Deltares

Enabling Delta Life

Bodemdalingsmonitor 2019

Kustfundament en getijdenbekkens

NAP-peilmerkenanalyse, monitoringsstrategie, isostatische modellen

Deltares

Bodemdalingsmonitor 2019
Kustfundament en getijdenbekkens

NAP-peilmerkenanalyse, monitoringsstrategie, isostatische modellen

Marc Hijma
Erik van Onselen

© Deltares, 2019

Deltares

Titel
Bodemdalingsmonitor 2019 Kustfundament en getijdenbekkens

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat-WVL	11203683-002	11203683-002-ZKS-0017	32

Trefwoorden
Zeespiegelstijging, gaswinning, tektoniek, isostasie, InSAR, GNSS, NAP

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, 2018a; 2018b). Op basis hiervan zijn ook bodemdalingsvolumes berekend, ten behoeve van het suppletieprogramma, zowel voor het heden als de toekomst. Deze volumes worden vooral bepaald door glacio-isostatische bodemdaling (GIA) en daling door winning. De onzekerheden rondom isostatische bodemdaling en toekomstige daling door winning zijn echter groot. Het huidige rapport vergelijkt meerdere isostatische modellen. De vergelijking laat zien dat de in het verleden gebruikte onzekerheid van 50% niet conservatief is. In de toekomst kan deze onzekerheid verkleind worden door verder samen te werken met GIA-modelleurs en de modellen te kalibreren met geologische zeespiegelgegevens.

In het rapport is ook gekeken naar de invloed van veranderende gaswinningsplannen voor de bodemdaling rondom het Groninger gasveld. In het centrum van het gasveld, op land dus, zal veel minder bodemdaling gaan optreden, maar de bodemdaling bij de randen (Waddenzee, Eems-Dollard) verandert niet wezenlijk.

De samenwerking met GIA-modelleurs heeft geleid tot het identificeren van een relevante bodembewegingscomponent die tot nog toe niet meegenomen was: de elastische respons van de aarde op recente ijsafsmelt van Groenland. Dit leidt in Nederland tot bodemstijging, met snelheden van meerdere cm/eeuw, een grootte die vergelijkbaar is met snelheden van bodemdaling door GIA. In 2020 zal dit nader onderzocht worden, mogelijk leidend tot aanpassingen in de gemodelleerde bodemdalingsvolumes.

Een belangrijke aanbeveling uit het vorige rapport (Hijma & Kooi, 2018b) was om geodetische metingen te gebruiken ter validatie van de modelberekeningen. In dit rapport zijn NAP-peilmerk-, GNNS-, InSAR- en zwaartekrachtsdata gebruikt om inzicht te krijgen in gemeten bodemdaling.

Het rapport sluit af met een voorgestelde monitoringsstrategie voor de getijdenstations. Deze strategie heeft als doel om de zeespiegelstand zo nauwkeurig mogelijk te meten ten opzichte van een referentieniveau, waarbij verticale bewegingen van dit referentieniveau ook gemeten worden. Op deze manier zou de absolute zeespiegelstijging van relatieve onderscheiden kunnen worden.

Deltares

Titel
Bodemdalingsmonitor 2019 Kustfundament en getijdenbekkens

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat-WVL	11203683-002	11203683-002-ZKS-0017	32

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	dec. 2019	Marc Hijma Erik van Onselen	MH	Henk Kooi		Toon Segeren	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**

2 Bodemdaling door isostasie en winning: een actualisatie **3**
2.1 Isostasie 3
2.1.1 Zeespiegeldatabase 3
2.1.2 GIA 3
2.2 Bodemdaling door winning tot 2050 7
2.2.1 Hoek van Holland 7
2.2.2 Groningen 9

3 Geologische bodemdaling op basis van metingen **11**
3.1 Primaire en secundaire peilmerken 11
3.1.1 Introductie NAP en peilmerken 11
3.1.2 Methode voor analyseren peilmerkdata 15
3.1.3 Resultaten 18
3.1.4 Discussie 18
3.2 GNSS, InSAR en zwaartekracht 24
3.2.1 GNSS 24
3.2.2 InSAR 25
3.2.3 Zwaartekracht 27

4 Discussie en conclusies **29**

5 Aanbevelingen **31**

6 Literatuurlijst **32**

Bijlage(n)

A Monitoringsstrategie voor zeespiegelstijging en bodemdaling langs de Nederlandse kust **A-1**

1 Inleiding

In het kader van een nieuwe rekenregel voor de bepaling van de benodigde hoeveelheid suppletiezand langs de Nederlandse kust en in de getijdenbekkens is in 2017 gestart met een onderzoek naar bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. In de nieuwe rekenregel is namelijk een aparte term voor volumeveranderingen door verticale bodembewegingen opgenomen (Van der Spek et al., 2015; Lodder, 2016). In de voorgaande rekenregel werd het volumeverlies door bodemdaling impliciet meegenomen, doordat de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging, 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.

De sinds 2018 verschenen onderzoeken naar bodemdaling in het kustfundament (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b) geven een overzicht van de relevante bodemdalingscomponenten, waarbij een uitsplitsing gemaakt is tussen wat ‘geologische’ bodemdaling genoemd is (door tektoniek en isostasie) en bodemdaling door winning (gas, olie, zout en water). Ook is de bijdrage van elke component gekwantificeerd. Daarbij is veel aandacht geschonken aan onzekerheden. Deze laatste zijn namelijk fors, tot wel 50% van de totale daling. Daarnaast is voor drie periodes (1917-2017, 1987-2017 en 2018-2050) het bodemdalingsvolume uitgerekend voor alle deelgebieden van het kustfundament. Dit liet zien dat de volumes significante grootes hebben (2.5 Mm^3/jaar in het kustfundament). Verder is afgesproken dat, in analogie met de *Zeespiegelmonitor*, een *Bodemdalingsmonitor* wordt opgezet waarbij jaarlijks over nieuwe inzichten en data gerapporteerd worden.

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 een aantal (afhankelijk van prioriteiten) van de aanbevelingen uit het voorgaande rapport doorgevoerd. Hieronder wordt beschreven hoe de aanbevelingen uit het rapport van 2018 (Hijma & Kooi, 2018b) zijn opgepakt:

- *Gericht(er) monitoren van bodemdaling*
  Dit is in 2019 opgepakt door het opstellen van een monitoringsstrategie voor de getijdenstations (als aparte memo opgenomen in de bijlage). Hiertoe is onder andere, samen met RWS-WVL, een workshop georganiseerd en samengewerkt met de TU Delft.

- *Vaststellen of grondwateronttrekking een significante bijdrage levert aan bodemdaling*
  In 2018 is vastgesteld dat deze bijdrage zeer gering is geweest, met daarbij de kanttekening dat deze conclusie getrokken is op basis van weinig brongegevens en verschillende aannames. Een uitgebreidere onderbouwing van de conclusie werd aanbevolen, maar is dit jaar niet opgepakt, omdat andere onderwerpen geprioriteerd zijn.

- *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. Ook dit is nog niet uitgevoerd vanwege prioritering van andere onderwerpen. Mogelijk is het op te pakken middels een Ph.D.-student.

- *De onzekerheid over de isostatische bodembeweging verkleinen*
  Dit is wel opgepakt, omdat bodemdaling door isostasie een van de belangrijkste veroorzakers van bodemdaling is op landelijke schaal. De onzekerheid over de snelheid van isostatische bodemdaling is echter groot, waardoor schattingen uiteenlopen van ruwweg 3-8 cm/eeuw voor eenzelfde locatie. Er zijn dit jaar belangrijke stappen gezet in het verkleinen van de onzekerheden, met name door overleg met modelleurs uit Delft (zie §2.1.2). Voor deze modelleurs is het noodzakelijk hun modellen te kunnen kalibreren/valideren aan betrouwbare (geologische) zeespiegeldata. In 2017 is hiermee een belangrijke start gemaakt door het opzetten van een database met zeespiegeldata uit de omgeving van Rotterdam (§2.1.1). Naar verwachting kan deze database de komende jaren uitgebreid worden met data uit de rest van Nederland en de Noordzee. Daarnaast is gestart met het meenemen van metingen (NAP-peilmerken, GNSS-stations, InSAR) in de bepaling van de geologische bodemdaling (H3).

- *Het uitbreiden van de zeespiegelmonitor met de bodemdalingsmonitor*
  Dit huidige rapport vormt feitelijk het start van de bodemdalingsmonitor van het kustfundament. Deze monitor zou zich langjarig moeten richten op het actualiseren van de landelijke kustfundament-getijdenbekkens bodemdalingskaart. 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.

Het huidige rapport start in Hoofdstuk 2 met een update over de kennis van geologische bodemdaling en bodemdaling door winning. Hoofdstuk 3 beschrijft daarna de analyse van NAP-peilmerken en GPS- en InSar-data. Hoofdstuk 4 sluit af met discussie, conclusie en aanbevelingen.

2 Bodemdaling door isostasie en winning: een actualisatie

2.1 Isostasie

De achtergronden bij (glacio-)isostasie, hier verder GIA genoemd, zijn eerder beschreven door Hijma & Kooi (2018a), terwijl de GIA-modeluitkomst die gebruikt is voor het berekenen van de bodemdalingsvolumes is beschreven in Hijma & Kooi (2018b). Het laat zien dat verwacht wordt dat GIA de grootste bijdrage levert aan geologische bodemdaling, met snelheden van 2-6 cm/eeuw, waarbij de snelheden toenemen van zuid naar noord. De onzekerheid rondom deze bijdrage is echter groot en is toen geschat op ±50%. Een aanbeveling was dan ook om te proberen deze onzekerheid te verkleinen. Dit is naar verwachting mogelijk op basis van metingen van geologische bodembeweging (denk aan primaire NAP-peilmerken, GNSS-data, InSar-data), maar ook door de modellen die GIA-bewegingen uitrekenen te verbeteren. Dit laatste is bijvoorbeeld mogelijk door de modellen te kunnen kalibreren op meer en nauwkeurigere geologische zeespiegelgegevens dan in het verleden. Deze verbeteringen zijn alleen mogelijk door nauwe samenwerking met zowel geodeten als GIA-modelleurs. Deze samenwerking is dan in 2019 ook nadrukkelijk gezocht. Hieronder wordt eerst een korte update gegeven over de zeespiegeldatabase en daarna ingegaan op de stappen die gezet zijn binnen het GIA-onderzoek.

2.1.1 Zeespiegeldatabase

Het artikel met de Holocene zeespiegeldata voor de omgeving van Rotterdam en de verdronken Rijn-Maasvallei in de Noordzee is inmiddels gepubliceerd (Hijma & Cohen, 2019) en wordt reeds gebruikt binnen GIA-modellen. De database is onderdeel geworden van een wereldwijde database met geologische zeespiegeldata (www.holsea.org) die gebruikt wordt voor onder andere het verbeteren van GIA-modellen. De database zal voor Nederland steeds verder uitgebreid worden, bijvoorbeeld door het toevoegen van verschenen data voor Noord-Nederland (Meijles et al., 2018) en naar verwachting ook met nieuwe data voor de Noordzee vanuit het geologische zeespiegelonderzoek dat de laatste jaren daar uitgevoerd is (zie ook Hijma & Kooi, 2018b). De database en de afgeleide kennis hieruit kan steeds met een kleine inspanning direct gebruikt worden voor projecten als Beheer & Onderhoud Kust en Kustgenese.

2.1.2 GIA

In 2019 is de samenwerking met de TU Delft uitgebreid en is er gewerkt met Wouter van der Wal, zijn student Rosalie van Casteren, Riccardo Riva en Karen Simon. Voor de afstudeerscriptie van Van Casteren is de bovengenoemde zeespiegeldatabase gebruikt om vast te stellen welk model de beste ‘fit’ geeft met deze database. De modeluitkomsten van dit model zijn weergegeven in Figuur 2.1. Vorig jaar is verder een nieuw GIA-model gepresenteerd (Simon et al., 2018) dat ook relevante output voor Nederland gaf (Figuur 2.2). Voor de volledigheid wordt het in 2018 gebruikte model voor het berekenen van het bodemdalingsvolume ook getoond (Figuur 2.3).

Figuur 2.1 Huidige GIA-bodembewegingen (cm/jaar) volgens het ICE6G-VM5A model van Peltier et al. (2015), dat volgens Van Casteren haar afstudeerscriptie de beste fit gaf met de Nederlandse geologische zeespiegeldatabase.

Figuur 2.2 Huidige GIA-bodembewegingen (cm/jaar) volgend uit Simon et al. (2018), met daarin per modelpunt de berekende onzekerheid in procenten.

Figuur 2.3 Huidige GIA-bodembewegingen (cm/jaar) volgend uit een modelrun van Paolo Stocchi (NIOZ). Deze is gebruikt voor de bodemvolumebepalingen in 2018. De groene sterren geven de locaties weer van de hoofdgetijdenstations (plaatje eerder verschenen in Hijma & Kooi, 2018b).

Omdat de verschillen tussen de drie kaarten op basis van alleen bovenstaande figuren lastig te zien zijn, laat Figuur 2.4 de modeluitkomsten langs een lijn tussen de getijdenstations zien. Duidelijk is dat het model van Simon et al. sterk lijkt op het model dat gebruikt is voor de bodemdalingsvolumeberekeningen in 2018. Het ICE6G-VM5A van Peltier et al. (2015) laat met name voor Noord-Nederland veel hogere dalingssnelheden zien dan de andere modellen. Dit geeft eens te meer aan hoeveel spreiding er mogelijk is tussen verschillende GIA-modellen, afhankelijk van welk ijskapmodel en welke aardkorstparameters gebruikt worden.
Vooralsnog wordt niet voorgesteld om de eerdere berekeningen van en onzekerheid rond de bodemdalingsvolumes te veranderen. Het is beter te wachten totdat de recent verzamelde geologische zeespiegeldata uit de Noordzee gebruikt zijn om GIA-modellen te kalibreren en dan het meest geschikte model te gebruiken. Hiervoor is het nodig de in 2019 opgezette samenwerking met GIA-modelleurs in 2020 te intensiveren, waarbij ook de nieuwste inzichten meegenomen worden (zie §2.1.2.1).

Figuur 2.4 Berekende GIA-bodembeweging langs de getijdenstations volgens de verschillende modellen. De verschillen vallen grotendeels binnen de geschatte onzekerheid van ±50%. Het noorden van Nederland is het meest gevoelig voor variaties binnen de GIA-modellen.

2.1.2.1 *Nieuw inzichten: invloed ijskapverandering in 20e/21ste eeuw op bodembeweging*

Tijdens de overleggen met TU Delft werd aanvankelijk alleen over GIA-bewegingen gesproken. Deze worden feitelijk nog veroorzaakt door het aangroeien/afsmelten van grote ijskappen in de laatste ijstijd. Maar de overgebleven grote ijskappen, op Groenland en Antarctica, ondergaan momenteel veranderingen die ook invloed hebben op de bodembeweging in Nederland. Dit geldt met name voor de toenemende snelheid van smelt op Groenland. Dit effect wordt momenteel niet/nauwelijks meegenomen in relatieve zeespiegelstudies, bijvoorbeeld bij een analyse van getijdenstationreeksen. Het kan gezien worden als een snelle versie van GIA, en wordt in de literatuur 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 2.5).

Figuur 2.5 Linker paneel laat de bodemweging 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)

Voor Nederland pakt het vooralsnog gunstig uit, want het leidt ogenschijnlijk tot behoorlijke bodemstijging (naar verwachting vergelijkbaar met London). Hoewel ook rond deze modeluitkomsten de onzekerheden groot zullen zijn, is wel duidelijk dat bij het interpreteren van bijvoorbeeld GNSS-data, de invloed van ijskapveranderingen in de laatste eeuw meegenomen moet worden. Ook is duidelijk dat deze invloed niet constant is geweest tijdens de laatste eeuw en huidige snelheden zeker niet geëxtrapoleerd kunnen worden naar bijvoorbeeld het begin van de 20ste eeuw. Binnen de *Zeespiegelmonitor* zou gekeken kunnen worden op welke manier deze invloed ook bij de analyse van getijdenreeksdata meegenomen kan worden. Voorgesteld wordt om in 2020 de elastische bijdrage en de invloed daarvan op bodembeweging in NL samen met de TU Delft goed te analyseren. Op basis van de uitkomsten zullen nieuwe bodemdalingsvolumes uitgerekend moeten worden inclusief deze elastische bijdrage. Dit zou dus kunnen betekenen dat de volumes aanmerkelijk kleiner worden. De veroorzaakte bodemstijging door de elastische reactie varieert niet veel binnen Nederland. Over de periode 1902-2014 bedroeg deze ongeveer 4 cm, maar gemiddelde snelheden over 2003-2014 liggen al rond 5.5-6 cm/eeuw (pers. comm. met Thomas Frederikse en Riccardo Riva).

2.2 Bodemdaling door winning tot 2050

Ten opzichte van de eerdere rapporten over bodemdaling door winning in het kustfundament (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b), zijn er enkele nieuwe winningsplannen goedgekeurd voor de winning bij de velden rondom Hoek van Holland (meer winning) en in Groningen (minder winning). Half september werd bekend dat de gaswinning in het Groningergasveld zelfs al in 2022 volledig gaat stoppen. In de volgende paragrafen wordt per gebied ingegaan op de gevolgen van deze nieuwe winningsplannen voor de verwachte bodemdaling in het kustfundament.

Er is verder overleg geweest met relevante onderzoeksgroepen bij TNO (Peter Fokker) en TU Delft (Femke Vossepoel). Deze overleggen hadden twee doelen:

1) Vaststellen welk onderzoek de verschillende onderzoeksgroepen doen naar bodemdaling door winning.
2) Afspraken maken om elkaar op de hoogte te houden van lopende en toekomstige onderzoeken, zodat er geen onnodig overlappend onderzoek gedaan wordt en men kan profiteren van elkaars resultaten.

Uit de overleggen volgde dat geen van de onderzoeksgroepen op dit moment zelf modellen draait om toekomstige bodemdaling door winning uit te rekenen. De enige bron hiervoor zijn momenteel dus de rapporten die verschijnen bij nieuwe winningsplannen (zie ook volgende paragrafen). De achterliggende data bij deze rapporten is momenteel niet digitaal beschikbaar, het zou voor de *Bodemdalingsmonitor* wenselijk zijn als in de toekomst deze data digitaal gedeeld wordt, zodat geen contourkaarten overgetrokken/gedigitaliseerd hoeven te worden.

2.2.1 Hoek van Holland

Het winningsgebied rondom Hoek van Holland bevat verschillende velden (Hijma & Kooi, 2018a) die naar verwachting na 2027 allemaal niet meer produceren. Tot die tijd zal de productie verhoogd worden, met name in het veld rondom Maasdijk. Geconcludeerd wordt dat de verwachte bodemdaling tot 2027 niet wezenlijk afwijkt van de eerdere verwachting (NAM, 2013), namelijk minder dan 2 cm. Na 2027 wordt geen bodemdaling meer verwacht (NAM, 2017). Bij een directe vergelijking van de verwachtingen is te zien dat het gebied met bodemdaling wel groter is geworden en de contourlijn van 4 cm bodemdaling een groter gebied beslaat (Figuur 2.6, Figuur 2.7). Deze veranderingen vallen echter binnen de onzekerheid voor bodemdaling door winning tot 2050 (±50%, Hijma en Kooi, 2018b) en er is dus geen noodzaak

om binnen de bodemdalingsmonitor de verwachte bodemdaling door winning tot 2050 voor dit gebied aan te passen.

Figuur 2.6 Bodemdalingsprognose voor 2025 uit 2013 (NAM, 2013)van de totale bodemdaling door winning (bodemdaling in cm). De daling is de combinatie van de bijdrage van de verschillende velden.

Figuur 2.7 Bodemdalingsprognose voor 2027 uit 2017 (NAM, 2017) van de totale bodemdaling door winning (bodemdaling in cm). De daling is de combinatie van de bijdrage van de verschillende velden. Ten opzichte van Figuur 2.6 valt op dat de contourlijn van 4 cm een groter gebied omvat en dat de 2 cm contourlijn eerder ophoudt op de Noordzee.

2.2.2 Groningen

Tot voor kort werd aangenomen dat de gaswinning in het Groningergasveld in 2030 zou stoppen, recent is dit dus vervroegd naar 2022. Voor dit laatste scenario zijn nog geen modeluitkomsten bekend met betrekking tot de verwachte bodemdaling, wel voor het scenario waarbij in 2030 gestopt wordt. In eerdere rapporten over de bijdrage van gaswinning aan bodemdaling (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b) werd nog gewerkt met een scenario waarbij nog tientallen jaren gas gewonnen wordt. De nieuwe modeluitkomsten (Doornhof & Van der Wal, 2018) laten zien dat in het centrum van de schotel de uiteindelijke bodemdaling rond de 38 cm zal liggen in plaats van de eerder verwachte 46 cm (Figuur 2.8).

Figuur 2.8 Ontwikkeling van de bodemdaling in het centrum van de bodemdalingsschotel van Groningen: een vergelijk tussen de eerdere verwachtingen uit 2016 en de verwachting op basis van de kabinetsplannen (Doornhof & Van der Wal, 2018).

Het kustfundament en de getijdenbekkens van de Waddenzee en de Eems-Dollard liggen echter ver weg van het centrum van de schotel. Een vergelijking van de eerdere en de nieuwe verwachting voor de bodemdalingsschotels (vanaf het begin van de winning) laten minimale verschillen zien in de ligging van de verschillende contourlijnen (Figuur 2.9 en Figuur 2.10), verschillen die ruim binnen de onzekerheid van ±50% vallen die gehanteerd wordt voor verwachtingen voor bodemdaling (Hijma & Kooi, 2018b). De contourlijn langs de oostpunt van het schiereiland bij Termunten is bijvoorbeeld nog steeds 6 cm en de contourlijn die de noordkust van Groningen snijden ten noorden van Warffum zijn ook niet veranderd. Het is daarom niet nodig om binnen de bodemdalingsmonitor de verwachte bodemdaling door winning tot 2050 voor dit gebied aan te passen.

*Figuur 2.9 Bodemdalingsprognose voor 2050 (in cm), **exclusief** productiestop na 2030 (NAM, 2015).*

*Figuur 2.10 Bodemdalingsprognose voor 2050 (in cm), **inclusief** productiestop na 2030 (Doornhof & Van der Wal, 2018).*

3 Geologische bodemdaling op basis van metingen

De geologische bodemdaling in Hijma en Kooi (2018a; 2018b) was volledig gebaseerd op modeluitkomsten en werd gedomineerd door de bijdrage van GIA. Een belangrijke aanbeveling was om geodetische metingen te gebruiken om vast te stellen of de gemodelleerde geologische bodemdaling met de metingen overeenstemt. Relevante metingen in dit verband zijn metingen van bodemdaling van de top van het Pleistoceen in Nederland, waarbij bodemdaling in het Holocene pakket, door bijvoorbeeld compactie en veenoxidatie, geen rol speelt. Het is echter niet eenvoudig om geologische bodemdaling te meten. Ten eerste omdat snelheden van bodembeweging laag zijn en er dus lange en nauwkeurige meetreeksen nodig zijn (minimaal 10-20 jaar) om die bewegingen te meten en dergelijke meetreeksen zijn schaars. Ten tweede omdat de meetreeksen van geologische bodemdaling 'verstoord' worden door bodemdaling door winning van gas, olie, zout en water. Ten derde omdat het niet zeker is dat geologische bodemdaling inderdaad gedomineerd wordt door GIA. In hoofdstuk 2 wordt de elastische respons van de aarde op recente afsmelt van landijs genoemd als een mogelijk belangrijke component van bodembeweging in Nederland. Proceskennis hiervan is echter nog beperkt en dit geldt mogelijk ook voor andere processen die bijdragen aan bodembewegingen van de top van het Pleistoceen. Dit betekent dat het niet zeker is dat patronen die bijvoorbeeld zichtbaar zijn in lange meetreeksen goed begrepen worden. Het niet overeenkomen van de metingen met de gemodelleerde geologische bodemdaling hoeft dus niet direct te betekenen dat de modellen of de metingen niet betrouwbaar zijn.

Niettegenstaande bovenstaande bedenkingen, is het erg nuttig om de meetreeksen en data die er zijn goed te analyseren. De aanname hierbij is dat, ondanks de vele onzekerheden, geologische bodemdaling een regionaal-landelijk patroon heeft dat herkenbaar zou moeten zijn in datasets met een landelijke dekking. Hiertoe is gebruik gemaakt van NAP-peilmerken, GNSS, GPS en zwaartekracht data. De NAP-peilmerken analyse heeft tot een goede samenwerking geleid met RWS-CIV (Bas Alberts) en TU Delft (Ramon Hanssen).

3.1 Primaire en secundaire peilmerken

3.1.1 Introductie NAP en peilmerken

Het Normaal Amsterdams Peil (NAP) is sinds 1875 een denkbeeldig equipotentiaalvlak waarvan de hoogte per definitie gelijk is aan 0 m. Het NAP wordt vastgelegd in peilmerken. Dit zijn objecten waarvan het hoogteverschil met het NAP-vlak bekend wordt verondersteld. De hoogte van nieuwe peilmerken kan vervolgens ten opzichte van bestaande peilmerken - en dus indirect het NAP-vlak - bepaald worden. Omdat het NAP een denkbeeldig vlak is moet er in de fysieke wereld aan gerefereerd kunnen worden. Hiervoor zijn in het verleden de Huddestenen (acht marmeren stenen die in sluizen rond het IJ gemetseld zijn) gebruikt voor het toenmalige Amsterdams Peil (AP). Deze stenen lagen op 2.67 m boven het AP-niveau, de hoogte die zeedijken destijds minimaal moesten hebben. Eind 19de eeuw werd het AP overgebracht naar andere peilmerken in Nederland en werd het NAP voor heel Nederland geïntroduceerd. Bij de tweede nauwkeurigheidswaterpassing (2^{e} NWP: 1926-1939) zijn twee nog bruikbare Huddestenen gebruikt als referentieniveau, maar de peilmerken bleken niet stabiel genoeg. In 1953 is daarom overgestapt op een bronzenbout op een heipaal onder de Dam in Amsterdam. Dit punt bleek echter ook niet volledig stabiel en de hoogte van deze bout is in 2004, na de 5^{e} NWP, opnieuw berekend. Het nieuwe uitganspunt hiervoor is een cluster van zes ondergrondse peilmerken op de Veluwe en Utrechtse Heuvelrug die als stabiel worden verondersteld. Als uitgangshoogte voor deze punten is hun hoogte van de 2^{e} NWP genomen die daarmee in feite

dus nog gerelateerd is aan de Huddestenen. Bodemdaling van deze 6 punten tussen de 2e en 5e NWP zit dus niet verwerkt in de aanpassing van de NAP-hoogte van de bout op de DAM. Het NAP-vlak blijft echter moeilijk vast te leggen in peilmerken door de (deels) onvoorspelbare instabiliteit van deze merken.

Peilmerken zijn er in verschillende vormen en worden grofweg in twee categorieën ingedeeld: secundaire (Figuur 3.1) en primaire peilmerken (Figuur 3.2). De primaire peilmerken worden het meest stabiel geacht, omdat ze meestal gefundeerd zijn in het Pleistoceen. De hoogte van secundaire peilmerken (vaak aangebracht in gebouwen of kunstwerken) wordt gemeten ten opzichte van een primair peilmerk of een groep van primaire peilmerken. De gerapporteerde hoogtes van secundaire peilmerken 'hangen' dus aan de gerapporteerde hoogtes van de primaire peilmerken waaraan ze gekoppeld zijn.

Het vastleggen van het NAP-nulvlak en het opmeten van hoogtes gebeurt door middel van waterpassingen. Voor primaire peilmerken zijn er speciale meetcampagnes om het NAP-nulvlak vast te leggen: de nauwkeurigheidswaterpassingen (NWP). Er zijn in totaal 5 NWP-en geweest, waarvan de 2e t/m 5e NWP betrouwbaar genoeg zijn om bodemdaling mee te schatten. Bij de 3e en 4e NWP zijn de hoogtes van de primaire merken ten opzichte van het NAP-nulniveau van de 2de NWP vastgehouden. Wel werd opgemerkt, met name bij de 4e NWP, dat voor sommige primaire peilmerken de hoogtes ten opzichte van elkaar en van het nulvlak niet meer klopten. Naar aanleiding van de 5e NWP zijn de hoogtes van zowel de primaire als de secundaire peilmerken aangepast. Als referentiepunt is hiervoor nog steeds de bout op de Dam gebruikt, maar de NAP-hoogte van deze bout is opnieuw vastgesteld op basis van de eerder genoemde 6 stabiel veronderstelde punten in het midden van het land.

In dit rapport maken we zowel gebruik van data van primaire als secundaire peilmerken. Alhoewel secundaire peilmerken op zich niets zeggen over de totale bodembeweging, kunnen ze in combinatie met de hoogteverandering van primaire peilmerken over de periode tussen de 2e en 5e NWP wel inzicht geven in de totale bodembeweging. Het doel van het onderzoek is aan de hand van de enorme hoeveelheid peilmerkdata (meer dan 75000 punten verdeeld over Nederland) bodemdaling inzichtelijk te maken. Hierbij zijn we met name geïnteresseerd of patronen van gemodelleerde geologische bodemdaling herkenbaar zijn, bijvoorbeeld de noord-zuid trend in GIA-bodemdaling, maar ook of de gemodelleerde snelheden van geologische bodemdaling dezelfde orde van grootte hebben als de gemeten dalingssnelheid van de primaire peilmerken. Hierbij wordt nogmaals vermeld dat de daling van de primaire peilmerken gemeten wordt ten opzichte van 6 punten die stabiel worden geacht . De geologische bodemdalingsmodellen geven echter aan dat ook deze punten dalen. Als deze modellen kloppen, zit de daling van de 6 punten dus niet verwerkt in de daling van de primaire peilmerken, waardoor de daling van deze merken altijd lager zal zijn dan de daling volgend uit de geologische bodemdalingsmodellen.

Figuur 3.1 Alle 76546 peilmerken in Nederland, waarvan de meeste secundaire peilmerken zijn.

Figuur 3.2 Alle huidige primaire peilmerken in Nederland. Deze peilmerken worden tijdens een NWP nauwkeurig ingemeten en worden gebruikt als referentie voor de hoogte van secundaire peilmerken. In het verleden waren er minder primaire peilmerken.

3.1.2 Methode voor analyseren peilmerkdata

Voor het inzichtelijk maken en analyseren van de data is een programma in Python geschreven. De input is een .out bestand waarin alle door de tijd gerapporteerde hoogtes van 76546 verschillende peilmerken (zowel primair als secundair) staan. In de voorbewerking van deze dataset is:

- Onderscheid gemaakt tussen primaire en secundaire peilmerken
- Onderscheid gemaakt tussen gecorrigeerde (na 5^{e} NWP) en ongecorrigeerde hoogtes

Het resultaat van de voorbewerking is weggeschreven als een .csv bestand. Dit bestand wordt direct ingelezen door het Pythonprogramma. Het programma doet het volgende:

- Data vooraf filteren op basis van een aantal specificaties:
  - Minimum tijd tussen de eerste en laatste waarneming van een peilmerk
  - Minimum aantal waarnemingen
  - Primaire/secundaire peilmerken of beide
- Per punt een lineaire regressie berekenen (apart voor gecorrigeerde en ongecorrigeerde metingen.
- Data achteraf filteren
  - Verbeteren regressie door verwijderen datapunten met een onverklaard verschil ten opzichte van de regressielijn groter dan 1 – α (net zolang totdat er geen outliers meer zijn).
  - Verwijderen van punten met R^2 van de regressie kleiner dan een gespecificeerde waarde.
  - Toetsen of de helling significant is. Een maximale p-waarde met nulhypothese de lijn y = 0 (geen bodembeweging) is gebruikt. Boven deze p-waarde wordt helling als 0 aangenomen.
- Een shapefile maken van de hierboven gefilterde puntdata
- Een figuur maken per peilmerk met de metingen, regressies en eventueel verwijderde outliers (voorbeeld in Figuur 3.3).
- Een raster interpoleren op basis van de puntdata

Op basis van de eerste resultaten is besloten om de bovenstaande filters op de volgende manier toe te passen voor een goede balans tussen datadichtheid en betrouwbaarheid van de regressie door de meetpunten:

- Minimaal 30 jaar tussen de eerste en de laatste waterpasmeting van een peilmerk
- Minimaal 8 waterpasmetingen uitgevoerd op een peilmerk
- Voor het verbeteren van de regressie is gekozen voor een betrouwbaarheidsinterval van 90% (α = 0.05 aan beide kanten van de verdeling) en een students' t-verdeling.
- De R^2 van de lineaire regressie dient minimaal 0.25 te zijn, de p_0 maximaal 0.75. Boven deze p-waarde wordt aangenomen dat er geen bodembeweging plaatsvindt.
- De resulterende bodembeweging is het gemiddelde van de hellingen van de regressielijnen door de ongecorrigeerde (unrev) en gecorrigeerde (rev) meetpunten.

60514 peilmerken zijn afgevallen omdat ze niet aan de vereisten van minimaal 8 metingen over een periode van 30 jaar of langer voldeden. Van de 16031 overgebleven peilmerken zijn er vervolgens nog 1422 verwijderd omdat de lineaire regressie niet aan de andere eisen voldeed. Uiteindelijk zijn 14609 peilmerken gebruikt voor verdere analyse. De bewegingssnelheden van de punten is geïnterpoleerd naar een raster met een resolutie van 4x4 km. De waarde in een cel is bepaald door de mediaan te nemen van punten binnen de cel (als er minimaal twee punten in liggen). In cellen waar minder dan twee (of geen) peilmerken liggen is een inverse

distance weighted interpolatie uitgevoerd op het midden van de cel met een maximale zoekradius van 12 km.

De correctie (hoogteaanpassing) die naar aanleiding van de 5e NWP is toegepast geeft een beeld van hoe de primaire peilmerken in hoogte zijn veranderd over een tijdspanne van gemiddeld 60 jaar (gemiddeld omdat de NWP-campagnes meerdere jaren in beslag namen). Van Bas Alberts (RWS-CIV) hebben we het grid gekregen met correctiehoogtes. Het lijkt voor de hand te liggen om de beweging van de primaire peilmerken te gebruiken voor het vaststellen van geologische bodemdaling: de meeste zijn tenslotte gefundeerd in het Pleistocene zand. Van primaire merken die tot de 5e NWP zijn vastgehouden kan de uitgevoerde correctiehoogte gedeeld worden door de tijd tussen opname (gemiddeld 60 jaar) in de 2e en 5e NWP, om zo gemiddelde bewegingssnelheden in cm/jaar te berekenen. Het delen van het correctiegrid van NAP-hoogtes na de 5e NWP door 60 jaar geeft dus inzicht in de gemiddelde bewegingssnelheid van de merken en dus in principe in die van het Pleistocene oppervlak. Het resultaat hiervan is gegeven in Figuur 3.4. Vooral voor oudere merken geldt echter wel dat ook zetting van de fundering zelf tot bodemdaling kan leiden. Deze zetting kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door aantasting van de fundering, belasting van de fundering door een gebouw of door negatieve kleef. Verder wordt opgemerkt dat primaire peilmerken binnen duidelijke dalingsschotels van gaswinningen niet meegenomen zijn bij het maken van het NAP-correctiegrid.

Figuur 3.3 Voorbeeld van een secundair peilmerk (ten noordwesten van Groningen) en de regressielijnen voor gecorrigeerde en ongecorrigeerde data. Bodemdaling bedraagt hier ongeveer 1.5 mm/jaar ten opzichte van gekoppelde primaire merken. 'rev' staat voor 'revisioned'. De blauwe lijn geeft dus hoogtes aan die gecorrigeerd zijn met de hoogtecorrectie van het gekoppelde primaire peilmerk. Deze 2e – 5e NWP hoogtecorrectie is hier ongeveer -1 cm geweest.

Figuur 3.4 Correctiegrid met hoogteverschillen tussen de 2e en 5e NWP, reeds omgezet naar een bewegingssnelheid in cm/jaar, uitgaande van 60 jaar tussen de 2e en 5e NWP.

Data van secundaire peilmerken analyseren voor vergelijk met gemodelleerde geologische bodemdaling is alleen zinvol als dit gedaan wordt in combinatie met die van primaire peilmerken. Een gemeten daling in een secundaire peilmerken is immers niet de 'werkelijke' bodemdaling als de primaire peilmerken waaraan ze aan gekoppeld zijn zelf ook bewegen. Het bleek niet mogelijk om de exacte manier waarop secundaire merken aan het primaire netwerk gekoppeld zijn te achterhalen. Om enig inzicht te krijgen in de werkelijke bewegingssnelheden van het secundaire netwerk is het correctiegrid van NAP-hoogte opgeteld bij de gemeten bodembeweging van de secundaire peilmerken.

3.1.3 Resultaten

Het RWS-CIV NAP-correctiegrid (Figuur 3.4) laat duidelijke patronen zien die aangeven dat de primaire merken niet willekeurig bewogen hebben, maar onder invloed van processen met ruimtelijke patronen. Een vergelijk met de gemodelleerde geologische bodemdaling (Figuur 3.6: nog niet eerder verschenen voor geheel Nederland, maar op basis van de berekeningen uit Hijma en Kooi, 2018b) laat zien dat de patronen in beide kaarten niet goed overeenkomen. De sterke noord-zuid trend die in Figuur 3.6 naar voren komt wordt veroorzaakt door de dominantie van GIA-bodemdaling. De zichtbare variatie binnen deze trend wordt veroorzaakt door tektonische bodemdaling. De patronen in het NAP-correctiegrid (Figuur 3.4) zijn deels te koppelen aan tektonische systemen in Nederland: de Roerdalslenk in Noord-Brabant/Limburg is bijvoorbeeld goed zichtbaar en ook het dalingsgebied in Noord-Holland komt overeen met een bekend tektonisch dalend gebied.

Wat verder opvalt in Figuur 3.4 is dat in een groot deel van Zeeland de primaire merken relatief veel gedaald zijn, terwijl Zeeland op een relatief stabiel geologisch blok ligt. Al eerder is vastgesteld dat de meetreeks in Zeeland niet goed bruikbaar is, onder andere omdat relatief veel punten slechts sinds de 4^{e} NWP gemeten worden. Leusink (2003) heeft daarom Zeeland ook buiten zijn onderzoek gehouden. Daarnaast correspondeert het gebied met stijgende peilmerken (geel/oranje) vrij goed met de hogere zandgronden van Nederland. Het is bekend dat de grondwaterstand in deze gebieden sinds de 2^{e} NWP flink gedaald is wat bodembeweging tot gevolg kan hebben gehad.

In de kaart met de geconstrueerde (totale) beweging van de secundaire peilmerken (Figuur 3.5) zijn de winningen in Groningen, bij Ameland, in Drenthe, tussen Harlingen en Franeker, bij Bergen aan Zee en bij Ter Apel goed zichtbaar door de versnelde bodemdaling ten opzichte van omliggende gebieden. Het vollopen met water van de mijnen in Limburg zorgt lokaal voor een sterke gemiddelde stijging van de bodem tussen de 0.3 en 0.7 cm/jaar. De Roerdalslenk is mogelijk zichtbaar als het dalende gebied dat door Noord-Limburg in noordwestelijke richting doorloopt. De gemeten daalsnelheden zijn hier ongeveer 0.1 cm/jaar.

De dalingssnelheden langs de kust volgens Figuur 3.5 worden gegeven in Figuur 3.7. In de kuststrook ligt de daalsnelheid tussen de 0.05 en 0.1 cm/jaar, met uitzondering van de kust bij Bergen en bij Ameland en Groningen, waar het effect van de gasvelden de daalsnelheid sterk beïnvloed. De gemiddelde daling langs de kust van 0.1 cm/jaar is dus een overschatting en zal, met name voor de Hollandse kust, gemiddeld tussen de 0.05 en 0.08 cm/jaar liggen op basis van deze analyse.

3.1.4 Discussie

Aan de hand van trends door hoogtemetingen van secundaire peilmerken in combinatie met de correctie die is uitgevoerd voor primaire peilmerken is voor heel Nederland een schatting gemaakt van de bewegingssnelheid van de bodem. Het doel van de analyses was om trends uit de data te halen die aan geologische bodemdaling gelinkt kunnen worden, zoals de noord-

zuid trend door isostasie. Door de manier waarop peilmerken geïnstalleerd zijn en door de manier waarop ze ingemeten worden, is gebleken dat dergelijke trends niet met een eenvoudige analyse uit de data te halen zijn. Wel zijn voor totale bodembeweging waardevolle resultaten behaald (Figuur 3.5, Figuur 3.7) en is voor elk peilmerk in Nederland een figuur gemaakt dat inzicht geeft in gerapporteerde hoogtes en (eventueel) bodembewegingstrends.

Ten eerste is het is belangrijk om op te merken dat de bodembeweging die uit de analyse van secundaire peilmerken volgt een totale bodembeweging is. Dat wil zeggen dat zowel diepe als ondiepe bodemdaling, inclusief mogelijke versnelde daling van zware, slecht gefundeerde constructies waar het peilmerk in zit, een rol spelen. Het is waarschijnlijk om die reden dat er in Zuid-Holland een gebied met veel bodemdaling wordt aangegeven in Figuur 3.5, wat in dit geval wordt veroorzaakt door compactie van slappe lagen en veenoxidatie in de ondiepe ondergrond. Een deel van de bodembewegingen in Figuur 3.5 zal dus veroorzaakt zijn door geologische bodemdaling, maar een onbekend deel ook door andere processen (winning, oxidatie, compactie, enz.). Met de huidige filters en methodiek was het niet mogelijk om uit de dataset van secundaire peilmerken de verschillende signalen van bodembeweging te ontrafelen. In relatie tot geologische bodemdaling wordt deze kaart vooral gebruikt voor het identificeren en vergelijken van landelijke patronen.

Vanwege het belang wordt nogmaals benadrukt dat geologische bodemdaling ook de 6 ‘stabiele’ punten beïnvloedt. Aangezien de NAP-hoogte van deze punten sinds de 2^{e} NWP constant wordt gehouden is een deel van de geologische bodemdaling dus feitelijk uit het NAP-correctiegrid ‘gefilterd’. Volgens de geologische bodemdalingsmodellen, die nog niet gevalideerd zijn, is de snelheid van geologische bodemdaling bij deze punten 3-4 cm/eeuw, ofwel ongeveer 2-2.5 cm in 60 jaar.

Eerdere schattingen van bodemdaling op basis van peilmerken (e.g. Lorenz et al., 1991; De Bruijne et al., 2001; Leusink, 2003) hebben zich voornamelijk beperkt tot primaire (ondergrondse) peilmerken. De snelheden die hieruit volgden zijn daarom niet direct vergelijkbaar met de resultaten uit Figuur 3.6, omdat secundaire peilmerken op allerlei manieren onstabiel zijn. Nogmaals: dit is omdat het beeld dat ontstaat door de bewegingssnelheid van secundaire peilmerken te combineren met de 2^{e} naar 5^{e} NWP NAP-correctiegrid niet direct interpreteerbaar is als geologische bodemdaling, maar de totale bodemdaling geeft.

Het rapport van Leusink kwam pas in 2019 boven water en was in 16 jaar tijd al vrijwel volledig in vergetelheid geraakt. Ook voor dat rapport is een analyse uitgevoerd naar het vaststellen van de snelheid van geologische bodemdaling op basis van beweging van (primaire) peilmerken. Leusink concludeert dat, naast daling door delfstofwinning, isostasie de enige oorzaak van gemeten bewegingen is, die mogelijk uit de data geschat kan worden. Hij laat Groningen (invloed gaswinning), Zeeland (weinig data) en Zuid-Limburg (zwak in het netwerk zittend) buiten zijn analyse. Hij gebruikt verder zoveel mogelijk primaire ondergrondse merken. Hij concludeert dat het isostatisch signaal gemakkelijk verstoord kan worden door menig ander signaal. Zijn uiteindelijk kaarten (Figuur 3.8) laten logischerwijs patronen zien die overeenkomen met het NAP-correctiegrid uit Figuur 3.4. Zijn conclusie dat dit patroon veroorzaakt wordt door isostasie kan echter niet kloppen, aangezien het niet mogelijk is dat door GIA-processen het noordwestelijke deel van Nederland met enkele cm/eeuw daalt en het zuidoostelijk deel met enkele cm/eeuw stijgt. Ook andere processen (zie boven) moeten hier verantwoordelijk voor zijn.

Ten opzichte van de analyse van Leusink is de gebruikte aanpak in het onderhavige rapport relatief eenvoudig gehouden, met als hoofddoel om regionale/landelijke patronen van geologische bodemdaling uit de peilmerkendata te halen. De betrouwbaarheid van individuele metingen is hierbij niet meegenomen. In een vervolganalyse wordt aangeraden om de data stochastisch te benaderen, d.w.z. dat de kwaliteit van de waarnemingen wordt meegenomen in het opstellen van een bewegingsmodel, vergelijkbaar met de aanpak van Lorenz et al. (1991) en Leusink (2003), maar dan inclusief de enorme hoeveelheid secundaire peilmerken. Deze zouden wel beoordeeld moeten worden op hun kwaliteit, bijvoorbeeld op basis van funderingsinformatie en waarde (buiten gebieden met grondwaterwinningsinvloeden).

Figuur 3.5 Bewegingssnelheid in cm/jaar op basis van secundaire peilmerken, waarvan de snelheid gecorrigeerd is door het 2e-5e NWP NAP-correctiegrid uit het vorige figuur. Het betreft hier gezien de aard van secundaire peilmerken een totale bodembeweging (geologische bodemdaling + ondiep).

Figuur 3.6 Geologische bodemdalingssnelheden voor Nederland op basis van de modellen uit Hijma & Kooi (2018b).

Figuur 3.7 Profiel van zuid naar noord met bodembeweging in m/jaar langs de kust op basis van Peilmerken (links) en totale bodembeweging volgens 3-jaar lange InSar meetreeksen van bodemdalingskaart.nl voor totale bodembeweging (rechts). Het profiel ligt zo dicht mogelijk tegen de kustlijn aan, gebruikmakend van de meest kustwaarts geanalyseerde peilmerk- en InSar-metingen.

Figuur 3.8 Bewegingssnelheid van ondergrondse merken (cm/eeuw). Wordt door Leusink (2003) vooral toegeschreven aan isostasie, maar dat is onwaarschijnlijk.

3.2 GNSS, InSAR en zwaartekracht

3.2.1 GNSS

In Nederland staan vele GNSS-stations, 21 daarvan zijn onderdeel van een wereldwijd netwerk van GNSS-stations (benaderbaar via http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html) en 13 van deze 21 zijn ook onderdeel van het Actief GNSS Referentie Systeem (AGRS) van het Kadaster en RWS-CIV. Twee van deze stations zijn gekoppeld aan een hoofdgetijdenstation (Figuur 3.9; Vlissingen en IJmuiden). Dit systeem is onderdeel van het Europese netwerk en gekoppeld aan het *European Terrestrial Reference System (ETRS89)*. Figuur 3.10 laat de dalingssnelheden zien die berekend zijn voor de verschillende stations. Deze stations staan meestal op gefundeerde gebouwen of direct op het Pleistoceen. Dit betekent dat de gemeten snelheden beïnvloed zijn door geologische bodembeweging, maar lokaal mogelijk ook door bodemdaling door winning. Sommige datareeksen zijn erg kort en daardoor nog niet betrouwbaar (bij Texel), andere laten vreemde sprongen zien (bijvoorbeeld Schiermonnikoog). De GNSS-data laat, afgezien van Texel, voor heel Nederland een bodemdalingstrend zien, waarbij de snelheden vrijwel altijd groter zijn dan de gemodelleerde snelheden voor de geologische bodemdaling (Hijma & Kooi, 2018b).

Figuur 3.9 Bodembewegingen bij hoofdgetijdenstation Vlissingen (boven) en IJmuiden. In beide gevallen de antenne aan het huisje vast. Op beide locaties is een opvallende 'verzakking' zichtbaar in 2014. Dit is het moment waarop overgestapt is naar een nieuw merk ontvanger.

3.2.2 InSAR

De GNSS-data zijn puntdata en kunnen, gezien de geringe hoeveelheid punten, niet gebruikt worden voor het vaststellen van landelijke trends. Dit kan wel aan de hand van InSAR-data (INterferometric Synthetic Aperture Radar), waarbij faseverschillen in weerkaatste radargolven op hetzelfde oppervlak worden gebruikt om bodembeweging uit te rekenen. Het voordeel van InSAR-data is dat voor grote gebieden veel puntdata beschikbaar zijn. Via www.bodemdalingskaart.nl zijn kaarten te bekijken en te downloaden die de totaal berekende bodemdaling laten zien, maar ook een schatting voor de diepere bodemdaling bevatten. De kaarten zijn met name afgeleid uit InSAR-metingen, al zijn ook de GNSS-data en zwaartekrachtdata gebruikt. De InSAR-data is hierbij in vakken van 2x2 km gegroepeerd. De aanname hierbij is dat een histogram van de totale InSAR-data bestaat uit een combinatie van relatief snel dalende punten die representatief zijn voor de totale bodemdaling (door diepe en ondiepe processen) en relatief langzaam dalende punten die representatief zijn voor de diepere bodemdaling. Middels statistiek worden deze groepen gescheiden en is de snelheid van de diepere bodemdaling geschat.

De kaart met de diepere bodemdaling wordt op www.bodemdalingskaart.nl gepresenteerd als de kaart die de beweging onder het funderingsniveau weergeeft. Dit omvat dus zowel geologische bodemdaling als bodemdaling door winning. Figuur 3.10 toont deze kaart, waarop duidelijk de bodemdaling bij het Groningergasveld te zien is. Wat echter opvalt is dat grote delen van Nederland volgens deze kaart omhoog komen en dat er geen duidelijke 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.

Figuur 3.10 Kaart met de diepere bodemdaling zoals berekend voor www.bodemdalingskaart.nl, grotendeels middels InSAR-data. Bij ieder GNSS-station staat deze snelheid van bodembeweging volgend uit de GNSS-data, de InSAR-data en de gemodelleerde geologische bodemdaling uit Hijma & Kooi (2018b).

3.2.3 Zwaartekracht

Het is ook mogelijk om op basis van gemeten zwaartekrachtveranderingen verticale bodembeweging vast te stellen. Het voordeel van het meten van bodembewegingen met een zwaartekrachtmeter is dat de metingen ten opzichte van het middelpunt van de aarde gedaan worden en niet aan referentiesystemen gekoppeld zijn, in tegenstelling tot peilmerken, GNSS en InSAR, systemen die zelf ook kunnen veranderen. Voor betrouwbare metingen is het wel nodig om langjarig te meten en op locaties die niet teveel verstoord worden door trillingen. Er zijn inmiddels 6 stations waar de zwaartekracht gemeten worden (Kootwijk, Westerbork, Epen, Zundert, Oudemirdum en Texel), met als doel om de verticale stabiliteit van het NAP-vlak vast te stellen. Slechts 2 van deze stations hebben een lange meetreeks: Westerbork laat een stijging van 0.01 cm/jr zien en Epen 0.13 cm/jaar. De stijging bij Westerbork is niet in overeenstemming met de GNSS en INSAR-data die een daling laten zien. Het is wachten op langere meetreeksen voor de overige stations om ook die data te kunnen gebruiken.

Er zijn nu dus 6 zwaartekrachtmeetstations, maar in het verleden zijn verschillende zwaartekrachtmeetcampagnes uitgevoerd. Deze geven vlakdekkende data voor heel Nederland. Op basis van de hoogteligging van Nederland kan een verwachte zwaartekracht berekend worden. Afwijken ten opzichte van deze verwachte zwaartekracht worden Bouguer-anomalieën genoemd. De afwijkingen zijn meestal te linken aan geologische patronen. Figuur 3.11 geeft deze anomalieën voor Nederland (via https://bodemdalingskaart.nl/kennis-datacentrum/zwaartekrachtsdata/).

De anomalieën laten bijvoorbeeld heel mooi de tektonisch dalende Roerdalslenk zien in Limburg en Noord-Brabant. Harde gesteentelagen zijn hier relatief diep weggezakt en daarop liggen juist relatief dikke lagen lichter en minder geconsolideerd materiaal, waardoor de totale massa lager is. In noordoost Nederland is de massa lager door de aanwezigheid van zout.

Een visuele vergelijking van het patroon in Figuur 3.10 met het patroon van het NAP-correctiegrid in Figuur 3.4 laat grote verschillen zien (bijvoorbeeld Zeeland, Groene Hart), maar ook opvallende overeenkomsten. Het gebied met de meest positieve zwaartekrachtsanomalie (Achterhoek/Twente) is duidelijk herkenbaar in het NAP-correctiegrid. Ook de positieve anomalierug die via het Gaasterland naar Terschelling loopt is zichtbaar. Verder is de Roerdalslenk in beide figuren duidelijk zichtbaar. De betekenis van de visuele overeenkomst is nog niet duidelijk.

Figuur 3.11 De zwaartekrachtanomalieën voor Nederland.

4 Discussie en conclusies

Dit rapport over bodemdaling langs de Nederlandse kust en in de getijdenbekkens is een vervolg op Hijma & Kooi (2018a; 2018b) en het eerste rapport binnen de *Bodemdalingsmonitor.* Binnen deze monitor worden kennis- en beheersvragen over bodemdaling langs de Nederlandse kust beantwoord.

Het huidige rapport bestaat uit twee delen. Het eerste deel geeft een actualisatie met betrekking tot de bodemdalingskaarten: zijn er aanpassingen nodig op basis van de laatste inzichten? Het tweede deel vergelijkt meetreeksen waarvan verwacht wordt dat ze informatie geven over geologische bodemdaling: bevestigen de metingen de patronen van gemodelleerde geologische bodemdaling? Hieronder worden de belangrijkste bevindingen uit het huidige rapport gegeven.

- *Bodemdaling door isostasie en winning: een actualisatie*
  De vergelijking van verschillende GIA-modeluitkomsten laat zien dat er aanzienlijke spreiding aanwezig is tussen de verschillende modellen. Deze spreiding werd verwacht en daarom is in 2018 de onzekerheid rondom de GIA-modelberekeningen ook op 50% gezet. Het is lastig om te zeggen welk model het ‘best’ of ‘meest betrouwbaar’ is en daarom zijn de geologische bodemdalingskaarten tot 2050 niet geactualiseerd. Een geschikte manier om de modellen te kalibreren en/of valideren is het gebruik maken van (paleo)zeespiegelgegevens. Hierbij is de ontwikkelde zeespiegeldatabase voor Nederland beschikbaar gesteld aan de modelleurs om hun modellen te kunnen kalibreren. Voor de komende jaren bestaat de verwachting dat de GIA-modellen voor Nederland verbeterd kunnen worden en de onzekerheden verkleind. Het zou daarbij goed zijn om een systematiek te ontwikkelen waarin wordt vastgelegd op welke gronden een model beter of betrouwbaarder is, en wanneer de verandering ten opzichte van het eerder gebruikte model voldoende groot is om een update zinvol te maken.

  Uit de samenwerking met de TU Delft volgt verder dat, naast tektoniek en GIA, ook de elastische respons van de aarde op de recente afsmelt van Groenland in Nederland een relevante component is van geologische bodembeweging. Het woord ‘bodemdaling’ is hier nu bewust veranderd in ‘bodembeweging’, omdat de elastische respons waarschijnlijk leidt tot bodemstijging. Dit proces zit nog niet verwerkt in de geologische bodemdalingskaarten. De eerste modeluitkomsten laten zien dat in sommige delen van Nederland de bodemdaling door GIA volledig teniet gedaan wordt. Dit proces moet in de komende jaren dus zeker meegenomen worden bij het vaststellen van geologische bodembewegingsvolumes.

  De nieuwe winningsplannen voor het Groninger gasveld, waarbij eerder gestopt wordt met het winnen van gas dan eerder voorzien, hebben geen gevolgen voor de verwachte bodemdalingsvolumes tot 2050 in de Waddenzee, de Eems-Dollard en het kustfundament.. De nieuwe berekeningen laten slechts kleine verschillen zien met de eerdere berekeningen en nieuwe kaarten zijn daarom niet nodig.

- *Geologische bodemdaling op basis van metingen*
  Het uitgangspunt bij het analyseren van de beschikbare meetreeksen was dat geologische bodembeweging patronen op regionale/nationale schaal tot gevolg heeft en dat deze in geschikte meetreeksen zichtbaar zouden kunnen worden. Deze

patronen zouden met name zichtbaar kunnen worden in analyses van NAP-peilmerken en InSAR-data, omdat dit landsdekkende datareeksen betreft. GNSS-data en zwaartekrachtsdata leveren aanvullende puntgegevens.

De analyse van de primaire peilmerken voor dit rapport leveren een bodembewegingskaart op die goed overeenkomst met het NAP-correctiegrid van de RWS. De patronen in de beweging van de primaire peilmerken kunnen deels gelinkt worden aan bekende patronen in geologische bodemdaling, maar voor een belangrijk deel ook niet. Het is opvallend dat met name de zandgronden er uit springen als gebieden met relatief weinig bodemdaling of zelfs bodemstijging.

De bodembeweging van secundaire merken wordt relatief ten opzichte van het primaire netwerk gemeten. Door het NAP-correctiegrid bij de beweging van secundaire peilmerken op te tellen ontstaat een beeld van de totale bodemdaling. In deze kaart komen de dalingsgebieden door winning goed naar voren. Een vergelijk van deze kaart met de landsdekkende InSAR-kaart van de totale bodemdaling laat behoorlijke verschillen zien. Daarnaast zijn er grote verschillen tussen GNSS-data en InSAR-data onderling.

Het meten van geologische bodemdaling is dus niet eenvoudig. De snelheden van beweging zijn laag en er zijn daarom lange en nauwkeurige meetreeksen nodig zijn (minimaal 10-20 jaar) om die bewegingen te meten en dergelijke meetreeksen zijn schaars. En omdat de snelheden zo laag zijn, ‘verstoren’ andere processen zoals winning, grondwaterstandsveranderingen en beweging van funderingen het signaal van geologische bodembeweging. Daarnaast is het (nog) niet zeker dat geologische bodembeweging inderdaad gedomineerd wordt door GIA, omdat de elastische respons van de aarde op recente afsmelt van landijs mogelijk een belangrijke rol speelt. Dit betekent dat het niet zeker is dat patronen die bijvoorbeeld zichtbaar zijn in lange meetreeksen goed begrepen worden. Het niet overeenkomen van de metingen met de gemodelleerde geologische bodemdaling hoeft dus niet direct te betekenen dat de modellen of de metingen niet betrouwbaar zijn. Er moet geconcludeerd worden dat er nog veel werk te verzetten is voor het maken van een robuuste kaart van geologische bodembeweging, een kaart die gevoed zou moeten worden door zowel metingen als modellen. Dit rapport vormt hierbij een belangrijke tussenstap, omdat de meeste ingrediënten voor het maken van een dergelijke kaart nu aanwezig zijn: de data en modellen zijn beschikbaar en samenwerkingsverbanden zijn aangegaan.

5 Aanbevelingen

- *Gericht(er) monitoren van bodemdaling bij de getijdenstations*
  Er bestaat nog veel onzekerheid over de mate van bodemdaling bij de getijdenstations en de bijdrage daaraan van de verschillende componenten. Daarnaast bestaat er nog 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. Een monitoringsstrategie hiervoor is bijgevoegd als bijlage. Aanbevolen wordt deze strategie zo snel mogelijk uit te voeren.

- *De onzekerheid over de gemodelleerde geologische bodemdaling 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 patronen in gemeten bodemdaling van de top van het Pleistoceen te vergelijken met patronen in de verschillende GIA-modellen. Maar vooral ook door bij te dragen aan het verbeteren van de modellen die isostatische bodembeweging berekenen. Vanuit de bodemdalingsmonitor kan deze bijdrage 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. Daarnaast zullen de modellen ook verbeterd worden door

  Tot dit rapport werd gedacht dat GIA veruit de belangrijkste component van geologische bodemdaling was, maar wellicht speelt de elastische respons van de aarde op meer recente landijsveranderingen ook een grote rol. Dit zou in 2020 verder uitgezocht moeten worden.

- *Het maken van een kaart van geologische bodemdaling*
  Er is nu een aantal jaar gewerkt aan het maken van een kaart van geologische bodemdaling voor heel Nederland. Dat dit niet eenvoudig is laat dit rapport zien: er is discrepantie tussen de gemodelleerde geologische bodemdaling en de geodetische metingen, maar ook tussen de metingen onderling. Het maken van een dergelijke kaart vraagt nauwe samenwerking tussen geologen en geodeten. Hier is het laatste jaar nadrukkelijk mee gestart, maar er is nog veel terreinwinst mogelijk. Aanbevolen wordt om in 2020 met elkaar om de tafel te gaan zitten, de resultaten van dit rapport te bespreken en vervolgens een plan te maken om concreet te gaan werken aan een dergelijke kaart.

- *Procedure opstellen voor het actualiseren van de bodemdalingsvolumes*
  Het wordt aanbevolen criteria op te stellen voor het actualiseren van bodemdalingsvolumekaarten, om vragen te beantwoorden als :wanneer vinden we een GIA-model het ‘beste’? en wanneer is een update zinvol?

6 Literatuurlijst

De Bruijne, A., Kenselaar, F., Kleijer, F., 2001. Kinematic deformation analysis of the first order benchmarks in the Netherlands, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, pp. 19-22.

Doornhof, D., Van der Wal, O., 2018. Assessment of subsidence based on production scenario "Basispad Kabinet", NAM. pp.

Hijma, M.P., Kooi, H., 2018a. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11200538-008-ZKS-000163 pp.

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_v1.0pp.

Hijma, M.P., Cohen, K.M., 2019. Holocene sea-level database for the Rhine-Meuse Delta, The Netherlands: Implications for the pre-8.2 ka sea-level jump. Quaternary Science Reviews, 214, 68-86. doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.05.001.

Leusink, J.G., 2003. Wat waterpasgegevens vertellen over geologische bodemdaling. M.Sc.-thesis, TUDelft/Rijkswaterstaat.

Lodder, Q.J., 2016. Rekenregel suppletievolume, Rijkswaterstaat memo 14-10-2016, versie 0.89 pp.

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, Haarlem72 pp.

Meijles, E.W. et al., 2018. Holocene relative mean sea-level changes in the Wadden Sea area, northern Netherlands. Journal of Quaternary Science, 0 (0). 10.1002/jqs.3068.

NAM, 2013. Verzoek om instemming voor winningsplan Gaag-Monster, NAM. http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1363506377&type=fieldPubAssetpp.

NAM, 2015. Bodemdaling door Aardgaswinning - NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, NAM - Statusrapport 2015 en Prognose tot het jaar 2080. pp.

NAM, 2017. Aanvraag Instemming Winningsplan Gaag-Monster, NAM. https://www.nlog.nl/nlog/requestDocument?id=2918434848&type=fieldPubAssetpp.

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.

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.

Simon, K.M., Riva, R.E.M., Kleinherenbrink, M., Frederikse, T., 2018. The glacial isostatic adjustment signal at present day in northern Europe and the British Isles estimated from geodetic observations and geophysical models. Solid Earth, 9 (3), 777-795. 10.5194/se-9-777-2018.

Van der Spek, A.J.F., Elias, E., Lodder, Q.J., Hoogland, R., 2015. Toekomstige Suppletievolumes - Eindrapport, Deltares report 1208140-005-ZKS-0001103 pp.

A Monitoringsstrategie voor zeespiegelstijging en bodemdaling langs de Nederlandse kust

Memo

Aan
RWS-WVL, RWS-CIV

Datum	Ons kenmerk	Aantal pagina's
20 december 2019	11203683-002-ZKS-0012	5
Contactpersoon	**Doorkiesnummer**	**E-mail**
Marc Hijma	+31(0)88 335 7869	Marc.Hijma@deltares.nl

Onderwerp
Monitoringsstrategie zeespiegelstijging en bodemdaling langs de kust

---

Achtergrond

De komende eeuwen wordt veel zeespiegelstijging verwacht en de mate van stijging zal van invloed zijn op hoe Nederland er in de toekomst uit zal zien. Dit laatste zal ook sterk afhankelijk zijn van beleidskeuzes die tot die tijd gemaakt worden. Deze keuzes, en de momenten waarop ze gemaakt gaan worden, zullen beïnvloed worden door de snelheden van zeespiegelstijging zoals die daadwerkelijk gemeten worden langs de Nederlandse kust.

De zeespiegelstand langs de Nederlandse kust wordt gemeten bij getijdenstations. Zes van deze stations zijn gelabeld als hoofdgetijdenstation: Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. De metingen van deze stations worden jaarlijks gemiddeld tot een landelijk gemiddelde zeespiegelstand voor het betreffende jaar (Zeespiegelmonitor; Baart et al., 2018). In de hoofdgetijdenstations wordt de waterstand gemeten via vlotters die gerefereerd zijn aan een NAP-peilmerk. De hoogte van dit peilmerk wordt eens in de 7 jaar gecontroleerd. Voor zover bekend zijn de NAP-hoogtes van de peilmerken sinds de aanpassingen na de 5^{e} waterpassing (2005) niet meer veranderd (wel gecontroleerd). Mochten er in de toekomst aanpassingen nodig zijn, dan zullen deze in de meeste gevallen veroorzaakt worden door bodemdaling. De vlotter wordt jaarlijks gecontroleerd en zo nodig herijkt. Op basis van deze herijking worden gemeten zeespiegelstanden achteraf aangepast (Rijkswaterstaat-WVL, 2018).

De weg die de zeespiegelmetingen afleggen vanaf het moment dat ze gemeten zijn door de vlotter tot het moment dat ze in de *Zeespiegelmonitor* gebruikt worden bestaat uit een lange keten. In een aantal workshops (Rijkswaterstaat-WVL, 2018; 2019) is geprobeerd deze keten inzichtelijk te maken, met daarbij ook oog voor alle onzekerheden en kansen op fouten die per stap in de keten geïntroduceerd worden. Het is nog niet mogelijk gebleken deze keten voor het verleden volledig in beeld te krijgen, onder andere doordat de huidige keten niet of onvolledig is vastgelegd in protocollen en veel informatie niet meer of alleen via archiefonderzoek beschikbaar is. In de praktijk blijken de archieven vaak onvolledig of niet goed ontsloten. Een van de twee aanbevelingen van de workshops was dan ook om deze keten retrospectief zo goed mogelijk in beeld te brengen. Dit is noodzakelijk om 1) onzekerheden rondom de gedane metingen in beeld te krijgen; 2) vast te stellen in welke mate bodemdaling van de getijdenstations in het zeespiegelsignaal verwerkt zit en 3) hierdoor de variaties in zeespiegelstand in de periode 1890-nu op een goede manier te kunnen gebruiken voor analyses van snelheden van zeespiegelstijging. Het retrospectieve onderzoek zal geïnitieerd worden door Rijkswaterstaat en wordt verder in dit memo niet meer behandeld.

De andere aanbeveling van de workshops was het gaan opstellen van een nieuwe monitoringsstrategie voor het meten van zeespiegelstijging en bodembeweging langs de Nederlandse kust. Een nieuwe monitoringsstrategie is nodig, omdat het momenteel niet mogelijk is om op basis van de huidige monitoring vast te stellen wat de snelheid van absolute zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is. De absolute zeespiegel is de 'hoogte' van de zee ten opzichte van het centrum van de aarde. Toename daarin wordt veroorzaakt door het toenemen van het volume zeewater (met name door landijssmelt/afkalving en de stijgende temperatuur van het zeewater). Relatieve zeespiegelstijging is de optelsom van de absolute zeespiegelstijging en verticale bodembewegingen. Op dit moment is het niet duidelijk in welke mate verticale bodembeweging in de reeksen van gemeten waterstanden verwerkt zit. Dit wordt vooral veroorzaakt doordat niet duidelijk is hoe bovengenoemde keten in de praktijk uitgevoerd wordt. Aangezien in Nederland de snelheid van verticale bodembeweging geschat wordt op ongeveer 25-30% van de snelheid van absolute zeespiegelstijging is dit niet wenselijk. Om dit in de toekomst te verbeteren wordt geadviseerd om naast de veranderingen in waterstand ook de bodembeweging rondom de hoofdgetijdestations op een heldere en robuuste manier te gaan meten. De in dit memo voorgestelde monitoringsstrategie heeft als belangrijke pijlers:

- **Herleidbaar**: alle stappen in de keten 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

Hieronder wordt de strategie nader ingevuld. In 2020 kan deze in overleg met RWS verder gedetailleerd en hopelijk in gang gezet worden. Een land dat voor een groot deel onder zeeniveau ligt kan niet zonder een state-of-the-art zeespiegelmonitoringssysteem.

Monitoringsstrategie
Het hoofddoel van de monitoring bij de getijdenstations zou moeten zijn:

De zeespiegelstand zo nauwkeurig mogelijk te meten ten opzichte van het (inter)nationale referentieniveau (NAP/EVRS), waarbij verticale bewegingen van dit referentieniveau ook gemeten worden.

De verticale bewegingen van het referentieniveau kunnen veroorzaakt worden door vele factoren. Aangezien de nulpalen in de getijdenstations dieper reiken dan het Holoceen (dieper dan 10-20 m), worden ze beïnvloed door bodemdaling beneden dit niveau. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen geologische bodemdaling en bodemdaling als gevolg van winning (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b). Een deel van de bodemdaling door winning vindt relatief ondiep plaats (ruwweg bovenste 80 m, door grondwateronttrekking), terwijl een ander deel veel dieper plaatsvindt (door winning van gas, olie en water).

Om bovenstaande doelstelling te halen is het nodig om:

- De getijdenstations in ieder geval uit te rusten met
  - NAP-peilmerken (reeds aanwezig, voorstel om 2x zo vaak in te meten om dichtere en robuustere dataset te verkrijgen)
  - GNSS (bij twee hoofdgetijdenstations reeds aanwezig: Vlissingen en IJmuiden) volgens bestaande protocollen voor frequentie en dergelijke.
  - InSAR-reflectoren
  - Absolute en relatieve zwaartekrachtsmetingen
    GNNS-Reflectometry
- Absolute bewegingsmetingen met GNSS op de veronderstelde stabiele peilmerken op de Veluwe en Heuvelrug om zo vast te stellen hoeveel bodemdaling mogelijk nog in de zeespiegelmetingen zit.
- Metingen van bodemdaling op diepte te verkrijgen door bijvoorbeeld
  - Wrijvingsloze palen met een fundering op 80 m diepte installeren en de beweging van deze palen te monitoren (met GNSS).
  - Extensometers plaatsen met ankers op verschillende dieptes
  - Piëzometers in verschillende watervoerende pakketten om in de gaten te houden of er invloed van onttrekking/bemalingen is
  - Beter archiveren en documenteren.

De gemeten bodemdaling moet hierbij in samenhang met de bodemdalingsmetingen in de omgeving van de stations (o.a. uit InSAR) en in de rest van Nederland beschouwd worden, zodat het patroon van bodemdaling duidelijk wordt en de oorzaken voor dit patroon onderzocht kunnen worden. Het is dus nodig om de bodemdalingsmetingen bij de getijdenstations op te hangen in een groter netwerk van bodemdalingsmetingen. Op meerdere plekken wordt al bodemdaling gemeten met bijvoorbeeld GNSS of zwaartekrachtsmetingen en de monitoring bij de getijdenstations zou daarbij aangehaakt moeten raken. Op basis van beschikbare meetreeksen van bodemdaling in het landelijk gebied (vaak korte meetreeksen) is duidelijk aan het worden dat de bodembeweging in Nederland temporeel in ieder geval zeer variabel is. Hoewel vanuit verschillende studies is aangetoond dat in een deel van Nederland op lange termijn (decennia-eeuwen) bodemdaling plaatsvindt, vindt er over heel korte periodes in deze gebieden ook bodemstijging plaats. Dit is gerelateerd aan fluctuaties in de grondwaterstand en het vochtgehalte van de bodem. Hiermee lijkt bodemhoogte in variabiliteit enigszins vergelijkbaar met waterstanden langs de kust die door golven, getij en wind ook sterk variabel zijn. Het is de vraag in hoeverre dit soort variatie ook te zien is in de zandige pakketten. Dit geldt voor zowel de zandige pakketten op diepte (het begraven Pleistoceen bij de getijdenstations), als de dagzomende zandige pakketten in het midden, oosten, noorden en zuiden van Nederland.

Voorgestelde acties op korte termijn

- Plaatsen van 4 extra GNSS-stations op getijdenstations Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen en Delfzijl, plaatsen van GNSS-stations op overige kuststations
- Plaatsen, indien nog niet aanwezig, van InSar-reflectoren op ieder getijdenstation
- Frequenter inmeten van NAP-hoogtes van nulpalen in getijdenstations (elke 3-4 jaar).
- Projectmatige inbedding monitoring/analyse in Zeespiegelmonitor en/of Kennisprogramma Zeespiegelstijging
- Concreet overleg met relevante partijen. Agendapunten
  - Uitvoering korte termijn acties: randvoorwaarden
  - Dataopslag, -herleidbaarheid en -beschikbaarheid
  - Lange-termijn plannen concretiseren: totaalplan monitoring zeespiegelstijging

Referenties

Baart, F. et al., 2018. Zeespiegemonitor 2018 - De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust, Deltares report 11202193-000-ZKS-0004188 pp.

Hijma, M.P., Kooi, H., 2018a. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11200538-008-ZKS-000163 pp.

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_v1.0pp.

Rijkswaterstaat-WVL, 2018. Verslag van bijeenkomst: Relatieve zeespiegelstijging, waterstandsmetingen en correctie bodemdaling. Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Bijeenkomst gehouden op 24-5-2018.

Rijkswaterstaat-WVL, 2019. Verslag van bijeenkomst: Geologische bodemdaling en relatieve zeespiegelstijging Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving. Bijeenkomst gehouden op 22-5-2019.