

Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens

Door geologische processen en menselijke activiteiten



Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens

Door geologische processen en menselijke activiteiten

Marc Hijma
Henk Kooi

11200538-008

Titel

Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	11200538-008	11200538-008-ZKS-0001	63

Trefwoorden

Zeespiegelstijging, gaswinning, tektoniek, isostasie, bodemdaling, kustfundament

Samenvatting

In het gehele kustfundament en in de getijdenbekkens vindt bodemdaling plaats en deze draagt bij aan relatieve zeespiegelstijging (de som van absolute zeespiegelbewegingen en bodembewegingen). In de huidige rekenregel voor het vaststellen van het suppletievolume wordt bodemdaling indirect meegenomen doordat gerekend wordt met de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging voor Nederland op basis van de zes hoofdgetijdenstations (circa 19 cm/eeuw). De relatieve stijging per station verschilt per station en varieert tussen de 13 (Harlingen) en 23 (Hoek van Holland) cm/eeuw. Een mogelijke oorzaak voor deze verschillen betreft ruimtelijke verschillen in bodemdaling.

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

De geologische bodemdaling wordt veroorzaakt door isostasie, autocompactie en tektoniek. Op landelijke schaal is isostasie het belangrijkste met snelheden van ruwweg 3-8 cm/eeuw, waarbij de laagste snelheden in het zuiden en de hoogste in het noorden voorkomen. Op de plekken waar de duinen het hoogst en relatief jong zijn treedt mogelijk versnelde bodemdaling op door autocompactie onder invloed van het gewicht van de duinen. In de huidige werkwijze wordt de daling door geologische processen impliciet meegenomen door de gemiddelde stijging van de zes hoofdstations te gebruiken.

Bodemdaling door menselijke invloed behelst onder andere de zettingen die kunnen optreden onder invloed van het aanbrengen van grote hoeveelheden zand (suppleties, aanwas) op de vooroevers en het strand. De invloed hiervan op het kustfundament lijkt echter nihil, omdat er altijd netto bodemverhoging plaatsvindt. Bodemdaling door menselijke activiteiten treedt verder vooral op bij de winning van olie, gas, zout en grondwater. Olie- en gaswinning leiden lokaal langs de Hollandse Kust tot bodemdaling, maar vooral in het Waddenzee- en Eems-Dollardgebied treedt over grote oppervlaktes bodemdaling op, met bijbehorende bodemdalingsvolumes van tientallen miljoenen m³. Aangezien er langs de Nederlandse kust jaarlijks gemiddeld 12 miljoen m³ zand wordt gesuppleerd, zijn dit relevante volumes. De invloed van bodemdaling door zoutwinning is vooralsnog beperkt, maar het nieuwe veld in de Waddenzee zal waarschijnlijk leiden tot een bodemdalingsvolume van meer dan 10 miljoen m³. Grootschalige grondwateronttrekking leidt in veel gevallen tot bodemdaling, maar op dit moment is het nog onduidelijk wat de effecten zijn van grondwateronttrekking op de bodemligging van het kustfundament.

Titel




Bodemdaling in het kustfundament en de
getijdenbekkens

Opdrachtgever Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	Project 11200538-008	Kenmerk 11200538-008-ZKS-0001	Pagina's 63
---	--------------------------------	---	-----------------------

Het hoofdgetijdenstation dat het meest beïnvloed wordt door bodemdaling door menselijke activiteiten is Delfzijl, waar door gaswinning de bodem de laatste decennia meer dan 20 cm is gedaald. In de datareeks die voor Delfzijl door Rijkswaterstaat beschikbaar is deze daling niet zichtbaar en aangenomen kan worden dat hiervoor gecorrigeerd wordt. Bij de berekening van de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust op basis van de zes hoofdstations wordt deze daling door gaswinning dus niet meegenomen.

Dit rapport beschrijft de ruimtelijke patronen in bodemdalingssnelheden per bodemdalingscomponent. Het bevat nog geen totaalkaart van de bodemdaling in het kustfundament (optelsom van de bijdrage van de verschillende componenten), met de daarbij behorende onzekerheden. Deze kaart zal in 2018 verschijnen. Om de onzekerheid over de bijdrage van de verschillende componenten worden in dit rapport verschillende aanbevelingen gedaan:

1. Bodemdaling zou gericht(er) gemonitord moeten gaan worden om de veelal gemodelleerde snelheden te verifiëren. Deze monitoring zou bijvoorbeeld moeten bestaan uit het plaatsen van diep-gefundeerde ondergrondse meetpunten en een gerichte studie van inSAR-data.
2. Er zou vastgesteld moeten worden of grondwateronttrekkingen een significante bijdrage leveren aan bodemdaling. Op dit moment is het onduidelijk hoeveel bodemdaling veroorzaakt wordt door grondwateronttrekkingen bij onder andere IJmuiden en in het Westland.
3. De ruimtelijke variatie in compactiegraad en compressie-eigenschappen rondom grondwaterwinningen en het jonge duinengebied zouden bepaald moeten worden.
4. De onzekerheid rondom de bijdrage van isostasie zou verkleind moeten worden. Isostasie is landelijk verreweg de belangrijkste component van geologische bodemdaling en een kleinere onzekerheid over de mate waarin dit optreedt, is daarmee zeer wenselijk. De onzekerheid kan verkleind worden door enerzijds metingen (inSAR, peilmerken) te analyseren, maar ook door het verbeteren van isostatische voorspelingsmodellen. Dit laatste kan vooral door het uitbreiden van de bestaande database van zeespiegelstanden gedurende de laatste millennia, op basis waarvan isostatische voorspellingsmodellen gekalibreerd en gevalideerd kunnen worden.
5. Er zou, in aanvulling op de zeespiegelmonitor, een bodemdalingsmonitor opgestart moeten worden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Feb. 2018	Marc Hijma Henk Kooi		Fedor Baart		Frank Hoozemans	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Bodemdalingscomponenten in Nederland	2
1.3 Opzet van het onderzoek	5
1.4 Leeswijzer	5
2 Geologische bodemdaling	7
2.1 Algemeen	7
2.2 Autocompactie	7
2.2.2 Autocompactie van pre-Holocene afzettingen	8
2.3 Tektoniek	9
2.3.1 Tektonische bodemdaling in het kustfundament	9
2.4 Isostasie	13
2.4.2 Paleo-zeespiegeldatabase	18
2.5 Discussie en conclusie	19
3 Bodemdaling door winning	21
3.1 Algemeen	21
3.2 Olie- en gaswinning	21
3.2.1 Hoek van Holland	23
3.2.2 Wassenaar	25
3.2.3 Castricum	26
3.2.4 Bergen	26
3.2.5 Zuidwal	28
3.2.6 Vlieland	28
3.2.7 Harlingen	30
3.2.8 Terschelling	30
3.2.9 Ameland	31
3.2.10 Blija 32	
3.2.11 Lauwers	33
3.2.12 Groningen	34
3.3 Zoutwinning	36
3.4 Grondwaterwinning	38
3.4.1 Grondwateronttrekking in of nabij het kustfundament	40
3.5 Bodemdalingsvolume door olie-, gas- en zoutwinning	42
3.6 Discussie en conclusie	45
4 Zetting van het kustfundament	49
4.1 Algemeen	49
4.2 Zetting onder invloed van suppleties en ophogingen	49
4.2.1 Zandmotor	49
4.2.2 Hondsbossche en Pettemer Zeewering	50
4.2.3 Maasvlakte 2	51
4.2.4 Zetting buiten het gebied van ophoging	52
4.3 Discussie en conclusie	52
5 Verwachte bodemdaling bij de hoofdgetijdenstations	53

5.1	Geologische bodemdaling bij de hoofdgetijdenstations	53
5.2	Bodemdaling door menselijke activiteiten bij de hoofdgetijdenstations	53
6	Conclusies en aanbevelingen	57
6.1	Bijdrage van de verschillende bodemdalingscomponenten	57
6.1.1	Geologische bodemdaling	57
6.1.2	Daling onder invloed van menselijke activiteit	58
6.2	Aanbevelingen	59
7	Referenties	61

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Vrijwel het gehele kustgebied van Nederland zakt langzaam naar beneden (Kooi et al., 1998; Barends et al., 2008). Gecombineerd met een stijging van het volume aan zeewater leidt dit tot relatieve zeespiegelstijging die in Nederland gemonitord wordt met behulp van zes hoofdgetijdenstations: Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. De gemiddelde stijgingssnelheid bij deze stations over de periode 1890-2016 bedroeg 18.8 cm/eeuw, met een minimum van 12.7 cm/eeuw (Harlingen) en een maximum van 23.4 cm/eeuw (Hoek van Holland; Baart et al., 2017). Relatieve zeespiegelstijging houdt in dat de stijging ten opzichte van een vast punt op land bepaald wordt en deze stijging wordt dus beïnvloed door bodembewegingen. De langjarig gemiddelde trendlijn in Nederland laat een vrijwel lineair verlopende zeespiegelstijging zijn, maar rondom deze trendlijn komen variaties voor in de orde van 5-10 cm. Deze variaties treden op onder invloed van onder meer variaties in getijstrooming en de vorm van getijbekkens, luchtdrukpatronen, golfhoogte en – richting. Vooralsnog is er Nederland geen versnelling waarneembaar van de snelheid van relatieve zeespiegelstijging (Baart et al., 2015). Dit in tegenstelling tot de wereldwijde gemiddelde snelheid die wel toegenomen is in de afgelopen eeuw (Church et al., 2013) en de laatste jaren met 30-35 cm/eeuw (Jevrejeva et al., 2014) iets boven de in Nederland waargenomen snelheid (27.8 cm/eeuw over de periode 1993-2016; Baart et al., 2017). Opgemerkt wordt dat dit wereldwijde gemiddelde de absolute stijging van het zeeoppervlak betreft, dus exclusief bodembewegingen.

In Nederland speelt de relatieve zeespiegelstijging een belangrijke rol bij het vaststellen van het benodigde suppletievolume om de Nederlandse kustlijn op zijn plaats te houden. De gemiddelde stijging per jaar is onderdeel van een rekenregel waarbij de stijging vermenigvuldigd wordt met de oppervlaktes van het kustfundament én de oppervlaktes van de Waddenzee en de Westerschelde (Nederbragt, 2005). Het kustfundament heeft momenteel als zeewaartse grens de doorlopende -20 m NAP lijn en omvat op het land alle duingebieden (zie Figuur 3.1 voor de ligging van het kustfundament). De getijdenbekkens vallen dus buiten het kustfundament, maar hun oppervlakte wordt toch meegenomen om te compenseren voor het netto sedimenttransport vanuit het kustfundament richting deze twee bekkens. De Oosterschelde wordt buiten beschouwing gelaten, omdat aangenomen wordt dat daar het netto sedimenttransport nihil is. Uit de rekenregel volgt een volume dat gecompenseerd wordt met zandsuppleties. Momenteel wordt jaarlijks gemiddeld 12-13 miljoen m³ zand gesuppleerd (Van der Spek en Lodder, 2015; Lodder, 2016). Recent is er naar aanleiding van nieuwe inzichten een aangepaste rekenregel opgesteld om toekomstige suppletievolumes te berekenen (Van der Spek et al., 2015; Lodder, 2016):

$$V_{suppl} = (A_{kf^*} * ZSS_{act}) + V_{imp,bekkens} + V_{bodemdaling,kf^*}, \text{ waarin:}$$

$$V_{suppl} = \text{Suppletievolume (m}^3\text{/jaar)}$$

$$A_{kf^*} = \text{Oppervlakte kustfundament met eventueel aangepaste grenzen (m}^2\text{)}$$

$$ZSS_{act} = \text{Actuele relatieve zeespiegelstijging (m/jaar, gemeten)}$$

$$V_{imp,bekkens} = \text{Verliespost kustfundament: netto sediment transport naar bekkens (m}^3\text{/jaar)}$$

$$V_{bodemdaling,kf^*} = \text{additionele bodemdaling in kustfundament tussen getijdenstations (m}^3\text{/jaar)}$$

Een belangrijke wijziging in de aangepaste rekenregel betreft de opname van een aparte term voor bodemdaling. In de landelijk gemiddelde zeespiegelstijging ZSS_{act} die momenteel gebruikt wordt in de rekenregel, wordt de lokale bodemdaling van de stations dus ook

gemiddeld. Het is echter de vraag of dit een betrouwbare waarde levert voor de bijdrage van bodemdaling voor het kustfundament als geheel. Een aanwijzing dat dit niet zo is het feit dat er verschillen bestaan in de gemeten zeespiegelstijging bij de hoofdgetijdenstations. De oorzaak van deze verschillen wordt momenteel niet goed begrepen (Baart et al., 2015; Baart en Kooi, 2016), maar een verschil in lokale bodemdaling kan één van de oorzaken zijn. Daarnaast is het te verwachten dat tussen getijdenstations de bodem significant sneller of langzamer daalt dan bij de stations zelf, waardoor het volumeverlies van het kustfundament over- of onderschat wordt. Om de aangepaste rekenregel te kunnen toepassen is het dus nodig om de variatie in bodemdaling langs de gehele Nederlandse kust in kaart te brengen. Hierbij moest steeds bedacht worden dat bij de hoofdgetijdenstations de lokale bodemdaling al in de gemiddelde snelheid van zeespiegelstijging verwerkt zit. In de meeste gevallen betreft deze lokale bodemdaling de geologische bodemdaling. Tussen de stations in bestaan echter gebieden met relatief veel bodemdaling door met name menselijke activiteiten. Deze bodemdaling wordt momenteel niet meegenomen bij de bepaling van het suppletievolume, maar kan in de nieuwe rekenregel opgenomen worden in de term $V_{\text{bodemdaling},kf}$. Het in kaart brengen van ruimtelijke verschillen in bodemdaling zal het ook mogelijk maken om op regionaal niveau een gewenst suppletievolume vast te stellen om het kustfundament te onderhouden. Hierbij is het ook nodig om bodemdaling in de getijdenbekkens, die feitelijk buiten het kustfundament vallen, vast te stellen. Bodemdaling in de getijdenbekkens wordt momenteel namelijk gecompenseerd door sedimentatie en een deel van het sediment zal uit het kustfundament afkomstig zijn.

Vanuit het programma *Kustgenese 2* (KG2) zal er in 2020 een beleidsadvies komen waarin een voorstel gedaan wordt voor het toekomstige suppletievolume. Voor dit beleidsadvies moeten aan de verschillende componenten van de rekenregel onderbouwde waardes toegekend worden. De actuele zeespiegelstijging zal volgen uit de Zeespiegelmonitor (Baart et al., 2017), het oppervlakte kustfundament, het netto sediment verlies richting de bekkens en de bodemdaling in het kustfundament uit verschillende *Kennis voor Primaire Processen – Beheer en onderhoud van de Nederlandse kust* (KPP B&O Kust) en KG2-projecten. Het onderhavige rapport beschrijft de werkzaamheden die in 2017 uitgevoerd zijn om de bodemdaling in het kustfundament en in de getijdenbekkens vast te stellen en geeft aanbevelingen voor vervolgonderzoek in 2018. Het bevat nog geen totaalkaart van de bodemdaling in het kustfundament (optelsom van de bijdrage van de verschillende componenten). Deze zal in 2018 verschijnen. Voor het beleidsadvies moet ook de term $V_{\text{imp,bekkens}}$ bepaald worden, maar dit valt buiten de scope van dit rapport. Hieronder volgt eerst een beschrijving van verschillende belangrijke aspecten van bodemdaling.

1.2 Bodemdalingscomponenten in Nederland

Bodemdaling in Nederland kent diverse oorzaken. Hoewel op plaatsen met sterke bodemdaling vaak één oorzaak dominant is, bestaat bodemdaling in het algemeen uit een combinatie van diverse componenten die tegelijkertijd werkzaam zijn. Dat geldt ook voor de bodemdaling in het kustfundament.

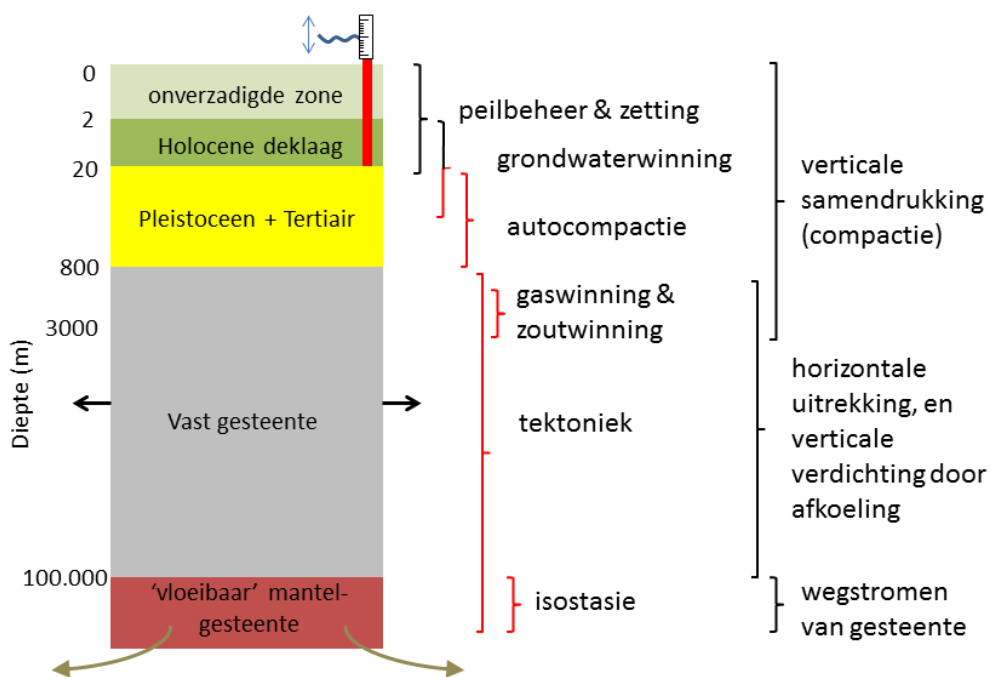
Tabel 1.1 geeft een beknopt overzicht van acht bodemdalingscomponenten in Nederland. Daarin wordt onderscheid gemaakt tussen antropogene en autonome componenten. Autonome daling wordt veroorzaakt door natuurlijke, geologische processen waar de mens geen invloed op kan uitoefenen en wordt hier aangeduid met de term geologische bodemdaling. Antropogene daling ligt vanzelfsprekend wel in de invloedssfeer van de mens. Alle componenten behalve 'peilbeheer' worden in dit rapport besproken. Bodemdaling door peilbeheer is naar verwachting niet of nauwelijks relevant in het kustfundament.

Tabel 1.1 Componenten van bodemdaling in Nederland

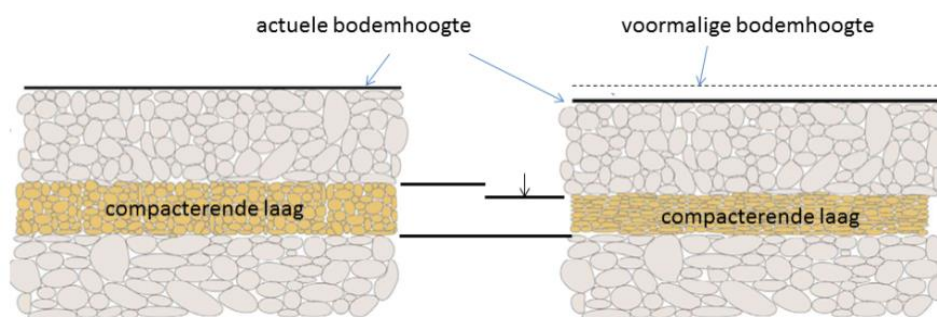
Hoofdoorzaak	Component/oorzaak	Beschrijving
Geologische bodemdaling	Tektoniek	Daling die wordt veroorzaakt door spanningen in de ca. 100 km dikke Euraziatische aardplaat waar Nederland deel van uitmaakt. De spanningen hangen samen met het naar elkaar toe bewegen van de Afrikaanse en Euraziatische aardplaat en het uit elkaar drijven van Europa en Noord Amerika.
	Isostasie	Daling die samenhangt met het terugbuigen van de aardplaat in noord-west Europa door het afsmelten van de grote ijskappen die in de laatste glaciële periode op Groot-Brittannië en Scandinavië rusten. Bij het ontstaan van de ijskappen was de aardplaat onder het gewicht van het vele ijs doorgelbogen. Het proces van herstel (terugbuigen) is nog gaande.
	Autocompactie	Daling die wordt veroorzaakt door nog voortgaande samendrukking van afzettingen tussen het maaiveld en honderden meters diepte. Deze compactie vindt plaats onder het eigen gewicht en door toename van dat gewicht in het recente geologische verleden door jonge afzettingen.
Antropogene daling	Olie-/gaswinning	Daling aan het maaiveld die wordt veroorzaakt door de drukverlaging in olie- of gasvelden en die zorgt voor samendrukking van de betreffende lagen.
	Zoutwinning	Daling die wordt veroorzaakt door de lage druk in de cavernes die ontstaan door het winnen van zout. De cavernes worden langzaam dichtgedrukt en zorgen voor inzakking van bovenliggende lagen.
	Grondwaterwinning	Daling die wordt veroorzaakt door de waterdrukverlaging in de bodemlagen in de omgeving van de winning waardoor de laag waaruit wordt gewonnen, maar ook boven en/of onderliggende lagen, worden samengedrukt.
	Peilbeheer	Daling die samenhangt met periodische aanpassing/verlaging (t.o.v. NAP) van het waterpeil in sloten en vaarten in gebieden met maaiveld daling om een gewenste drooglegging (verschil tussen maaiveld en waterpeil) te handhaven. Peilaanpassingen zijn vooral aan de orde in veengebieden. Door de drooglegging kan zuurstof het veen dat boven de grondwaterspiegel ligt oxideren (verbranden). De peilverlagingen zorgen ervoor dat maaiveld daling door veenoxidatie doorgaat. Daarnaast zorgt een peilverlaging ook voor een waterdrukverlaging in klei- en veenlagen onder de grondwaterspiegel die daardoor iets worden samengedrukt.
	Zetting	Daling onder invloed van extra gewicht dat op het maaiveld (of waterbodem) wordt aangebracht door de mens en waardoor lagen in de ondergrond worden samengedrukt.

Figuur 1.1 geeft een schematische weergave van het dieptebereik waarbinnen de onderliggende processen van de bodemdalingscomponenten actief zijn. Rechtsboven in de figuur wordt vermeld dat bij vrijwel alle processen tot ca. 3 kilometer diepte compactie een centrale rol vervult. Compactie is de samendrukking van het korrelskelet van lagen in de ondergrond waarbij de pakking van het korrelmateriaal dichter wordt en de poriënruimte afneemt (Figuur 1.2). Compactie gebeurt onder invloed van het bovenliggende gewicht dat bestaat uit sediment, grondwater, kunstwerken en bebouwing. Compactie kan worden veroorzaakt als het bovenliggende gewicht toeneemt. Dat is het geval bij de aanleg van kunstmatige ophogingen, dijken en bebouwing. Maar ook bij sedimentatie, wat beschouwd kan worden als een natuurlijke ophoging. Binnen de geotechniek wordt meestal, in plaats van compactie, de term zetting gebruikt.

Naast vergroting van het bovenliggende gewicht wordt compactie ook veroorzaakt door verlaging van de druk in de porieruimte tussen het korrelskelet, waarbij het korrelskelet meer van het al aanwezige bovenliggende gewicht krijgt te dragen. Dat is het geval bij de winning van grondwater en olie- of gas. Naar verwachting staan veel getijdenstation gefundeerd in het Pleistoceen, waardoor zetting of compactie van de onverzadigde zone en de Holocene deklaag geen effect heeft op de gemeten relatieve zeespiegelstijging.



Figuur 1.1 Schematische weergave van het dieptebereik waarbinnen de onderliggende processen van diverse bodemdalingscomponenten actief zijn. De vermelde dieptes zijn indicatief en de schaal is sterk niet-lineair. Componenten die kunnen bijdragen aan waterstandsregistraties van de hoofddeelstations zijn aangeduid met een rode accolade. Ondiepe componenten hebben niet of nauwelijks invloed op de registraties omdat de stations zijn gefundeerd op of in het Pleistoceen. Die processen kunnen wel bijdragen aan daling van het maaiveld of de waterbodem.



Figuur 1.2 Schematische weergave van de wijze waarop compactie bijdraagt aan bodemdaling.

1.3 Opzet van het onderzoek

Aanvankelijk was het hier beschreven onderzoek ondergebracht in KG2, maar begin 2017 is besloten om het onder KPP B&O Kust te laten vallen. Er zijn destijds drie producten afgesproken, te weten 1) een memo over bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens door isostasie en tektoniek en daarnaast een ingediend artikel met zeespiegelpunten voor Nederland; 2) een rapport over bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens door delfstofwinning en 3) een rapport over bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens door zetting. Gezien de grote raakvlakken tussen de producten en het doel waartoe ze gemaakt worden is in de loop van 2017 besloten om alle producten op te nemen in een gezamenlijk, het onderhavige, rapport. Het artikel is eind 2017 ingediend en zal na verwerken van de reviews in 2018 verschijnen in het tijdschrift *Quaternary Science Reviews*.

Het onderzoek sluit aan bij werkzaamheden voor de Zeespiegelmonitor, een onderdeel van BOA Kust. Binnen dit laatste onderdeel wordt specifiek gekeken naar de situatie bij de hoofdgetijdenstations (bijvoorbeeld fundering, bodemopbouw, NAP-correcties). Die resultaten komen terug in het getijdenstationoverzicht dat een onderdeel is van de Zeespiegelmonitor. Een verschil belangrijk verschil ten opzichte van eerdere projecten die naar bodemdaling langs (delen) van de Nederlandse kust keken (Barends et al., 2008) is dat nu ook het buitengaatse gedeelte van het kustfundament meegenomen wordt.

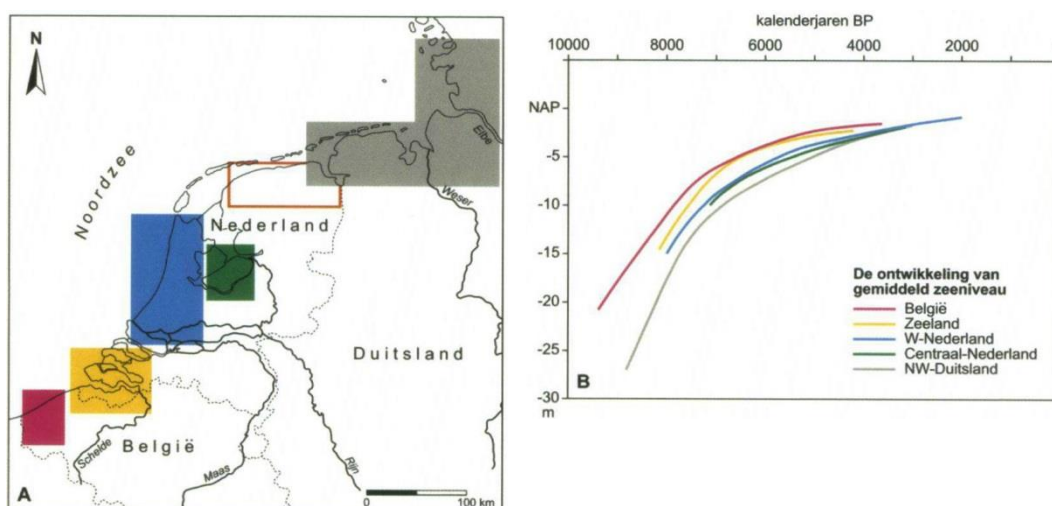
1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 behandelt de geologische bodemdaling, waarbij niet alleen naar tektoniek en isostasie gekeken is, maar ook naar autocompactie. Hoofdstuk 3 gaat in op bodemdaling door delfstofwinning, maar is wat breder getrokken dan in de eerdere productbeschrijving door ook daling door grondwateronttrekking te betrekken. Hoofdstuk 4 gaat in op bodemdaling door zetting, waarbij de focus ligt op de invloed van megasuppleties en landaanwinningen. Hoofdstuk 5 toont de verwachte bodemdaling, uitgesplitst naar de verschillende componenten, bij de hoofdgetijdenstations. Het rapport wordt afgesloten met overkoepelende conclusies en aanbevelingen.

2 Geologische bodemdaling

2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de drie componenten van geologische bodemdaling (autocompactie, tektoniek en isostasie) toegelicht en de huidige kennis over hun bijdrage aan bodemdaling in het kustfundament besproken. Dat geologische bodemdaling in de afgelopen tienduizend jaar (Holoceen) een rol heeft gespeeld is duidelijk uit reconstructies van de relatieve zeespiegelstijging over die periode (Figuur 2.1). De grotere zeespiegelstijging in Noord-Duitsland van 5 tot 10 meter ten opzichte van de Belgische kustvlakte kan niet worden verklaard met een verschil in absolute zeestanden, maar wijst op een verschil in verticale beweging van de bodem. De verschillen worden minder naar het heden. Het is echter aannemelijk om te veronderstellen dat de onderliggende bodemdaling nog steeds actief is. Een belangrijke vraag is hoe groot deze daling nu is en welke component of componenten daarvoor verantwoordelijk zijn. Bodemdaling als gevolg van menselijke activiteiten wordt beschreven in de volgende twee hoofdstukken.



Figuur 2.1 Gereconstrueerd gemiddeld zeespiegelniveau voor het Holoceen (B), aangegeven voor de gebieden in A (Kiden et al., 2008).

2.2 Autocompactie

Met autocompactie wordt compactie bedoeld die wordt veroorzaakt door (natuurlijke) sedimentatie. Net als bij veel bouwactiviteiten belast sedimentatie de ondergrond via extra gewicht. Relevant daarbij is dat sedimentatie grote oppervlakten bestrijkt waardoor de ondergrond tot kilometers diepte wordt belast. Nog relevanter is het feit dat de compactie van dikke, slechtdoorlatende lagen die in dat grote dieptebereik voorkomen heel langzaam plaatsvindt. Om te compacteren moet er poriewater worden uitgedreven, zodat het korrelskelet kan samendrukken (in de geotechniek wordt het uitdrijven van water consolidatie genoemd) en dat uitdrijven kan vele duizenden jaren duren. Daarnaast draagt kruip (viskeus gedrag van het korrelskelet) bij aan de duur van het compactieproces. In geotechnische 'toepassingen' zijn consolidatie en kruip verantwoordelijk voor 'restzetting' die 30 jaar kan aanhouden voordat de bodemdaling verwaarloosbaar klein wordt geacht. Bij autocompactie kan het 'nailen' van de bodemdaling door compacterende diepe kleilagen vele duizenden jaren duren. Dat betekent dat sedimentatie uit het verre verleden in het kustfundament en in

de getijdenbekkens nog steeds een 'staartje' geologische bodemdaling kan veroorzaken. In delen van delta's waar tot zeer recent, of nog steeds, snelle sedimentatie plaatsvond/vindt, zoals in de delta's van de Mississippi (USA) en de Mekong (Vietnam), kan autocompactie van de jonge, Holocene afzettingen een belangrijke bijdrage leveren aan bodemdaling (Törnqvist et al., 2008).

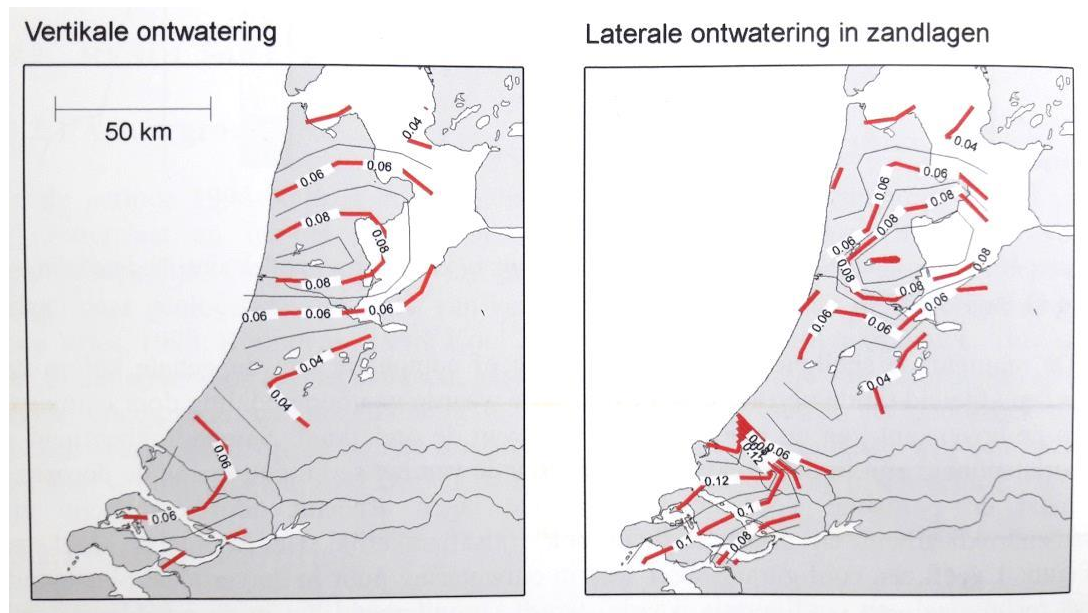
2.2.1 Autocompactie binnen het Holocene pakket

Autocompactie binnen het Holocene pakket is naar verwachting nihil in het kustfundament. Offshore, maar ook onder het strand en in de duinen is de fractie klei- en veenlagen in het Holocene pakket erg klein. Daardoor is de consolidatietijd van het Holocene pakket op belasting door sedimentatie erg kort. Bovendien heeft er al honderden jaren geen noemenswaardige (natuurlijke) sedimentatie plaatsgevonden.

2.2.2 Autocompactie van pre-Holocene afzettingen

Autocompactie van pre-Holocene afzettingen in het kustfundament is waarschijnlijk gering. Dat geldt in ieder geval voor de offshore en de onshore delen van het kustfundament waar zich geen duinen bevinden. Figuur 2.2 toont kaarten van bodemdaling door autocompactie die volgen uit modelberekeningen (Kooi, 2000). In die berekeningen is de belasting door het ontstaan van de jonge duinen niet meegenomen. Snelheden zijn over het algemeen kleiner dan 1 cm/eeuw (0.1 mm/jaar). Dit zijn naar verwachting maximum snelheden die kunnen optreden buiten het duingebied. Landelijke kaarten voor autocompactie zijn gepresenteerd in Kooi et al. (1998).

Voor het jonge duinengebied is het echter niet uitgesloten dat bodemdaling door autocompactie significant (vele cm/eeuw) bijdraagt aan bodemdaling. De jonge duinen vertegenwoordigen in vergelijking met andere Holocene afzettingen een grote belasting die relatief recent is ontstaan (ca. 1000 jaar geleden). Ruwe berekeningen (Kooi, 2008) laten zien dat in delen van Noord-Holland, waar de dikte aan Tertiaire kleilagen in de ondergrond erg groot is, deze belasting op dit moment, theoretisch kan zorgen voor bodemdaling door autocompactie met snelheden van ca. 20 cm/eeuw. Daarvoor moeten alle omstandigheden in de ondergrond (pre-consolidatiespanning en doorlatendheidsverdeling) 'gunstig' zijn. Deze omstandigheden zijn niet of nauwelijks bekend. Gezien de grote gevoeligheid voor deze omstandigheden is het waarschijnlijk dat de bodemdaling door autocompactie in het duingebied niet groter is dan enkele cm/eeuw. Nadere analyses zijn nodig om hier met meer zekerheid en voor andere gebieden (Zuid-Holland, Zeeland, Wadden) uitspraken over te kunnen doen.



Figuur 2.2 Berekende bodemdaling (mm/jaar) door autocompactie van de pre-Holocene ondergrond in west Nederland (Kooi, 2000). De relatief recente belasting door het ontstaan van de jonge duinen is hierin niet meegenomen. Verschillen tussen het linker en rechterpaneel geven een indruk van de gevoeligheid voor de manier waarop diepe kleilagen ontwateren.

2.3 Tektoniek

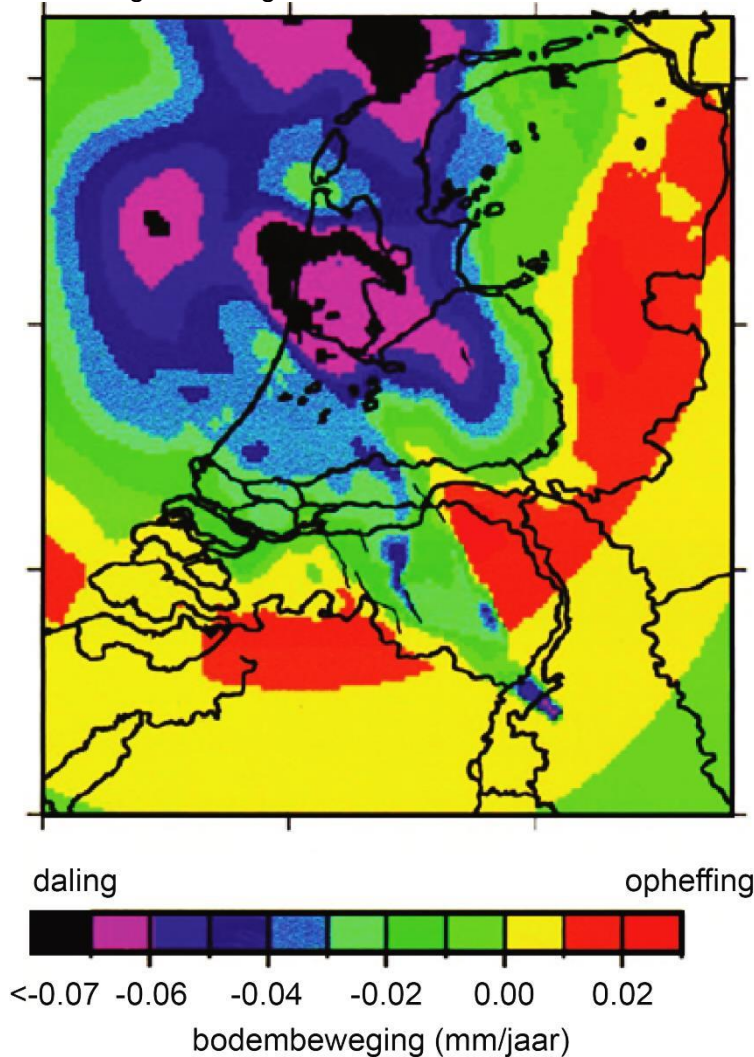
Tektoniek heeft betrekking op bewegingen en vervormingen van de aardplaten (ook: aardchollen of lithosfeer genoemd; ca. 100 km dik) die ontstaan door de krachten die die platen op elkaar uitoefenen. Dit komt tot uiting in plooiing van gesteentelagen en breukwerking en gaat gepaard met opheffing of daling van het aardoppervlak. In riftbekkens, zoals het Noordzeegebied waar Nederland deel van uitmaakt, is de aardplaat gedurende vele miljoenen jaren horizontaal opgerekt en verdund. Daarbij is de plaat op diepte ook warmer dan normaal het geval is. Tijdens een lange periode van afkoeling die daarop volgt vindt verticale verkorting en verdichting (thermische contractie, zoals een afkoelende spoorstaaf) van het gesteente plaats wat bijdraagt aan bodemdaling. In tektonisch actieve gebieden (Japan, Chili, Alaska) kunnen bij aardbevingen in heel korte tijd (minder dan een minuut) grote verticale opheffingen of dalingen (lokaal tot enkele meters) plaatsvinden. In Nederland zijn zulke grote, kortstondige bodembewegingen door breukwerking tot aan maaiveld of andere tektonische processen niet aan de orde. Langzame bewegingen vinden wel plaats en de bijdrage daarvan wordt hieronder beschreven.

2.3.1 Tektonische bodemdaling in het kustfundament

Net als bij autocompactie bestaan er grote onzekerheden over tektonisch daling in het kustfundament. De meest betrouwbare informatie duidt op vrij lage snelheden van minder dan 1 cm/eeuw, maar dat betreft gemiddelde waarden over perioden van duizenden tot miljoenen jaren. Het is mogelijk, maar dit staat zeker niet vast, dat die relatief lage snelheden ook gelden voor het 'heden' voor perioden van decennia tot een eeuw die belangrijk zijn voor het beheer en onderhoud van het kustfundament.

Figuur 2.3 toont een kaart van de gemiddelde tektonische dalingsnelheid in Nederland voor de afgelopen 2.5 miljoen jaar die door Kooi et al. (1998) is bepaald op basis van de dikte van de Kwartaire afzettingen, de palaeo-waterdiepten waarin de betreffende pakketten zijn

afgezet, en een correctie voor de invloed van isostatische daling (zie paragraaf 2.4) en de compactie van diepere lagen die door het gewicht van de afzettingen is veroorzaakt. De kaart laat vrij lage dalingssnelheden zien waarin ruimtelijke verschillen zijn waar te nemen die correleren met bekende tektonische structuren zoals de Roerdalslenk in Brabant en het IJsselmeerbekken dat zich uitstrekt onder Noord-Holland. Voor de afgelopen duizenden jaren zijn lokaal buiten het kustfundament, in het riviereengebied en langs breuken in Zuid-Oost Nederland, iets hogere snelheden afgeleid van enkele cm/eeuw (Houtgast en van Balen, 2000; Stouthamer en Berendsen, 2000; Cohen, 2003). Kiden et al. (2002) rapporteerden een gemiddelde daling van Amersfoort ten opzichte van West-België over de afgelopen 125 duizend jaar van 0.6 cm/eeuw op basis van de diepteligging van afzettingen uit de voorlaatste warme periode (Eemien). Deze daling bevat bijdragen van bodemdaling door compactie van onderliggende afzettingen en isostatische beweging van de aardplaat door het verschil in gewicht van alle afzettingen jonger dan 125 duizend jaar. De tektonische daling die ten grondslag ligt aan de waargenomen verschillen in diepteligging van de afzettingen uit het Eemien is daarom waarschijnlijk significant lager en in goede overeenstemming met de langere tijdschaal schattingen van Figuur 2.3.



Figuur 2.3 Reconstructie van de gemiddelde bodembeweging door tektoniek over de afgelopen 2.5 miljoen jaar (Naar Kooi et al., 1998). Het is niet uitgesloten dat het ruimtelijk beeld er op dit moment (bijvoorbeeld over een periode van enkele tientallen jaren) anders uitziet en dat snelheden plaatselijk of regionaal veel hoger zijn.

Welke snelheden op dit moment over perioden van enkele jaren tot een eeuw voor het kustfundament van toepassing zijn kan niet met zekerheid worden vastgesteld. Het is in ieder geval denkbaar dat het ruimtelijke patroon in de resultaten van Kooi et al. (1998) is veranderd gedurende de periode van 2.5 miljoen jaar waarover de meting is verricht. Ook is het theoretisch mogelijk dat snelheden in bepaalde delen van het kustfundament nu, voor een relatief korte periode in vergelijking met de miljoenen jaren, veel hoger zijn. Als de spanningstoestand in de aardkorst dusdanig is dat de langzame vervormingen tot uitdrukking komen in breukbewegingen, dan kan de langzame lange termijn daling onregelmatig verlopen (met horten en stoten) en zorgen voor relatief korte perioden (bv. jaren tot een eeuw) met lokaal hogere snelheden. Zulke kortdurende onregelmatige bewegingen leiden echter tot geringe ruimtelijke verschillen die niet of nauwelijks zijn terug te vinden in geologische informatie en het is daarom niet vast te stellen of degelijke perioden zich eerder hebben voorgedaan.

In een aantal gevallen lijken geodetische waarnemingen aanwijzingen te bevatten die zouden kunnen duiden op een grotere rol van tektoniek dan Figuur 2.3 laat zien. Waterpasanalyses van ondergrondse peilmerken van het NAP netwerk in heel Nederland over een periode van ca. zestig jaar (1926-1987) bevatten bijvoorbeeld snelheden tot ca. 10 cm/eeuw in Noord- en Zuid-Holland (Lorenz et al., 1991; Kooi et al., 1998). Om de relatie met tektoniek te kunnen leggen zou echter uitgesloten moeten worden dat de dalingen worden veroorzaakt door andere invloeden, maar moet ook goed bekend zijn hoe de peilmerken gefundeerd zijn en wat de invloed is geweest van NAP-correcties. Voor bijvoorbeeld het ondergrondse merk bij Rotterdam is het niet ondenkbeeldig dat de relatief hoge dalingssnelheid wordt veroorzaakt door grondwateronttrekking en/of olie- dan wel gaswinning.

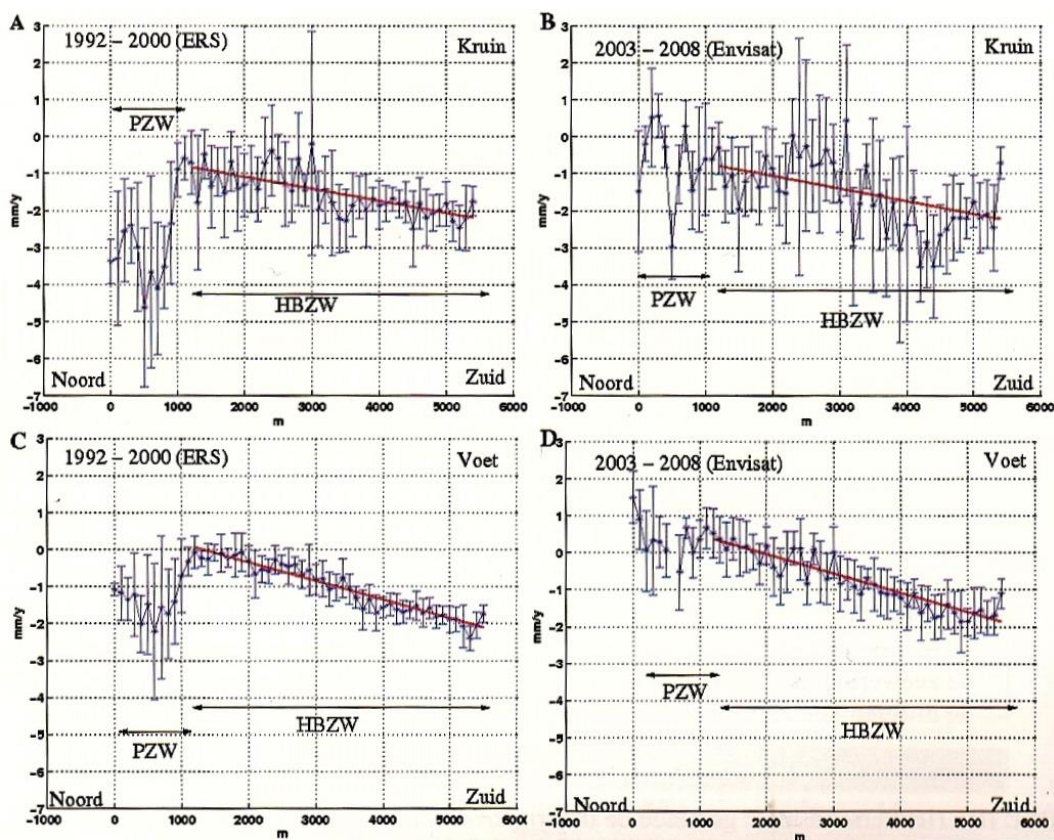
In 2004 rapporteerde Schokking (2004) lokaal hoge dalingssnelheden van decimeters/eeuw bij de Hondsbossche zeewering (HBZW) op basis van historische peilmerkgegevens. In een door RWS georganiseerde workshop met deskundigen werd in 2005 geconcludeerd dat de snelle daling waarschijnlijk aan menselijke factoren is te wijten, zoals aardgasonttrekking en zetting in verband met verhoging van de HBZW rond 1980 (Barends et al., 2008). In een recentere publicatie in 2010 kwamen Schokking en Nieuwland (2010) met nieuwe argumenten, en (beperkt) nieuwe informatie, zoals de aanwezigheid van een relatief ondiep breuksysteem, die zouden aantonen dat de hoge dalingssnelheden (~40 cm/eeuw) bij de HBZW toch hoofdzakelijk een natuurlijke en tektonische oorzaak zouden hebben. De conclusies van Barends et al. (2008) lijken echter overeind te blijven staan, al kon door Barends et al. (2008) niet onomstotelijk vastgesteld worden dat er géén afwijkende tektonische component van daling aanwezig is in het betreffende gebied. Het breuksysteem waar Schokking en Nieuwland (2010) de aandacht op richten bevindt zich op weinig kilometers ten noorden van de gasvelden van Groet en Bergen. Indien beweging van dit breuksysteem daadwerkelijk verantwoordelijk is voor lokaal afwijkende bodemdaling moet de mogelijkheid worden opgehouden dat het gaat om geïnduceerde bewegingen die samenhangen met de spanningsveranderingen die worden veroorzaakt door de gaswinning, en niet noodzakelijk om reguliere tektonische bewegingen.

Het is verder opmerkelijk dat in Barends et al. (2008) zowel Dillingh (blz. 112) als Barends (blz. 131) waargenomen dalingssnelheden van peilmerken na 2000 bij de HBZW in de orde van 1 tot 2 mm/jaar aanduiden met 'autonome bodemdaling' (notabene: deze snelheden zijn van dezelfde orde als de relatieve zeespiegelstijging die wordt gemeten door de getijdenstations). Tegelijkertijd merkt Dillingh op dat compactie van Tertiaire kleilagen of diepere tektonische effecten daarbij geen rol van betekenis spelen. De combinatie van deze twee kwalificaties strookt niet met elkaar. Als de snelheden van 1 tot 2 mm/jaar autonoom zijn in de zin dat ze niet door menselijke activiteiten worden veroorzaakt, dan is er een natuurlijk

proces voor verantwoordelijk. Omdat de daling zich voordoet ten noorden van Camperduin lijkt een tektonische oorzaak in dat geval de enige mogelijke kandidaat.

Een andere intrigerende bevinding die werd gepubliceerd in het boek van Barends et al. (2008) betreft analyses van InSAR data (Figuur 2.4) die wijzen op een schijnbaar systematische zuidwaartse kanteling van HBZW over een lengte van ca. 5 km van ~ 2 mm/jr (20 cm/eeuw) voor de periode 1992 – 2008 (Van Leijen et al., 2008). InSar is een afkorting van *Interferometric synthetic aperture radar*, waarbij radarbeelden vanuit satellieten worden gecombineerd om bewegingen van het grondoppervlak te berekenen. Bij meetreeksen van meerdere jaren kunnen vervormingssnelheden met een precisie van ongeveer 1 mm/jaar afgeleid worden. De radarreflecties die gemeten worden zijn afkomstig van harde infrastructuur, zoals huizen, straten en keringen.

De kanteling van de HBZW betreft zowel de kruin als de (zeewaartse) voet van de zeewering. Het is wenselijk om te onderzoeken of deze kanteling nog een restzetting kan zijn door de versterking van de zeewering in 1980, of dat er mogelijk andere oorzaken aan ten grondslag liggen. Daarvoor is het bijzonder zinvol om te onderzoeken óf en op welke manier de waargenomen kanteling zich na 2008 verder heeft ontwikkeld. Indien er aanwijzingen zijn voor diepe oorzaken in plaats van restzetting zou er ook gekeken kunnen worden naar de mogelijkheid van grondwaterstroming in diepe watervoerende lagen richting de nabijgelegen gasvelden bij Bergen.



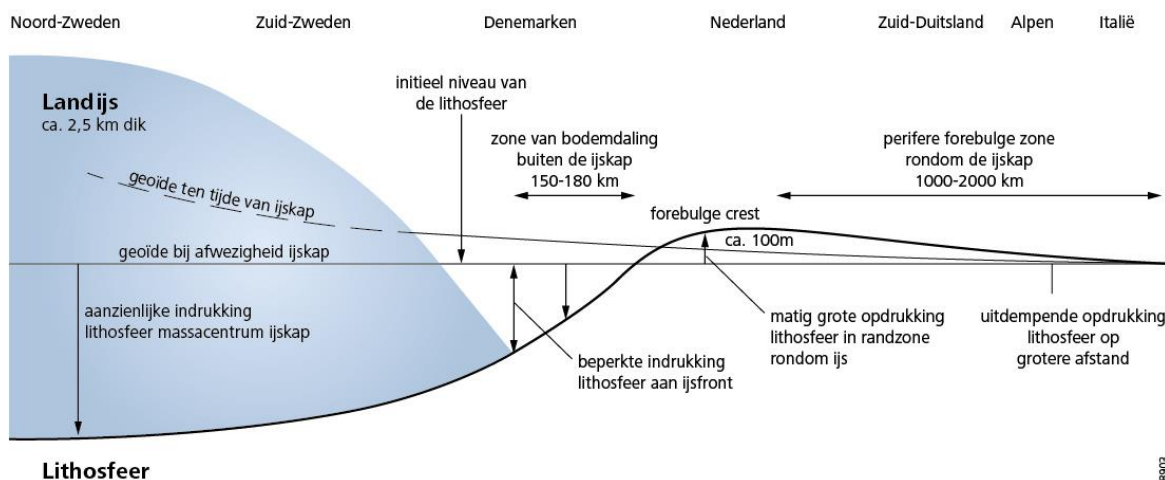
Figuur 2.4 InSAR bewegingssnelheden voor de Hondsbosse Zeewering (HBZW) en, in het noorden de Pettemer Zeewering (PZW) voor de periode 1992-2000 (links) en de periode 2003-2008 (rechts) en voor de kruin (boven) en de zeewaartse voet van de weringen (beneden) (Van Leijen et al., 2008).

2.4 Isostasie

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

De rubbermatras bestaat op aarde uit de lithosfeer, een stevige, korst van gemiddeld 70-120 km dik. Door veranderingen in de belasting van de lithosfeer en de mantel, bijvoorbeeld door het groeien en smelten van ijskappen, sedimentatie en erosie en veranderingen in de hoeveelheid (zee)water, wordt het isostatische evenwicht verstoord en zal de lithosfeer-mantel configuratie aangepast worden om het evenwicht te hervinden. In Nederland speelt momenteel vooral de isostatische aanpassing aan het verdwijnen van het ijs uit de laatste ijstijd nog een grote rol. Figuur 2.5 laat deze invloed conceptueel zien. De linkerkant van het figuur toont de 2.5 km dikke ijskap in Scandinavië en hoe deze de lithosfeer indrukt. Op zekere afstand van de ijskap komt de lithosfeer juist omhoog door de elasticiteit van de lithosfeer. Deze opdrukking wordt in het Engels de *forebulge* genoemd en Nederland lag tijdens de piek van de laatste ijstijd dichtbij het hoogste punt van deze *forebulge*. De kam van de *forebulge* wordt vaak net ten noorden van Nederland gemodelleerd en het grootste gedeelte van Nederland lag daarmee op de zuidflank van de *forebulge*. Na het verdwijnen van de ijskap veert de lithosfeer ter plaatse van de ijskap weer terug en zakt de *forebulge* in (zie bijvoorbeeld Vink et al., 2007). Omdat de mantel sterk viskeus is duurt dit aanpassingsproces duizenden jaren en speelt dit momenteel nog steeds een rol. De invloed van sedimentatie/erosie op het isostatische evenwicht in Nederland is nog niet goed bekend.

De modellen die veranderingen in het isostatisch evenwicht door water en ijs modelleren worden meestal aangeduid met glacio-isostatische aanpassingsmodellen oftewel GIA-modellen. Er zijn tal van GIA-modellen beschikbaar, allemaal met hun eigen configuratie van eigenschappen van de lithosfeer en de mantel en met hun eigen ijskapmodellen. Momenteel vindt er een overgang plaats naar modellen die rekening houden met de 3D-variatie in de opbouw van de aarde, in plaats van de opbouw van de aarde in het model constant te houden. De GIA-modellen worden veel gebruikt om de huidige en toekomstige bijdrage van GIA aan bodembewegingen te modelleren. Een belangrijke databron voor de GIA-modellen zijn paleo-zeespiegelgegevens, dit zijn gegevens die voor een zeker moment in het verleden aangeven hoe hoog of laag de zee relatief stond ten opzichte van het heden. De GIA-modellen worden zodanig gekalibreerd dat de overeenkomst met de paleo-zeespiegelgegevens zo goed mogelijk is. Wanneer de kalibratie voldoende vertrouwen geeft kan het GIA-model gebruikt worden om de huidige of toekomstige bijdrage van GIA aan zeespiegelveranderingen te berekenen. Hieronder worden eerst enkele state-of-the-art GIA-model resultaten voor Nederland getoond. Daarna wordt ingegaan op de huidige inspanning om een paleo-zeespiegeldatabase voor Nederland op te zetten waarmee de GIA-modellen nog beter gekalibreerd kunnen worden.

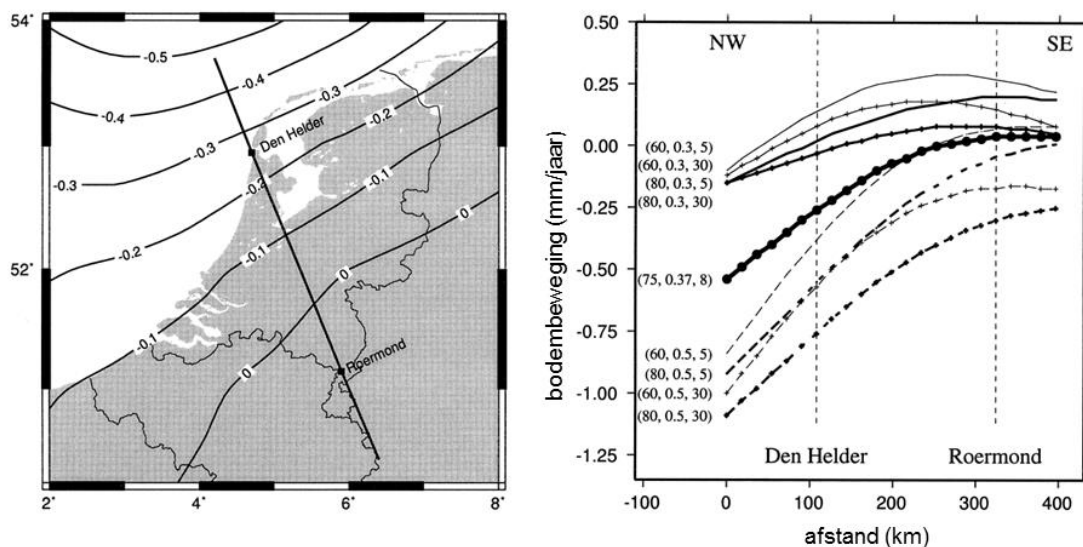


Figuur 2.5 Voorbeeld van de werking van glacio-isostasie. Onder de ijskap wordt de lithosfeer in de mantel gedrukt en mantelmateriaal stroomt zijwaarts en duwt daar de lithosfeer omhoog. De ontstane bult wordt de forebulge genoemd. Tijdens en na het afsmelten van de ijskap draait dit proces om en stort de forebulge in en veert de lithosfeer ter plaatse van de voormalige ijskap omhoog (uit Stouthamer et al., 2015).

2.4.1 GIA-modellen voor Nederland

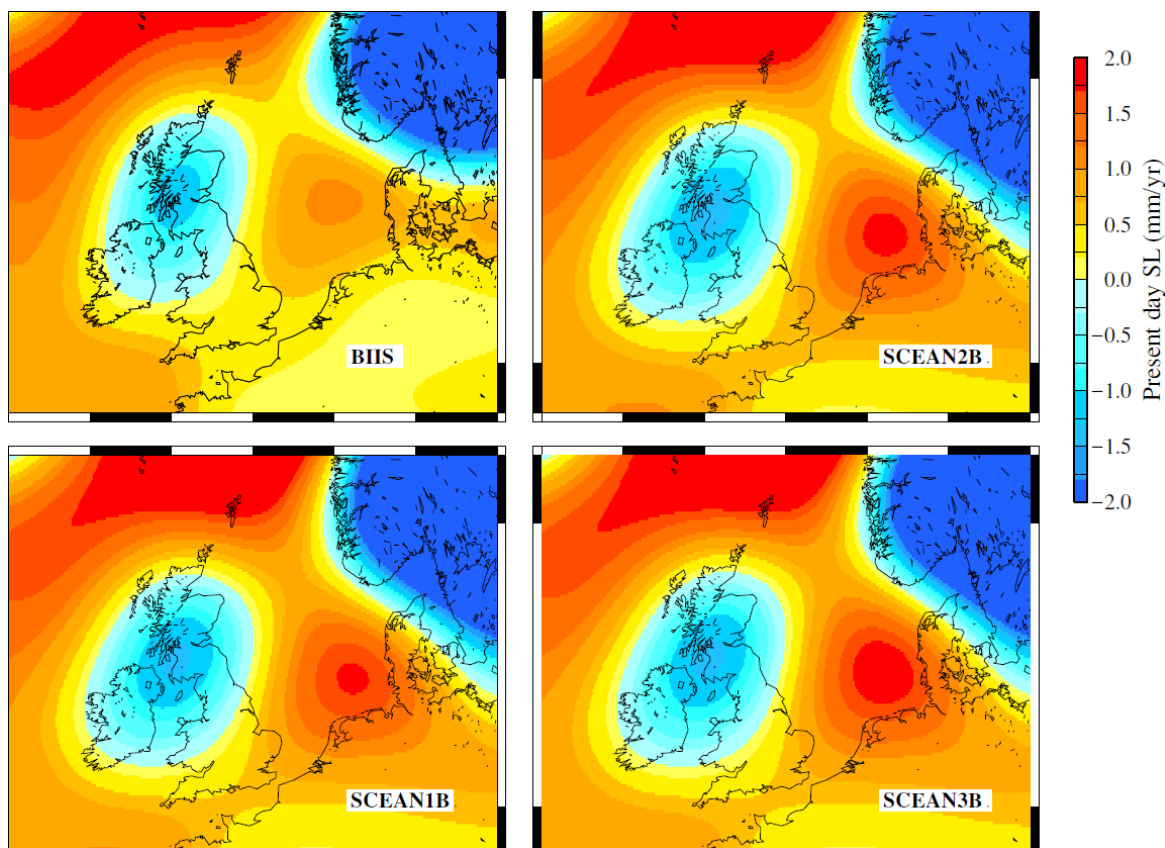
Er bestaat niet een beste GIA-model voor Nederland. Zoals hierboven aangegeven zijn er vele GIA-modellen in omloop die allemaal anders opgezet zijn en dus andere uitkomsten hebben. Om dit illustreren worden hieronder verschillende uitkomsten van GIA-modellen getoond.

Een van de eerste artikelen waarin specifiek naar de bijdrage van isostatische bewegingen in Nederland wordt gekeken is dat van Kooi et al. (1998). Het artikel laat een duidelijke NW-ZO trend zien met dalingssnelheden van 0.3 mm/jaar in de Waddenzee en 0.1 mm/jaar in Zeeland (Figuur 2.6, linkerpaneel). Bij deze uitkomst is een dikte van de lithosfeer aangehouden van 75 km en viscositeiten van 3.7×10^{20} Pa*s en 8×10^{21} Pa*s voor de bovenste en onderste laag van de mantel. Het rechterpaneel in de figuur laat de uitkomsten zien met variaties in deze parameterwaarden, waarbij voor de lithosfeer een dikterange is aangehouden van 60-80 km en voor viscositeiten van de bovenste en onderste laag van de mantel een range van $3-5 \times 10^{20}$ Pa*s en $5-30 \times 10^{21}$ Pa*s. Door de verschillende uitkomsten van deze configuraties te vergelijken met Holocene zeespiegelobservaties in Noordwest-Europa is vervolgens het beste model bepaald, waarvan de contourplot in het linkerpaneel te zien is. In het rechterpaneel wordt deze uitkomst weergegeven met de dikke lijn. Kiden et al. (2002) lieten zien dat een toevoeging van een kleine component van tektonische daling op basis van de resultaten van Kooi et al. (1998) de ruimtelijke verschillen in Holocene zeespiegelstijging tussen West-België en Noord-Holland nog nauwkeuriger reproduceert.



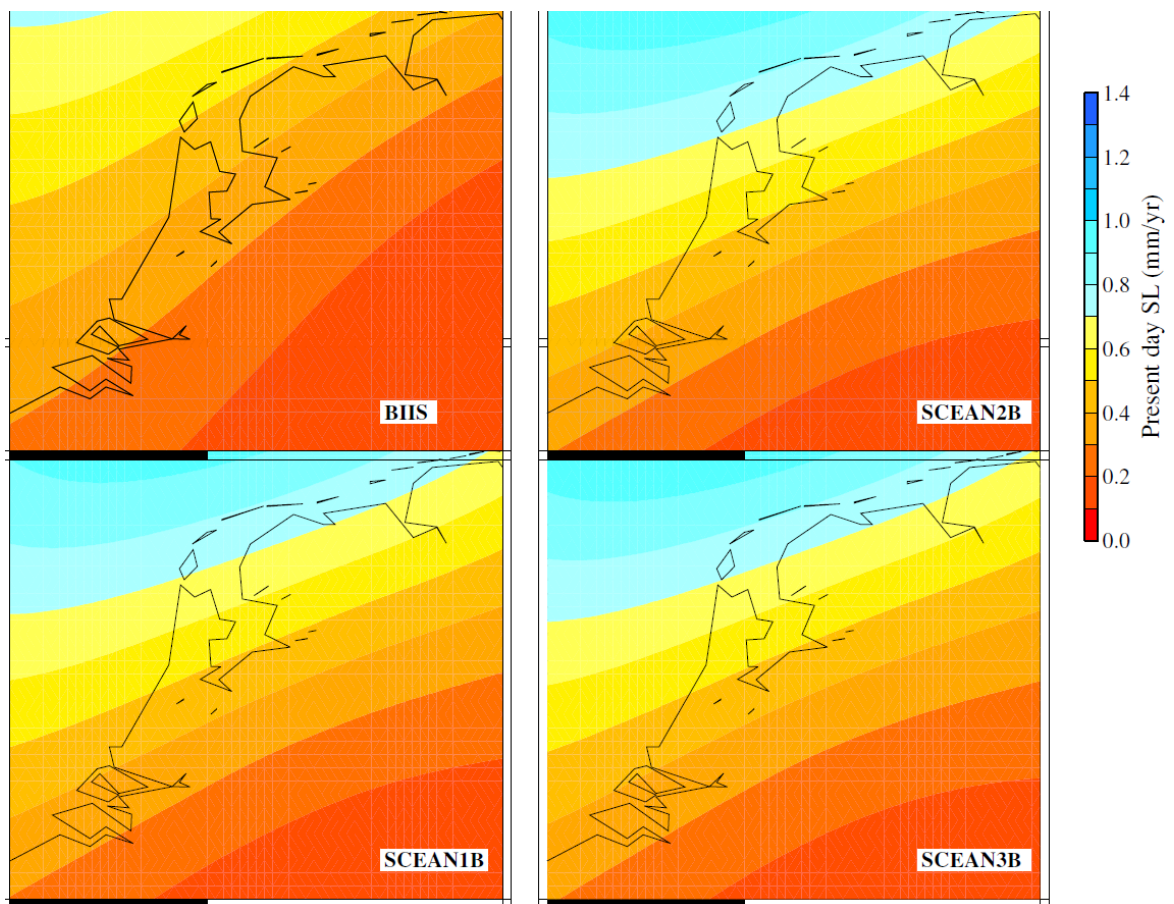
Figuur 2.6 Kaart van de meest waarschijnlijke schatting van de huidige bodembeweging (mm/jaar) door isostasie (links). Range van mogelijke oplossingen weergegeven als profielen voor de lijn Roermond–Den Helder (Naar Kooi, 1998).

Zeer recent GIA-werk is voor dit rapport aangeleverd door Sarah Bradley (TUDelft). Vier aangeleverde modeluitkomsten die worden getoond in Figuur 2.7 laten de huidige bijdrage van GIA-effecten aan zeespiegelveranderingen zien voor Noordwest-Europa. Duidelijk zichtbaar is dat ter plaatse van de grote ijskappen, met als kernen Schotland en Scandinavië, de aarde terugveert en dat de bijdrage aan zeespiegelstijging negatief is (zeespiegeldalingscomponent). De locaties waar vroeger *forebulges* gelegen hebben, bijvoorbeeld ten noorden van de Wadden en ten noorden van Schotland, dalen het snelst. De vier getoonde scenario's laten hetzelfde patroon zien als Kooi et al. (1998), maar de snelheden zijn hoger, met name ook in Noord-Nederland. Het scenario BIIS is gebaseerd op een model van Bradley et al. (2011) waarin een nieuw landijsmodel van Bradley et al. (2016) is opgenomen. Hierbij wordt een lithosfeerdikte van 71 km aangehouden en viscositeiten van 5×10^{20} Pa*s en 3×10^{22} Pa*s voor de bovenste en onderste laag van de mantel. De overige drie scenario's zijn van het BRITICE-CHRONO project (www.britice-chrono.org), dat als doel heeft om het smelten van de Britse ijskap zo goed mogelijk te reconstrueren en om robuuste GIA-modellen voor Noordwest-Europa te maken. Nederland valt binnen het onderzoeksgebied en profiteert dus van deze inspanning. In het eerste scenario (SCEAN1B) hebben de Britse en Scandinavische ijskappen lang contact gehad, waarbij dus de gehele noordelijke Noordzee geblokkeerd was; in het tweede scenario (SCEAN2B) hadden beide ijskappen slechts kort contact gehad en in het derde scenario (SCEAN3B) was er slechts heel kort contact tussen twee dunne uitlopers van beide ijskappen. In het geval van de laatste twee scenario's trokken de twee ijskappen zich relatief snel terug uit de Noordzee, op basis van Sejrup et al. (2016), terwijl in het eerste scenario de ijskappen zich relatief langzaam terugtrokken. De parameters zijn verder identiek, alleen is de viscositeit van de onderste laag van de mantel bijgesteld naar 1×10^{22} Pa*s.



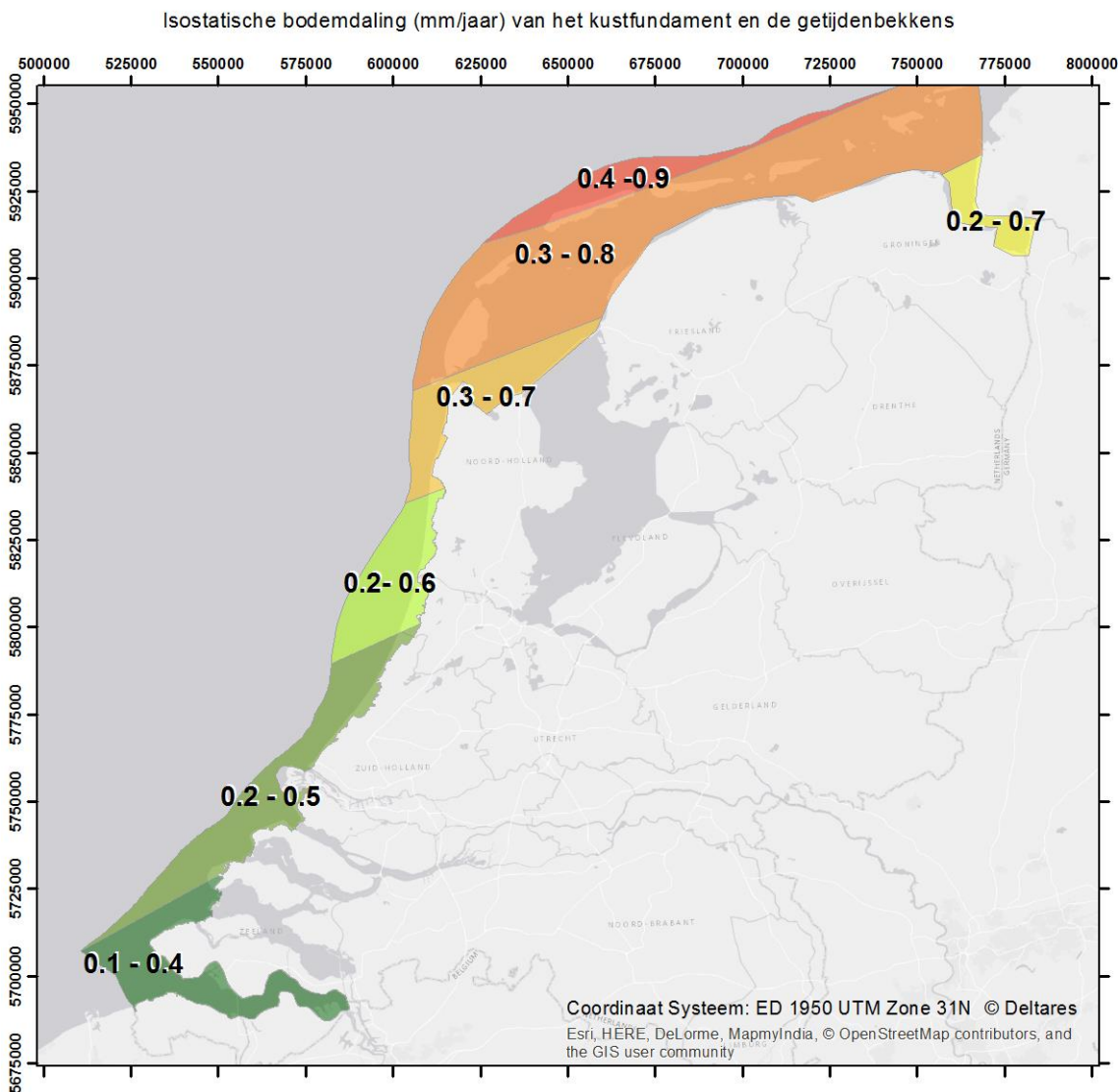
Figuur 2.7 Gemodelleerde bijdragen van GIA-effecten op zeespiegelveranderingen in NW-Europa, inclusief glacio- en hydro-isostatische effecten en aanpassingen aan de geoïde. Het scenario BIIS is gebaseerd op het GIA-model van Bradley et al. (2011) en een wereldwijd ijskap model van Bradley et al. (2016). De andere scenario's zijn afkomstig van het momenteel lopende BRITICE-CHRONO project, zie hoofdstuk voor details. Dit project wordt gesponsord door de Natural Environment Research Council (NERC), project BRITICE-CHRONO NE/J009868/1.

Inzoomend op Nederland (Figuur 2.8) valt op dat verschillen tussen scenario BIIS, het oude model, en de drie nieuwste scenario relatief groot zijn, maar dat tussen de drie nieuwste scenario's (SCEAN1B, 2B en 3B) de verschillen klein zijn. In het Waddengebied is de huidige bijdrage volgens deze nieuwe modellen circa 0.7-0.8 mm/jaar, wat dus neerkomt op 7-8 cm per eeuw en, indien correct, een substantiële bijdrage aan de relatieve zeespiegelstijging in Nederland (ongeveer 20 cm in de laatste eeuw). Richting het zuiden neemt het GIA-effect langzaam af, voor Zeeland wordt een bijdrage van 0.3-0.4 mm/jaar berekend. Het BRITICE-CHRONO project is nog lopende, dus het is goed mogelijk dat er nog aanpassingen verschijnen die in 2018 meegenomen kunnen worden.



Figuur 2.8 Gemodelleerde bijdragen van GIA-effecten op zeespiegelveranderingen in Nederland, inclusief glacio- en hydro-isostatische effecten en aanpassingen aan de geoïde. Het scenario BIIS is gebaseerd op het GIA-model van Bradley et al. (2011) en een wereldwijd ijskap model van Bradley et al. (2016). De andere scenario's zijn afkomstig van het momenteel lopende BRITICE-CHRONO project, zie hoofdstuk voor details. Dit project wordt gesponsord door de Natural Environment Research Council (NERC), project BRITICE-CHRONO NE/J009868/1. De kleurenschaal is afwijkend van die in Figuur 2.7.

De hierboven getoonde modellen vertonen dus relatief grote verschillen, waarbij recentere modellen hogere dalingssnelheden berekenen dan het oudere model. Figuur 2.9 toont een kaart die uitkomsten van de modellen samenvat, waarbij de minimale en maximale waarden uit de verschillende modellen gebruikt zijn om de mogelijke range in dalingssnelheden weer te geven. Er is een duidelijke trend waarneembaar met de hoogste snelheden in het noorden en de laagste snelheden in het zuiden. Het is goed mogelijk dat deze range in de toekomst aangepast moet worden door het verschijnen van modeluitkomsten die gekalibreerd zijn aan Nederlandse zeespiegeldata (zie ook de volgende paragraaf).



Figuur 2.9 Isostatische bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. De getoonde range is gebaseerd op een combinatie van gegevens uit Kooi et al. (1998) en het Britice-chrono project.

2.4.2 Paleo-zeespiegeldatabase

GIA-modeluitkomsten zoals in bovenstaande figuren worden sterk beïnvloed door de hoeveelheid en kwaliteit van de zeespiegeldata om ze te kalibreren en het liefst ook te valideren. Veel GIA-modellereurs gebruiken hiervoor een database met zeespiegeldata, maar het is gemakkelijk om een dergelijke database te maken zonder oog te hebben voor de onnauwkeurigheden van de data en de kwaliteit van de verschillende databronnen op waarde te schatten. Om een goede zeespiegeldatabase te maken, van welk gebied dan ook, is een behoorlijke inspanning vereist. Het laatste decennium is dit besef sterk naar voren gekomen en verschijnen er steeds meer goede databases die worden gebruikt in GIA-studies en zeespiegelstudies. Voor het opstellen van een dergelijke database is een internationaal protocol opgesteld dat verschenen is in het *Handbook of Sea-Level Research* (Hijma et al., 2015). Momenteel vindt er een wereldwijde inspanning plaats om dit protocol toe te passen en een wereldwijde database van paleo-zeespiegeldata te maken. Veel van de onderzoekers die hier aan werken zijn bezig met een artikel voor een special issue van *Quaternary Science Reviews*, om daarin de database waar zij aan werken te presenteren. Voor Nederland was

een met dit protocol opgestelde database ook nog niet beschikbaar, al zijn er wel veel paleo-zeespiegelgegevens aanwezig. In een samenwerking tussen Deltares en de Universiteit Utrecht (Hijma/Cohen) is een database opgesteld voor West-Nederland die gepubliceerd zal worden in het special issue (dat in 2018 verschijnt). Deze database kan daarna door iedereen gebruikt worden en hopelijk aangevuld worden met data uit Zuid- en Noord-Nederland.

2.5 Discussie en conclusie

Op basis van dit hoofdstuk over geologische bodemdaling kan worden geconcludeerd dat:

- Er goede algemene kennis is van de processen die geologische bodemdaling veroorzaken in het kustfundament en de getijdenbekkens.
- Gemiddelde dalingssnelheden door tektoniek en autocompactie vrij goed kunnen worden bepaald voor lange perioden (tienduizend tot miljoenen jaren) in het geologische verleden en dat deze gemiddeld laag zijn, veelal ruim minder dan 1 cm/eeuw voor de individuele componenten.
- Er veel minder zekerheid bestaat over de snelheid van geologische bodemdaling door tektoniek en autocompactie in het recente verleden, heden en nabije toekomst. Dit wordt vooral veroorzaakt door de onbekende, maar potentieel sterke, invloed van het gewicht van de jonge duinen op autocompactie. Daarnaast bestaan er aanwijzingen dat op kortere tijdschalen versnelde tektonische bewegingen mogelijk zijn.
- Isostatische bodemdaling relatief snel gaat en een duidelijke zuid-noord trend vertoont: in het zuiden daalt de bodem door isostasie ongeveer 2-5 cm/eeuw, terwijl in het noorden dalingssnelheden van 3-9 cm/eeuw verwacht kunnen worden.
- De totale geologische bodemdaling dus snelheden kent, van ca. 2-10 cm/eeuw, die relevant zijn in relatie tot zeespiegelstijging en voor de kustverdediging.

De volgende activiteiten zouden moeten worden overwogen om meer duidelijkheid te verkrijgen over de rol van de drie componenten van geologische bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens:

1 Plaatsing van diep-gefundeerde ondergrondse peilmerken en extensometers die worden gecombineerd met een GPS station en InSAR reflectoren.

Dit is een belangrijke stap om zekerheid te krijgen over de totale grootte van de geologische bodemdaling en ruimtelijke verschillen daarin. Tegelijkertijd wordt de grip op bijdragen van ondiepere processen, die in het volgende hoofdstuk, worden besproken sterk vergroot. In andere landen waar belangrijke vragen leven rond bodemdaling (bv. VS, Indonesië, China) is dit min of meer 'common practice'. Deze peilmerken zouden bijvoorbeeld nuttig zijn bij de hoofdgetijdenstations of in het jonge duinen gebied.

2 Gerichte en blijvende studie van InSAR data.

Hoewel de fysieke aard van reflectoren van satellietradarsignalen slecht is bepaald in vergelijking met NAP-merken, is de ruimtelijke en temporele dichtheid van InSAR metingen veel groter dan bij waterpassingen en neemt ook de periode waarover radarbeelden beschikbaar zijn ieder jaar toe. Daarmee is, of komt, ook detectie van relatief lage (sub- mm/jaar) bodemdalingssnelheden van geologische bodemdaling binnen bereik. Daarnaast verdient het aanbeveling om de reeds geconstateerde sterke daling/kanteling van de Hondbossche Zeewering (1992-2008) over langere tijd te volgen.

3 Uitbreiding van de paleo-zeespiegel database.

Dit levert belangrijke informatie om de onzekerheid in GIA-modellen voor de huidige snelheid van de isostatische component van bodembeweging te verkleinen.

4 Studie van de compactiegevoeligheid van afzettingen in de ondergrond.

Geotechnische compressie-eigenschappen en de huidige compactiegraad van potentieel gevoelige afzettingen in de ondergrond van het kustfundament en het kustfundament bieden waardevolle informatie om de onzekerheid over mogelijke bijdragen door autocompactie te verkleinen. Ruimtelijke verschillen (bijvoorbeeld onder en buiten de duinen) van dezelfde afzetting geven goede kwalitatieve informatie; geotechnische parameter-waarden kunnen worden gebruikt in voorspellingen.

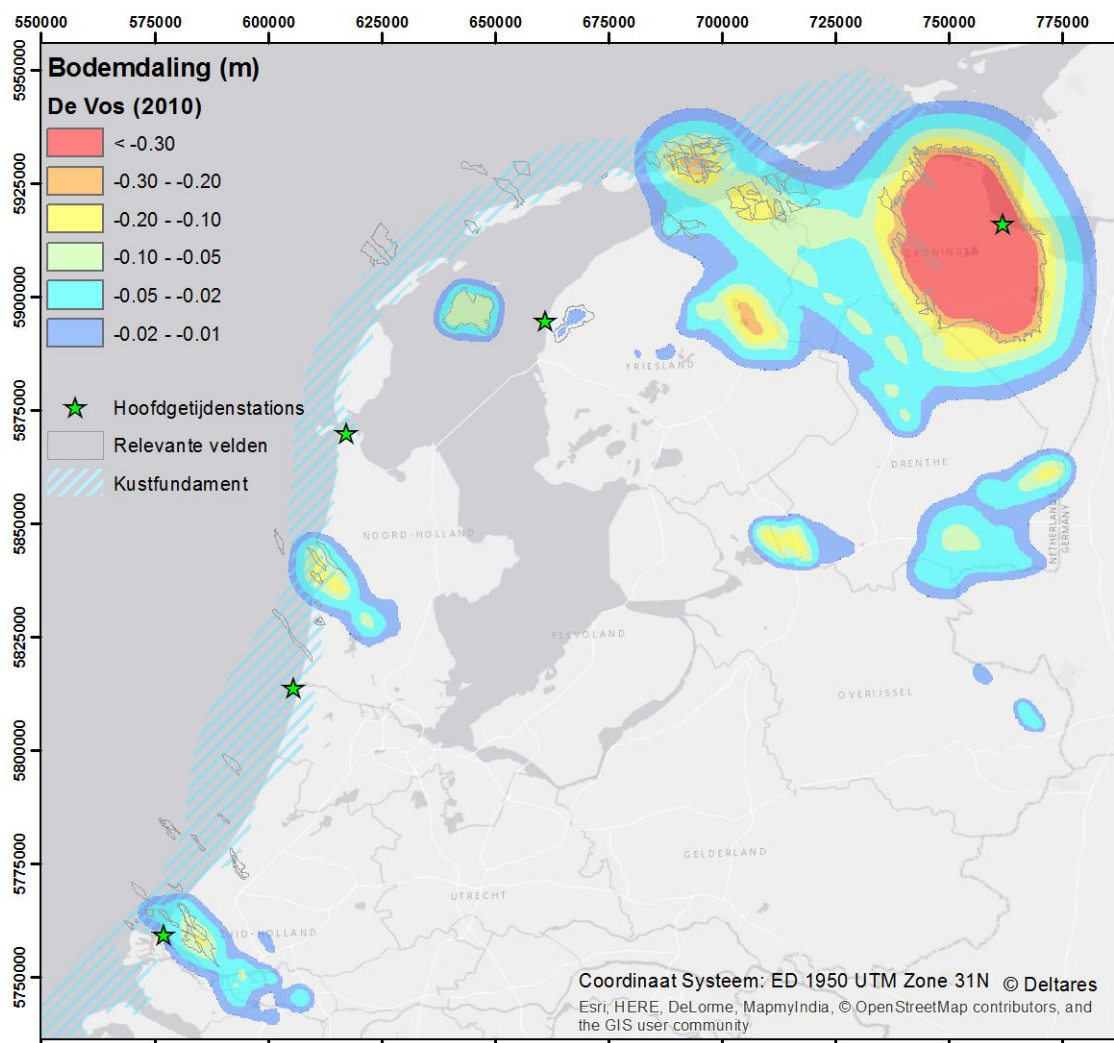
Bodemdaling door gaswinning treedt op doordat de winning een vermindering van de poriëndruk veroorzaakt. Als gevolg hiervan wordt de gasvoerende gesteentelaag langzaam samengedrukt onder invloed van het bovenliggende materiaal. De mate van samendrukking wordt bepaald door de grootte van de drukval, de materiaaleigenschappen van het reservoirgesteente en de dikte van het reservoir (NAM, 2015a). Hoe deze samendrukking, ook wel compactie genoemd, zich vertaalt in een bodemdaling aan het maaiveld hangt af van de diepte van de winning en de omvang van het veld. Bij grote velden komt de maximale maaiveldddaling behoorlijk overeen met de compactie van het reservoir gesteente, terwijl bij kleinere velden de maaiveldddaling aanzienlijk kleiner is dan de compactie op grotere diepte. Indien verschillende velden naast elkaar liggen wordt de uiteindelijke bodemdaling bepaald door de overlappende bodemdalingsschotels.

Hieronder wordt per schotel een detailkaart getoond met daarop de verschillende velden en de hoofdkarakteristieken van de velden worden in een tabel samengevat. Voor elke schotel wordt verder aangegeven wat er bekend is over de opgetreden bodemdaling, de te verwachte bodemdaling en in hoeverre deze zaken alleen gemodelleerd of ook gemeten zijn. De verwachte bodemdaling zoals vermeld in de tabellen betreft de daling door de productie bij 1 veld. Indien er meerdere velden dicht bij elkaar liggen en de dalingsschotels overlappen kan de gecombineerde bodemdaling hogere waarden bereiken. Bijbehorende bodemdalingsvolumes worden in een aparte sectie besproken.

Bij de beschrijving van de velden hieronder wordt per schotel steeds aangegeven hoeveel bodemdaling al opgetreden is en welke nog verwacht kan worden volgens bodemdalingmodellen op basis van de verwachte levensduur en productie van de velden. De genoemde dalingen moeten gezien worden als een inschatting van de ordegrrootte van bodemdaling, aangezien er bij het meten en modelleren van bodemdaling veel onzekerheden bestaan. Ter illustratie van de aanzienlijke onzekerheid die bij bodemdalingmodellering aanwezig is; in een rapport van de NAM (2015a) is het volgende opgenomen:

- Boven de kleinere velden die al langer in productie zijn en aan de randen van het Groningen-gasveld is de onzekerheidsmarge (1σ) ongeveer $\pm 25\%$ van de berekende bodemdaling
- Voor nieuw te ontwikkelen velden is de onzekerheid groter en moet een marge van $\pm 100\%$ worden aangehouden.
- De ondergrens voor de genoemde onzekerheden is ± 2 cm.
- Daarnaast wordt in het rapport gesteld dat bodemdaling van minder dan 2 cm over enkele decennia in het algemeen niet precies te meten is. In contourkaarten van prognoses worden daarom ook geen contouren van minder dan 2 cm getoond.

Voordat de individuele schotels besproken worden toont Figuur 3.2 nog een landelijke kaart van de gemodelleerde bodemdaling die door olie- en gaswinning optreedt (De Vos, 2010). De gemodelleerde bodemdaling betreft de bodemdaling over de gehele (verwachte) levensduur van het veld. In sommige gevallen is de winning al gestaakt en heeft de gemodelleerde bodemdaling al opgetreden. Bij actieve velden zal een deel van de gemodelleerde bodemdaling nog optreden, terwijl een ander deel al opgetreden is. Deze scheiding is per veld verschillend. Een belangrijk punt hierbij is dat deze modellering voor de meeste van de offshore velden niet is uitgevoerd. Zoals hierboven aangegeven bestaat er grote onzekerheid bij de uitkomsten van dit soort modellen en verschillende modellen leiden tot verschillende uitkomsten. De kaart is vooral bedoeld om een indruk te geven van de ordegrrootte van de bodemdaling.



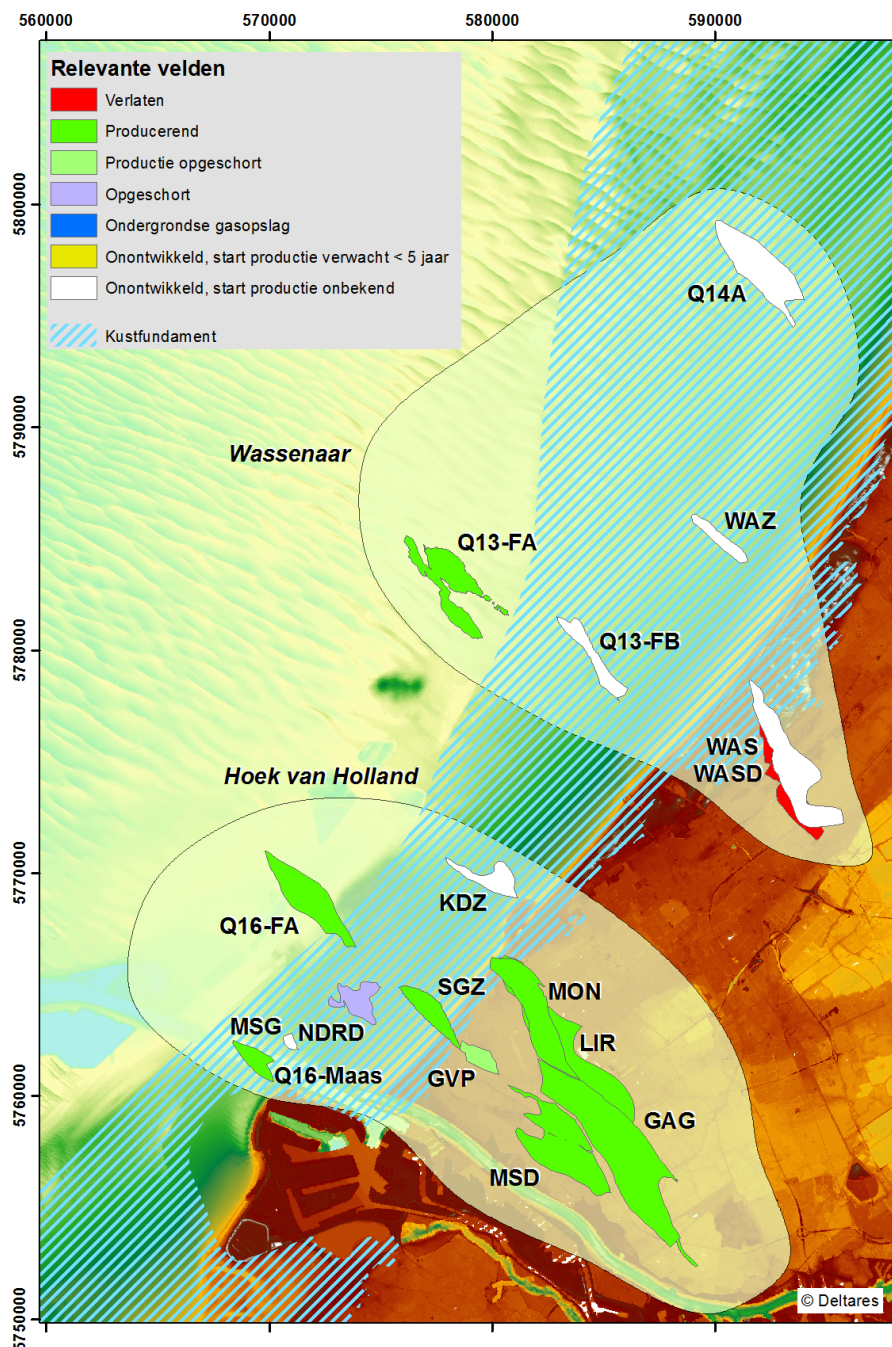
Figuur 3.2 Verwachte bodemdaling door olie- en gaswinning, op basis van historische en verwachte productiegegevens (De Vos, 2010). De ligging van de hoofdgetijdenstations, exclusief Vlissingen, wordt ook getoond. Opgemerkt wordt dat er een grote onzekerheid aanwezig is bij dit soort modellen en dat verschillende modellen leiden tot verschillende uitkomsten. De kaart is vooral bedoeld om een indruk te geven van de ordegrrootte van de verwachte bodemdaling. De kleinere offshore gasvelden zijn in dit model niet meegenomen.

3.2.1 Hoek van Holland

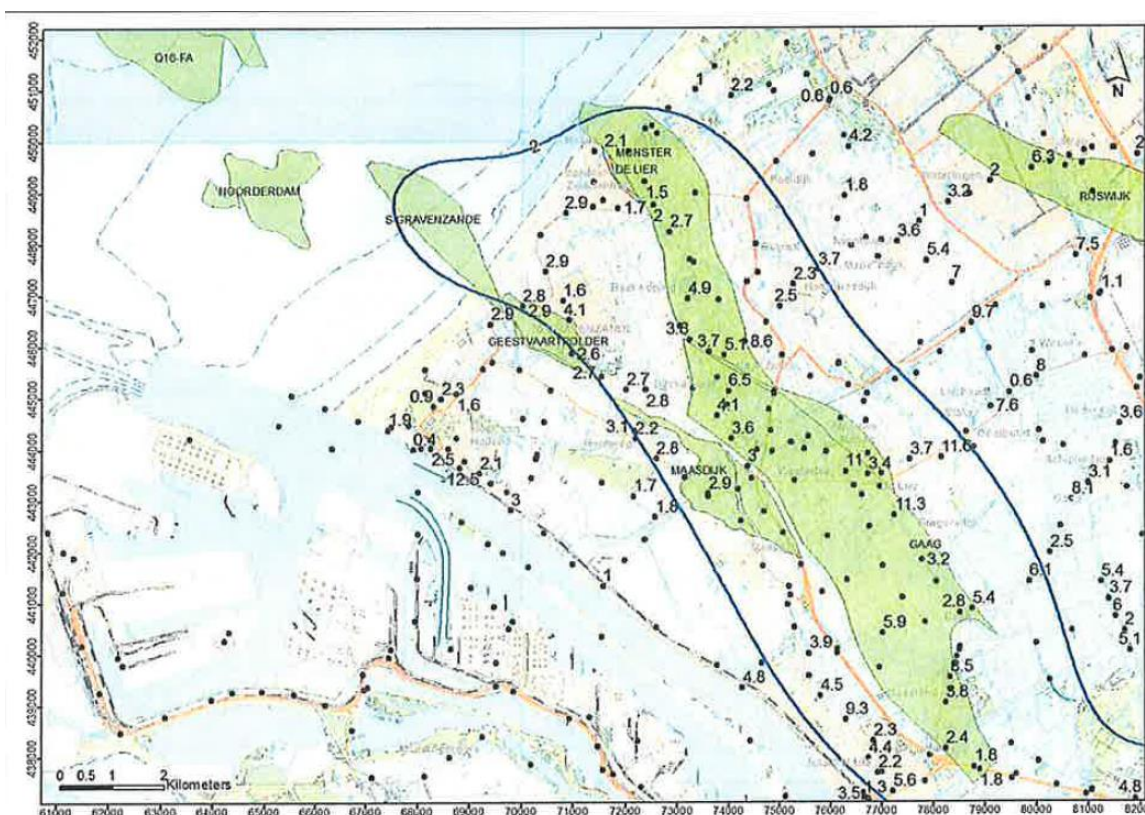
In de omgeving van Hoek van Holland liggen verschillende producerende velden, waarvan de meeste op het land liggen (Figuur 3.3). Veel van de velden op het land zijn aan het einde van hun productiefase, maar offshore is relatief kort geleden gestart met winning. Ook zijn enkele velden nog onontwikkeld, met dus de potentie om in de toekomst producerend te worden (Tabel 3.1). In het meest recent winningsplan van de NAM voor de velden op het land staat een kaart met de gemeten bodemdaling tussen 1989 en 2011 (NAM, 2013). De getallen zijn gebaseerd op een waterpassing uit 2011 (NAM, 2012). Duidelijk zichtbaar zijn de grote verschillen tussen de peilmerken, maar ook zichtbaar is dat in het centrum van de gasvelden dalingen van boven de 5 cm niet ongebruikelijk zijn. In het kustgebied liggen de waarden meestal tussen de 2-3 cm (Figuur 3.4), deze getallen komen goed overeen met de uitkomsten van De Vos (2010). Het hoofdgetijdenstation Hoek van Holland ligt binnen het

gebied waar bodemdaling door winning verwacht kan worden. Offshore zijn geen metingen beschikbaar.

Voor de periode 2011-2025 heeft de verwachte bodemdaling, ook binnen het kustfundament, een grootte van enkele centimeters (NAM, 2013). Opgemerkt wordt dat Figuur 3.4 nog niet de bijdrage van het kleine veld Q16-Maas bevat. In het winningsplan (Oranje-Nassau Energie B.V., 2013) wordt voor dit veld een bodemdaling van maximaal 1.75 cm verwacht. Gezien de productieplannen voor de verschillende velden kan aangenomen worden dat het grootste deel van de verwachte bodemdaling al is opgetreden.



Figuur 3.3 Overzichtskartaal van de velden bij Hoek van Holland en Wassenaar met de benoemde clusters.



Figuur 3.4 In 2011 gemeten bodemdaling (in cm) sinds 1989 als gevolg van gaswinning van alle voorkomens in dit gebied weergegeven op de peilmerken met de contouren van de gemodelleerde bodemdaling in cm (NAM, 2013).

Tabel 3.1 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotel Hoek van Holland

Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
LIR	Olie/Gas	1957-2018	Producterend	2-4	Gemodelleerd en gemeten
GAG	Gas	1989-2018	Producterend	2-4	Gemodelleerd en gemeten
MON	Gas	1990-2018	Producterend	2-4	Gemodelleerd en gemeten
Q16-FA	Gas	1998-2023	Producterend	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
MSD	Gas	2000-2018	Producterend	2-4	Gemodelleerd en gemeten
SGZ	Gas	2002-2018	Producterend	2-4	Gemodelleerd en gemeten
GVP	Gas	2005-2015	Opgeschort	2-4	Gemodelleerd en gemeten
NDRD	Gas	2006-2015	Opgeschort	0-2	Gemodelleerd en niet gemeten
Q16-Maas	Gas	2014-2020	Producterend	0-1	Gemodelleerd en gemeten
KDZ	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
MSG	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten

3.2.2 Wassenaar

De meeste velden bij Wassenaar zijn nog onontwikkeld (Tabel 3.2). Op het land is het hoofdveld verlaten en offshore is alleen Q13-FA op dit moment producterend (Figuur 3.3). Dit veld ligt net ten westen van het kustfundament, maar de dalingsschotel zal zich zeker tot in het kustfundament uitstrekken. De productie is echter relatief laag en de verwachte bodemdaling is gesteld op maximaal enkele millimeters (GDF SUEZ, 2015). De

achterliggende bodemdalingstudie is geclassificeerd als 'Vertrouwelijk' en daarom vooralsnog niet beschikbaar. De effecten van bodemdaling in dit gebied zijn vooralsnog dus beperkt, dit kan uiteraard veranderen als de verschillende onontwikkelde velden actief worden.

Tabel 3.2 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotel Wassenaar

Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
WAS	Olie	1956-?	Verlaten	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
Q13-FA	Olie	2014-2023	Producterend	0-1	Gemodelleerd en niet gemeten
Q13-FB	Olie	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
WAZ	Olie	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
WASD	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
Q14A	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten

3.2.3 Castricum

De schotel Castricum overlapt vrijwel geheel met het kustfundament (Figuur 3.5) en bestaat uit enkele velden die in 2004 allemaal verlaten zijn (Tabel 3.3). Alleen voor veld CMZ is een modelstudie bekend (Wintershall, 2003). Ter plaatse van de kustlijn wordt een daling van 2 cm verwacht, in het duingebied een daling van maximaal 8 mm. Aangezien de velden reeds 13 jaar verlaten zijn zal de resterende bodemdaling zeer beperkt zijn.

Tabel 3.3 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotel Castricum

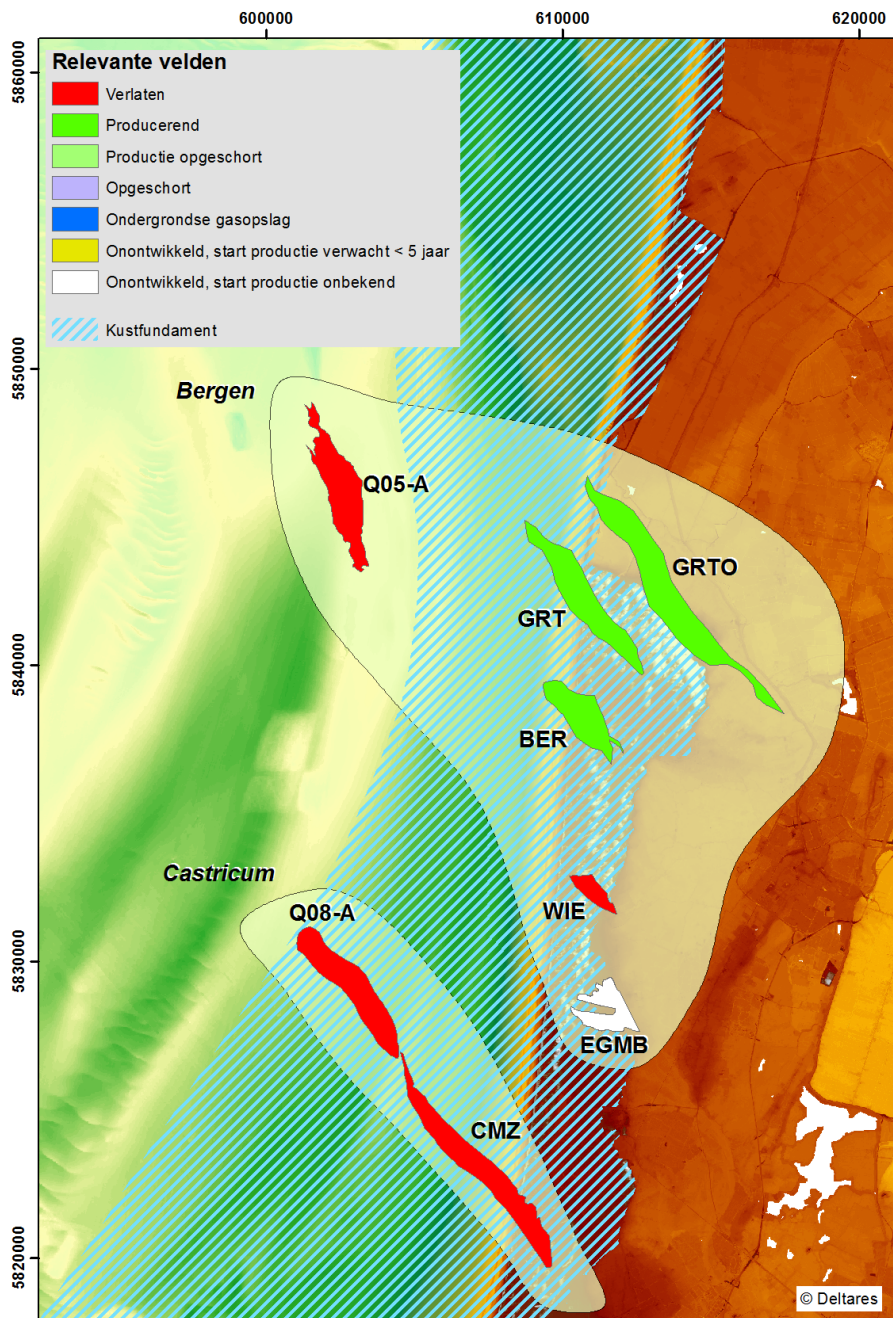
Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
Q08-A	Gas	1986-2004	Verlaten	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
CMZ	Gas	2001-2004	Verlaten	0.8-2	Gemodelleerd en meting onbekend

3.2.4 Bergen

De velden bij Bergen zijn al lang actief en produceren veel gas. Als gevolg hiervan treedt relatief veel bodemdaling op, waarbij de totale daling over de levensduur van de velden kan oplopen tot ongeveer 0.15 m (De Vos, 2010). Het gebied met de grootste daling ligt direct ten zuiden van Hondsbossche en Pettemerzeewering in de Schoorlse Duinen en is voor een belangrijk deel gelegen in het kustfundament. Deze gemodelleerde daling is hoger dan de 2-8 cm die aangenomen wordt in Hanssen et al. (2008). In het gebied treden daarnaast regelmatig aardbevingen op, waarbij sterktes van 2.5-3.5 op de Schaal van Richter voorgekomen zijn.

Tabel 3.4 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotel Bergen

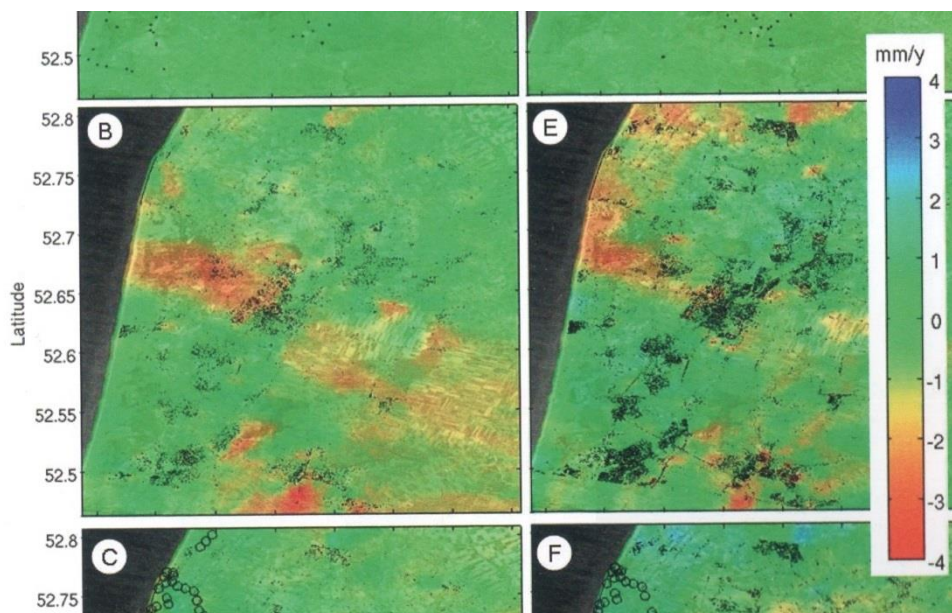
Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
GRT	Gas	1974-?	Producterend	2-15	Gemodelleerd en gemeten
BER	Gas	1978-?	Producterend	2-15	Gemodelleerd en gemeten
WIE	Gas	1984-?	Verlaten	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
Q05-A	Gas	2004-2008	Verlaten	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
GRT0	Gas	2006-?	Producterend	2-15	Gemodelleerd en gemeten



Figuur 3.5 Overzichtskartaal van de velden bij Castricum en Bergen met de benoemde clusters.

Er zijn geen recente overzichten bekend van de gemeten daling in de schotel Bergen. Een studie uit 2008 (Hanssen et al.) concludeert op basis van satellietmetingen dat er binnen de schotel verschillende dalingskommen aanwezig zijn. De metingen beslaan de periode 1992-2007 en laten een maximale daling zien 4 cm. Er is interessant genoeg ook bodemstijging waargenomen, met een snelheid van 1 mm/jaar, boven gasveld Alkmaar (niet zichtbaar in Figuur 3.5). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door gasinjectie. De satellietmetingen zijn vergeleken met waterpasmetingen en hoewel de patronen vergelijkbaar zijn, kunnen de verschillen in gemiddelde daling per jaar oplopen tot 1.5 mm/jaar. Figuur 3.6 laat zien dat

tussen 1992-2001 de hoogste dalingsnelheden vooral direct ten westen van Bergen optraden, terwijl in de periode daarna de bodemdaling zich wat meer richting het noorden ging uitstrekken. Aangezien veel velden nog actief producerend zijn en verwachte einddata niet bekend zijn, valt op dit moment niet goed in te schatten hoeveel bodemdaling nog zal optreden. Daarnaast is onbekend hoeveel bodemdaling sinds het overzicht van Hanssen et al. (2008) is opgetreden.



Figuur 3.6 Geïnterpoleerde lineaire deformatiesnelheden door kriging, afgeleid uit radarmetingen voor de periode 1991-2001 (B) en 2001-2006 (E). Naar Hanssen et al. (2008).

3.2.5 Zuidwal

Het gasveld Zuidwal is een groot gasveld ten zuiden van de Griend (Figuur 3.7). Het is reeds lang in gebruik en naar verwachting stopt de productie in 2020 (Tabel 3.5). Veruit de meeste winning heeft dus al plaatsgevonden. Een rapport uit 2015 (Vermillion Energy) schrijft dat er tussen 1988-2015 in totaal 14.177 miljard Nm^3 aan gas is gewonnen en dat er tussen 2015-2020 nog slechts ongeveer 70 miljoen Nm^3 gewonnen gaat worden. Nm^3 is de standaard eenheid waarin aardgas wordt gemeten. Het staat voor de hoeveelheid gas die bij een temperatuur van 0 °C en onder absolute druk van 1,01325 bar een volume van 1 m^3 inneemt.

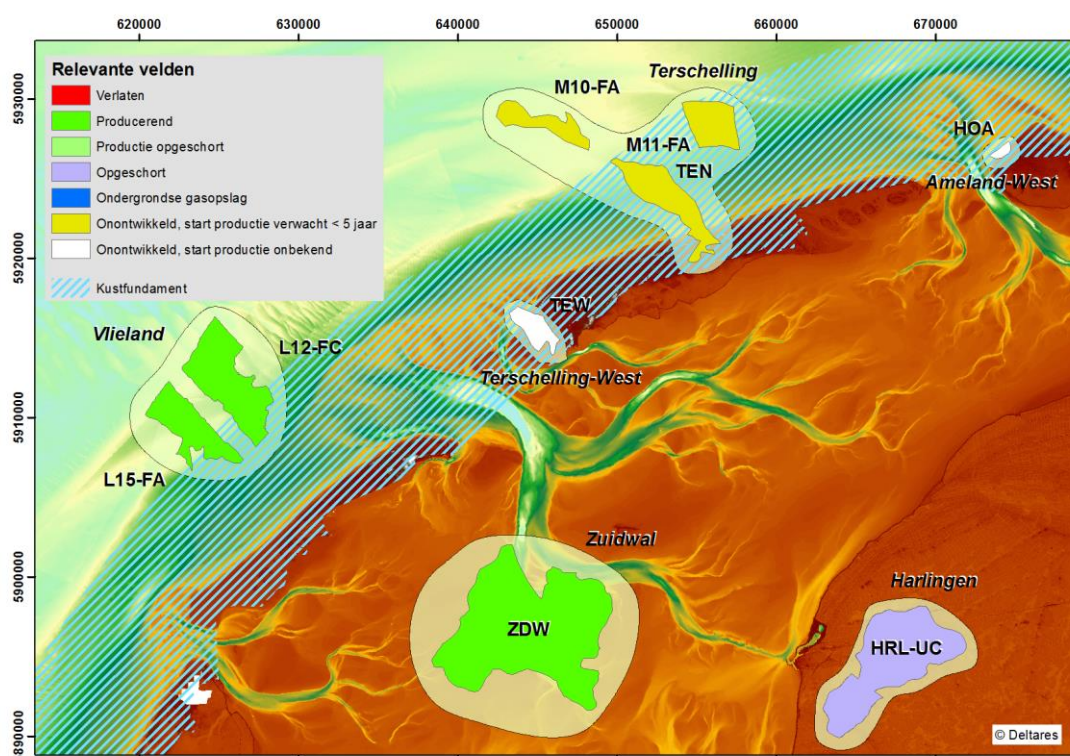
De bodemdaling bij het gasveld wordt gemonitord op de locatie van het platform, in eerste instantie met waterpasmetingen, maar later met GPS- en satellietmetingen. Met behulp van modellen, die geijkt zijn aan de metingen, is berekend dat de maximale bodemdaling 10-14 cm bedraagt (Vermillion Energy, 2015). Figuur 3.8 laat verder zien dat de daling nog tientallen jaren na-ijlt, maar dat de snelheid wel sterk afneemt. Tussen 2017 en 2030 kan bijvoorbeeld nog ongeveer 2 cm bodemdaling verwacht worden.

3.2.6 Vlieland

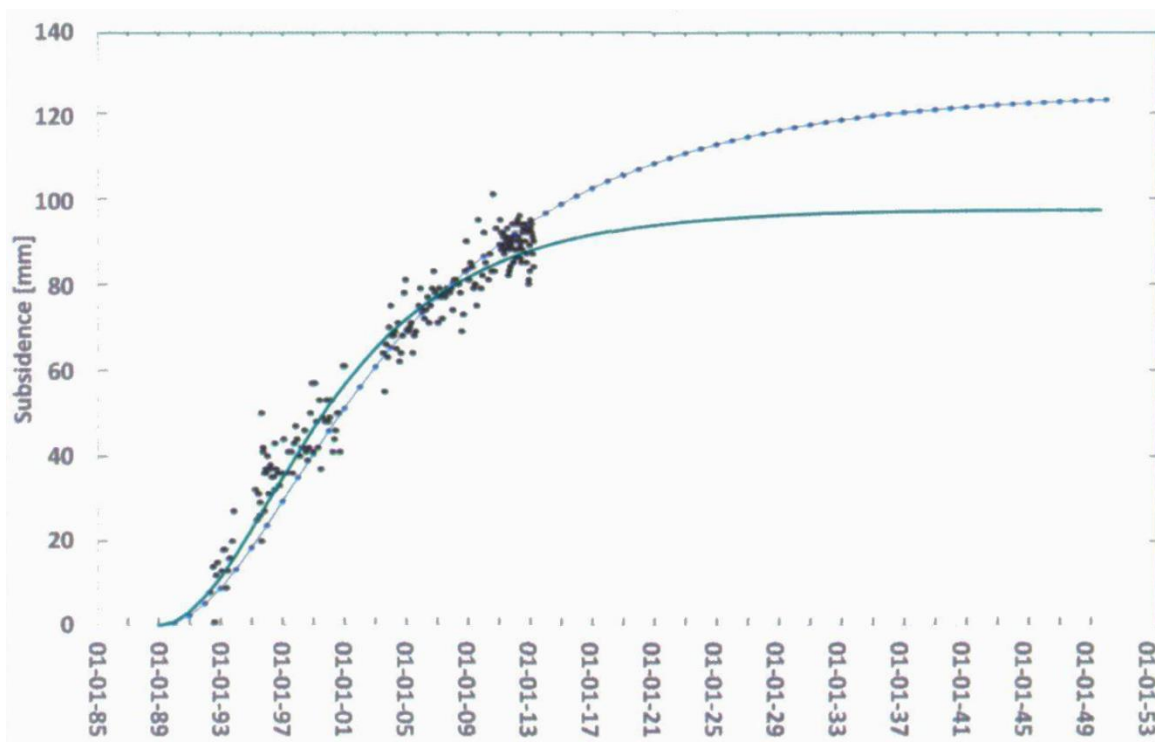
De velden bij Vlieland zijn al meer dan 15 jaar in gebruik, maar er is geen informatie gevonden over gemodelleerde of gemeten bodemdaling. Een beperkt deel van de gasvelden, en dus van de bodemdalingsschotel, overlapt met het kustfundament. Het geschatte bodemdalingsvolume in het kustfundament (Figuur 3.20) is zeer onzeker en gebaseerd op bodemdalingsscijfers van andere gasvelden.

Tabel 3.5 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotels Harlingen, Terschelling (West), Vlieland en Zuidwal

Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
HRL-UC	Gas	1988-2017	Opgeschort	2-16	Gemodelleerd en gemeten
TEN	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
M11-FA	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
M10-FA	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
TEW	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
L15-FA	Gas	1993-2029	Producterend	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
L12-FC	Gas	2001-2029	Producterend	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
ZDW	Gas	1988-2020	Producterend	2-14	Gemodelleerd en gemeten



Figuur 3.7 Overzichtkaart van de gasvelden in de westelijke Waddenzee met de benoemde clusters.



Figuur 3.8 Twee model-scenario's voor de bodemdaling op de platformlocatie vergeleken met de satellietmetingen (zwarte puntenwolk).

3.2.7 Harlingen

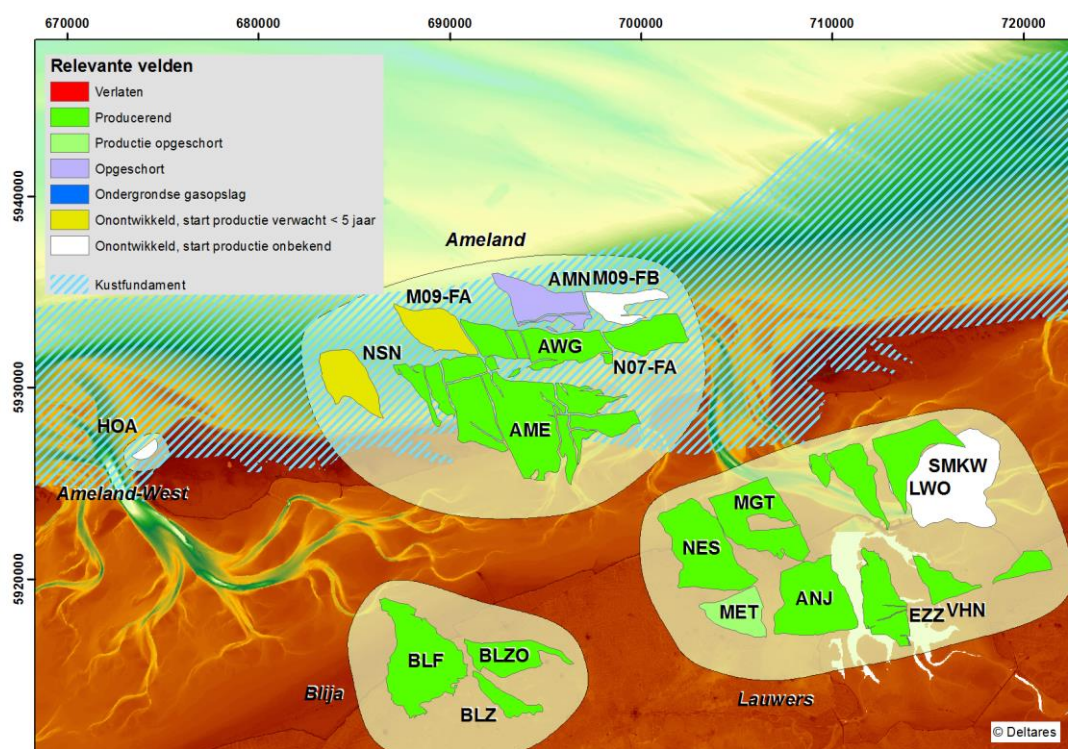
Het veld bij Harlingen is nog wel open, maar de productie is voornamelijk opgeschort. Het winningsplan laat zien dat de verwachte bodemdaling weliswaar fors is, maximaal zo rond 8 cm, maar dat de dalingsschotel zich niet uitstrekt tot in de Waddenzee. De zoutwinning rondom Harlingen speelt in dit gebied een belangrijkere rol, zie ook paragraaf 3.3.

3.2.8 Terschelling

Het veld bij Terschelling-West (Figuur 3.7) is nog onontwikkeld zorgt dus momenteel niet voor bodemdaling. Het is onbekend of en wanneer dit veld actief zal worden. Wel bekend is dat de voorraad minder dan 1 miljard Nm^3 bedraagt en eventuele winning daarom waarschijnlijk tot relatief weinig bodemdaling zal leiden. Ook de drie velden ten noorden van Terschelling zijn nog niet actief, maar verwacht wordt dat deze binnen vijf jaar producerend gaan worden (Tabel 3.5). Op nlog.nl is over deze velden geen informatie beschikbaar, maar voor veld TEN zijn op de website van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (rvo.nl) wel documenten beschikbaar. Deze laten zien dat de verwachte winbare voorraad 2-5 miljard Sm^3 is. Het verschil tussen Sm^3 en Nm^3 is dat het bij Sm^3 een kubieke meter gas bij 20 °C betreft in plaats van 0 °C. Voor alle drie de velden, TEN, M10-FA en M11-FA, zijn voornamelijk geen modelberekeningen bekend van de bodemdaling indien de velden producerend gaan worden. Gezien de ligging van de velden TEN en M11-FA binnen het kustfundament moeten toekomstige activiteiten bij deze velden meegenomen worden binnen het suppletiebeleid. In Figuur 3.21 is ter indicatie een inschatting gemaakt van een te verwachten bodemdalingsvolume.

3.2.9 Ameland

Bodemdaling door gaswinning bij Ameland is veelvuldig onderzocht en in het nieuws geweest. Afgezien van een klein, niet ontwikkeld, veld aan de westkant van Ameland vindt de meeste productie plaats aan de oostkant van Ameland. De gasvelden liggen deels onder de oostpunt van het eiland zelf, deels onder Waddenzee, maar met name aan de noordkant van het eiland (Figuur 3.9). In het grootste deel van de velden wordt al tientallen jaren gas gewonnen, terwijl momenteel twee nieuwe velden, NSN en M09-FA, in gebruik worden genomen (Tabel 3.6). Vrijwel alle velden liggen binnen de grenzen van het kustfundament.



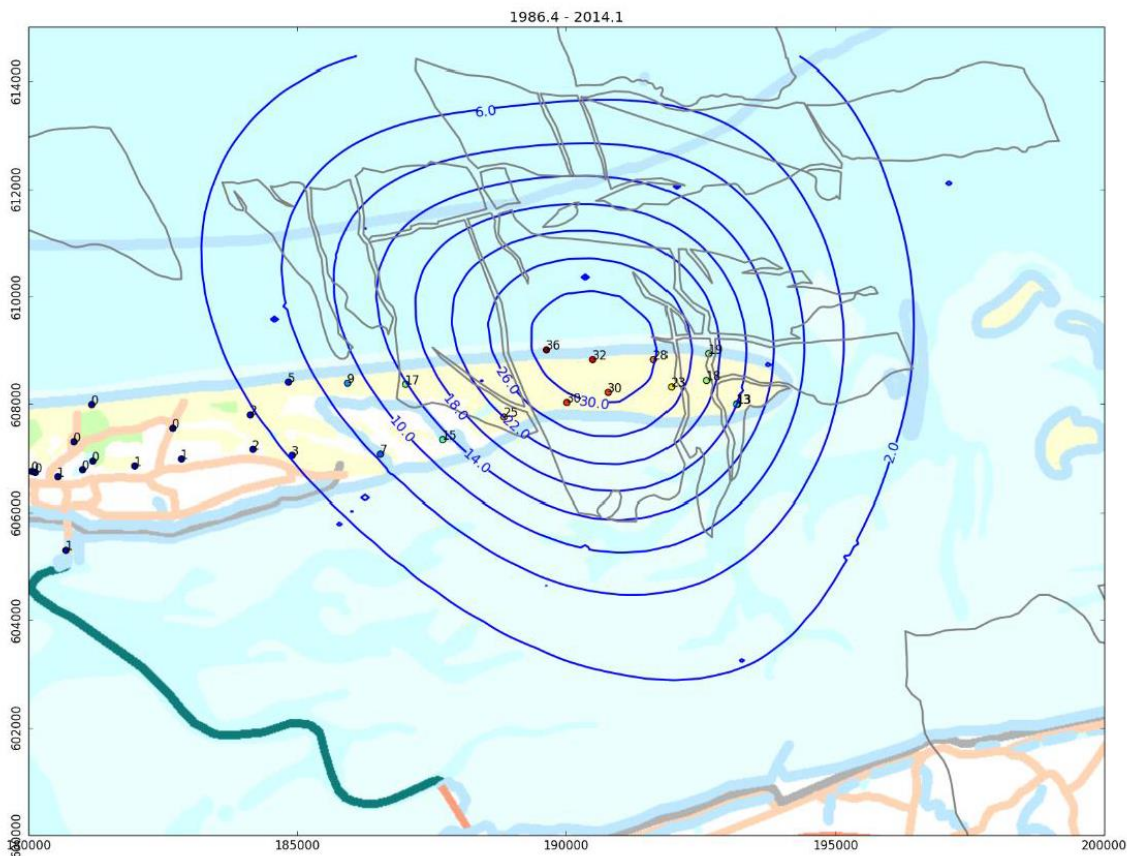
Figuur 3.9 Overzichtskartaal van de gasvelden in de oostelijke Waddenzee met de benoemde clusters.

Tabel 3.6 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotels Ameland en Ameland-West

Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
AME	Gas	1986-2030/5	Producterend	2-56?	Gemodelleerd en gemeten
AWG	Gas	1993-2030/5	Producterend	2-10?	Gemodelleerd en niet gemeten
AMN	Gas	1996 - 2017	Opgeschort	2-35?	Gemodelleerd en gemeten
N07-FA	Gas	2011 - 2035	Producterend	2-10?	Gemodelleerd en niet gemeten
NSN	Gas	2017 - 2035	Onontwikkeld	0-2	Gemodelleerd en niet gemeten
M09-FA	Gas	2017 - 2035	Onontwikkeld	0-2	Gemodelleerd en niet gemeten
M09-FB	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten
HOA	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten

De reeds opgetreden bodemdaling is fors en bedraagt momenteel in het centrum van de winning al bijna 40 cm (NAM, 2017). Opgemerkt wordt dat dit aanzienlijk hoger is dan volgt uit de modelstudie van De Vos (2010), wederom de grote onzekerheid aantonend rondom dergelijke modeluitkomsten. Een recent rapport toont een kaart met de opgetreden bodemdaling tussen 1986 en 2014, waarbij het model geijkt is met peilmerkmetingen (NAM,

2017). Het totale bodemdalingsvolume is hierbij in die tijd opgelopen tot ongeveer 13 miljoen m^3 (zie ook samenvattingen in Schuttenhelm, 2017). De uiteindelijke bodemdaling die zal optreden is niet bekend, dit hangt uiteraard ook af van de toekomstige productie, maar ook van het na-ijleffect en de bijdrage van de nieuw gestarte velden. Deze bijdrage lijkt overigens beperkt: in het winningsplan voor de velden NSN en MO9-FA wordt uitgegaan van hooguit enkele centimeters (NAM, 2015b). In hetzelfde winningsplan wordt een kaart getoond met de totale verwachte bodemdaling in 2050: in het centrum van de schotel wordt een daling van ongeveer 40 cm verwacht. Aangezien momenteel al een bodemdaling van bijna 40 cm is gemeten, lijkt dit een onderschatting. In het rapport van Schuttenhelm (2017) staat dat deskundigen 'off the record' een daling van 56 cm verwachten. Dit zou betekenen dat er nog zo'n 20 cm daling aan zit te komen. Hoewel deze claim dus (nog) niet onderbouwd is, mag wel aangenomen worden dat er nog lang relevante bodemdaling zal optreden rondom de velden van Ameland. Het uiteindelijke totale bodemdalingsvolume zal hierbij zeker meer dan 20 miljoen m^3 bedragen, waarbij naar verwachting ongeveer 3/5 deel in de Noordzee zal liggen, 1/5 deel op Ameland zelf en 1/5 deel in de Waddenzee (Vermaas en Marges, 2015).



Figuur 3.10 Bodemdaling tussen 1986 en 2014 (in cm): gemodelleerd (contouren) en gemeten (punten). Afkomstig uit NAM (2017).

3.2.10 Blija

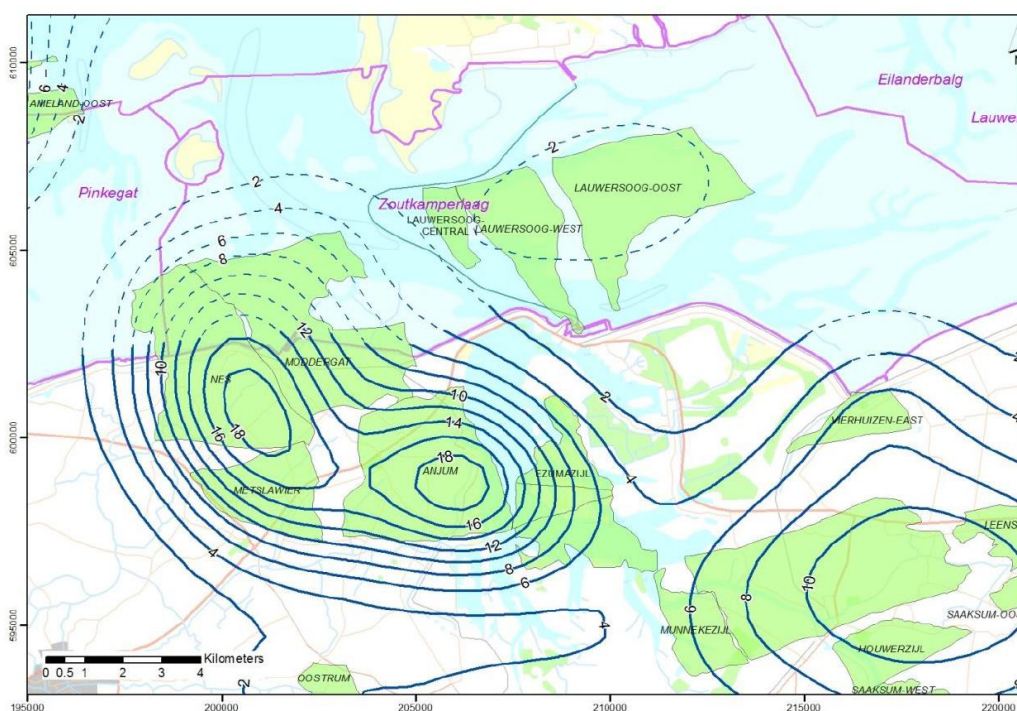
De velden bij Blija zijn momenteel allemaal open (Figuur 3.9) en blijven naar verwachting nog enige tijd gas produceren (Tabel 3.7). In de winningsplannen wordt aangegeven dat de verwachte bodemdaling relatief laag is, grotendeels kleiner dan 2 cm, en vooral op het vaste land plaatsvindt (NAM, 2011a).

3.2.11 Lauwers

In het gebied rondom de Lauwerszee zijn verschillende gasvelden aanwezig en producerend (Figuur 3.9). De eerste velden zijn eind jaren '90 in gebruik genomen en de laatste velden zullen waarschijnlijk in 2035 gesloten worden (Tabel 3.7). Een aanzienlijk deel van de optredende bodemdaling zal daarom nog optreden. Uit metingen en modelberekeningen blijkt dat tussen 1997-2011 de maximale bodemdaling ongeveer 10 cm bedroeg (NAM, 2011b). Het diepste punt van de schotel lag toen rondom het dorp Anjum en de bodemdaling beperkte zich feitelijk tot het vaste land. In de komende 8 jaar zal de maximale daling waarschijnlijk oplopen tot 16 cm en zal ook in de Waddenzee sterke bodemdaling optreden. De bodemdaling concentreert zich hierbij rond de velden Nes en Moddergat. Bij het oostelijke veld LWO treedt waarschijnlijk slechts enkele centimeters bodemdaling op. Deze prognoses komen goed overeen met die in een rapport van TNO (Muntendam-Bos et al., 2012).

Tabel 3.7 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotels Blija en Lauwers

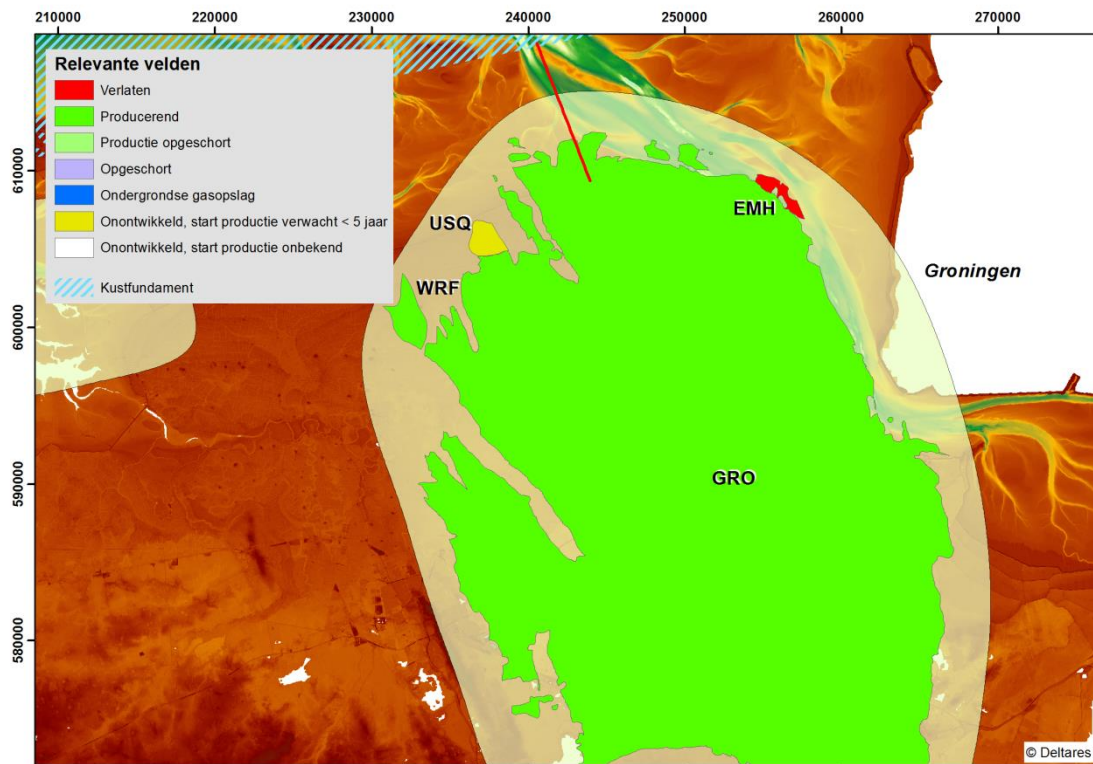
Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
BLF	Gas	1985-2020	Producerend	0-2	Gemodelleerd en gemeten
BLZO	Gas	2001-2020	Producerend	0-2	Gemodelleerd en gemeten
BLZ	Gas	2012-2032	Producerend	0-2	Gemodelleerd en niet gemeten
ANJ	Gas	1997-2030	Producerend	2-9	Gemodelleerd en gemeten
MET	Gas	1997-2016	Opgeschort	2-9	Gemodelleerd en gemeten
EZZ	Gas	1999-2018	Producerend	2-4	Gemodelleerd en gemeten
NES	Gas	2007-2030/5	Producerend	n.n.b.	Gemodelleerd en gemeten
MGT	Gas	2007-2028	Producerend	2-10?	Gemodelleerd en gemeten
VHN	Gas	2008-2018	Producerend	0-2	Gemodelleerd en gemeten
LWO	Gas	2008-2035	Producerend	0-2	Gemodelleerd en gemeten
SMKW	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten



Figuur 3.11 Bodemdalingsprognose voor 2050 van de totale bodemdaling door gaswinning. De contourlijnen geven de bodemdaling in cm aan (NAM, 2011b).

3.2.12 Groningen

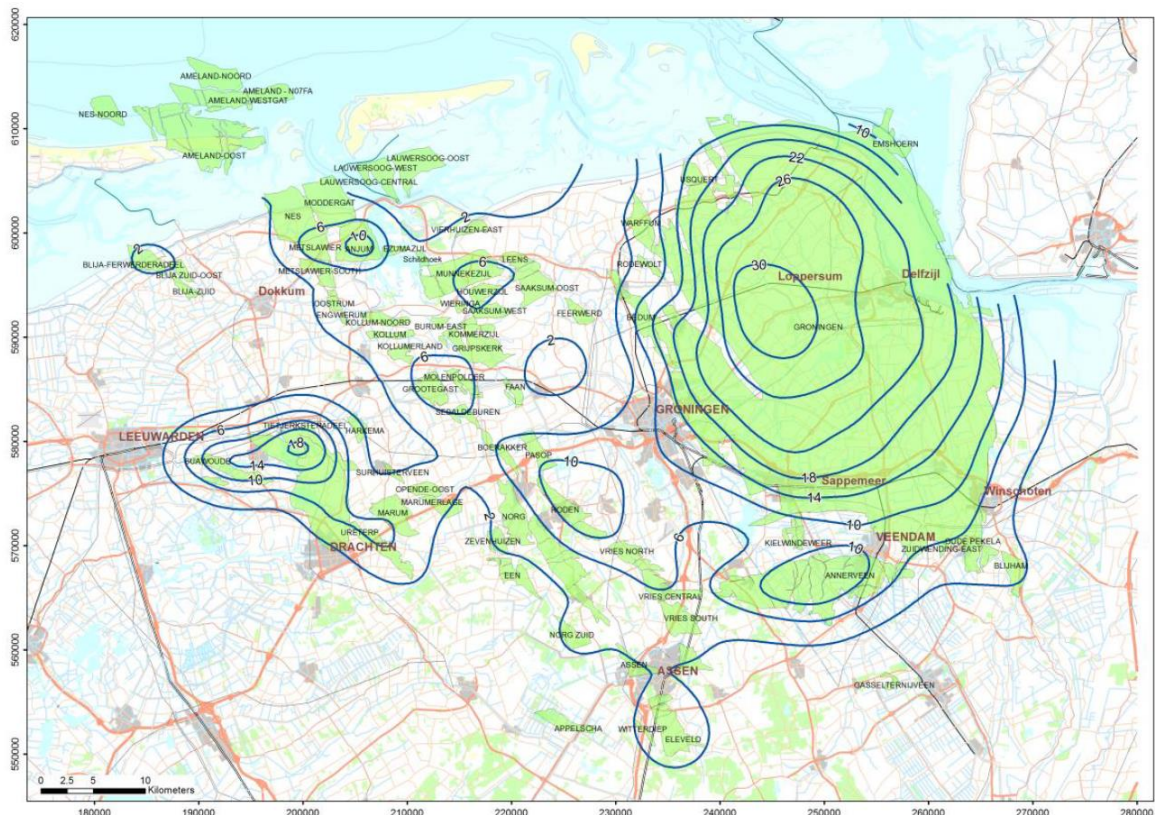
Het Groningergasveld (Figuur 3.12) is veruit het grootste gasveld van Nederland en al sinds de jaren '60 in gebruik (Tabel 3.8). Aan de randen van het hoofdveld liggen nog enkele kleinere velden. Delen van het veld strekken zich uit tot in de Waddenzee en het Eems-estuarium. De optredende bodemdaling is aanzienlijk, met waarden die in het centrum van het veld tot 2013 al opgelopen waren tot meer dan 30 cm (NAM, 2015a). In grote delen van het Eems-estuarium en in de Waddenzee zijn dalingen opgetreden van 10-20 cm en bij het hoofdgetijdenstation Delfzijl meer dan 20 cm.



Figuur 3.12 Overzichtkaart van de gasvelden in Groningen met de benoemde clusters. De rode lijn geeft de ligging van het profiel in Figuur 3.19

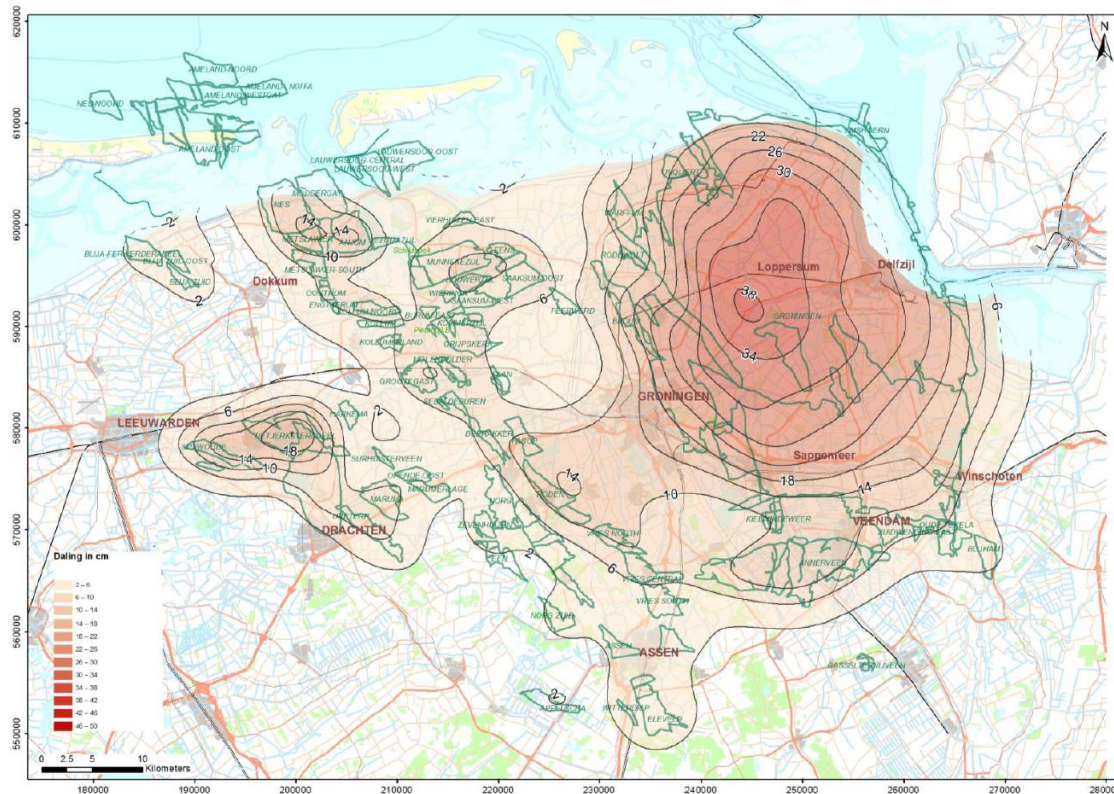
Tabel 3.8 Overzicht van de olie- en gasvelden in de schotel Groningen

Veld	Delfstof	Begin-eind	Status	Bereik totale bodemdaling (cm)	Bodemdaling: gemodelleerd en/of gemeten
GRO	Gas	1963-?	Producerend	2-50?	Gemodelleerd en gemeten
EMH	Gas	1981-?	Verlaten	n.n.b.	Niet gemodelleerd en niet gemeten
WRF	Gas	1986->2023	Producerend	2-6	Gemodelleerd en gemeten
USQ	Gas	n.n.b.	Onontwikkeld	n.n.b.	Modellering onbekend en niet gemeten



Figuur 3.13 Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2013, bepaald met een model dat aan metingen gekalibreerd is (NAM, 2015a).

De verdere bodemdaling in de komende decennia is sterk afhankelijk van de productie in die decennia. In 2015 werd gemodelleerd dat tot 2080 op land nog circa 10-15 cm additionele bodemdaling zou optreden over grote delen van het gasveld (NAM, 2015a). Verwacht mag worden, op basis van de landelijke discussies begin 2018, dat de productie per jaar in de komende decennia lager zal liggen dan aangenomen bij de modellering in 2015. De bodemdalingssnelheid zal dan ook lager liggen, maar als uiteindelijk evenveel gas gewonnen wordt, alleen verspreid over een langere periode, zal de uiteindelijke bodemdaling niet veranderen. Los van onzekerheid over de productie, bestaan er ook veel onzekerheden over de compactie van het gesteente en de grootte van het na-ijl effect. Een vergelijk van Figuur 3.13 met een prognose voor 2025 (Figuur 3.14) laat zien dat de additionele bodemdaling tot die tijd nog zeker 5 cm bedraagt. Gezien de grote onzekerheden rondom de bodemdaling door gaswinning in het Groningergasveld, is het uiteraard noodzakelijk om dit goed te blijven monitoren.

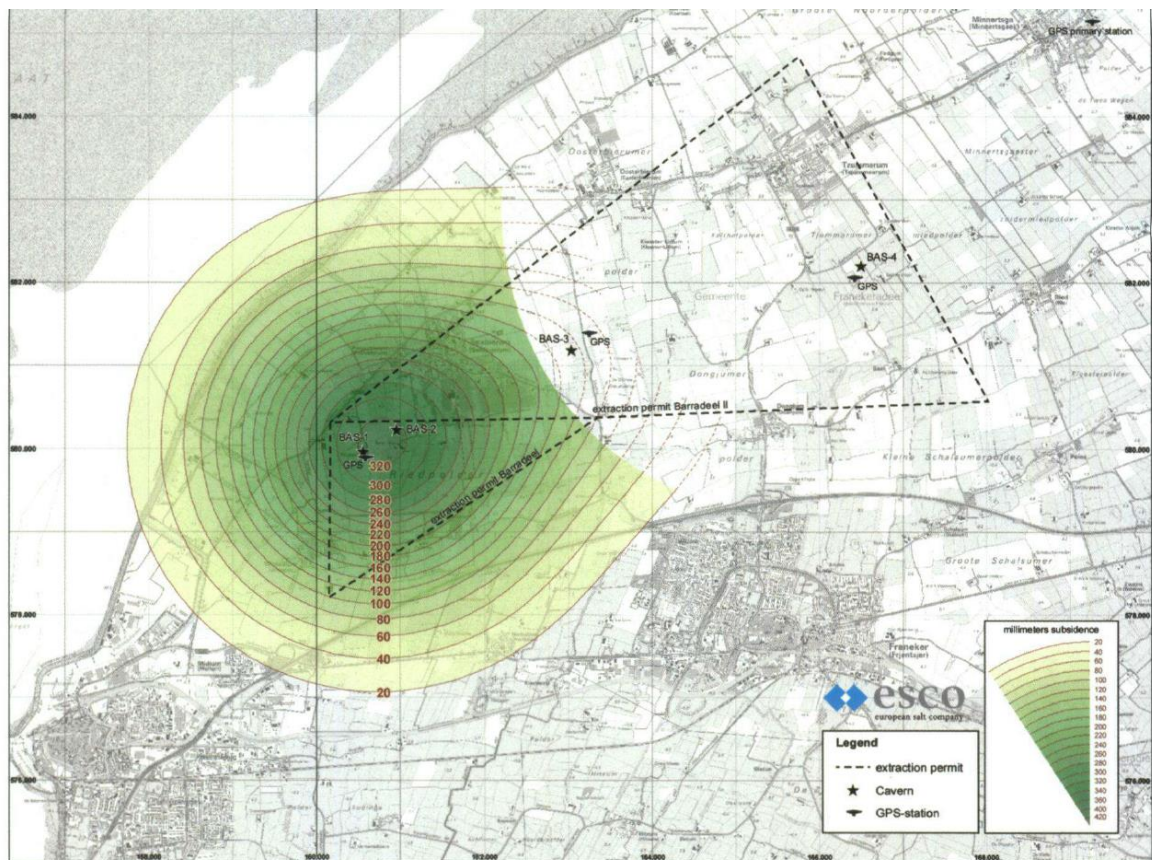


Figuur 3.14 Prognose voor 2025 (NAM, 2015a).

3.3 Zoutwinning

Bij zoutwinning wordt zoetwater in het zoutlagen gepompt, waarna zoutwater (pekel) omhoog gepompt wordt en weer onttrokken wordt aan het water. Het winnen van zout leidt tot bodemdaling aan het oppervlak, waarbij de mate van bodemdaling afhangt van de hoeveelheid gewonnen zout en de eigenschappen van de omliggende lagen. In Nederland wordt op verschillende plekken zout gewonnen, maar alleen de zoutwinning in Friesland, regio Harlingen-Sexbierum, is relevant voor de huidige studie. Het gaat hier zowel om bestaande velden als om plannen om nieuwe velden te exploiteren.

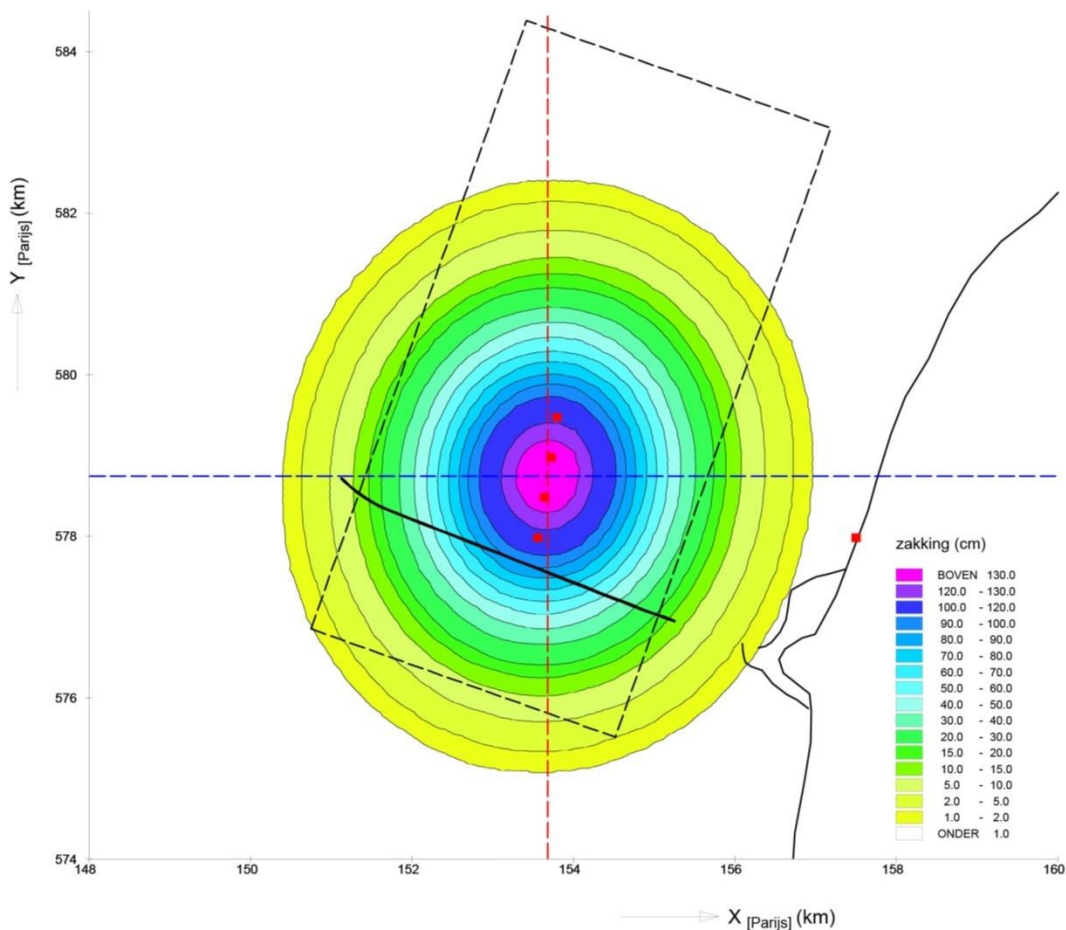
Het wingebied bij Harlingen wordt ook wel aangeduid met Barradeel. Het is sinds 1995 in productie en levert circa 1 Megaton zout per jaar op, wat neerkomt op ongeveer 20% van de nationale productie (Breunese, 2010). Er is aanzienlijke bodemdaling opgetreden, meer dan 30 cm in de eerste 10 jaar, met snelheden hoger dan bij gaswinning en ook meer dan verwacht. Er is daarom toen een limiet vastgesteld van maximaal 35 cm bodemdaling met een continue monitoring door GPS-stations. Na bereiken van deze limiet werd de winlocatie verschoven om de zoutproductie niet te hoeven staken. Een modelberekening, gekalibreerd met GPS-data, laat zien dat de dalingsschotel zicht uitstrekt tot in de Waddenzee waar dalingen van 2-4 cm worden berekend over de periode 1995-2008 (Figuur 3.15).



Figuur 3.15 Contourenkaart van de bodemdaling (in mm) door zoutwinning in wingebed Barradeel (Bakker en Duquesnoy, 2010).

De invloed van de zoutwinning bij Barradeel strekt zich dus uit over een relatief klein gedeelte van de Waddenzee. Er zijn echter ook vergevorderde plannen van Frisia Zout B.V. om onder de Waddenzee zelf zout te gaan winnen, onder de Ballastplaat tussen Harlingen en Terschelling. Een gezamenlijk bezwaar van de Vogelbescherming, de Waddenvereniging en Natuurmonumenten is eind 2016 door de Raad van State afgewezen waardoor groen licht is gegeven voor de zoutwinning. Het bezwaar is vooral gericht tegen de verwachte bodemdaling als gevolg van de winning, maar is afgewezen omdat in de ogen van de Raad van State voldoende is aangetoond dat het meegroeivermogen van de Ballastplaat voldoende is om voor de bodemdaling te compenseren (op basis van Cleveringa en Grasmeijer, 2010).

Figuur 3.16 laat de verwachte bodemdaling bij de Ballastplaat zien. Duidelijk is dat er forse bodemdaling verwacht kan worden, tot meer dan 1.3 m in het centrum van de schotel die een doorsnede heeft van meer dan 5 km. Verwachte dalingsnelheden per jaar zijn 3-5 cm en het totale bodemdalingsvolume zal, indien de plannen ongewijzigd doorgaan, uitkomen op meer dan 10 miljoen m³ (Van Rijn, 2015). Tijdens de winning zal de bodemligging frequent gemonitord worden om vast te stellen of het meegroeivermogen inderdaad voldoende zal zijn om voor de bodemdaling te compenseren.



Figuur 3.16 Contouren bodemdalingsschotel (naar Hartsuiker, 2010)

3.4 Grondwaterwinning

Op veel plaatsen in de wereld is grondwaterwinning veruit de belangrijkste veroorzaker van bodemdaling. Waar olie- en gaswinning plaatsvindt op een diepte van enkele kilometers in relatief vast gesteente, wordt grondwater onttrokken op dieptes tot enkele honderden meters, en vaak in lagen met sedimenten die erg gevoelig zijn voor compactie. Op tientallen plaatsen in de wereld, waaronder in veel wereldsteden, bedraagt de door grondwateronttrekking geïnduceerde daling meer dan een meter en in extreme gevallen als in Mexico City en de Central Valley in Californië zelfs meer dan tien meter (Gambolati en Teatini, 2015). Deze dalingshoeveelheden werden vrijwel altijd ruim binnen één eeuw bereikt. Dalingsnelheden zijn typisch in de orde van een centimeter per jaar, maar bereiken soms tientallen centimeters per jaar (Jakarta, Mexico City). Grondwateronttrekking kan dus lokaal potentieel van grote betekenis zijn voor bodemdaling in het kustfundament in verleden, heden en toekomst. Of dat daadwerkelijk het geval is hangt van heel veel factoren af.

In Nederland is vrijwel geen onderzoek gedaan naar bodemdaling door grondwateronttrekking. Algemene kaarten met prognoses, zoals voor gaswinning, zijn niet beschikbaar en uitspraken over bodemdaling door grondwateronttrekking in Nederland berusten daarmee vrijwel geheel op modellen, ervaring in andere landen, en algemene systeemkennis.

De voormalige Heidemij, nu Arcadis, heeft in opdracht van het voormalige Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening voorspellend grondmechanisch modelonderzoek uitgevoerd naar de

invloed van grondwaterwinning in het westelijk deel van de provincie Utrecht. Hierbij werd de bijdrage van diepere lagen niet in beschouwing genomen, maar werd alleen de bodemdaling door compactie van de Holocene deklaag gemodelleerd (RID, 1981). Getabelleerde resultaten tonen een maximale zetting (na volledige consolidatie) van ca. 6-10 cm in compactiegevoelige gebieden bij een stijghoogteverlaging van 0.5 m in het eerste watervoerende pakket.

Belangrijke elementen bij bodemdaling door grondwateronttrekking zijn:

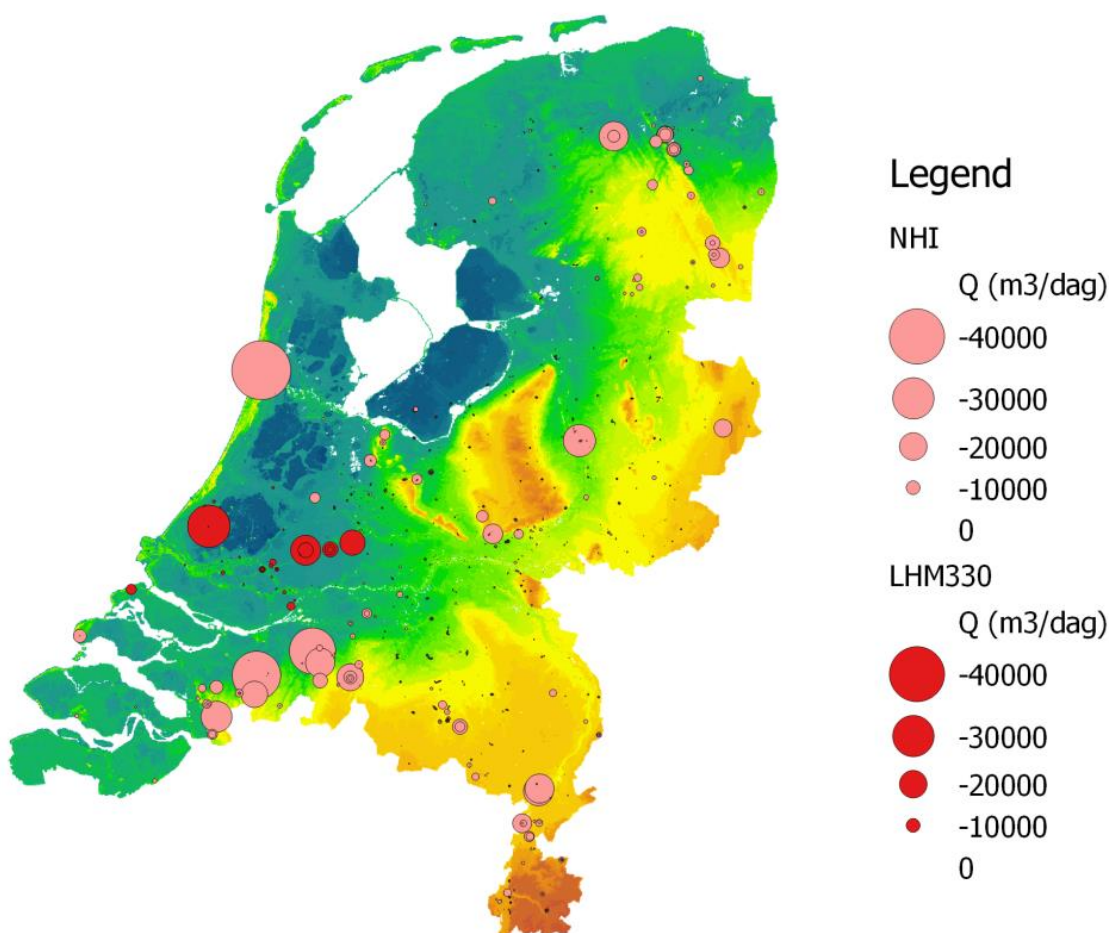
- De hoeveelheid bodemdaling die kan optreden door grondwateronttrekking hangt vooral af van de stijghoogteverlagingen (maat voor de drukverlaging) die worden bereikt, de duur ervan, en van de eigenschappen van de ondergrond (dikte van klei- en leemlagen en de natuurlijke of antropogene 'voorbelaasting' waaraan die lagen blootgesteld zijn geweest).
- Over het algemeen zal de bodemdaling het grootst zijn nabij de putten waar onttrokken wordt. Daling is min of meer conus-vormig met de onttrekking in de apex. Hoe ver het invloedsgebied van een put of een puttenveld reikt (uitgedrukt in termen van spreidingslengte) hangt sterk af van de ondergrond rond het dieptebereik waarin onttrokken wordt. Voor onttrekking uit een goed afgesloten pakket kan de spreidingslengte in principe vele kilometers zijn.
- De totale daling die een langdurige grondwateronttrekking veroorzaakt vindt niet meteen plaats, maar wordt uitgesmeerd over een lange periode. Dat komt door de vertraagde ontwatering van slechtdoorlatende lagen die het grootste deel van de daling voor hun rekening nemen (dat proces heet consolidatie) en door kruip. De duur van die periode kan minder dan een jaar zijn, maar ook tientallen jaren. Het is niet uitgesloten dat dalingssnelheden van 1 cm/eeuw zich tot meer dan een eeuw na de start van een winning voordoen.
- Wanneer een onttrekking wordt gestopt veert de bodem deels terug. Bij geringe voorafgaande bodemdaling kan dat een groot deel van de daling zijn. Bij grote voorafgaande daling betreft het slechts een klein deel (nominaal ca. 10%). De opheffing kan ook lang duren, maar is over het algemeen korter dan de duur van daling.

Bovenstaande algemene elementen van systeemgedrag impliceren dat:

- Onttrekkingen tot ca. 5 kilometer buiten het kustfundament relevant kunnen zijn.
- De bodemdaling niet altijd een permanent, maar soms wel een vrij langdurig en mogelijk onregelmatig karakter heeft.
- Vooral jonge en nieuwe winningen relevant zijn voor prognose van toekomstige daling.
- Historische winningen vooral relevant zijn voor de historische relatieve zeespiegelstijging, tenzij het debiet recent sterk is veranderd of dat er plannen zijn voor zulke veranderingen. Beëindiging is er een extreem geval hiervan.
- Ondanks het vrij lokale karakter van daling, in korte tijd een vrij groot volume aan daling kan ontstaan. Deze volumes kunnen berekend worden.
- Bodemdalingsmonitoring en/of zeer uitgebreide geotechnische data nodig zijn om daadwerkelijke bodemdaling door grondwaterwinning met redelijke nauwkeurigheid te kunnen kwantificeren.

3.4.1 Grondwateronttrekking in of nabij het kustfundament

De grondwaterpompstations voor de drinkwatervoorziening (en huishoudwater) in Nederland bevinden zich hoofdzakelijk in de wat hogere delen van ons land en zijn zeer beperkt aanwezig in en nabij het kustfundament. In verschillende delen van het duingebied in Noord-Holland, Zuid-Holland en Zeeland wordt wel grondwater gewonnen, maar dat gebeurt alleen in combinatie met infiltratie van oppervlaktewater. Netto is er in principe geen onttrekking. In en rond het kustfundament wordt voornamelijk grondwater gewonnen of gepompt voor industriële processen (frisdrank, bier, koeling), voor verwarming en koeling van kantoren en woningen (warmte-koude opslag), voor gietwater in kassen, en bij bemalingen voor bouwprojecten.

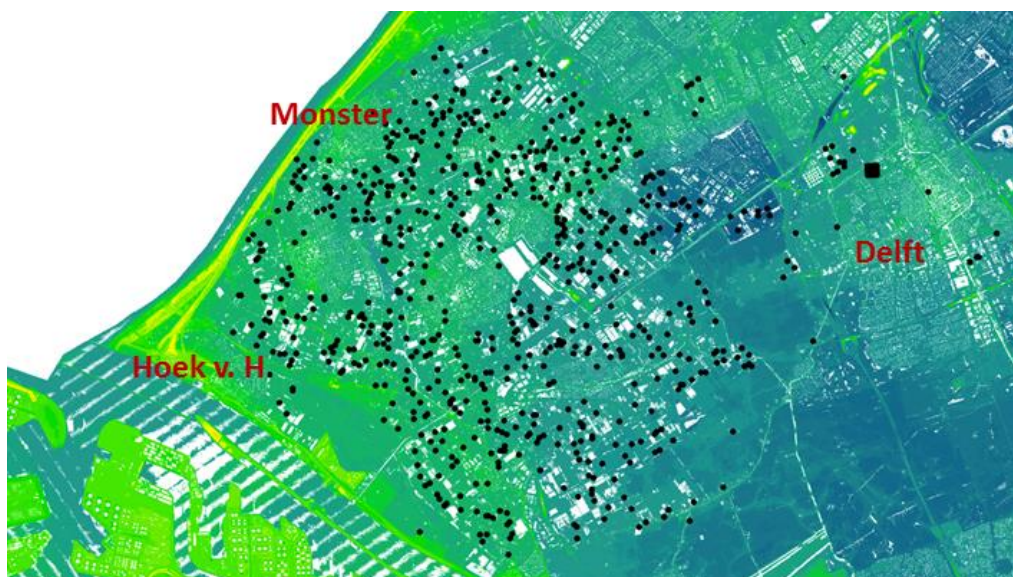


Figuur 3.17 Grondwaterwinningen in Nederland die zijn opgenomen in het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium met aanvullingen (2017 update) uit het LHM330 van de provincie Zuid Holland.

Figuur 3.17 toont de locaties van onttrekkingen die zijn opgenomen in het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) voor de provincie Zuid-Holland. De grote en oude onttrekking van DSM bij Delft (sinds 1916) en van Tata Steel in Velzen-Noord springen het meest in het oog als het gaat om het kustfundament. Stijghoogte verlagingen bij de DSM-locatie bedragen meer dan 10 meter in het eerste watervoerende pakket. De afstand tot het kustfundament bedraagt echter een kleine tien kilometer. De invloed op het kustfundament is daardoor naar verwachting gering, maar de vraag of de invloed verwaarloosbaar is kan niet beantwoord worden zonder verdere analyse. Ten noorden van de zeesluizen bij IJmuiden

wordt vrij diep water onttrokken. De lozing van het water direct ten westen van de sluizen is zichtbaar op Google Maps. Waarnemingsgegevens in Dinoloket laten zien dat de stijghoogteverlaging toeneemt tussen het maaiveld en de diepste waarnemingspunten op ca. 145 m diepte (Formatie van Peize-Waalre). In de jaren '80 was de verlaging in het betreffende pakket op verschillende waarnemingslocaties op en rond het hoogovensterrein (1.5 tot meer dan 2 km van de onttrekking), ook direct naast de duinen, 3 à 4 m. Vanaf het begin van de jaren '90 is een langzame afname van de verlaging te zien. De afstand van de onttrekking tot het hoofdgetijdenstation IJmuiden bedraagt ca. 4.7 km. Het dieptebereik boven het pakket van de Formatie van Peize-Waalre waar, zeer waarschijnlijk, uit onttrokken wordt bevat vrij dikke kleirijke eenheden (Formatie van Drente, Eem Formatie). Maar ook onder het onttrekkingspakket bevinden zich potentieel compactiegevoelige kleirijke lagen. Het is dus aannemelijk dat de onttrekking op het hoogovensterrein in ieder geval in het verleden bodemdaling heeft veroorzaakt die mogelijk tot in het kustfundament reikt. Voor zover bekend hebben energiecentrales geen grote grondwaterwinningen. Ze gebruiken vooral oppervlaktewater als bron voor koelwater. Kerncentrale Borssele heeft een noodvoorziening in de vorm van 8 grondwaterbronnen voor het (onwaarschijnlijke) geval dat Westerscheldewater niet beschikbaar is als bron van koelwater.

Tijdelijke bemalingen bij grote infrastructurele werkzaamheden, zoals de vergroting van de zeesluizen bij IJmuiden, zijn niet opgenomen in Figuur 3.17. Deze onttrekkingen kunnen vanzelfsprekend wel relevant zijn in relatie tot bodemdaling in de omgeving. Figuur 3.18 toont locaties van onttrekkingen voor gietwater in het kassengebied van het Westland ten zuiden van Den Haag (debieten tot enkele duizenden m³/maand). Stijghoogtegegevens bevatten aanwijzingen dat deze onttrekkingen tijdelijke verlagingen kunnen genereren van minimaal twee meter in het eerste watervoerende pakket. Bodembeweging is naar verwachting gecompliceerd, omdat er na zuivering brakwater wordt geïnjecteerd in het tweede watervoerende pakket, waar juist stijghoogteverhogingen kunnen optreden. In de omgeving van Monster bevinden zich systemen heel dicht bij het kustfundament.

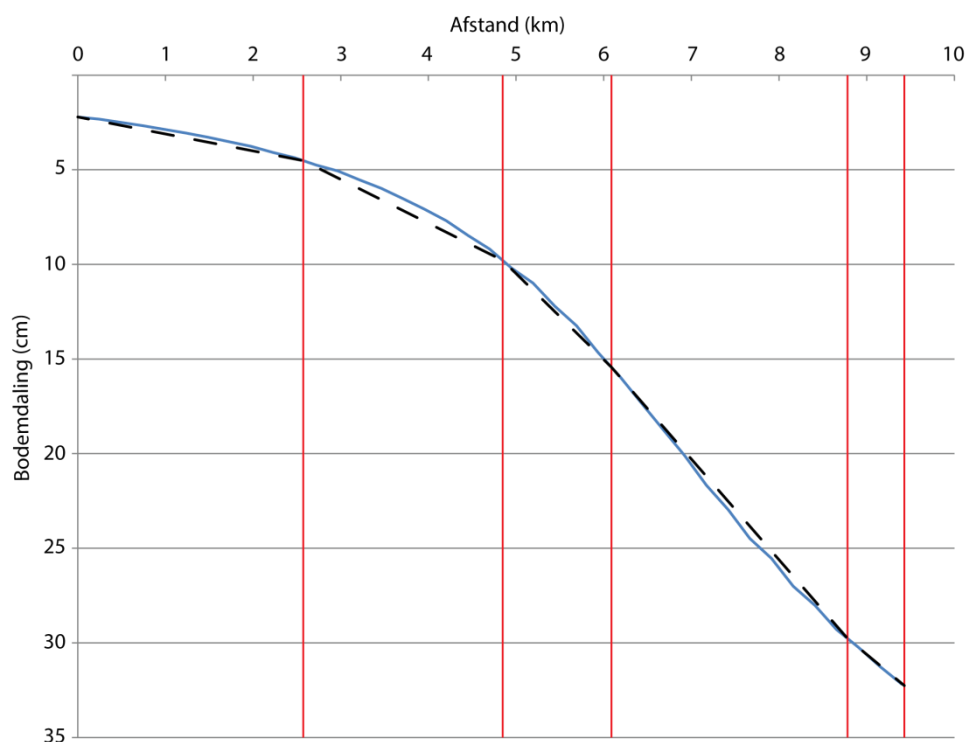


Figuur 3.18 Locaties van bedrijven met een vergunning voor een brijnsysteem voor de watervoorziening van de glastuinbouw (cirkelvormige symbolen). Bron: Faneca Sanchez et al. (2012).

3.5 Bodemdalingsvolume door olie-, gas- en zoutwinning

Bovenstaande gegevens over de bodemdaling door winning van olie, gas, zout en water laten zien dat de mate van bodemdaling, en dus van het bodemdalingsvolume, sterk verschilt tussen gebieden. In de oostelijke Waddenzee en in het Eems-Dollardgebied is de bodem over grote gebieden meer dan 10 cm gedaald, lokaal zelfs al meer dan 30 cm. In aanzienlijke delen van het kustfundament en de getijdenbekkens beperkt de bodemdaling door delfstofwinning zich echter tot centimeters. De bodemdalingsschotels zijn in veel gevallen wel uitgestrekt en dit betekent dat bodemdaling van enkele centimeters vertaald kan worden naar aanzienlijke bodemdalingsvolumes. De onderstaande figuren geven een schatting van de bodemdalingsvolumes in het kustfundament en de getijdenbekkens, waarbij onderscheid gemaakt is in de periode voor 2017 en de periode na 2017. De invloed van grondwaterwinning is hierbij vooralsnog niet meegenomen, omdat hier geen cijfers over bekend waren. De volumes zijn berekend door in een gis-omgeving bodemdalingscontouren te plotten, die gebaseerd zijn op de beschikbare data uit winningsplannen en op de modellering van De Vos (2010).

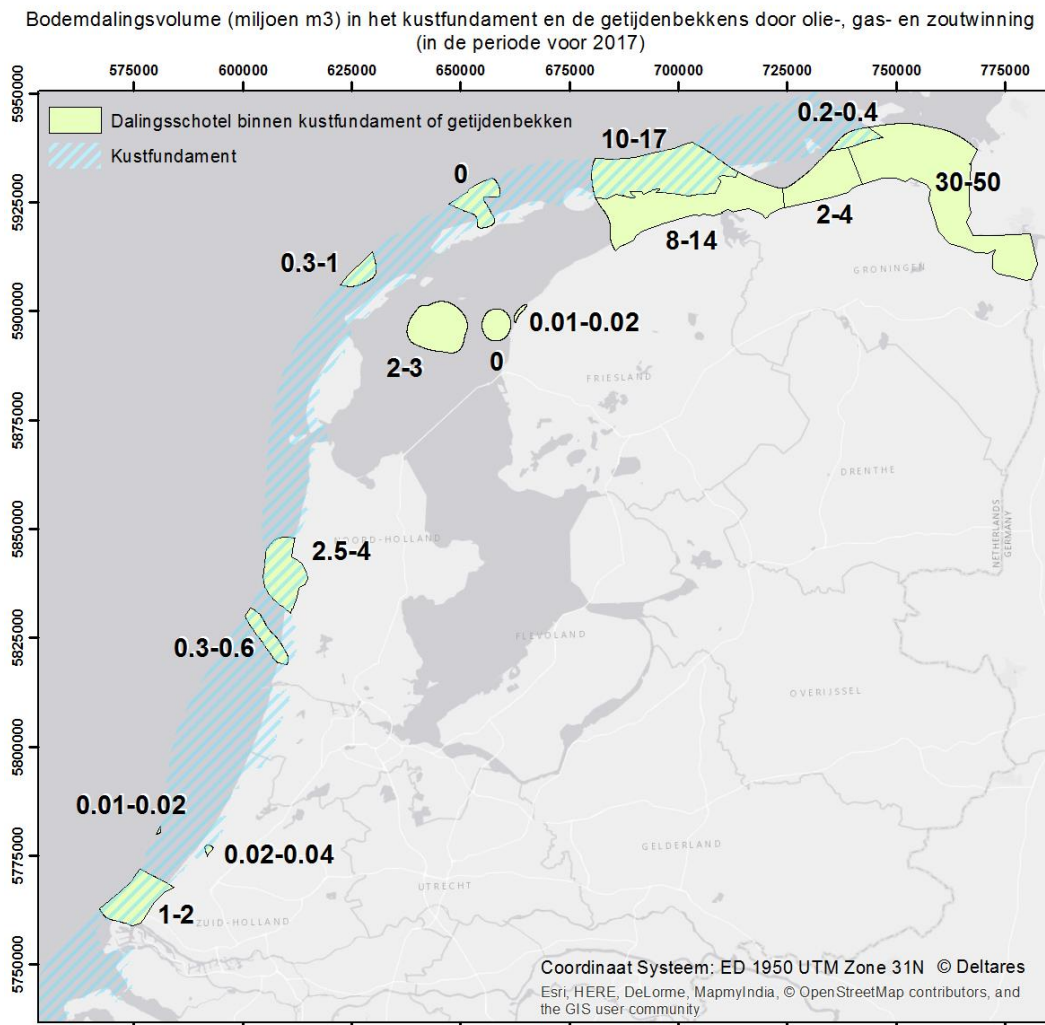
Voor de periode voor 2017 is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van kaarten met bodemdalingscontourlijnen die gebaseerd zijn op een combinatie van daadwerkelijk gemeten bodemdaling en modelstudies. Door de gemiddelde bodemdaling in de gebieden tussen contourlijnen te vermenigvuldigen met het bijbehorende oppervlak kan het bodemdalingsvolume berekend worden. Hierbij wordt aangenomen dat tussen contourlijnen de bodemdaling een lineair verloop heeft. Dit heeft praktische voordelen, omdat zo het totale bodemdalingsvolume eenvoudig berekend kan worden. In werkelijk heeft de bodemdaling vanaf de rand van een schotel richting het centrum echter niet een lineair, maar een sigmoïdaal verloop. Hierbij neemt de bodemdaling vanaf de buitenrand richting het centrum eerst geleidelijk, dan snel en vlak bij het centrum weer langzamer toe. De gebruikte contourlijnen zijn echter relatief smal en binnen een contourlijn leidt het gebruik van een lineair verloop niet tot grote onder- of overschattingen van het bodemdalingsvolume. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 3.19 dat een profiel toont van het bodemdalingsverloop aan de noordrand van de bodemdalingsschotel van Groningen (zie Figuur 3.12 voor de ligging van het profiel). De blauwe lijn is het verloop volgens De Vos (2010) en het s-vormige, sigmoïdale verloop is duidelijk zichtbaar. De rode lijnen geven de grenzen aan van de gebruikte contourlijnen en de blauw gestreepte lijn het gebruikte lineaire verloop van bodemdaling binnen twee contourlijnen. Aan de buitenrand van de schotel leidt dit tot enige overschatting van het bodemdalingsvolume en richting het centrum juist tot enige onderschatting van het bodemdalingsvolume. De verschillen zijn echter klein en de onder- en overschatting is niet relevant in vergelijking met de grote onzekerheden die bestaan over de hoeveelheid bodemdaling en de ligging van de contourlijnen. Gezien deze onzekerheden is er voor gekozen om de bodemdalingsvolumes uit te drukken in een bereik. Voor de periode voor 2017 is dit bereik berekend door rondom het gemiddelde bodemdalingsvolume een onzekerheid van 25% aan te houden. Voor de periode 2017-2050 is een onzekerheid van 50% aangehouden, omdat er veel onzekerheden bestaan over de toekomstige productie en het na-ijleffect. De fout die ontstaat door het gebruik van een lineair verloop valt ruim binnen deze marges.



Figuur 3.19 Bodemdalingsverloop aan de noordrand van het gasveld van Groningen (zie Figuur 3.12 voor de ligging van het profiel). De blauwe lijn is het gemodelleerde verloop volgens De Vos (2010), de rode lijnen zijn de grenzen van de gebruikte contourlijnen langs dit profiel en de zwart gestreepte lijn is het gebruikte lineaire bodemdalingsverloop.

Figuur 3.20 laat zien dat de grootste bodemdalingsvolumes opgetreden zijn in de oostelijke Waddenzee. Langs de Hollandse Kust zijn de maximale volumes ongeveer 1-4 miljoen m^3 , terwijl in de westelijke Waddenzee de grootste bodemdalingsvolumes zich voorgedaan hebben rondom het veld Zuidwal (2-3 miljoen m^3). Rondom Ameland, en met name in het Eems-Dollardgebied, lopen de volumes echter op tot boven de 10 miljoen m^3 . In een rapport uit 2008 (Cleveringa) wordt voor het Eems-Dollardgebied een gemiddeld bodemdalingsvolume van 0.43 miljoen m^3 /jaar vermeld, maar het is op dit moment niet duidelijk hoe en over welke periode dit gemiddelde is uitgerekend.

In de meeste winningsplannen worden hooguit contourlijnen geplot en geen volumes vermeld, dus een direct vergelijk van hier berekende volumes met volumes uit de winningsplannen is niet mogelijk. Voor het gasveld Zuidwal wordt wel een volume genoemd, namelijk een totaalvolume van 2.5-5 miljoen m^3 (Vermillion Energy, 2015). Dit komt goed overeen met de hier berekende volumes voor Zuidwal (optelsom van Figuren 3.20 en 3.21). De verwachte bodemdalingsvolumes voor ruwweg de periode 2000-2050 die in Hoeksema et al. (2004) vermeld worden hebben dezelfde ordegrrootte als de hier berekende volumes. Omdat er sindsdien veel nieuwe metingen en modelberekeningen beschikbaar zijn gekomen heeft het weinig zin om de berekende volumes uit 2004 met de voor het huidige rapport berekende volumes te vergelijken. In opdracht van de Waddenacademie is verder het afgelopen jaar door verschillende instituten gewerkt aan een rapport over bodemdaling, zeespiegelstijging en morfodynamiek in de Waddenzee. Dit rapport verschijnt naar verwachting in juni 2018. De delen over bodemdaling zouden vergeleken moeten worden met de resultaten uit dit rapport.

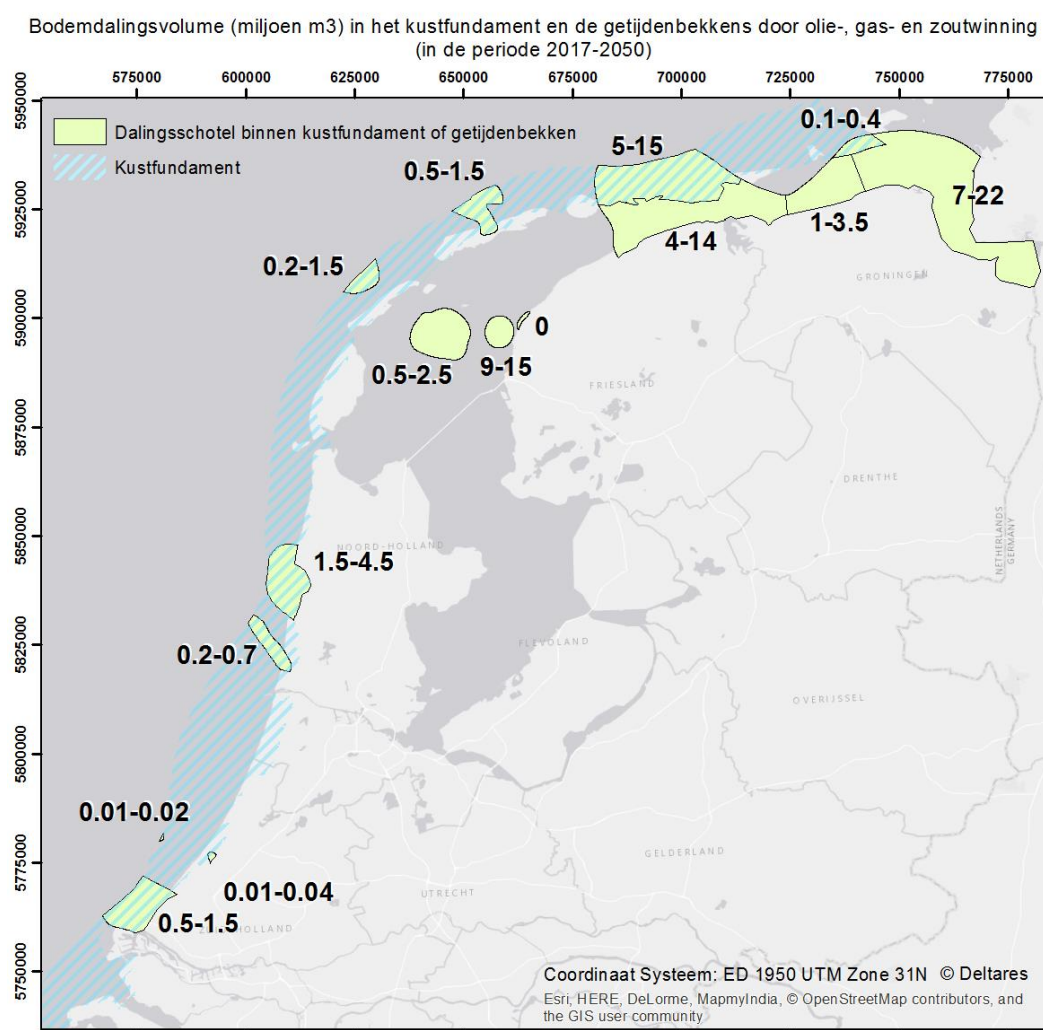


Figuur 3.20 Geschat bodemdalingsvolume door olie-, gas- en zoutwinning in de periode voor 2017. De volumes zijn geschat op basis van data uit rapporten van de winbedrijven en De Vos (2010). De range in volume is ontstaan door rondom het berekende volume een onzekerheidsmarge van 25% aan te houden.

Figuur 3.21 laat de verwachte bodemdalingsvolumes zien tussen 2017 en 2050. Bij de meeste gasvelden heeft de grootste bodemdaling al plaatsgevonden en daarom zijn de verwachte volumes een stuk lager dan de opgetreden bodemdalingsvolumes. Een uitzondering hierop vormt het zoutwinningsveld bij de Ballastplaat, waar naar verwachting het bodemdalingsvolume 10-14 miljoen m³ zal bedragen. Rondom Ameland en in de Eems-Dollard worden nog wel aanzienlijke bodemdalingsvolumes verwacht. In Tabel 3.9 zijn de bodemdalingsvolumes gesommeerd voor het kustfundament en de getijdenbekkens.

Tabel 3.9 Opgetreden en verwachte bodemdaling in het kustfundament en getijdenbekkens

Gebied	Bodemdalingsvolume door olie-, gas- en zoutwinning (miljoen m ³)	
	Voor 2017	2017-2050
Kustfundament	15-25	8-25
Getijdenbekkens	40-70	20-60



Figuur 3.21 Geschat bodemdalingsvolume door olie-, gas- en zoutwinning in de periode 2017-2050. De volumes zijn geschat op basis van data uit rapporten van de winbedrijven en De Vos (2010). De range in volume is ontstaan door rondom het berekende volume een onzekerheidsmarge van 50% aan te houden.

3.6 Discussie en conclusie

Op basis van dit hoofdstuk kan worden geconcludeerd dat:

- Gaswinning en zoutwinning lokaal aantoonbaar een significante bijdrage (cm-dm) hebben geleverd en/of nog gaan leveren aan bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. De bijbehorende bodemdalingsvolumes zijn aanzienlijk: langs de Hollandse Kust enkele miljoenen m³, maar in de oostelijke Waddenzee tot enkele tientallen miljoenen m³ over de laatste decades.
- Daling door gas- en zoutwinning over het algemeen redelijk goed bekend is door een combinatie van modelberekeningen en metingen. Voor enkele offshore velden zijn geen modelstudies bekend. Bodemdaling wordt op veel plaatsen, met name op het vaste land, actief gemonitord.
- Het getijdenstation Delfzijl zeker is beïnvloed door gaswinning: het pleistocene oppervlak is de laatste decennia meer dan 20 cm gedaald en naar verwachting zal dit in de komende decennia nog zeker 10 cm verder dalen. Bij Hoek van Holland bedraagt de

bodemdaling door gaswinning waarschijnlijk enkele centimeters. Getijdenstation Harlingen lijkt buiten de invloedssfeer van de gas- en zoutwinning te liggen.

- Voor een bijdrage door grondwateronttrekking evidentie ontbreekt, maar dat het aannemelijk is dat er op beperkte schaal bijdragen aan bodemdaling zijn geweest en nog kunnen ontstaan.

De volgende activiteiten zouden moeten worden overwogen om meer duidelijkheid te verkrijgen over de invloed het winnen van olie, gas, zout en water:

1 Meer gebruik van inSAR data bij het vaststellen van de bodemdaling in de dalingsschotels

In de meeste gevallen wordt de opgetreden bodemdaling door delfstofwinning in elk nieuw winningsplan bepaald aan de hand van gedaalde peilmerken. In veel gevallen zitten er aanzienlijke periodes tussen deze winningsplannen en na beëindiging van de producties wordt de verdergaande bodemdaling niet meer geanalyseerd. Het gericht gebruik van inSAR data om de bodemdaling bij dalingsschotels vast stellen is zeer waardevol, ook omdat er soms aanzienlijke verschillen optreden tussen verwachte bodemdaling op basis van de modellen en de daadwerkelijk optredende bodemdaling. Offshore bieden alleen winplatforms een vast punt voor het gebruik van inSAR. Verder zou om de zoveel tijd een nieuwe analyse uitgevoerd moeten worden naar bodemdaling door delfstofwinning in verband met het in productie komen van nieuwe velden of aanzienlijke veranderingen van de lopende productie. Mocht dit nog niet zo zijn, dan zou in ieder geval elk winplatform uitgerust moeten worden met een meetopstelling voor bodemdaling.

2 Studie van grondwateronttrekkingen en stijghoogteverlagingen

Zijn er relevante historische grondwateronttrekkingen en wat zijn de mogelijke verlagingen die door de winningen zijn gecreëerd? Speciale aandacht moet geschonken worden aan de omgeving van de getijdenstations. Indien er aanwijzingen zijn voor mogelijke beïnvloeding zou mogelijke signalen daarvan in de getijdenstation meetreeksen onderzocht moeten worden. Verder zou ook gekeken moeten worden naar winningen in het noorden van Vlaanderen (België) waarvan de invloed zich kan uitstrekken onder Zeeuws-Vlaanderen.

3 Studie van de compactiegevoeligheid van afzettingen in de ondergrond van het kustfundament en bij getijdenstations.

Geotechnische compressie-eigenschappen en de huidige compactiegraad van potentieel gevoelige afzettingen in de ondergrond van het kustfundament bieden waardevolle informatie om de onzekerheid over mogelijke bijdragen door grondwaterwinning in het verleden of nieuwe winningen te verkleinen. Geotechnische parameter-waarden zijn essentieel in procesmodellen (bv. binnen het programma iMOD-SUB-CR).

4 Studie van historische bodemdaling rond grote grondwaterwinningen in West-Nederland.

Vergelijkende studie van de compactiegraad van vergelijkbare afzettingen nabij en op afstand van de betreffende winning (DSM e/of Hoogovens) op basis van nieuwe boringen en archief- en booronderzoek van ophogingen rond de winning. Dit levert kwantitatieve informatie over de minimale bodemdaling.

5 Studie van bodemdaling bij nieuwe grondwaterwinningen en bemalingen in of nabij het kustfundament.

Bodemdalingsmonitoring door (InSAR), monitoring van peilverlagingen en modellering (iMOD-SUB-CR). Dit levert kennis die nu vrijwel volledig ontbreekt. Gestart kan worden met InSAR studie in verband met de verbreding van de zeesluis bij IJmuiden.

4 Zetting van het kustfundament

4.1 Algemeen

Zetting is het proces waarin de bodem onder invloed van een belasting wordt samengeperst (gecompacteerd). In dit rapport wordt 'belasting' in enge zin geïnterpreteerd, beperkt tot door de mens aangebracht extra gewicht op de oorspronkelijke bodem. Zetting of compactie door natuurlijke sedimentatie wordt in §2.2 besproken onder de aanduiding 'autocompactie', en zetting of compactie door grondwateronttrekking in §3.4. De meest relevante door de mens aan het oppervlak aangebrachte belastingen in het kustfundament zijn suppleties en ophogingen in verband met het onderhoud en de verdediging van de kust.

Hoewel zetting die plaatsvindt nadat de suppletie of ophoging is afgerond een vorm van bodemdaling/maaivelddaling is, is de zetting zeer zelden of nooit groter dan de aangebrachte ophoging. Het doel van dit soort ingrepen is ook om een netto ophoging te bewerkstelligen. Voor geplande ophogingen of constructies wordt zelfs al met de zetting rekening gehouden om de gewenste hoogte op termijn te bereiken. Daarmee is de zetting geen belangrijke factor waarmee in het kader van de suppletiebehoefte in relatie tot de relatieve zeespiegelstijging rekening moet worden gehouden. Alleen wanneer zetting zich uitstrekt tot gebieden buiten de zone waarin is opgehoogd of gesuppleerd, zou dit kunnen zorgen voor een extra suppletievraag in het kustfundament. In dit hoofdstuk wordt daarom eerst beknopt informatie gegeven over wat er bekend is over zetting bij een drietal grote ingrepen. Vervolgens wordt kort ingegaan op de vraag over zetting in de ruimere omgeving.

4.2 Zetting onder invloed van suppleties en ophogingen

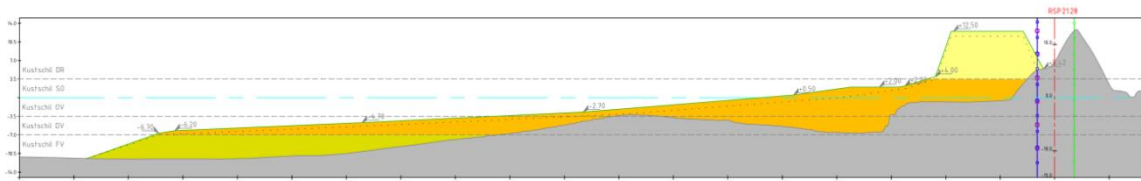
4.2.1 Zandmotor

Zetting in verband met de opspuiting van de Zandmotor tussen Kijkduin en Monster is bestudeerd in een Bachelor afstudeerproject Civiele Techniek aan de TUDelft (Mossinkhof, 2016). De onderzoeksvraag was of het volumeverlies van de zandmotor door zetting na aanleg significant is/was in vergelijking met het totale volumeverlies waarin erosie en transport naar de nabijgelegen stranden de hoofdfactor is. Door afwezigheid van specifieke zettingsdata is het onderzoek gebaseerd op berekeningen. Daarvoor is de bijdrage bepaald/geschat voor de ondergrond tot ca. 20 m diep. Boringen en sonderingen laten zien dat er een beperkt aantal dunne (~ dm) kleirijke lagen aanwezig zijn onder de zandmotor. De sonderingsgegevens zijn gebruikt om een indruk te krijgen van de consolidatiegraad van de sedimenten en die blijkt over het algemeen vrij hoog te zijn. Dit wordt toegeschreven aan het feit dat kustlijn vroeger ten westen van de zandmotor lag en nu ten oosten. Tijdens de migratie van de kustlijn door het gebied is de ondergrond relatief zwaar belast geweest door strand en/of duinafzettingen. Siltrijke zandlagen worden door Mossinkoff ook gedacht, in theorie, een bijdrage te leveren die niet verwaarloosbaar is in vergelijking met de kleilagen, maar deze bijdrage wordt niet gekwantificeerd.

De totale zetting door de aanleg van de zandmotor wordt op basis van de berekeningen geschat op minder dan 1 cm. Door de geringe dikte van de kleilagen is de consolidatietijd minder dan 1 dag. De bijdrage van kruip is niet beschouwd, maar zal naar verwachting van weinig betekenis zijn.

4.2.2 Hondsbossche en Pettemer Zeewering

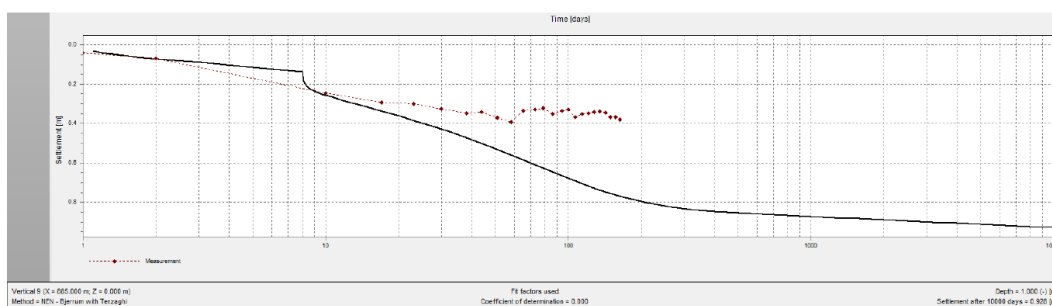
In het kader van Zwakke Schakels Noord-Holland is in de zomer van 2014 de buitenzijde van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ) versterkt met een ophoging (Figuur 4.1). Voor het ontwerp zijn zettingsberekeningen gemaakt met het softwarepakket D-Settlement (ZSNH Combinatie, 2013). Na aanleg zijn middels zakbakens zettingsmetingen verricht, en vervolgens zijn op basis van deze metingen verbeterde (fit) en prognoseberekeningen gedaan (ZSNH Combinatie, 2015).



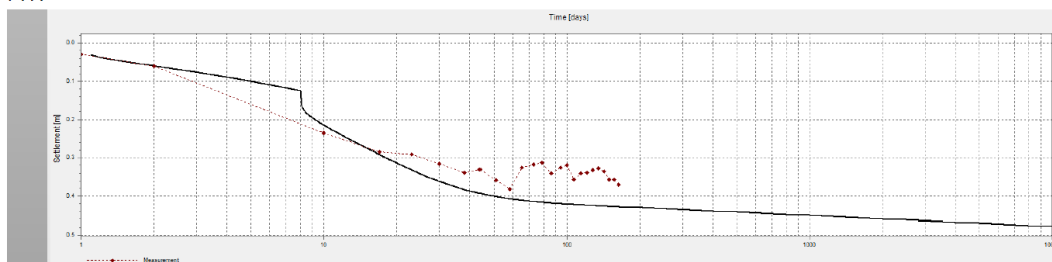
Figuur 4.1 Kenmerkend aanlegprofiel voor de versterking van de HPZ in 2014 (uit ZSNH Combinatie, 2013). Het profiel is ca. 1 km lang. In grijs de oorspronkelijke situatie met rechts de bestaande zeewering. Dicht bij de wering wordt een extra ophoging (duin) aangebracht.

Figuur 4.2 toont een voorbeeld van een vergelijking tussen waargenomen en berekende daling/zetting. Op basis van studie van de genoemde documenten wordt opgemerkt dat:

- Zich zettingen voordoen van decimeters tot een meter.
- Zakbaakmetingen slechts een erg grof beeld geven van de zetting, gevoelig zijn voor verstoringen, en onregelmatigheden laten zien waarvan de oorzaak niet bekend is.
- De verschillen tussen waargenomen en berekende zetting vaak erg groot zijn ondanks optimalisatie van modelparameters.
- Deze procedures niet erg geschikt lijken om betrouwbare prognoses te leveren met betrekking tot 'restzetting', o.a. door kruip, die zich op de tijdschaal van vele jaren tot decennia kunnen voordoen.



FIT:

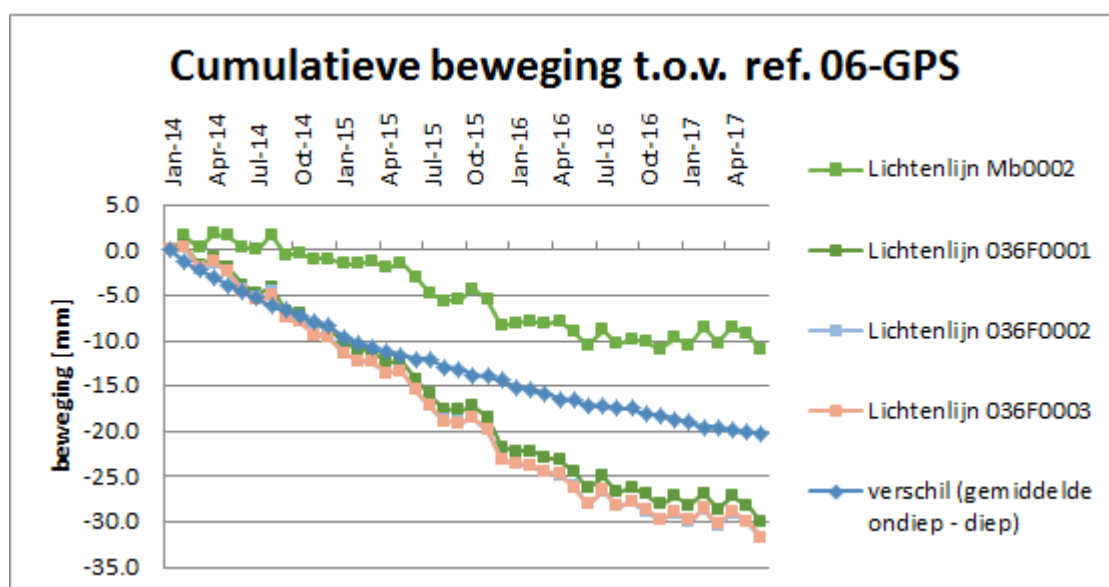


Figuur 4.2 Voorbeeld van waargenomen (punten) en berekende zetting (uit ZSNH Combinatie, 2015). Boven op basis van parameterwaarden die werden gehanteerd in de ontwerpberekening; onder met geoptimaliseerde parameter waarden.

4.2.3 Maasvlakte 2

Bij Maasvlakte 2 wordt door Oranje-Nassau Energie (ONE) en Deltares bodemdalingsonderzoek verricht. De opspuiting en drooglegging van de Maasvlakte 2 is begin maart 2012 afgerond en door de aanleg treedt zetting op. Het noordelijk deel van de vlakte bevindt zich bovendien boven de dalingskom van het Q-16 Maas gasveld dat door ONE wordt geëxploiteerd. Zetting en gasdaling zijn daar dus gesuperponeerd. Om beide componenten te kunnen scheiden worden bodemdalingsmetingen met GPS stations verricht waarbij naast oppervlakkig gefundeerde merken, ook een diep gefundeerd merk wordt gebruikt (Figuur 4.3). Zettingsmetingen zijn verricht voor de periode januari 2014 – april 2017, de gaswinning is gestart in april 2014. Deze metingen startten dus ruim nadat drooglegging plaatsvond. Een heel groot deel van de zetting door de aanleg had toen dus al plaatsgevonden. Ook omdat de totale periode van aanleg waarin de vlakte werd opgespoten ruim drie jaar besloeg (aanvang in 2008).

Er zijn drie meetbakens op de dijk geplaatst (036F0001 t/m 0003), terwijl het diepe meetpunt geplaatst is op ongeveer -70 m NAP (Mb0002) en daarmee onder de samendrukbare kleilagen van Holocene en Pleistocene ouderdom. De kleilagen hebben diktes die variëren tussen de 0.5 en 5.5 m. De figuur laat zien dat de meetbakens aan het maaiveld een onderling vergelijkbare daling laten zien van ongeveer 30 mm, met een snelheid van gemiddeld 9 mm/jaar. De snelheid van daling neemt licht af met de tijd. Het diepe meetbaken daalt langzamer, in totaal ongeveer 10 mm, met een snelheid van 3 mm/jaar. De daling van het diepe punt is vooral in het begin opgetreden, het laatste jaar is het meetbaken feitelijk niet gedaald. Dit correspondeert vrijwel 1:1 met de productiecijfers van het gasveld die laten zien dat in de periode april 2014- mei 2016 gemiddeld 20 miljoen m³ per maand gewonnen werd en in de periode juni 2016-april 2017 gemiddeld 5 miljoen m³ per maand.



Figuur 4.3 Gemeten bodemdaling bij locatie Lichtlijnen op de Tweede Maasvlakte. Met toestemming van Oranje Nassau Energie BV uit: Deltares rapport 11200728-002-BGS-0004-v0-b-Briefrapportage Bodemdaling Gasveld Q16-Maas en -CharlieNoord - derde jaar

De daling aan het oppervlak is de som van de zetting van de lagen onder het gewicht van de ophoging van de Tweede Maasvlakte, de daling ten gevolge van de compactie van het gasreservoir en de geologische bodemdaling. Het verschil tussen het gemiddelde van de drie oppervlakte bakens en de daling van het diepe peilmerk kan gezien worden als de zetting van de ondergrond tot -70 m NAP onder het gewicht van de ophoging. Deze zetting bedraagt dus ongeveer 20 mm. De totaal opgetreden zetting zal veel groter geweest zijn, omdat de aanleg van de Maasvlakte 2 gestart is in 2008 en deze metingen in 2014 begonnen zijn.

4.2.4 Zetting buiten het gebied van ophoging

Zetting zal zich altijd over enige afstand uitstrekken buiten het gebied van ophoging. Dit wordt veroorzaakt door spanningsverspreiding, het principe dat met toenemende diepte het gewicht van de ophoging wordt gedragen door een groter oppervlak. Spanningsverspreiding is ook de reden dat de zetting aan de rand van een uniforme ophoging minder is dan onder het centrale deel van de ophoging. Er zijn twee methoden om dit te beschrijven: (1) theoretisch (elasticiteitsleer) en (2) pragmatisch (volgens Boussinesq (19^e eeuw) en later Buisman). De eerste methode wordt gebruikt in een code als PLAXIS en wordt beschreven door Verruijt (2001, p. 171) (<https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/GrondMechBoek.pdf>). De pragmatische methoden van Boussinesq en Buisman zijn beschreven in Verruijt (2001, p. 175) en in de handleiding van het Deltares-programma DSettlement dat gebruikt wordt voor zettingsberekeningen (<https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/DSettlement-manual.pdf>).

Hoe ver de zetting zich buiten de ophoging uitstrekt hangt af van de ruimtelijke verdeling (geometrie) van de ophoging en van de diepte waarop de slappe lagen zich bevinden die bijdragen aan de zetting. Als de slappe laag zich direct onder de ophoging bevindt, dempt de zetting aan de rand van de ophoging uit over een afstand die gelijk is aan 1 à 2 maal de dikte van de slappe laag. Als de laag zich dieper bevindt, is dit grofweg 1 à 2 maal de diepte van de betreffende laag. In het geval van de tweede Maasvlakte zijn er mogelijk bijdragen van drie lagen: Holocene afzettingen tot ca. 15 m onder de (voormalige) zeebodem, Kreftenheye klei op een diepte van 20 tot 30 m en Waalre klei tussen 50 en 70 m. Het is dus in principe mogelijk dat zetting van invloed is tot ca. 100 m buiten de randen van de Maasvlakte. Hoeveel zettingsvolume dat betreft kan met modelstudies nader worden verkend.

4.3 Discussie en conclusie

Op basis van dit hoofdstuk kan worden geconcludeerd dat:

- Zetting als component van bodemdaling in het kustfundament in een belangrijk opzicht afwijkt van dat van de andere componenten, namelijk dat zetting zich voordoet in situaties waarbij een netto verhoging van de bodem wordt bewerkstelligd.
- Met zetting rekening wordt gehouden door het aanbrengen van overhoogte bij aanleg.
- Zetting daarmee niet van wezenlijk belang is voor de kwantificering van de termen die betrekking hebben op bodemdaling in de berekening van de benodigde suppletiebehoefte.
- Toepassing van ophoging in de directe nabijheid van getijdenstations verdient speciale aandacht omdat eventuele zettingsbijdragen de interpretatie van de metingen van de stations in termen van zeespiegelverandering bemoeilijken.
- Er nog gekeken zou kunnen worden naar de vraag in hoeverre zetting buiten het gebied van ophoging relevantie heeft in het kader van de suppletiebehoefte.

5 Verwachte bodemdaling bij de hoofdgetijdenstations

In Nederland zijn zes hoofdgetijdenstations aanwezig, te weten bij Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Op basis van de gegevens in dit rapport kan een inschatting gemaakt worden van de bodemdaling bij de verschillende stations, uitgesplitst naar de verschillende bijdrages van de verschillende bodemdalingscomponenten. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt in geologische bodemdaling en daling door menselijke activiteiten voor de periodes 1916-2016 en 2017-2050.

5.1 Geologische bodemdaling bij de hoofdgetijdenstations

Paragraaf 2.2 beschrijft dat bodemdalingssnelheden door autocompactie van pre-Holocene afzettingen in Nederland klein zijn en ruim beneden de 1 cm/eeuw liggen. Er wordt een uitzondering gemaakt voor het duingebied, omdat daar relatief recent een grote belasting is ontstaan bij de vorming van de jonge duinen. Deze belasting leidt potentieel nog steeds tot autocompactiesnelheden van meerdere centimeters per eeuw. De hoofdgetijdenstations liggen echter buiten de jonge duinen en de bodemdaling door autocompactie is daardoor zeer gering. Op basis van Kooi et al. (1998) en Kooi (2000) zijn voor de verschillende stations schattingen gemaakt van de bodemdaling door autocompactie (Tabel 5.1).

Figuur 2.3 laat de gemiddelde bodembeweging door tektoniek zien over de laatste 2.5 miljoen jaar (§2.3). De gemiddelde snelheden zijn laag, ook hier veelal ruim minder dan 1 cm/eeuw, maar kunnen over korte tijdschalen fluctueren en er bestaat daarom onzekerheid over de snelheid van bodemdaling door tektoniek in het recente verleden, heden en nabije toekomst. Deze onzekerheid kan alleen verkleind worden door metingen uit te voeren. Tabel 5.1 laat per hoofdgetijdenstation de gemiddelde bodemdaling door tektoniek zien, afgeleid uit Kooi et al. (1998).

De bijdrage van isostatische bodembewegingen aan de geologische bodemdaling kan afgeleid worden uit zeespiegelreconstructies en uit GIA-modellen (§2.4). Er bestaan verschillende modellen die verschillende snelheden berekenen voor de huidige situatie. Figuur 2.9 toont voor het kustfundament en de getijdenbekkens het verwachte bereik voor isostatische bodemdaling. Aangezien isostasie de belangrijkste component van de geologische bodemdaling lijkt te zijn, wordt in Tabel 5.1 dit volledige bereik gebruikt om duidelijk te maken dat er nog veel onzekerheid bestaat over de grootte van deze component.

5.2 Bodemdaling door menselijke activiteiten bij de hoofdgetijdenstations

Hoofdstuk 3 beschrijft bodemdaling door winning van olie, gas, zout en water en hoofdstuk 4 de invloed van zetting. Hieruit volgt dat zetting geen relevante rol speelt bij de hoofdgetijdenstations en dat de invloed van grondwateronttrekking waarschijnlijk beperkt is. Voor het station IJmuiden is dit laatste niet helemaal zeker, aangezien er in de nabije omgeving veel grondwater gewonnen wordt. De invloed hiervan op de ondergrond bij het hoofdstation zou onderzocht moeten worden. Vooralsnog wordt in Tabel 5.1 geen bodemdaling benoemd bij de hoofdgetijdenstations door zetting en grondwateronttrekking. Ook zoutwinning heeft geen invloed. Station Harlingen ligt wel dichtbij winlocaties, maar op basis van de modelberekeningen wordt er bij het station zelf geen bodemdaling gewacht.

Er zijn twee hoofdstations waar bodemdaling onder invloed van olie- en gaswinning wordt verwacht. Bij station Hoek van Holland is de daling relatief beperkt en bedraagt hooguit enkele centimeters. Door de ligging van station Delfzijl nabij het gasveld van Slochteren heeft

daar wel aanzienlijke bodemdaling opgetreden: tot 2017 ongeveer 23 cm en tot 2050 wordt nog een additionele daling van 10 cm verwacht. Deze daling is groter dan de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging in Nederland in de laatste honderd jaar. Rondom de daling door olie- en gaswinning is voor de periode vóór 2017 een onzekerheid van $\pm 25\%$ aangehouden en voor de periode van 2017-2050 een onzekerheid van 50%. De berekende totale bodemdaling voor beide periodes is afgeleid uit de gemiddelde geologische bodemdaling en de verwachte bodemdaling door olie- en gaswinning. Hierbij is afgerond naar halve centimeters. De onzekerheid rondom de berekende totale bodemdaling is afgeleid van de onzekerheid over de isostatische bodemdaling en de onzekerheid over de bodemdaling door gaswinning. Tabel 5.1 laat zien dat voor stations waar bodemdaling door olie- en gaswinning geen rol speelt de gemiddelde bodemdaling 2-7 cm/eeuw bedraagt en dus een relatief grote bijdrage heeft geleverd aan de gemiddelde stijging van 19 cm over de periode 1916-2016.

Tabel 5.1 Bodemdaling bij de hoofdgetijdenstations, uitgesplitst naar bodemdalingscomponent en de periodes 1916-2017 en 2018-2050

Station	Autocompactie tektoniek isostasie (cm/jaar)			Bodemdaling door Olie- en gaswinning 1916-2016 2017-2050 (cm)		Totale bodemdaling 1916-2016 2017-2050 (cm)	
	Delfzijl	-0.000	+0.001	-0.02 tot -0.07	23 ± 5	10 ± 5	27.5 ± 7.5
Harlingen	-0.004	-0.006	-0.03 tot -0.08	0	0	6.5 ± 2.5	2.0 ± 1.0
Den Helder	-0.004	-0.002	-0.03 tot -0.07	0	0	5.5 ± 2.0	2.0 ± 0.5
Ijmuiden	-0.008	-0.006	-0.02 tot -0.06	0	0	5.5 ± 2.0	2.0 ± 0.5
Hoek van Holland	-0.007	-0.001	-0.02 tot -0.05	2 ± 0.5	1 ± 0.5	6.5 ± 2.0	2.5 ± 1.0
Vlissingen	-0.000	+0.001	-0.01 tot -0.04	0	0	2.5 ± 1.5	1.0 ± 0.5

Bij een vergelijk van de getallen uit Tabel 5.1 met de gemiddelde relatieve stijgingsnelheden uit Tabel 5.2 valt direct op dat de berekende bodemdaling bij Delfzijl niet past bij de gemiddelde stijgingsnelheid bij dat station. De meest voor de hand liggende verklaring is dat de data van getijdenstation Delfzijl door Rijkswaterstaat gecorrigeerd wordt voor bodemdaling door gaswinning. De gemiddelde snelheid van 19.2 cm/eeuw zal dus min of meer overeenkomen met de relatieve zeespiegelstijging exclusief de bodemdaling veroorzaakt door gaswinning. Min of meer, omdat onduidelijk is hoe en welke correctie is toegepast. De mogelijke invloed van andere (NAP)-correcties op de gemeten relatieve zeespiegelstijging bij de getijdenstations wordt momenteel onderzocht binnen de Zeespiegelmonitor.

De zeespiegelstijgingsnelheid voor de andere stations kan daarom gezien worden als de relatieve zeespiegelstijgingsnelheid met daarin verwerkt alle bodemdalingscomponenten, behalve compactie en zetting van het pakket afzettingen boven de diepte waarop het station gefundeerd staat.

Het is vooralsnog onduidelijk of een correctie voor bodemdaling door gaswinning ook bij Hoek van Holland is toegepast. Op basis van de beschikbare data rondom het getijdenstation mag aangenomen worden dat deze hooguit enkele centimeters bedraagt. Opvallend is verder dat de getijdenstations in noordelijk Nederland duidelijk lagere gemiddelde snelheden laten zien. Tabel 5.1. laat zien dat dit verschil niet verklaard kan worden door lagere bodemdalingssnelheden in Noord-Nederland: van zuid naar noord neemt de gemiddelde bodemdaling door isostasie juist toe (Figuur 2.9) en zou je dus juist hogere gemiddelde snelheden verwachten in het noorden. Met name de lage gemiddelde snelheid bij Harlingen (12.8 cm/eeuw) is opvallend. Dit wordt vooral veroorzaakt door het aanleggen van de Afsluitdijk en het effect daarvan op de gemiddelde zeespiegelstand bij Harlingen (Hollebrandse, 2005). De afsluiting van de Zuiderzee heeft ook invloed gehad op de getijslag

bij Den Helder, waarbij de gemiddeld hoogwaterstand met enkele decimeters is gestegen en de gemiddelde zeespiegelstand dus ook gestegen is.

Tabel 5.2 Zeespiegelstijging in cm / eeuw op basis van het meervoudig lineaire regressiemodel toegepast op jaargemiddelde zeespiegel in de periode 1890-2016 (Baart et al., 2017).

Station	Gemiddelde (cm/eeuw)	2.5%	97.5%
Delfzijl	19.2	17.6	20.8
Harlingen	12.8	11.2	14.4
Den Helder	14.7	13.3	16.0
IJmuiden	21.0	19.6	22.3
Hoek van Holland	23.5	22.3	24.7
Vlissingen	21.5	20.4	22.6

Samengevat kan gesteld worden dat ruimtelijke verschillen in bodemdaling tot verschillen in gemeten relatieve zeespiegelstijging zullen leiden bij de getijdenstations, maar dat de gemeten verschillen niet of niet alleen door verschillen in bodemdaling verklaard kunnen worden. Andere factoren die de gemiddelde waterstand beïnvloeden (bijv. wind, temperatuur, stroming, menselijke ingrepen) moeten ook beschouwd worden om de verschillen beter te kunnen duiden (zie ook Baart en Kooi, 2016).

6 Conclusies en aanbevelingen

Relatieve zeespiegelbewegingen zijn de som van absolute zeespiegelbewegingen en bodemdaling. Het is belangrijk om de ontwikkeling van de relatieve zeespiegelbeweging in Nederland te bepalen, omdat dit invloed kan hebben op het overstromingsrisico. In Nederland wordt de zeespiegelstijging bepaald met behulp van zes hoofdgetijdenstations. Deze laten zien dat de gemeten relatieve zeespiegel langs de Nederlandse kusten in de laatste eeuw met gemiddeld 19 cm is gestegen. Deze stijging is opgetreden als gevolg van bodemdaling en een groter volume zeewater op aarde. Bij het middelen van de gemeten relatieve zeespiegelstijging wordt de differentiële bodemdalingscomponent ook gemiddeld. Bij twee stations, Hoek van Holland en Delfzijl, treedt ook bodemdaling op door gaswinning. Op de meetreeks Delfzijl heeft Rijkswaterstaat een, vooralsnog onbekende, correctie toegepast voor bodemdaling door gaswinning en deze daling zit dus niet verwerkt in de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging voor Nederland. Het is onbekend of er ook een correctie voor gaswinning is toegepast op de meetreeks van Hoek van Holland en hoe NAP-correcties voor de getijdenstations exact zijn toegepast. Dit zal in 2018 nader onderzocht worden.

Momenteel wordt de gemiddelde zeespiegelstijging gebruikt om het benodigde suppletievolume te bepalen. Om het suppletiebeleid voor de toekomst beter te kunnen onderbouwen is het wenselijk om een overzicht te hebben van de bodemdalingssnelheid per gebied. Op deze manier kan het bodemdalingsvolume van de het kustfundament en de getijdenbekkens beter geschat worden. Dit is ook nodig omdat de gemiddelde bodemdalingcomponent dus bepaald wordt aan de hand van slechts zes stations, terwijl het bekend is dat bodemdaling in de ruimte en in de tijd zeer variabel is. Hieronder worden eerst de conclusies over de bijdrage van de verschillende bodemdalingcomponenten gegeven en aansluitend worden de belangrijkste aanbevelingen gegeven.

6.1 Bijdrage van de verschillende bodemdalingcomponenten

Dit rapport geeft het eerste overzicht van de bijdrage van verschillende bodemdalingcomponenten aan de bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. Dit overzicht kan gebruikt worden om het totale bodemdalingsvolume te bepalen als input voor het berekenen van het benodigde suppletievolume, maar kan ook gebruikt worden om regionale bodemdalingsvolumes en afgeleide regionale suppletievolumes vast te stellen. In dit rapport wordt een onderscheid gemaakt tussen geologische bodemdaling, dat wil zeggen daling onder invloed van geologische processen, en daling onder invloed van menselijke activiteiten, zoals delfstofwinning, grondwateronttrekking en het ophogen van het land. Hieronder wordt per component de belangrijkste conclusie gegeven:

6.1.1 Geologische bodemdaling

➤ *Autocompactie*

Dit omvat compactie die wordt veroorzaakt door (natuurlijke) sedimentatie. Het gewicht van het sediment zorgt voor uitdrijving van poriewater en dit leidt tot samendrukking en daarmee bodemdaling. Bijhorende bodemdalingssnelheden zijn laag, veelal ruim minder dan 1 cm/eeuw. In het gebied met de hoogste en jongste duinen (jonge duinengebied) kan deze snelheid veel hoger zijn, door de relatief recente belasting die is ontstaan tijdens de vorming van de jonge duinen. Het is vooralsnog niet bekend of in het jonge duinengebied de bodemdalingssnelheid door

autocompactie inderdaad veel hoger is. De hoofdgetijdenstations liggen buiten het jonge duinengebied en worden hierdoor niet beïnvloed.

➤ *Tektoniek*

Ook de gemiddelde bodemdalingssnelheid door tektoniek is laag en ligt ruim onder de 1 cm/eeuw. Deze gemiddelde snelheid geldt echter voor tijdschalen van honderdduizenden jaren en op tijdschalen van decennia kan de snelheid (sterk) afwijken van het gemiddelde. In dit rapport is bij de berekening van bodemdalingssnelheid bij de getijdenstations uitgegaan van de gemiddelde tektonische bodemdalingssnelheid die per station varieert.

➤ *Isostasie*

Isostatische bodemdaling is een nawee van de laatste ijstijd. In die periode werd Nederland omhoog gedrukt als gevolg van de aanwezigheid van dikke ijskappen in Schotland en Scandinavië. Ter plaatse van de ijskappen werd de aardkorst ingedrukt en daarom heen, onder andere in Nederland, kwam het aardoppervlak juist omhoog. Sinds het verdwijnen van het ijs is de aardkorst bezig een nieuw evenwicht te vinden en komen de ingedrukte gebieden weer omhoog en zakken de opgeheven gebieden juist weer omlaag. Hierbij spelen ook andere belastingen door het volstromen van de Noordzee met water en sediment een rol. Er bestaan verschillende modellen die voor de huidige situatie de isostatische bodemdalingssnelheid berekenen. Deze laten eensgezinds zien dat Noord-Nederland harder (3-9 cm/eeuw) zakt dan Zuid-Nederland (2-5 cm/eeuw). Met deze snelheden levert de isostatische bodemdalingscomponent landelijk gezien de grootste bijdrage aan de geologische bodemdaling.

6.1.2 Daling onder invloed van menselijke activiteit

➤ *Olie- en gaswinning*

Bodemdaling door olie- en gaswinning treedt op door een vermindering van de poriëndruk in het gesteente en de daaropvolgende samendrukking. De daling kan aanzienlijk zijn en oplopen tot meer dan 30 cm over perioden van enkele decennia. In Nederland vinden de grootste dalingen plaats bij Ameland en in het Eems-Dollardgebied. Bijbehorende dalingsvolumes in het kustfundament en de getijdenbekkens lopen daar op tot tientallen miljoenen m³. Langs de Hollandse Kust bedragen de dalingsvolumes enkele miljoenen m³. Ter vergelijking: langs de Nederlandse kust wordt gemiddeld jaarlijks 12 miljoen m³ gesuppleerd.

➤ *Zoutwinning*

In Nederland heeft alleen de zoutwinning in de omgeving van Harlingen impact in het kustgebied. Tot nu toe is de impact beperkt, maar de geplande winning bij de Ballastplaat zal tot aanzienlijke bodemdaling leiden met een bijbehorend bodemdalingsvolume, over meerdere decennia, van 9-15 miljoen m³.

➤ *Grondwateronttrekking*

Uit andere delta's en kustgebieden wereldwijd is bekend dat grondwateronttrekkingen tot aanzienlijke bodemdaling kunnen leiden. Voor het kustfundament lijken vooral de winning bij IJmuiden en in het Westland potentieel belangrijk. Op beperkte ruimtelijke schaal zou dit bij kunnen dragen aan bodemdaling, maar momenteel ontbreken de gegevens om deze bijdragen te specificeren.

➤ *Ophoging*

Ophogingen van het landoppervlak vormen een belasting van het onderliggende pakket en dit kan leiden tot zetting. De mate van zetting wordt bepaald door de eigenschappen van het onderliggende pakket en de grootte van de belasting. Bij grote ophogingen zoals bij Maasvlakte 2 en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering treedt er zetting op van vele decimeters. De impact op het kustfundament is echter zeer beperkt, omdat het uiteindelijke maaiveld hoger ligt dan het oorspronkelijk maaiveld en de zetting naar verwachting vrijwel beperkt blijft tot het gebied van de ophoging.

6.2 Aanbevelingen

Aan het eind van hoofdstukken 2-4 worden verschillende aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek. Ze kunnen samengevoegd worden tot onderstaande hoofdaanbevelingen:

- *Gericht(er) monitoren van bodemdaling*
Er bestaat in verschillende gebieden nog veel onzekerheid over de mate van bodemdaling en de bijdrage daaraan van de verschillende componenten. Met behulp van gerichte monitoring zou een belangrijk deel van de onzekerheid weggenomen kunnen worden. De monitoring zou kunnen bestaan uit 1) het plaatsen van diep-gefundeerde ondergrondse peilmerken en extensometers om de geologische bodemdaling beter te meten en 2) een gerichte en structurele studie met inSAR-data om vragen te beantwoorden rondom de kanteling van de Hondsbossche Zeewering, de bodemdaling in het jonge duinengebied (autocompactie) en de bodemdaling door olie-, gas- en waterwinning.
- *Vaststellen of grondwateronttrekking een significante bijdrage levert aan bodemdaling*
Het is momenteel niet duidelijk wat het effect is van grondwateronttrekkingen. Gestart zou kunnen worden met een studie naar de grondwaterwinning in de omgeving van IJmuiden, waar relatief grote debieten water opgepompt worden. De studie zou onder andere moeten bestaan uit het vaststellen van de hoeveelheid gewonnen water, bodemdalingsmonitoring (inSAR), monitoring van peilverlagingen en bodemdalingmodellering.
- *Gericht onderzoek naar grondeigenschappen*
Dit onderzoek zou zich moeten focussen op het vaststellen van de compactiegraad en geotechnische compressie-eigenschappen van vergelijkbare afzettingen nabij en op afstand van 1) grondwaterwinningen en 2) de jonge duinen. Deze informatie geeft goede kwalitatieve data en kan gebruikt worden in prognostische procesmodellen.
- *De onzekerheid over de isostatische bodembeweging verkleinen*
Bodemdaling door isostasie is een van de belangrijkste veroorzakers van bodemdaling op landelijke schaal. De onzekerheid over snelheid van bodemdaling is echter groot, waardoor schattingen uiteenlopen van ruwweg 3-8 cm/eeuw. Deze onzekerheid kan deels verkleind worden door metingen, maar ook vooral ook door bij te dragen aan het verbeteren van de modellen die isostatische bodembeweging berekenen. Deze bijdrage kan vooral geleverd worden door het aanleveren van betrouwbare (geologische) zeespiegeldata. In 2017 is hiermee een belangrijke start gemaakt door het opzetten van een database met zeespiegeldata uit de omgeving van Rotterdam, maar deze database zou uitgebreid moeten worden met gegevens uit de rest van Nederland.

- *Het uitbreiden van de zeespiegelmonitor met de bodemdalingsmonitor*
Deze monitor zou zich langjarig moeten richten op het updaten van de landelijke kustfundament-getijdenbekkens bodemdalingskaart die in de loop van 2018 zal verschijnen. Daarnaast zou de monitor zich moeten focussen op het verkleinen van de onzekerheden rondom de bijdrage van de belangrijkste bodemdalingscomponenten. Updates 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.

7 Referenties

- Baart, F., Leander, R., De Ronde, J., De Vries, H., Vuik, V., Nicolai, R., 2015. Zeespiegemonitor 2014: rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging. Deltares report 1209426-000-VEB-0011, 44 pp.
- Baart, F., Kooi, H., 2016. Zeespiegel onderzoeksagenda. Deltares report 1230046-000-ZKS-0001, 19 pp.
- Baart, F., Rongen, G., Nicolai, R., Van de Vries, C., 2017. Sea-level monitor (Version v2017.04). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1065964>.
- Bakker, T.W., Duquesnoy, A.J.H.M., 2010. FRISIA Zout B.V., informatie bodemdaling door zoutwinning. ESCO European Salt Company Frisia Zout B.V. report versie 3.0, 17 pp.
- 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.
- Bradley, S.L., Milne, G.A., Shennan, I., Edwards, R., 2011. An improved glacial isostatic adjustment model for the British Isles. *Journal of Quaternary Science*, 26 (5), 541-552. 10.1002/jqs.1481.
- Bradley, S.L., Milne, G.A., Horton, B.P., Zong, Y., 2016. Modelling sea level data from China and Malay-Thailand to estimate Holocene ice-volume equivalent sea level change. *Quaternary Science Reviews*, 137, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.02.002>.
- Breunese, J., 2010. Zoutwinning en bodemdaling bij Harlingen (Barradeel). *Grondboor en Hamer*, 4/5 (Journal Article), 133-136.
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., Unnikrishnan, A.S., 2013. Sea Level Change. In: T.F. Stocker et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cleveringa, J., 2008. Ontwikkeling sedimentvolume Eems-Dollard en het Groninger wad - Overzicht van de beschikbare kennis en gegevens. Alkyon rapport A2269R1r3, 47 pp.
- Cleveringa, J., Grasmeijer, B., 2010. Meegroeiervormen en grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee. Alkyon rapport A2062, 156 pp.
- Cohen, K.M., 2003. Differential subsidence within a coastal prism. Late-Glacial "Holocene tectonics in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Ph.D.-thesis, Utrecht University.
- De Vos, D., 2010. Determination and visualization of the expected surface subsidence due to onshore gas production in the Netherlands. Internship report, TNO.
- Faneca Sanchez, M., Klein, J., Oude Essink, G., Raat, K., Paatmant, M., 2012. Effecten van brijninjectie op de grondwaterkwaliteit en functies in het Westland. Deltares rapport 1205897-000-BGS-007/KWR rapport 2012.096, 77 pp.
- Gambolati, G., Teatini, P., 2015. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resources Research*, 51 (6), 3922-3955. 10.1002/2014WR016841.
- GDF SUEZ, 2015. Winningsplan Q13a Amstel veld. GDF SUEZ E&P Nederland B.V. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=2057238244&type=fieldPubAsset>.
- Hanssen, R.F., Van Leijen, F.J., Van Zwieten, G., 2008. Bodemdaling Kennemerland waargenomen met satellietradarinterferometrie (inSAR). In: F.B.J. Barends, D. Dillingh, R. Hanssen, K. Van Onselen (Eds.), *Bodemdaling langs de Nederlandse kust: Case Hondsbossche en Pettemer zeewering*. Delft University Press, pp. 69-99.
- Hartsuiker, G., 2010. MER studie zoutwinning Waddenzee, hydrodynamische effecten, abiotische parameters. Alkyon rapport A2062R1, 184 pp.
- Hijma, M.P., Engelhart, S.E., Horton, B.P., Törnqvist, T.E., Hu, P., Hill, D.F., 2015. A protocol for a geological sea-level database. In: I. Shennan, A.J. Long, B.P. Horton (Eds.), *Handbook of Sea-Level Research*. Wiley Blackwell, pp. 536-553.

- Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., De Ronde, J.G., De Vlas, J., 2004. Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 - Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. RIKZ rapport RIKZ/2004.025, 138 pp.
- Hollebrandse, F.A.P., 2005. Temporal development of the tidal range in the southern North Sea. MSc-thesis, Delft University, Delft.
- Houtgast, R.F., van Balen, R.T., 2000. Neotectonics of the Roer Valley Rift System, the Netherlands. *Global and Planetary Change*, 27 (1), 131-146. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00063-7).
- Jevrejeva, S., Moore, J.C., Grinsted, A., Matthews, A.P., Spada, G., 2014. Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807. *Global and Planetary Change*, 113 (Supplement C), 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.12.004>.
- Kiden, P., Denys, L., Johnston, P., 2002. Late Quaternary sea-level change and isostatic and tectonic land movement along the Belgian-Dutch North Sea coast: geological data and model results. *Journal of Quaternary Science*, 17, 535-546.
- Kiden, P., Makaske, B., Van de Plassche, O., 2008. Waarom verschillen de zeespiegelreconstructies voor Nederland? *Grondboor en Hamer*, 3/4, 54-62.
- Kooi, H., Johnston, P., Lambeck, K., Smither, C., Ronald, M., 1998. Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands. *Tectonophysics*, 299 (4), 297-316.
- Kooi, H., 2000. Land subsidence due to compaction in the coastal area of The Netherlands: The role of lateral fluid flow and constraints from well-log data. *Global and Planetary Change*, 27 (1-4), 207-222. [10.1016/S0921-8181\(01\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00067-4).
- Kooi, H., 2008. Compactiebijdragen aan bodemdaling langs de kust. In: F.B.J. Barends, D. Dillingh, R. Hanssen, K. Van Onselen (Eds.), *Bodemdaling langs de Nederlandse kust: Case Hondsbossche en Pettemer zeevering*. Delft University Press, pp. 19-28.
- Lodder, Q.J., 2016. Rekenregel suppletievolumen. Rijkswaterstaat memo 14-10-2016, versie 0.8, 9 pp.
- Lorenz, G.K., Groenewoud, W., Schokking, F., Van den Berg, M.W., Jelgersma, S., Brouwer, F., 1991. *Heden en Verleden — Nederland naar Beneden???* - Interim rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland. Rijkswaterstaat, Delft/Rijswijk en Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 72 pp.
- Mossinkhof, L., 2016. The consolidation of the Sand Engine. Delft University, BSc.-thesis, Delft, The Netherlands, 67 pp.
- Muntendam-Bos, A., Breunese, J., K., V.T.-V., Peters, L., Juez-Larre, J., 2012. Toetsing van de belasting op de gebruiksruimte in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag door bodemdaling ten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee. TNO rapport TNO-060-UT-2011-02035/C, 106 pp.
- NAM, 2011a. Verzoek om instemming van het winningsplan Blija-Zuid. NAM. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1487414555&type=fieldPubAsset>.
- NAM, 2011b. Verzoek om wijziging instemming voor winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. NAM. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1363502168&type=fieldPubAsset>.
- NAM, 2012. Meetregister bij het meetplan Zuid-Holland 2010 - Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Zuid-Holland 2011. NAM rapport EP201201206442.
- NAM, 2013. Verzoek om instemming voor winningsplan Gaag-Monster. NAM. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1363506377&type=fieldPubAsset>.
- NAM, 2015a. Bodemdaling door Aardgaswinning - NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe. NAM - Statusrapport 2015 en Prognose tot het jaar 2080. .
- NAM, 2015b. Verzoek om instemming van het winningsplan NSN/M09. NAM. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1980197315&type=fieldPubAsset>.
- NAM, 2017. Ensemble based subsidence application to the Ameland gas field - long term subsidence study part two (LTS II). NAM. <https://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiCzcWvs6LXAhUGfhoKHennDU8QFgg1MAE&url=https%3A%2F%2Fnam-feitenencijfers.data->

- app.nl%2Fdownload%2Frapport%2F2a2da56c-fae6-4453-a8a7-c64c43b418a6%3Fopen%3Dtrue&usg=AOvVaw2f0RWMLgLYj-zZQzxE_4J6.
- Nederbragt, G.J., 2005. Zandvoorraden van het kuststelsel: onderbouwing van een conceptueel model met behulp van trends van de winst- en verliesposten over de periode 1973-1997. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) rapport 09-2006.
- Oranje-Nassau Energie B.V., 2013. Aanvraag instemming winningsplan Q16-Maas. Oranje-Nassau Energie B.V. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1363502115&type=fieldPubAsset>.
- RID, 1981. Invloed Grondwaterwinning in West-Utrecht; grondmechanisch onderzoek. Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening rapport 6323-81/3, 39 pp.
- Schokking, F., 2004. Bodemdaling erger dan broeikas effect, risico's op versnelde daling langs Land en Water, 11.
- Schokking, F., Nieuwland, D., 2010. Bodemdaling Hondsbossche en Pettemer Zeewering: gevolg van geologische processen in diepe ondergrond. Geotechniek, 1, 50-57.
- Schuttenhelm, R., 2017. De toekomst van de Waddenzee - Een stijgende zeespiegel over een dalende bodem. In opdracht van de Waddenvereniging, Harlingen.
- Sejrup, H.P., Clark, C.D., Hjelstuen, B.O., 2016. Rapid ice sheet retreat triggered by ice stream debudding: Evidence from the North Sea. *Geology*, 10.1130/g37652.1.
- Stouthamer, E., Berendsen, H.J.A., 2000. Factors Controlling the Holocene Avulsion History of the Rhine-Meuse Delta (The Netherlands). *Journal of Sedimentary Research*, 70 (5), 1051-1064.
- Stouthamer, E., Cohen, K.M., Hoek, W.Z., 2015. De vorming van het land: geologie en geomorfologie. Perspectief Uitgevers, Utrecht.
- Törnqvist, T.E., Wallace, D.J., Storms, J.E.A., Wallinga, J., van Dam, R.L., Blaauw, M., Derksen, M.S., Klerks, C.J.W., Meijneken, C., Sijnders, E.M.A., 2008. Mississippi Delta subsidence primarily caused by compaction of Holocene strata. *Nature Geosciences*, 1 (3), 173-176.
- Van der Spek, A.J.F., Elias, E., Lodder, Q.J., Hoogland, R., 2015. Toekomstige Suppletievolumes - Eindrapport. Deltares report 1208140-005-ZKS-0001, 103 pp.
- Van der Spek, A.J.F., Lodder, Q.J., 2015. A new sediment budget for the Netherlands: the effect of 15 years of nourishing (1991-2005). Deltares report 1220040-007-ZKS-0001, 17 pp.
- Van Leijen, F.J., Humme, A.J.M., Hanssen, R.F., 2008. Deformatie van de Hondsbossche en Pettemer zeewering geconstateerd met radarinterferometrie. In: F.B.J. Barends, D. Dillingh, R. Hanssen, K. Van Onselen (Eds.), *Bodemdaling langs de Nederlandse kust: Case Hondsbossche en Pettemer zeewering*. Delft University Press, pp. 151-169.
- Van Rijn, L.C., 2015. Bodemdaling Wadden door Zoutwinning - beoordeling eerder uitgevoerd onderzoek. Rapport voor de Waddenvereniging, Natuurmonumenten en de Vogelbescherming, 131 pp.
- Vermaas, T., Marges, V.C., 2015. Detailanalyse volumeveranderingen rondom Ameland. Deltares, The Netherlands, 39 pp.
- Vermillion Energy, 2015. Verzoek om instemming voor winningsplan Zuidwal. Vermillion Oil & Gas Netherlands B.V. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=2243052580&type=fieldPubAsset>.
- Verruijt, A., 2001. *Grondmechanica*. Delft University Press.
- Vink, A., Steffen, H., Reinhardt, L., Kaufmann, G., 2007. Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quaternary Science Reviews*, 26 (25-28), 3249-3275.
- Wintershall, 2003. Winningsplan Castricum Zee VELD. Wintershall Noordzee B.V. <http://nlog.nl/nlog/requestDocument?id=279938356&type=fieldPubAsset>.
- ZSNH Combinatie, 2013. Initieel Aanlegprofiel, Prognose van zetting door ophoging. Zwakke Schakels Noord-Holland, Versterking en Onderhoud, Kustdeel RSP17.00 - RSP28.32, Van Oord en Boskalis rapport VB-ZSNH-73-BB-ONO-05.
- ZSNH Combinatie, 2015. Technische Notitie: Voorlopige Fit-berekening HPZ-3. Zwakke Schakels Noord-Holland, Versterking en Onderhoud, Kustdeel RSP17.00 - RSP28.32, Van Oord en Boskalis rapport 154347-TN-43-0019.