouwbaar zijn. Het verschil tussen het betreffende model en de zeespiegelpunten geeft dan een indicatie van de onzekerheid rondom de uitkomsten van het GIA-model.



Figuur 3.5 Isostatische bodemdaling in Nederland (modelrun afkomstig van Paolo Stocchi). De groene sterren geven de locaties weer van de hoofdgetijdenstations.

Half september zijn daarnaast door Sarah Bradley (TuDelft) nieuwe modelresultaten aangeleverd uit het BRITICE-CHRONO project ([www.britice-chrono.org](http://www.britice-chrono.org)). Dit project heeft als doelen om het smelten van de Britse ijskap zo goed mogelijk te reconstrueren en om robuuste GIA-modellen voor Noordwest-Europa te maken. Nederland valt binnen het onderzoeksgebied en profiteert dus van deze inspanning. Sarah Bradley maakt hierbij inmiddels ook gebruik van de gevormde zeespiegeldatabase voor Nederland. Een eerste vergelijking van haar bestaande GIA-modeluitkomsten met de Nederlandse zeespiegelpunten laat een aanzienlijk verschil zien, terwijl de overeenkomst met de Engelse zeespiegelpunten (waarmee het model gekalibreerd is) zeer goed is. Er wordt momenteel door haar gewerkt aan een verklaring voor dit grote verschil en aanpassingen aan het model waardoor de verschillen minder groot worden en het vertrouwen in het model toe kunnen nemen. Voor het huidige (concept)rapport was er geen tijd meer om haar resultaten goed te verwerken. Hieronder wordt een samenvattend figuur (Figuur 3.6) getoond dat door haar aangeleverd en daardoor enigszins afwijkend is in lay-out. Het figuur wordt toch getoond om enerzijds de voortgang op dit gebied te tonen, anderzijds om het belang te laten van een verbetering van de GIA-modellen voor Nederland.

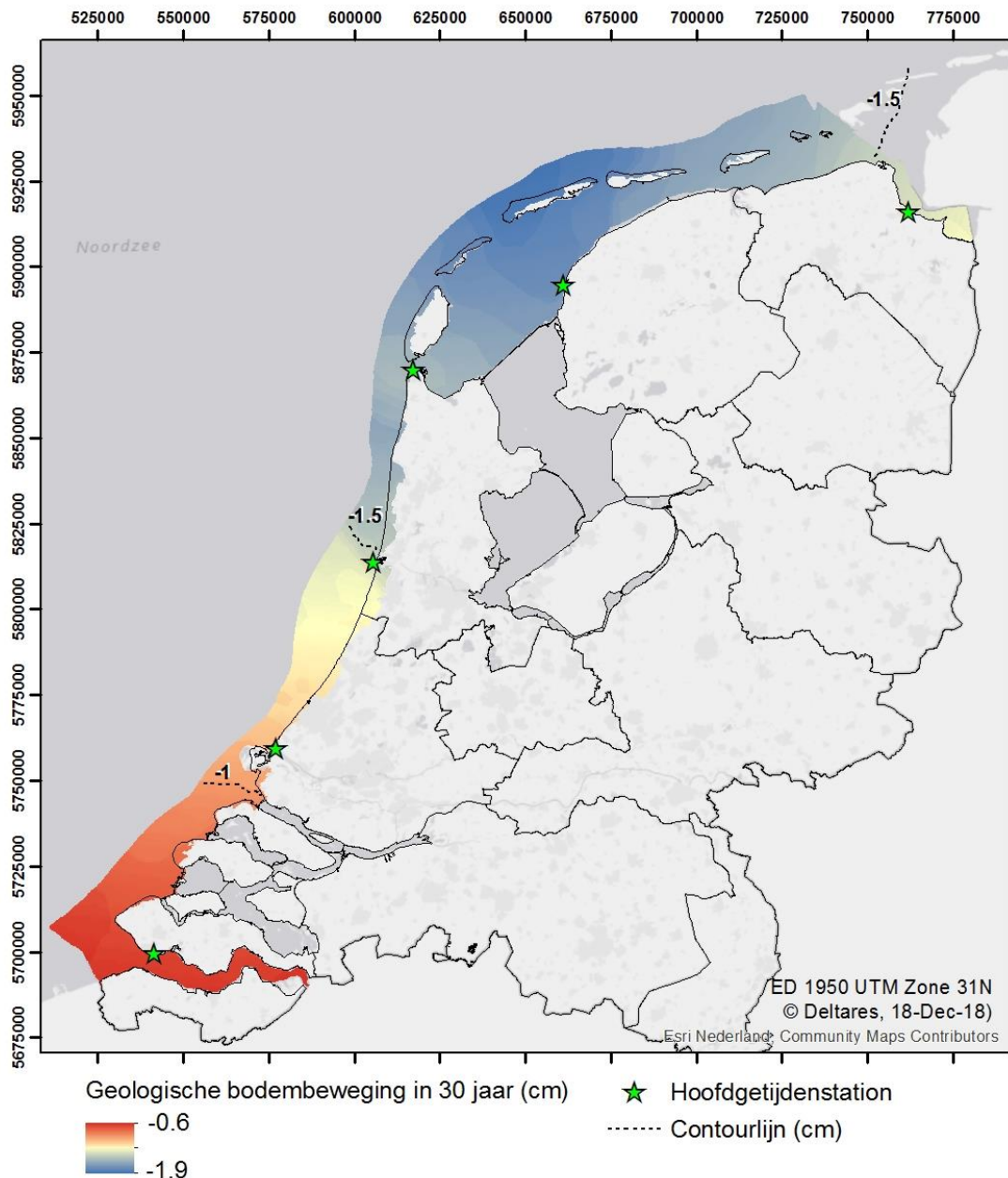


Figuur 3.6 GIA-modeluitkomsten zoals aangeleverd door Sarah Bradley. De getallen geven de bodemdalingssnelheid door isostatie weer (mm/jr). De snelheden zijn Zie onderstaande tekst voor toelichting.

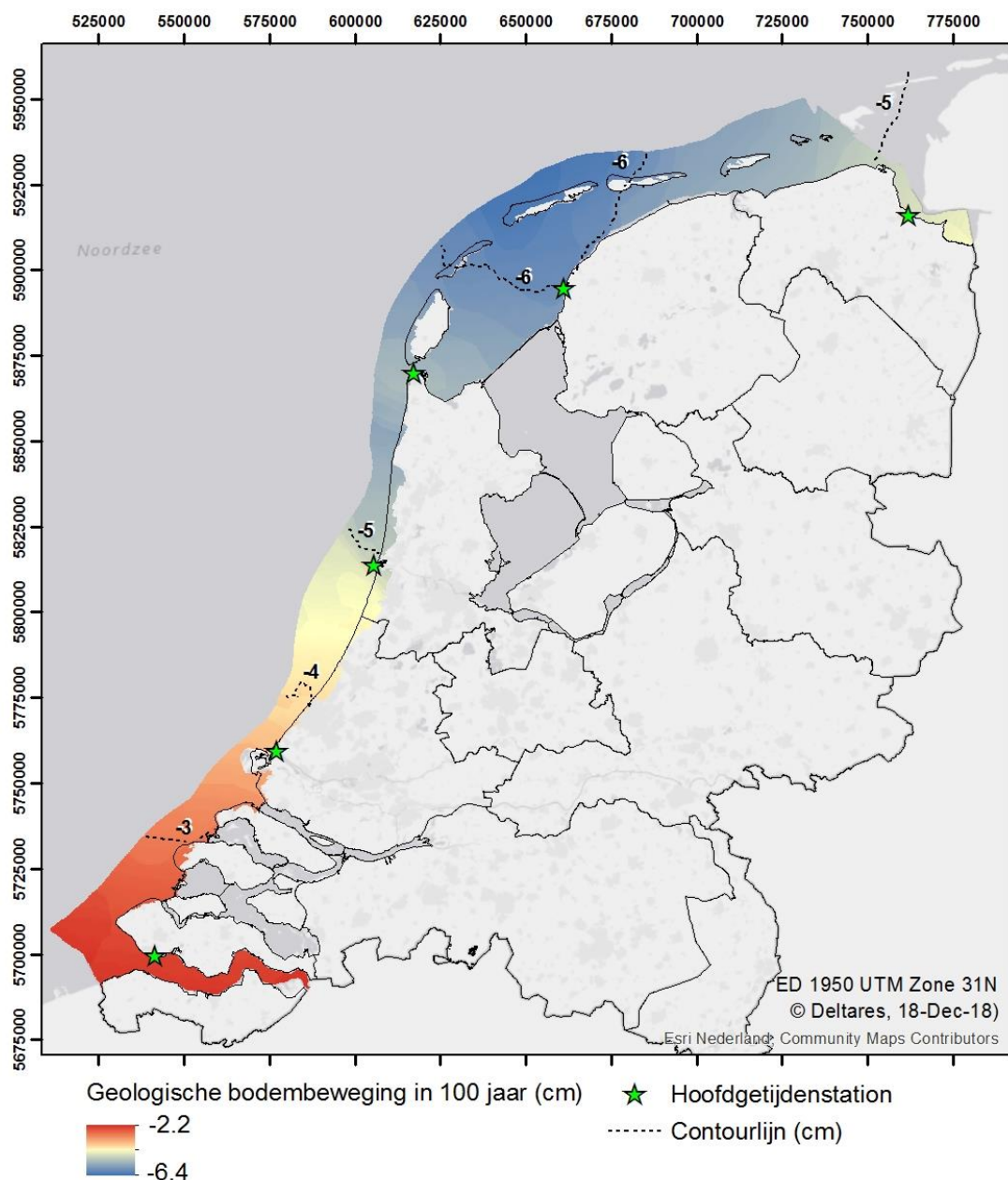
De GIA-modellen in het linker- en middenpaneel zijn alleen op de zeespiegeldata uit het Verenigd Koninkrijk gekalibreerd. Ze zijn vrijwel identiek in uitkomst, onder de motorkap van het model is alleen een anders ijskapmodel voor de Noordzee gebruikt. Voor Zeeland worden dalingssnelheden van circa 0.03-0.04 cm/jr berekend, voor het Waddengebied 0.07-0.08 cm/jr, slechts iets hoger dan de waarden uit Figuur 3.5. Het rechterpaneel toont de uitkomsten van een GIA-modelrun waarbij een eerste poging gedaan is om het model ook overeen te laten komen met de Nederlandse paleo-zeespiegelgegevens. Hierbij wordt een alternatief afsmeltscenario gebruikt, waarbij vanaf 16.000 jaar geleden de Scandinavische ijskap heel snel afsmelt. Het gevolg is een flink lagere bodemdalingssnelheid voor Nederland dan in de andere twee scenario's. De snelheid voor Zeeland wordt 0.02-0.03 cm/jr, voor het Waddengebied 0.05-0.06 cm/jr, een afname van bijna 30%. Hoewel dit alternatieve scenario slechts een eerste poging was, toont het wel het belang aan van het gebruik maken van het betrouwbare GIA-model.

### 3.1.3 Totaalkaart geologische bodembeweging: 30 en 100 jaar

Door het combineren van de basiskaarten voor bodembeweging door tektoniek en GIA kan een totaalkaart geologische bodembeweging gemaakt worden. Hieronder worden de totaalkaarten voor periodes van 30 en 100 jaar getoond. Deze kaarten zijn bruikbaar voor zowel het verleden als voor de toekomst, omdat aangenomen wordt dat op deze tijdschalen zowel de tektonische als de isostatische bodembeweging gemiddeld lineair verlopen. De gemiddelde geologische bodemdaling over de zes hoofdgetijdenstations bedraagt  $4.5 \pm 0.95$  cm/eeuw met een range van 2.4 cm/eeuw (Vlissingen) tot 6.0 cm/eeuw (Harlingen).



Figuur 3.7 Actuele geologische bodembeweging door tektoniek en GIA over een periode van 30 jaar. De snelheid neemt richting het noorden toe.



Figuur 3.8 Actuele geologische bodembeweging door tektoniek en isostasie over een periode van 100 jaar.

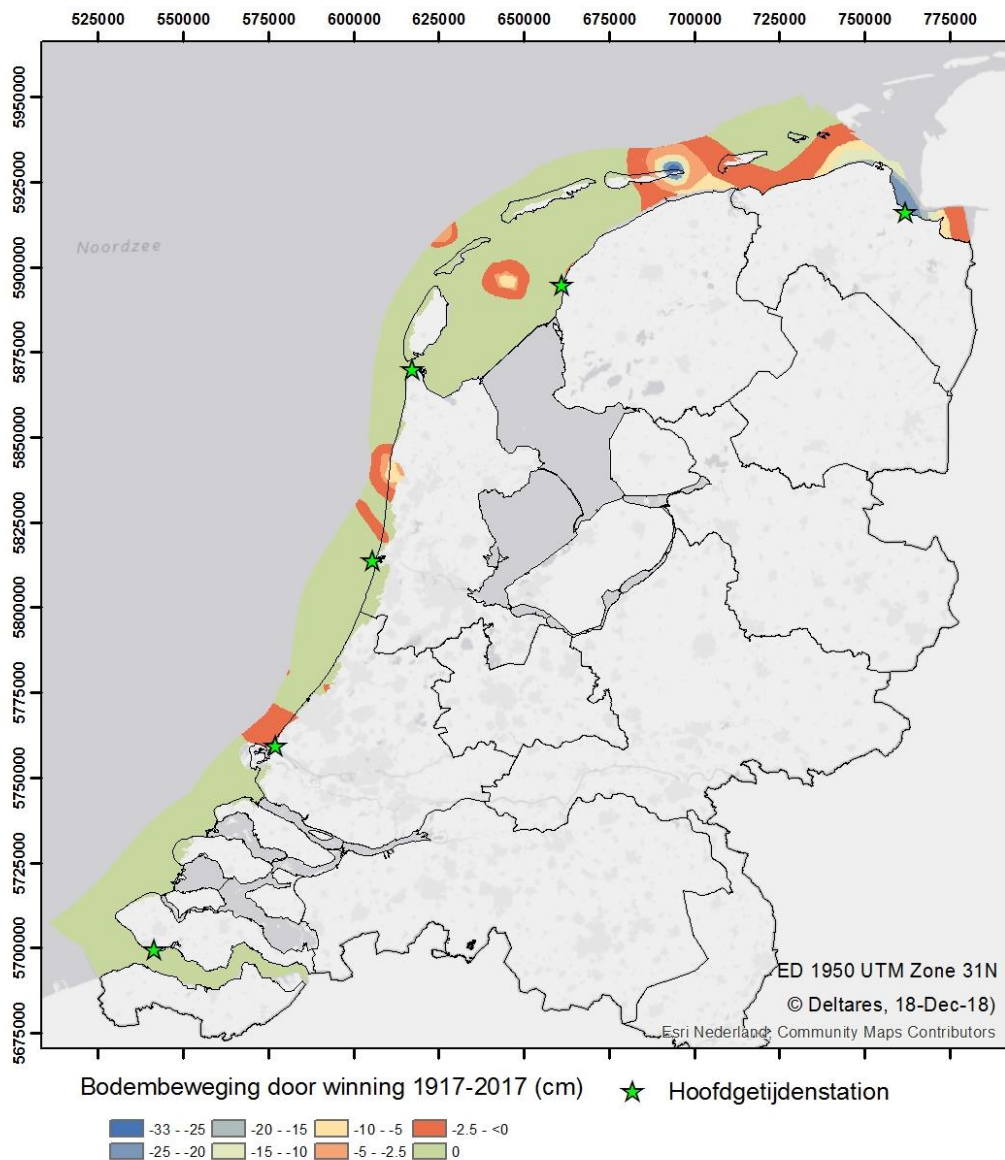
### 3.2 Bodemdaling door winning

In Hijma & Kooi (2018) is de bodemdaling door de winning van gas, olie en zout berekend op basis van beschikbare metingen en modelgegevens. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de reeds opgetreden bodemdaling, over de periode 1917-2017, en de verwachte bodemdaling tussen 2018-2050. Voor deze twee periodes zijn tevens kaarten van de bijbehorende bodemdalingsvolumes gepresenteerd. Deze kaarten zijn gemaakt op basis van contourlijnen van bodemdaling (zie Hijma en Kooi (2018) voor een beschrijving van de gevolgde werkwijze). Het rapport van Hijma & Kooi (2018) toont echter geen kaarten van de berekende hoeveelheid bodemdaling, alleen van de volumes. Hieronder worden voor de genoemde periodes dergelijke kaarten wel gepresenteerd, uitgebreid met kaarten voor de afgelopen 30 jaar. Hiertoe zijn de contourlijinkaarten van Hijma & Kooi (2018) omgezet naar rasterkaarten met celgroottes van

50x50 m. Hierbij is een eenvoudige aanpak gevolgd: alle rastercellen binnen twee contourlijnen hebben dezelfde waarde gekregen, namelijk de gemiddelde waarde van het gebied tussen de contourlijnen. Als voorbeeld: in het gebied tussen de contourlijnen van 2 en 4 cm bodemdaling hebben alle cellen de waarde van 3 cm gekregen. De fout die hierdoor ontstaat is minimaal (zie Hijma en Kooi, 2018). Een aanpak waarbij cellen gradueel van 2 naar 4 cm overgaan binnen het gebied is gezien de grote onzekerheden onnodig complex en leidt niet tot een beter of bruikbaar product.

### 3.2.1 1917-2017

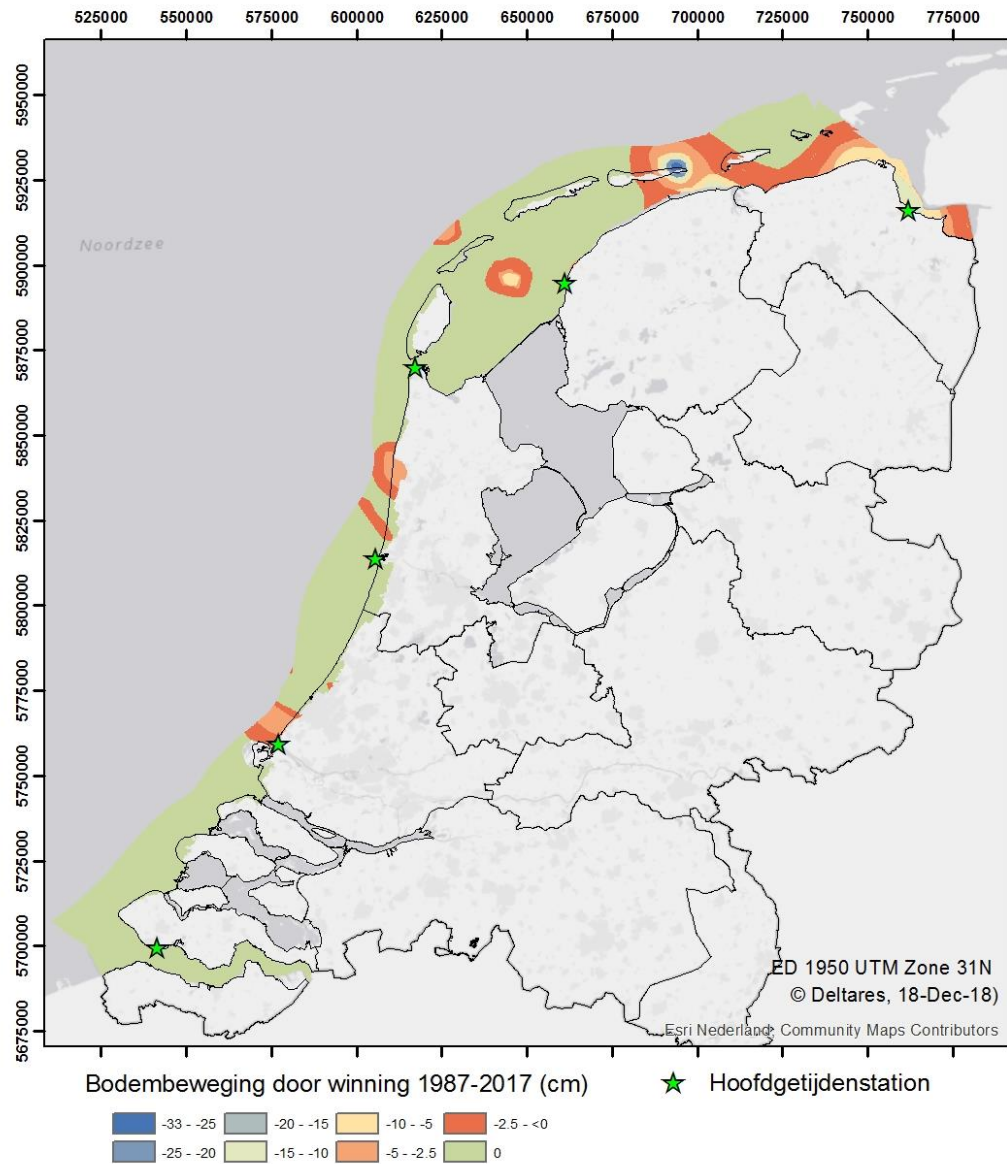
Figuur 3.9 toont de bodemdaling door de winning van gas, olie en zout in de periode 1917-2017. In lijn met Hijma en Kooi (2018) wordt de onzekerheid (variatiecoëfficiënt) rondom de bodemdalingsgetallen op  $\pm 25\%$  geschat.



Figuur 3.9 Bodembeweging door winning van gas, olie en zout in de periode 1917-2017.

## 3.2.2 1987-2017

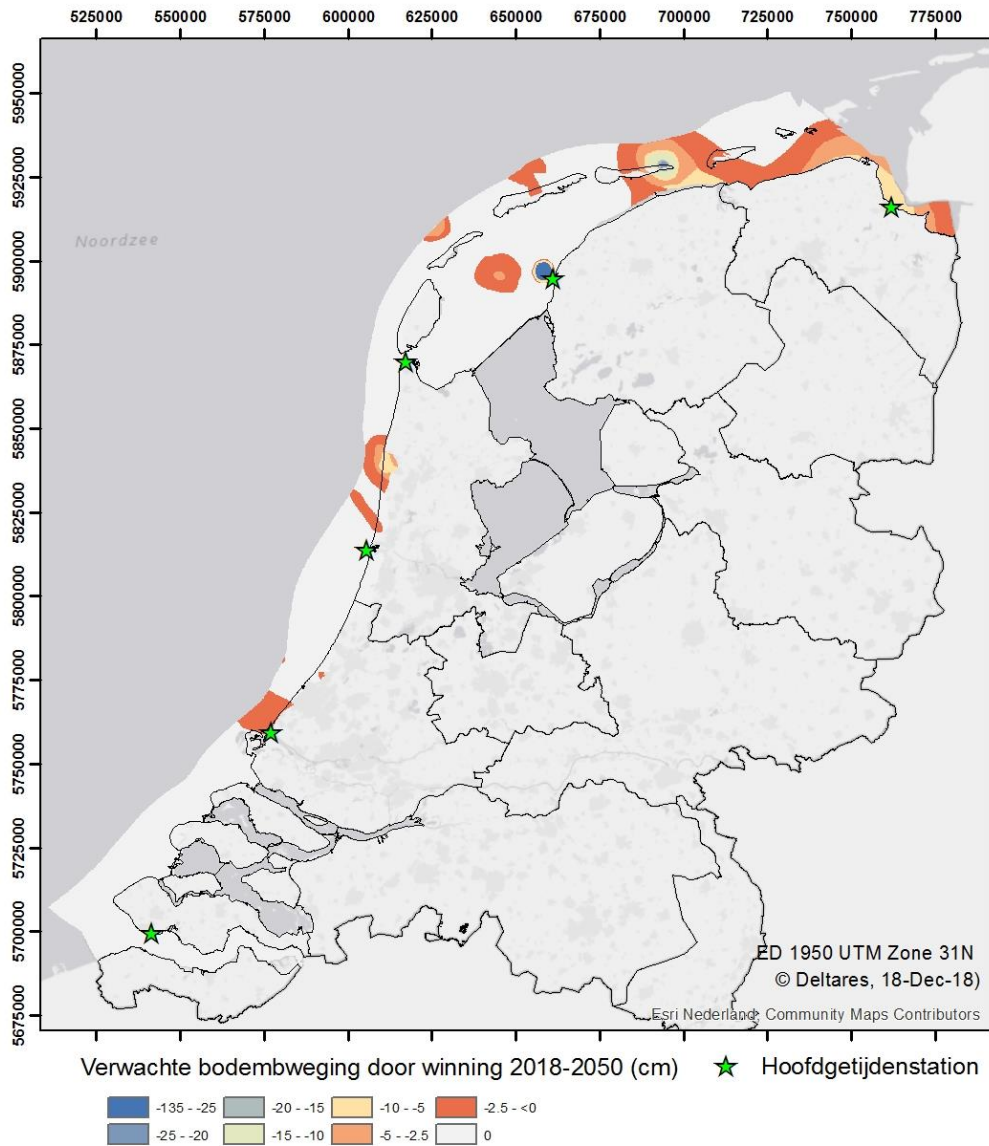
Figuur 3.10 toont de bodemdaling voor de winning van gas, olie en zout in de periode 1987-2017. In lijn met Hijma en Kooi (2018) wordt onzekerheid (variatiecoëfficiënt) rondom de bodemdalingen getallen op  $\pm 25\%$  geschat.



Figuur 3.10 Bodembeweging door winning van gas, olie en zout in de periode 1987-2017.

### 3.2.3 2018-2050

Figuur 3.11 toont de verwachte bodemdaling voor de winning van gas, olie en zout in de periode 2018-2050. In lijn met Hijma en Kooi (2018) wordt onzekerheid (variatiëcoëfficiënt) rondom de bodemdalingsetallen op  $\pm 50\%$  geschat. Deze hoge onzekerheid ten opzichte van de periode 1917-2017 komt zowel door de onzekerheid over het gemodelleerde gedrag van het reservoir, maar ook door de onzekerheid over de hoeveelheden die gewonnen gaan worden. Recent is bijvoorbeeld aangekondigd dat de gaswinning in het Groninger gasveld in 2030 volledig zal stoppen. Daarnaast staat in nieuwe winningsplannen van de NAM voor het Westland (Zuid-Holland) een voorstel om productie juist te verhogen. Door veranderende winningsplannen, als gevolg daarvan veranderende productie, zullen regelmatig nieuwe modelstudies verschijnen. In de voorgestelde bodemdalingsmonitor (Hijma en Kooi, 2018) kunnen dergelijke nieuwe modelstudies steeds verwerkt worden en kunnen nieuwe actualisaties van de bodemdalingskaarten gemaakt worden.



Figuur 3.11 Verwachte bodembeweging door winning van gas, olie en zout in de periode 2018-2050



### 3.3 Bodemdalingscomponenten en onzekerheden

De bodemdalingscomponenten die gebruikt zijn bij het opstellen van de kaarten en de ingeschatte variatiecoëfficiënten staan samengevat in Tabel 3.1

Tabel 3.1 Bodemdalingscomponenten en hun variatiecoëfficiënt (VC)

Bodemdalingscomponent	VC (%)	Opmerking
Tektoniek	50	Te verkleinen door analyse langjarige metingen
Isostasie	50	Te verkleinen door analyse langjarige metingen en/of vergelijk GIA-modellen met zeespiegelpunten
Winning (gas, olie, zout)		
1917-2017	25	Overgenomen uit Hijma en Kooi (2018)
1987-2017	25	Overgenomen uit Hijma en Kooi (2018)
2018-2050	50	Overgenomen uit Hijma en Kooi (2018)

### 3.4 Totale bodembeweging door geologische processen en winning

Hieronder worden kaarten getoond die voor de periodes 1917-2017, 1987-2017 en 2018-2050 de totale bodembeweging weergeven. Deze kaarten zijn gemaakt door de bewegingen onder invloed van tektoniek, isostasie en winning bij elkaar op te tellen. Voor elke periode wordt, in een aparte kaart, ook de onzekerheid rondom de bodembeweging gegeven. Deze is berekend op basis van de vermelde variatiecoëfficiënten in Tabel 3.1. In Tabel 3.2 wordt voor elk hoofdgetijdenstation de geologische bodemdaling, de daling door winning en de totale bodemdaling over de periodes 1917-2017 en 2018-2050 samengevat.

Tabel 3.2 Bodemdaling bij de hoofdgetijdenstations, uitgesplitst naar geologische bodemdaling en de bodemdaling door winning, voor de periodes 1916-2017 en 2018-2050.

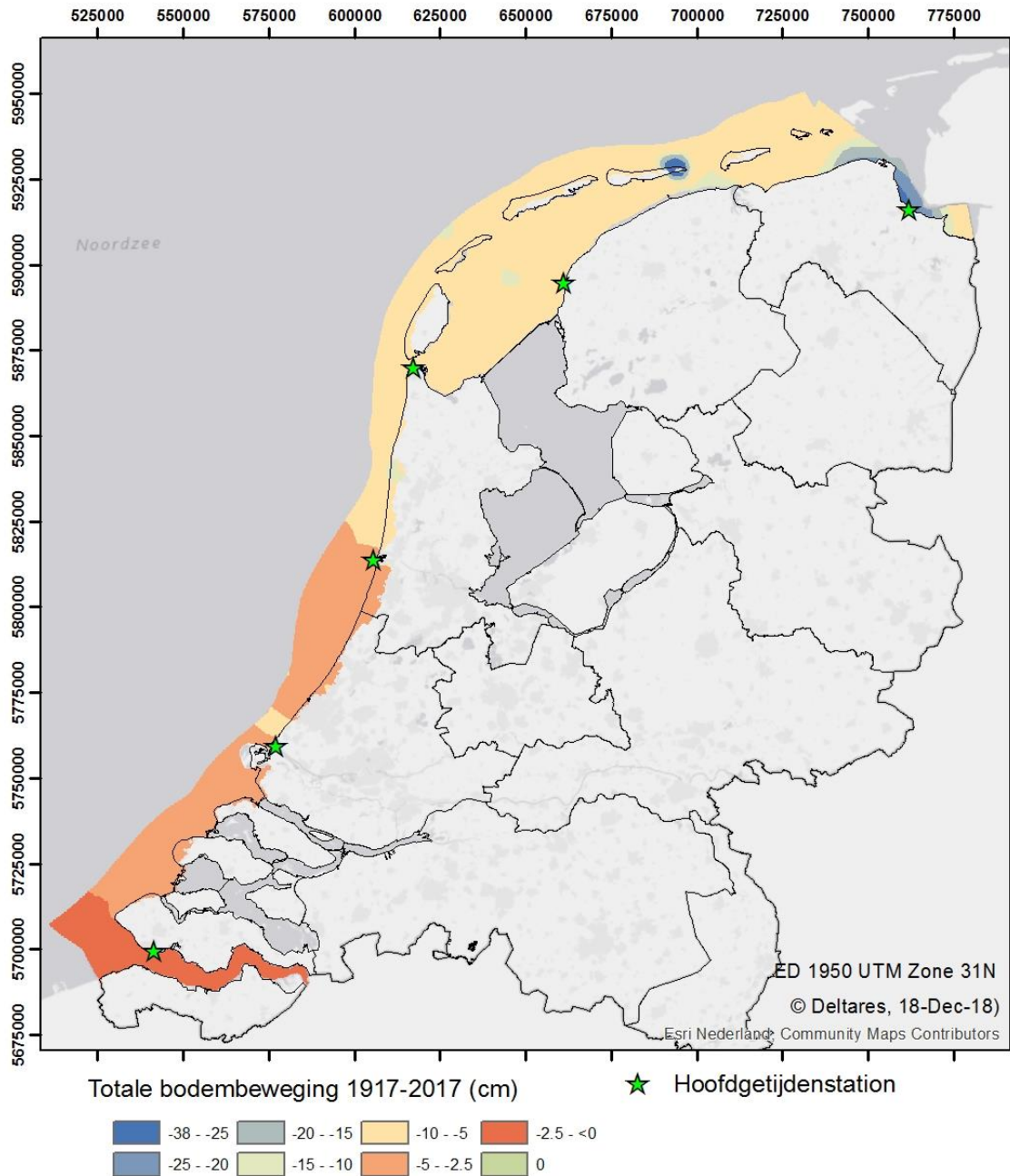
Station	Geologische bodemdaling	Bodemdaling door	Totale bodemdaling
	1917-2017   2018-2050 (cm)	Olie- en gaswinning 1917-2017   2018-2050 (cm)	1917-2017   2018-2050 (cm)
Delfzijl	4.8 ± 2.4   1.6 ± 0.8	24.0 ± 6.0   8.0 ± 4.0	28.8 ± 6.5   9.6 ± 4.1
Harlingen	6.0 ± 2.7   2.0 ± 0.9	0   0	6.0 ± 2.7   2.0 ± 0.9
Den Helder	5.4 ± 2.6   1.8 ± 0.8	0   0	5.4 ± 2.6   1.8 ± 0.8
IJmuiden	5.0 ± 2.2   1.6 ± 0.7	0   0	5.0 ± 2.2   1.6 ± 0.7
Hoek van Holland	3.7 ± 1.7   1.2 ± 0.6	1.0 ± 0.3   1.0 ± 0.5	4.7 ± 1.7   2.2 ± 0.8
Vlissingen	2.4 ± 1.2   0.8 ± 0.4	0   0	2.4 ± 1.2   0.8 ± 0.4

#### 3.4.1 1917-2017

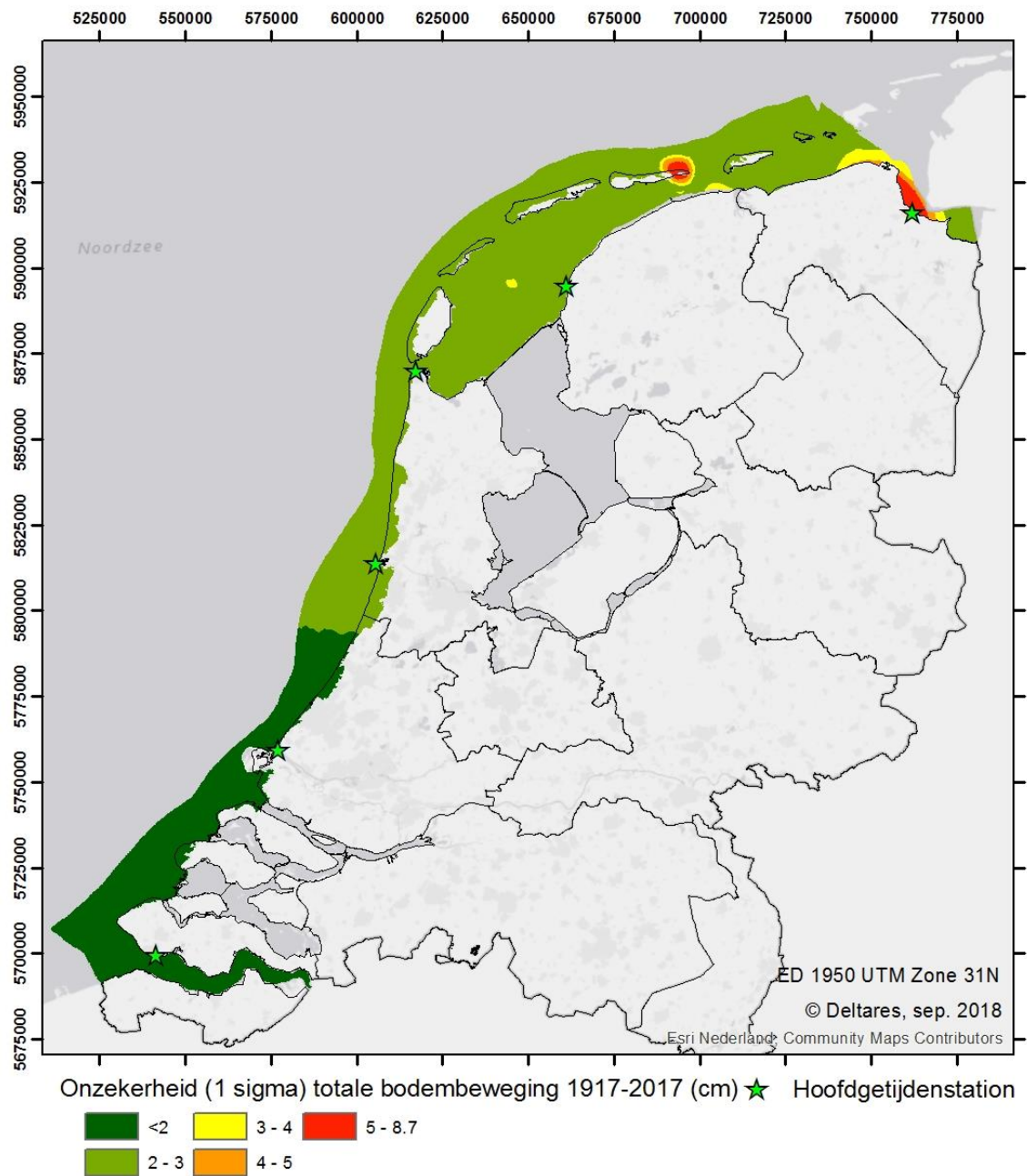
Figuur 3.12 toont de totale bodembeweging tussen 1917-2017 als gevolg van zowel geologische bodemdaling als daling door het winnen van gas, olie en/of zout. De algemene trend, een afname van bodemdaling richting het noorden, wordt bepaald door de geologische component. De grootste bodemdalingsschotels van de wingebieden komen duidelijk naar voren. Deze kaart kan eenvoudig geactualiseerd worden bij het beschikbaar komen van nieuwe basiskaarten. Voor deze periode zullen dit vooral aanpassingen zijn aan de GIA-basiskaart. De absolute onzekerheid bedraagt meestal enkele centimeters (Figuur 3.13), maar is aanzienlijk groter in de omgeving van de grote wingebieden.

### 3.4.2 1987-2017

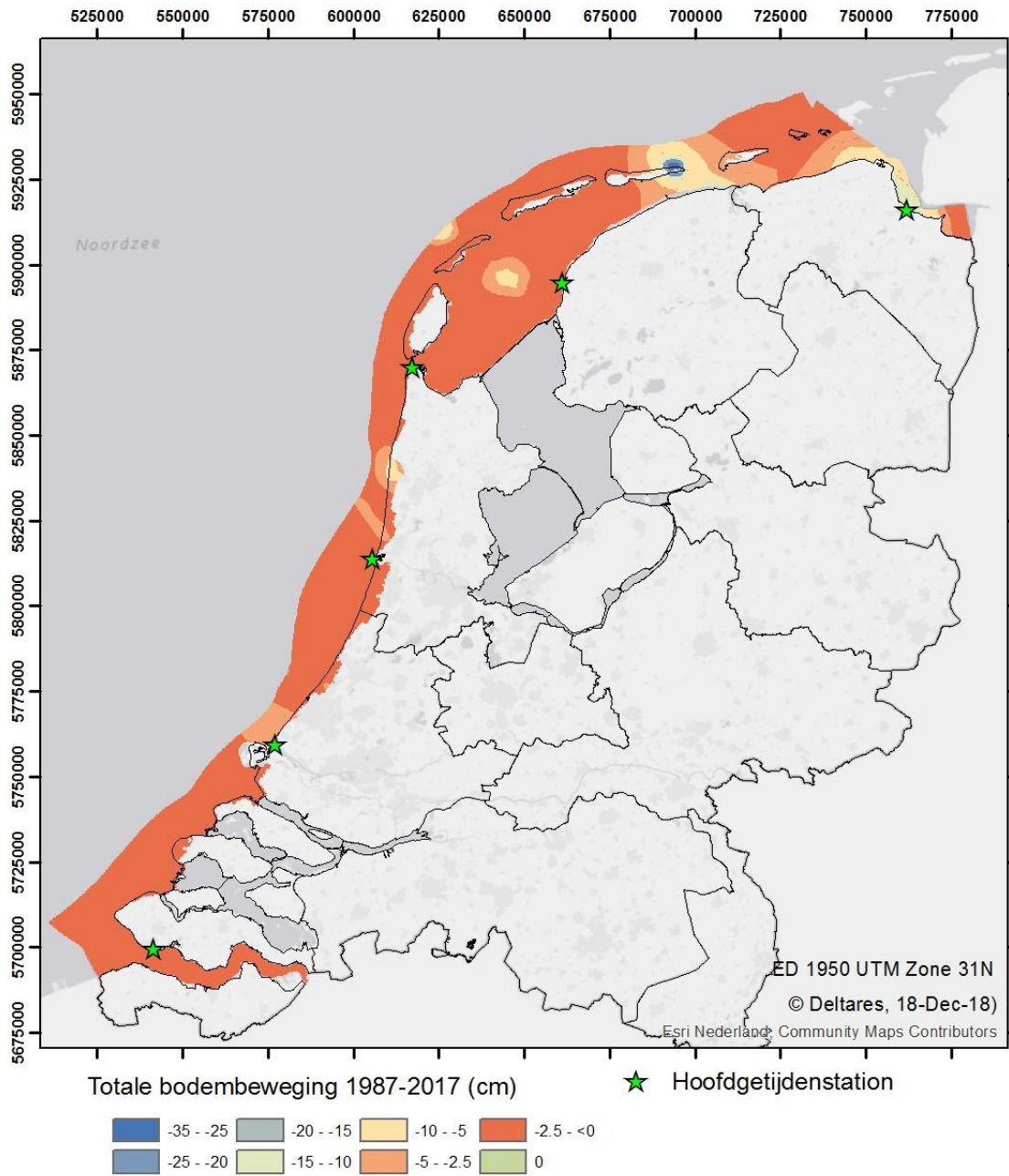
Voor deze periode zijn de totale bodembewegingen en de absolute onzekerheden kleiner dan voor de periode 1917-2017. Dit wordt met name veroorzaakt doordat de kortere periode leidt tot minder geologische bodembeweging, maar deels ook omdat verschillende wingebieden al producerend waren in de periode voor 1987. De algemene trend voor 1917-2017, een afname van de bodembeweging richting het noorden, is op deze tijdschaal en met deze legendaklassen niet duidelijk zichtbaar.



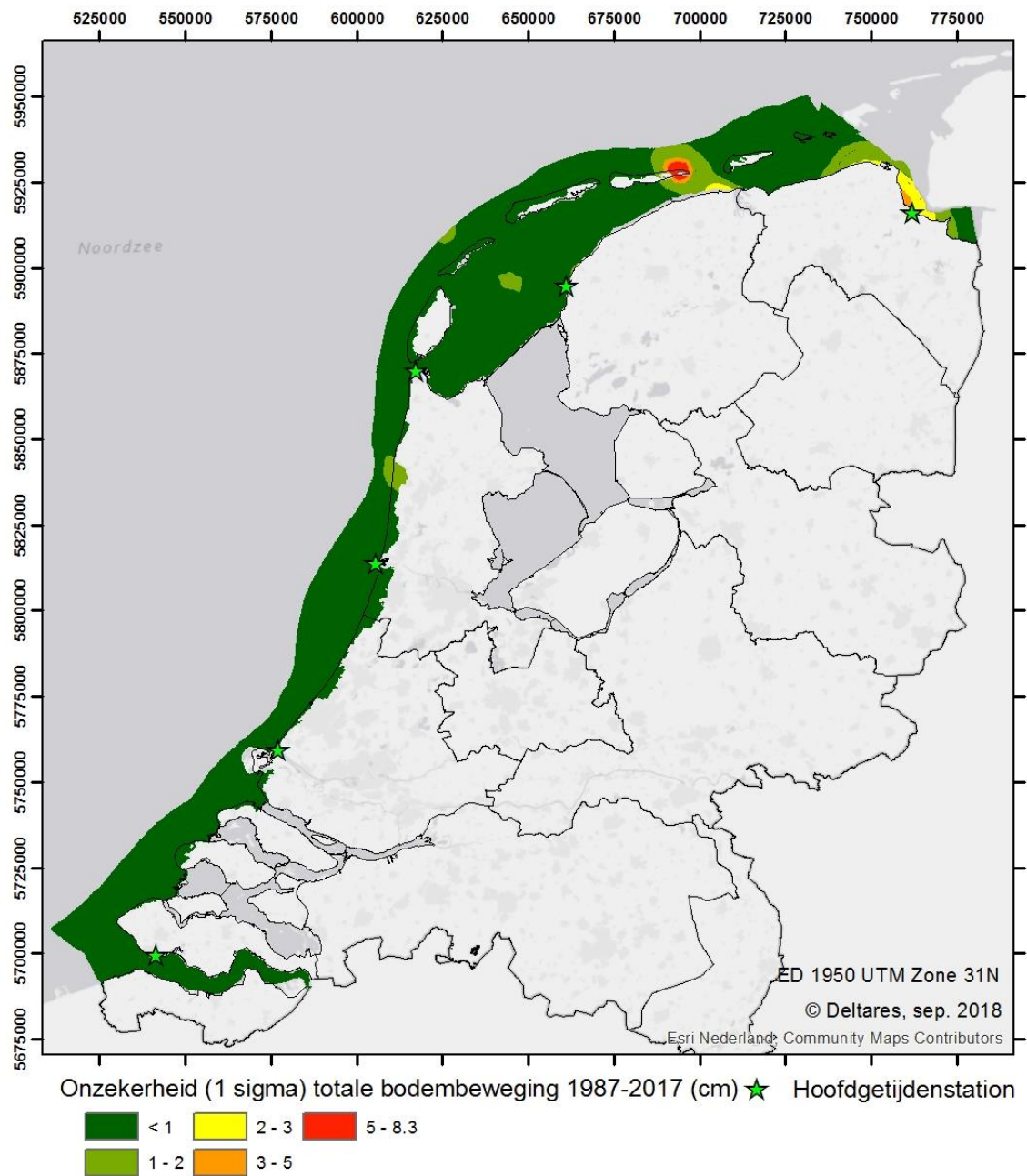
Figuur 3.12 Totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 1917-2017.



Figuur 3.13 Onzekerheid rondom de totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 1917-2017.



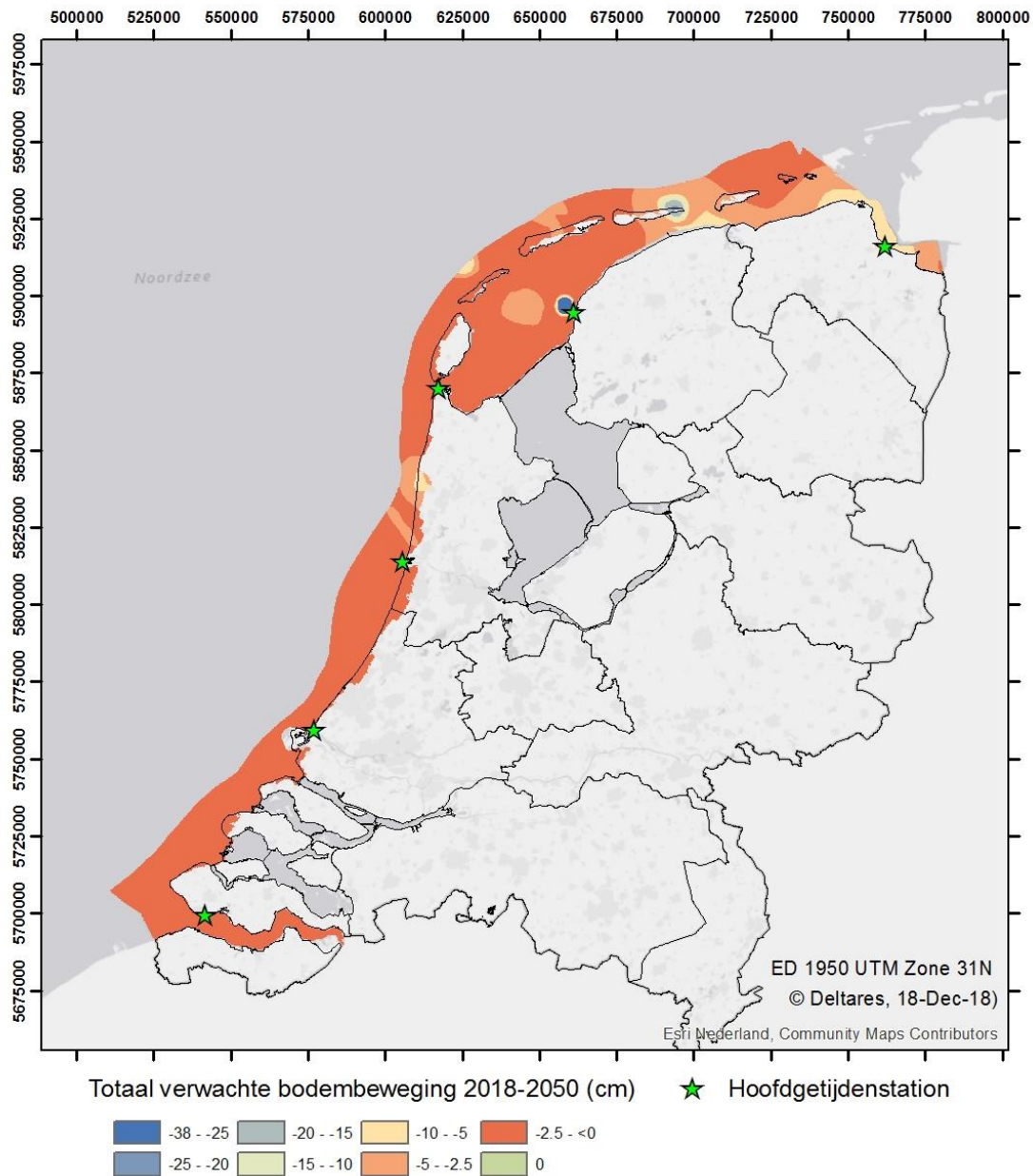
Figuur 3.14 Totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 1987-2017.



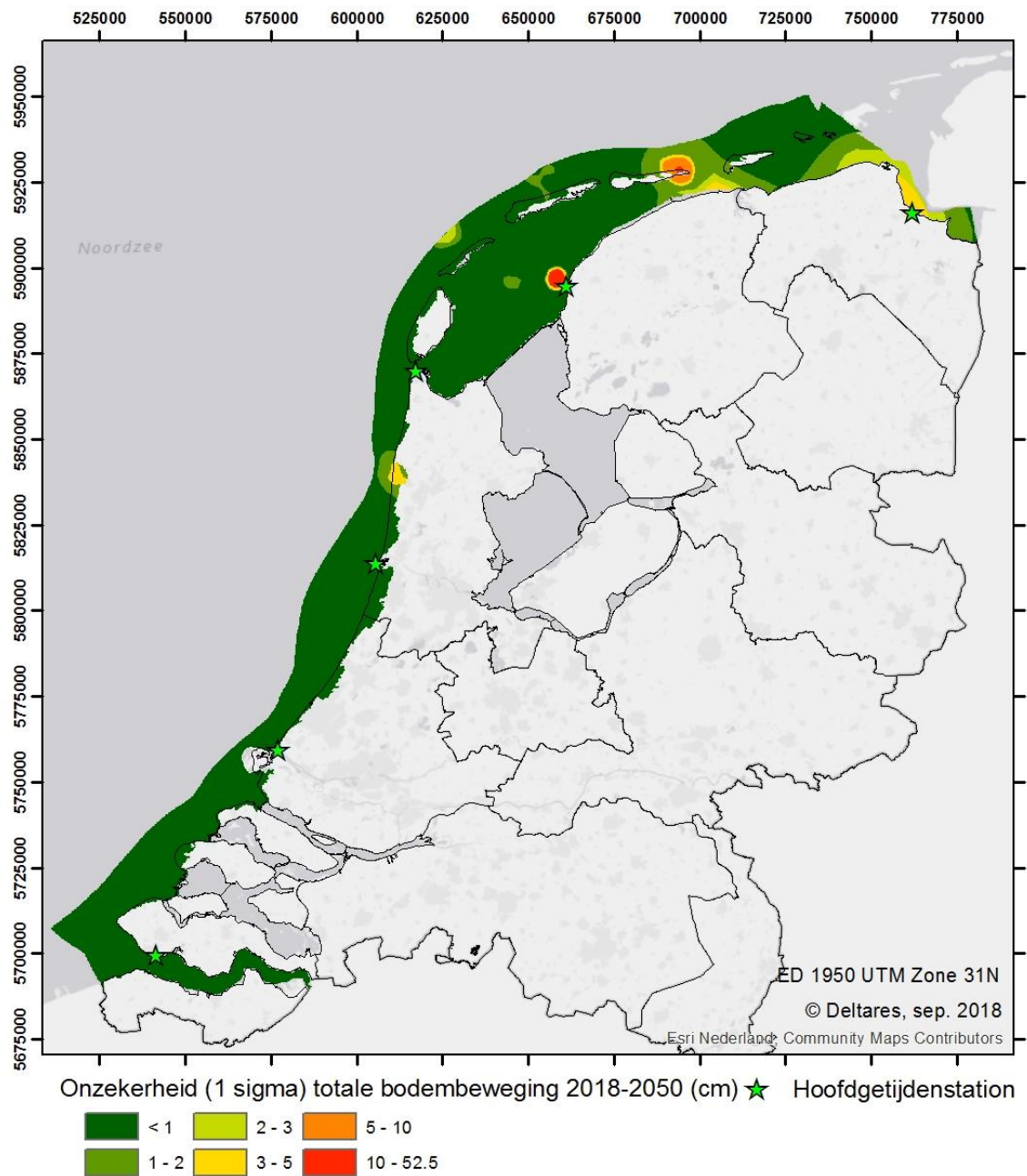
Figuur 3.15 Onzekerheid rondom de totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 1987-2017.

### 3.4.3 2018-2050

Figuur 3.16 toont de verwachte totale bodembeweging tussen 2018-2050 als gevolg van zowel geologische bodemdaling als daling door het winnen van gas, olie en/of zout. De gebruikte geologische bodembewegingssnelheid is hetzelfde als bij de andere periode. De wingebieden komen duidelijk naar voren, waarbij met name de gebieden rondom Ameland en de zoutwinning bij Harlingen eruit springen. Voor deze periode kunnen er toekomstige aanpassingen aan de GIA-basiskaart verwacht worden, maar vooral ook aan de (verwachte) bodemdaling bij het beschikbaar komen van nieuwe winningsplannen en/of metingen. De onzekerheden zijn hoger, omdat voor de daling door toekomstige winning een variatiecoëfficiënt van 50% gebruikt wordt, terwijl voor reeds voorbij winning een variatiecoëfficiënt van 25% gehanteerd wordt.



Figuur 3.16 Verwachte totale bodemdaling (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 2018-2050.



Figuur 3.17 Onzekerheid rondom de totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 2018-2050.

### 3.5 Bodembeweging per kustbeheerdeelgebied

In Hijma & Kooi (2018) zijn voor de verschillende wingebieden de volumes van bodemdaling berekend voor de periodes 1917-2017 en 2017-2050. Voor het huidige rapport zijn de totale bodemdalingsvolumes per deelsysteem van de kust bepaald, dus inclusief de bijdrage van geologische bodemdaling (Figuur 3.18). Het volume is berekend door, op basis van de basiskaarten, voor elk deelgebied de gemiddelde bodembeweging door tektoniek, GIA of winning te bepalen en bij elkaar op te tellen. Deze som wordt vervolgens vermenigvuldigd met het oppervlak van het deelgebied. Voor elk deelgebied is ook de onzekerheid berekend rondom het bodemdalingsvolume op basis van genoemde variatiecoëfficiënten. Belangrijk aandachtspunt hierbij is dat de vorm van de deelgebieden een samenvoeging is van twee bestanden van Rijkswaterstaat. Het ene bestand omvat de deelgebieden (deelsystemen\_kustsysteem\_incl\_kustfundament\_2008.shp, verkregen via Rena Hoogland) en het andere het kustfundament (Kustfundament\_def\_versie\_Barro\_1juni2011.shp, aanwezig bij Deltares). Met name de landsgrens van het kustfundament in de duingebieden van Noord-Holland en de Waddeneilanden verschilde sterk van elkaar in beide bestanden. Er is voor gekozen om de voor het kustfundament de 2011-versie aan te houden. Verwacht mag worden dat in de toekomst de precieze begrenzing van het kustfundament en de deelgebieden aan verandering onderhevig zijn. Het huidige project is zo opgezet dat het betrekkelijk weinig werk zal zijn om de getallen voor de nieuwe gebieden te actualiseren.

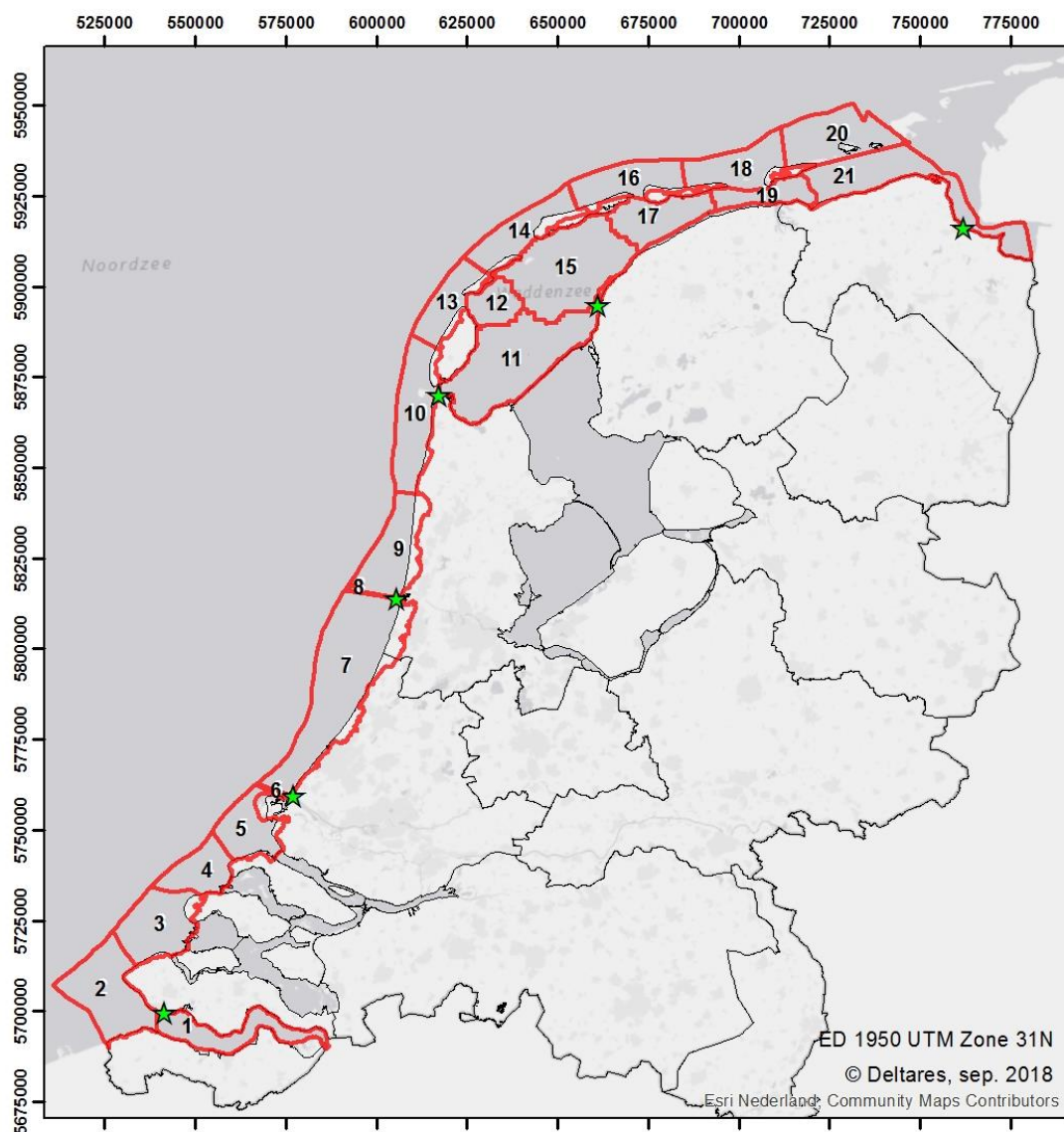
Figuur 3.19 toont voor ieder deelsysteem het bodemdalingsvolume in de periode 1917-2017. De deelsystemen verschillen sterk in grootte en dit heeft uiteraard invloed op het totale bodemdalingsvolume. Met name in het Waddenzeegebied zijn de deelgebieden relatief klein en hebben daardoor, ondanks de bodemdaling door winning, relatief lage bodemdalingsvolumes. Het deelgebied voor de Zuid-Hollandse kust is daarentegen erg groot en heeft daardoor, ondanks de geringe invloed van winning, een groot bodemdalingsvolume. In deelgebieden waar de geologische bodemdaling dominant is de onzekerheid ongeveer de helft van het totale volume, in gebieden waar bodemdaling door winning domineert is de onzekerheid relatief kleiner.

De bodemdalingsvolumes voor de periode 1987-2017 (Figuur 3.20) laten uiteraard lagere waarden zien dan voor de periode 1917-2017. De verwachte bodemdalingsvolumes voor de komende 30 jaar komen veel overeen met die van de laatste 30 jaar, waarbij het gebied rondom de nieuwe zoutwinning nabij Harlingen een uitzondering is: daar was weinig bodemdaling buitengaats, maar in de komende decennia zal daar lokaal meer dan 1 m bodemdaling op gaan treden (Figuur 3.21). De onzekerheden rondom de volumes zijn wel groter door de grotere onzekerheid omtrent de daling door winning.

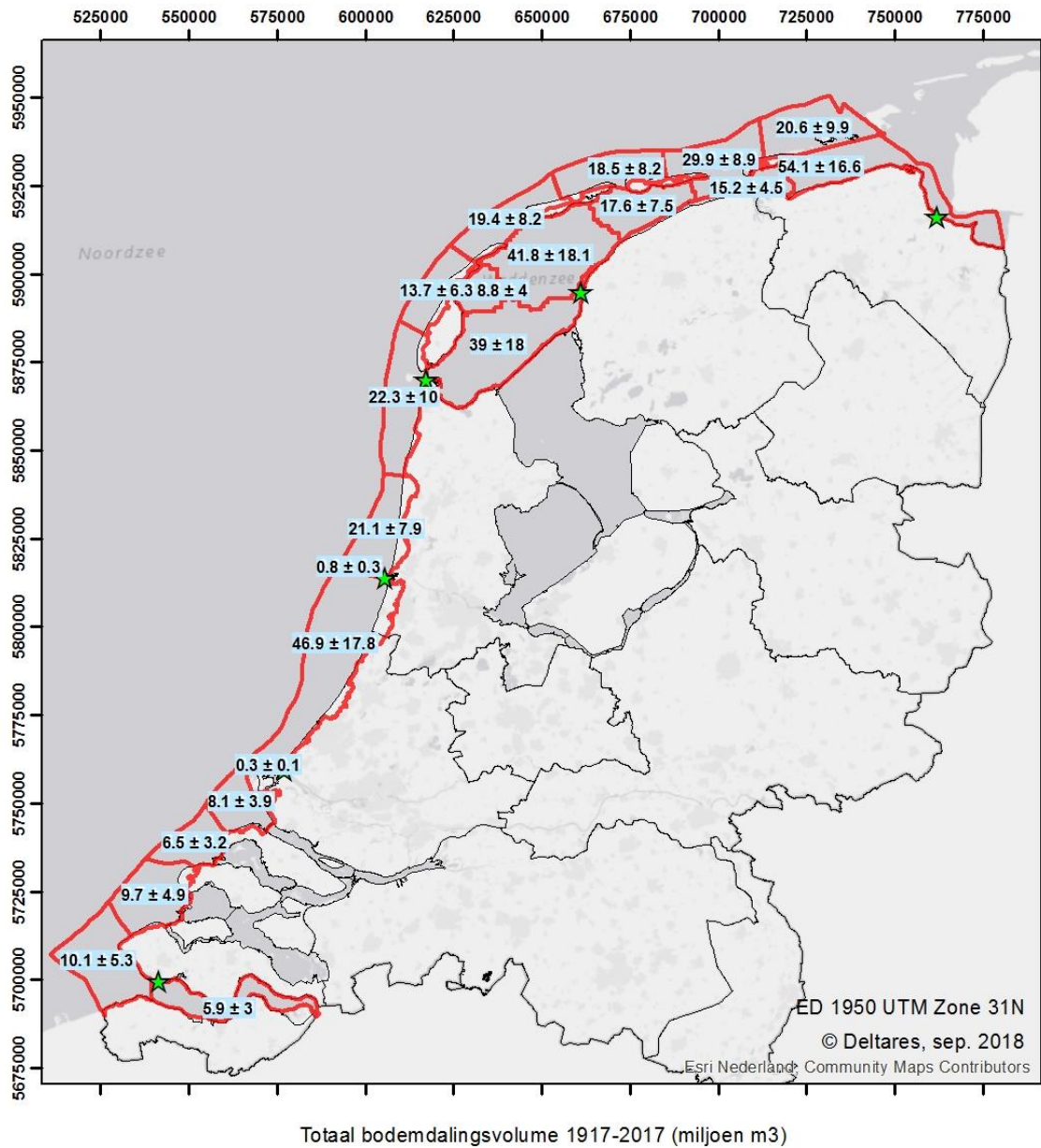
Voor elk deelgebied en voor elke periode zijn in Tabellen 3.3-3.5 de gemiddelde bodembeweging door tektoniek, GIA en winning weergegeven, alsmede de totale beweging, de gemiddelde bewegingssnelheid over die periode en het berekende bodemdalingsvolume. Tabellen 3.6-3.8 geven ten slotte voor de drie periodes voor zowel de deelgebieden, het gehele kustfundament en de getijdenbekkens het jaarlijks gemiddelde bodemdalingsvolume (geologie, winning, totaal).

In het onlangs verschenen artikel van Fokker et al. (2018) wordt specifiek gekeken naar bodemdaling in het Waddenzeegebied, waarbij de nadruk ligt op bodemdaling door winning van olie, gas en zout. Het artikel en dit rapport zijn anders van opzet en de gerapporteerde getallen zijn daardoor lastig met elkaar te vergelijken.

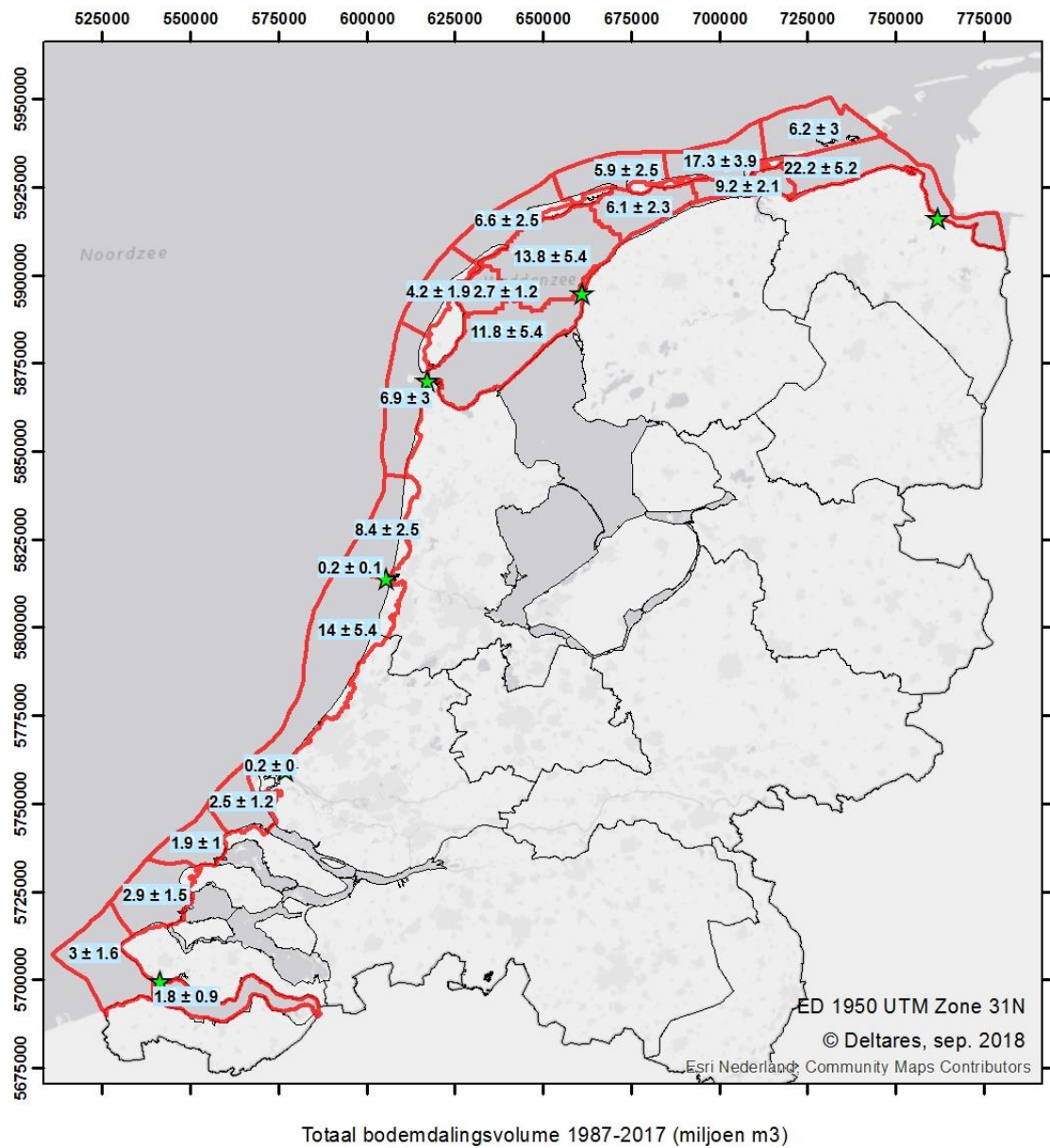




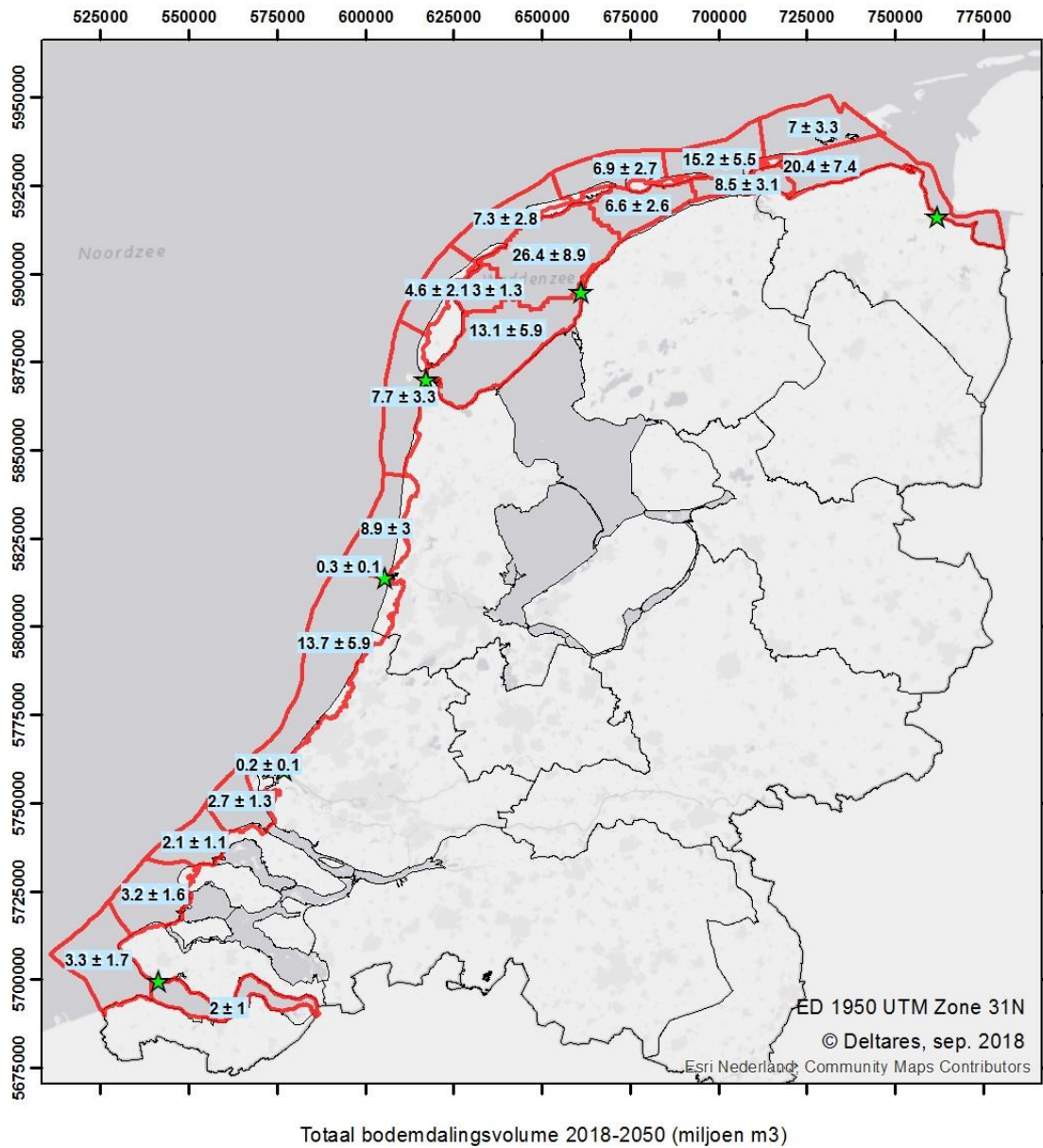
Figuur 3.18 Kaart met de deelgebieden voor kustonderhoud, zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat. Deze nummering wordt gebruikt in onderstaande tabellen, waar ook de naam van elk deelgebied getoond wordt.



Figuur 3.19 Het totale bodemdalingsvolume per deelgebied over de periode 1917-2017 met de bijbehorende onzekerheid.



Figuur 3.20 Het totale bodemdalingsvolume per deelgebied over de periode 1987-2017 met de bijbehorende onzekerheid.



Figuur 3.21 Het totale bodemdalingsvolume per deelgebied over de periode 2018-2050 met de bijbehorende onzekerheid.

Tabel 3.3 Bodembewegingsgetallen voor de deelgebieden voor de periode 1917-2017.

Deelgebied	Gemiddelde tektonische bodembeweging (cm)	Gemiddelde GIA-bodem-beweging (cm)	Gemiddeld bodembeweging door winning (cm)	Gemiddelde bodembewegings-snelheid (cm/yr)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> )
<b>1917-2017</b>					
Westerschelde (1)	0.06	-2.40	0.00	-0.023	5.9 ± 3.0
Westerschelde delta (2)	0.10	-2.50	0.00	-0.024	10.1 ± 5.3
Oosterschelde delta (3)	0.02	-2.80	0.00	-0.028	9.7 ± 4.9
Grevelingen delta (4)	-0.04	-3.06	0.00	-0.031	6.5 ± 3.2
Haringvliet delta (5)	-0.11	-3.26	0.00	-0.034	8.1 ± 3.9
Maasgeul (6)	-0.24	-3.44	-0.02	-0.037	0.3 ± 0.1
Zuid-Holland (7)	-0.33	-3.94	-0.95	-0.052	46.9 ± 17.8
IJgeul (8)	-0.42	-4.32	0.00	-0.047	0.8 ± 0.3
Noord-Holland (9)	-0.68	-4.49	-0.92	-0.061	21.1 ± 7.9
Zeegat van Texel (10)	-0.44	-5.01	-0.14	-0.056	22.3 ± 10
Marsdiep binnen (11)	-0.44	-5.20	-0.01	-0.057	39.0 ± 18.0
Eierlandse Gat binnen (12)	-0.54	-5.39	-0.06	-0.060	8.8 ± 4.0
Eierlandse Gat (13)	-0.42	-5.39	-0.07	-0.059	13.7 ± 6.3
Vliestroom (14)	-0.68	-5.59	-0.37	-0.066	19.4 ± 8.2
Vlie binnen (15)	-0.64	-5.47	-0.26	-0.064	41.8 ± 18.1
Amelanders Zeegat (16)	-0.62	-5.64	-0.18	-0.064	18.5 ± 8.2
Amelanders Zeegat binnen (17)	-0.40	-5.52	-0.53	-0.064	17.6 ± 7.5
Friesche Zeegat (18)	-0.18	-5.51	-4.52	-0.102	29.9 ± 8.9
Friesche Zeegat binnen (19)	-0.15	-5.39	-4.27	-0.098	15.2 ± 4.5
Eems Dollard (20)	-0.13	-5.35	-0.08	-0.056	20.6 ± 9.9
Eems Dollard binnen (21)	-0.03	-5.06	-6.05	-0.111	54.1 ± 16.6

Tabel 3.4 Bodembewegingsgetallen voor de deelgebieden voor de periode 1987-2017.

Deelgebied	Gemiddelde tektonische bodembeweging (cm)	Gemiddelde GIA-bodem-beweging (cm)	Gemiddeld bodembeweging door winning (cm)	Gemiddelde bodemwegings-snelheid (cm/yr)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> )
<b>1987-2017</b>					
Westerschelde (1)	0.02	-0.72	0.00	-0.023	1.8 ± 0.9
Westerschelde delta (2)	0.03	-0.75	0.00	-0.024	3 ± 1.6
Oosterschelde delta (3)	0.01	-0.84	0.00	-0.028	2.9 ± 1.5
Grevelingen delta (4)	-0.01	-0.92	0.00	-0.031	1.9 ± 1.0
Haringvliet delta (5)	-0.03	-0.98	-0.03	-0.035	2.5 ± 1.2
Maasgeul (6)	-0.07	-1.03	-1.91	-0.100	0.2 ± 0.1
Zuid-Holland (7)	-0.10	-1.18	-0.28	-0.052	14 ± 5.4
IJgeul (8)	-0.12	-1.30	0.00	-0.047	0.2 ± 0.1
Noord-Holland (9)	-0.20	-1.35	-0.87	-0.081	8.4 ± 2.5
Zeegat van Texel (10)	-0.13	-1.50	-0.10	-0.058	6.9 ± 3.0
Marsdiep binnen (11)	-0.13	-1.56	-0.02	-0.057	11.8 ± 5.4
Eierlandse Gat binnen (12)	-0.16	-1.62	-0.07	-0.062	2.7 ± 1.2
Eierlandse Gat (13)	-0.13	-1.62	-0.06	-0.060	4.2 ± 1.9
Vliestroom (14)	-0.20	-1.68	-0.37	-0.075	6.6 ± 2.5
Vlie binnen (15)	-0.19	-1.64	-0.26	-0.070	13.8 ± 5.4
Amelander Zeegat (16)	-0.19	-1.69	-0.16	-0.068	5.9 ± 2.5
Amelander Zeegat binnen (17)	-0.12	-1.66	-0.48	-0.075	6.1 ± 2.3
Frische Zeegat (18)	-0.06	-1.65	-4.22	-0.198	17.3 ± 3.9
Frische Zeegat binnen (19)	-0.05	-1.62	-4.28	-0.198	9.2 ± 2.1
Eems Dollard (20)	-0.04	-1.61	-0.04	-0.056	6.2 ± 3.0
Eems Dollard binnen (21)	-0.01	-1.52	-3.05	-0.153	22.2 ± 5.2

Tabel 3.5 Bodembewegingsgetallen voor de deelgebieden voor de periode 2018-2050.

Deelgebied	Gemiddelde tektonische bodembeweging (cm)	Gemiddelde GIA-bodem-beweging (cm)	Gemiddeld bodembeweging door winning (cm)	Gemiddelde bodembewegings-snelheid (cm/yr)	Totale bodemdalingvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> )
<b>2018-2050</b>					
Westerschelde (1)	0.02	-0.79	0.00	-0.023	2.0 ± 1.0
Westerschelde delta (2)	0.03	-0.82	0.00	-0.024	3.3 ± 1.7
Oosterschelde delta (3)	0.01	-0.92	0.00	-0.028	3.2 ± 1.6
Grevelingen delta (4)	-0.01	-1.01	0.00	-0.031	2.1 ± 1.1
Haringvliet delta (5)	-0.04	-1.07	-0.02	-0.034	2.7 ± 1.3
Maasgeul (6)	-0.08	-1.13	-0.95	-0.065	0.2 ± 0.1
Zuid-Holland (7)	-0.11	-1.30	-0.11	-0.046	13.7 ± 5.9
IJgeul (8)	-0.14	-1.43	0.00	-0.047	0.3 ± 0.1
Noord-Holland (9)	-0.23	-1.48	-0.86	-0.078	8.9 ± 3.0
Zeegat van Texel (10)	-0.15	-1.65	-0.12	-0.058	7.7 ± 3.3
Marsdiep binnen (11)	-0.15	-1.72	-0.04	-0.058	13.1 ± 5.9
Eierlandse Gat binnen (12)	-0.18	-1.78	-0.07	-0.062	3.0 ± 1.3
Eierlandse Gat (13)	-0.14	-1.78	-0.06	-0.060	4.6 ± 2.1
Vliestroom (14)	-0.22	-1.85	-0.43	-0.076	7.3 ± 2.8
Vlie binnen (15)	-0.21	-1.80	-2.01	-0.122	26.4 ± 8.9
Amelanders Zeegat (16)	-0.20	-1.86	-0.32	-0.072	6.9 ± 2.7
Amelanders Zeegat binnen (17)	-0.13	-1.82	-0.47	-0.073	6.6 ± 2.6
Friesche Zeegat (18)	-0.06	-1.82	-3.33	-0.158	15.2 ± 5.5
Friesche Zeegat binnen (19)	-0.05	-1.78	-3.63	-0.165	8.5 ± 3.1
Eems Dollard (20)	-0.04	-1.77	-0.08	-0.057	7.0 ± 3.3
Eems Dollard binnen (21)	-0.01	-1.67	-2.53	-0.128	20.4 ± 7.4

Tabel 3.6 Jaarlijks gemiddelde bodemdalingsvolumes voor de periode 1917-2017.

Gebied	Geologisch bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)
Westerschelde (1)	0.059 ± 0.030	0 ± 0	0.059 ± 0.03
Westerschelde delta (2)	0.101 ± 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 ± 0	0.081 ± 0.039
Maasgeul (6)	0.003 ± 0.001	0 ± 0	0.003 ± 0.001
Zuid-Holland (7)	0.384 ± 0.178	0.085 ± 0.043	0.469 ± 0.178
IJgeul (8)	0.008 ± 0.003	0 ± 0	0.008 ± 0.003
Noord-Holland (9)	0.179 ± 0.079	0.032 ± 0.016	0.211 ± 0.079
Zeegat van Texel (10)	0.218 ± 0.100	0.006 ± 0.003	0.223 ± 0.1
Marsdiep binnen (11)	0.389 ± 0.180	0.001 ± 0.000	0.39 ± 0.18
Eierlandse Gat binnen (12)	0.088 ± 0.040	0.001 ± 0.000	0.088 ± 0.04
Eierlandse Gat (13)	0.136 ± 0.063	0.002 ± 0.001	0.137 ± 0.063
Vliestroom (14)	0.183 ± 0.082	0.011 ± 0.005	0.194 ± 0.082
Vlie binnen (15)	0.401 ± 0.181	0.017 ± 0.009	0.418 ± 0.181
Amelander Zeegat (16)	0.180 ± 0.082	0.005 ± 0.003	0.185 ± 0.082
Amelander Zeegat binnen (17)	0.161 ± 0.075	0.014 ± 0.007	0.176 ± 0.075
Friesche Zeegat (18)	0.166 ± 0.081	0.132 ± 0.066	0.299 ± 0.089
Friesche Zeegat binnen (19)	0.086 ± 0.042	0.066 ± 0.033	0.152 ± 0.045
Eems Dollard (20)	0.203 ± 0.099	0.003 ± 0.002	0.206 ± 0.099
Eems Dollard binnen (21)	0.247 ± 0.123	0.294 ± 0.147	0.541 ± 0.166
Getijdenbekkens	1.432 ± 0.671	0.393 ± 0.197	1.825 ± 0.672
- Waddenzee	- 1.372 ± 0.640	- 0.393 ± 0.197	- 1.766 ± 0.642
- Westerschelde	- 0.059 ± 0.030	- 0 ± 0	- 0.059 ± 0.030
Kustfundament	2.003 ± 0.940	0.275 ± 0.138	2.278 ± 0.940
Kustfundament en getijdenbekkens	3.435 ± 1.610	0.669 ± 0.334	4.104 ± 1.611



Tabel 3.7 Jaarlijks gemiddelde bodemdalingsvolumes voor de periode 1987-2017.

Gebied	Geologisch bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)
Westerschelde (1)	0.059 ± 0.03	0 ± 0	0.059 ± 0.03
Westerschelde delta (2)	0.101 ± 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	0.003 ± 0.001	0.083 ± 0.039
Maasgeul (6)	0.003 ± 0.001	0.004 ± 0.002	0.007 ± 0.002
Zuid-Holland (7)	0.384 ± 0.178	0.083 ± 0.042	0.467 ± 0.179
IJgeul (8)	0.008 ± 0.003	0 ± 0	0.008 ± 0.003
Noord-Holland (9)	0.179 ± 0.079	0.1 ± 0.05	0.279 ± 0.082
Zeegat van Texel (10)	0.218 ± 0.1	0.014 ± 0.007	0.231 ± 0.1
Marsdiep binnen (11)	0.389 ± 0.18	0.005 ± 0.002	0.394 ± 0.18
Eierlandse Gat binnen (12)	0.088 ± 0.04	0.004 ± 0.002	0.091 ± 0.04
Eierlandse Gat (13)	0.136 ± 0.063	0.005 ± 0.002	0.14 ± 0.063
Vliestroom (14)	0.183 ± 0.082	0.036 ± 0.018	0.219 ± 0.083
Vlie binnen (15)	0.401 ± 0.181	0.058 ± 0.029	0.459 ± 0.181
Amelander Zeegat (16)	0.18 ± 0.082	0.015 ± 0.008	0.196 ± 0.082
Amelander Zeegat binnen (17)	0.161 ± 0.075	0.043 ± 0.022	0.205 ± 0.076
Friesche Zeegat (18)	0.166 ± 0.081	0.411 ± 0.206	0.578 ± 0.131
Friesche Zeegat binnen (19)	0.086 ± 0.042	0.222 ± 0.111	0.307 ± 0.069
Eems Dollard (20)	0.203 ± 0.099	0.005 ± 0.003	0.208 ± 0.099
Eems Dollard binnen (21)	0.247 ± 0.123	0.494 ± 0.247	0.741 ± 0.174
Getijdenbekkens	1.432 ± 0.671	0.825 ± 0.413	2.257 ± 0.672
- Waddenzee	- 1.372 ± 0.640	- 0.825 ± 0.413	- 2.198 ± 0.643
- Westerschelde	- 0.059 ± 0.030	- 0 ± 0	- 0.059 ± 0.030
Kustfundament	2.003 ± 0.940	0.676 ± 0.338	2.679 ± 0.940
Kustfundament en getijdenbekkens	3.435 ± 1.610	1.102 ± 0.751	4.936 ± 1.611

Tabel 3.8 Jaarlijks gemiddelde bodemdalingsvolumes voor de periode 2018-2050.

Gebied	Geologisch bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)	Bodemdalingsvolume door winning ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)
Westerschelde (1)	0.059 ± 0.03	0 ± 0	0.059 ± 0.03
Westerschelde delta (2)	0.101 ± 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)	0.003 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.005 ± 0.002
Zuid-Holland (7)	0.384 ± 0.178	0.03 ± 0.015	0.414 ± 0.178
IJgeul (8)	0.008 ± 0.003	0 ± 0	0.008 ± 0.003
Noord-Holland (9)	0.179 ± 0.079	0.091 ± 0.045	0.27 ± 0.091
Zeegat van Texel (10)	0.218 ± 0.1	0.015 ± 0.007	0.233 ± 0.101
Marsdiep binnen (11)	0.389 ± 0.18	0.009 ± 0.004	0.398 ± 0.18
Eierlandse Gat binnen (12)	0.088 ± 0.04	0.003 ± 0.002	0.091 ± 0.04
Eierlandse Gat (13)	0.136 ± 0.063	0.004 ± 0.002	0.14 ± 0.063
Vliestroom (14)	0.183 ± 0.082	0.038 ± 0.019	0.221 ± 0.084
Vlie binnen (15)	0.401 ± 0.181	0.4 ± 0.2	0.801 ± 0.269
Amelander Zeegat (16)	0.18 ± 0.082	0.028 ± 0.014	0.208 ± 0.083
Amelander Zeegat binnen (17)	0.161 ± 0.075	0.039 ± 0.019	0.2 ± 0.078
Frische Zeegat (18)	0.166 ± 0.081	0.295 ± 0.147	0.461 ± 0.168
Frische Zeegat binnen (19)	0.086 ± 0.042	0.171 ± 0.085	0.257 ± 0.095
Eems Dollard (20)	0.203 ± 0.099	0.009 ± 0.005	0.212 ± 0.099
Eems Dollard binnen (21)	0.247 ± 0.123	0.373 ± 0.186	0.62 ± 0.223
Getijdenbekkens	1.432 ± 0.671	0.993 ± 0.497	2.425 ± 0.675
- Waddenzee	- 1.372 ± 0.640	- 0.993 ± 0.497	- 2.366 ± 0.646
- Westerschelde	- 0.059 ± 0.030	- 0 ± 0	- 0.059 ± 0.030
Kustfundament	2.003 ± 0.940	0.513 ± 0.256	2.516 ± 0.940
Kustfundament en getijdenbekkens	3.435 ± 1.610	1.506 ± 0.753	4.941 ± 1.612

## 4 Discussie

### 4.1 Algemeen

Dit rapport toont de opgetreden en verwachte bodemdaling voor de verschillende deelgebieden langs de kust en kwantificeert daarbij de onzekerheden. Deze zijn fors, 50% voor de geologische bodemdaling en 25% voor opgetreden en 50% voor verwachte bodemdaling door winning. Verkleining van de onzekerheid voor de onzekerheid door GIA valt zeker te verwachten; verkleining van de onzekerheid omtrent toekomstige bodemdaling door winning is waarschijnlijk alleen mogelijk door directe koppeling van modeluitkomsten aan metingen, waarbij de metingen de verwachtingen bijsturen (*data-driven modelling*).

Verder bestaat de verwachting dat winst te behalen valt door het integreren van het bodemdalingsonderzoek voor het vaste land met het onderzoek naar bodemdaling van het kustfundament en de getijdenbekkens. Aangezien op beide vlakken hier binnen Deltares (deels overlappende) onderzoeksgroepen actief zijn valt dit relatief eenvoudig te realiseren. Daarnaast zal hierbij aansluiting gezocht worden bij de partijen die verantwoordelijk zijn voor de “Actuele bodemdalingskaart Nederland” die onlangs verschenen is (<https://bodemdalingskaart.nl>). De bodemdaling wordt daar uitgesplitst naar diepe bodemdaling en ondiepe bodemdaling, waarbij de diepe bodemdalingkaart in grote lijnen hetzelfde patroon zou moeten hebben als de geologische bodemdalingskaart in dit rapport. In 2019 zal dit nader onderzocht worden.

### 4.2 Bodemdaling na 2050

Dit rapport toont kaarten en gegevens voor de periode 2018-2050. Voor deze periode is aangenomen dat de geologische bodemwegingssnelheid niet veranderd is ten opzichte van 1917-2017. Ook voor de periode na 2050 zal deze snelheid niet wezenlijk veranderen. Dit rapport laat echter ook zien dat de onzekerheid over de bijdrage van GIA aan de bodembeweging groot is, terwijl in gebieden zonder daling door winning, GIA vrijwel de gehele geologische bodemdaling veroorzaakt. Toekomstige verbetering en verfijning van deze modellen zullen naar verwachting leiden tot andere dalingssnelheden en daarmee dus ook tot andere bodemdalingsvolumes. De verwachtingen voor de toekomst zullen om de zoveel jaar geactualiseerd kunnen worden. Er kan dan ook gekozen worden om de kaarten voor 1917-2017 en 1987-2017 opnieuw te berekenen.

In gebieden met grootschalige winning van bijvoorbeeld gas en zout, is de resulterende bodemdalingssnelheid meestal groter dan de snelheid van geologische bodemdaling. Een goede inschatting van deze snelheid is dus heel belangrijk. Voor na 2050 is dit echter nog heel lastig, zo niet onmogelijk. Dit komt allereerst doordat de winningsplannen voor die periode nog niet gemaakt en/of beschikbaar zijn. Duidelijk lijkt dat het Groningergasveld zeker na 2050 niet meer gebruikt wordt, maar mogelijk zal op andere plaatsen juist meer gas gewonnen gaan worden. Beschikbaar komende winningsplannen en bijbehorende modeluitkomsten kunnen steeds gebruikt worden voor een inschatting van de resulterende bodemdaling, waarbij het de voorkeur zou hebben om de door winbedrijven berekende bodemdalingssnelheden digitaal te kunnen ontvangen, zodat ze eenvoudig verwerkt kunnen worden. Een tweede punt is dat het bodemdalingsgedrag van gasvelden die niet meer actief zijn, of waaruit minder gewonnen wordt, nog niet goed begrepen wordt. De bodemdaling zal naar verwachting wel geleidelijk afnemen, maar met welke snelheid is lastig te voorspellen.

Voortdurende en verbeterde monitoring van de bodemdaling in Nederland kan hieraan een belangrijke bijdrage leveren, waarbij samenwerking tussen de verschillende groepen die met bodemdaling bezig zijn essentieel is.

#### 4.3 Gebruik van bodemdalingsvolumes in de rekenregel

In de nieuwe rekenregel (Van der Spek et al., 2015; Lodder, 2016) is bodemdaling van het kustfundament als aparte term opgenomen. Bodemdaling in de getijdenbekkens niet, maar aangezien deze wel van invloed is op de vraag naar sediment van de getijdenbekkens, is het belangrijk om bij modelberekeningen van de sedimentvraag van en de sedimentaanvoer naar de getijdenbekkens deze bodemdaling wel mee te nemen.

In de nieuwe rekenregel wordt verder de oppervlakte van het kustfundament vermenigvuldigd met de actuele, gemiddelde relatieve zeespiegelstijging zoals gemeten bij de zes hoofdgetijdenstations. Meestal wordt aangenomen dat de bodemdaling van de getijdenstations zelf al verwerkt zit in de meetreeks van gemeten waterstanden. Bij vier van zes stations treedt bodemdaling van het station zelf alleen op door geologische bodemdaling, maar de stations Hoek van Holland en Delfzijl vallen binnen bodemdalingsschotels door winning. Station Harlingen valt waarschijnlijk net buiten de bodemdalingsschotel van de recent gestarte zoutwinning in de Waddenzee, maar monitoring zal moeten uitwijzen of dit inderdaad zo is. Bij Hoek van Holland gaat het naar verwachting om enkele centimeters bodemdaling, uitgesmeerd over enkele decennia, terwijl bij Delfzijl de opgetreden bodemdaling door winning reeds meer dan 20 cm bedraagt en in de toekomst komt hier nog wel 5-10 cm bij. In de meetreeks van station Delfzijl is deze daling overigens niet zichtbaar, e is de meetreeks dus al gecorrigeerd. Dit laatste feit en de daarnaast toenemende onduidelijkheid over de mate waarin bodemdaling verwerkt zit in de gemeten zeespiegelstijging bij de getijdenstations heeft er toe geleid dat verschillende partijen (Deltares, RWS, TUDelft) momenteel bezig zijn om de hele keten van gemeten waterstand tot gepubliceerde meetreeks in beeld te brengen, inclusief de daarbij behorende onzekerheden. De uitkomst hiervan is van belang voor het invullen van de rekenregel: moet alleen het dalingsvolume door winning ingevuld worden of het gehele bodemdalingsvolume? Op deze vraag zal in 2019 een antwoord gegeven kunnen worden.

Er zijn verschillende mogelijkheden om bodemdaling binnen de nieuwe rekenregel mee te nemen. Een simpele optie is om te stellen dat de geologische bodemdaling verwerkt zit in het gemiddelde van de relatieve zeespiegelstijging over de zes stations en alleen het additionele bodemdalingsvolume door winning mee te nemen in de rekenregel. Voor de periode 2018-2050 is het bodemdalingsvolume in het kustfundament door winning  $27.5 \pm 13.8 \text{ Mm}^3$ , oftewel  $0.8 \pm 0.4 \text{ Mm}^3$  per jaar. In het getijdenbekken van de Waddenzee is het verwachte bodemdalingsvolume door winning over die periode  $39.3 \pm 19.7 \text{ Mm}^3$ , oftewel  $1.2 \pm 0.6 \text{ Mm}^3$  per jaar. Circa 75% van dit volume treedt op in Eems-Dollard binnengebied en 17% in het binnengebied van het Friesche Zeegat. Een complexere variant hierop is een differentiatie naar bijvoorbeeld getijdenstationregios en voor elke regio apart berekeningen uit te voeren voor het suppletievolume.

In theorie bestaat er ook de mogelijkheid om de meetreeksen van de getijdenstations te corrigeren voor bodemdaling en zo een meetreeks van absolute zeespiegelstijging te krijgen. De absolute zeespiegelstijging kan dan vermenigvuldigd worden met het oppervlak van het kustfundament. Aansluitend zou dan de gehele bodemdaling van het kustfundament, zowel door winning als geologische bodemdaling, gebruikt kunnen worden om het volume bodemdaling te berekenen en in de rekenregel in te vullen. Door de grote onzekerheden omtrent de mate van bodemdaling wordt dit echter niet aangeraden: er kan beter direct gewerkt worden met de daadwerkelijk gemeten (relatieve) zeespiegelstijging, maar dan moet goed bekend wat de feitelijke meting betekent.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport over bodemdaling langs de Nederlandse kust en in de getijdenbekkens is een vervolg op Hijma & Kooi (2018), een rapport waarin alle relevante bodemdalingscomponenten behandeld en zo goed mogelijk gekwantificeerd zijn. Het huidige rapport is een actualisatie en uitbreiding op het vorige rapport, waarbij onder andere meer aandacht is gegeven aan de kwantificatie van de onzekerheden. Daarnaast is de invloed van de grondwateronttrekking bij IJmuiden onderzocht. Hieronder worden de belangrijkste conclusies voor het huidige rapport gegeven.

### 5.1 Conclusies

- *Grondwateronttrekking en bodemdaling: casus IJmuiden*  
Een overblijvende vraag uit Hijma en Kooi (2018) was de bijdrage van de grootschalige grondwateronttrekking bij de hoogovens van IJmuiden aan bodemdaling. In het huidige rapport zijn op basis van een beperkt aantal beschikbare gegevens modelberekeningen gedaan voor verschillende scenario's. Hieruit volgt dat de meeste bodemdaling opgetreden zal zijn eind jaren '60 en begin jaren '70 en dat er momenteel geen verdere bodemdaling door grondwateronttrekking plaatsvindt. Volumeverlies van het kustfundament heeft dus 40-50 jaar geleden wel plaatsgevonden, maar is momenteel niet significant en wellicht zelfs afwezig.
- *Geologische bodemdaling*  
De gebruikte tektonische bodemdalingssnelheid is niet veranderd ten opzichte van het vorige rapport. Wel is de basis voor deze snelheid, een figuur uit Kooi et al. (1998), gedigitaliseerd naar een grid van 50x50 m en daarmee bruikbaar gemaakt voor verdere berekeningen. Voor de bodemdalingssnelheid door GIA is wel een nieuwe modeluitkomst gebruikt (50x50 m grid), maar ten opzichte van de eerder gebruikte waarden is er (nog) niet veel veranderd.

Daarnaast wordt er veel samengewerkt met GIA-modellereurs in Nederland om de modellen verder te verbeteren. Hierbij is de ontwikkelde zeespiegeldatabase voor Nederland beschikbaar gesteld aan de modellereurs om hun modellen te kunnen kalibreren. Voor de komende jaren bestaat de verwachting dat de GIA-modellen voor Nederland sterk verbeterd kunnen worden.

De geologische bodemdaling (tektoniek + GIA) laat zien dat de bodemdaling toeneemt van circa  $0.02 \pm 0.01$  cm/jr in Zeeland tot  $0.06 \pm 0.03$  cm/jaar in het Waddengebied.

- *Bodemdaling door winning*  
De kaarten die gebruikt zijn in Hijma & Kooi (2018) zijn omgezet naar een 50x50 m grid en daarnaast is er een nieuwe kaart gemaakt voor de periode 1987-2017. Voor de periode tot 2050 zijn sinds het vorige rapport geen nieuwe verwachtingen verschenen in winningsrapporten en derhalve is de kaart 2018-2050 niet veranderd. Gezien de aangekondigde aanpassingen in de winningsplannen mag verwacht worden dat deze kaart wellicht op korte termijn aangepast moet worden. De onzekerheid omtrent de verwachte bodemdaling door winning is 50%, voor reeds opgetreden bodemdaling 25%. Verkleining van de onzekerheid omtrent toekomstige bodemdaling door winning is waarschijnlijk alleen mogelijk door directe koppeling van modeluitkomsten aan metingen, waarbij de metingen de verwachtingen bijsturen (*data-driven modelling*).

- *Totale bodemdaling en bodemdalingsvolumes per deelgebied*  
De ontwikkeling van drie digitale basiskaarten (tektoniek, GIA, winning) met een grid van 50x50 m maakt het mogelijk om eenvoudig totaalkaarten te maken of per deelgebied berekeningen uit te voeren. Daarnaast kan een actualisatie van een van de basiskaarten snel leiden tot nieuwe totaalkaarten. Op de trend van een noordwaarts toenemende geologische bodemdaling zijn lokaal/regionaal bodemdalingsschotels door winning aanwezig. Grote schotels zijn de laatste 30-50 jaar ontstaan bij Bergen, in de westelijke Waddenzee, bij Ameland en in het Eems-Dollardgebied. Deze locaties blijven zakken de komende 30 jaar, waarbij een nieuwe schotel ontstaat ten westen van Harlingen door de recent gestart zoutwinning.

## 5.2 Aanbevelingen

In het vorige rapport zijn verschillende aanbevelingen gedaan. Deze aanbevelingen worden hier herhaald en aangevuld.

- *Gericht(er) monitoren van bodemdaling*  
Er bestaat in verschillende gebieden nog veel onzekerheid over de mate van bodemdaling en de bijdrage daaraan van de verschillende componenten. Daarnaast bestaat er onduidelijkheid over hoe de bodemdaling van het getijdenstation zelf verwerkt zit in de reeks van gemeten waterstanden. Met behulp van gerichte monitoring zou een belangrijk deel van de onzekerheid weggenomen kunnen worden. De monitoring zou kunnen bestaan uit 1) het plaatsen van diep-gefundeerde ondergrondse peilmerken en extensometers om de geologische bodemdaling beter te meten en 2) een gerichte en structurele studie met inSAR-data om vragen te beantwoorden rondom de kanteling van de Hondsbossche Zeewering, de bodemdaling in het jonge duinengebied (autocompactie) en de bodemdaling door olie-, gas- en waterwinning.
- *Vaststellen of grondwateronttrekking een significante bijdrage levert aan bodemdaling*  
Deze aanbeveling is in het huidige rapport opgepakt, waaruit volgt dat de bijdrage zeer gering is geweest. Kanttekening daarbij is dat deze conclusie getrokken is op basis van weinig brongegevens en verschillende aannames. Een uitgebreidere onderbouwing van de conclusie valt aan te bevelen.
- *Gericht onderzoek naar grondeigenschappen*  
Dit onderzoek zou zich moeten focussen op het vaststellen van de compactiegraad en geotechnische compressie-eigenschappen van vergelijkbare afzettingen nabij en op afstand van 1) grondwaterwinningen en 2) de jonge duinen. Deze informatie geeft goede kwalitatieve data en kan gebruikt worden in prognostische procesmodellen.



➤ *De onzekerheid over de isostatische bodembeweging verkleinen*

Bodemdaling door isostasie is een van de belangrijkste veroorzakers van bodemdaling op landelijke schaal. De onzekerheid over snelheid van bodemdaling is echter groot, waardoor schattingen uiteenlopen van ruwweg 3-8 cm/eeuw. Deze onzekerheid kan deels verkleind worden door metingen, maar ook vooral ook door bij te dragen aan het verbeteren van de modellen die isostatische bodembeweging berekenen. Deze bijdrage kan vooral geleverd worden door het aanleveren van betrouwbare (geologische) zeespiegeldata. In 2017 is hiermee een belangrijke start gemaakt door het opzetten van een database met zeespiegeldata uit de omgeving van Rotterdam, maar deze database zou uitgebreid moeten worden met gegevens uit de rest van Nederland.

Ook deze aanbeveling is het afgelopen jaar opgepakt en er is goed samengewerkt met GIA-modelleers in Nederland. Daarnaast is de zeespiegeldatabase uitgebreid met punten uit de Noordzee, zodat GIA-modelleers hun modellen beter kunnen kalibreren. Het is aan te bevelen de samenwerking in stand te houden en de GIA-basiskaarten verder te verbeteren.

➤ *Het uitbreiden van de zeespiegelmonitor met de bodemdalingsmonitor*

Deze monitor zou zich langjarig moeten richten op het actualiseren van de landelijke kustfundament-getijdenbekkens bodemdalingskaart die in de loop van 2018 zal verschijnen. Daarnaast zou de monitor zich moeten focussen op het verkleinen van de onzekerheden rondom de bijdrage van de belangrijkste bodemdalingscomponenten. Actualisaties zullen noodzakelijk zijn door het beschikbaar komen van nieuwe meetgegevens over bodemdaling, door het uitkomen van nieuwe modelleerstudies of door veranderende inzichten omtrent de onzekerheid rondom de geschatte bodemdaling.



## Referenties

- Fokker, P.A., van Leijen, F.J., Orlic, B., van der Marel, H., Hanssen, R.F., 2018. Subsidence in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97 (3), 129-181. 10.1017/njg.2018.9.
- Hijma, M.P., Engelhart, S.E., Horton, B.P., Törnqvist, T.E., Hu, P., Hill, D.F., 2015. A protocol for a geological sea-level database. In: I. Shennan, A.J. Long, B.P. Horton (Eds.), *Handbook of Sea-Level Research*. Wiley Blackwell, pp. 536-553.
- Hijma, M.P., Kooi, H., 2018. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. Deltares report 11200538-008-ZKS-0001, 63 pp.
- Hijma, M.P., Cohen, K.M., 2018, ter review. Holocene sea-level database for the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Quaternary Science Reviews*, Special Issue: Inception of a Global Atlas of Sea Levels since the Last Glacial Maximum.
- 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.
- Kooi, H., Yuherdha, A.T., 2017. Updated subsidence scenarios Jakarta; MODFLOW-SUB-CR calculations for Sunter, Daan Mogot and Marunda. Deltares report 11202275-008-BGS-0004, 43 pp.
- Kooi, H., Bakr, M., De Lange, G., Den Haan, E., Erkens, G., 2018. User guide to SUB-CR; a MODFLOW package for land subsidence and aquifer system compaction that includes creep. Deltares report 11202275-008-BGS-0003, 63 pp.
- Lodder, Q.J., 2016. Rekenregel suppletievolumen. Rijkswaterstaat memo 14-10-2016, versie 0.8, 9 pp.
- Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H., Bui, V.T., Erban, L., Kooi, H., Stouthamer, E., 2017. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 12 (6), 064006.
- Peltier, W.R., Argus, D.F., Drummond, R., 2015. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G\_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120 (1), 450-487. doi:10.1002/2014JB011176.
- Van der Spek, A.J.F., Elias, E., Lodder, Q.J., Hoogland, R., 2015. Toekomstige Suppletievolumes - Eindrapport. Deltares report 1208140-005-ZKS-0001, 103 pp.