

## Bodemdalingsmonitor 2020 Kustfundament en getijdenbekkens

Vergelijk met GNSS-data



**Bodemdalingsmonitor 2020 Kustfundament en getijdenbekkens**  
Vergelijk met GNSS-data

**Auteur(s)**

Marc Hijma

Erik van Onselen

## Bodemdalingsmonitor 2020 Kustfundament en getijdenbekkens

Vergelijk met GNSS-data



<b>Opdrachtgever</b>	RWS-WVL
<b>Contactpersoon</b>	Rena Hoogland
<b>Referenties</b>	n.v.t.
<b>Trefwoorden</b>	Zeespiegelstijging, bodemdaling, isostasie, tektoniek, GIA, model, getijdenstations, GNSS, InSAR

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.3
<b>Datum</b>	20-11-2020
<b>Projectnummer</b>	11205236-002
<b>Document ID</b>	11205236-002-ZKS-0004
<b>Pagina's</b>	29
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Marc Hijma	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.3	Marc Hijma 	Henk Kooi 	Bob Hoogendoorn 	
	Erik van Onselen 			

# 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 bodemdaling door winning van met name gas. In eerdere rapporten zijn de verschillende componenten van beide typen bodemdaling benoemd en hun bijdrage, inclusief onzekerheden, gekwantificeerd (Hijma & Kooi 2018ab; Hijma & Van Onselen, 2019). Op basis hiervan zijn ook bodemdalingsvolumes berekend, ten behoeve van het suppletieprogramma, zowel voor het heden als de toekomst. Deze bodemdalingsvolumes worden per kustdeelgebied berekend door het combineren van basiskaarten omtrent geologische bodemdaling en bodemdaling door winning. Voor dit rapport is deze berekening geautomatiseerd binnen een Python-module; eerder werd deze berekening uitgevoerd in een GIS-omgeving. De werkwijze is hierdoor robuuster en beter overdraagbaar geworden.

Het huidige rapport gaat dieper in op de elastische respons van de aarde op massa-veranderingen van de Groenlandse ijskap. Vorig jaar is deze component voor het eerst beschreven in de *Bodemdalingsmonitor* (Hijma & Van Onselen, 2019). De modellen geven aan dat deze component in de afgelopen eeuw een bodemstijging van meerdere centimeters vertegenwoordigt. Gecombineerd met de overige twee geologische bodemdalingcomponenten, tektoniek en glacio-isostasie, zou dit netto leiden tot bodemdaling (0-2 cm/eeuw) in het noordelijke  $\frac{2}{3}$  deel van Nederland en tot bodemstijging (0-1 cm/eeuw) in het zuidelijke  $\frac{1}{3}$  deel.

Het huidige rapport beschrijft ook een analyse van de bodembewegingstrends die volgen uit de meer dan 150 GNSS-stations in Nederland. Vrijwel alle stations laten bodemdaling zien, afgezien van een deel van het bovenrivierengebied en in een strook tussen Zuid-Limburg en Roosendaal. Een vergelijking van de trends bij de GNSS-stations met de geologische bodemdalingsskaarten laat zien dat er meer overeenkomst is met de kaart zónder dan mét de elastische respons. **Vooralsnog wordt daarom aanbevolen om voor het berekenen van bodemdalingsvolumes in de kustgebieden de geologische bodemdalingsskaart zónder elastische respons te blijven gebruiken. Dit betekent concreet dat de eerder voor Kustgenese afgeleide bodemdalingsvolumes en de daaruit volgende adviezen niet veranderd hoeven te worden.**

Het verschil tussen de gemeten bodembewegingstrend bij de GNSS-stations en de gemodelleerde bodembewegingstrend (zonder elastische respons) ligt meestal tussen de 0-2 cm/eeuw, wat als een goede match beschouwd wordt. Specifiek kijkend naar de hoofdgetijdenstations is er in het algemeen een goede overeenkomst tussen de berekende bodemdalingstrend binnen de *Bodemdalingsmonitor* en de trend volgend uit nabijgelegen GNSS-stations. Dit geldt niet voor station IJmuiden en in mindere mate niet voor station Hoek van Holland. De reden hiervoor is nog niet duidelijk.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Geologische bodembeweging</b>	<b>8</b>
2.1	Bodembeweging door elastische respons	8
2.2	Geologische bodemdaling inclusief elastische respons	10
2.3	Vergelijk met monitoringsdata	13
2.3.1	Achtergrond	13
2.3.2	GNSS-data overzicht	13
2.3.3	Vergelijk GNSS-data met geologische bodemdaling	16
2.3.4	Vergelijk GNSS-data met bodemdaling bij getijdenstations	18
2.4	Discussie	19
2.4.1	Nieuwe bodemdalingsvolumekaarten nodig?	19
2.4.2	Gebruik GNSS-stations	20
<b>3</b>	<b>Procedure bodemdalingsvolumes</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Literatuurlijst</b>	<b>28</b>

# 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-WVL<sup>1</sup> waarbij specifiek de bodemdaling van het kustfundament en de getijdenbekkens geanalyseerd wordt (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b; Hijma & Van Onselen, 2019). Het achterliggende hoofddoel hierbij 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 zeespiegelstijging) en daling door delfstofwinning en wordt gewerkt op een regionale schaal.

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) die zich richt op de actuele zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Tot de jaarlijkse werkzaamheden voor de *Bodemdalingsmonitor* behoren het actief op de hoogte blijven van nieuwe inzichten 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 doorgevoerd. Hieronder wordt beschreven hoe de aanbevelingen uit het rapport van 2019 (Hijma & Van Onselen) zijn opgepakt:

- *Gericht(er) monitoren van bodemdaling bij de getijdenstations*  
In het rapport van 2019 is een aanzet voor een monitoringsstrategie voor de getijdenstations opgenomen (als memo in de bijlage). Deze is in 2020 binnen KPP B&O Kust uitgewerkt door HKV-Lijn in Water en dit heeft geleid tot een rapport met gerichte aanbevelingen voor het verbeteren van de huidige monitoringsstrategie (Strijker et al., 2020). Naar verwachting zullen (delen van) deze aanbevelingen in 2021 uitgevoerd worden. Belangrijkste onderdelen zijn het plaatsen van GNSS-stations en InSAR-transponders bij verschillende stations, het beter ontsluiten en vervolgens benutten van de bodemdalingsdata (verleden, heden, toekomst) en het opzetten van een werkproces waarbij alle data leidt tot bruikbare data voor KPP B&O Kust (en daarmee ook voor vele andere doeleinden).
- *De onzekerheid over de gemodelleerde geologische bodemdaling verkleinen*  
Tot het rapport van 2019 werd gedacht dat GIA<sup>2</sup> veruit de belangrijkste component van geologische bodemdaling was, maar in dat rapport wordt aangegeven dat de elastische respons van de aarde op meer recente landijsveranderingen ook een grote rol zou kunnen spelen. Deze respons zorgt rond de huidige tijd juist voor een bodemstijging en zou dus tot minder geologische bodemdaling in Nederland leiden. In 2020 is contact geweest met Riccardo Riva van de TUDelft, de hoofdauteur van het artikel hierover (Riva et al., 2017), en Paolo Stocchi van het NIOZ. De

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Glacio-isostatische aanpassingen. Dit is een najffect van de laatste ijstijd. Het gewicht van het ijs, dat Nederland toen niet bereikte, drukte de aarde onder het ijs in. Het gebied daarom heen, inclusief Nederland, kwam juist omhoog (waterbed effect). Sinds het ijs weg is zakt Nederland weer naar beneden. Dit proces duurt nog duizenden jaren.

berekeningen die in het artikel gebruikt worden zijn gedeeld met Deltares en gebruikt in dit rapport (§2.1).

De geologische bodemdaling wordt vooralsnog berekend aan de hand van modellen, omdat de monitoring van geologische bodemdaling nog niet toereikend is. Door het uitvoeren van de monitoringsstrategie zal dit de komende tijd veranderen, maar modellen zullen nog steeds gebruikt worden. Het is daarom zaak om de modellen zo goed mogelijk en de onzekerheden zo klein mogelijk te maken. Vanuit de *Bodemdalingmonitor* bestaat de bijdrage uit overleggen met experts (bijv. Riva, TUDelft; Stocchi, NIOZ) en het aanleveren van betrouwbare (geologische) zeespiegeldata aan de modellers. De gesprekken hebben meerdere doelen:

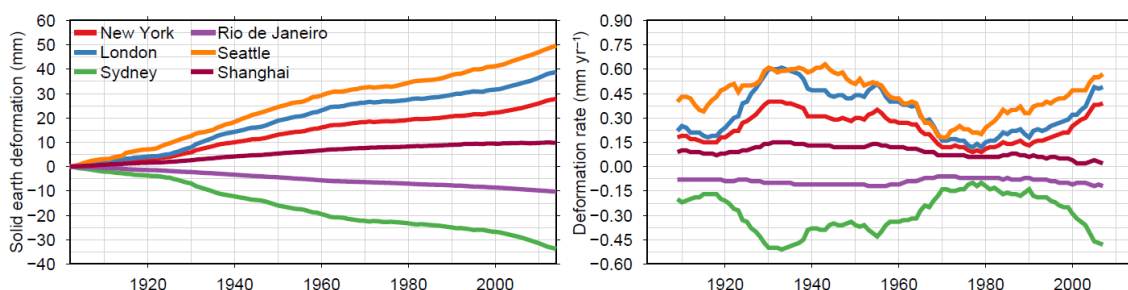
1. De experts werken aan modellen, maar zijn niet altijd bekend met de toepassingen waarvoor hun modellen soms gebruikt worden. In dit geval voor het inschatten van de bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. Als ze van de toepassing weten, zijn ze vaak bereid om specifiek voor de *Bodemdalingsmonitor* kaarten aan te leveren en mee te denken over hoe hun modellen het beste gebruikt kunnen worden.
  2. Inzicht verkrijgen in de onzekerheid rondom de modellen. Uit papers over GIA-modellen wordt de onzekerheid van deze modellen niet altijd duidelijk. In gesprekken met de modellers wordt de onzekerheid besproken en met name ook de belangrijkste oorzaken van onzekerheid. Dit helpt in het identificeren van welke data nodig is om de onzekerheid te verkleinen.
  3. Voor GIA-modellen is het cruciaal dat er datapunten bestaan om hun modellen te kalibreren en valideren. Goede geologische zeespiegeldata is hierbij essentieel. Binnen het team *Bodemdalingsmonitor* is expert kennis aanwezig op het gebied van deze zeespiegeldata. In projecten buiten KPP B&O Kust is deze data verzameld en vanuit de *Bodemdalingsmonitor* wordt deze data aangeleverd aan en besproken met de modellers.
- *Het maken van een kaart van geologische bodemdaling*  
Dit rapport bevat een nieuwe kaart van geologische bodemdaling, op basis van modellen voor bodemdaling door tektoniek, GIA en elastische respons (§2.2). Het rapport uit 2019 liet zien dat er een discrepantie bestaat tussen de gemodelleerde geologische bodemdaling en de geodetische metingen, maar ook tussen de metingen onderling. De nieuwe kaart wordt weer vergeleken met de metingen, dit keer hoofdzakelijk met GNSS-metingen (§2.3.3).
- *Procedure opstellen voor het actualiseren van de bodemdalingsvolumes*  
Deze wordt beschreven in hoofdstuk 3.

## 2 Geologische bodembeweging

Eerdere gemodelleerde geologische bodemdalingsskaarten werden gemaakt door tektonische en GIA-modellen te combineren, omdat dit de belangrijkste componenten zijn. In dit hoofdstuk wordt de kaart aangevuld met modelresultaten voor de bodemstijging door de elastische respons op het afsmelten van Groenland. Hieronder worden eerst de kaarten getoond voor de bodemstijging door elastische respons, daarna wordt de nieuwe gecombineerde geologische bodemdalingsskaart gepresenteerd.

### 2.1 Bodembeweging door elastische respons

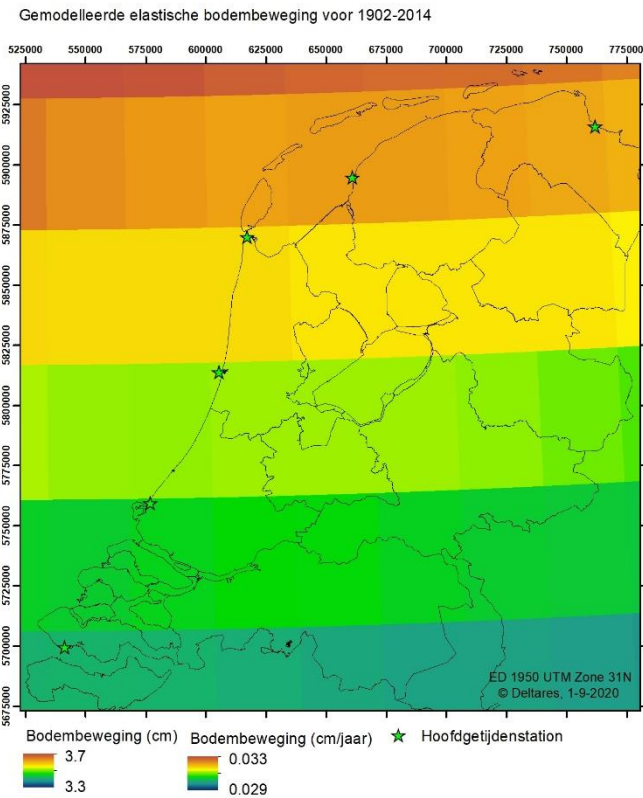
In Hijma & Van Onselen (2019) wordt de elastische respons van de aarde op massaveranderingen in Groenland beschreven als een snelle vorm van GIA. In de literatuur wordt hij beschreven als een elastische reactie van de aardkorst op veranderingen in de belasting van deze korst door bijvoorbeeld ijssmelt (Riva et al., 2017). Deze varieert sterk over de aarde en, vanwege de snelle reactie, ook in de tijd (Figuur 2-1). In dit rapport wordt verder de term 'elastische respons' gebruikt.



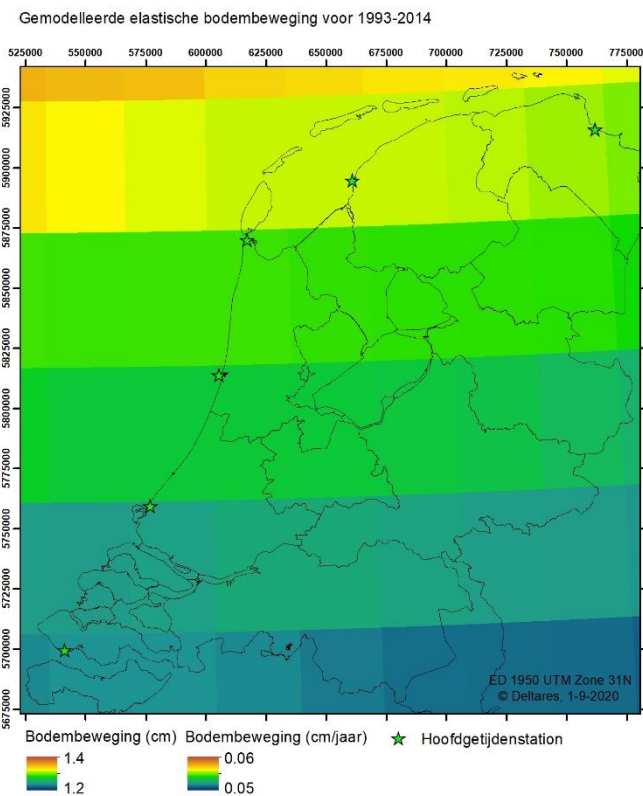
Figuur 2-1 Het linker paneel laat de bodembeweging zien door de elastische reactie van de aardkorst op recente veranderingen in de landijsmassa. London is bijvoorbeeld 4 cm gestegen in 120 jaar, terwijl Sydney bijna 4 cm gedaald is. Het rechter paneel laat zien dat de bewegingssnelheid sterk varieert met de tijd, hierbij de snelheid van landijssmelt volgend (Riva et al., 2017).

Riccardo Riva (TUDelft) heeft de modelresultaten van het artikel gedeeld en daarmee zijn voor dit rapport onderstaande kaarten gemaakt. Figuur 2-2 laat de gemodelleerde bodembeweging zien voor 1902-2014 en Figuur 2-3 voor de periode 1993-2014. Voor Noord-Nederland worden hogere snelheden berekend dan voor Zuid-Nederland, maar de verschillen zijn klein. Voor ruwweg de laatste 100 jaar wordt een netto stijging van rond de 3.5 cm berekend, voor de laatste 20 jaar een netto stijging van 1.5 cm. Duidelijk is dat de berekende snelheden van stijging niet constant zijn en de laatste decennia zijn toegenomen door toenemende smelt in Groenland. Dit betekent dat ook de snelheid van bodemstijging door de elastische respons toeneemt. Aangezien verwacht wordt dat de smelt van Groenland voorlopig blijft versnellen, zal ook de snelheid van bodemstijging blijven versnellen. In het artikel van Riva et al. worden modelresultaten tot 2014 getoond. Er wordt gewerkt aan nieuwe resultaten (tot 2020) die de meest recent afsmeltgegevens meenemen. Deze zijn nu nog niet beschikbaar.





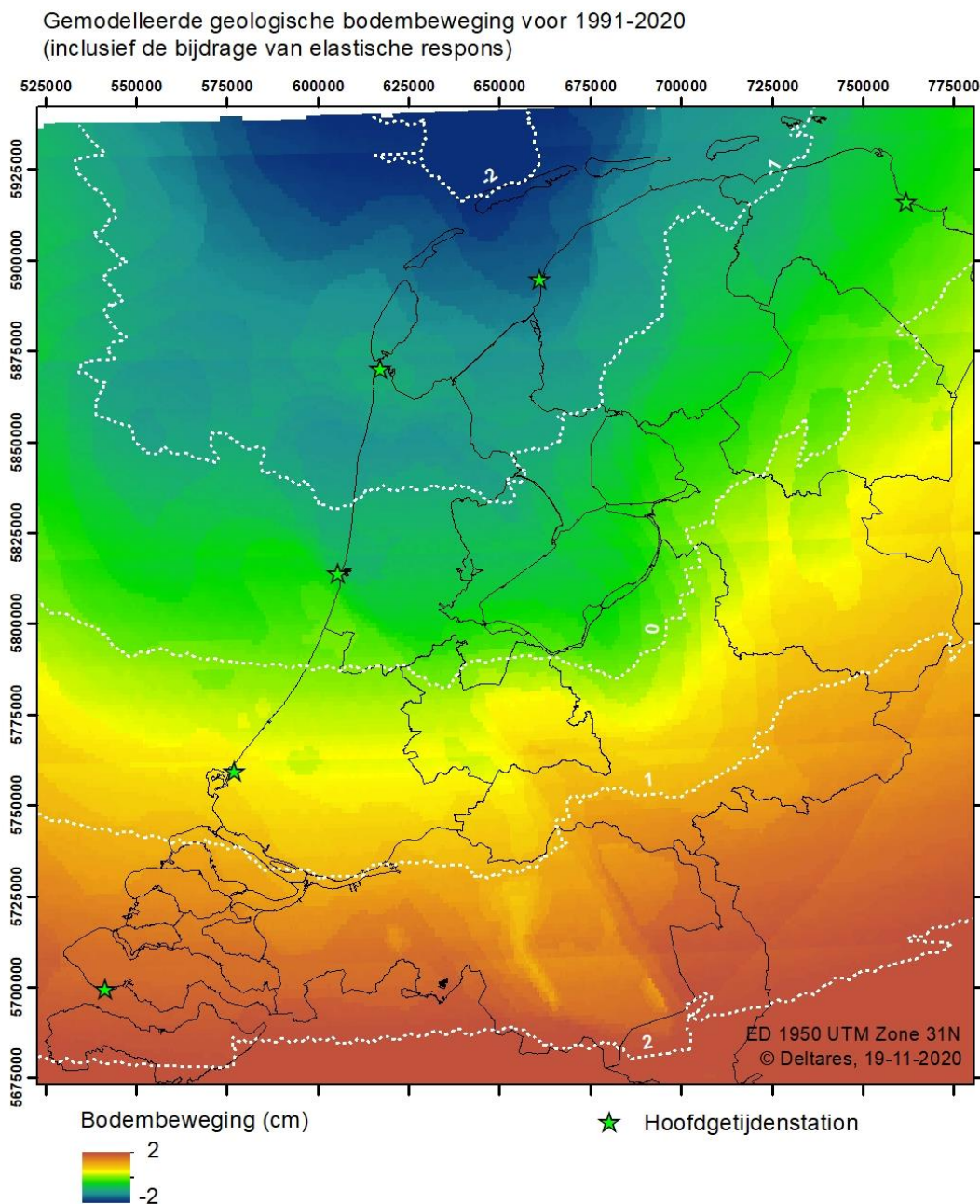
Figuur 2-2 Gemiddelde bodembeweging in Nederland tussen 1902-2014 door de elastische respons van de aarde op massaveranderingen op de aarde. Modeldata afkomstig uit Riva et al. (2017).



Figuur 2-3 Gemiddelde bodembeweging in Nederland tussen 1993-2014 door de elastische respons van de aarde op massaveranderingen op de aarde. Modeldata afkomstig uit Riva et al. (2017).

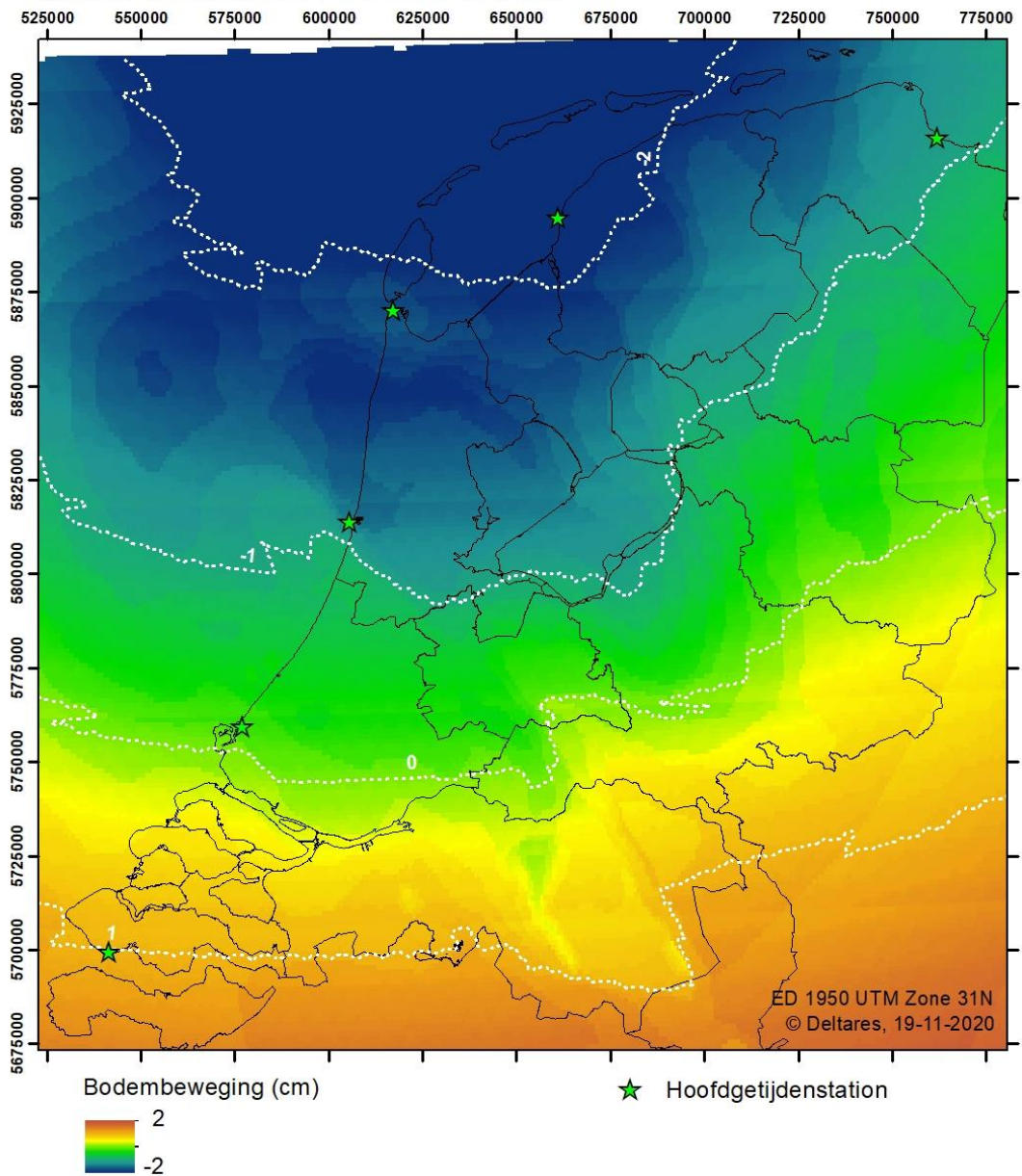
## 2.2 Geologische bodemdaling inclusief elastische respons

In voorgaande rapporten werden geologische bodemdalingskaarten getoond die gemaakt waren door de bewegingen door tektoniek en GIA te sommeren. De kaarten hieronder tonen nieuwe geologische bodemdalingskaarten die gemaakt zijn door de gemodelleerde bewegingen door tektoniek, GIA én elastische respons te sommeren. Figuur 2-4 laat de beweging zien voor de laatste 30 jaar en Figuur 2-5 voor de laatste 100 jaar. Ter vergelijking laat Figuur 2-6 de gemodelleerde geologische bodemdaling zonder elastische respons zien. Deze kaart is eerder gepubliceerd in Hijma & Van Onselen (2019; Figuur 3.6). Het patroon is grotendeels hetzelfde gebleven, maar de bodemdalingssnelheid is sterk verminderd en in de zuidelijke helft treedt nu bodemstijging op.



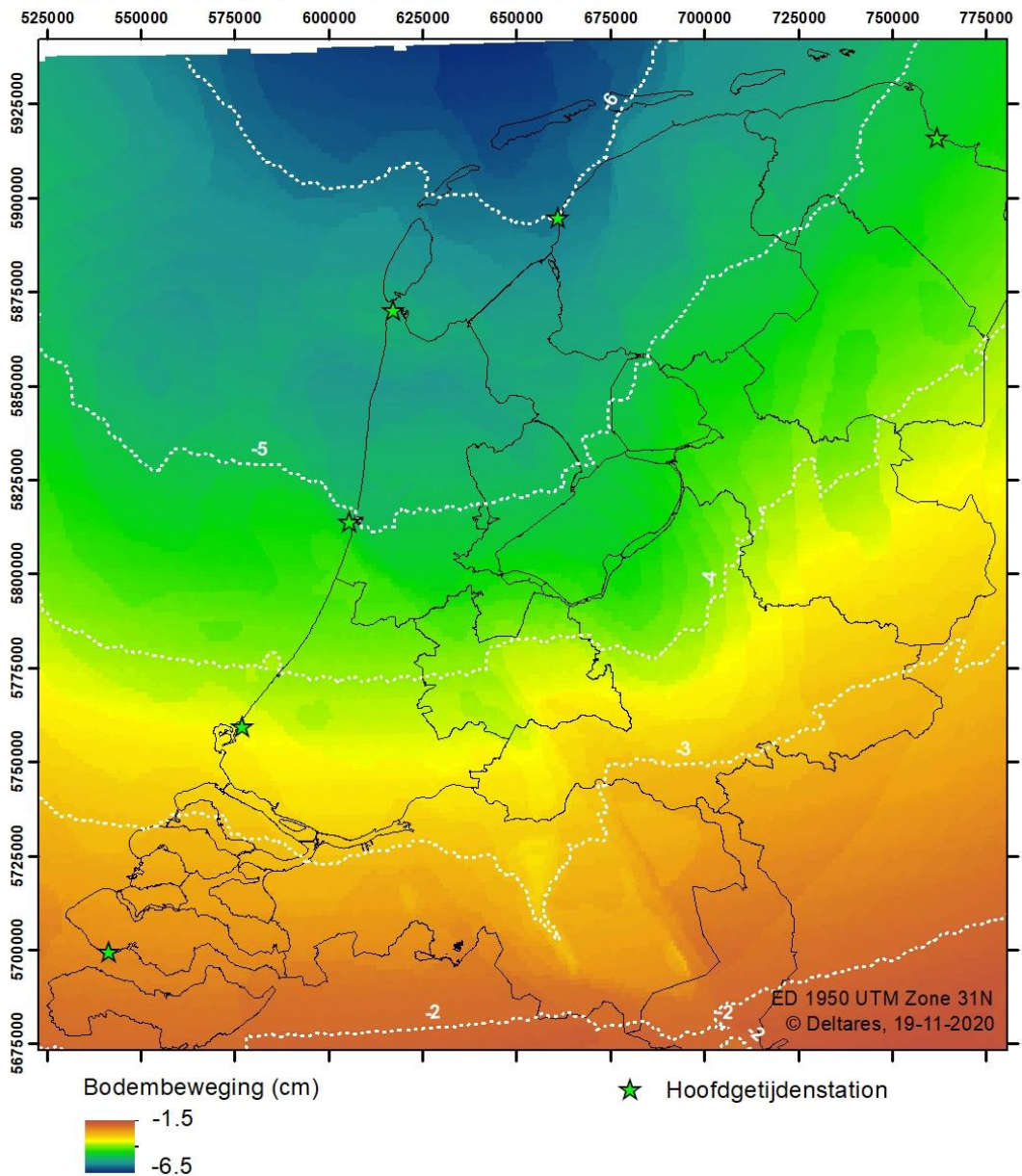
Figuur 2-4 Gemodelleerde geologische bodemdaling voor de laatste 30 jaar. Door het meenemen van de elastische respons, die leidt tot bodemstijging, is de geologische bodemdaling sterk verminderd in het noorden en voor de gehele zuidelijke helft wordt nu een bodemstijging gemodelleerd.

Gemodelleerde geologische bodembeweging voor 1921-2020  
(inclusief de bijdrage van de elastische respons)



Figuur 2-5 Gemodelleerde geologische bodemdaling voor de laatste 100 jaar. Door het meenemen van de elastische respons, die leidt tot bodemstijging, is de geologische bodemdaling sterk verminderd in het noorden en voor de gehele zuidelijke helft wordt nu een bodemstijging gemodelleerd.

Gemodelleerde geologische bodembeweging voor 1921-2020  
(exclusief de bijdrage van de elastische respons)



Figuur 2-6 Gemodelleerde geologische bodemdaling voor de laatste 100 jaar zonder het meenemen van de elastische respons. Voor geheel Nederland wordt bodemdaling gemodelleerd, toenemend van zuid naar noord van 2 cm/eeuw tot 6 cm/eeuw.

Tabel 2-1 laat voor de getijdenstations zien wat het wel of niet meenemen van de elastische respons voor invloed heeft op de gemodelleerde bodembeweging. De elastische respons is vrij constant voor Nederland (rond 3 cm over de laatste 100 jaar), waardoor de bodembeweging bij alle stations met circa 3 cm verminderd is voor de laatste 100 jaar. Voor Vlissingen zou dit tot een kleine bodemstijging leiden. De getallen in de tabel voor beweging zonder elastische respons zijn overgenomen uit Hijma & Kooi (2018b).

Tabel 2-1 Bodembeweging bij de hoofdgetijdenstations, uitgesplitst naar geologische bodembeweging exclusief en inclusief de invloed van de elastische respons, voor de periode 1921-2020.

Station	Geologische bodembeweging exclusief elastische respons 1921-2020 (cm)	Geologische bodembeweging inclusief elastische respons 1921-2020 (cm)
Delfzijl	-4.8 ± 2.4	-1.5 ± 2.9
Harlingen	-6.0 ± 2.7	-2.7 ± 3.1
Den Helder	-5.4 ± 2.6	-2.2 ± 2.3
IJmuiden	-5.0 ± 2.2	-1.8 ± 2.7
Hoek van Holland	-3.7 ± 1.7	-0.6 ± 2.3
Vlissingen	-2.4 ± 1.2	+0.7 ± 1.9
Gemiddelde	-4.55 ± 0.89	-1.35 ± 1.05

## 2.3 Vergelijk met monitoringsdata

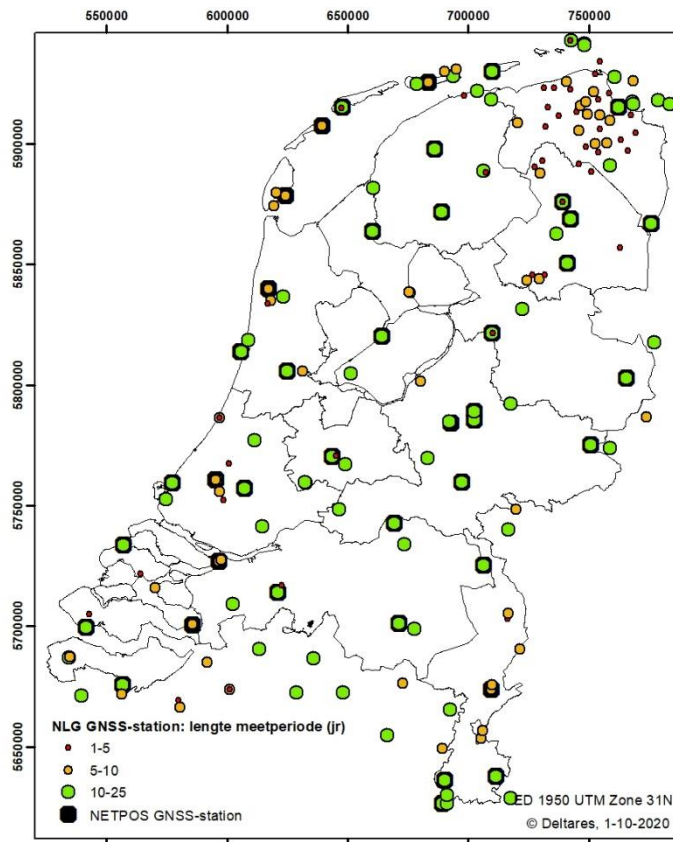
### 2.3.1 Achtergrond

In de *Bodemdalingsmonitor* van 2019 (Hijma & Van Onselen) is een aanzet gegeven om de gemodelleerde geologische bodemdalingskaarten te vergelijken met bewegingen van NAP-peilmerken, InSAR-data en de destijds beschikbare GNSS-stations. Daaruit volgde dat het gebruiken van NAP-peilmerken voor het vaststellen van geologische bodemdaling met veel onzekerheden omgeven is en dat een landelijke aanpak, met geavanceerde geodetische kennis en geostatistiek, vereist is om hier een stap verder mee te komen (zie ook Leusink, 2003). Dit wordt daarom (voorlopig) niet opgepakt binnen de *Bodemdalingsmonitor*. Voor een vergelijk van de geologische bodemdalingskaarten met InSAR werd gebruik gemaakt van de informatie op [www.bodemdalingskaart.nl](http://www.bodemdalingskaart.nl). Daar werd een kaart met de 'diepere bodemdaling' gepubliceerd, puur op basis van een statistische analyse van de InSAR-data. Onlangs is er een nieuwe versie verschenen van de InSAR-bodemdalingskaart, maar deze statistische analyse is niet uitgevoerd op de nieuwe dataset. Wat in de 'diepe' bodemdalingskaart opvalt is dat grote delen van Nederland omhoog komen en er geen patronen te herkennen zijn. Daarnaast valt op dat er grote verschillen bestaan in de bodembewegingssnelheden volgens GNSS, InSAR en gemodelleerde geologische bodemdaling. Gezien de resultaten en de grote verschillen in ruimtelijke en temporele dekking van de metingen en de gebruikte methodes (aannames in de statistiek) is de relatie van de resultaten tot geologische bodemdaling vooralsnog onduidelijk. InSAR-gegevens kunnen in principe zeker gebruikt worden voor het vaststellen van geologische bodemdaling, maar ook dit vraagt veel analyse en uitgebreide studies. InSAR-gegevens zijn namelijk relatief en moeten worden aangesloten aan locaties met bekend veronderstelde bewegingen. Ook dit wordt daarom voorlopig niet opgepakt binnen de *Bodemdalingsmonitor*. Er is wel verder gegaan met het gebruik van GNSS-data (zie onder).

### 2.3.2 GNSS-data overzicht

Er is gebruik gemaakt van twee datasets. De eerste set is verkregen via Bas Alberts (RWS-CIV) en omvat data van de NETPOS-stations in Nederland. NETPOS staat voor Netherlands Positioning System en dit referentienetwerk maakt het voor landmeters mogelijk om binnen enkele seconden op een paar centimeter nauwkeurig hun positie in het veld te meten. Het NETPOS-netwerk wordt beheerd door de Nederlandse Samenwerking Geodetische Infrastructuur (NSGI).

De tweede set is gedownload van het Nevada Geodetic Laboratory (NGL) GPS Network (<http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html>). Dit is een wereldwijde database van GNSS-stations. Alle bodembewegingstrends hieronder volgen uit de GNSS-datareeksen tot begin november 2020 en zijn berekend volgens de methode uit Blewitt et al. (2016). Alle NETPOS-stations zitten ook in de NGL-database (Figuur 2-7).

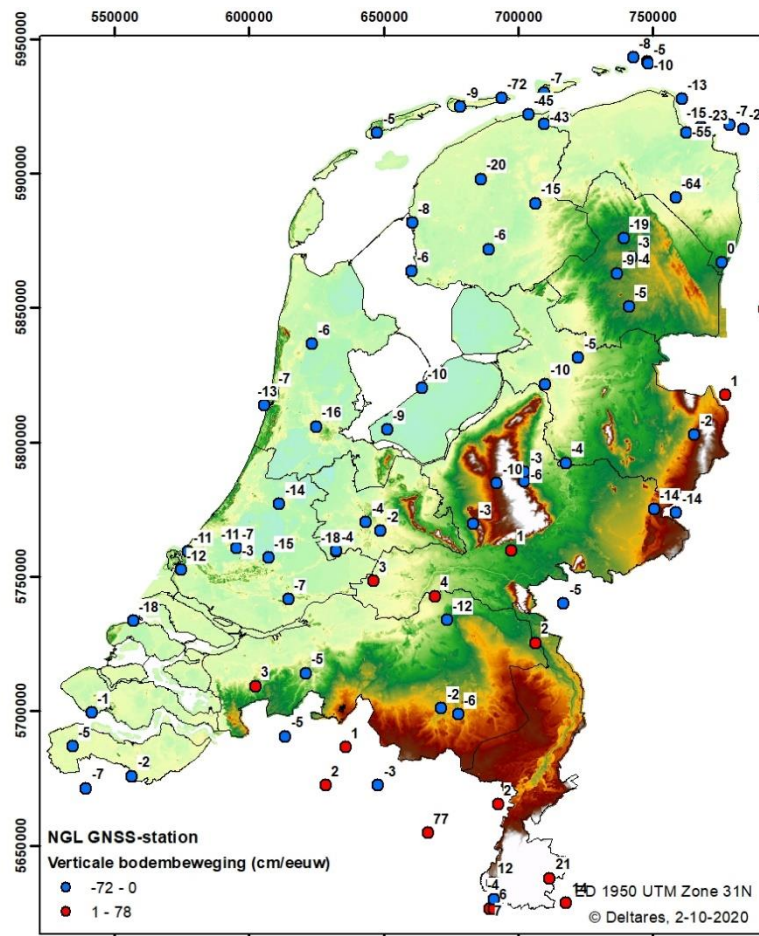


*Figuur 2-7 Overzichtskaart van de NGL en NETPOS GNSS-stations in Nederland. Vrijwel alle NETPOS-stations zijn ook opgenomen in NGL-database. De NGL-stations zijn geassocieerd naar de lengte van de meetperiode. Hoe langer de meetperiode, hoe betrouwbaarder de bodembewegingstrend kan worden.*

De GNSS-stations meten niet direct verticale bodembewegingen, maar de afstand tussen het station en de satelliet. Deze wordt onder andere beïnvloed door horizontale bewegingen als gevolg van met name platentektoniek. Om te komen tot een betrouwbare verticale bodembeweging van het station moeten complexe berekeningen worden uitgevoerd (zie bijvoorbeeld Blewitt et al., 2016), waarbij ook seizoensinvloeden en meetiaten meegenomen moeten worden. Afhankelijk van de berekening en het referentieniveau waarmee gewerkt wordt kunnen behoorlijk grote verschillen optreden tussen de berekende verticale bodembewegingen. Voor een vergelijk met de gemodelleerde geologische bodemdaling is een vergelijk met de NGL-data het meest geschikt, omdat de gebruikte modellen en de NGL-data gebruik maken van een vergelijkbaar referentieniveau (ITRS). De NSGI-snelheden worden berekend in het ETRS1989-systeem en kunnen behoorlijk anders zijn. Voor Groningen is bijvoorbeeld uitgezocht dat de bodemdaling volgend uit GNSS-stations in het ETRS1989 systeem 0.91 mm/jaar sneller gaat (9 cm/eeuw!) dan in het ITRS-systeem (Van der Marel, 2020). In dat onderzoek wordt de voorkeur gegeven aan het ITRS-systeem.

Een probleem bij beide GNSS-datasets is dat niet bekend is tot hoe diep het object waar de ontvanger aan vast zit gefundeerd zit. Foto's van stations laten zien dat de meeste stations in

Nederland, maar niet alle, vast zitten aan gebouwen die gefundeerd zullen zijn tot op het Pleistocene zand. Sommige stations zitten echter vast aan losstaande palen waarvan onduidelijk is of ze gefundeerd staan. Onderstaande figuur toont een simpel overzicht van de bodembewegingstrend per station, waarbij alleen stations met een meetperiode langer dan 10 jaar zijn gebruikt. Dit is een arbitraire grens, ingegeven door het feit dat de snelheden van bodembeweging laag zijn en dus meerjarige metingen nodig zijn om trends vast te stellen.



*Figuur 2-8 Overzichtskaart met de bodembeweging in cm/eeuw voor NGL-stations die al langer dan 10 jaar meten. De achtergrond is de AHN-hoogtekaart van Nederland.*

Direct zichtbaar is dat er weinig stations (rode stippen) zijn die een bodemstijging meten. Deze stations komen ongeveer in twee clusters voor: één die loopt van Zuid-Limburg richting het noordwesten, tot nabij Roosendaal. Het andere cluster bevindt zich rondom de Betuwe. Grootste dalingssnelheden komen uiteraard voor bij de gasvelden van Groningen en Ameland. Verder valt op dat er regelmatig grote verschillen zijn in dichtbij elkaar gelegen stations, waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van stations die niet gefundeerd staan (en die dus ook niet-geologische bodembewegingen meten) en nog onbegrepen bodembewegingsprocessen.

Zoals boven beschreven wordt de bodembeweging bij de NETPOS-stations door het NSGI beheerd en ook zij berekenen de bodembeweging bij de stations. Voor een direct vergelijk met de geologische bodemdalingsmodellen zijn deze data dus minder geschikt, omdat in een ander referentiesysteem gewerkt wordt (ETRS1989 versus ITRS). Voor de volledigheid wordt

hun kaart hieronder toch getoond (Figuur 2-9). Ook deze kaart laat een duidelijk dalende bodembewegingstrend zien voor geheel Nederland (afgezien van Zuid-Limburg). De bodemdalingssnelheden volgens NETPOS zijn hoger dan volgens het NGL.



Figuur 2-9 Bewegingstrends bij de NETPOS-stations, zowel horizontale als verticale beweging (kaart beschikbaar via <https://services.netpos.nl/data/misc/vel/vel.html>).

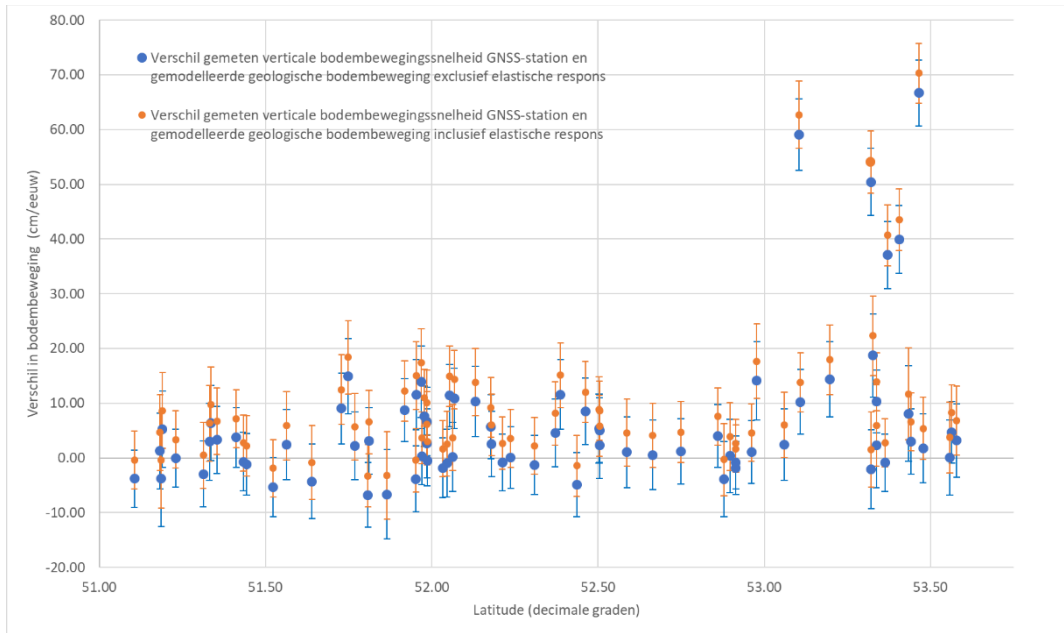
### 2.3.3 Vergelijk GNSS-data met geologische bodemdaling

In eerdere rapporten zijn geologische bodemdalingsskaarten gepresenteerd die gemaakt zijn aan de hand van modellen voor tektonische bodemweging en isostatische bewegingen, in dit rapport is een variant gepresenteerd waarbij ook de elastische respons van de aarde is meegenomen. Het meenemen van elastische respons zorgt voor minder geologische bodemdaling en in het zuidoostelijke deel van Nederland voor bodemstijging (Figuur 2-5). Gezien het feit dat vrijwel alle GNSS-stations (flink) dalen laat een vergelijk van de GNSS-data met de twee varianten in geologische bodemdaling uiteraard zien dat de GNSS-data beter overeenkomt met de variant zonder elastische respons. Maar ook bij die variant zijn er verschillen tussen de gemodelleerde bodemdaling en de GNSS-data.

Onderstaande figuur laat voor beide varianten het verschil zien tussen de metingen en de modeluitkomsten, waarbij de data van zuid (links) naar noord (rechts) gegroepeerd is. De punten met sterke afwijkingen in het noorden worden veroorzaakt door versterkte bodemdaling door gaswinning. Ook de onzekerheden rondom de verschillen zijn geplot, op basis van een aangenomen onzekerheid van 50% voor de geologische bodemdaling (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b; Hijma & Van Onselen, 2019) en de onzekerheid rondom de GNSS-

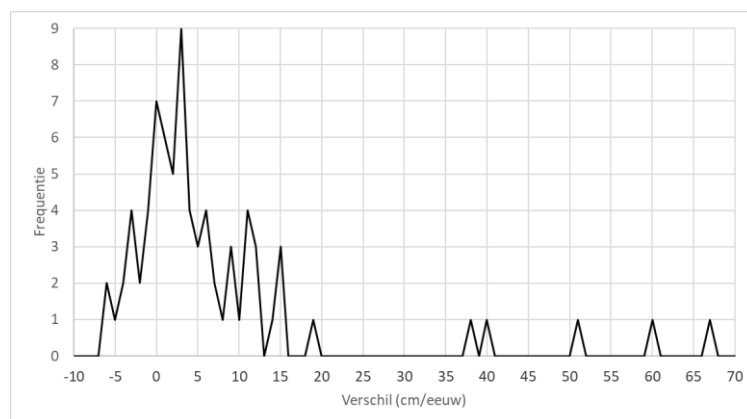


trends zoals gerapporteerd door het NGL. Deze laatste onzekerheid is erg groot (gemiddelde van 171% en mediaan van 86%).



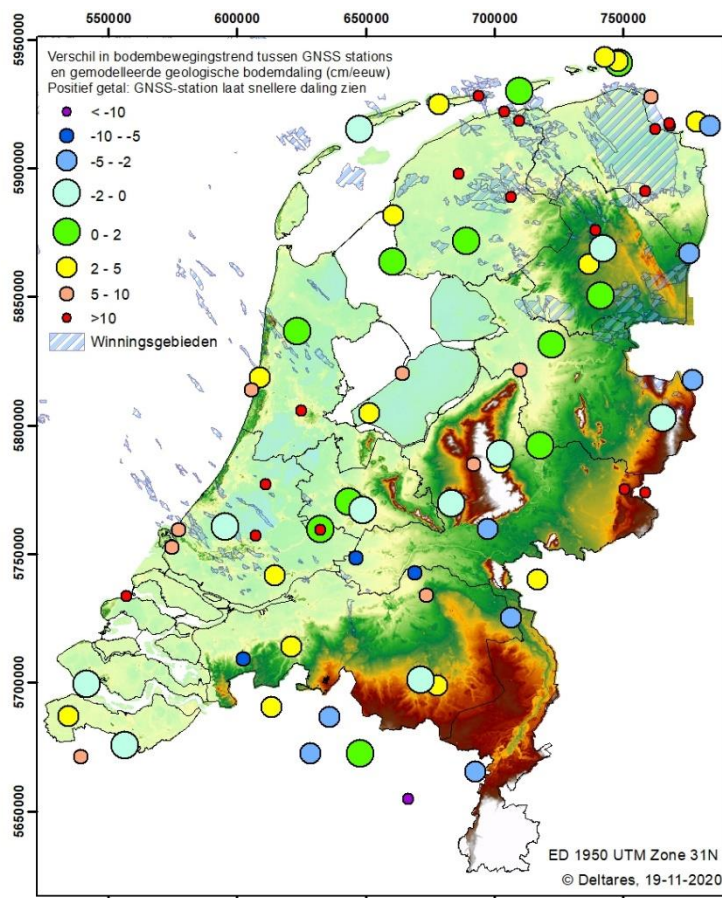
*Figuur 2-10 Verschil in cm/eeuw tussen de gemeten verticale bodembewegingssnelheden en de gemodelleerde geologische bodembewegingen, exclusief (blauw) en inclusief (oranje) de elastische respons. Alleen GNSS-stations met een meetreeks langer dan 10 jaar worden getoond.*

Als we de stations in dalingsgebieden door (met name) gaswinning buiten beschouwing laten en het gemiddelde verschil nemen van de overblijvende stations (binnen het 95% interval) dan volgt daar een gemiddeld verschil uit van  $\sim 2.2$  cm/eeuw en  $\sim 5.7$  cm/eeuw voor respectievelijk de variant zonder en met elastische respons. Een gemiddeld verschil van 2 cm over een eeuw wordt hier beschouwd als een behoorlijk goede overeenkomst. Figuur 2-11 geeft aanvullend inzicht over hoe vaak welk verschil voorkomt. Er is een duidelijk concentratie te zien van verschillen rond 0-2 cm/eeuw, met daarom heen een vrij normale verdeling. Verschillen groter dan 15 cm komen zeer beperkt voor en worden veroorzaakt door stations die in dalingsgebieden door gaswinning liggen.



*Figuur 2-11 Frequentiediagram voor de verschillen in bodembewegingssnelheid tussen de GNSS-stations en de geologische bodemdaling exclusief elastische respons. Alleen GNSS-stations met een meetreeks langer dan 10 jaar worden getoond.*

Figuur 2-12 laat ten slotte de ruimtelijke verdeling van de verschillen zien. De invloed van de winningsgebieden in Noord-Nederland is duidelijk zichtbaar, maar ook in Zuid-Holland zijn de verschillen groot. Daar zijn ook winningsgebieden, maar de verwachting is niet dat deze leiden tot dergelijke grote effecten (Hijma & Kooi, 2018a). In het algemeen lijkt gesteld te kunnen worden dat de overeenkomst in gebieden met een dik pakket Holocene afzettingen, oftewel met een dikke bovenste slappere laag, minder goed is dan in gebieden waar het Pleistocene ondiep voorkomt.



Figuur 2-12 Ruimtelijk overzicht van de verschillen in bodembewegingssnelheid tussen de GNSS-stations en de geologische bodemdaling (exclusief elastische respons). Alleen GNSS-stations met een meetreeks langer dan 10 jaar worden getoond.

### 2.3.4 Vergelijk GNSS-data met bodemdaling bij getijdenstations

Afgezien van hoofdgetijdenstation Harlingen staan er bij alle hoofdgetijdenstations wel GNSS-stations binnen een straal van 5 km. Het is natuurlijk interessant om de bodembewegingstrends van deze stations 1:1 te vergelijken met de bodembeweging die volgt uit de optelsom van gemodelleerde geologische bodemdaling en de daling door winning. In Tabel 2-2 wordt voor ieder hoofdgetijdenstation een overzicht gegeven van de bodembewegingstrend die volgt uit de *Bodemdalingsmonitor* en de bodembewegingstrend volgend uit de GNSS-stations. Hierbij wordt via verschillende kolommen inzicht gegeven in de relatie tussen beide trends. Afgezien van stations IJmuiden en Hoek van Holland is er een behoorlijk goede overeenkomst tussen de trends uit de *Bodemdalingsmonitor* en kolom B, dit is de gemiddelde trend volgend uit de drie dichtstbijzijnde stations met meetreeksen meer dan 10 jaar. De standaarddeviatie voor stations met langere meetreeksen is een stuk lager dan voor stations met kortere meetreeksen, in overeenstemming met de algemene regel dat hoe langer de meetreeks is, hoe robuuster deze wordt.

Een opvallend groot verschil bestaat er tussen de trend volgend uit de GNSS-stations nabij IJmuiden en (in mindere mate) Hoek van Holland en de trend volgend uit de *Bodemdalingsmonitor*. Dit is ook goed zichtbaar in Figuur 2-12, waar te zien is dat de meeste GNSS-stations in Zuid- en Noord-Holland een bodembewegingstrend hebben die meer dan 5 cm/eeuw afwijkt van de trend uit de *Bodemdalingsmonitor*. De achterliggende reden hiervoor is nog niet bekend. Mogelijk is er een relatie met de diepteligging van de top van het Pleistocene zand ten opzichte van het maaiveld.

*Tabel 2-2 Overzicht van bodembewegingstrends volgend uit de Bodemdalingsmonitor (combinatie van geologische bodemdaling en daling door winning) en uit GNSS-data. Kolom A laat de trend zien van het dichtstbijzijnde GNSS-station met een meetreeks van minimaal 10 jaar. Kolom B geeft het gemiddelde (met standaarddeviatie) van de 3 dichtstbijzijnde GNSS-stations met een meetreeks van minimaal 10 jaar. Kolommen C en D doen hetzelfde, maar dan voor stations met een meetreeksen van minimaal 5 jaar.*

Station	Huidige Bodembewegingstrend <i>Bodemdalingsmonitor</i> (cm/eeuw)	Huidige Bodembewegingstrend GNSS-stations (cm/eeuw)			
		A	B	C	D
Delfzijl	-29.1 ± 12.4	-55.2	-31.1 ± 21.3	-50.1	-40.0 ± 22.1
Harlingen	-6.0 ± 2.7	-8.0	-6.6 ± 1.4	-8.2	-8.0 ± 2.7
Den Helder	-5.4 ± 2.6	-5.7	-6.4 ± 1.5	-10.0	-6.3 ± 8.7
IJmuiden	-5.0 ± 2.2	-13.2	-12.0 ± 4.4	-13.5	-12.0 ± 4.4
Hoek van Holland	-6.7 ± 2.4	-11.2	-9.9 ± 2.9	-11.2	-9.9 ± 2.9
Vlissingen	-2.4 ± 1.2	-1.2	-2.8 ± 2.1	-1.2	-2.0 ± 2.9

## 2.4 Discussie

### 2.4.1 Nieuwe bodemdalingsvolumekaarten nodig?

In eerdere rapporten werd de geologische bodemdaling berekend op basis van tektonische en glacio-isostatische bodembewegingen, resulterend in een bodemdalingscomponent voor heel Nederland, waarbij de daling toeneemt richting het noordwesten. In dit rapport is de elastische bodemstijging toegevoegd aan de geologische bodemdaling (Riva et al., 2017). Dit resulteert in verminderde bodemdaling in het noorden en bodemstijging in het zuiden (Figuur 2-5). Een vergelijk met de bodembewegingstrends van GNSS-stations laat zien dat er meer overeenkomst is met de geologische bodemdalingskaart zónder dan mét elastische respons. Vooralsnog wordt daarom aanbevolen om voor het berekenen van bodemdalingsvolumes in de kustgebieden de geologische bodemdalingskaart zónder elastische respons te blijven gebruiken. Dit betekent concreet dat de eerder voor Kustgenese afgeleide bodemdalingsvolumes en de daaruit volgende adviezen niet veranderd hoeven te worden. Dit betekent overigens niet per sé dat de gemodelleerde elastische respons niet optreedt. Het is bijvoorbeeld ook mogelijk dat de geologische bodemdaling door tektoniek en glacio-isostasie enigszins onderschat wordt en de stijging door de elastische respons enigszins overschat wordt.

## 2.4.2 Gebruik GNSS-stations

Het toevoegen van de data van GNSS-stations aan de 'gereedschapskist' van de *Bodemdalingsmonitor* is waardevol, omdat ze bruikbaar zijn om landelijke trends inzichtelijk te maken en omdat ze een direct vergelijk met de geologische bodemdalingstrends mogelijk maken. Er zitten nog wel wat haken en ogen aan de GNSS-dataset, hopelijk kunnen die in de nabije toekomst opgelost worden. Hieronder worden enkele aandachtspunten benoemd:

- Er is geen informatie over de fundering van het object waar de GNSS-receiver aan vast zit. Afgaand op de foto's die beschikbaar zijn, zitten ze soms op gebouwen, maar soms ook op vrijstaande masten. Informatie over de funderingsdiepte zou erg welkom zijn, omdat dan nog beter gefilterd kan worden op stations die in principe de diepere, geologische, bodemdaling meten. In overleg met RWS-CIV en het Kadaster kan dit volgend jaar mogelijk beter uitgezocht worden.
- De berekende bodemdalingstrends verschillen aanzienlijk tussen wat de NSGI en wat het NGL berekend. Dit kan verklaard worden doordat ze verschillende referentiesystemen gebruiken en dit leidt tot behoorlijk grote verschillen (zie bijvoorbeeld ook Van der Marel, 2020). In overleg met RWS-CIV en het Kadaster kan hier volgend jaar dieper op ingegaan worden.

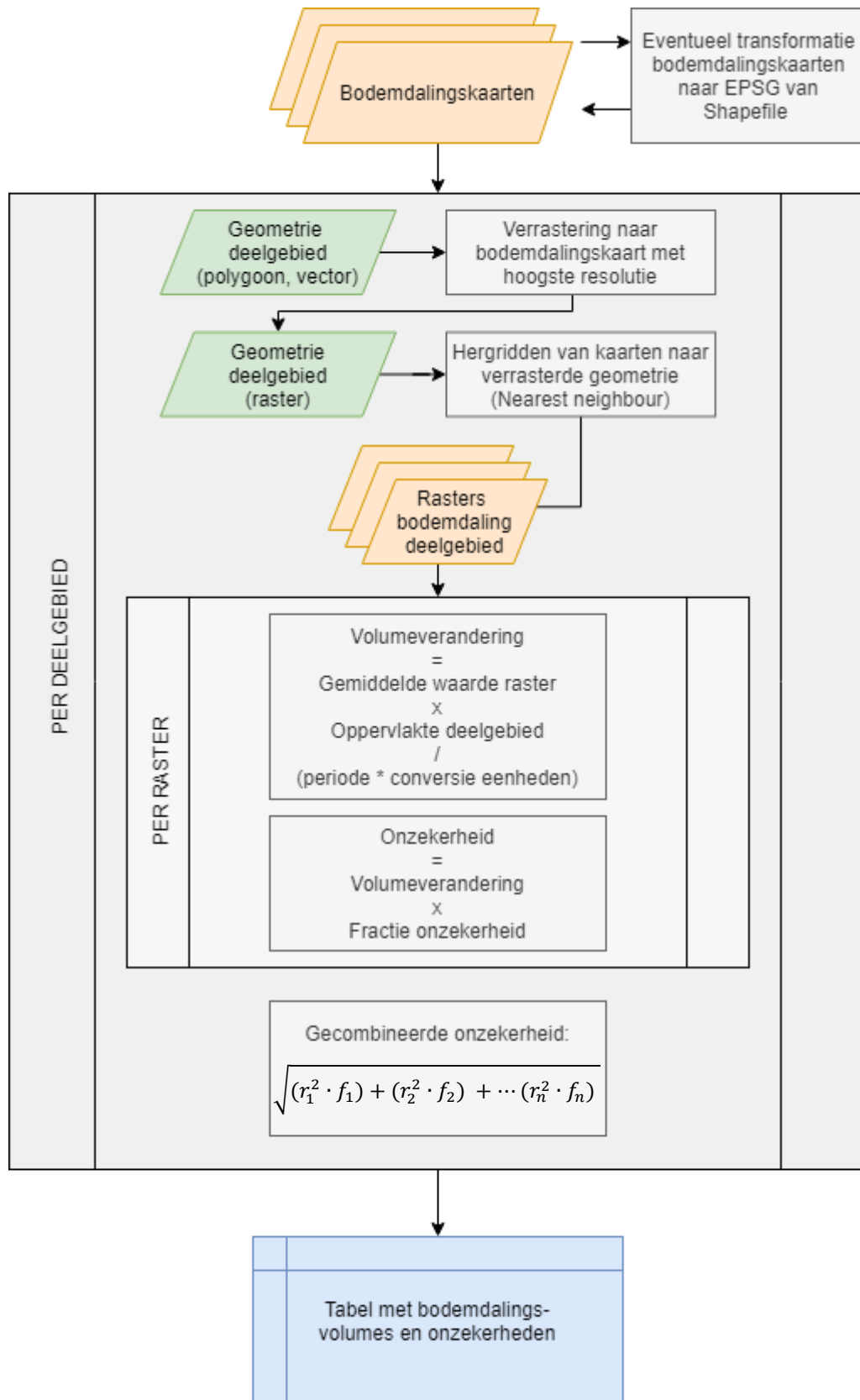
### 3 Procedure bodemdalingsvolumes

In Nederland zijn het kustfundament en de getijdenbekkens opgedeeld in 21 deelgebieden voor kustonderhoud. In een eerder rapport zijn voor alle deelgebieden tabellen gemaakt met de bodemdalingsgetallen en zijn kaarten gepresenteerd met de bodemdalingsvolumes per deelgebied (Hijma & Kooi, 2018b). Het is de verwachting dat de onderliggende kaarten die gebruikt worden voor het berekenen van de bodemdalingsgetallen regelmatig zullen veranderen door nieuwe inzichten en/of nieuwe gegevens. Het is daarom wenselijk om het proces van het combineren van verschillende basiskaarten (geologische bodemdaling, daling door winning en deelgebieden) te automatiseren, zodat de tabellen en kaarten in de toekomst eenvoudig en herleidbaar geactualiseerd kunnen worden. Hieronder wordt de geautomatiseerde werkwijze gevisualiseerd. Doordat de werkwijze geautomatiseerd is kunnen bij een aanpassing van een basiskaart direct nieuwe bodemdalingsvolumes berekend worden.

De automatisering is gerealiseerd in een Pythonmodule. De module is dusdanig flexibel opgezet dat verschillende bodemdalingskaarten ongeacht hun eenheid en coördinatenstelsel gebruikt kunnen worden. De module wordt aangestuurd door een configuratiebestand. In het configuratiebestand wordt door de gebruiker opgegeven:

- Het pad naar de shapefile met deelgebieden
- Het EPSG-nummer van het coördinatenstelsel van de bovenstaande shapefile
- Per bodemdalingskaart:
  - Pad naar het rasterbestand
  - Onzekerheid als fractie van de bodemdalingswaarde
  - Periode in jaren waarvoor de kaart informatie over bodemdaling geeft
  - De eenheid waarin bodemdaling gegeven is
  - De eenheid waarin bodemdalingsvolume uitgerekend moet worden

De onderstaande flowchart (Figuur 3-1) geeft aan hoe uit de kaarten bodemdalingsvolumes en onzekerheden berekend worden in deze module:



Figuur 3-1 Flowchart van de manier waarop uit de ontwikkelde Python-module bodemdalingsvolumes en onzekerheden berekend uit de basiskaarten

Ter illustratie van de werking van de Python-module worden in Tabel 3-1 de berekende volumes voor de verschillende deelgebieden getoond. De getallen exclusief de bijdrage van de elastische respons zijn eerder gerapporteerd in Hijma & Kooi (2018b; Tabel 3.6). Een direct vergelijk van de tabellen laat zien dat de Python-module dezelfde getallen oplevert voor het geologische bodembewegingsvolume. *(Let op: omdat er nu ook bodemstijging is, is er voor gekozen om bodembewegingsvolumes te tonen. Hierdoor worden nu negatieve getallen gebruikt voor bodemdalingsvolumes)*. Voor het bodembewegingsvolume door winning (en daarmee ook voor het totaal) zijn er verschillen voor Zuid-Holland, Maasgeul, Vliestroom en Vlie binnen. Dit komt door een eerdere fout, waarbij de gemiddelde bodemdalingsgetallen door winning voor Zuid-Holland en de Maasgeul, en voor Vliestroom en Vlie, zijn verwisseld. Dit onderstreept het belang van de Python-module, zodat dergelijke fouten niet meer gemaakt worden. De jaarlijkse gemiddelde bodemdalingsvolumes voor het kustfundament en de getijdenbekkens zijn hierdoor ook licht veranderd.

Tabel 3-1 Jaarlijks gemiddelde bodembewegingsvolumes voor de periode 1921-2020 voor de verschillende deelgebieden, exclusief en inclusief de bijdrage van de elastische respons. **Er wordt aanbevolen alleen de getallen zonder elastische respons te gebruiken** (zie ook hoofdstekst).

Gebied	Geologisch bb.volume Exclusief E.R. (Mm <sup>3</sup> /per jaar)	Geologisch bb.volume Inclusief E.R. (Mm <sup>3</sup> /per jaar)	Bb.volume door winning (Mm <sup>3</sup> /jaar)	Totaal bb.volume Exclusief E.R. (Mm <sup>3</sup> /jaar)	Totaal bb.volume Inclusief E.R. (Mm <sup>3</sup> /jaar)
Westerschelde (1)	-0.06 ± 0.03	0.02 ± 0.05	0.00 ± 0.00	-0.06 ± 0.03	0.02 ± 0.05
Westerschelde delta (2)	-0.1 ± 0.05	0.03 ± 0.08	0.00 ± 0.00	-0.10 ± 0.05	0.03 ± 0.08
Oosterschelde delta (3)	-0.1 ± 0.05	0.01 ± 0.07	0.00 ± 0.00	-0.10 ± 0.05	0.01 ± 0.07
Grevelingen delta (4)	-0.07 ± 0.03	0.00 ± 0.045	0.00 ± 0.00	-0.07 ± 0.03	0 ± 0.05
Haringvliet delta (5)	-0.08 ± 0.04	-0.01 ± 0.05	0.00 ± 0.00	-0.08 ± 0.04	-0.01 ± 0.05
Maasgeul (6)	-0.002 ± 0.001	0.00 ± 0.001	0.00 ± 0.00	-0.003 ± 0.001	-0.001 ± 0.002
Zuid-Holland (7)	-0.38 ± 0.18	-0.1 ± 0.23	-0.02 ± 0.004	-0.40 ± 0.18	-0.12 ± 0.23
IJgeul (8)	-0.008 ± 0.004	-0.003 ± 0.004	0.00 ± 0.00	-0.01 ± 0.004	-0.003 ± 0.004
Noord-Holland (9)	-0.18 ± 0.08	-0.07 ± 0.10	-0.03 ± 0.01	-0.21 ± 0.08	-0.10 ± 0.10
Zeegat van Texel (10)	-0.22 ± 0.10	-0.09 ± 0.12	-0.01 ± 0.001	-0.22 ± 0.1	-0.10 ± 0.12
Marsdiep binnen (11)	-0.39 ± 0.18	-0.17 ± 0.21	0.00 ± 0.00	-0.39 ± 0.18	-0.17 ± 0.21
Eierlandse Gat binnen (12)	-0.09 ± 0.04	-0.04 ± 0.05	0.00 ± 0.00	-0.09 ± 0.04	-0.04 ± 0.05
Eierlandse Gat (13)	-0.14 ± 0.06	-0.06 ± 0.07	0.00 ± 0.00	-0.14 ± 0.06	-0.06 ± 0.07
Vliestroom (14)	-0.18 ± 0.08	-0.09 ± 0.10	-0.01 ± 0.002	-0.19 ± 0.08	-0.10 ± 0.10
Vlie binnen (15)	-0.40 ± 0.18	-0.19 ± 0.21	-0.02 ± 0.01	-0.43 ± 0.18	-0.21 ± 0.21
Amelander Zeegat (16)	-0.18 ± 0.08	-0.09 ± 0.09	-0.01 ± 0.001	-0.19 ± 0.08	-0.09 ± 0.09
Amelander Zeegat binnen (17)	-0.16 ± 0.08	-0.07 ± 0.09	-0.01 ± 0.004	-0.18 ± 0.08	-0.09 ± 0.09
Friesche Zeegat (18)	-0.17 ± 0.08	-0.07 ± 0.09	-0.13 ± 0.03	-0.30 ± 0.09	-0.20 ± 0.11
Friesche Zeegat binnen (19)	-0.09 ± 0.04	-0.04 ± 0.05	-0.07 ± 0.02	-0.15 ± 0.05	-0.1 ± 0.050
Eems Dollard (20)	-0.20 ± 0.10	-0.08 ± 0.12	-0.003 ± 0.001	-0.21 ± 0.10	-0.09 ± 0.12
Eems Dollard binnen (21)	-0.25 ± 0.12	-0.09 ± 0.15	-0.29 ± 0.07	-0.54 ± 0.16	-0.38 ± 0.18
Getijdenbekkens	-1.43 ± 0.67	-0.58 ± 0.79	-0.40 ± 0.10	-1.83 ± 0.71	-0.98 ± 0.84
Waddenzee	-1.37 ± 0.64	-0.60 ± 0.75	-0.40 ± 0.10	-1.77 ± 0.68	-1.00 ± 0.79
Westerschelde	-0.06 ± 0.03	0.02 ± 0.05	0.00 ± 0.00	-0.06 ± 0.03	0.02 ± 0.05
Kustfundament	-2.01 ± 0.94	-0.63 ± 1.17	-0.20 ± 0.05	-2.21 ± 0.96	-0.83 ± 1.19
Kustfundament/getijdenbekkens	-3.44 ± 1.61	-1.20 ± 1.96	-0.60 ± 0.15	-4.04 ± 1.67	-1.80 ± 2.03

## 4 Conclusies

Dit rapport over bodemdaling langs de Nederlandse kust en in de getijdenbekkens is een vervolg op eerdere rapporten (Hijma & Kooi, 2018ab; Hijma & Van Onselen, 2019) en het tweede rapport binnen de *Bodemdalingsmonitor*. Binnen deze monitor worden kennis- en beheersvragen over bodemdaling langs de Nederlandse kust beantwoord.

Het huidige rapport bestaat uit drie delen. Het eerste deel toont de invloed van het meenemen van bodembewegingen door elastische respons op de totale geologische bodemdaling. Het tweede deel vergelijkt de geologische bodemdalingskaarten met data van tientallen GNSS-stations en het derde deel beschrijft een geautomatiseerde procedure voor het berekenen van bodemdalingsvolumes. Hieronder worden de belangrijkste bevindingen uit het huidige rapport gegeven.

- *Geologische bodemdaling: effect van het meenemen van de elastische respons*  
De data uit Riva et al. (2017) laat zien dat de elastische respons op het afsmelten van Groenland in geheel Nederland leidt tot bodemstijging. Wordt deze stijging gecombineerd met tektonische en isostatische bodembewegingen, dan ontstaat een patroon waarbij ruwweg het noordelijke  $\frac{2}{3}$  deel van Nederland daalt (0-2 cm/eeuw) en het zuidelijke  $\frac{1}{3}$  deel stijgt (0-1 cm/eeuw), een groot verschil met eerder gepubliceerde kaarten van geologische bodemdaling waarin te zien is dat vrijwel geheel Nederland daalt.
- *Geologische bodemdaling: een vergelijking met GNSS-data*  
Er zijn veel GNSS-stations in Nederland, maar tot nog toe zijn deze niet gebruikt om inzichten te krijgen in de geologische bodemdaling, hoewel deze data in principe daar zeer geschikt voor is. Voor een vergelijking van de verticale bodembewegingen van de GNSS-stations en geologische bodemdalingskaarten is gebruik gemaakt van de NGL-database die online beschikbaar is. Voor Nederland gaat het om meer dan 150 stations, verspreid over het gehele land, met een duidelijke concentratie bij het gasveld van Groningen. Het duurt enige tijd voordat een eventueel aanwezige bodembewegingstrend met betrouwbaarheid zichtbaar wordt in de data. Voor dit rapport is gesteld dat stations met meetreeksen langer dan 10 jaar bruikbaar zijn voor een vergelijking met geologische bodemdalingskaarten. Deze stations laten voor vrijwel geheel Nederland bodemdaling zien, met uitzondering van een stuk in het bovenrivierengebied en in een strook van Zuid-Limburg naar Roosendaal. Een vergelijking van de trends bij de GNSS-stations met de geologische bodemdalingskaarten laat zien dat er meer overeenkomst is met de kaart zónder dan mét de elastische respons. **Het verschil tussen de gemeten bodembewegingstrend bij de GNSS-stations en de gemodelleerde bodembewegingstrend ligt gemiddeld rond 2 cm/eeuw, wat als een redelijk goede match beschouwd wordt.**

Dit betekent overigens niet per sé dat de gemodelleerde elastische respons niet optreedt. Het is bijvoorbeeld ook mogelijk dat de geologische bodemdaling door tektoniek en glacio-isostasie enigszins onderschat wordt en de stijging door de elastische respons enigszins overschat wordt. **Vooralsnog wordt daarom aanbevolen om voor het berekenen van bodemdalingsvolumes in de kustgebieden de geologische bodemdalingskaart zónder elastische respons te blijven gebruiken. Dit betekent concreet dat de eerder voor Kustgenese afgeleide bodemdalingsvolumes en daaruit volgende adviezen niet veranderd hoeven te worden.**



- *Geologische bodemdaling: geautomatiseerde procedure*  
In Hijma & Kooi (2018b) zijn voor alle Rijkswaterstaat-kustdeelgebieden in tabelvorm bodemdalingsvolumes met de bijbehorende onzekerheden gegeven. Deze volumes zijn uitgesplitst naar tektoniek, glacio-isostasie en winning. De berekeningen zijn uitgevoerd in een GIS-omgeving. Dit jaar is dit systeem geautomatiseerd tot een Python-module, zodat bij aanpassingen van basiskaarten, het toevoegen van basiskaarten en/of het veranderen van de onzekerheden, de bodemdalingsvolume snel en robuust opnieuw bepaald kunnen worden.

## 5 Aanbevelingen

- *Verder verbeteren werkwijze monitoren van bodemdaling bij de getijdenstations*  
In 2020 is een belangrijke stap gezet door het opstellen van een monitoringsstrategie voor geologische bodemdaling bij de getijdenstations (Strijker et al., 2020). In 2021 zullen delen van deze strategie uitgevoerd gaan worden en zullen nieuwe GNSS-stations en InSAR-transponder geplaatst worden.

Het zo goed mogelijk meten van geologische bodemdaling is erg belangrijk. Het uiteindelijk gebruik van de meting in de gehele keten van de *Bodemdalings- en Zeespiegelmonitor* is dat evenzeer. De huidige keten (huidige werkwijze) moet eerst in detail beschreven worden en vervolgens moet deze keten zodanig aangepast worden dat hij berust op de volgende pijlers:

- **Herleidbaar:** alle stappen in de keten van meting tot zeespiegelwaarde moeten zijn vastgelegd in openbare protocollen en alle acties binnen deze protocollen, inclusief de data, moeten in openbare databases beschikbaar zijn
- **Robuust:** de strategie moet minimaal geldig zijn voor de komende 50-100 jaar
- **Doelgericht:** het doel van de monitoring moet leidend zijn bij het inrichten van het meetnetwerk
- **Onderscheidend:** de monitoring moet laten zien welk deel van de gemeten zeespiegelstijging veroorzaakt wordt door bodembeweging van het getijdenstation
- **Inclusief:** het meetnetwerk moet gekoppeld kunnen worden aan zeespiegelmetingen elders (in de wereld, op zee) en aan bodemdalingsmetingen in het binnenland

Om dit voor elkaar te krijgen is continue aandacht nodig vanuit de *Bodemdalingsmonitor*, ook voor de afstemming met alle betrokken partijen. Het wordt dus aanbevolen om binnen de *Bodemdalingsmonitor* in 2021 e.v. hier actief mee bezig te blijven.

- *De onzekerheid over de gemodelleerde geologische bodemdaling verkleinen*  
Dit onderdeel blijft voorlopig belangrijk binnen de *Bodemdalingsmonitor*, met name omdat de onzekerheid nog steeds relatief groot is en er continu nieuwe inzichten beschikbaar komen. In de laatste jaren is (deels) vanuit de *Bodemdalingsmonitor* gewerkt aan opzetten van een database met zeespiegeldata van Nederland en de Noordzee. Een dergelijke database is onmisbaar bij het verbeteren van isostatische modellen en daarmee onmisbaar voor het verkleinen van de onzekerheid rondom de gemodelleerde geologische bodemdalingskaart. De database is vrijwel af en kan in 2021 volledig afgerond worden en daarmee kunnen de isostatische modellen direct beter gekalibreerd en gevalideerd worden. Verwacht wordt dat in 2021 daarom nieuwe isostatische modellen gebruikt kunnen worden binnen de *Bodemdalingsmonitor*.

Aanbevolen wordt om in 2021 verder te blijven werken aan het verbeteren van de geologische bodemdalingskaart en daarbij weer samen te werken met geodeten. Hier is al mee gestart in 2019-2020, maar er is nog veel terreinwinst mogelijk. Concreet betekent dit dat in 2021 een rapport zal verschijnen met daarin aandacht voor de afgeronde geologische zeespiegeldatabase, de consequenties daarvan voor de geologische bodemdalingskaart en de afgeleide bodemdalingsvolumes, en extra aandacht voor de GNSS-stations in de omgeving van de hoofdgetijdenstations (fundering, meetreeksanalyse).

De bodemdalingsvolumes zullen dan geüpdatet worden volgens de procedure zoals beschreven in het huidige rapport. Hierbij zal ook hernieuwde aandacht zijn voor bodemdaling door winning. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is het openbaar beschikbaar stellen van de ontwikkelde Python-module, zodat gebruikers ook zelf deze module kunnen gebruiken. Hierbij zal aangesloten worden bij eerder ontwikkelde online tools voor de *Zeespiegelmonitor*.

## 6 Literatuurlijst

- 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.
- Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W.C., Gazeaux, J., 2016. MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (3), 2054-2068. 10.1002/2015jb012552.
- 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.
- Jelgersma, S., 1961. Holocene sea-level changes in The Netherlands. *Mededelingen Geologische Stichting*, 7, 1-101.
- Leusink, J.G., 2003. Wat waterpasgegevens vertellen over geologische bodemdaling. M.Sc.-thesis, TUDelft/Rijkswaterstaat.
- 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.
- Riva, R.E.M., Frederikse, T., King, M.A., Marzeion, B., van den Broeke, M.R., 2017. Brief communication: The global signature of post-1900 land ice wastage on vertical land motion. *The Cryosphere*, 11 (3), 1327-1332. 10.5194/tc-11-1327-2017.
- Strijker, B., Wegman, C., Honingh, D., Rongen, G., Leenders, J., 2020. Strategie voor monitoring van bodembewegingen bij de Nederlandse kust - Bodemdaling en relatieve zeespiegelstijging, HKV-Lijn in Water rapport PR2695.60; .
- Van der Marel, H., 2020. Comparison of GNSS Processing Methodologies for Subsidence Monitoring - NAM GNSS APM Project Report, TUDelft.

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](http://www.deltares.nl)