Deltares

Enabling Delta Life

Bodemdaling door grondwateronttrekking in het Westland en omgeving

Deltares

Bodemdaling door grondwateronttrekking in het Westland en omgeving

Henk Kooi

11202399-005

© Deltares, 2018, B

Deltares

Titel
Bodemdaling door grondwateronttrekking in het Westland en omgeving

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zuid-Holland	11202399-005	11202399-005-BGS-0002	88

Trefwoorden
Bodemdaling, grondwateronttrekking, modellering, InSAR

Samenvatting

In de driehoek Den Haag - Rotterdam - Hoek van Holland, en met name in het Westland, wordt de afgelopen 30 jaar steeds meer grondwater onttrokken uit het eerste watervoerende pakket. De grondwateronttrekking zorgt voor stijghoogteverlaging. Zoals bekend uit andere delen van de wereld kan onttrekking en stijghoogteverlaging aanzienlijke bodemdaling veroorzaken, vooral als er onder of boven het watervoerende pakket waaruit onttrokken wordt veel klei of veen aanwezig is. In het Westland en omgeving is veel klei en veen aanwezig in de Holocene afzettingen tussen het eerste watervoerende pakket en het maaiveld.
Voor beleidsontwikkeling is het voor de provincie Zuid-Holland en andere overheden belangrijk om inzicht te krijgen in de bodemdaling die door de toenemende grondwateronttrekking in het gebied is veroorzaakt, en mogelijk nog kan worden veroorzaakt in de toekomst. In deze studie is hier onderzoek naar gedaan.

Stijghoogteverlagingen tot ca. 3 m zijn afgeleid uit grondwaterstandswaarnemingen rond De Lier. Deze verlagingen worden veroorzaakt door seizoenale onttrekkingen voor de glastuinbouw (brijnsystemen). De stijghoogte zakt in het voorjaar en de zomer en herstelt weer in de winter. De geconstateerde verlagingen rond De Lier berusten hoofdzakelijk op grondwaterstandmonitoring uitgevoerd door de gemeente Westland. Door het ontbreken van monitoringsdata voor lange perioden is er geen zich op wanneer de verlagingen rond De Lier zijn ontstaan en of dat geleidelijk is gebeurd of in een korte periode.
Elders in het Westland kan, op basis van de beschikbare metingen uit het provinciale grondwatermeetnet, geen goed beeld worden gevormd van eventueel aanwezige stijghoogteverlagingen door het beperkte aantal waarnemingspunten in het monitoringsnetwerk en hiaten in de tijdreeksen.

Modelberekeningen geven een grote onzekerheid in de bodemdaling die kan zijn veroorzaakt door de stijghoogteverlagingen rondom De Lier. De modeluitkomsten zijn sterk afhankelijk van de lokale bodemopbouw, bodemeigenschappen, en de historische ontwikkeling van de stijghoogteverlaging, factoren die slechts beperkt bekend zijn. De daadwerkelijk opgetreden bodemdaling door de verlagingen is daardoor niet nauwkeurig te reconstrueren. Een seizoenale stijghoogteverlaging van 3 m kan enkele centimeters, maar ook meer dan twee decimeter aan bodemdaling hebben veroorzaakt. En die daling kan heel geleidelijk hebben plaatsgevonden over enkele decennia, waardoor deze niet goed is te onderscheiden van bodemdaling door andere oorzaken, of in vrij korte tijd tot stand zijn gekomen wat gepaard zou zijn gegaan met een potentieel beter herkenbare trendbreuk in de bodemdalingssnelheid. Dit gedrag kan ruimtelijk verschillen.

Radarsatellietbeelden bevatten sterke aanwijzingen voor een toename van de bodemdalingssnelheid met ca. 5 mm/jaar door onttrekking met brijnsystemen in de periode 2003-2011 in een kassengebied ten zuiden van De Lier.
Elders in en rond de Lier bieden de radarsatellietdata geen uitsluitsel over bodemdalingseffecten door de stijghoogteverlagingen. Dat geldt ook voor de vrij hoge

Deltares

Titel
Bodemdaling door grondwateronttrekking in het Westland en omgeving

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zuid-Holland	11202399-005	11202399-005-BGS-0002	88

maaivelddalingssnelheden in de woonkern van De Lier. Goede informatie over de tijdsontwikkeling van de stijghoogteverlaging (en/of aantallen onttrekkingen en onttrekkingshoeveelheden) zou daar meer duidelijkheid over kunnen verschaffen, maar ontbreekt. Inrichting van bodemdalingsmonitoringssites waarin extensometers (bodemdalingsinstrumenten waarmee de dikteafname van bodemlagen wordt gemonitord) zijn opgenomen zijn noodzakelijk om meer duidelijkheid te verkrijgen over de vraag in welke mate de stijghoogteverlagingen in het eerste watervoerende pakket een bijdrage leveren aan bodemdaling op locaties waar vrij hoge bodemdalingssnelheden worden gemeten.

Bij verdere toename van het aantal onttrekkingen en/of vergroting van vergunde onttrekkingshoeveelheden van bestaande grondwateronttrekkingssystemen mag verwacht worden dat de reeds aan de gang zijnde bodemdaling door onttrekkingen (de grootte blijft vooralsnog onduidelijk) kan toenemen. Indien de stijghoogteverlaging gestabiliseerd wordt (of blijft) op het huidige niveau moet nog rekening worden gehouden met enige 'restbodemdaling' die meerdere decennia kan duren voordat de daling is gestopt, vergelijkbaar met het verschijnsel van restzetting na oplevering van een nieuwbouwproject.

De invloed van WKO (warmte koude opslag) systemen is in vergelijking met de brijnsystemen zeer beperkt. De geplande afbouw van de DSM grondwateronttrekking in Delft Noord heeft een kleine maar positieve invloed op bodemdaling in het oostelijk deel van het Westland omdat de stijghoogte in het 1^{e} watervoerende pakket iets zal stijgen (orde van enkele dm).

De studie laat zien dat uitbreiding en verbetering van het grondwatermonitoringsnetwerk, en van registratie van onttrekkingen en onttrekkingshoeveelheden, met aanvullend directe metingen van de bodemdaling met extensometers, essentieel is om vragen over potentiële bijdragen van grondwateronttrekkingen aan toekomstige bodemdaling beter te kunnen beantwoorden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	maart 2019	Henk Kooi		Gilles Erkens		Henriëtte Otter	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Achtergrond 1
1.2 Doel van het onderzoek 2
1.3 Interessegebied 2
1.4 Onderzoeksvragen 2
1.5 Fasering en focussering van het onderzoek 3
1.6 Opzet van het rapport en leeswijzer 3

2 Onttrekkingen **5**
2.1 Data sets 5
2.2 Bewerkingen en analyse 5
2.2.1 Onderscheid tussen soorten systemen en onttrekkingsdiepte 5
2.2.2 Koppeling met onttrekkingsinformatie 6
2.3 Resultaten 6
2.3.1 Ruimtelijke verdeling en ‘grootte’ van soorten onttrekkingssystemen 6
2.3.2 Temporele ontwikkeling van onttrekkingen 7

3 Grondwaterpeilverlaging **9**
3.1 Aanpak 9
3.1.1 Analyse van waarnemingen 9
3.1.2 Duiding op basis van de kennis over onttrekkingen, theorie en modellering 10
3.2 Datasets 10
3.3 Resultaten 10
3.3.1 Stijghoogte in het 1e watervoerende pakket op basis van waarnemingen 10
3.3.2 Verlaging van peilen van ondiepe filters in de deklaag 13
3.4 Interpretatie 13
3.5 Invloed van de afbouw dan de DSM winning te Delft op de stijghoogte 17

4 Modellering van bodemdaling **19**
4.1 Aanpak 19
4.1.1 Modelinstrument 19
4.1.2 Uitgangspunten 19
4.1.3 Kwalitatieve beschrijving van het model 20
4.1.4 Stijghoogteverlagingsscenario’s 21
4.1.5 Bodemopbouwtypen 22
4.1.6 Parameterwaarden 24
4.2 Resultaten 25
4.3 Conclusies 32

5 Bodemdaling uit waarnemingen **35**
5.1.1 Algemene informatie over InSAR 35
5.1.2 De gebruikte datasets 36
5.2 Aanpak 38
5.3 Resultaten 38
5.3.1 Verandering gemiddelde snelheid voor de drie waarnemingsperiodes 38
5.3.2 Versnellingen of vertragingen binnen de waarnemingsperioden 45
5.3.3 Verschil maaiveldbeweging en gebouwen 47

5.4 Discussie en conclusies 49

6 Algemene conclusies 53
6.1 Antwoorden op de onderzoeksvragen 53
6.1.1 Deelgroepvragen 1 53
6.1.2 Deelgroepvragen 2 54
6.1.3 Deelgroepvragen 3 56
6.2 Conclusies 57
6.3 Aanbevelingen 58

7 Referenties 61

8 Bijlagen 63

Bijlage(n)

A Algemene eigenschappen van enkele soorten onttrekkingssystemen A-1

B Kaarten met informatie over onttrekkingssystemen B-1

C Tijdreeksen waarnemingen grondwaterpeil C-1

D Aanvullende grafieken van voorspelde bodemdaling D-1

E Documentatie voor gebied D (Figuur 5.5) E-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Grote delen van de provincie Zuid-Holland (PZH) zijn gevoelig voor bodemdaling. De bodemdalingsgevoeligheid hangt samen met de aanwezigheid van veenbodems die langzaam verdwijnen door oxidatie van het organisch materiaal, maar ook door de aanwezigheid van slappe veen- en kleiafzettingen in diepere delen van de ondergrond die sterk samendrukbaar zijn. Dit heeft consequenties voor wonen, werken en infrastructuur en resulteert in grote opgaven voor zowel nieuwe ontwikkelingen als voor beheer en onderhoud, in zowel bebouwd als landelijk gebied.

Sinds enige jaren staat bodemdaling hoog op de provinciale agenda van de PZH (weblink). De PZH heeft de ambitie om, samen met betrokken partijen (waterschappen, gemeenten, Rijk, eigenaren, gebruikers, belangenorganisaties), perspectieven te ontwikkelen op een vitale leefbare toekomst waarin de omgang met bodemdaling is opgenomen. Op basis daarvan kan de PZH toegesneden beleidskeuzes maken.

Een gedegen kennis van bodemdaling is belangrijk voor deze ambitie. De afgelopen jaren is veel kennis ontwikkeld over bodemdaling door veenoxidatie en zetting onder invloed van belasting door ophogingen en zandcunetten van wegen, en wordt er onderzoek gedaan naar mogelijkheden om die vormen van bodemdaling te beperken. Voor een goed onderbouwd beleid is echter ook kennis nodig over andere oorzaken van bodemdaling (Erkens en Kooi, 2017; Hijma en Kooi, 2018), waaronder bodemdaling door grondwateronttrekking.

Vragen rond een mogelijke bijdrage aan bodemdaling door grondwateronttrekkingen spelen onder andere in de gemeente Westland. De gemeente Westland kampt met name in de dorpskern van De Lier met verzakkingsproblematiek. Maaivelddaling zorgt voor wateroverlast en problemen met de riolering, kabels en leidingen (waaronder gas en water), en problemen met ‘licht onderheide’ constructies. De maaivelddaling zal voor een deel toe te schrijven zijn aan zetting, en aan compactie en krimp van de bovenste bodemlagen die in gang is gezet bij de aanleg van de wijken, eventueel versterkt door lekkage van riolering. De afgelopen dertig jaar is in het Westland echter ook de onttrekking van grondwater sterk toegenomen. Het gaat daarbij vooral om toepassing van open bodemenergiesystemen voor warmte-/koudeopslag (WKO), en om grondwateronttrekking als bron van gietwater in de glastuinbouw. De vraag is bij de gemeente gerezen of deze onttrekkingen een rol spelen in de bodemdaling. Deze vraag wordt versterkt door waarnemingen in door de gemeente in 2016 ingerichte grondwatermonitoringspunten. Resultaten laten zien dat de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket in het zomerseizoen flink uitzakt, ook onder de woonkern van De Lier.

De voorliggende studie naar de bijdrage van grondwaterwinning aan bodemdaling in het Westland en omgeving is tot stand gekomen in opdracht van de provincie Zuid-Holland (PZH). Naast de PZH zijn de volgende instanties betrokken geweest bij de opzet van het onderzoek, de levering van data en informatie, en/of bespreking van resultaten:

- Gemeente Westland (GW)
- Hoogheemraadschap van Delfland (HHD)
- Glastuinbouw Nederland (GTBN)
- Gemeente Midden Delfland (GMD)
- Rijkwaterstaat (RWS)

1.2 Doel van het onderzoek

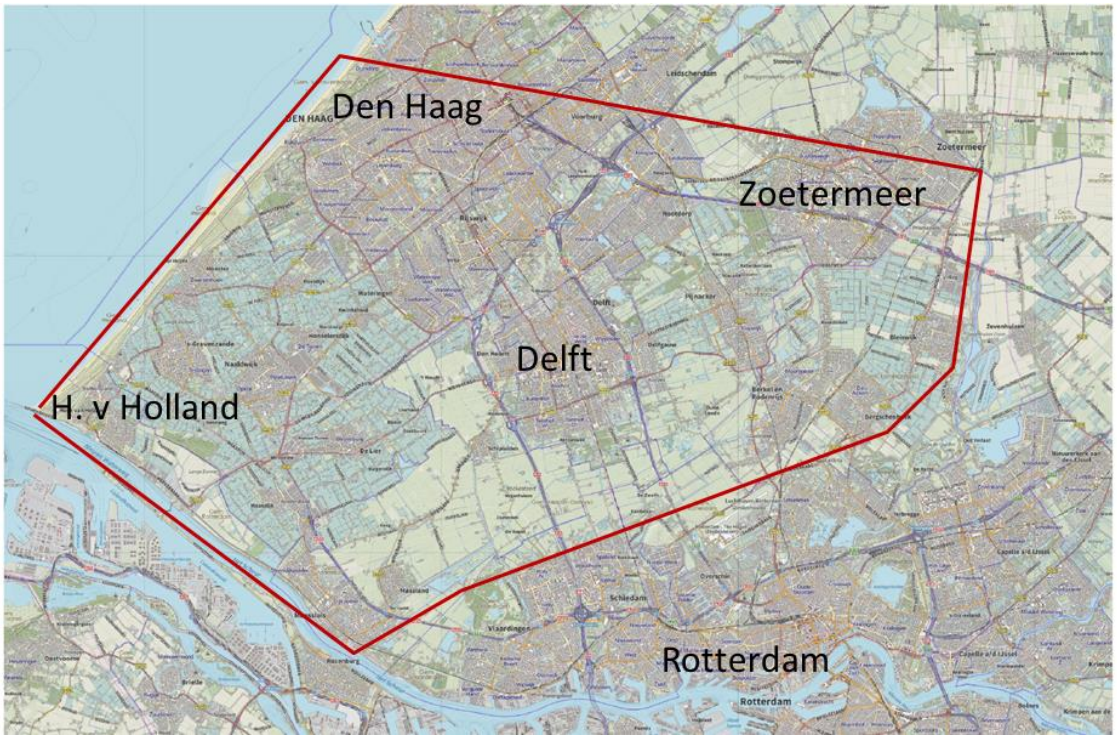
Het doel van het onderzoek dat ten grondslag ligt aan dit rapport is:

Meer duidelijkheid verschaffen over de effecten van stijghoogteverlaging in het eerste watervoerende pakket (en eventueel diepere pakketten) door grondwateronttrekkingen in de afgelopen 30 jaar (1987-2017), op bodemdaling in het gebied tussen Rotterdam en Den Haag.

Analyse van beheersmogelijkheden van bodemdaling door grondwateronttrekking vormde geen doel van deze studie. Er zijn wel enkele aanbevelingen opgenomen die op dit aspect ingaan.

1.3 Interessegebied

Figuur 1.1 toont het interessegebied van de studie. Naast het Westland omvat het interessegebied het glastuinbouwgebied ten oosten van Delft en ten zuiden van Zoetermeer en tussengelegen gebieden.



Figuur 1.1 Het interessegebied van de studie

1.4 Onderzoeksvragen

Specifieke onderzoeksvragen die zijn opgesteld in samenspraak met de betrokken partijen vallen uiteen in drie delen:

1. Wat is de aard van de verlagingen veroorzaakt door verschillende soorten onttrekkingen (WKO; beregening/gietwater; anders) en in samenhang?
2. Wat zijn de verwachtingen omtrent de bodemdaling die wordt veroorzaakt door die verlagingen? Hoe groot is de magnitude van de bodemdaling? Hoe ontwikkelt de

bodemdaling zich door de tijd? Welke factoren zijn belangrijk voor de tijdsontwikkeling? Wat is de minimale stijghoogteverlaging die merkbare bodemdaling veroorzaakt? Wat is de betekenis van de afbouw van de DSM onttrekking in Delft?

3. Is er bevestiging voor de verwachte effecten op bodemdaling vanuit diverse soorten waarnemingen? Dit betreft waarnemingen middels: (a) gedrag gemeten zettingen door waterpassingen (b) radarsatellietwaarnemingen (InSAR).

1.5 Fasering en focussering van het onderzoek

Het onderzoek is gefaseerd uitgevoerd op basis van de volgorde van de drie deelgroepen van vragen die zijn gedefinieerd in paragraaf 1.4. Daarbij is voor deelgroep 1 die zich richt op de aard van de verlagingen en de relatie daarvan met de verschillende typen onttrekkingen uitgegaan van het interessegebied (Figuur 1.1). Op basis van de bevindingen is voor de deelgroepvragen 2 en 3 vervolgens ingezoomd op een studiegebied dat ongeveer samenvalt met de gemeente Westland en dat in hoofdstuk 5 nader wordt gespecificeerd.

1.6 Opzet van het rapport en leeswijzer

In de studie is gebruik is gemaakt van diverse datasets en methoden. Voor de leesbaarheid van het rapport is er daarom voor gekozen om de methodische toelichting en de beschrijving van de gebruikte datasets op te nemen in verschillende hoofdstukken waarin ook de bijbehorende resultaten worden gepresenteerd, en deze niet te groeperen in een apart hoofdstuk. Hoofdstuk 2 gaat in op de onttrekkingen in het interessegebied. De analyse in dit hoofdstuk is opgenomen om bevindingen over grondwaterpeilverlagingen en eventuele bodemdaling zo goed mogelijk te kunnen relateren aan (soorten) onttrekkingen. Hoofdstuk 3 beschrijf eerst de grondwaterwaarnemingen. Vervolgens wordt op basis van theorie en modellering een beeld gegeven wat het ruimtelijke beeld van verlagingen zou kunnen zijn. Hoofdstuk 4 presenteert resultaten van bodemdalingsmodellering en richt zich daarmee op deelgroepvragen 2. Hoofdstuk 5 geeft de resultaten van analyse van bodemdalingswaarnemingen en richt zich daarmee op deelgroepvragen 3. Hoofdstuk 6 sluit af met antwoorden op de onderzoeksvragen en enkele aanbevelingen.

2 Onttrekkingen

Dit hoofdstuk presenteert de eerste stap van de studie waarin is getracht een beeld te krijgen van de ruimtelijke verdeling en temporele ontwikkeling van de verschillende soorten grondwateronttrekkingen in het interessegebied, de grootte van de onttrekkingen, en welke onttrekkingen plaatsvinden in het eerste watervoerende pakket. De gecompileerde gegevens, die zijn opgenomen in een GIS, worden gebruikt in hoofdstuk 3, dat ingaat op verlagingen door de verschillende soorten onttrekkingen. De informatie is ook gebruikt bij de interpretatie van bodemdaling uit InSAR data in hoofdstuk 5.

De bewerkingen, analyses en resultaten zijn beperkt en kunnen verder worden uitgebreid. De beperktheid hangt samen met het feit dat de benodigde tijd voor deze stap sterk was onderschat en niet was opgenomen in het projectplan en de projectbegroting.

2.1 Data sets

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de gebruikte bronbestanden.

Tabel 2.1 Gebruikte bronbestanden met informatie over onttrekkingen

nr	Bestandsnaam	Verstrekker	Type inhoud	Gebied
1.	*locatie_grondwateronttrekking.shp*	HHD	Basisbestand info grondwaterinstallaties, gesloten- en open (WKO) bodemenergiesystemen	HHD
2.	*XYPuttenEnLussen.xlsx*	HHD	Putinformatie	HHD
3.	*Administratie_ZH_17032.xlsx*	HHD	Geregistreerde jaaronttrekkingen	HHD
4.	*Vergunde hvlhdn (beschkn) - 23 Jul 2018.csv*	HHD	Vergunde debieten op jaar/mnd/uurbasis	HHD
5.	*obes_westland.xlsx*	ODH*	WKO installaties, vergunde jaardebieten	GW

* Omgevingsdienst Haaglanden

2.2 Bewerkingen en analyse

Op basis van de bronbestanden zijn nieuwe bestanden gemaakt waarmee relevante typen van informatie in een GIS systeem gevisualiseerd kunnen worden.

2.2.1 Onderscheid tussen soorten systemen[1] en onttrekkingsdiepte

Gesloten bodemenergiesystemen die geen grondwater verpompen zijn verwijderd. Op basis van informatie over het gebruiksdoel zijn van bronbestand 1 aparte bestanden gemaakt voor soorten onttrekkingen/toepassingen: *WKO, beregening, koelwater, proceswater, drinkwater* en *anders*.
Binnen de categorie beregening kunnen *brijnsystemen* worden onderscheiden. Deze installaties worden hoofdzakelijk gebruikt voor de productie van gietwater in de glastuinbouw. De naamgeving ‘brijnsysteem’ duidt op het feit dat het onttrokken brakke water, dat hoofdzakelijk wordt onttrokken uit het 1e watervoerende pakket, met behulp van inverse

[1] *Algemene eigenschappen van enkele belangrijke soorten systemen zoals WKO- en brijnsystemen zijn opgenomen in bijlage B*

osmose wordt ontzilt, en dat het zoute residu (brijn) wordt geïnjecteerd in het 2e watervoerende pakket. In de dataset is ook informatie aangetroffen die duidt op brijnsystemen die onttrekken uit de Holocene deklaag. Deze kunnen apart worden onderscheiden. Voor WKO's is een apart bestand gemaakt voor installaties waarvoor een aanduiding aanwezig is dat deze zouden onttrekken uit het 1e watervoerende pakket. Het karakter en de debietsinformatie van speciale combinatiesystemen die zowel als WKO, brijnsysteem (en of regenwaterinfiltratiesysteem) lijken te zijn ingericht zijn niet goed uit de informatie op te maken. Deze systemen zijn daarom verwijderd uit de nieuw gecreëerde bestanden.

2.2.2 Koppeling met onttrekkingsinformatie

Bronbestand 1 geeft de 'capaciteit' op jaarbasis in m^3 voor vrijwel alle systemen. Dit komt over het algemeen overeen met het vergunde jaardebiet in bronbestanden 4 en 5. Afwijkende waarden die waarschijnlijk samenhangen met gebruik van een verkeerde tijdsbasis (uur in plaats van jaar) in bronbestand 1 zijn in enkele gevallen aangepast.

Voor brijnsystemen wordt over het algemeen zowel een onttrekkings- als een (brijn)infiltratiecapaciteit vermeld in bronbestand 1. Om onttrekkingscapaciteit in beeld te kunnen brengen zijn de veronderstelde infiltratiecapaciteiten uit de nieuwe bestanden verwijderd. De geografische coördinaten betreffen waarschijnlijk hoofdzakelijk adrescoördinaten omdat vrijwel altijd dezelfde coördinaten worden vermeld voor onttrekkings- en retourputten. WKO's bestaan uit koppels van koude en warme putten waarvan elk paar evenveel onttrekt (en infiltreert).

Op basis van het inrichtingsnummer van de systemen is het vergunde maanddebiet uit bronbestand 4 voor WKO's en brijnsystemen gekoppeld aan de nieuwe bestanden voor de verschillende soorten systemen.

Bronbestand 3 is gebruikt om het jaar van eerste registratie van onttrekkingshoeveelheid in het landelijk grondwater register (LGR) te bepalen voor WKO's en brijnsystemen. Dit eerste jaar van registratie is verwerkt in het GIS.

2.3 Resultaten

2.3.1 Ruimtelijke verdeling en 'grootte' van soorten onttrekkingssystemen

Tabel 2.2 toont dat onttrekkingssysteemcategorie 'anders' veruit de meeste systemen/inrichtingen vertegenwoordigd in het beheersgebied van HHD. Dit zijn over het algemeen tijdelijke, of alleen bij calamiteiten te gebruiken onttrekkingen en zijn in de studie verder niet beschouwd. Er zijn ca 300 WKO systemen waarvan ruim 50 systemen onttrekken (en opslaan) in het 1e watervoerende pakket. Er zijn meer dan 540 beregeningsinrichtingen waaronder ca. 325 brijnsystemen. Voor de categorieën koelwater, proceswater en drinkwater gaat het om één tot enkele tientallen van systemen.

De vergunde capaciteit binnen de verschillende categorieën verschilt sterk. De kaarten in bijlage B geven een beeld van de ruimtelijke verdeling van de verschillende soorten systemen en van de capaciteit van de systemen op jaarbasis.

Tabel 2.2 Soorten van onttrekkingen met enkele kengetallen

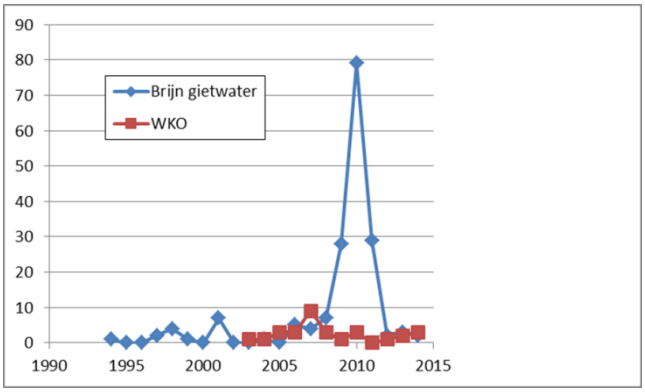
		aantal systemen	capaciteit jaarbasis (m3*1000) per systeem		opmerkingen
			min.	max.	
WKO	Westland	37	110	2900	*obes_westland*
	hele dataset	300			*locatie_grondwateronttrekking*
	1e WVP	57		1550	*locatie_grondwateronttrekking*
Beregening	alle	542			
	brijnsystemen	325	1.2	200	combinatie met WKO soms hogere capaciteit
	brijnsystemen deklaag	54	3.9	100	max. bron capaciteit 50 ? soms ook retour in deklaag
Koelwater		25	0.1	13500	veruit grootste DSM, Delft
Proceswater		15	0.03	60	
Drinkwater		11	0.7	45000	grote: Dunea Meijendel en Solleveld (duinen)
Anders		2753			bronnering, brandputten, sanering e.d.

Het is belangrijk om te vermelden dat diverse eerdere studies (Agerimaco, 2010; Faneca Sanchez e.a., 2012 bijlage D) al hebben geconstateerd dat een sluitend overzicht van het daadwerkelijke aantal brijnsystemen en de daadwerkelijke omvang van de onttrekkingen van deze systemen ontbreekt en wordt onderschat op basis van de geregistreerde informatie.

2.3.2 Temporele ontwikkeling van onttrekkingen

Om grondwaterpeilverlagingen en bodemdaling te relateren aan onttrekkingen is informatie over de toename van het aantal onttrekkingssystemen met de tijd, en, bij voorkeur informatie over het tijdstip van ingebruikname van individuele onttrekkingssystemen bijzonder wenselijk.

Figuur 2.1 geeft een indruk van de toename van het aantal WKO systemen en brijnsystemen over de laatste decennia. Voor WKO systemen in het Westland lijkt te toename vrij geleidelijk te zijn geweest. De grafiek voor brijnsystemen suggereert een enorme toename van het aantal systemen rond 2010. Kaarten 8 en 9 in bijlage 8B tonen de betreffende informatie in kaartbeeld. Diverse partners in het project vermoeden echter dat dit beeld sterk vertekend is en te maken heeft met de invoering van de Waterwet in 2009 waardoor veel bestaande brijnsystemen voor het eerst werden opgenomen in de LGR registratie. Er lijkt daardoor geen betrouwbare informatie beschikbaar om de ontwikkeling van brijnsystemen goed in beeld te brengen. De oudere systemen dateren van de eerste helft van de jaren ’90. Verwacht wordt dat de droge zomer van 2003 voor veel tuinders aanleiding is geweest om brijnsysteem te installeren.



Figuur 2.1 Aantallen systemen uitgezet tegen het jaar van eerste registratie van de onttrokken jaarhoeveelheid in het landelijk grondwater register (LGR) voor brijnsystemen, en tegen het jaar van vergunning voor WKO systemen. De grafiek voor brijnsystemen betreft het hele HHD gebied. De grafiek voor WKO systemen is gebaseerd op systemen in de gemeente Westland.

Op het terrein van DSM in Delft Noord vindt sinds 1916 een onttrekking voor koelwater plaats uit het 1e watervoerende pakket (zie kaart 4, bijlage 8B). Deze grote onttrekking (capaciteit van ca. 13,5 miljoen m^3/jaar) was al ruime tijd actief aan het begin van de studieperiode (laatste dertig jaar). Als de onttrekking heeft geleid tot bodemdaling (wat zeker verwacht mag worden), zal het overgrote deel van die daling zich verder in het verleden zijn opgetreden. Die daling is geen onderdeel van de huidige studie. Sinds de zomer van 2017 wordt de onttrekking stapsgewijs afgebouwd over een periode van tien jaar. Dit zal aanleiding geven tot stijghoogtetoename en bodemstijging (prognoses zijn opgenomen in voorgaand onderzoek (Roelofsen e.a., 2008)). In paragraaf 3.5 wordt op basis van een grondwatermodel een indruk gegeven van de grote van de stijghoogte toename die op termijn verwacht mag worden.

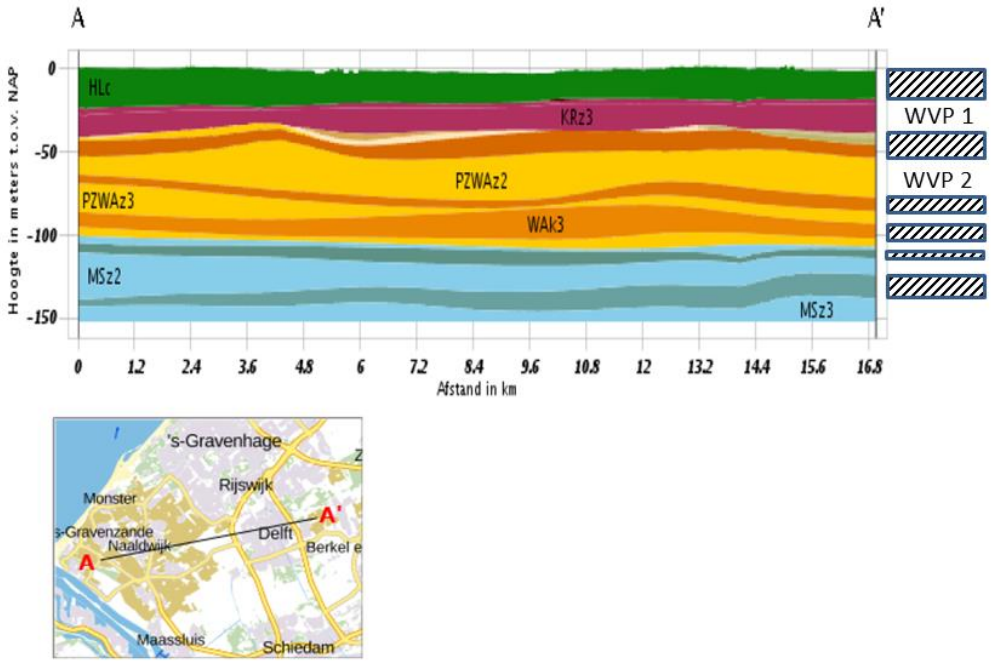
3 Grondwaterpeilverlaging

Dit hoofdstuk presenteert de onderzoekstap die gericht is op grondwaterpeilverlaging[2] in het interessegebied in de afgelopen dertig jaar en de relatie daarvan met onttrekkingen. Naast peilverlaging wordt ook kort ingegaan op de verwachte verhoging van de stijghoogte door de afbouw van de DSM onttrekking in Delft.

3.1 Aanpak

3.1.1 Analyse van waarnemingen

Voor het eerste deel van de aanpak zijn grondwaterpeilwaarnemingen (tijdreeksen verkregen door monitoring) geanalyseerd. De gebruikte datasets zijn vermeld in paragraaf 3.2. Naast de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket is, waar beschikbaar, het peil van een bijbehorend 'ondiep filter' in de bovenkant van de Holocene deklaag beschouwd om eventuele invloeden van stijghoogteverlaging op het freatisch niveau te onderzoeken. Figuur 3.1 geeft aan wat wordt verstaan onder het 1e watervoerende pakket met behulp van een profieluitsnede uit het ondergrondmodel Regis II.



Figuur 3.1 Aanduiding van enkele watervoerende pakketten zoals bedoeld in deze studie (rechterdeel figuur). Het profiel is een uitsnede uit Regis II. Het eerste watervoerende pakket (WVP 1) bevindt zich tussen de Holocene deklaag (HLc) en de ondiepste oranjebruine slechtdoorlatende laag (geen annotatie; Waalre Klei 1: WAk1). Het pakket bestaat hoofdzakelijk uit zanden van de Kreftenheye Formatie.

Peilverlagingen (of afwezigheid daarvan) zijn visueel geïnterpreteerd op basis van grafische weergave van de onbewerkte tijdreeksen (Bijlage 8C). Er wordt onderscheid gemaakt tussen direct en indirect bepaalde verlaging. Die methoden worden als volgt omschreven:

[2] *Peil betreft zowel stijghoogte als het freatisch niveau (grondwaterstand).*

Directe bepaling. Een verlaging is direct bepaald als deze is geconstateerd op basis van een verandering die te zien is in een tijdreeks van een individuele waarnemingsput (en één filter). De betrouwbaarheid van een direct geconstateerde verlaging is groot. Het gaat er hierbij dus niet om of er grote seizoensverlaging te zien is in de tijdreeks, maar of in de reeks te zien is dat de seizoensverlaging is toegenomen (dat is de relevante verlaging in deze studie).

Indirecte bepaling. Bij indirecte bepaling van een verlaging wordt het peil van een put waarvoor alleen een recente periode gemonitord is, verlaagd *geacht* ten opzichte van een eerdere periode waarvoor geen metingen voor de put aanwezig zijn. Voor de constatering is interpretatie nodig. De verwachting over het hogere oude peil berust in het algemeen op tijdreeksen voor de voorgaande periode die wel aanwezig zijn voor putten in de omgeving (afstand is hierbij relevant) of op basis van algemene kennis van het grondwatersysteem.

De indirecte methode is niet gebruikt om verlagingen voor ondiepe filters in de deklaag te bepalen omdat de ondiepe seizoensdynamiek en peilen een sterke variatie kunnen vertonen over relatief korte afstand. Ruimtelijke verschillen voor verschillende perioden betekent niet noodzakelijk dat er een verandering in de tijd is opgetreden.

3.1.2 Duiding op basis van de kennis over onttrekkingen, theorie en modellering

In het tweede deel van de aanpak is relevante theoretische kennis over verlagingen door grondwateronttrekkingen gebruikt om meer inzicht te krijgen in het ruimtelijke beeld van verlagingen. Daarbij zijn ook enkele modelberekeningen uitgevoerd om interpretaties te onderbouwen en illustreren.

3.2 Datasets

Voor de analyse van waarnemingen is gebruik gemaakt van vier datasets weergegeven in Tabel 3.1. De waarnemingsputten van dataset 2 en 3 corresponderen over het algemeen met die van Dinoloket (dataset 1) en zijn gebruikt om de laatste tijdreeksen te ‘complementeren’.

Tabel 3.1 Gebruikte grondwatermonitoringsinformatie

Nr	Dataset	Dekkingsperiode (ongeveer)
1	Dinoloket (TNO)	Vóór 2012
2	Provinciaal meetnet ZH	Vanaf 2013
3	Gemeente Delft meetnet DSM onttrekking	Vanaf 2013
4	Gemeente Westland meetnet	Juli 2016-juli 2017

3.3 Resultaten

3.3.1 Stijghoogte in het 1e watervoerende pakket op basis van waarnemingen

De data bevatten alleen aanwijzingen voor stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket voor het zomerseizoen. Er zijn géén aanwijzingen voor verlaging van de winterstijghoogte gevonden. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de resultaten. Grafische weergaven van de betreffende tijdreeksen zijn opgenomen in Bijlage 8C.

Figuur 3.2 toont de locaties van de putten die zijn opgenomen in Tabel 3.1 in kaartbeeld. Figuur 3.3 laat de geïnterpreteerde verlagingen zien waarbij is aangegeven of de verlaging direct of indirect is bepaald.

Via directe constatering zijn verlagingen gevonden voor 4 waarnemingsputten. Van 3 putten is de verlaging erg klein (0.3 m), voor één waarneming bedraagt de verlaging 1.0 m. Voor 7 putten is op basis van directe constatering géén verlaging opgetreden. Via indirecte constatering zijn verlagingen geschat voor 16 putten, met waarden variërend van 0.6 - 3.2 m. Alle gevonden verlagingen van 0.5 m of meer bevinden zich in het oostelijk deel van de gemeente Westland in De Lier en ruime omgeving (Figuur 3.3).

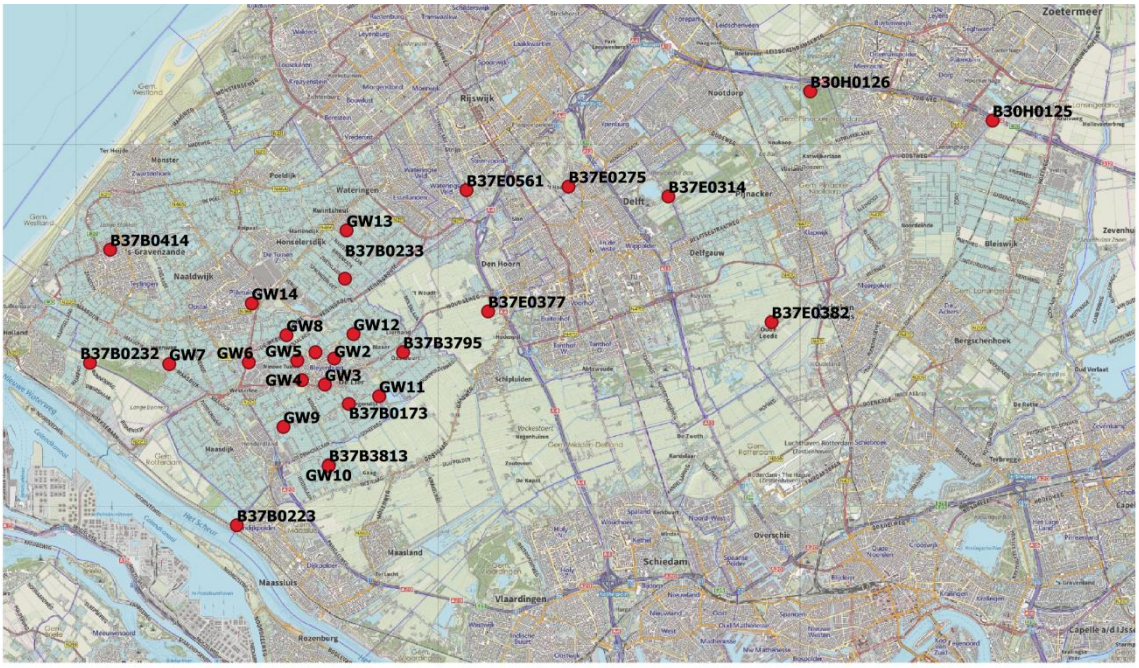
De waarden van de gerapporteerde verlaging zijn een maat voor de maximale verlaging die optreedt in het zomerseizoen voor het betreffende waarnemingspunt. Inspectie van de tijdreeksen van o.a. B37B95, B37B3813, GW7 en GW9 () laten zien dat de stijghoogte met ruim 1 m kan fluctueren op een tijdschaal van een week tot een maand binnen het zomerseizoen.

Het moment waarop verlaging optreedt, of de tijdsontwikkeling van verlaging, is alleen voor de eerste vier putten in Tabel 3.2 redelijk goed gedocumenteerd. Er is daarmee een zeer slecht beeld van de tijdsontwikkeling van de geconstateerde verlagingen.

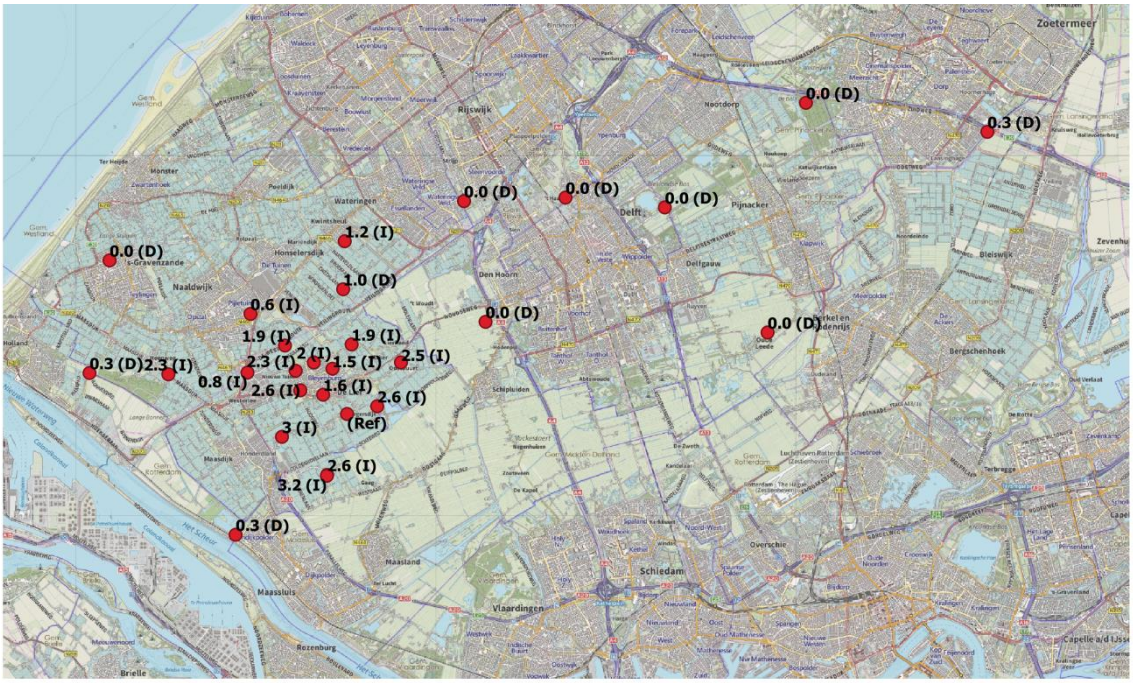
Voor grote delen van de gemeente Westland zijn er weinig of geen waarnemingspunten om eventuele verlagingen te kunnen constateren. Dat is bijvoorbeeld het geval in het noorden rond Poeldijk, en tussen Hoek van Holland en Maasdijk.

Tabel 3.2 Overzicht resultaten zomerstijghoogte 1e watervoerende pakket

constatering	put	verlaging (m)	moment verlaging	opmerking
direct	B37B0233	1	2003-2009 (geleidelijk)	uitschieter 2.5m in 2009
	B37B0232	0.3	tussen 2009-2014	
	B37B0223	0.3-0.4	2000	
	B30H0125	0.3	2002 of 2005	in '70er jaren was peil eerder zo laag
	B37B0414	-	nvt	vanaf 2003
	B37E0382	-	nvt	vanaf 1992
	B37E0377	-	nvt	vanaf 1971; seizoensvariatie ca. 1.0 m
	B37E0314	-	nvt	geleidelijke verhoging vanaf ~ 2000 ca. 0.8 m
	B37E0275	-	nvt	geleidelijke verhoging vanaf ~ 2000 ca. 3.5 m
	B30H0126	-	nvt	vanaf 1972
	B37E0561	-	nvt	geleidelijke verhoging tussen 1999 en 2003
indirect	B37B3795	2.5-2.6	tussen 1980-2009	tov B37B0173 '70er jaren; seizoenaliteit 0.4 m
	B37B3813	2.6-2.7	tussen 1980-2009	tov B37B0173 '70er jaren; seizoenaliteit 0.4 m
	GW1	2.0	voor 2017	op basis schatting onverstoorde seizoenaliteit 0.4 m
	GW2	1.5-1.6	voor 2017	idem
	GW3	1.6	voor 2017	idem
	GW4	2.6	voor 2017	idem
	GW5	2.3	voor 2017	idem
	GW6	0.8	voor 2017	idem; niet in WVP maar tussenlaag binnen deklaag
	GW7	2.3	voor 2017	idem
	GW8	1.9	voor 2017	idem
	GW9	3.0	voor 2017	idem
	GW10	3.2	voor 2017	idem
	GW11	2.6	voor 2017	idem
	GW12	1.9	voor 2017	idem
	GW13	1.2	voor 2017	idem
	GW14	0.6	voor 2017	idem



Figuur 3.2 Naam en locatie van de waarnemingsputten waarvoor resultaten zijn vermeld in Tabel 3.2.



Figuur 3.3 Grootte van de gevonden verlaging van de stijghoogte in het 1e watervoerende pakket. (D) en (I) geven aan dat de verlaging (of afwezigheid ervan) is bepaald het behulp van directe, respectievelijk indirecte bepaling. (Ref) geeft aan dat het om een referentieput gaat waarvan de seizoensdynamiek voor een relatief oude periode is gebruikt om verlaging voor putten in de omgeving af te leiden via indirecte bepaling.

3.3.2 Verlaging van peilen van ondiepe filters in de deklaag

Verlaging van het peil in het bovenste deel van de deklaag is gevonden voor één waarnemingspunt: B37B0233 (Bijlage 8C). Het betreft een heel geleidelijke verlaging van 20 a 25 cm in de periode van 1995 tot 2017. Zonder verder onderzoek is niet vast te stellen of de verlaging wordt veroorzaakt door de verlaging van ca. 1 m in het 1e watervoerende pakket op die locatie.

3.4 Interpretatie

Over de geconstateerde verlagingen op basis van grondwaterpeilwaarnemingen (puntlocaties) kan het volgende aanvullend worden gezegd.

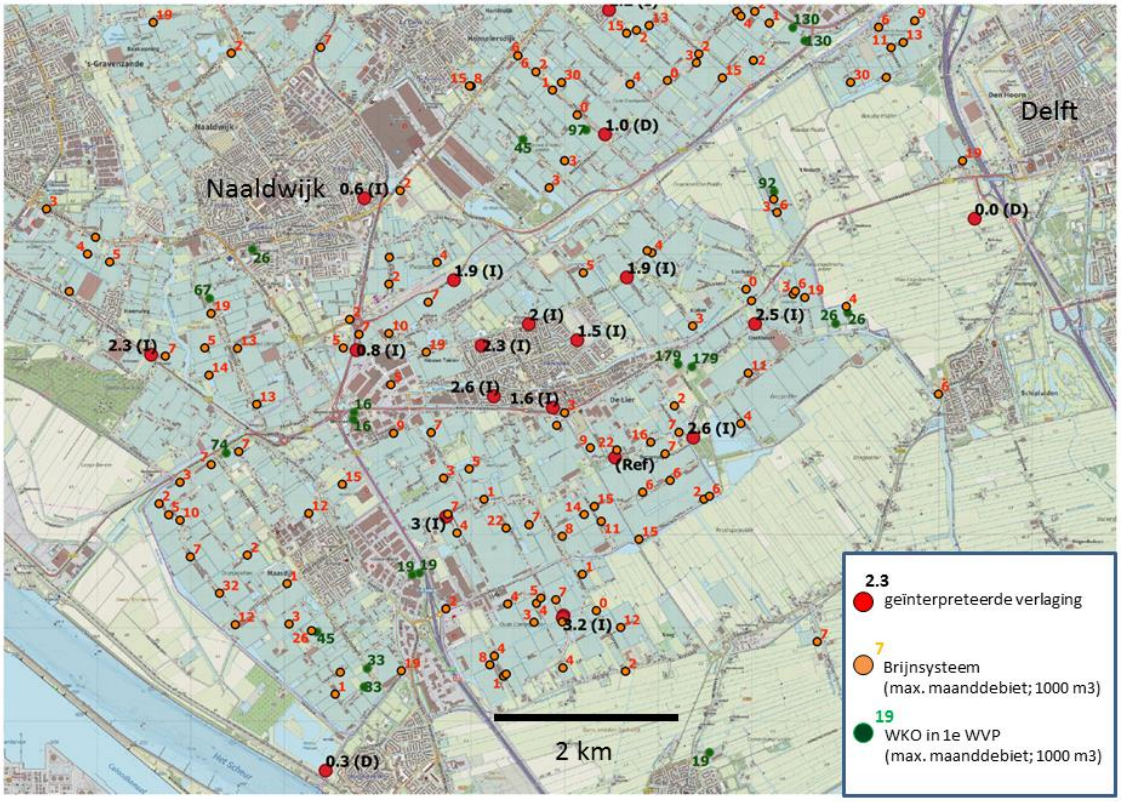
De gevonden verlaging van de stijghoogte in het 1^{e} watervoerende pakket wordt vrijwel geheel veroorzaakt door de seizoensonttrekkingen voor de glastuinbouw (brijnsystemen).

De belangrijkste argumenten voor deze constatering zijn:

1. De waargenomen verlagingen doen zich voor in een gebied waarin brijnsystemen op grote schaal en met een hoge systeem-dichtheid voorkomen (Figuur 3.4). Deze systemen onttrekken hoofdzakelijk uit het 1^{e} watervoerende pakket en alleen in het beregeningsseizoen.
2. Er zijn, ook WKO systemen actief in het 1^{e} watervoerende pakket (Figuur 3.4), maar met een veel kleinere systeem-dichtheid (kaart 1). Bovendien veroorzaken WKO systemen op jaarbasis zowel verlaging als verhoging van de stijghoogte doordat de putten afwisselend voor opslag en onttrekking worden gebruikt. Seizoenale verhoging is niet waargenomen.

De relatief hoge dichtheid van brijnsystemen zorgt, samen met de eigenschappen van het grondwatersysteem, in het zomerseizoen voor een algemene verlaging in de ruime omgeving van De Lier; daarbovenop neemt de verlaging lokaal toe rond de individuele onttrekkingsputten. Het verlagingsbeeld is ruimtelijk vrij complex.

Figuur 3.5 illustreert dit beeld met behulp van een modelberekening. De invloedsgebieden van de individuele onttrekkingen zijn vrij groot en overlappen elkaar daardoor deels. De verlaging van een individuele onttrekking wordt daardoor versterkt door bijdragen van andere onttrekkingen in de nabije omgeving (superpositie). Dit zorgt voor de algemene ‘regionale’ verlaging met piekverlaging rond onttrekkingsputten. Het verlagingsbeeld zal in werkelijkheid vrij complex zijn door diverse onderlinge afstanden tussen de systemen en verschillen in onttrekkingsdebieten.



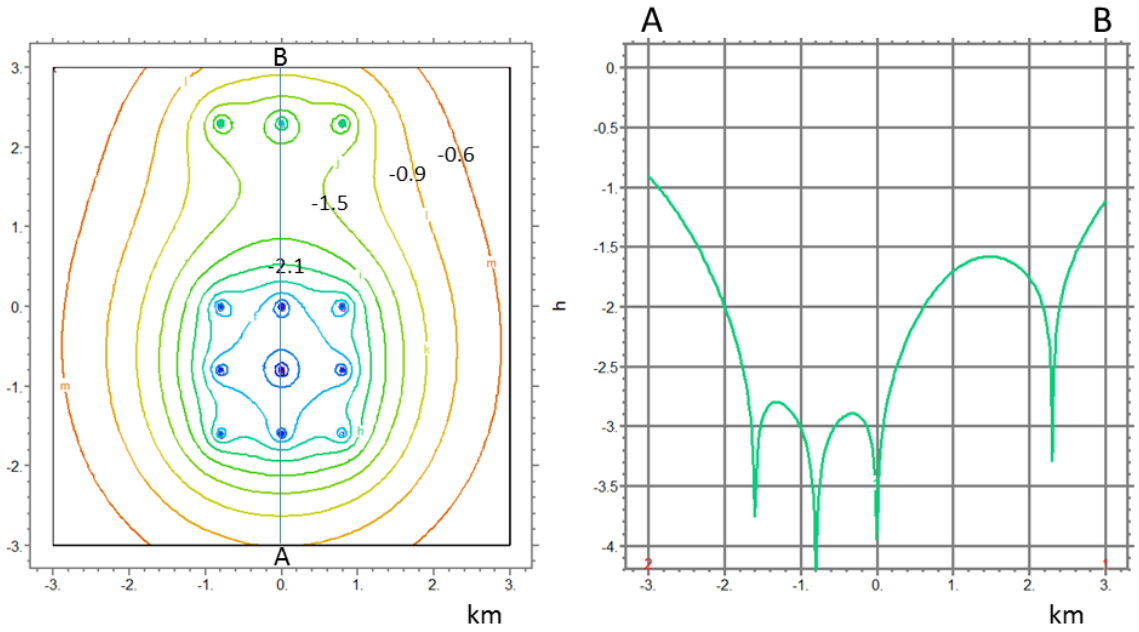
Figuur 3.4 Kaart van het gebied in het oostelijk deel van de gemeente Westland waar verlagingen zijn geconstateerd. Naast de gevonden verlagingen zijn de locaties en de vergunde maanddebieten van brijnsystemen en WKO systemen die actief zijn in het 1e watervoerende pakket aangegeven. Aantallen en debieten betreffen zeer waarschijnlijk een onderschatting (2.3.1).

De verlaging die wordt veroorzaakt door een WKO doublet in het 1e watervoerende pakket beperkt zich in de zomer tot de directe omgeving van de koude bron. De gelijktijdige infiltratie in de warme bron (op vrij kleine afstand) compenseert de verlaging op wat grotere afstand van de koude bron. In de winter beperkt de verlaging zich tot de directe omgeving van de warme bron waar in dat seizoen uit wordt onttrokken.

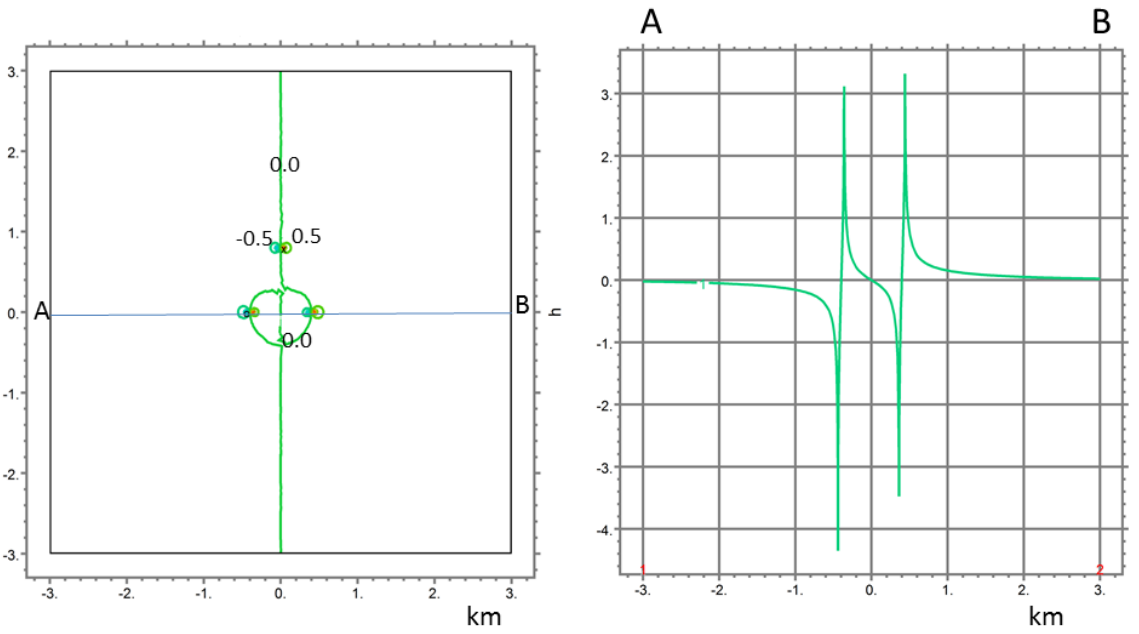
Het beperkte invloedsgebied van individuele WKO systemen wordt geïllustreerd met de modelberekening van Figuur 3.6.

Waarschijnlijk komen grotere verlagingen voor dan het maximum dat in de waarnemingen is gevonden (3.2 m).

Deze verwachting volgt uit het relatief beperkt aantal waarnemingspunten waarvoor verlaging kan worden bepaald en het complexe ruimtelijke verlagingsveld waarin zowel de afstand tot onttrekkingsfilters als de grote van de onttrekkingen een belangrijke rol spelen.



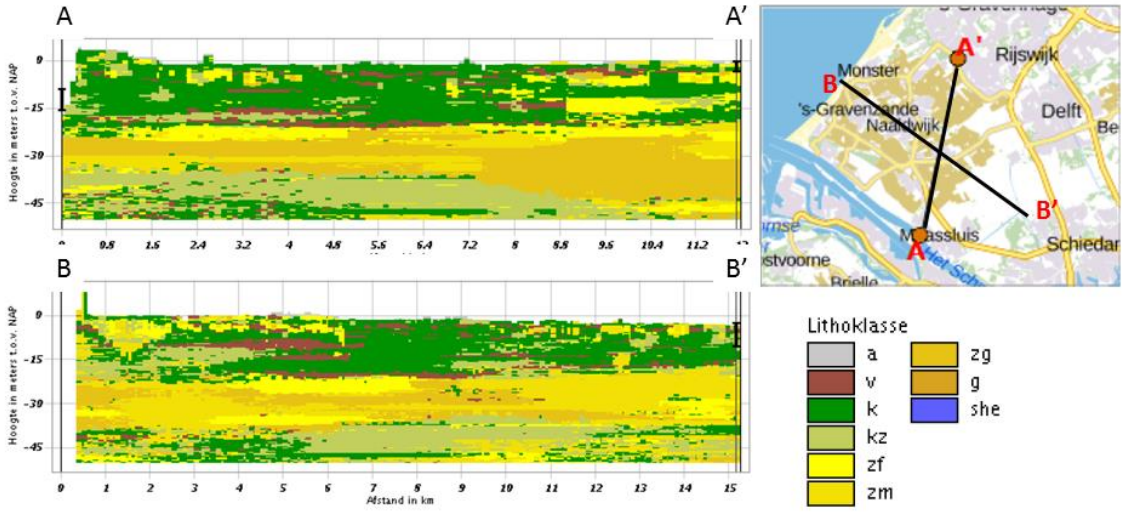
Figuur 3.5 Illustratieve berekening van de stijghoogteverlaging (stationair) in het 1e watervoerende pakket veroorzaakt door meerdere onttrekkingen die tegelijkertijd actief zijn. Links: kaartbeeld; rechts: 'zuid-noord' profiel.De kleinste onderlinge afstand tussen putten is 800 m. Elk systeem onttrekt 1000 m³/dag (ongeveer overeenkomend met het grootste vergunde debiet van brijnsystemen in het GIS). De KD-waarde van het watervoerende pakket is 500 m²/dag en de C-waarde van de deklaag 6000 dagen.



Figuur 3.6 Illustratieve berekening van de stijghoogte (stationair) veroorzaakt door een drietal WKO-doubletten in het 1e watervoerende pakket. Links: kaartbeeld; rechts: 'west-oost' profiel door het hart van twee systemen. De onderlinge afstand van de putten van elk doublet is 80 m. Elk doublet onttrekt en injecteert 2500 m³/dag (middelgroot WKO systeem). Ondergrondparameters als in *Figuur 3.5*.

De gemeten verlagingen zijn erg groot om te verklaren op basis van de systemen en vergunde maanddebieten die zijn opgenomen in het GIS en die zijn weergegeven in Figuur 3.4***. Dit lijkt erop te wijzen dat er meer onttrekkingen zijn en/of daadwerkelijke onttrekkingen groter zijn dan in de gebruikte dataset.***

In Figuur 3.4 zijn vrij forse verlagingen van 2 m of meer te zien in een omgeving waarin de dichtheid van brijnsystemen volgens het GIS bestand vrij gering is en de grootte van de maanddebieten van de systemen klein ten opzichte van de debieten die zijn gebruikt in de illustratieve modelberekening van Figuur 3.5. De debieten van de individuele systemen in het model corresponderen met maanddebieten van ca. 30 duizend m^3. In het model zijn bovendien de waarden van ondergrondparameters gunstig gekozen om grote verlagingen te genereren (relatief kleine KD en grote C). De waarden lijken echter niet onrealistisch gezien de aanwezigheid van basisveen en een grote fractie klei in de deklaag rond De Lier. De onderliggende zanden van het watervoerende pakket worden kleiig vanaf ca 35 m –NAP. Het meer doorlatende deel van het watervoerende pakket is daardoor mogelijk relatief dun en de KD-waarde vrij klein.



Figuur 3.7 Profielen door het ondergrondmodel GEOTOP in het studiegebied. De kleuren geven de meest waarschijnlijke lithoklasse weer.

Voor het westelijk deel van de gemeente Westland wordt verwacht dat stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket veel geringer is dan in het oostelijk deel van de gemeente.

In het westelijk deel van het Westland is de deklaag meer zandig van samenstelling, en is de C-waarde van de deklaag naar verwachting aanzienlijk kleiner dan in het oostelijk deel. Dit zorgt bij vergelijkbare onttrekkingsomstandigheden voor een kleinere stijghoogteverlaging, maar mogelijk wel voor een iets grotere verlaging van het freatisch niveau.

De stijghoogteverlaging in het watervoerende pakket past zich op een tijdschaal van dagen tot enkele weken aan een veranderd onttrekkingsdebiet.

Dit volgt uit schattingen op basis van een analytische oplossing voor het tijdsgedrag van verlaging door onttrekking in een watervoerend pakket onder een weerstandslaag (Walton's methode; Kruzeman en de Ridder (2000)). Voor de parameterwaarden van het model van

Figuur 3.5 en een bergingscoëfficient S=0.001 van het watervoerende pakket geldt bijvoorbeeld dat op een afstand van één maal de spreidingslengte (l = 1700 m) de verlaging 85% is aangepast aan een verandering (bijvoorbeeld stoppen van onttrekking) na ca. 7 dagen. Dichterbij de onttrekking is de aanpassing sneller en verder weg langzamer. Dat de verlaging zich vrij snel aanpast aan veranderingen in het onttrekkingsdebiet valt ook op te maken uit een aantal van de stijghoogtetijdreeksen bij Bijlage 8C (b.v. B37B3795; B37B3813; GW7; GW9).

N.B. De aanpassing van stijghoogteverlaging in de deklaag kan aanzienlijk langer duren, vooral waar de deklaag bestaat uit klei en veen.

Er mag verwacht worden dat op grotere afstand van watergangen gedurende het zomerseizoen door de onttrekkingen verlagingen van het freatisch niveau kunnen optreden van de orde van enkele decimeters.

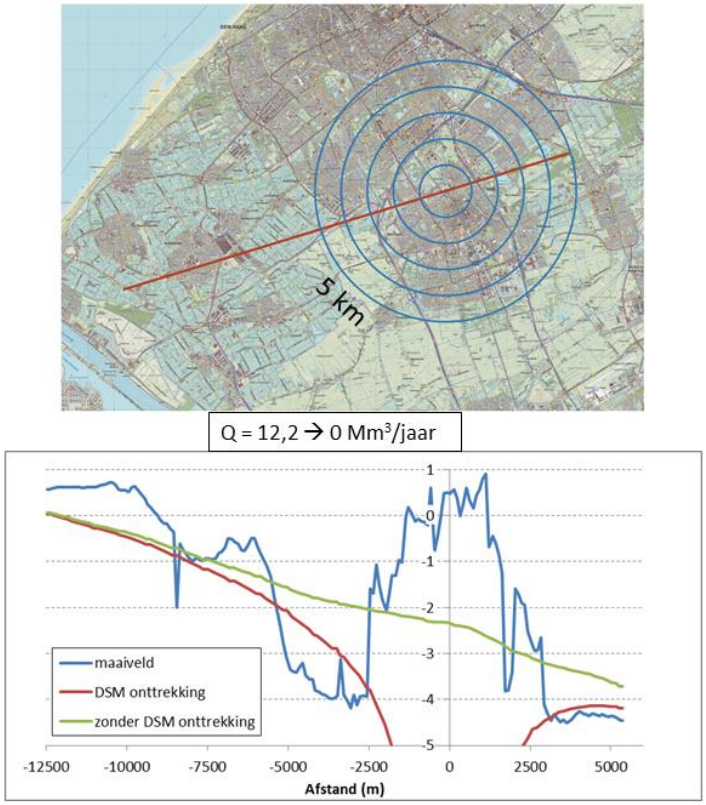
De verticale stroming door de deklaag naar het watervoerende pakket die wordt veroorzaakt door de onttrekkingen kan, wanneer een stationaire stromingstoestand is bereikt, worden geschat op basis van het potentiaalverschil over de deklaag door de verlaging en de deklaagweerstand: $q = \Delta h / C$. Als er (in de zomerperiode) weinig of geen aanvulling van het freatisch niveau plaatsvindt vanuit neerslag veroorzaakt dit een extra grondwaterstandsdaling bovenop de daling die er zou zijn zonder invloed van de onttrekkingen.

Het illustratieve model van Figuur 3.5 geeft aan dat er waarschijnlijk een grote gemiddelde weerstand (~ 6000 dagen) aanwezig is in de omgeving van De Lier om een verlagingen van 2 a 3 meter te genereren. Dit geeft een kleine verticale stroming van minder dan een halve millimeter per dag. Waar de weerstand lokaal wat kleiner is kan een sterkere stroming worden bereikt; bijvoorbeeld 1 mm/dag voor Δh=2 m en C = 2000 dagen. Als deze stroming ca. 50 dagen wordt aangehouden zal de freatische grondwaterstand daardoor makkelijk 2 a 3 decimeter kunnen dalen (ten opzichte van de situatie zonder invloed van verlaging in het 1^{e} watervoerende pakket). Levering van water uit de deklaag zelf (specifieke berging) vermindert deze schatting. Seizoenale levering van water uit de deklaag resulteert echter in seizoenale maaiveldbeweging. De resultaten van hoofdstuk 4 en hoofdstuk 5 laten zien dat deze component vrij klein is (orde van 1 cm).

3.5 Invloed van de afbouw dan de DSM winning te Delft op de stijghoogte

Op en rond het bedrijfsterrein van DSM (voormalig Gist-Brocades) in Delft Noord wordt sinds 1916 een grote hoeveelheid grondwater onttrokken uit het 1^{e} watervoerende pakket. In de 70'er, 80'er en 90'er jaren bedroeg de onttrekking ca. 12 miljoen m^3/jaar, sinds 2004 ca. 10.5 miljoen m^3/jaar, en in 2017 is gestart met het plan om de onttrekking over een periode van tien jaar af te bouwen (Acacia Water, 2018). Door de afbouw zal de stijghoogte op en rond het puttenveld sterk toenemen, maar in beperktere mate ook op relatief grote afstand voor een stijghoogtetoename zorgen.

Figuur 3.8 toont de berekende stijghoogte (ruim) vóór en na de afbouw van de onttrekking op basis van het 'Delfland model' (Roelofsen et al., 2008). Uit de figuur valt op te maken dat de stijghoogtetoename aan de oostrand van het kassengebied van het Westland, op ca. 5 km van de onttrekking, naar verwachting maximaal een halve meter zal bedragen.



Figuur 3.8 Stijghoogtetoename door het stoppen van de DSM winning (rode --> groene curve) voor de profiellijn die wordt getoond op de kaart. Op basis van berekening met het 'Delfland model' (Roelofsen et al.,2008).

4 Modellering van bodemdaling

In het vorige hoofdstuk is de aard van de grondwaterpeilverlaging door grondwateronttrekking in het studiegebied in beeld gebracht. In dit hoofdstuk wordt die kennis gecombineerd met de huidige proceskennis over de bodemmechanische reactie op zulke peilverlagingen en daarmee de door de verlagingen veroorzaakte bodemdaling te karakteriseren. Het betreft dus verwachtingen op theoretische gronden over de aard van de bodemdaling (grootte en tijdsontwikkeling). Deze verwachtingen worden gegenereerd met behulp van procesmodellen. Met bodemdaling wordt hier bedoeld: maaivelddaling.

4.1 Aanpak

4.1.1 Modelinstrument

De modellering is uitgevoerd met een door Deltares ontwikkeld modelinstrument. Dat instrument maakt gebruikt van een commercieel softwarepakket (FlexPDE) voor het oplossen van een door de gebruiker gespecifieerde set van gekoppelde partiële differentiaalvergelijkingen. Het softwarepakket maakt gebruikt van de eindige-elementen methode. Het modelinstrument bestaat uit een script met instructies voor het op te lossen wiskundige probleem waarin modellagen, parameterwaarden en randvoorwaarden flexibel kunnen worden gevarieerd.

Het wiskundige probleem dat in deze studie is gebruikt beschrijft: (1) grondwaterstroming en de bijbehorende tijdsontwikkeling van de stijghoogte en de spanningstoestand binnen bodemlagen; (2) de verticale vervorming (samendrukking/expansie) van de bodemlagen onder invloed van de tijdsontwikkeling van de spanningstoestand. Uit de verticale vervorming van de lagen wordt de verticale beweging van het maaiveld berekend. De vervormingsberekeningen (NEN-Bjerrum model) maken gebruik van de theorie die ten grondslag ligt aan het isotache model (Den Haan, 1994). Het isotache model is sinds 2005 jaar het gangbare model voor zettingsberekeningen in de geotechniek in Nederland en wordt onder andere toegepast in het softwarepakket DSettlement dat door Deltares is ontwikkeld. De berekende vervorming bestaat uit een elastisch en een niet-elastisch deel. Het niet elastische-deel ontstaat door kruip. Kruip is het heel geleidelijk samendrukken van de bodem met een bepaalde snelheid. In een bodem die decennia onverstoord is gebleven is de kruipsnelheid heel erg klein. De kruipsnelheid neemt toe als de korrelspanning in het korrelskelet van de bodem toeneemt. De korrelspanning kan toenemen door het aanbrengen van een bovenlast (bijvoorbeeld een ophoging), wat aanleiding geeft tot zetting, maar ook door de waterspanning in de poriën te verlagen. Dat laatste vindt plaats als gevolg van grondwateronttrekking en stijghoogteverlaging en is het relevante proces in de huidige studie.

4.1.2 Uitgangspunten

De belangrijkste uitgangspunten voor de berekeningen zijn de volgende:

- Alleen de vervorming (compressie) van de Holocene deklaag wordt beschouwd. Eventuele bijdragen van diepere lagen (beneden de basis van het Holoceen; ook evt. binnen het watervoerende pakket) worden niet meegenomen. Hoewel er geen goede kennis is over de compressiegevoeligheid van diepere lagen, wordt verwacht dat deze relatief klein is in vergelijking met die van de deklaag door de grotere bovenlast van die

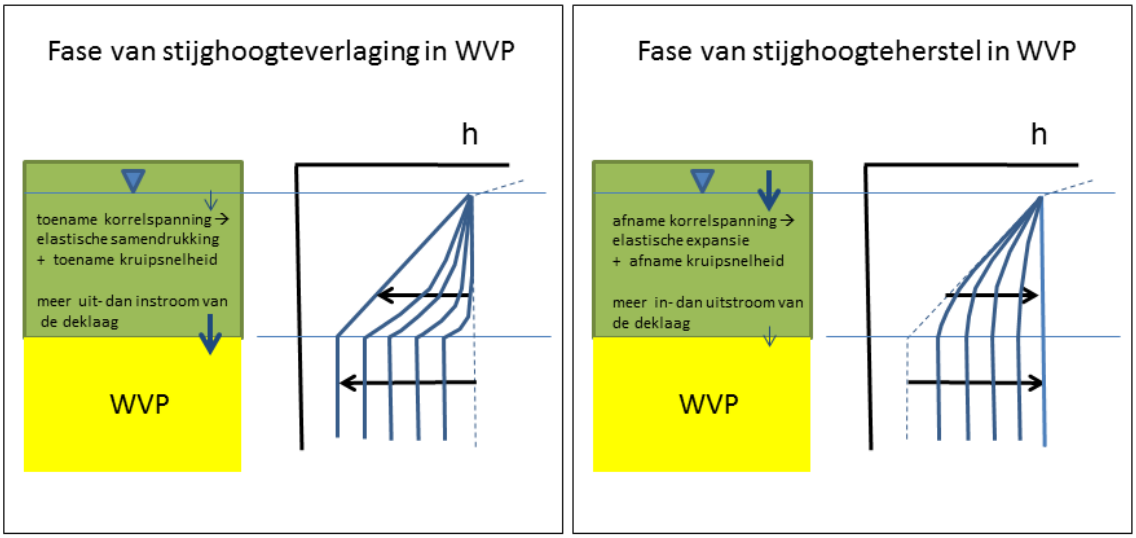
lagen en historische belasting (bijvoorbeeld lage grondwaterstanden in glaciale perioden) en de ouderdom van de lagen.
- De grondwaterstroming binnen de deklaag die wordt veroorzaakt door stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket wordt verondersteld verticaal te zijn gericht. De berekeningen worden daardoor 1-dimensionaal en kunnen daardoor worden toegepast voor individuele boorprofielen.
- Vervorming/compressie wordt alleen berekend voor het deel van de ondergrond dat verzadigd is (en blijft). Eventuele bijdragen aan bodemdaling die voortkomen uit processen boven het freatisch niveau, en met name door verlaging van het freatisch niveau, worden met het model niet gekwantificeerd. Daarbij kan gedacht worden aan maaivelddaling door (versterkte) oxidatie van organisch materiaal en krimp van het deel van de bodem dat permanent of vaker 'droogvalt'.
- Het freatisch niveau wordt constant gehouden en verondersteld niet te worden beïnvloed door de verlaging in het 1e watervoerende pakket.
- De autonome maaivelddaling door kruip in het Holocene pakket (voorafgaand aan de stijghoogteverlaging in het watervoerende pakket), wordt verondersteld klein te zijn (ca. 1 mm/jaar).

4.1.3 Kwalitatieve beschrijving van het model

Figuur 4.1 geeft een kwalitatief beeld de verschillende processen die in het model worden doorgerekend. De seizoenale cyclus van stijghoogteverlaging en herstel in het 1e watervoerende pakket (WVP) wordt als randvoorwaarde aan de onderkant van de deklaag opgelegd. De reactie van de deklaag daarop wordt gemodelleerd.

Tijdens de fase van stijghoogteverlaging in het WVP wordt grondwater vanuit de deklaag richting het WVP gezogen (linkerdeel van Figuur 4.1). Daardoor neemt de waterspanning in de deklaag af en gaat de stijghoogte in de deklaag omlaag. Onderin de deklaag gebeurt de verlaging eerder en in sterkere mate dan bovenin de deklaag. In deze fase wordt er meer grondwater uit de deklaag onttrokken dan er bij het freatisch niveau wordt aangevuld. Doordat de waterspanning in de poriën in de deklaag afneemt, krijgt het korrelskelet van het materiaal waar waaruit de deklaag bestaat meer van het bovenliggende grondgewicht te dragen. De korrelspanning neemt daardoor toe. Hierdoor ontstaan twee soorten vervormingen. (1) Het korrelskelet wordt elastisch samengedrukt (elastisch betekent dat het kan terugveren als de korrelspanning afneemt). (2) De snelheid van kruipvervorming neemt toe. De samendrukking die ontstaat door de kruip is onomkeerbaar.

Na het hoogtepunt van de onttrekking neemt de stijghoogte in het WVP weer toe (rechterdeel van Figuur 4.1). Hierdoor wordt de uitstroom aan de onderzijde van de deklaag naar het WVP sterk verminderd (en kan in sommige situaties omkeren naar instroom). Samen met de instroom van (en doorstroom binnen) de deklaag die door de vorige fase op gang is gebracht, neemt de waterspanning in de deklaag toe en gaat de stijghoogte in de deklaag omhoog. Onderin de deklaag gebeurt de verhoging eerder en sterker dan bovenin de deklaag. Door de toename van de waterspanning neemt de korrelspanning af. Daardoor vindt er elastische expansie plaats en neemt de snelheid van kruipvervorming af. Het samenspel van stroming en vervorming binnen de deklaag vormt de essentie van de modelberekening en wordt bepaald door diverse modelparameters die kunnen variëren afhankelijk van de gekozen opbouw van het deklaagprofiel.

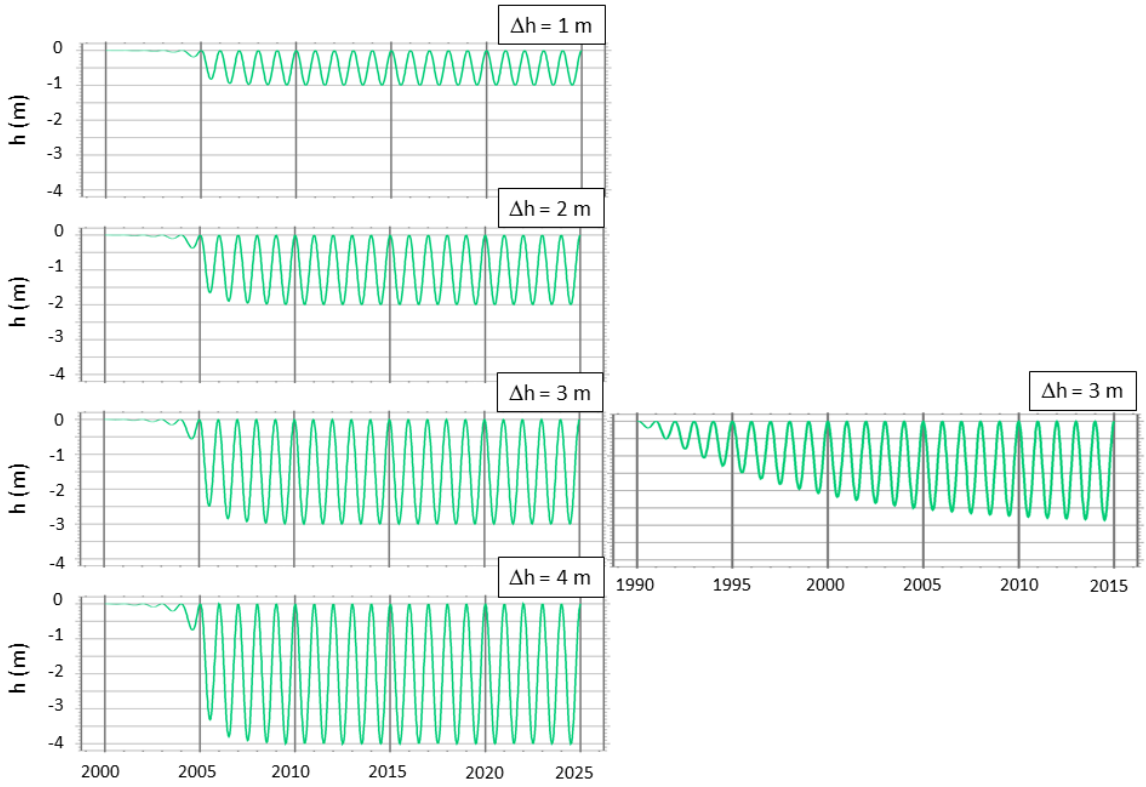


Figuur 4.1 Kwalitatieve weergave van de processen die in het model worden berekend. De groene laag stelt de deklaag voor. Het rechterdeel van beide panelen geeft schematisch weer hoe de stijghoogteontwikkeling in de deklaag verloopt. Uit de verticale vervorming binnen de deklaag wordt de tijdsontwikkeling van de totale dikte van de deklaag op ieder moment bepaald, en daarmee de verticale beweging van het maaiveld.

4.1.4 Stijghoogteverlagingsscenario's

Figuur 4.2 toont de stijghoogteverlagingsscenario's die zijn gebruikt. De scenario's beslaan een periode van 50 jaar waarvan de eerste 30 jaar zijn weergegeven. De linker set van vier scenario's is voor een situatie waarin de verlaging door de onttrekkingen in vrij korte tijd tot stand komt (hier rond 2005, maar de tijdreeks en de resultaten kunnen logischerwijs verschoven worden als een ander tijdstip van verandering wordt gekozen). Rechts een vijfde scenario waarin de verlaging heel geleidelijk ontwikkelt vanaf 1990.

De onverstoorde stijghoogte is gelijk aan het freatisch niveau gesteld en er is een waarde van 0 m aan toegekend. Daardoor geeft de stijghoogte direct de verlaging weer. De linker scenario's zijn geschaalde versies van elkaar; ze verschillen alleen in de maximale verlaging Δh die wordt bereikt. De verlaging neemt sterk, maar geleidelijk toe rond 2005 (19%, 84% en 99% van Δh in respectievelijk 2004, 2005 en 2008). Het moment van verlaging volgt op het droge jaar 2003, maar is verder willekeurig. Als de verlaging bijvoorbeeld later zou optreden kan de berekende bodemdaling met dezelfde periode verschoven worden in de tijd.



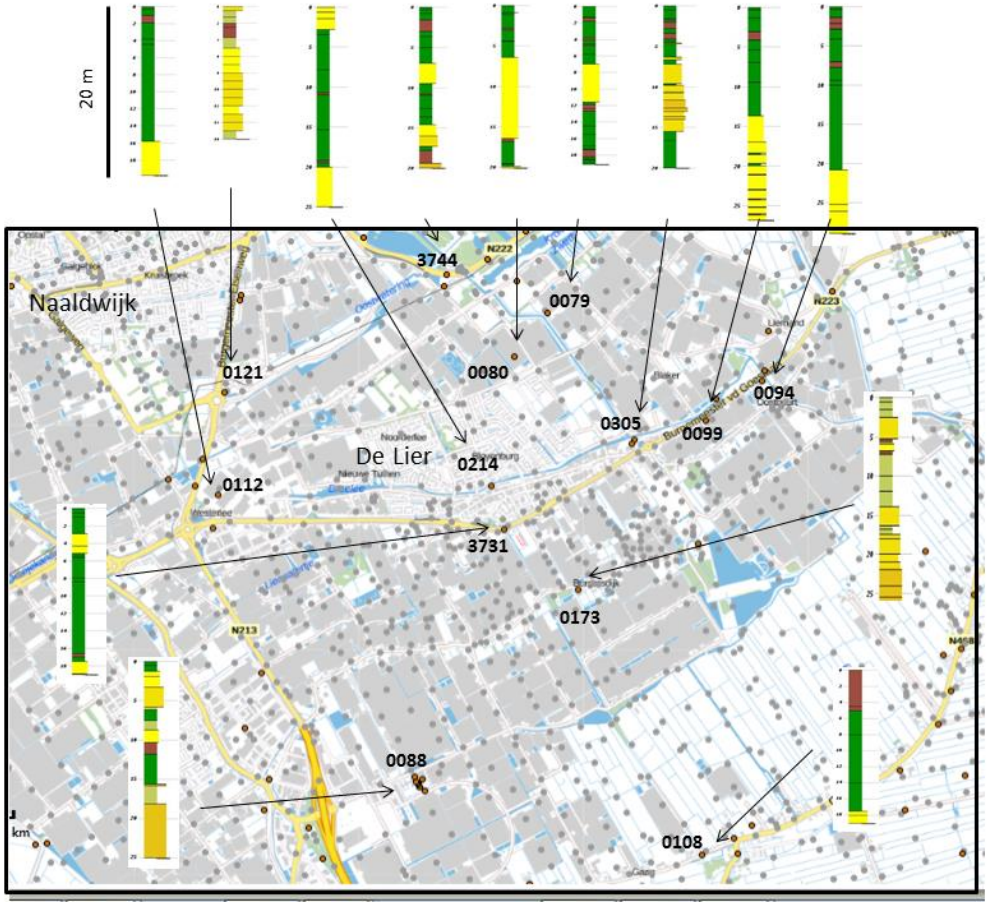
Figuur 4.2 Grafische weergave van de vier stijghoogteverlagingsscenario's die zijn toegepast. Links verlaging ontwikkelt in vrij korte tijd. Rechts verlaging ontwikkelt geleidelijk over een langere periode.

4.1.5 Bodemopbouwtypen

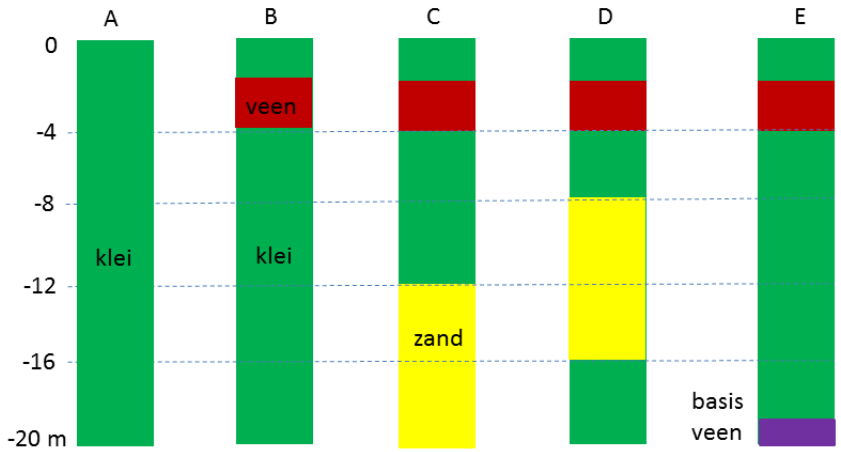
Figuur 4.3 toont boorbeschrijvingen van een 13-tal boringen in en rond De Lier. De boringen geven een beeld van de opbouw van de deklaag. De figuur laat zien dat de ruimtelijke variabiliteit (heterogeniteit) van de deklaag erg groot is. Pogingen om gedetailleerde aspecten van de opbouw van individuele boorbeschrijvingen mee te nemen in de berekeningen is daardoor niet zinvol. In plaats daarvan is een beperkt aantal representatieve bodemopbouwtypen (5) voor een totale kolomhoogte van 20 m opgesteld die de belangrijkste variaties schematiseren (Figuur 4.4). De verschillen in bodemdaling die deze opbouwtypen voor de vier stijghoogtescenario's opleveren geven dan een behoorlijk breed beeld van bodemdaling die in het gebied kan optreden, en de gevoeligheid ervan voor de lokale opbouw van de deklaag.

Voor de opbouwtypen zijn vier lithologiën gebruikt, elk met eigen specifieke bodemparameters: klei, zand, veen en basisveen. Basisveen is toegevoegd omdat de doorlatendheid en samendrukkingseigenschappen over het algemeen sterk verschillen van die van jongere veenafzettingen. Onderlinge vergelijking van de bodemdaling voor verschillende typen geeft een beeld van de invloed van de aan- of afwezigheid van een bepaalde bodemlaag:

- A-B (Holland)veen in het bovenste deel van de deklaag (0112; 0214; 0094; 0108);
- B-C de basis van de deklaag die minder diep ligt (0099; 0173)
- B-D tussenzandlaag (0079; 0080; 0305)
- B-E basisveen (0097; 3744)



Figuur 4.3 Boorbeschrijvingen van 13 boringen in en rond De Lier. De volledige aanduiding van de boringen is B37B$$$$, waar $$$$ bestaat uit de viercijferige code die is weergegeven op de kaart. Bron: Dinoloket.



Figuur 4.4 Vijf bodemopbouwtypen voor de deklaag die zijn gebruikt in de modellering.

4.1.6 Parameterwaarden

Tabel 4.1 toont de parameterwaarden die zijn gebruikt in de berekeningen. De bovenste set zijn default waarden met compressiecoëfficienten die representatief zijn voor schone tot zwak zandige klei van matige consistentie en matig overbelast veen. Deze waarden worden als 'gemiddeld' beschouwd. Daaronder waarden voor slap klei en veen die zijn gebruikt om een indruk te krijgen wat er gebeurt voor locaties waar de deklaag (in z'n geheel) zou bestaan uit erg gevoelig materiaal

K	verticale doorlatendheid
γ	verzadigd soortelijk gewicht
RR	recompressie ratio
CR	compressie ratio
Ca	kruipcoëfficient
OCR	overconsolidatie ratio

Tabel 4.1 Parameterwaarden die zijn gebruikt in de berekeningen (default)

lithologie	K (m/dag)	γ (kN/m^3)	RR (-)	CR (-)	Ca (-)	OCR (-)
zand	5	20	0.0001	0.0023	0.0001	1.25
klei	0.005	16	0.0125	0.15	0.007	1.66
veen	0.01	11	0.04	0.3	0.02	2.35
basisveen	0.0002	13	0.02	0.3	0.02	3
Voor slap klei en veen						
klei	**0.005**	**16**	**0.0125**	**0.25**	**0.007**	**1.34**
veen	0.01	11	0.04	**0.35**	0.02	**2.05**

De constante waarden voor compressiecoëfficienten RR, CR en Ca voor elk van de lithologiën betekent niet dat de samendrukbaarheid constant is. De samendrukbaarheid neemt af met toenemend bovenliggend grondgewicht (toenemende korrelspanning).

Voor zand is de hoge doorlatendheid ten opzichte van klei en veen belangrijk, maar de berekeningen zijn verder niet gevoelig voor de grootte van de doorlatendheid (mits de doorlatendheid meer dan een orde van grootte groter is dan van de andere lithologiën). De gekozen parameterwaarden zorgen ervoor dat zand nauwelijks vervormt. Voor klei bestaat over het algemeen een vrij grote spreiding van eigenschappen. Binnen het huidige project is dit niet onderzocht voor het studiegebied. De gekozen waarden zijn redelijke gemiddelde waarden voor klei. Hetzelfde geldt voor veen. Klei en vooral veen zijn het kruipgevoelig. De elastische vervormbaarheid is het grootst voor veen (RR-waarde). De OCR-waarden voor klei en veen zijn zo gekozen dat de autonome maaivelddaling (zonder stijghoogteverlaging in het watervoerende pakket) door kruip, voor 20 m klei of veen, minder dan 1 mm/jaar bedraagt. De compressieeigenschappen van basisveen zijn van beperkte relevantie omdat het om geringe diktes gaat en het bovenliggende grondgewicht relatief groot is in vergelijking met (Holland)veen. Nadruk in de keuze van parameterwaarden is gelegd op een geringe doorlatendheid van basisveen.

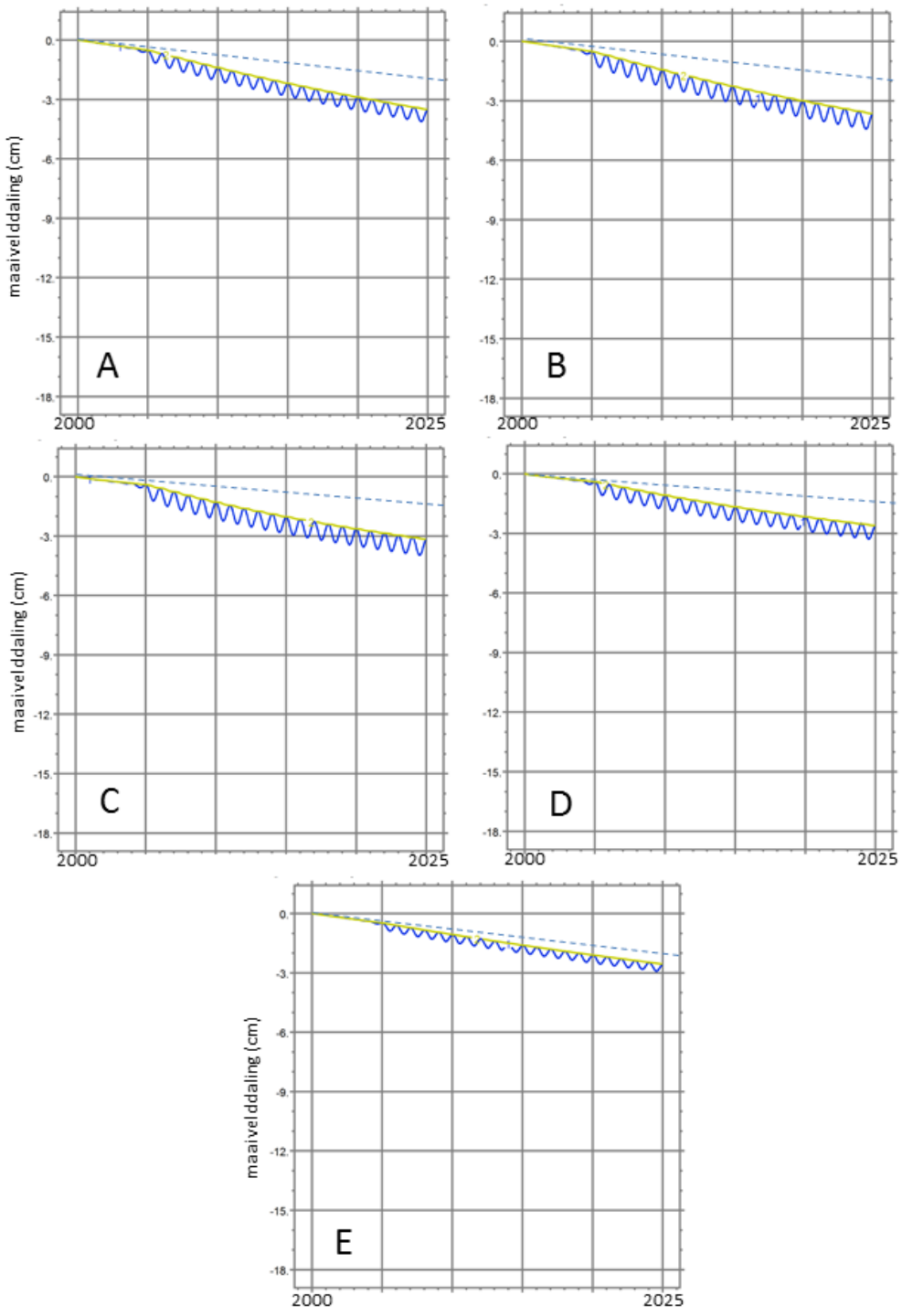
Op de bovenrand van het model (nominaal: freatisch grondwaterniveau) is een effectieve druk (korrelspanning) van 12 kN/m^2 toegepast.

4.2 Resultaten

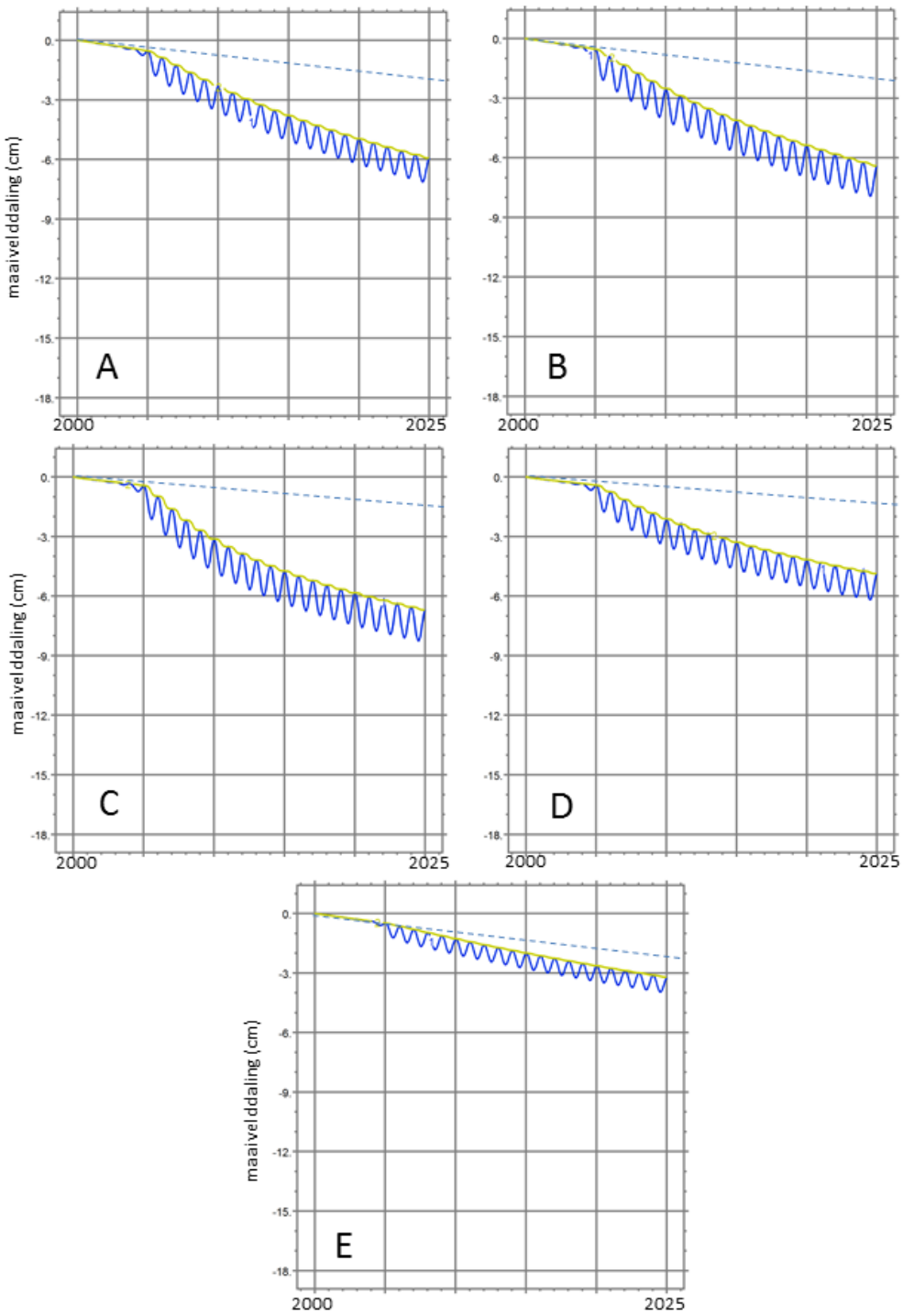
De resultaten van de berekeningen voor de default parameterwaarden zijn samengevat in Figuur 4.5 t/m Figuur 4.9 en Tabel 4.2. De figuren tonen de berekende maaiveldbeweging voor de vijf stijghoogteverlagingsscenario's en de vijf bodemopbouwtypen (20 modellen). Voor de verticale as van de figuren (maaiveldhoogte) is een vast bereik van 18 cm gebruikt om de modellen onderling goed te kunnen vergelijken.

Bijlage 8D presenteert grafieken voor een langere periode 2000-2050. De laatste figuur toont resultaten voor Δh = 3m voor parameterwaarden voor slap klei en veen.

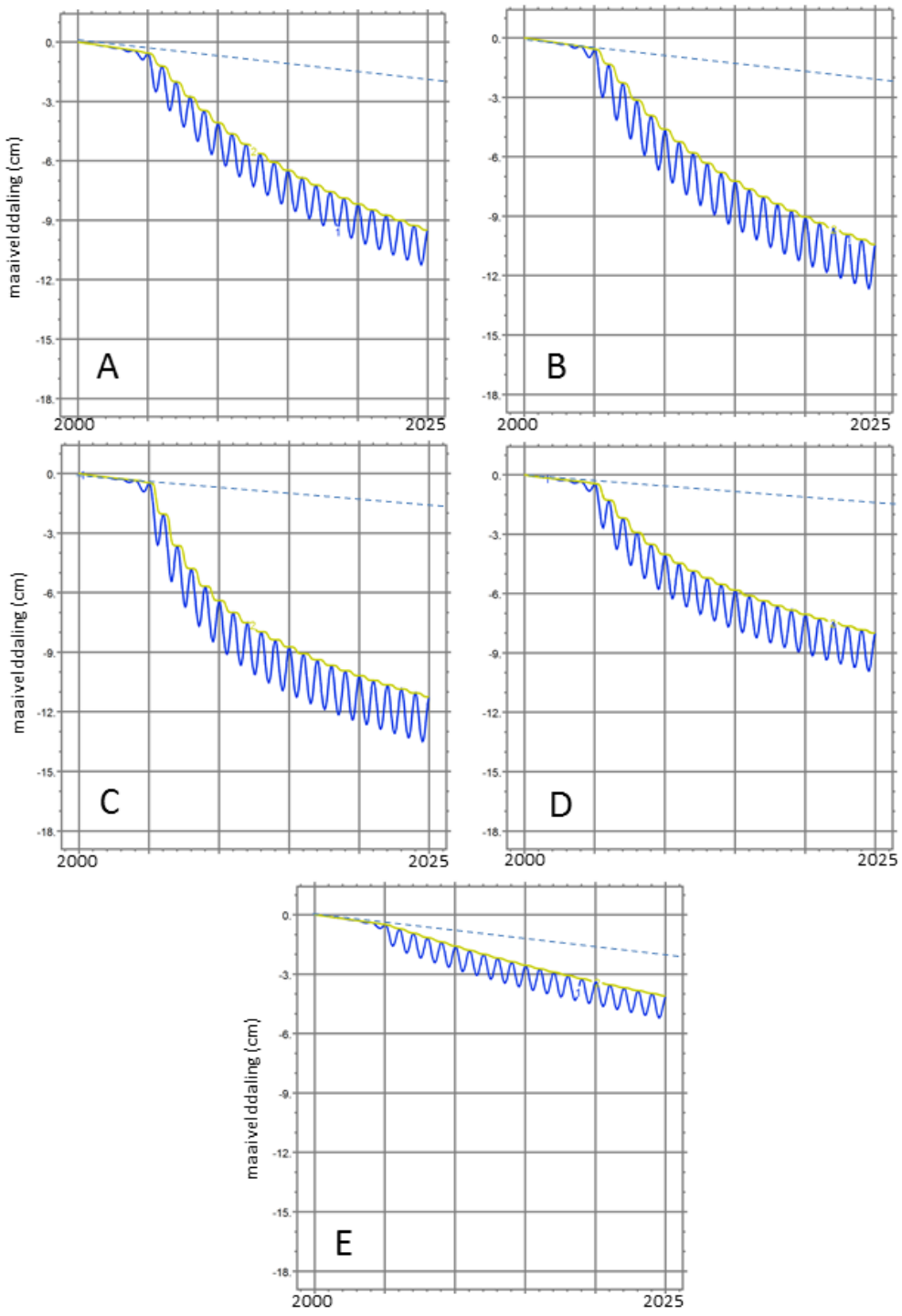
Tabel 4.2 karakteriseert de invloed van de stijghoogtescenario's op de bodemdaling door middel van: (i) de dalingssnelheidstoename in de periode kort na de stijghoogteverlaging; (ii) de daling die is veroorzaakt 20 jaar na de verlaging; (ii) de daling die is veroorzaakt 45 jaar na de verlaging.



Figuur 4.5 Berekende maaiveldaling voor ***Δh = 1 m en snelle toename van de verlaging en default parameter waarden****. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4).*

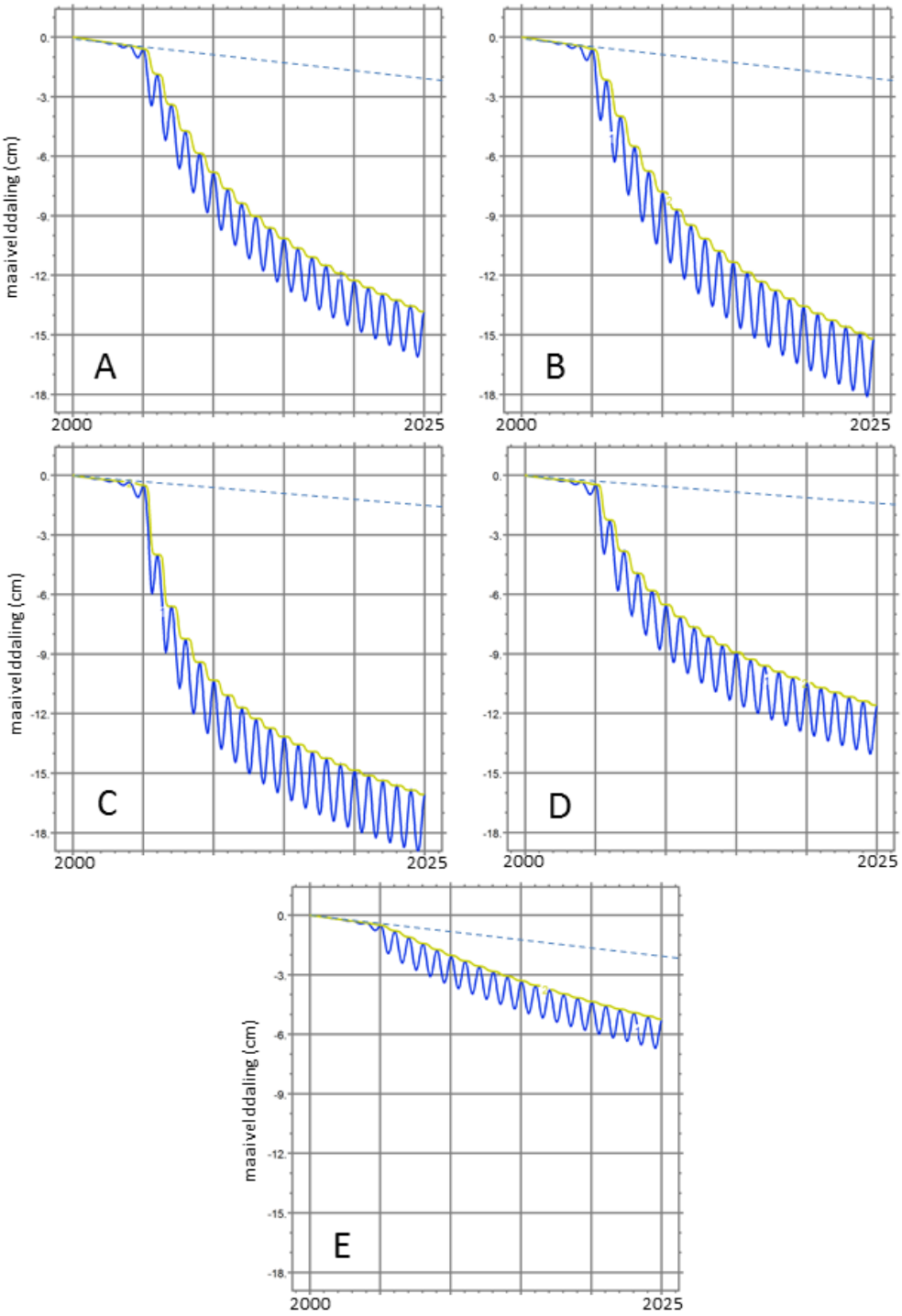


Figuur 4.6 Berekende maaivelddaling voor ***Δh = 2 m en snelle toename van de verlaging en default parameterwaarden****. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4)*

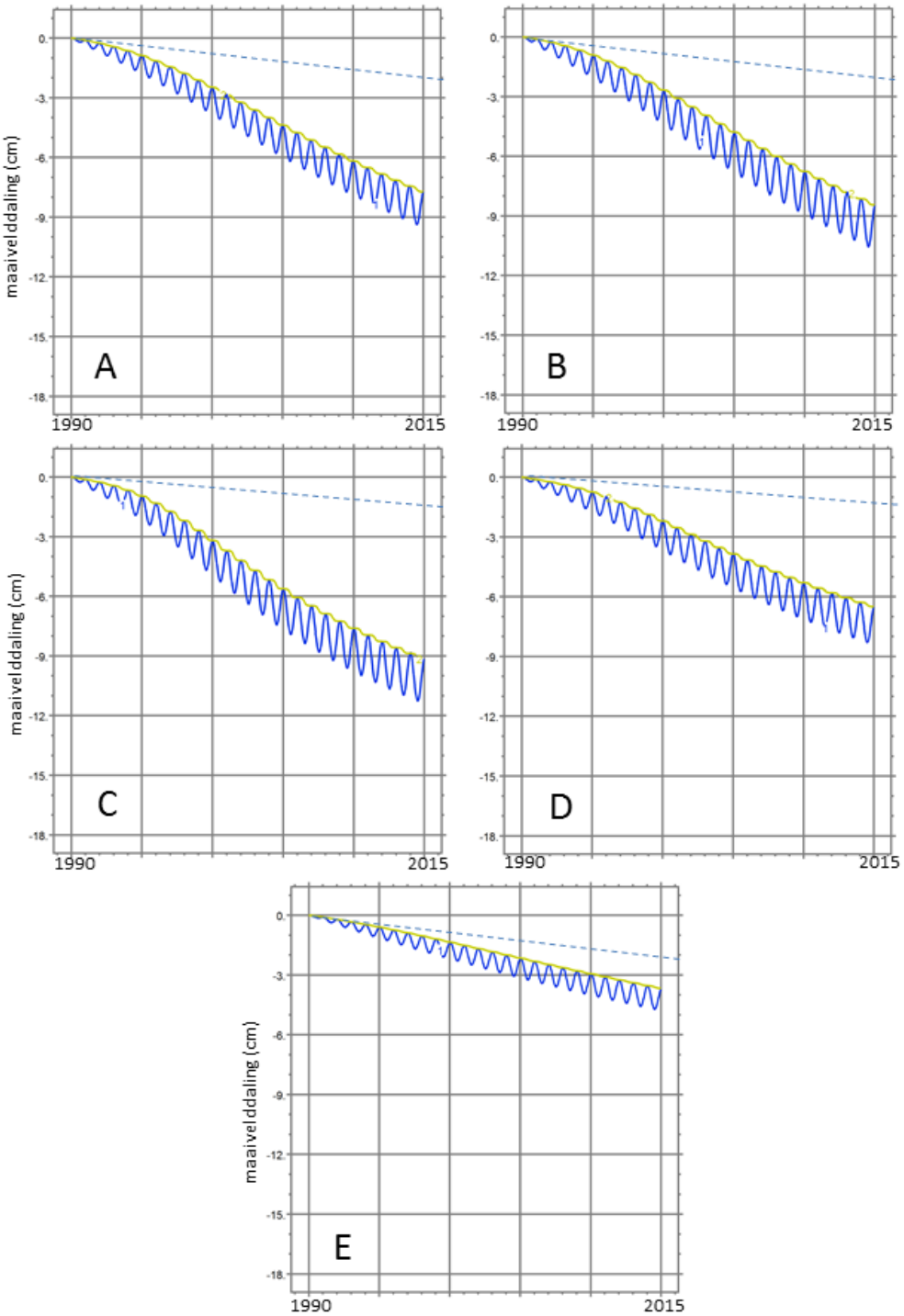


Figuur 4.7 Berekende maaiveldddaling voor ***Δh = 3 m en snelle toename van de verlagingen default parameterwaarden****. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4)*

.



Figuur 4.8 Berekende maaivelddaling voor ***Δh = 4 m en snelle toename van de verlaging en default parameterwaarden****. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4).*



Figuur 4.9 Berekende maaiveldaling voor ***Δh = 3 m en langzame toename van de verlaging en default parameterwaarden****. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4)*

Tabel 4.2 Invloed van de stijghoogteverlaging voor de scenario's met snelle toename van de verlaging op basis van de grafieken (waarden na correctie voor onverstoorde daling). Default parameterwaarden.

Model*	Maximum% snelheid (mm/jr)	Daling$ na 20 jaar (cm)	Daling$ na 45 jaar (cm)	Model*	Maximum% snelheid (mm/jr)	Daling$ na 20 jaar (cm)	Daling$ na 45 jaar (cm)
1A	1.0	1.4	2.1	3A	6.5	7.1	9.9
1B	0.9	1.7	2.4	3B	7.5	8.1	11.1
1C	1.1	1.9	2.6	3C	13.0	9.7	13.1
1D	0.7	1.2	1.9	3D	8.0	6.6	8.6
1E	0.4	0.6	0.9	3E	1.6	3.0	3.2
2A	2.5	4.0	5.5	4A	13.2	12.7	14.7
2B	4.0	4.3	6.2	4B	16.0	13.0	16.3
2C	5.4	5.5	7.0	4C	30.0	14.7	17.3
2D	3.4	5.7	4.8	4D	15.0	9.4	12.6
2E	0.5	1.0	1.9	4E	3.5	3.2	4.8

** 1A is model met ∆h = 1 m en bodemopbouwtype A, enz.*

% gemeten over ca 3 jaar aan het kruipdeel van de bodembeweging (geelgroene curves)

$ aantal jaren na 2005

Langzame toename verlaging en default parameterwaarden

Model*	Maximum snelheid (mm/jr)	Daling$ na 20 jaar (cm)	Daling$ na 45 jaar (cm)
3A	2.5	4.5	
3B	3.0	5.5	
3C	3.5	6.3	10.1
3D	3.0	4.2	
3E	1.0	1.5	

Parameters slap klei en veen; snelle toename verlaging

Model*	Maximum snelheid (mm/jr)	Daling$ na 20 jaar (cm)	Daling$ na 45 jaar (cm)
3A	32	19	21
3B	48	15.5	23
3C	65	21.5	23.5
3D	45	15	17
3E	6	5	7

4.3 Conclusies

Uit de resultaten van de modelberekeningen wordt het volgende opgemaakt (verwacht op basis van theoretische gronden):

1. De seizoenale verlaging in het 1e watervoerende pakket veroorzaakt een versnelling van de aanwezige (in principe geringe) jaargemiddelde achtergronddaling door kruip. De dalingssnelheid is het grootst tijdens of kort na het moment dat de grootste verlaging plaatsvindt en neemt in de jaren daarna geleidelijk af.

2. Het duurt 3 à 4 decennia voor de dalingssnelheid min-of-meer gelijk wordt aan de onverstoorde dalingssnelheid en de maximale bodemdaling (in meter), die door de verlaging wordt veroorzaakt, wordt bereikt.

3. Elk jaar vertoont de maaiveldbeweging een cyclus van daling en opheffing. Dit wordt veroorzaakt door de elastische reactie op de jaarlijks fluctuerende stijghoogte binnen de deklaag. Het gaat om cyclische beweging van de orde van millimeters tot centimeters afhankelijk van bodemopbouw en grote van de seizoensverlaging. Daarbovenop neemt de dalingssnelheid door kruip toe gedurende de zomer en het najaar en weer af gedurende de winter en het vroege voorjaar. Iedere zomer en najaar wordt er daarmee een nieuwe bijdrage (tik) geleverd aan de langjarige permanente daling die door de seizoensonttrekkingen wordt veroorzaakt.

4. *Snelle toename verlaging.* Een seizoenale stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket van 1, 2, 3 of 4 m veroorzaakt volgens de theoretische benadering een bodemdaling die typisch respectievelijk in het volgende bereik ligt: 1-2.5 cm; 2-7 cm; 3-13 cm;. 5-17.5 cm na 45 jaar (Tabel 4.2). Voor zeer slap klei en veen kunnen deze waarden een ca. twee maal hoger zijn. Deze resultaten horen bij een autonome daling door kruip bij aanvang van ca. 1 mm/jaar. Als deze autonome daling bij aanvang groter is, is de zettingsgevoeligheid voor de seizoenale stijghoogteverlaging ook groter en kan dit tot grotere geïnduceerde daling leiden. Voor een autonome daling van 5 mm/jaar moet worden gedacht aan een toename in de orde van 60-70%.

5. *Snelle toename verlaging.* Een seizoenale stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket van 1, 2, 3 of 4 m veroorzaakt in de eerste jaren nadat de verlaging plaatsvindt, een verhoging van de bodemdalingssnelheid die typisch respectievelijk in het volgende bereik ligt: 0.5 – 1 mm/jr; 0.5 – 5 mm/jr; 1.5 – 13 mm/jr; 4 – 30 mm/jr (Tabel 4.2). Voor grotere autonome dalingssnelheden door kruip bij aanvang nemen deze waarden toe. Significant hogere waarden kunnen ook voorkomen indien de deklaag bestaat uit zeer slap klei of veen.

6. *Langzame toename verlaging.* De toename van de bodemdalingssnelheid is veel geringer dan voor de snelle toename van de verlaging. Voor een seizoenale stijghoogteverlaging van 3 m is de toename maximaal ca. 3.5 mm/jaar in vergelijking met 13 mm/jaar voor een snelle toename va de verlaging. De invloed van de verlaging zal in dit geval niet of moeilijk onderscheiden kunnen worden van de achtergronddaling.

7. De bodemdaling die wordt veroorzaakt door een stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket is erg gevoelig voor de bodemopbouw van de deklaag (een toelichting wordt gegeven in 8). De deklaagopbouw in het studiegebied verschilt sterk van plaats tot plaats op relatief korte onderlinge afstand (Figuur 4.3). De bodemdaling zal

daardoor, los van ruimtelijke variatie in stijghoogteverlaging, ruimtelijk sterk variëren. Een betrouwbare gedetailleerde ruimtelijke voorspelling (modellering) van de bodemdaling is daardoor niet haalbaar zonder zeer gedetailleerde kennis van de verlagingsgeschiedenis, en de bodemopbouw (specifiek: doorlatendheid en geotechnische eigenschappen).

8. Verdere toelichting bij 6: De bodemdaling die wordt veroorzaakt door een stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket is erg gevoelig voor de bodemopbouw van de deklaag. De doorlatendheidsverdeling speelt daarbij een belangrijke rol. Als de grootste weerstand onderin de deklaag aanwezig is, bijvoorbeeld door aanwezigheid van basisveen (bodemopbouwtype E) of een zeer slecht doorlatende kleilaag, dan zorgt dit ervoor dat de verlaging die optreedt in bovenliggende delen van de deklaag gering beperkt wordt. Deze 'afschermende werking' beperkt daarmee de bodemdaling die wordt veroorzaakt. Dit lijkt het geval te zijn in diverse waarnemingsputten van de Gemeente Westland waarvoor het 1e filter dat zich op ca 11.5 m onder maaiveld bevindt, vrijwel geen verlaging laat zien gedurende het zomerseizoen (GW3, GW4, GW7, GW9, GW12, GW13) (voor locaties zie laatste figuur in 8C). Omgekeerd, als het onderste gedeelte van 'de deklaag' juist een geringe weerstand heeft, bijvoorbeeld omdat het vooral zandig is ontwikkeld (bodemopbouwtype C), dan zorgt dit ervoor dat de verlaging die wordt veroorzaakt in ondiepe delen van de deklaag relatief groot is (dit lijkt het geval te zijn voor waarnemingspunten GW1, GW8, GW11, GW14). Daarbij is ondiep gelegen klei en veen vaak meer compactie- en kruipgevoelig dan klei en veen op grotere diepte door het geringere bovenliggende bodemgewicht. Samen zorgt dit ervoor dat wanneer het onderste deel van de 'deklaag' een geringe weerstand heeft (of: als de deklaag effectief minder dik is), de bodemdaling door een stijghoogteverlaging in het watervoerende pakket relatief groot kan zijn (bodemopbouwtype C). Of dit het geval is wordt vanzelfsprekend ook bepaald door de aanwezigheid van 'slappe lagen' in de ondiepere delen van de 'deklaag' en de dikte daarvan. De boorbeschrijvingen bij de waarnemingsputten van de Gemeente Westland hebben weinig of geen voorspellende waarde voor de waargenomen geringe of sterke verlaging in het midden van de deklaag (1e filter) met de verlaging in het WVP (2e filter). Soms lijkt het onderste deel van de deklaag zandig ontwikkeld, maar is er desondanks nauwelijks verlaging voor het 1e filter. Voor andere putten is er veel klei in het onderste deel van de deklaag, maar treedt er toch een sterke verlaging op voor het 1e filter. Dit kan erop wijzen dat de tussen zandlaag lateraal een goede verbinding heeft met het onderliggende watervoerende pakket. Deze complexiteiten van het systeem leveren een extra beperking op de voorspelbaarheid van bodemdaling die wordt veroorzaakt door de verlaging in het 1e watervoerende pakket.

9. Aanvullende opmerking bij 4 en 5 (rol hogere 'autonome kruip'): Als er op enig moment een vrij grote bodemdaling aanwezig is door kruip in slappe bodemlagen (veroorzaakt door een voorgaande belasting), dan veroorzaakt een nieuwe belasting een grotere toename van de bodemdalingssnelheid dan wanneer de kruip bij het ontstaan van de nieuwe belasting klein is. Met andere woorden, de zettingsgevoeligheid is groter naarmate de actuele bodemdaling groter is. Dat betekent enerzijds dat de invloed van stijghoogteverlaging groter is op plaatsen waar relatief recent zetting door ophogingen, ondiepe bemalingen, verdiepte drainage, of lek rakende rioleringen is veroorzaakt. Anderzijds en omgekeerd betekent dit dat op plaatsen waar in het niet te verre verleden stijghoogteverlaging heeft gezorgd voor een toename van de bodemdalingssnelheid de daling die wordt veroorzaakt door ophogingen, ondiepe bemalingen, verdiepte drainage, of lek rakende rioleringen, groter is.

5 Bodemdaling uit waarnemingen

In het vorige hoofdstuk is op basis van modelberekeningen bestudeerd hoeveel bodemdaling en welke bodemdalingssnelheden naar verwachting kunnen zijn opgetreden, veroorzaakt door stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. In dit hoofdstuk wordt onderzocht of er bevestiging is voor zo'n bijdrage aan de bodemdaling in bodemdalingsinformatie uit waarnemingen. De waarnemingen bestaan uit verticale beweging die is afgeleid op basis van satelliet-gebaseerde radarmetingen (InSAR).

5.1.1 Algemene informatie over InSAR

De afgelopen vijfentwintig jaar worden door satellieten radarbeelden van de aarde gemaakt. InSAR (Interferometric Synthetic - Aperture Radar) combineert beelden die op verschillende momenten van dezelfde plek zijn gemaakt om daaruit de beweging van punten op het aardoppervlak te bepalen. De satelliet meet feitelijk de fase (deel van de golflengte) waarmee het door de aarde teruggekaatste signaal bij de satelliet terugkomt (Figuur 5.1). Als die fase verandert tussen twee beelden die vanaf dezelfde plek in de ruimte zijn gemaakt, betekent dat dat de afstand tussen het meetpunt op het aardoppervlak en de satelliet verandert. Met een reeks van beelden over lange tijd kan zo bodembeweging worden 'gemeten'.

Figuur 5.1 Faseverschuiving in het gemeten radar signaal door bodemdaling (basisprincipe van InSAR). Links: oorspronkelijke situatie. Rechts: Omdat het straatniveau (reflectiepunt) is gezakt moet het radarsignaal een grotere afstand afleggen. Dat resulteert in een faseverschuiving (in rood). Bron: SkyGeo.

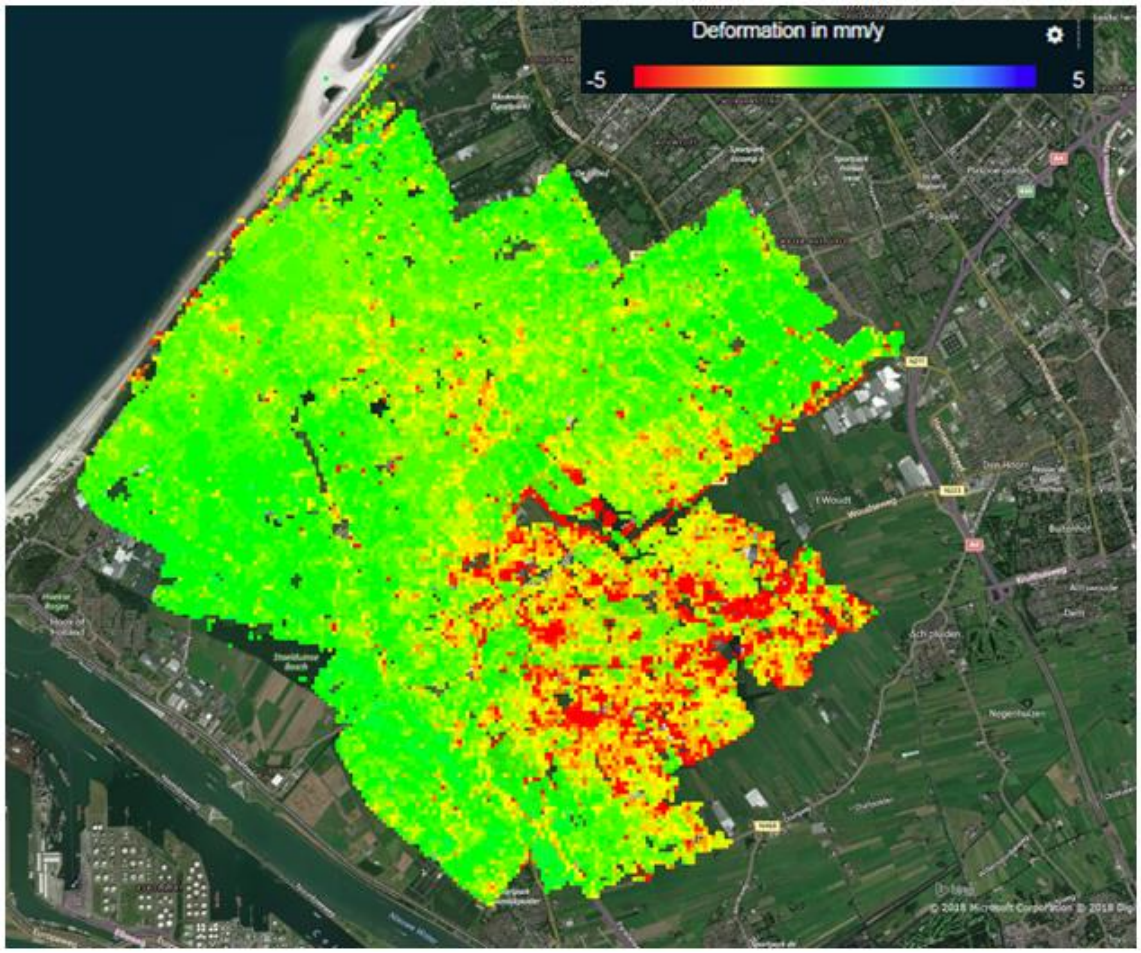
Bodembeweging kan niet overal op het oppervlak worden gemeten. Dat kan alleen voor punten aan het aardoppervlak die bij iedere omloop van de satelliet een herkenbaar en consistent signaal terugkaatsen (soort van handtekening). Deze reflectoren (ook: scatterers) zijn vaak delen van kunstobjecten zoals daken, electriciteitskastjes, wegdrempels, muren, putdeksels, bruggen en dergelijke.

De precisie waarmee de daling (of stijging) kan worden gemeten is over het algemeen een fractie van een mm/jaar. De hoogte van een reflector kan echter op zijn best slechts op enkele meters nauwkeurig worden bepaald. Het is dus niet goed vast te stellen of het punt waarvoor de daling nauwkeurig is gemeten op straat ligt, of op het dak van een schuur, of afkomstig is van een verkeersbord. Dit is belangrijk bij interpretatie van de data omdat dit soort objecten soms onafhankelijk van de bodem kunnen bewegen (een schuurtje kan bijvoorbeeld inzakken en een verkeersbord kan scheefzakken). Omgekeerd zal een gebouw op diepe paalfundering niet met het maaiveld meebewegen, maar vooral de beweging van diepere bodemdaling onder de fundering weerspiegelen. Ook de horizontale positie van een meetpunt (reflector) kan met beperkte nauwkeurigheid worden bepaald. Ongeveer 4*20 m voor de oudere satellieten (20 m

in de vliegrichting van de satelliet en 4m in de dwarsrichting), en meer recent met een nauwkeurigheid (resolutie) van 3*3 m.

5.1.2 De gebruikte datasets

De gebruikte datasets zijn aangeschaft bij SkyGeo en bekostigd door GW, HHD en GMD. De data beslaat vrijwel geheel de gemeente Westland en in het zuidoosten een klein deel van de gemeente Midden Delfland (Figuur 5.2).



Figuur 5.2 Ruimtelijk dekkingsgebied van de InSAR datasets.

De datasets (12) zijn gebaseerd op beelden die zijn opgenomen door drie satellieten die elk een specifieke periode afdekt (Figuur 5.3). Grofweg zijn die periodes:

1992 – 2001	ERS
2003 – 2011	ENV (Envisat)
2009 – 2018	TSX (Terrasar-X)

De afkortingen die worden vermeld bij de dataset in het linkerdeel van Figuur 5.3 hebben de volgende betekenis:

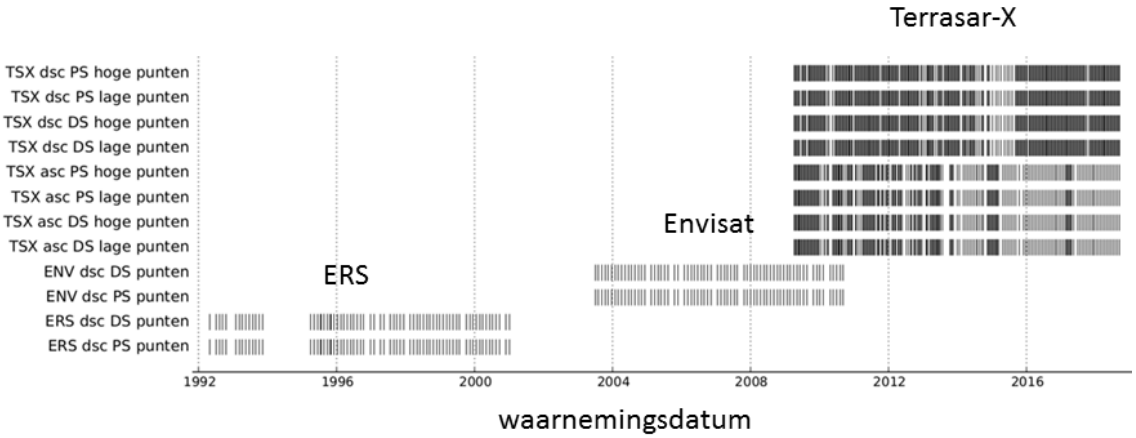
PS Persistent scatterer. Dit geeft aan dat de geconstrueerde tijdreeks van verticale beweging is gebaseerd op een signaal dat wordt gedomineerd door een individueel (scherp gedefinieerd) reflectiepunt.

DS Diffuse/distributed scatterer. Dit geeft aan dat de geconstrueerde tijdreeks van verticale beweging is gebaseerd op een gemengd signaal van meerdere reflectoren in het zichtgebied (footprint) van de radar.

asc Ascending pass. Opnames gedurende zuid-noord beweging van de satelliet over de locatie.

dsc Descending pass. Opnames gedurende noord-zuid beweging van de satelliet over de locatie.

Voor TSX is een scheiding aangebracht in hoge en lage punten. Voor de hoge punten is met vrij grote zekerheid te zeggen dat ze niet op maaiveld liggen, maar veelal op een gebouw.



Figuur 5.3 Dekkingsperiode van de verschillende datasets (12). Een verticaal lijntje geeft de waarnemingsdatum van een radarbeeld weer. Afkortingen aan de linkerzijde worden toegelicht in de hoofdtekst.

De onzekerheid van de locatie van een datapunt waarvoor een tijdreeks van is bepaald is vrij groot voor de oudere satellieten (ca. 10 m) en kleiner voor TSX (ca. 2 m voor PS).
Per datapunt in kaartbeeld is een tijdreeks van hoogte(verandering) beschikbaar voor de periode die een satelliet afdekt, en een fitmodel van die reeks bestaande uit de som van een kwadratische functie en een harmonische functie (sinus) met een periode van één jaar. De coëfficiënt voor de lineaire term van de fit geeft een schatting voor de gemiddelde snelheid voor het datapunt voor de waarnemingsperiode van de satelliet. De coëfficiënt voor de kwadratische term (Pnt_quadratic) geeft een maat voor de versnelling of vertraging gedurende de periode. Op verzoek is er voor de huidige studie voor gezorgd dat een extra parameter gevisualiseerd kan worden in het webportal:

Diff_deformation_velocity = 2*Pnt_quadratic*T

T is in deze uitdrukking de waarnemingsperiode. Diff_deformation_velocity geeft en schatting voor de verandering van de verticale bewegingssnelheid van het begin van de waarnemingsperiode tot het einde.

5.2 Aanpak

Ook zonder verlagingen in het 1e watervoerende pakket vindt maaivelddaling plaats door krimp (rijping) van gedraineerde bodemlagen, oxidatie van organisch materiaal en door kruip in klei en veenlagen in het Holocene pakket die wordt veroorzaakt door diverse belastingen zoals wegen, ophogingen en bedoelde of onbedoelde verlagingen van het freatisch niveau. Daarnaast kunnen er bijdragen aan maaivelddaling zijn van gaswinning en van diepe geologische processen. Deze “achtergronddaling” kan in de orde van mm/jaar tot cm/jaar zijn en vrij sterk variëren in ruimte en tijd. De InSAR data registreren het netto effect van al deze bijdragen plus een verwachte component van bodemdaling door de stijghoogteverlagingen. De uitdaging is om te zien of er aanwijzingen zijn voor die laatste component.

Het idee bij aanvang van dit project was om te kijken naar locaties waarvan bekend is dat er in een bepaalde korte periode of op een bepaald moment onttrekkingen zijn gestart, of waarvan bekend is dat er in korte tijd stijghoogteverlaging is ontstaan en te zien of er daardoor een toename van de bodemdaling is opgetreden die qua timing en grootte past in de verwachtingen (hoofdstuk 4). Omdat de tijdscontrole met betrekking tot het ontstaan van verlagingen en de start van onttrekkingen vrijwel afwezig is (hoofdstukken 2 en 3) is de data alleen in algemene zin bestudeerd met het oog op toename van de dalingssnelheid waarbij speciale aandacht is geschonken aan het gebied in en rond de Lier waar het bestaan van verlagingen is geconstateerd. Er is daarbij niet uitgegaan van aannames dat de verlaging in enige periode sterk zou zijn toegenomen; alleen of er aanwijzingen zijn voor toename van de bodemdalingssnelheid.

De datasets zijn bestudeerd met het oog op het volgende:

- Verandering van de gemiddelde dalingssnelheid voor de waarnemingsperiodes van de drie gebruikte satellieten.
- Versnelling of vertraging van de dalingssnelheid binnen de waarnemingsperiodes van de satellieten (Diff_deformation_velocity; alleen beschikbaar voor ENV en TSX).
- Onderscheid in beweging van hoge en lage punten (nominaal maaiveld en gebouwen) voor TSX.

Er is zoveel mogelijk gekeken naar clusters van waarnemingspunten en grotere ruimtelijke patronen. In de vergelijking van TSX data met de data van oudere satellieten (ERS en ENV) worden de datasets voor hoge en lage punten van TSX telkens gecombineerd getoond omdat er in de ERS en ENV datasets geen verschil gemaakt kan worden tussen hoog en laag.

Doordat elke satelliet andere waarnemingspunten ziet, en bewegingen over korte afstand sterk kunnen variëren (bijvoorbeeld gebouw en naastgelegen maaiveld, of verschillen in beweging over het dak van een kassencomplex), is zorgvuldig gekeken of verschillen tussen de verschillende datasets die op het oog worden waargenomen, geen schijnverschillen kunnen zijn. Het feit dat de voor de TSX dataset het aantal waarnemingspunten een orde van grote groter is, maakt het risico op oneigenlijke interpretatie van verandering erg groot.

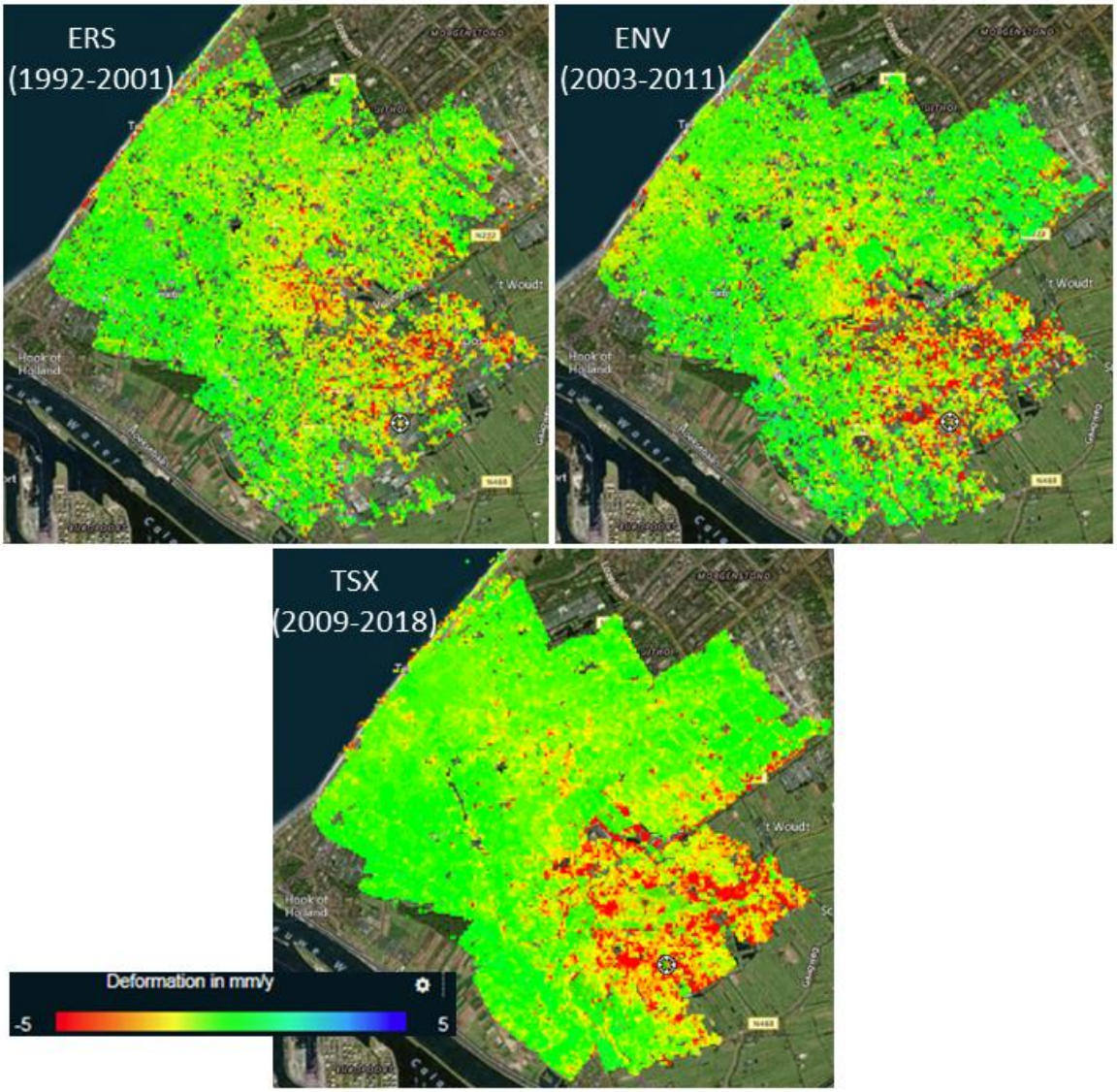
5.3 Resultaten

5.3.1 Verandering gemiddelde snelheid voor de drie waarnemingsperiodes

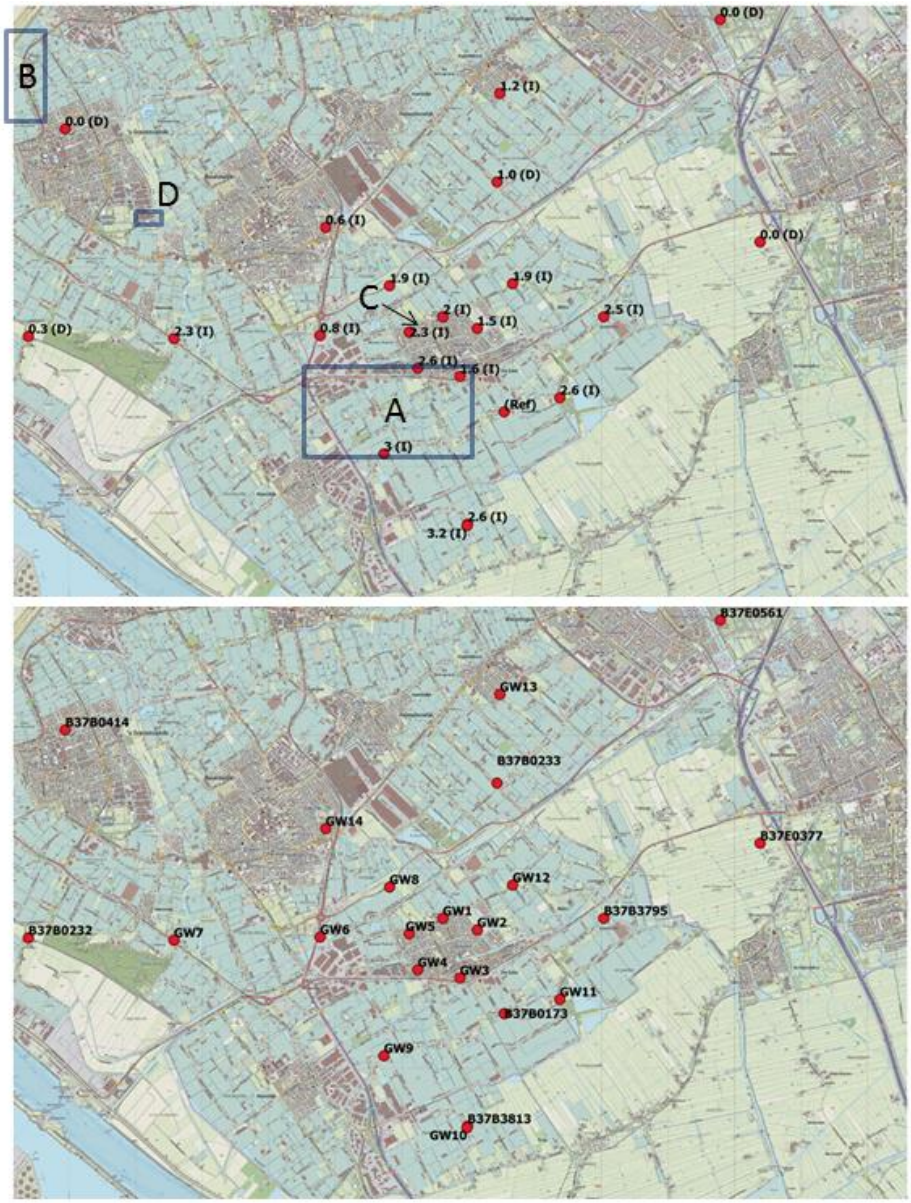
Figuur 5.4 toont de gemiddelde dalingssnelheid voor de waarnemingsperiodes voor het hele dekkingsgebied. Daaruit valt op te maken dat er geen in het oog springende grootschalige sterke veranderingen zijn opgetreden. Meer gedetailleerdere studie bevestigt dat in het overgrote deel van het InSAR dekkingsgebied géén duidelijke veranderingen hebben plaatsgevonden. Gebieden waar wél overtuigende verandering is geconstateerd zijn aangeven met witte kaders (A, B, C en D) in het bovenste deel van Figuur 5.5.

De verandering in gebied D in ZO 's-Gravenzande heeft vrijwel zeker betrekking op verandering die samenhangt met ophoging op een bedrijventerrein. De resultaten voor dat gebied zijn opgenomen in bijlage 8E.

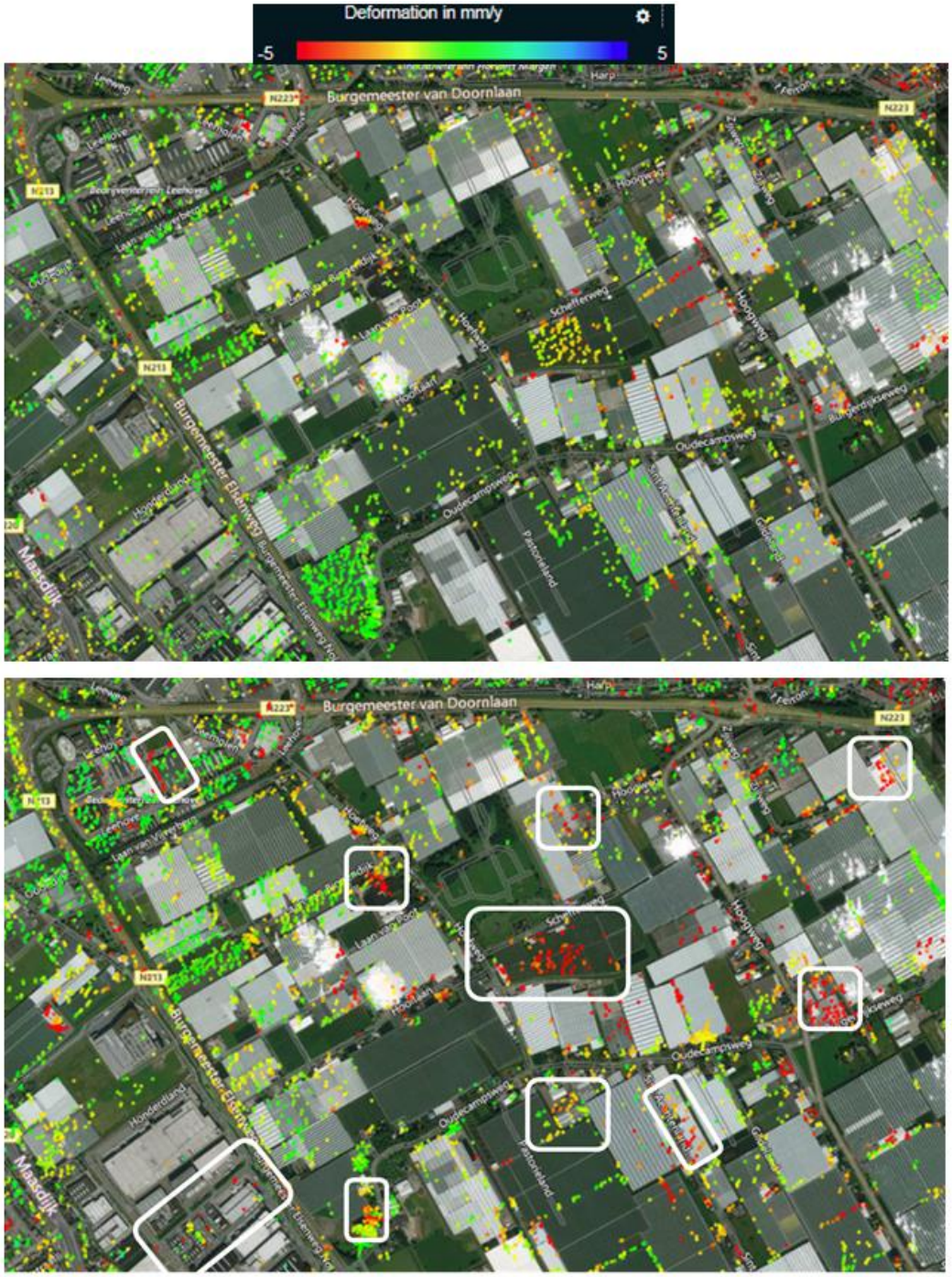
De veranderingen voor gebieden A, B en C zijn gevisualiseerd in Figuur 5.6 t/m Figuur 5.8.



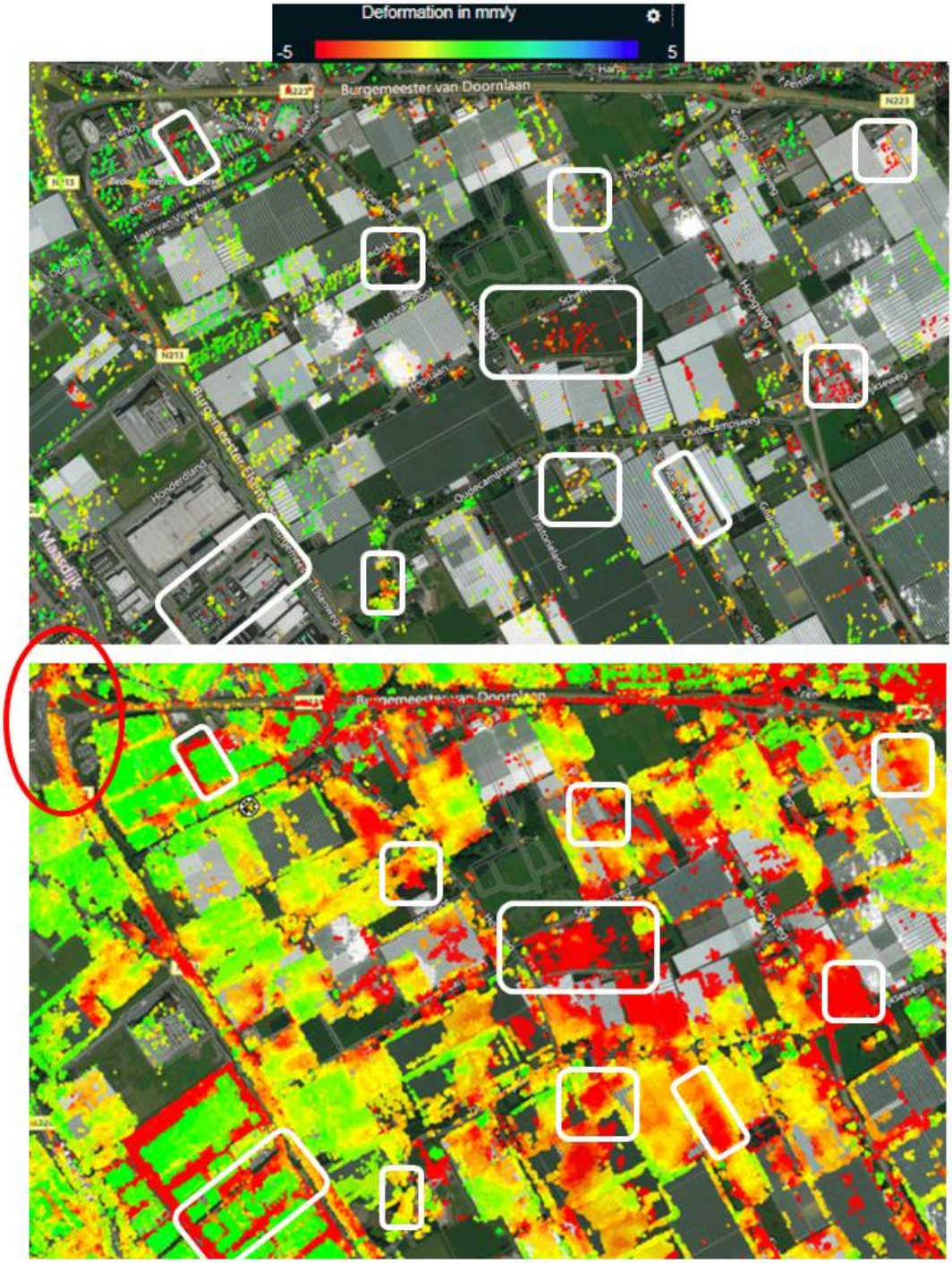
Figuur 5.4 Gemiddelde dalingssnelheden voor de drie waarnemingsperiodes voor het hele dekkingsgebied.



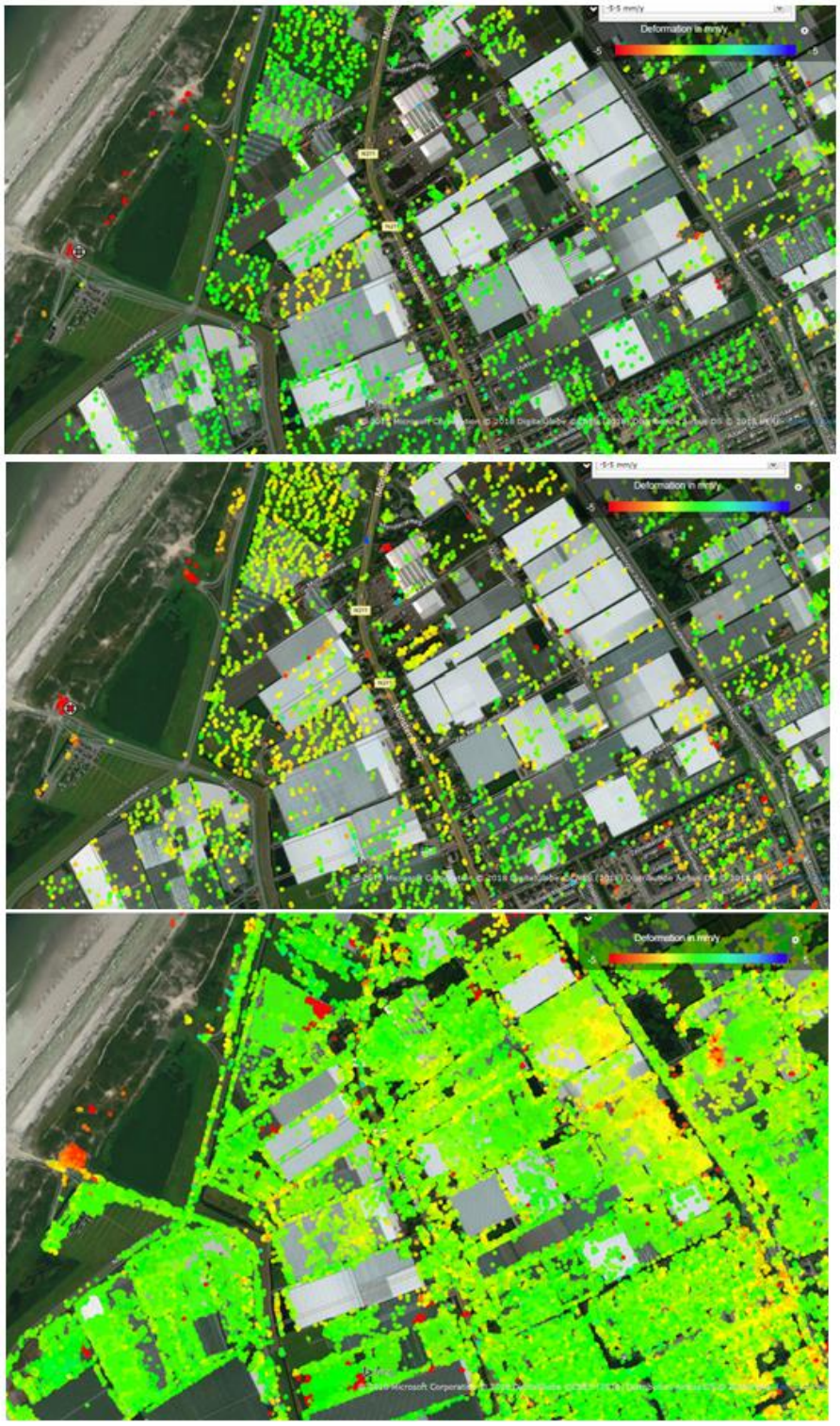
Figuur 5.5 Referentiekaarten met informatie over grondwaterwaarnemingspunten (beneden) en verlagingen (boven). De kaarten zijn uitsneden van Figuur 3.3 en Figuur 3.2). Op de bovenste kaart is aangegeven voor welke gebieden veranderingen van de gemiddelde dalingssnelheid zijn geconstateerd.



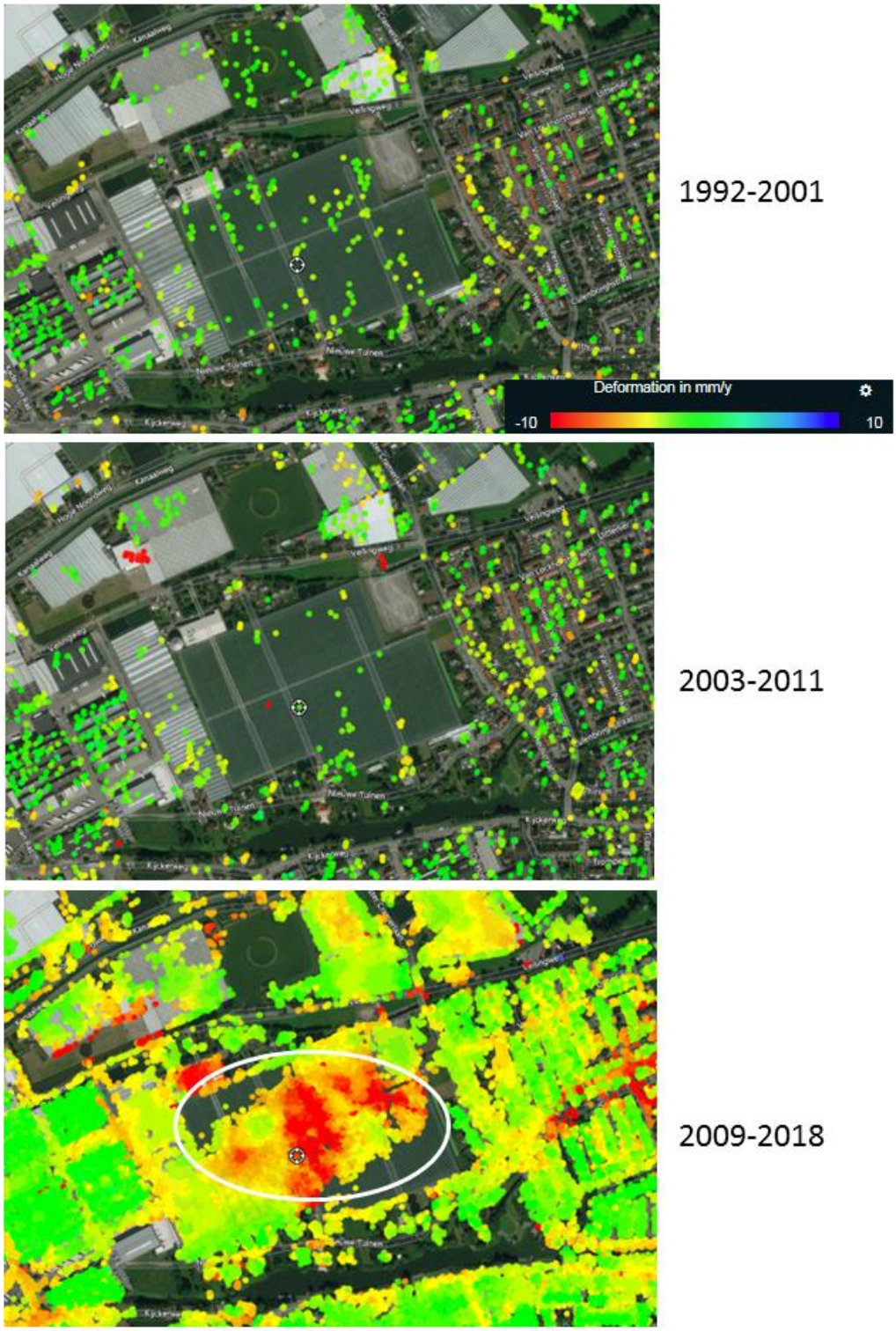
Figuur 5.6 Gebied A (ten zuiden van De Lier). Boven: ERS (1992-2001). Beneden: ENV (2003-2011). Clusters waarvoor de snelheid is veranderd zijn aangegeven met een wit kader. De snelheidstoename bedraagt ca. 1-4 mm/jaar.



Figuur 5.7 Gebied A (ten zuiden van De Lier). Boven: ENV (2003-2011). Beneden (TSX) (2009-2018). De witte kaders geven de clusters aan waarvoor veranderingen zijn geconstateerd tussen de voorgaande periodes (ERS – ENV). Merk op dat er weinig tot geen verandering is tussen ENV en TSX. De rode ovaal linksboven geeft aan dat er wel een snelheidstoename van ENV – TSX te zien is voor de wegdelen daar.



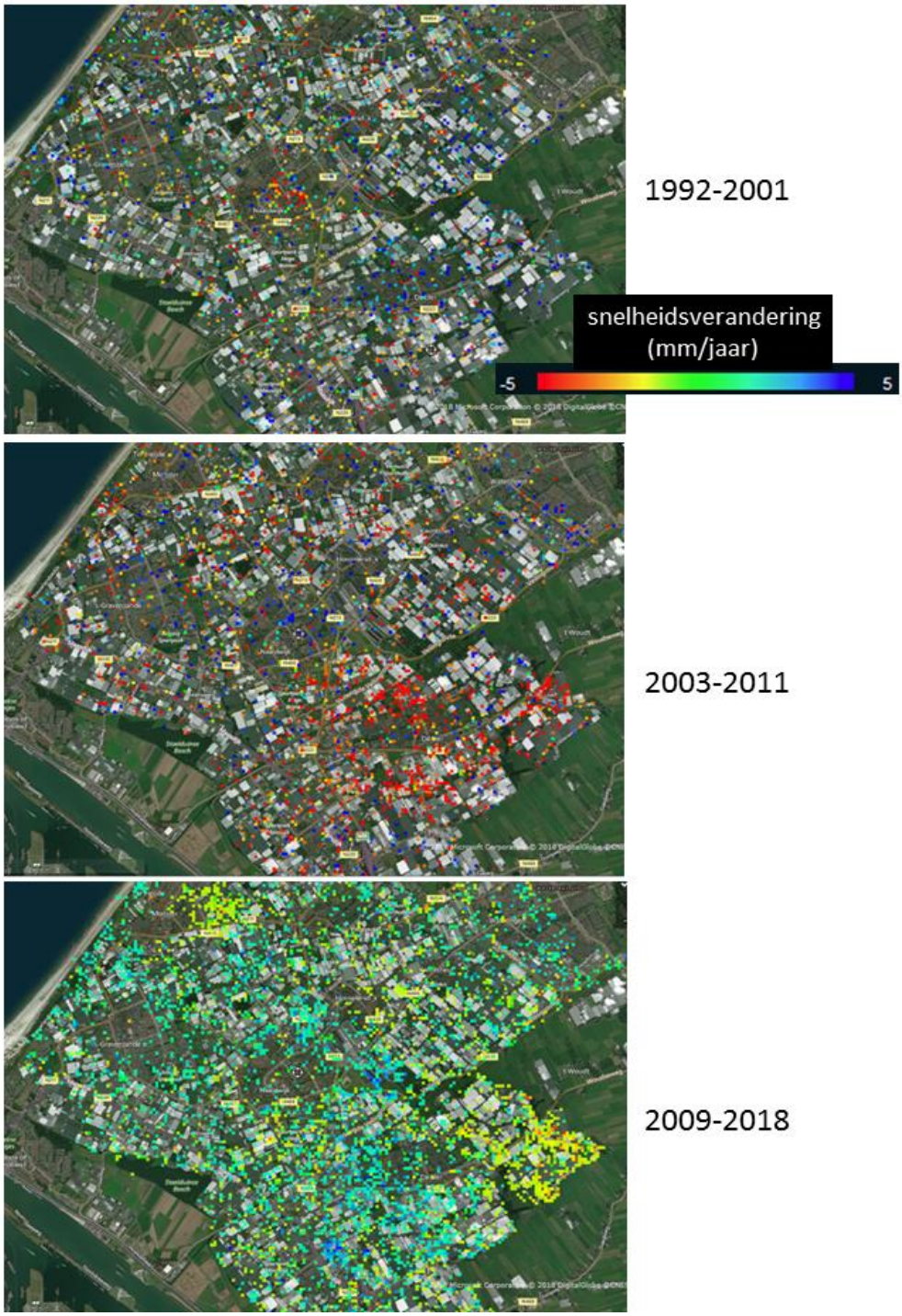
Figuur 5.8 Gebied B (tussen 's-Gravenzande en Monster). Van boven naar beneden: ERS, ENV, TSX. Voor ENV zijn snelheden iets (orde van 1 a 2 mm/jaar) hoger van voor ERS. Op veel plaatsen neemt de snelheid weer af in de periode van TSX.



Figuur 5.9 Gebied C (direct west van woonkern De Lier). Van boven naar beneden: ERS, ENV, TSX. Hogere gemiddelde snelheid voor TSX. Het betreft een groot kassencomplex dat is gebouwd in 2009/2010.

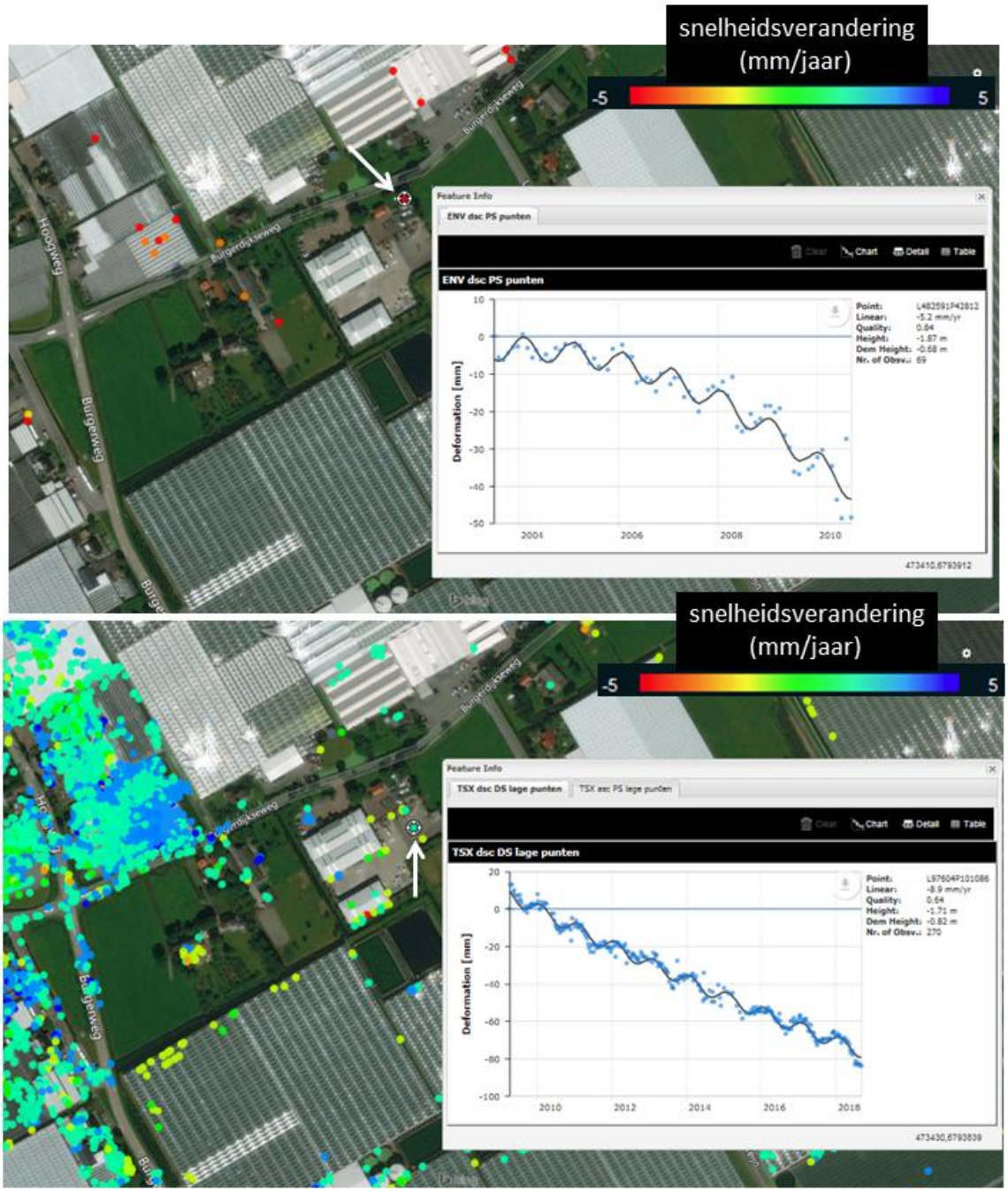
5.3.2 Versnellingen of vertragingen binnen de waarnemingsperioden

Figuur 5.10 toont schattingen van de snelheidsverandering binnen elk van de drie periodes. Figuur 5.11 toont de verandering in meer detail rond De Lier voor de periode 2003-2001. Figuur 5.12 geeft een indruk van beweging op zeer lokale schaal ten zuiden van De Lier.



Figuur 5.10 Snelheidsverandering (negatief is toenemende daling) binnen waarnemingsperiodes. Van boven naar onder: ERS, ENV, TSX. Dit betreft een grove pixelschaal waarbinnen informatie van meerdere punten wordt gemiddeld.

Figuur 5.11 Gebieden waarin een vrij sterke versnelling (rode punten) in de periode 2003-2011 (ENV) dominant is (wit omkaderd). Daarbuiten is het signaal meer gemengd (zowel versnelling als vertraging).

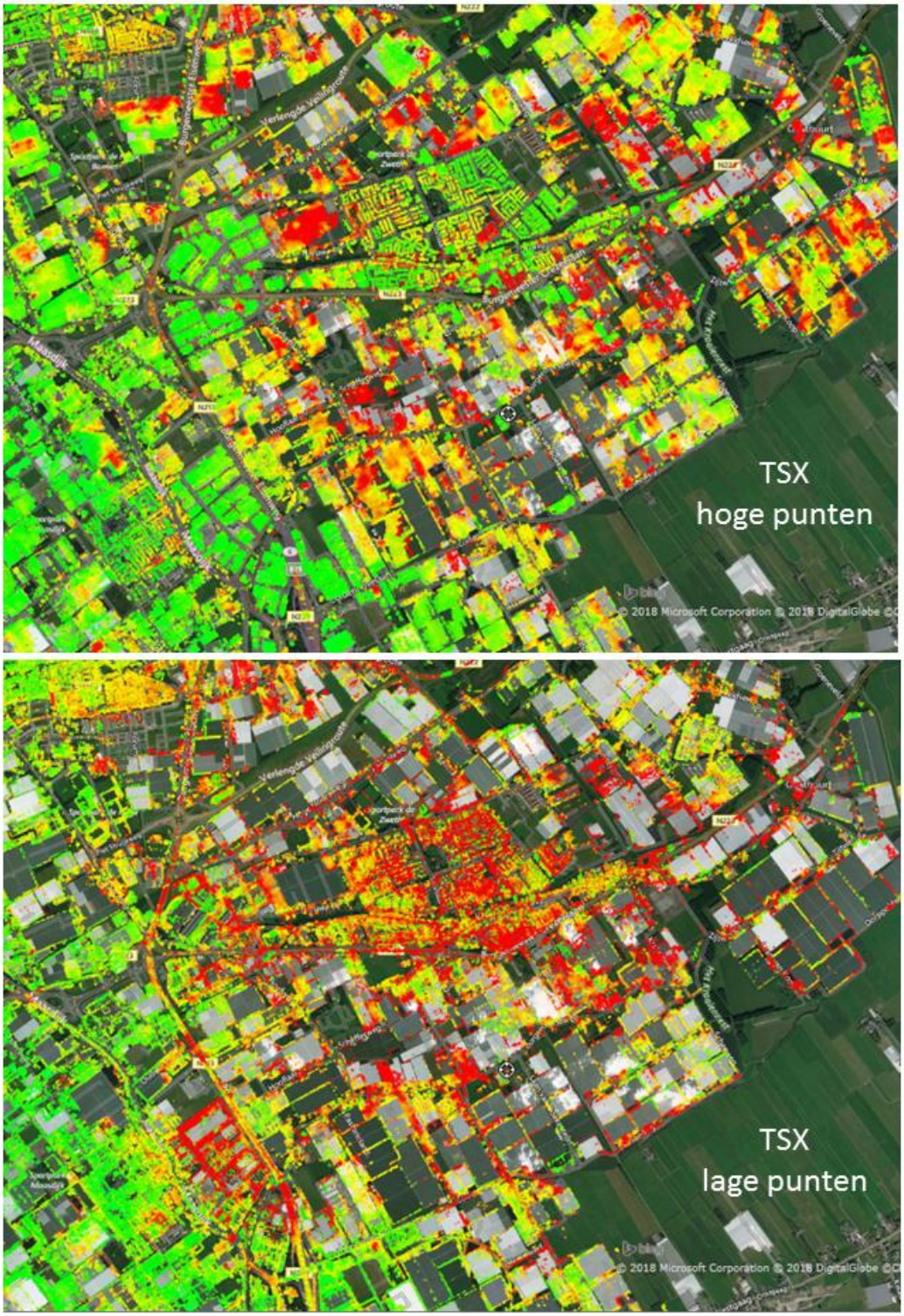


Figuur 5.12 Indruk van tijdreeks en snelheidsverandering binnen waarnemingsperiode op zeer lokale schaal. Boven ENV, onder TSX. Het waarnemingspunt is aangegeven met een witte pijl. N.B. waarnemingspunten voor de twee perioden zijn niet dezelfde. Het beeld is alleen in heel algemene termen representatief voor een groter gebied (versnelling in de ENV periode en geen tot een geringe afname van snelheid voor TSX. Snelheden variëren vrij sterk over vrij korte afstand.

5.3.3 Verschil maaiveldbeweging en gebouwen

Figuur 5.13 visualiseert de gemiddelde dalingssnelheid voor hoge en lage punten voor TSX. Hoge punten liggen vrijwel altijd op gebouwen. Vaak is duidelijk dat lage punten op wegen liggen, en daardoor maaiveldbeweging weerspiegelen. Omdat kassen en bedrijfsgebouwen

soms vrij laag zijn of lage delen bevatten geven lage punten deels ook de beweging van gebouwen weer. In de woonwijken van De Lier en aan de westzijde van het beeld is de scheiding maaiveld bebouwing het duidelijkst.



Figuur 5.13 Visualisatie van gemiddelde snelheid voor TSX voor hoge (boven) en lage punten (onder). Schaal -5 tot +5 mm/jaar.

5.4 Discussie en conclusies

Bodemdaling in het studiegebied is het grootst in het centraal-oostelijk deel van het Westland (COW), in de ruime omgeving van De Lier (geel tot rode tinten in Figuur 5.4). Deze discussie richt zich hoofdzakelijk op dat gebied.

Zetting door belasting en ontwatering speelt een belangrijke rol

De bodemdalingssnelheid is op hoofdlijnen onveranderd sinds de periode 1992-2001 (ERS). Een korte inspectie van historische hoogtes van NAP-merken in het gebied (niet gedocumenteerd in dit rapport) geven de indruk dat dalingen van 2 tot 5 mm/jaar al bestonden in de 70'er en 80'er jaren in het kassengebied den zuiden van Kwintsheul (buiten de grenzen van de gasvelden) en ten zuiden van De Lier. Het is daardoor onwaarschijnlijk dat het dalingsgebied van het COW in hoofdzaak wordt bepaald door grondwateronttrekking (grondwateronttrekking zou wel bij kunnen dragen aan het 'op gang houden' van de daling over langere tijd). Zetting door belasting en ontwatering levert zeer waarschijnlijk een belangrijke bijdrage aan de bodemdaling van dit gebied. Dat het COW in vergelijking met andere delen van het Westland grotere daling laat zien komt zeer waarschijnlijk voor uit een ondergrond die gevoeliger is voor belasting met infrastructuur en bebouwing (ook kassen), ontwatering en stijghoogteverlaging door onttrekkingen. In vergelijking met andere delen van Zuid Holland speelt veenoxidatie alleen lokaal mogelijk een rol omdat er in de bovenste paar meter weinig veen voorkomt.

Bijdrage dieper dan top Pleistoceen zeer beperkt

Figuur 5.13 laat duidelijk zien dat veel woningen en gebouwen weinig of niet dalen terwijl de omgeving dat wel doet. Dat geldt woning in De Lier (wel verschillend per wijk) en gebouwen aan de westzijde van het beeld, maar ook voor sommige gebouwen en woningen in het kassengebied. Dit wijst op de aanwezigheid van een diepe fundering, waarschijnlijk tot op het Pleistocene zand van het 1e watervoerende pakket. Het geeft ook aan dat er géén belangrijke bijdrage is aan de gemeten maaivelddaling door diepe oorzaken zoals de gaswinning, anders zouden deze gebouwen meer moeten dalen. De hogere dalingssnelheden van maaiveld en andere gebouwen (kassen) kunnen daardoor vrijwel volledig worden toegeschreven aan samendrukking van bodemlagen in de Holocene deklaag.

De recent (herfst 2018) gepubliceerde nationale bodemdalingskaart (https://bodemdalingskaart.nl/) laat 'diepe bodemdaling' zien direct ten oosten en noordoosten van De Lier van iets meer dan 2 mm/jaar voor de periode 2015-2018. Deze waarden volgen uit een redelijke, maar ook enigszins willekeurige statistische splitsing in diepe en ondiepe daling die is toegepast op nationale schaal. Wat 'diepe bodemdaling' in deze kaart betekent is daarom niet duidelijk. In de betreffende pixels van 2*2 km van de nationale bodemdalingskaart zijn ook gebouwen te vinden die minder snel dalen dan de gerapporteerde 'diepe bodemdalingssnelheid'. Mogelijk bevat de schatting voor diepe daling bijdragen die een oorsprong hebben in de Holocene deklaag.

Wat zegt het dat veel kassen dalen?

De waarneming dat kassen, in tegenstelling tot woningen en gebouwen, de maaivelddaling soms deels of geheel lijken te volgen (Figuur 5.13; hoge punten, deels ook lage punten) heeft waarschijnlijk te maken met het type fundering.
De volgende beschrijving over fundering van kassen is verstrekt door dhr G. Meis van LTO Glaskracht: “Bij kassen wordt over het algemeen gebruik gemaakt van paalfunderingen. Afhankelijk van de belasting worden de palen op kleef (wrijvingsweerstand in de ondergrond) of stuit (heien tot een zandlaag) gezet. De diepte is afhankelijk van de ondergrond, met name de aanwezigheid van een voldoende dikke zandlaag. Als de zandlaag te diep zit om op stuit te funderen, dan wordt er op basis van kleefkracht gefundeerd”.
De relatief sterke daling van kassen kan erop wijzen dat de samendrukking van bodemlagen deels onder de paalfunderingen plaatsvindt in de diepere delen van het Holocene pakket, zoals met name wordt verwacht bij bodemdaling die wordt veroorzaakt door stijghoogteverlaging in het onderliggende watervoerende pakket. Als palen op kleef zijn gefundeerd kan compactie in de deklaag in het dieptebereid van de palen ook de draagkracht (kleef) verminderen of zorgen voor negatieve kleef, wat ervoor zorgt dat de kas daalt. Gezien de grote oppervlakte van een kascomplex, is het minder waarschijnlijk dat deze constructies dalen onder invloed van negatieve kleef die wordt veroorzaakt door oppervlakkige belastingen (ophogingen) in de omgeving van het complex. Stijghoogteverlaging in het 1^{e} watervoerende pakket zou dus een rol kunnen spelen bij de daling van kassen. Omdat er geen directe metingen zijn van het dieptebereik in het Holocene pakket waarin de samendrukking plaatsvindt, zijn deze ideeën op dit moment echter niet te testen.

De toegenomen dalingssnelheid voor gebied C (Figuur 5.9) in de periode 2009-2018 volgt direct op de aanleg van een nieuw groot kassencomplex. Deze daling zou dus te maken kunnen hebben met ‘normale zetting’. Dat wil zeggen, een verband met stijghoogteverlaging is niet evident. Wat opvalt is dat de daling het grootst is in het centrale deel van het complex en ruimtelijk varieert. Direct buiten het kassencomplex is geen toename van de bodemdaling te zien.

Toename bodemdaling door onttrekkingen?

Alleen in het kassengebied direct ten zuiden van De Lier zijn meerdere aanwijzingen die in overeenstemming zijn met een invloed van onttrekkingen. Het centrum van dat gebied ligt rond de Schefferweg en de Hoogweg:

- De gemiddelde dalingssnelheid in de periode 2003-2011 is op veel plaatsen 1 tot 4 mm/jaar hoger dan de gemiddelde snelheid in 1992-2001 (Figuur 5.6).
- In de periode 2003-2011 is er op veel locaties in het gebied een versnelling van de bodemdaling te zien met een toename van de dalingssnelheid van 5 mm/jaar of meer (Figuur 5.10 en Figuur 5.11).
- Deze versnelling wordt gevolgd door een lichte afname van de dalingssnelheid in de periode 2009-2018 (Figuur 5.10 en Figuur 5.12).

De toename van dalingssnelheid van ca. 5 mm/jaar is in goede overeenstemming met de verwachte/berekende toename van snelheid voor een stijghoogteverlaging tussen 2 en 3 m in dat gebied (Tabel 4.2). De daaropvolgende langzame afname van de dalingssnelheid sluit ook uitstekend aan bij de verwachting (conclusies 1 en 2 in 4.3).

Elders, ten zuidoosten, ten oosten en ten noorden van De Lier, en ook in de noordelijke woonwijken van De Lier is er ook een vrij algemeen voorkomende versnelling in de bodemdaling aanwezig in de periode 2003-2011 (Figuur 5.11) die zou kunnen wijzen op een invloed van stijghoogteverlaging. In vergelijking met het gebied rond de Schefferweg en de Hoogweg is er echter geen logische aansluiting van de snelheden op die van de voorgaande (1992-2001) en volgende periode (2009-2018).

Voor GW7 ten ZW van Naaldwijk, waar een verlaging van meer dan 2 m was gevonden (Figuur 5.5) is geen enkele aanwijzing voor een invloed van die verlaging in de InSAR data gevonden.

Het is opvallen dat er in het zuidelijke kassengebied bij de Herenwerf, waar een sterke verlaging is gevonden (GW10; B37B3813; Figuur 5.5), weinig maaivelddaling plaatsvindt in de periode 2009-2018. GeoTOP toont een vrij continue aanwezigheid van basisveen rond deze locatie. Mogelijk heeft dit een afschermende werking door een lage doorlatendheid.

Buiten het COW is in het kassengebied direct naast de duinen tussen ’s-Gravenzande en Monster (Figuur 5.8) de gemiddelde bodemdalingssnelheid in de periode 2003-2011 iets hoger (1 a 2 mm/jaar) dan in de voorgaande waarnemingsperiode (1992-2001). Er is verder echter geen informatie om deze waarneming te kunnen relateren aan stijghoogteverlaging. Er zijn opvallend veel WKO’s actief in dat gebied; de beschikbare datasets bevatten weinig brijnsystemen (8B).

De afwezigheid van een duidelijk zichtbare bodemdalingstoename op plaatsen waar wel een significante stijghoogteverlaging heeft plaatsgevonden kan te maken hebben met de doorlatendheidsverdeling van de deklaag (conclusies 6 en 7 in 4.3). Dat zou betekenen dat er ook echt geen significante invloed op de bodemdaling is op die plaatsen. Het is echter niet uitgesloten dat de bodemdalingstoename er op bepaalde plaatsen wel is, maar niet goed kan worden vastgesteld door de lage resolutie en lage puntdichtheid van de oudere InSAR data (ERS en ENV) en het feit dat er in die datasets onderscheid tussen hoge en lage punten lastig is te maken. Figuur 5.14 illustreert dit punt voor een gebied binnen de woonkern van De Lier. De ENV set laat meer punten met een vrij hoge daling zien dan de ERS set (Figuur 5.14). Over het algemeen betreffen de rode en gele punten locaties waarvoor geen waarneming aanwezig is in de ERS set. Bovendien bestaat de mogelijkheid dat de groene punten van de ERS set vooral meer de woningen vertegenwoordigen. Er zou een toename van maaivelddaling kunnen hebben plaatsgevonden, maar dit is op basis van deze data niet goed vast te stellen.

Figuur 5.14 Voorbeeld van een situatie waarvoor een toename van bodemdaling aan de orde kan zijn, maar niet goed kan worden vastgesteld.

Mochten er bij meer gedetailleerde analyse locaties gevonden worden waarbij een toename van bodemdaling waarschijnlijk is, dan moet ook worden onderzocht of er andere oorzaken dan een verlaging van de stijghoogte aan ten grondslag zou kunnen liggen.

6 Algemene conclusies

6.1 Antwoorden op de onderzoeksvragen

6.1.1 Deelgroepvragen 1

Wat is de aard van de verlagingen veroorzaakt door verschillende soorten onttrekkingen (WKO; beregening/gietwater; anders) en in samenhang?

Brijnsystemen

Seizoensgebonden onttrekkingen voor beregening, en voornamelijk de brijnsystemen voor de glastuinbouw, zijn veruit de belangrijkste oorzaak van stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket in het studiegebied. Dit valt op te maken uit het feit dat de waargenomen verlagingen zich voordoen in het zomerseizoen, grofweg maart t/m oktober. De verlagingen bereiken een maximum de zomermaanden en herstellen zich in de winter.

Door hiaten in de monitoringsdata is er vrijwel geen zicht op wanneer deze stijghoogteverlagingen zijn ontstaan en of dat vrij geleidelijk is gebeurd of in een korte periode. De registratie van de onttrekkingen (tijdstip van ingebruikname en daadwerkelijke onttrekkingshoeveelheden) is ontoereikend om daar met modelberekeningen een betrouwbare reconstructie van te maken.

Het stijghoogteverlagingsbeeld dat in hoofdzaak door de brijnsystemen wordt veroorzaakt is complex. De ruimtelijke en temporele ontwikkeling is afhankelijk van het moment van ingebruikname van de individuele systemen, de locaties van de putten van de systemen, de daadwerkelijke onttrekkingsdebieten, en de ruimtelijk variërende geohydrologische eigenschappen van de ondergrond. Voor de onttrekkingssystemen ontbreekt goede informatie om de verlagingen betrouwbaar te kunnen voorspellen/modelleren in het studiegebied. Doordat individuele systemen verlaging veroorzaken tot meer dan een kilometer van de daadwerkelijke onttrekking, kunnen er vrij grote verlagingen ontstaan op plaatsen waar de dichtheid van systemen groot is (en onttrekkingshoeveelheden groot zijn), en kan zich een algemene verlaging voordoen in een relatief groot gebied. Grondwaterstandswaarnemingen laten stijghoogteverlagingen zien tot 3.2 m. Het is waarschijnlijk dat lokaal grotere verlagingen vóórkomen gezien de lage dichtheid van grondwaterwaarnemingsputten. Verkennende modellering wekt de indruk dat verlagingen van 3 m of meer alleen kunnen worden verklaard als de waarneming heel dicht bij een onttrekkingsput is gedaan (niet nader onderzocht), of wanneer de daadwerkelijke debieten van de onttrekkingen hoger zijn dan de vergunde onttrekkingsdebieten.

Verlagingen van meer dan 0.5 m zijn gevonden voor 17 waarnemingsputten. Deze putten liggen in én in de ruime omgeving van De Lier. De grootste verlagingen met waarden tot 3.2 m zijn aangetroffen ten zuiden van De Lier.

Er zijn geen overtuigende aanwijzingen voor verlagingen van het freatisch niveau in de waarnemingen. Desalniettemin mag verwacht worden dat lokaal ook invloed is op het freatisch niveau waar de weerstand van de deklaag relatief gering is en grondwateraanvulling uit neerslag of oppervlaktewater beperkt.

Voor grote delen van het de gemeente Westland zijn er weinig of geen waarnemingspunten om eventuele verlagingen te kunnen constateren. Dat is bijvoorbeeld het geval rond Poeldijk, en tussen Hoek van Holland en Maasdijk.

Er zijn volgens de beschikbare informatie brijnsystemen aanwezig in het Westland (en in het kassengebied ten oosten van Delft) die onttrekken uit de Holocene deklaag. Deze zullen vooral voor verlaging van de stijghoogte (en freatisch niveau) zorgen binnen de deklaag. Dit is in deze studie niet onderzocht.

WKO
Zeer lokaal zullen WKO doubletten die onttrekken en injecteren in het 1e watervoerende pakket vanaf het moment van ingebruikname ook voor verlaging hebben gezorgd. De verlaging treedt op rond de warme bron in de winter en rond de koude bron in de zomer. Tegelijkertijd wordt door injectie stijghoogteverhoging veroorzaakt rond de koude bron in de winter en de warme bron in de zomer. Op een afstand van enkele honderden meters is er weinig of geen verlaging of verhoging aanwezig.

Andere onttrekkingen
Verlagingen door industriële onttrekkingen zijn van weinig of geen betekenis in het studiegebied. De invloed van de DSM onttrekking in Delft noord wordt bij onderzoeksvraag 2 besproken. Bronbemalingen bij bouwputten zouden voor tijdelijke verlagingen kunnen zorgen, maar daar is in deze studie geen onderzoek naar gedaan.

6.1.2 Deelgroepvragen 2

Wat zijn de verwachtingen omtrent de bodemdaling die wordt veroorzaakt door die verlagingen? Hoe groot is de magnitude van de bodemdaling? Hoe ontwikkelt de bodemdaling zich door de tijd? Welke factoren zijn belangrijk voor de tijdsontwikkeling? Wat is de minimale stijghoogteverlaging die merkbare bodemdaling veroorzaakt? Wat is de betekenis van de afbouw van de DSM onttrekking in Delft?

Algemeen
De seizoenale stijghoogteverlagingen zorgen primair voor een toename van de bodemdalingssnelheid door het samendrukken van (voornamelijk) kleilagen die zich boven het watervoerende pakket bevinden. In de loop van de tijd ontwikkelt zich daardoor een bodemdaling in centimeters of decimeters.

De stijghoogteverlaging vergroot dus de bodemdalingssnelheid die al aanwezig is en die wordt veroorzaakt door andere factoren zoals krimp (rijping) van gedraineerde bodemlagen boven de grondwaterspiegel, oxidatie van organisch materiaal en kruip in klei en veenlagen in het Holocene pakket die wordt veroorzaakt door diverse belastingen zoals wegen, ophogingen en bedoelde of onbedoelde verlagingen van het freatisch niveau. Deze “achtergronddaling” kan in de orde van mm/jaar tot cm/jaar zijn (o.a. in Gouda) en vrij sterk variëren in ruimte en tijd.

De seizoenale stijghoogteverlagingen in het 1e watervoerende pakket zorgen voor een toename van de bodemdalingssnelheid door het vergroten de kruip in de bodemlagen in het Holocene pakket. Plaatselijk zou ook een toename van daling door krimp en/of oxidatie kunnen optreden wanneer de onttrekkingen zorgen voor een verlaging van het freatisch grondwaterniveau. Deze laatste bijdrage is in het Westland naar verwachting gering.
Magnitude en tijdsontwikkeling van de veroorzaakte bodemdaling

Modelberekeningen geven een groot bereik aan bodemdaling die kan zijn veroorzaakt door de stijghoogteverlagingen. De modeluitkomsten zijn sterk afhankelijk van de lokale bodemopbouw, bodemeigenschappen, en de historische ontwikkeling van de stijghoogteverlaging, factoren die slechts beperkt bekend zijn. De daadwerkelijk opgetreden bodemdaling door de verlagingen is daardoor niet nauwkeurig te reconstrueren. Een seizoenale stijghoogteverlaging van 3 m kan enkele centimeters, maar ook meer dan twee decimeter aan bodemdaling hebben veroorzaakt. En die daling kan heel geleidelijk hebben plaatsgevonden over enkele decennia, waardoor deze niet goed is te onderscheiden van bodemdaling door andere oorzaken, of in vrij korte tijd tot stand zijn gekomen wat gepaard zou zijn gegaan met een potentieel beter herkenbare trendbreuk in de bodemdalingssnelheid. Waar deze trendbreuk zou corresponderen met een bekende toename van de stijghoogteverlaging zou dit een bijzonder sterke aanwijzing geven voor een door de verlaging veroorzaakte bodemdaling.

Zoals mag worden verwacht neemt de magnitude van de (door de stijghoogteverlagingen) veroorzaakte bodemdaling in principe toe met de magnitude van stijghoogteverlaging. Twee andere factoren die zowel de magnitude als de tijdsontwikkeling van de veroorzaakte bodemdaling in sterke mate bepalen zijn:

1. De tijdsontwikkeling van de stijghoogteverlaging (zie deelgroepvraag 1).

Nabij nieuwe onttrekkingen of in gebieden waar in korte tijd veel nieuwe onttrekkingen worden opgestart kan de verlaging in korte tijd sterk toenemen. Waar zich deze omstandigheden voordoen is de door de verlaging veroorzaakte dalingssnelheid het grootst tijdens of kort na het moment dat de grootste verlaging plaatsvindt en neemt deze in de jaren daarna geleidelijk af (bijvoorbeeld Figuur 4.7). Het kan vier tot vijf decennia duren voordat de maximaal veroorzaakte bodemdaling (in cm of dm) wordt bereikt (vergelijkbaar met restzetting na oplevering van een nieuwbouwproject).

In gebieden waar over een lange periode nieuwe onttrekkingen worden opgestart zal de verlaging zich meer geleidelijk ontwikkelen. Waar zich deze omstandigheden voordoen neemt de dalingssnelheid beperkt toe (in vergelijking met de voorgaande situatie) en blijft deze over lange tijd min of meer constant (bijvoorbeeld Figuur 4.9). Nadat de stijghoogteverlaging min of meer constant wordt neemt de veroorzaakte bodemdalingssnelheid geleidelijk af (restbodemdaling).

2. De lokale bodemopbouw van de Holocene deklaag.

De verticale verdeling van samendrukkingseigenschappen heeft een belangrijke invloed op de veroorzaakte bodemdaling. De aanwezigheid van sterker samendrukbare lagen vergroot de kans op een sterke bodemdaling door stijghoogteverlaging. Lagen dieper in de deklaag hebben daarbij in principe een grotere invloed. De doorlatendheidsverdeling is echter minstens zo bepalend. Slecht-doorlatend klei of veen onderin de deklaag kan de bodemdalingsbijdrage van erboven gelegen bodemdalen heel sterk beperken, ook als deze ondiepere lagen erg slap zijn. Omgekeerd kunnen goed-doorlatende geulopvullingen in de deklaag die contact maken met het onderliggende watervoerende pakket er ook voor zorgen dat stijghoogteverlagingen lateraal diep de deklaag indringen in ‘zandige tussenlagen’ en daarmee daar de samendrukking van boven en/of onderliggend klei en veen versterken (het aspect van meerdimensionale grondwaterstroming binnen de deklaag is niet beschouwd in de berekeningen in hoofdstuk 4). Gezien de heterogene opbouw van de deklaag rond De Lier mag verwacht worden dat de door de stijghoogteverlaging veroorzaakte bodemdaling ruimtelijk sterk kan variëren. Als dat het

geval is kan dat relevante gevolgen hebben voor de waterhuishouding (afwatering) en het afschot van drainage en riolering.

Is er een minimale stijghoogteverlaging die merkbare bodemdaling veroorzaakt?
Op basis van de modellering en de onderliggende theorie, wordt verwacht dat een seizoensverlaging van een halve meter tot een meter nodig is om een merkbare toename van de bodemdalingssnelheid met 1 a 2 mm/jaar of een uiteindelijke daling van enkele centimeters te veroorzaken. Ook hier is een grote gevoeligheid voor de bodemopbouw en de voorgeschiedenis van het belasten van de bodemlagen. Op plaatsen waar in het verleden (minimaal enkele decennia terug) grote en vrij langdurige verlagingen hebben plaatsgevonden, is de bodemdalingsgevoeligheid voor nieuwe verlagingen kleiner. Een meer langdurige of permanente stijghoogteverlaging veroorzaakt een grotere bodemdaling dan een seizoenale stijghoogteverlaging (met dezelfde magnitude).

Indirecte bijdrage aan bodemdaling
Er mag verwacht worden dat stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket ook indirect kunnen bijdragen aan (extra) bodemdaling doordat ze de zettingsgevoeligheid van de deklaag vergroten. Dat betekent dat de bodemdaling die wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld nieuwe ophogingen (meestal aangeduid met de term zetting) groter zal zijn dan wanneer de stijghoogteverlaging niet aanwezig is.

Betekenis afbouw DSM onttrekking
De stijghoogtetoename aan de oostrand van het kassengebied van het Westland door de afbouw van de DSM onttrekking, zal op ca. 5 km van de onttrekking, naar verwachting maximaal een halve meter bedragen. De toename neemt af verder naar het westen en zuiden. Deze stijghoogteverhoging zal zorgen voor een reductie van de bodemdalingssnelheid aan de oostrand van het kassengebied met niet meer dan 1 mm/jaar.

6.1.3 Deelgroepvragen 3

Is er bevestiging voor de verwachte effecten op bodemdaling vanuit diverse soorten waarnemingen? (a) gedrag gemeten zettingen (waterpassingen) (b) satellietwaarnemingen (InSAR).

(a) Gedrag gemeten zettingen (waterpassingen).
Volgens mondelinge informatie van de Gemeente Westland (Kees Nagelkerke), is er bij een recente gebiedsontwikkeling bijzonder zettingsgedrag geregistreerd bij reguliere ophoging/voorbelasting (project Liermolen). De zettingssnelheid zou eerst een normale afname hebben vertoond (logaritmisch verloop met te tijd), maar zou in het voorjaar/zomer weer zijn versneld. Dit gedrag zou een sterke aanwijzing zijn voor de invloed van stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. Op basis van de toegestuurde documentatie kan dit gedrag niet overtuigend worden geconstrueerd/geverifieerd.

(b) Satellietwaarnemingen (InSAR).
In het kassengebied direct ten zuiden van De Lier zijn sterke aanwijzingen voor een toename van bodemdaling door stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket (Figuur 5.6). Het centrum van dat gebied ligt rond de Schefferweg en de Hoogweg. In de periode 2003-2011 heeft een versnelling van de bodemdaling plaatsgevonden (toename van ca. 5 mm/jaar). In de periode 2009-2018 is er een geringe afname van de dalingssnelheid waarneembaar. Het bodemdalingsgedrag sluit goed aan bij de verwachtingen voor een stijghoogteverlaging van 2 à 3 m die in het gebied is geconstateerd.

In andere delen van het kassengebied rond De Lier is de informatie minder duidelijk. Hoewel een vergelijkbare versnelling in de bodemdaling is te zien in de periode 2003-2011 (Figuur 5.11) sluiten de snelheden niet goed aan bij de snelheden die zijn geregistreerd in de voorgaande (ERS, 1992-2001) en volgende (TSX, 2009-2018) periode.

Modelsimulaties geven aan dat de bodemdalingssnelheid die wordt veroorzaakt door een stijghoogteverlaging lokaal erg gering kan zijn, ondanks een grote magnitude van de verlaging. Dit lijkt het geval te zijn het zuidelijke kassengebied bij de Herenwerf waar een stijghoogteverlaging geconstateerd van ca. 3 m, maar de maaivelddalingssnelheid gering is (InSAR 2009-2018).

In de woonkern van De Lier komen hoge snelheden van maaivelddaling van meer dan 10 mm/jaar op uitgebreide schaal voor en over de gehele periode 1992-2018, met name in de wijken rond park De Lierhout. Stijghoogteverlaging die is geconstateerd in De Lier zou hier een bijdrage in kunnen hebben, maar de hoge snelheden alleen bieden te weinig aanknopingspunten om die relatie te kunnen leggen.

6.2 Conclusies

1 In het Westland zijn seizoensgebonden onttrekkingen voor beregening, en voornamelijk de brijnsystemen voor de glastuinbouw, veruit de belangrijkste oorzaak van stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. In de omgeving van De Lier komen in het zomerseizoen in recente jaren (vanaf ca. 2009) op uitgebreide schaal stijghoogteverlagingen voor van 2 tot 3 meter en mogelijk zijn er grotere verlagingen aanwezig. De verlagingen herstellen weer gedurende de winter.

2 Door hiaten in de monitoringsdata is er vrijwel geen zicht op wanneer deze stijghoogteverlagingen gedurende de afgelopen 30 jaar zijn ontstaan en of dat vrij geleidelijk is gebeurd sinds de jaren ‘90 of in een korte periode. De registratie van de onttrekkingen (tijdstip van ingebruikname en daadwerkelijke onttrekkingshoeveelheden) is ontoereikend om daar betrouwbare reconstructie van te doen met modelberekeningen.

3 Voor veel andere delen van het Westland is er geen zicht op potentiële stijghoogteverlagingen door een gebrek aan waarnemingpunten.

4 In vergelijking met brijnsystemen veroorzaken WKO-systemen die onttrekken uit het 1e watervoerende pakket slechts zeer lokaal stijghoogteverlaging rond onttrekkingsputten en deze verlaging gaat over in een stijghoogteverhoging in het andere seizoen omdat dezelfde put dan wordt gebruikt voor infiltratie.

5 In de periode waarin de huidige seizoenale verlagingen zijn ontstaan (niet goed bekend) hebben de verlagingen waarschijnlijk gezorgd voor een toename van al aanwezige bodemdalingssnelheden. Daardoor is naar verwachting extra maaivelddaling veroorzaakt. Ook wanneer de onttrekkingen niet worden uitgebreid en de verlagingen stabiel blijven op het huidige niveau, moet nog rekening worden gehouden met enige ‘restbodemdaling’ (door de onttrekkingen) die meerdere decennia kan duren voordat deze is gestopt.

6 Een stijghoogteverlaging van ca. 3 m zoals is waargenomen kan een toename van de dalingssnelheid hebben veroorzaakt tussen 1 mm/jaar en meer dan 50 mm/jaar (vooral heel grote waarden zouden van korte duur zijn en snel afnemen). De totale daling na 20

jaar kan 1,5 cm bedragen, maar zou ook ruim 20 cm kunnen zijn. Deze bandbreedte in de modeluitkomsten is afhankelijk van de lokale bodemopbouw, de bodemeigenschappen en de tijdsontwikkeling van de stijghoogteverlaging.

7 Stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket kunnen ook indirect bijdragen aan (extra) bodemdaling doordat ze de zettingsgevoeligheid van de deklaag vergroten. Dat betekent dat de bodemdaling die wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld nieuwe ophogingen (meestal aangeduid met de term zetting) groter zal zijn dan wanneer de stijghoogteverlaging niet aanwezig is.

8 De geplande afbouw van de DSM onttrekking in Delft Noord heeft een kleine maar positieve invloed op bodemdaling in het oostelijk deel van het Westland omdat de stijghoogte in het 1e watervoerende pakket iets zal stijgen (orde van enkele dm).

9 In het kassengebied ten zuiden van De Lier zijn sterke aanwijzingen voor toegenomen bodemdaling door onttrekking met brijnsystemen op basis van waarnemingen aan bodemdaling met radarsatellietbeelden (dalingssnelheidstoename met ca. 5 mm/jaar tussen 2003 en 2011). Elders in en rond de Lier zouden ook bodemdalingseffecten door de verlagingen aan de orde kunnen zijn, maar bieden de radarsatellietdata daarover geen uitsluitsel. Dat geldt ook voor de vrij hoge maaivelddalingssnelheden in de woonkern van De Lier die zijn afgeleid uit de radarsatellietdata.

10 Bij verdere uitbreiding van en aantal onttrekkingen en/of vergroting van vergunde onttrekkingshoeveelheden van bestaande systemen mag verwacht worden dat de reeds in gang zijnde bodemdaling zal toenemen. Indien de stijghoogteverlaging gestabiliseerd wordt (of blijft) op het huidige niveau moet nog rekening worden gehouden met enige ‘restbodemdaling’ die meerdere decennia kan duren voordat de daling is gestopt.

6.3 Aanbevelingen

Het volgende wordt naar aanleiding van deze studie aanbevolen:

Ten aanzien van aanvullende kennisontwikkeling:

- Centrale deel van gebied A (Figuur 5.6): Na te gaan of de daling in dit gebied heeft geleid tot problemen en/of extra ingrepen in de openbare ruimte (waterbeheer) en extra kosten (ook voor bedrijven).

- Centrale deel van gebied A (Figuur 5.6): Informatie in te winnen over de onttrekkingen (start onttrekkingen, hoeveelheden, locaties putten) in het betreffende gebied (centrum gebied A) en met deze informatie de InSAR data nader te bestuderen. Deze activiteit wordt zinvol geacht om de voorlopige conclusie dat er in dit gebied sprake is van toegenomen bodemdaling door grondwateronttrekking nader te toetsen.

- Centrale deel van gebied A (Figuur 5.6): Op basis van de bevindingen van bovenstaande te overwegen om één of meer extensometers te plaatsen om inzicht te verkrijgen in de diepteniveaus in de Holocene deklaag die bijdragen aan de bodemdaling. Een relatief grote bijdrage van diepe niveaus geeft sterke aanwijzingen voor de invloed van onttrekkingen. Gedetailleerde waterspanning-/stijghoogtemonitoring op zou moeten worden toegevoegd om inzicht te verkrijgen in de seizoenale stijghoogtedynamiek binnen de deklaag op verschillende diepteniveaus. Inrichting van een

bodemdalingsmonitoringsite kan ook overwogen worden voor andere locaties in en rond De Lier waar vragen bestaan over opgetreden bodemdaling.

- Gebied C (Figuur 5.9): Informatie in te winnen over een eventuele grondwaterwinning (brijnsysteem) van dit kassencomplex, bouwtechnische aspecten, en eventuele schade door bodemdaling.

- Gericht onderzoek te doen naar bodemdaling door brijnsystemen die onttrekken in de Holocene deklaag.

Ten aanzien van beheersmaatregelen:

- Uitbreiding van grondwatermonitoring in delen van het kassengebied waar nu géén of beperkte monitoring aanwezig is. Toevoegen van waarnemingsfilters binnen deklaag. Inzet van o.a. InSAR data voor locatiebepaling van nieuwe waarnemingspunten (indicaties voor dalingsgevoelige gebieden).

- Verbetering van de informatie over bestaande en nieuwe onttrekkingen (met name brijnsystemen). Nadruk op informatie over het moment van ingebruikname, volledigheid van de systeemregistratie (geen ontbrekende onttrekkingen), daadwerkelijk onttrekkingsdebiet, putlocatie.

- Zoek naar mogelijkheden om verlagingen in gebieden die potentieel gevoelig zijn voor bodemdaling te beperken en terug te dringen om de risico's te verkleinen. Daarbij moet worden gekeken naar vergunningverlening. Ook kan gedacht worden aan peilgestuurd grondwaterbeheer, en aan het bieden van alternatieve bronnen voor de watervoorziening.

7 Referenties

Acacia Water (2018) Grondwateronttrekking Delft-Noord; resultaten van de monitoring in 2017. https://www.delft.nl/milieu/bodem/grondwateronttrekking/documenten-grondwateronttrekking.

Agrimaco (2010) Alternatieven voor brijn in Zuid-Holland, kosten en milieueffecten. http://www.agrimaco.nl/originele-files/bestanden/Alternatieven_brijn_Zuid-Holland_kosten_milieu-effecten.pdf

Den Haan, E. J., 1994. Vertical Compression of Soil. Ph.D. thesis, Delft University.

Erkens G. en H. Kooi (2017) Verkenning bodemdaling in Midden-Delfland. Deltares rapport 11200151-002-BGS-0001.

Faneca Sanchez, M., J. Klein, G. Oude Essink, K. Raat en M. Paalman (2012) Effecten van brijninjectie op de grondwaterkwaliteit en functies in het Westland. Deltares rapport 1205897-000-BGS-007; KWR rapport 2012.096.

Hijma M. en H. Kooi (2018) Bodemdaling in het kustfundament en de getijdebekkens door geologische processen en menselijke activiteiten. Deltares rapport 11200538-008-ZKS-0001.

Roelofsen, F. en 13 anderen, (2008) Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht); onderzoek naar effecten van stopzetting grondwateronttrekking DSM Delft. Deltares/Delft Cluster rapport 2008-U-R0960/A. 102 pp.

8 Bijlagen

A Algemene eigenschappen van enkele soorten onttrekkingssystemen

WKO (warmte-koude opslag systeem; ook wel KWO):

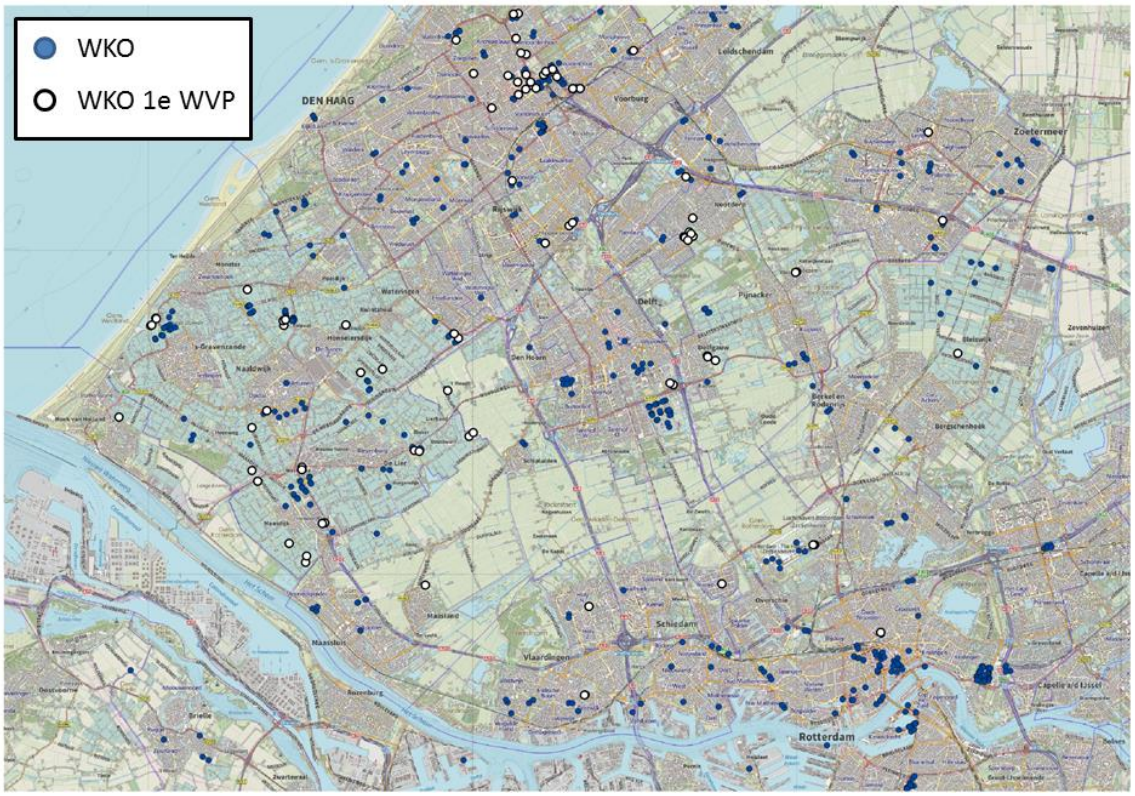
- Er wordt in deze systemen continu net zoveel grondwater onttrokken als geretourneerd. Netto is er dus geen grondwaterverbruik. Meestal gebeurt onttrekking en injectie in verschillende bronnen (putten) op enige tientallen tot ca. honderd meter afstand van elkaar (‘doubletten’ bestaande uit een koude en een warme bron) in hetzelfde watervoerende pakket (WVP). Soms gebeurt onttrekking en injectie in filters in verschillende WVPs in dezelfde bron (‘monobron’). Het WKO systeem op de campus van de Erasmus universiteit in Rotterdam bestaat uit 36 bronnen.
- Met de wisseling van de koude en warme seizoenen keert de functie van elke bron (of elk filter voor een monobron) om; d.w.z. onttrekking wordt injectie en vice versa. Over een tijdsperiode van enkele jaren wordt er per bron of filter net zoveel grondwater onttrokken als er wordt geretourneerd.
- De capaciteit vermeld in Tabel 2.2 betreft de maximaal toegestane onttrekking (óf injectie) gesommeerd over alle bronnen of filters van het totale systeem voor de periode van een jaar. Voor een doublet bestaande uit twee bronnen draagt elke bron daar dus ongeveer de helft aan bij, de ene in het koude seizoen, de andere in het warme seizoen.
- Naast de capaciteit op jaarbasis, is het debiet (volume per tijd) gemaximeerd op uurbasis. Voor kortere periodes kan het onttrekkings- en het injectiedebiet van het systeem daardoor hoger zijn dan het gemiddelde dat volgt uit de capaciteit op jaarbasis. Dat wordt dan gecompenseerd door periodes waarin het systeem niet of beperkt wordt gebruikt.
- Omdat de warmte/koudevraag van het gebouw of de kassen varieert met de variaties in de dag en nachttemperatuur varieert het daadwerkelijke debiet ook op deze relatief korte tijdschaal.

Beregening en brijnsysteem:

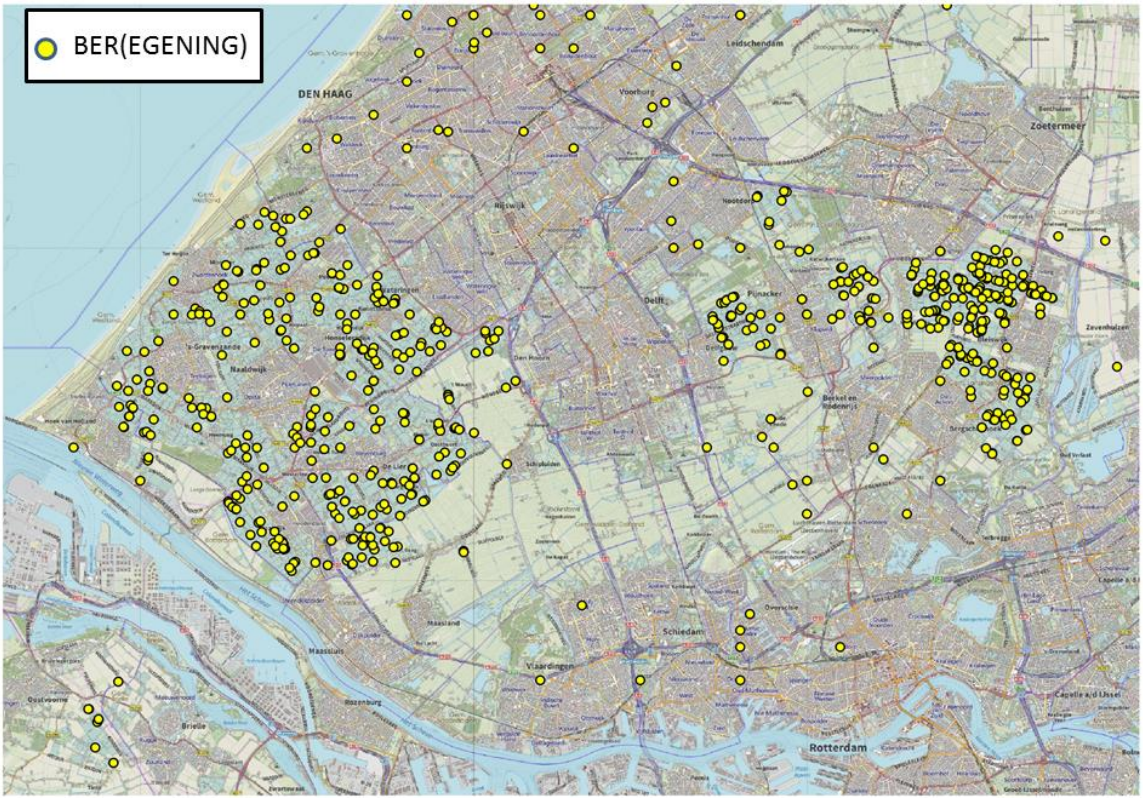
- Deze categorie bevat toepassing variërend van gietwater voor de glastuinbouw en beregening voor akkerbouw tot irrigatie van sportvelden en watervoorziening voor vegetatie tuinen en parken.
- Brijnsystemen onttrekken brak water uit het 1^{e} WVP of uit de deklaag (onder Duinkerke klei/ Holland veen, boven Calais klei/ Basisveen). Door ultrafiltratie of omgekeerde osmose wordt het brakke water gescheiden in een zoet deel en een residu met een verhoogde zoutconcentratie (dit residu wordt aangeduid als brijn). Het brijn wordt geïnjecteerd in het 2^{e} WVP, maar in sommige registraties wordt vermeld dat infiltratie plaatsvindt in het 1^{e} WVP of in de deklaag.
- Koen Zuurbier (KWR) zegt over brijnsystemen: Het debiet van brijnsystemen voor de glastuinbouw is gemaximeerd op dagbasis en op kwartaalbasis. Het onttrokken debiet is circa het dubbele van de watervraag omdat de helft ervan als brijn weer wordt geïnjecteerd. De geregistreerde capaciteit van injectiebronnen van brijnsystemen is meestal de helft van de capaciteit van de onttrekkingsbronnen. De systemen vereisen een vrij stabiel debiet zonder dag/nacht variaties, en het debiet zou over tijdspannes van maanden vrij constant zijn.

B Kaarten met informatie over onttrekkingssystemen

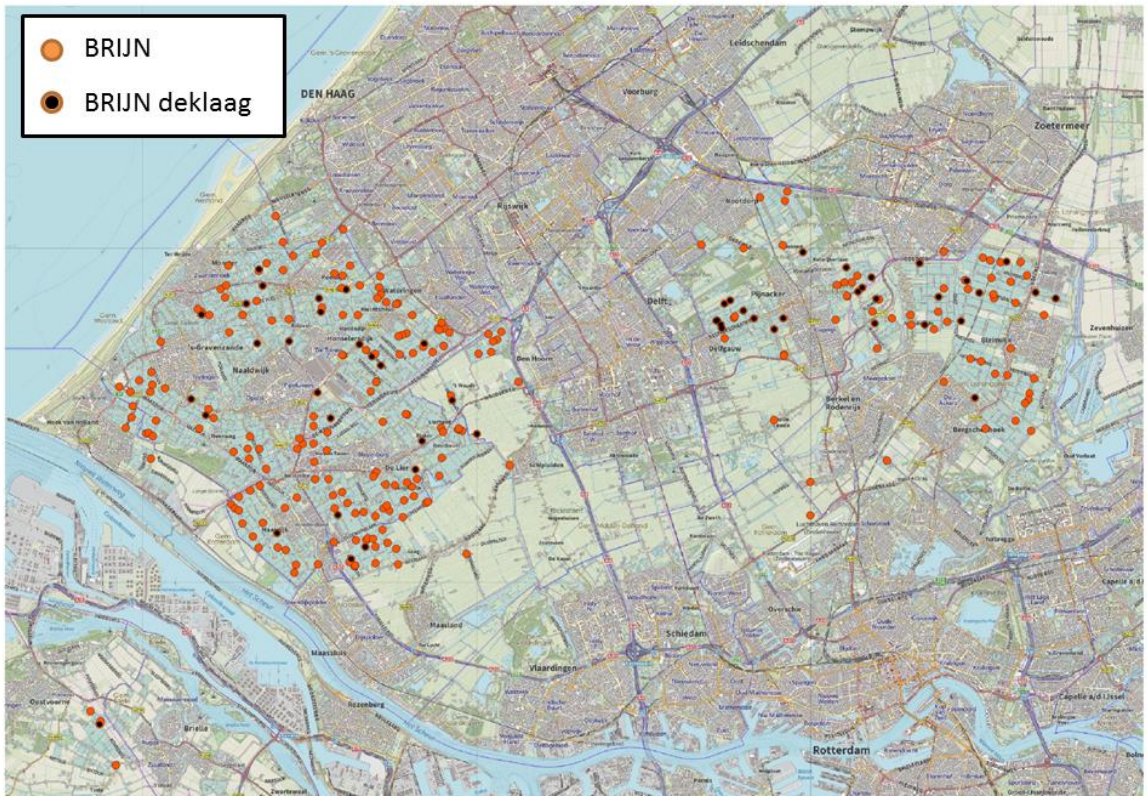
Kaarten 1 t/m 4	locaties van soorten systemen
Kaarten 4 t/m 7	capaciteit op jaarbasis
Kaarten 8 – 9	startjaar registratie onttrekking in het LGR



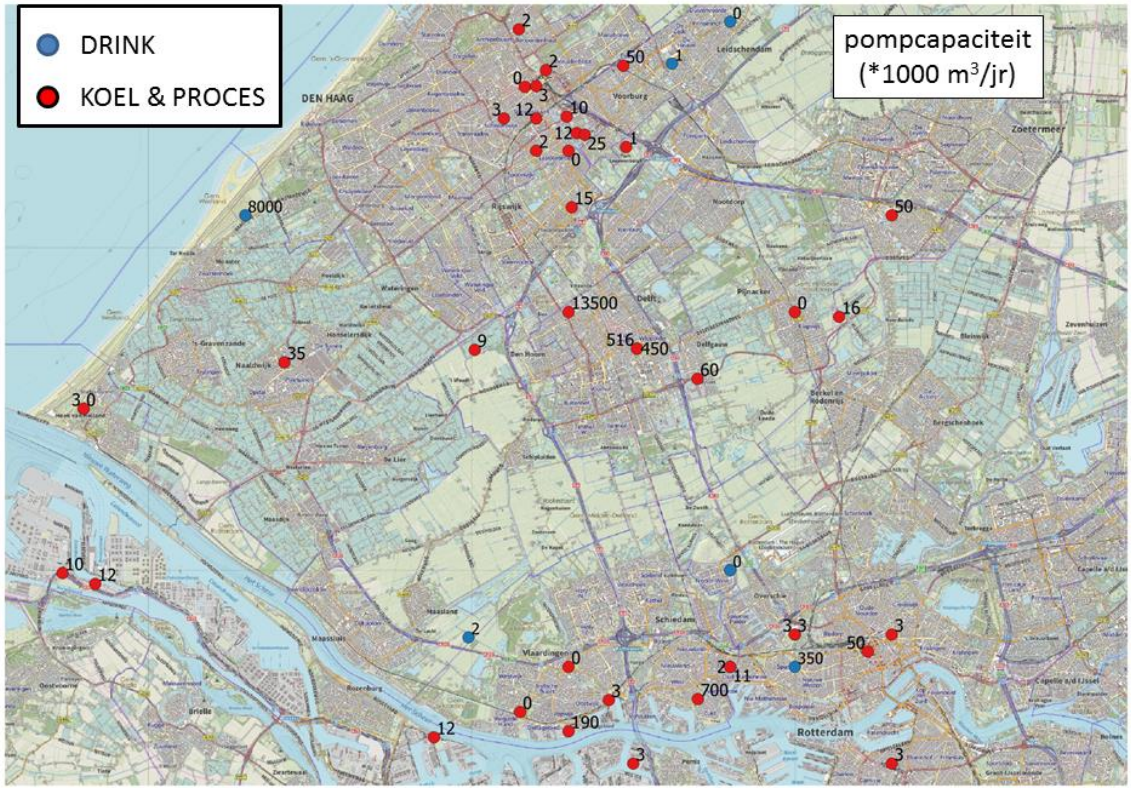
Kaart 1



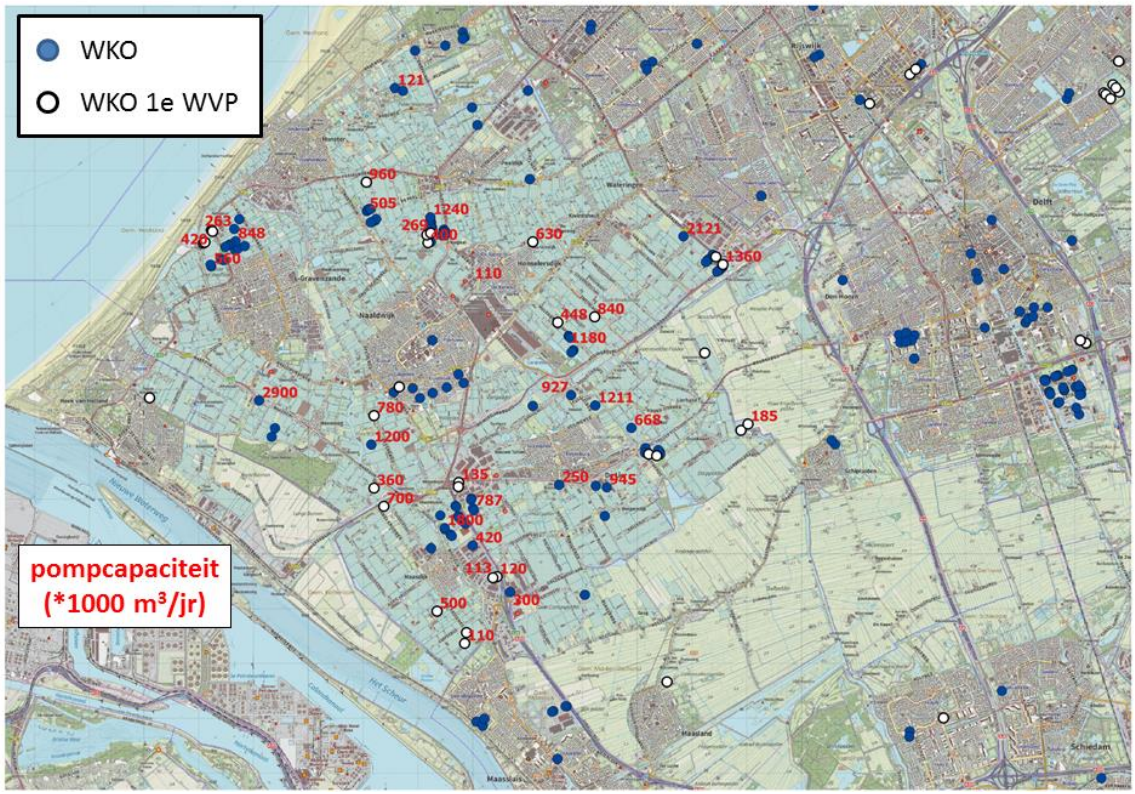
Kaart 2



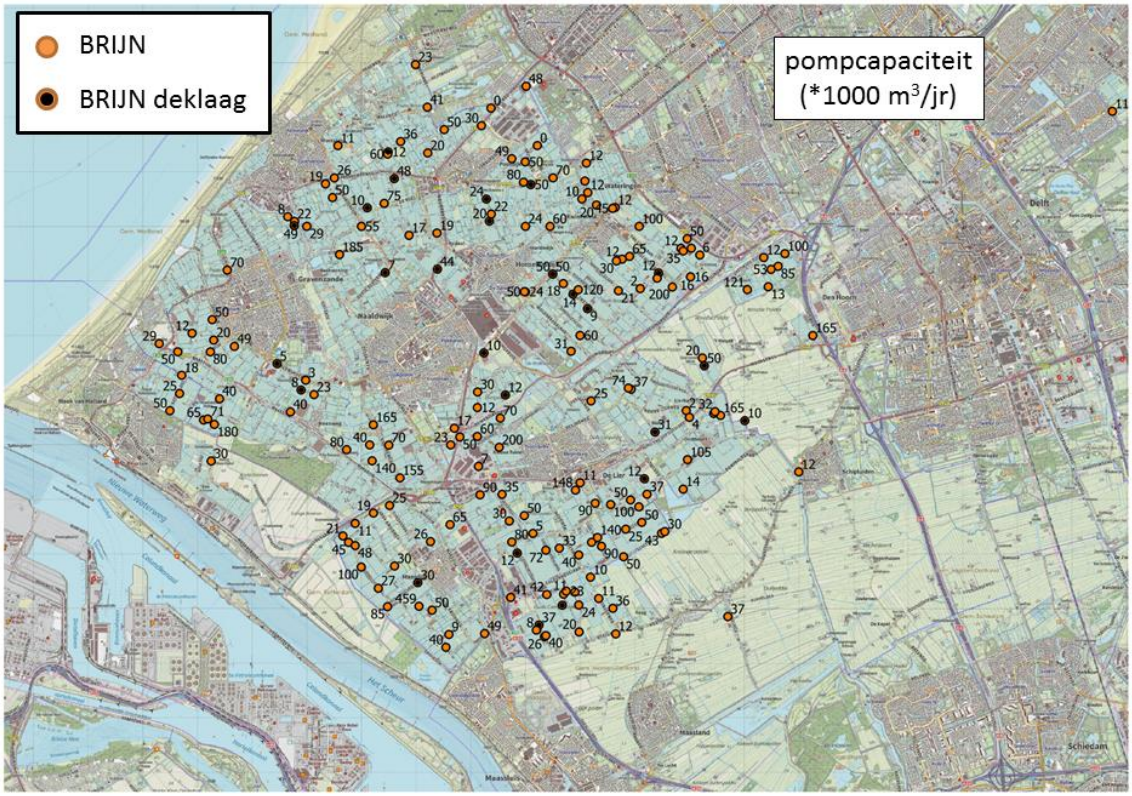
Kaart 3



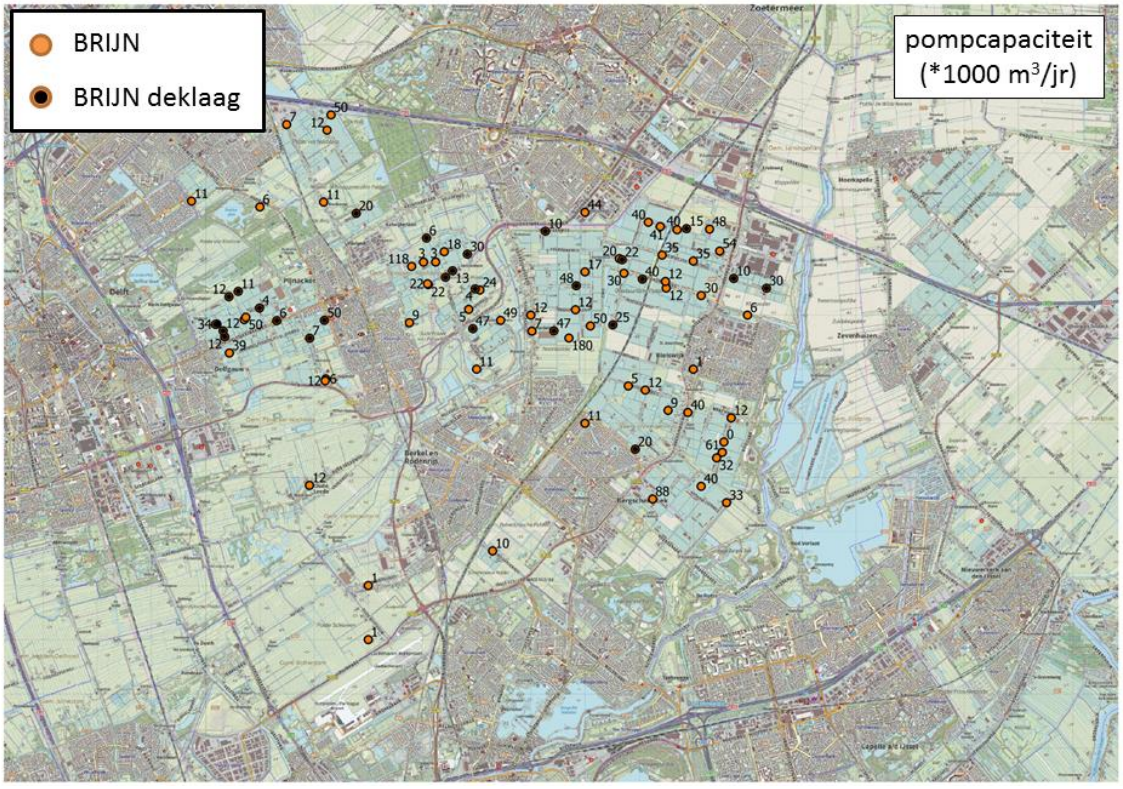
Kaart 4



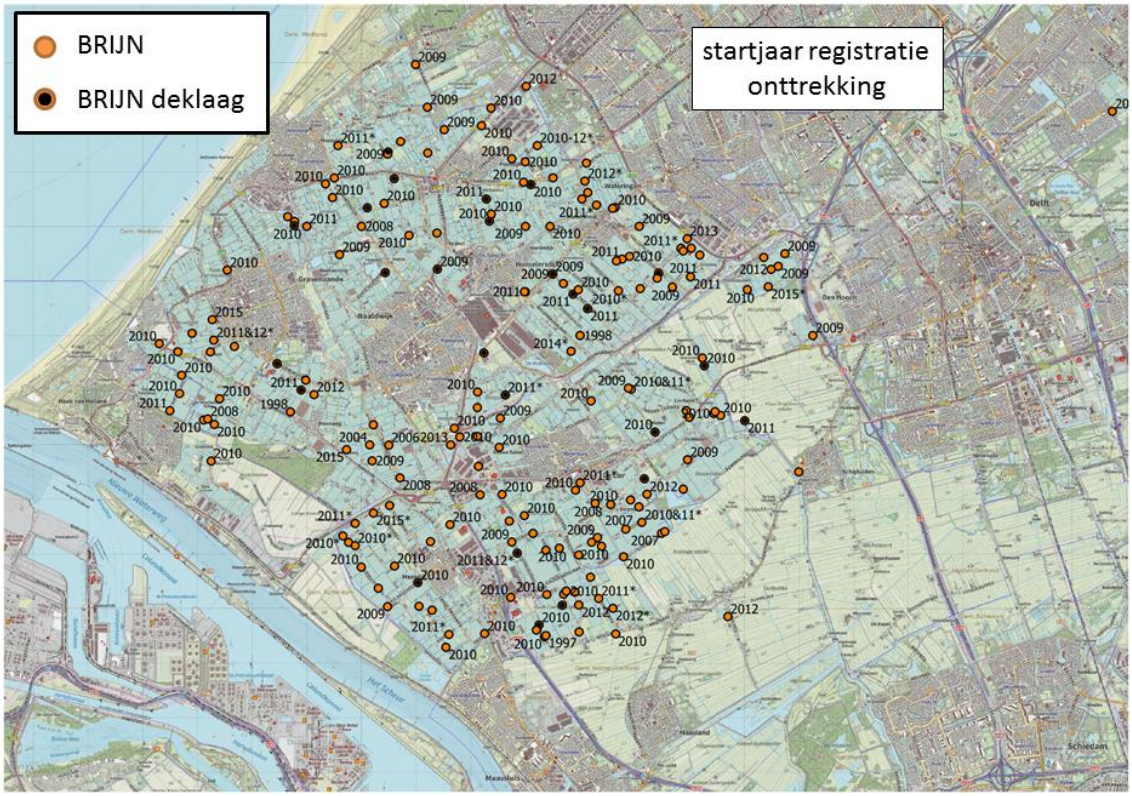
Kaart 5



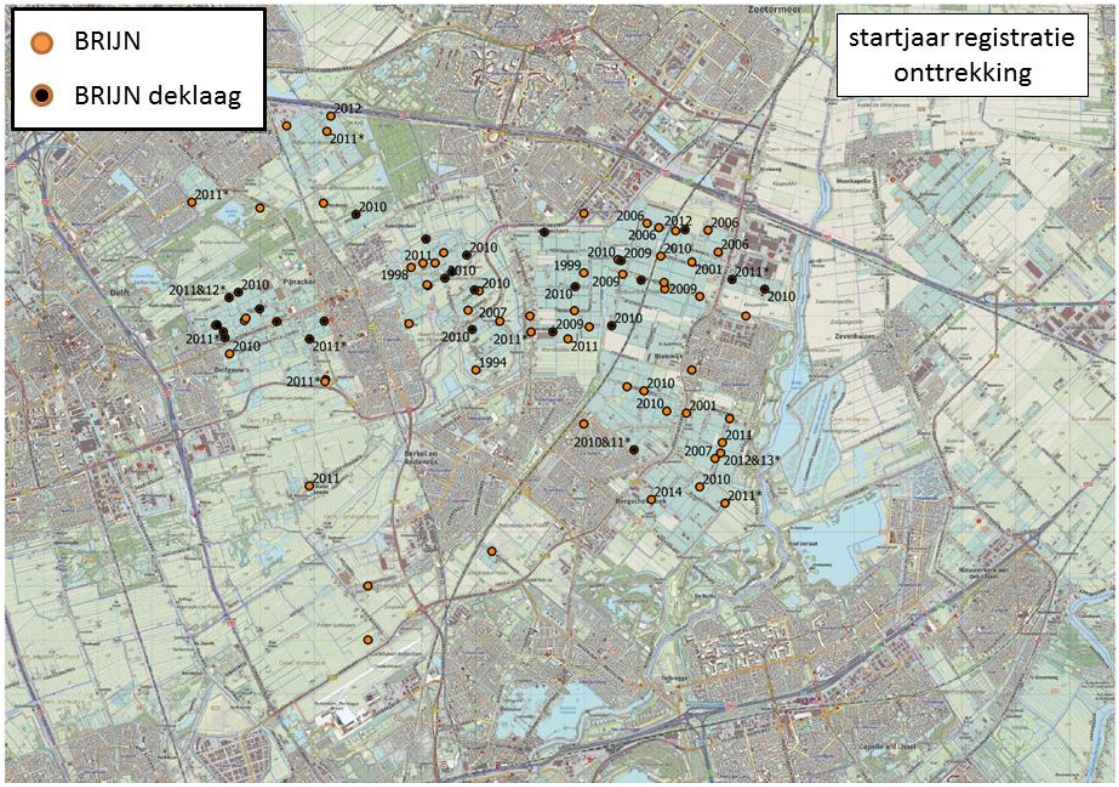
Kaart 6



Kaart 7



Kaart 8



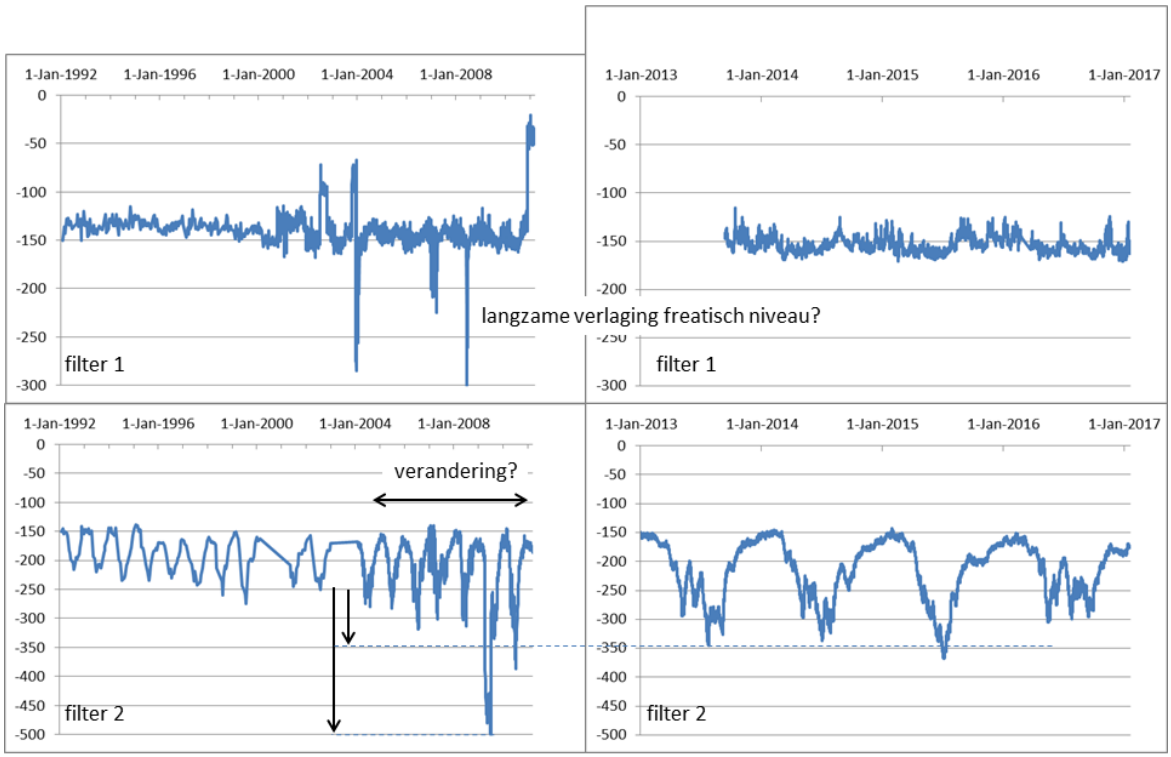
Kaart 9

C Tijdreeksen waarnemingen grondwaterpeil

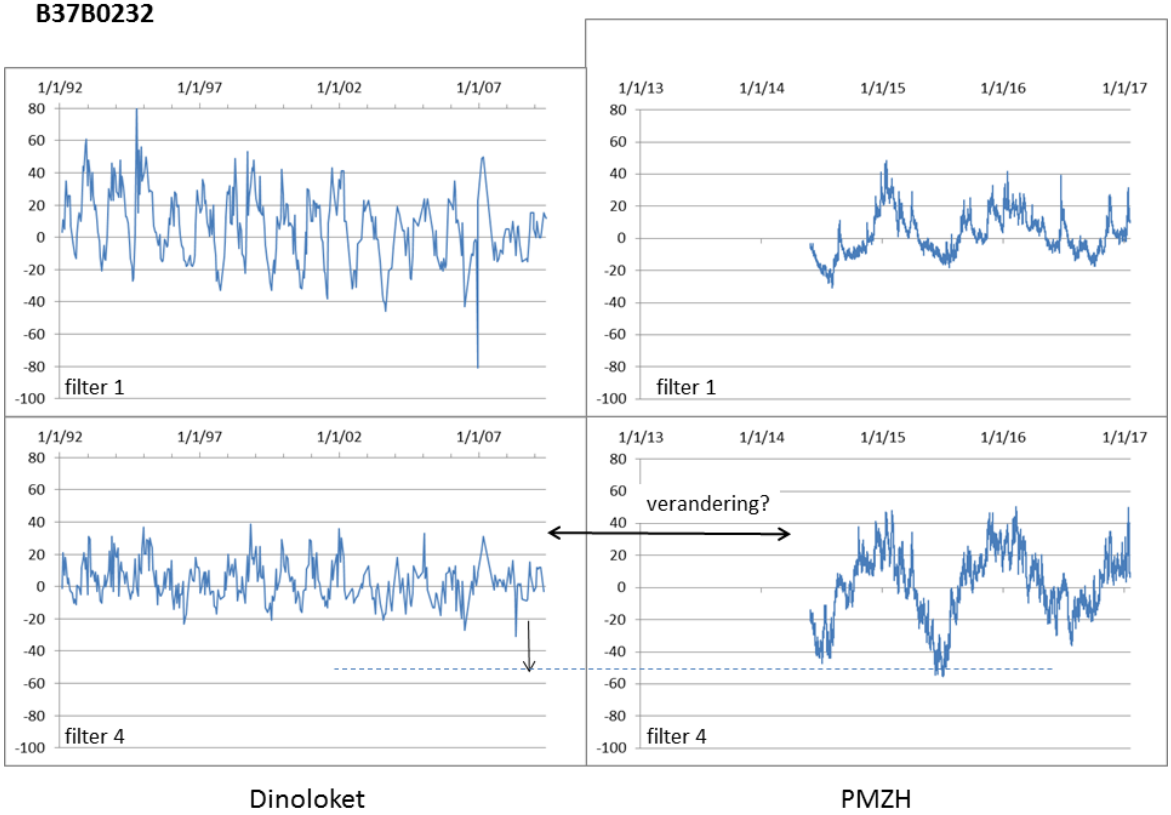
Deze bijlage bevat grafische weergaven van de grondwaterpeiltijdreeksen voor de meeste waarnemingsputten die zijn gebruikt in deze studie (Figuur 3.2). Voor putten waarvoor de informatie directe constatering van verlaging toelaat (beschikbaarheid van zowel 'oude' als 'nieuwe' tijdreeksdelen voor de onderzoeksperiode) wordt de informatie getoond in vier panelen zoals aangegeven in onderstaande figuur. De schaal van de verticale as van de grafieken voor het ondiepe en diepe (1e WVP) filter is zoveel mogelijk hetzelfde gekozen om de seizoensdynamiek goed te kunnen vergelijken. Peil is in cm t.o.v. NAP.

	Dinoloket (meestal < 2011)	PMZH (& DSM) 2013 - 2017
"grondwater-stand" (ondiep filter)		
1e WVP		

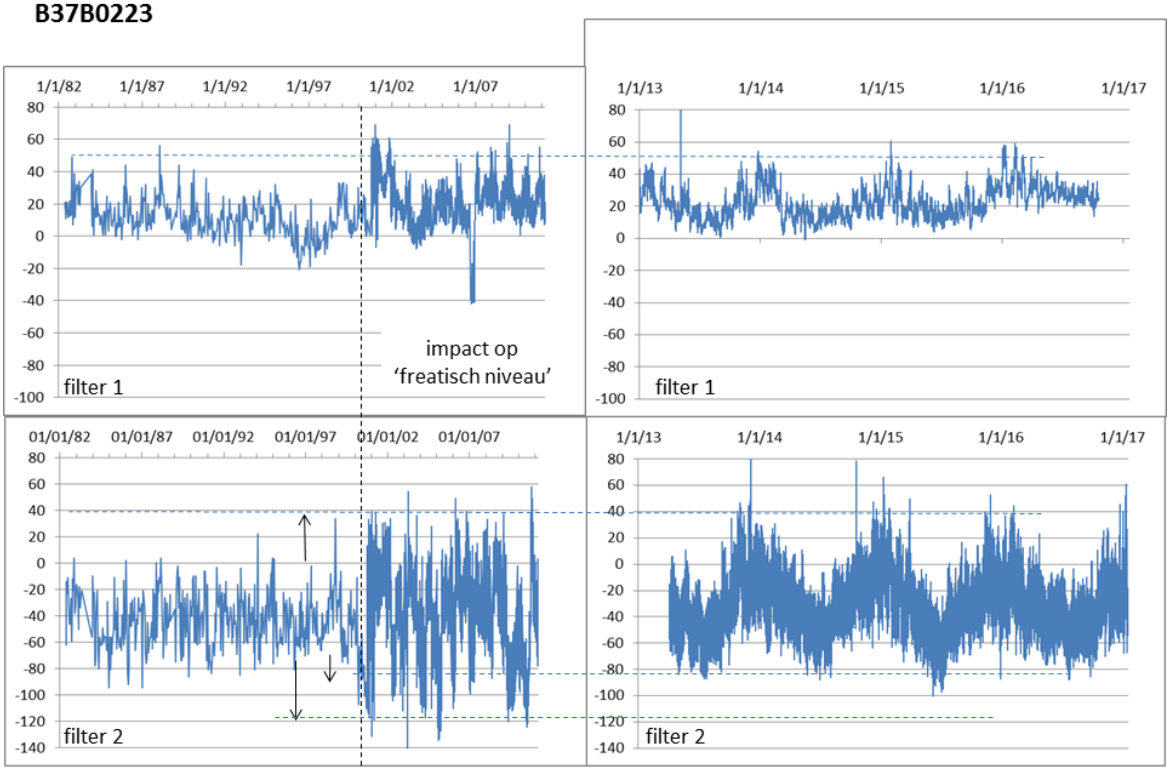
B37B0233



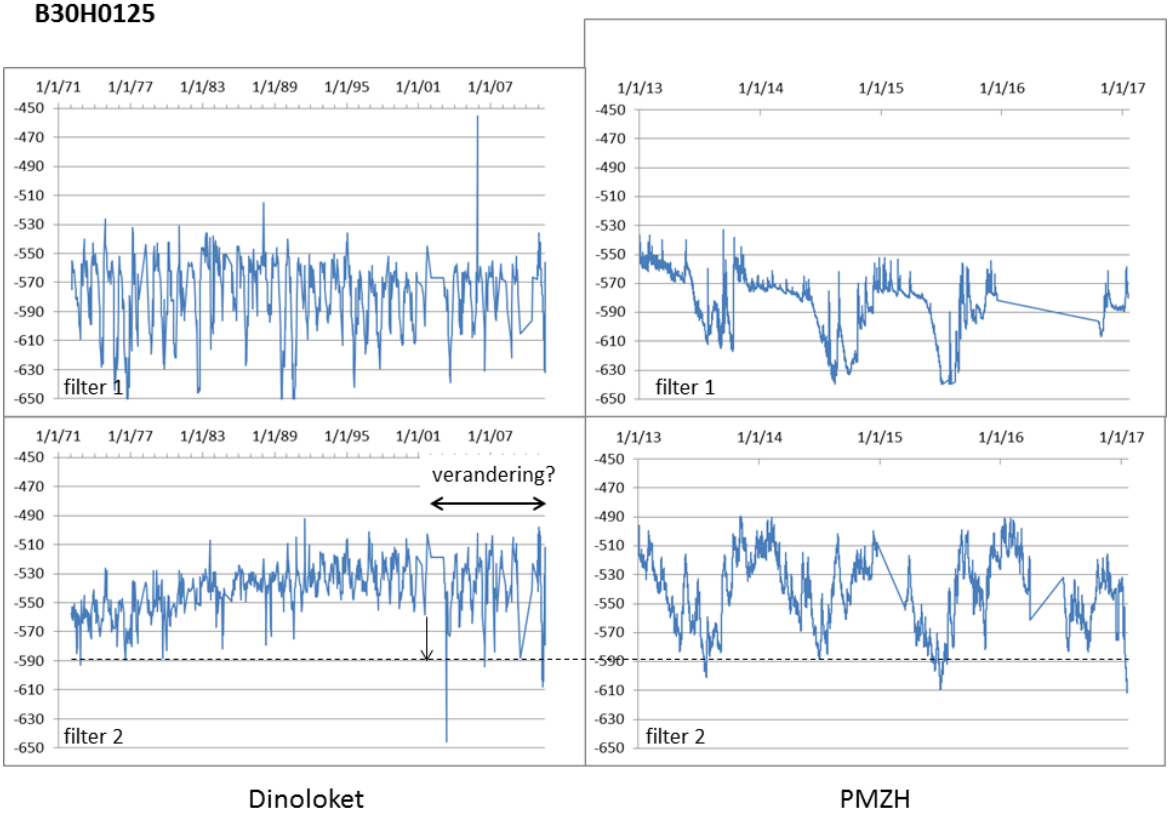
B37B0232



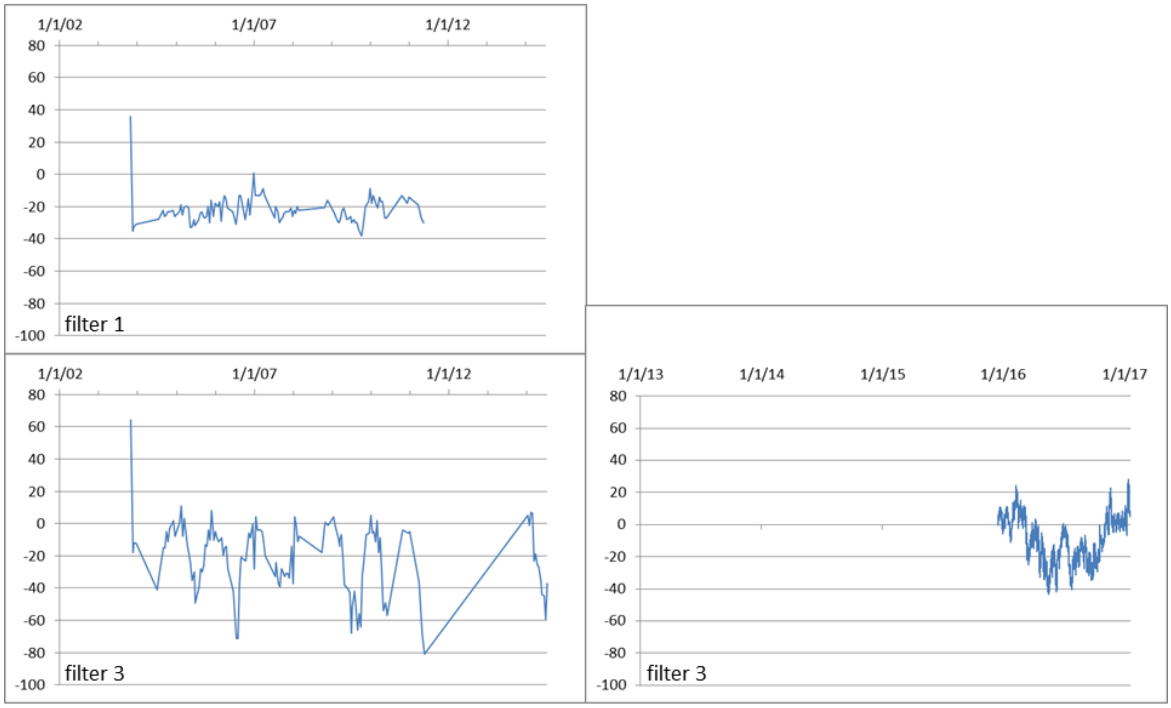
B37B0223



B30H0125

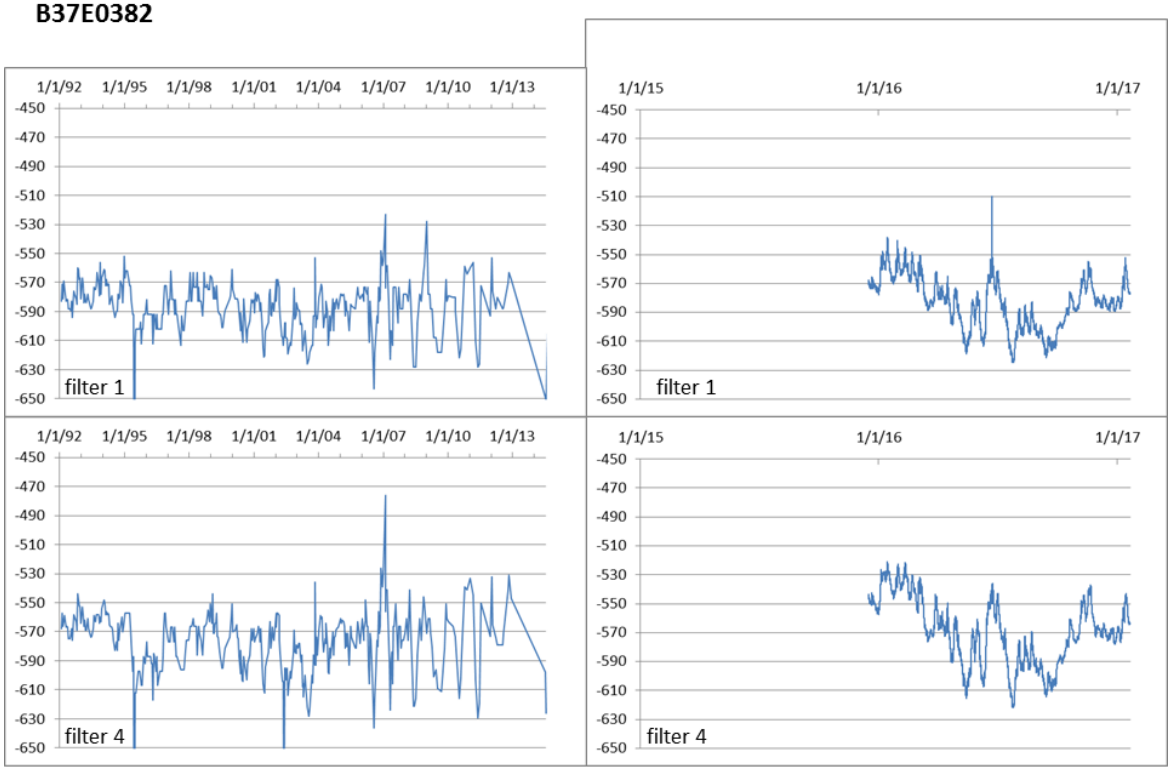


B37B0414



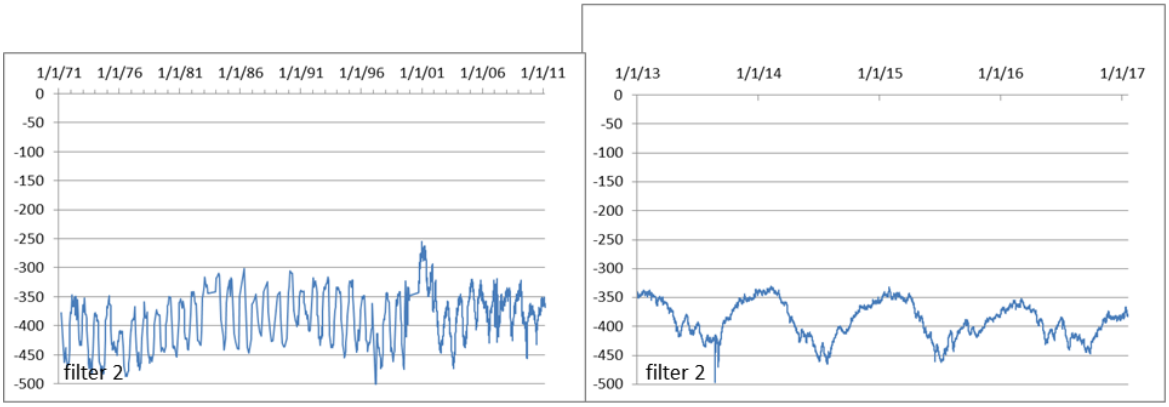
Dinoloket PMZH

B37E0382



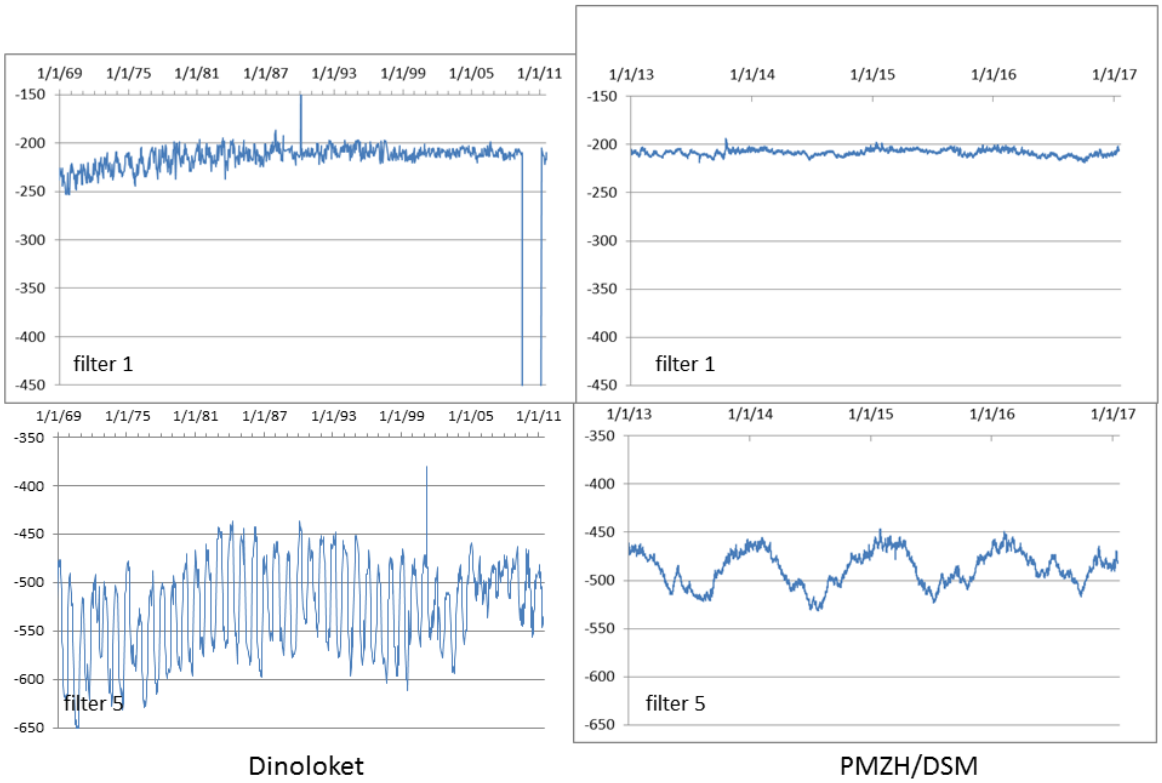
Dinoloket PMZH

B37E0377



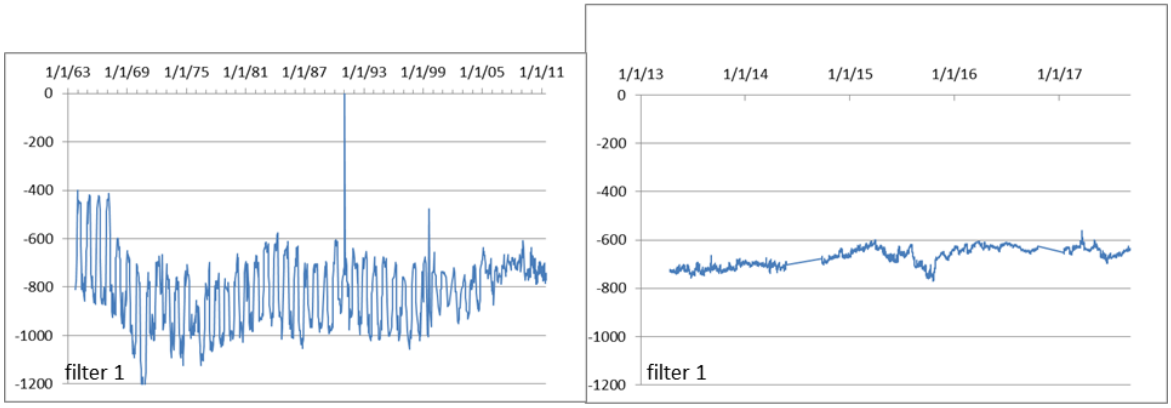
Dinoloket PMZH/DSM

B37E0314



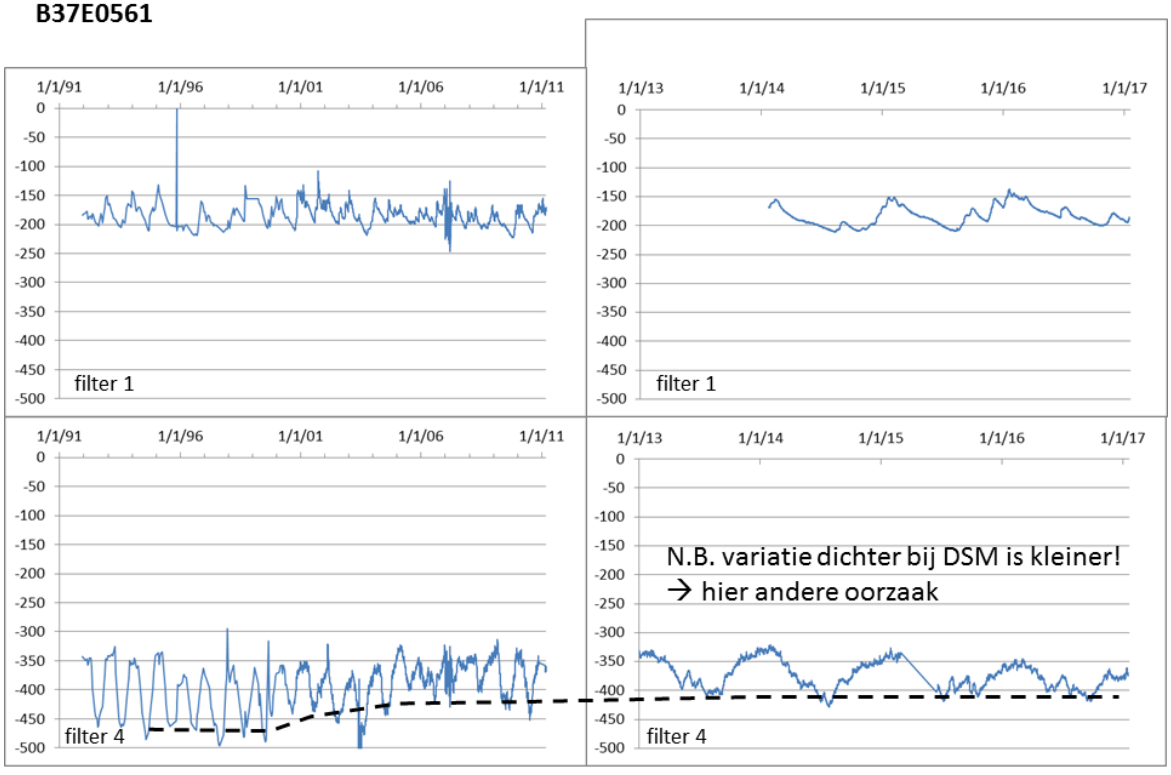
Dinoloket PMZH/DSM

B37E0275



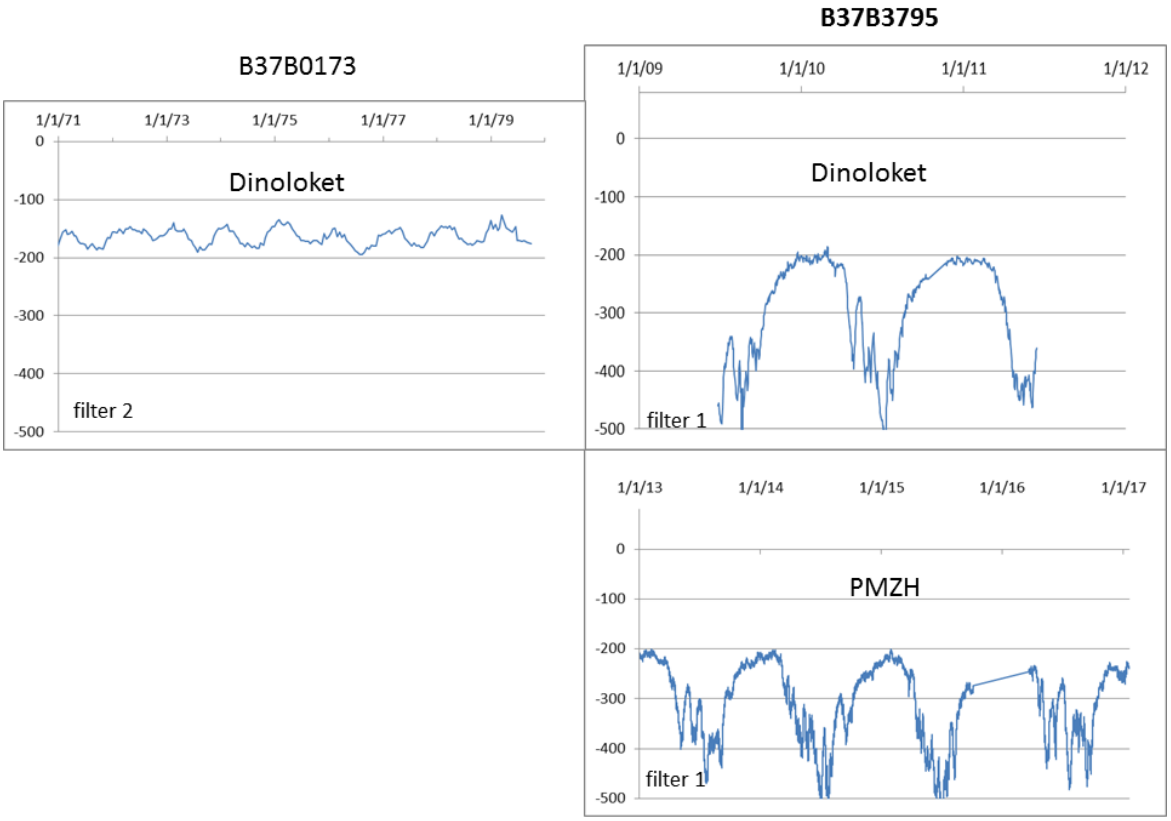
Dinoloket PMZH/DSM

B37E0561

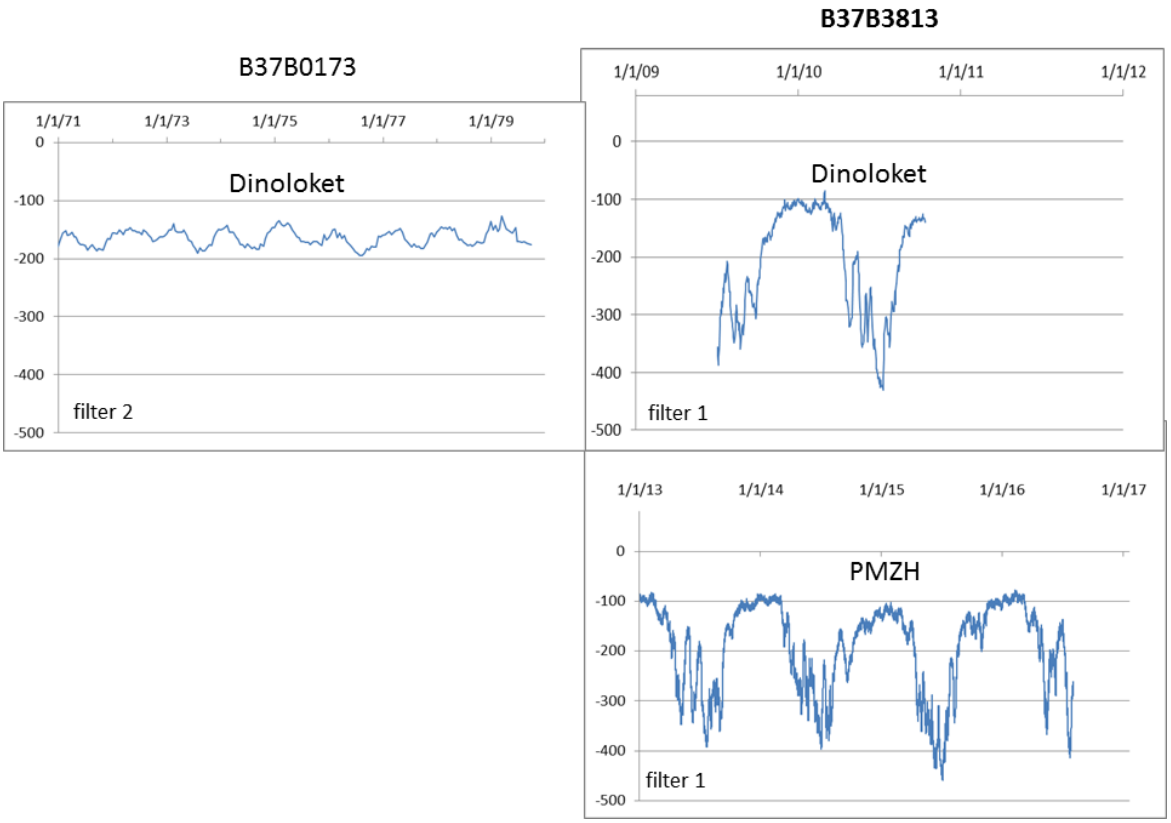


Dinoloket PMZH/DSM

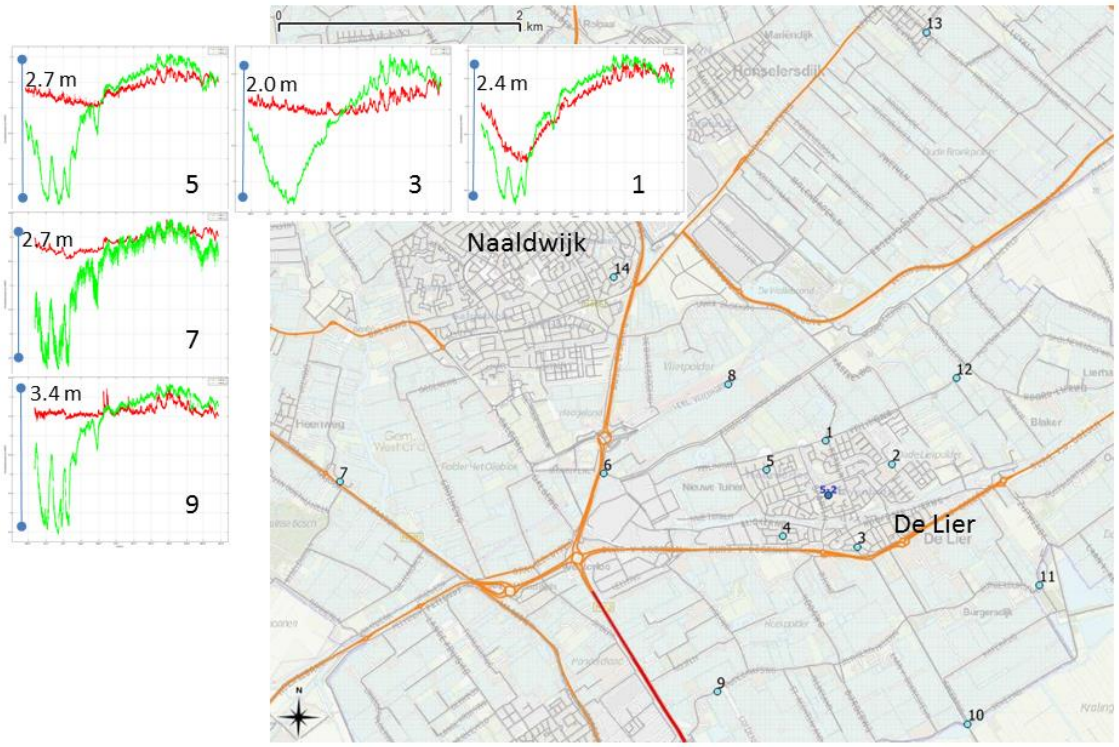
B37B0173 ←→ **B37B3795**



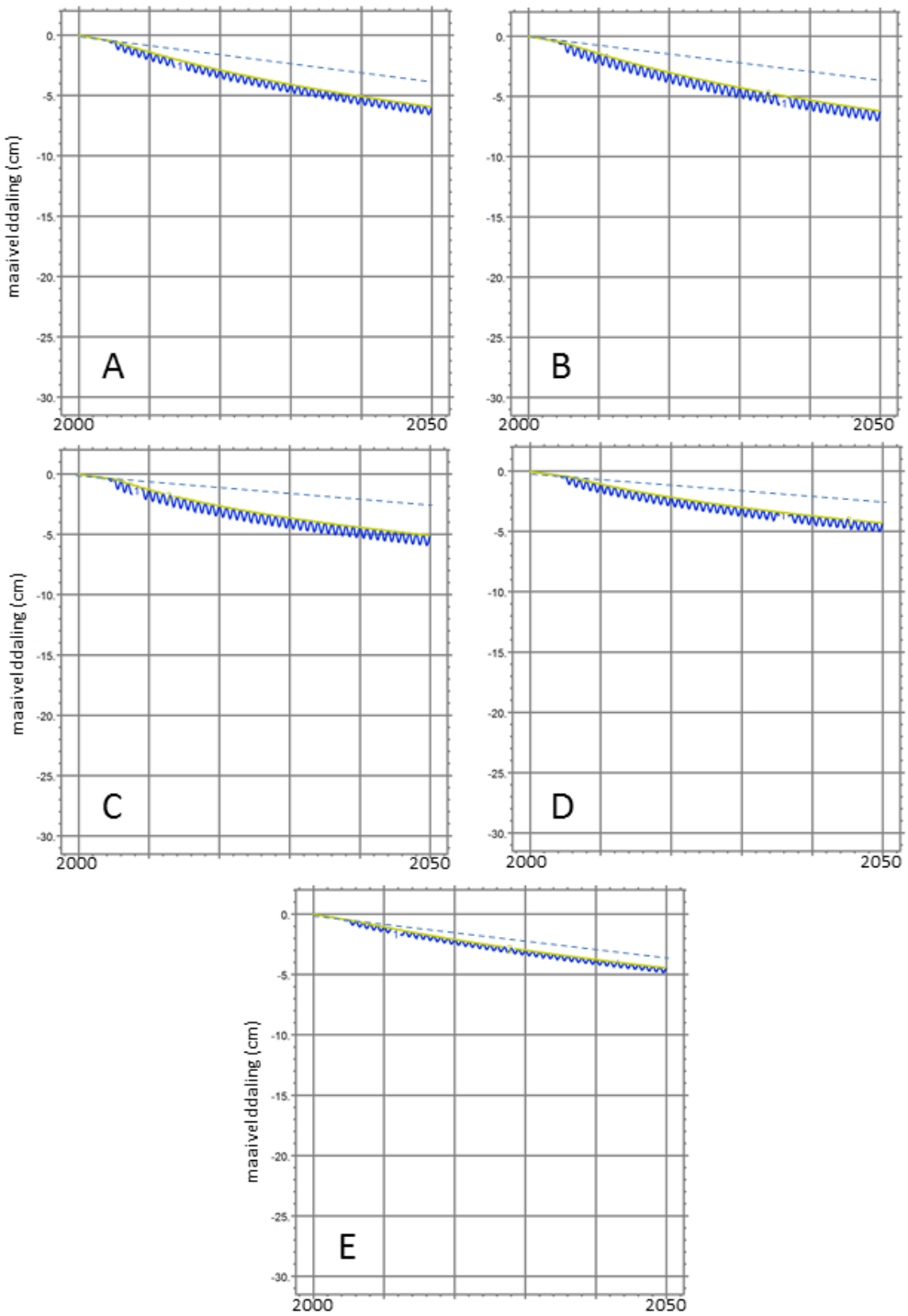
B37B0173 ←→ **B37B3813**



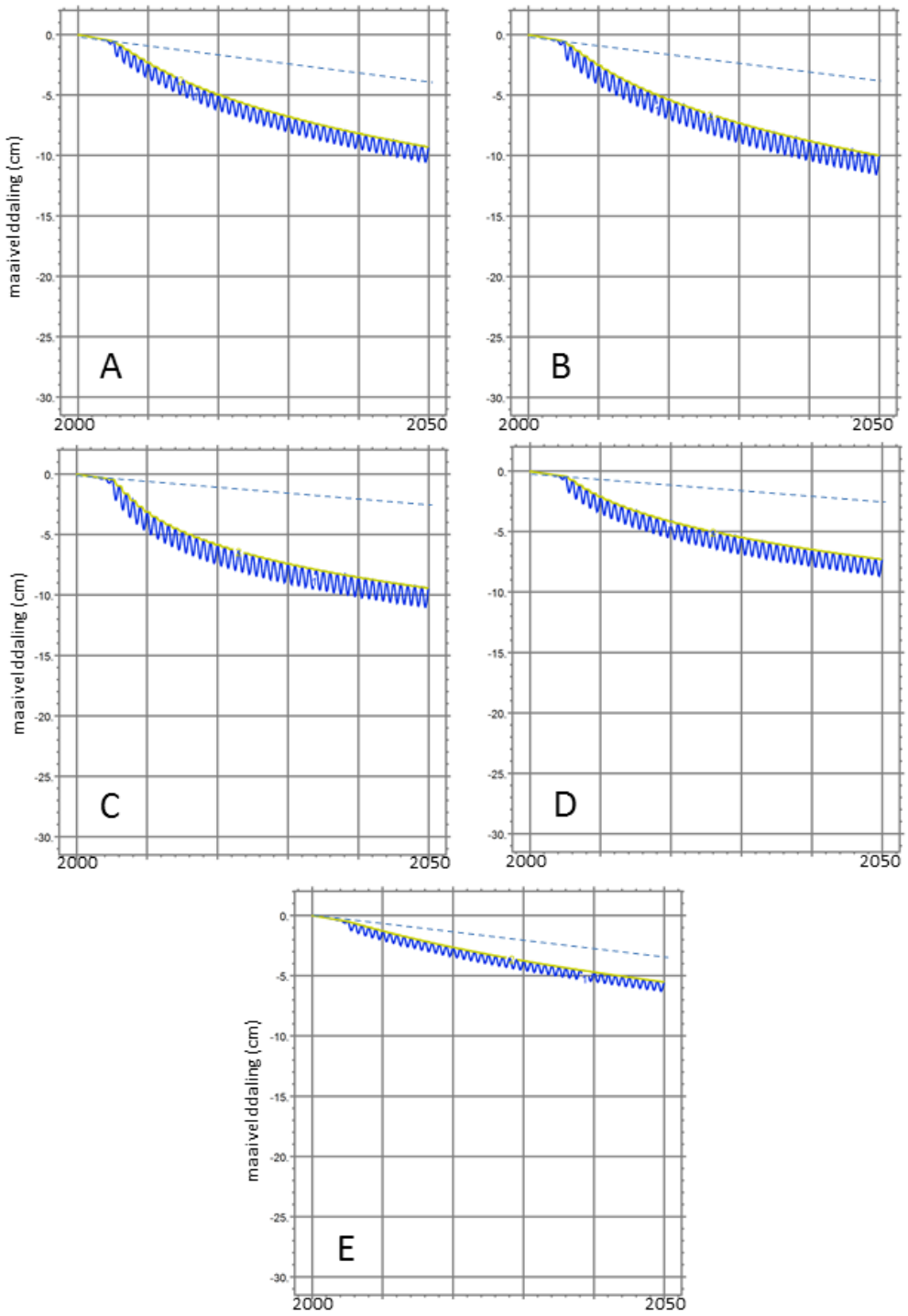
april/mei 2017 tot april 2018



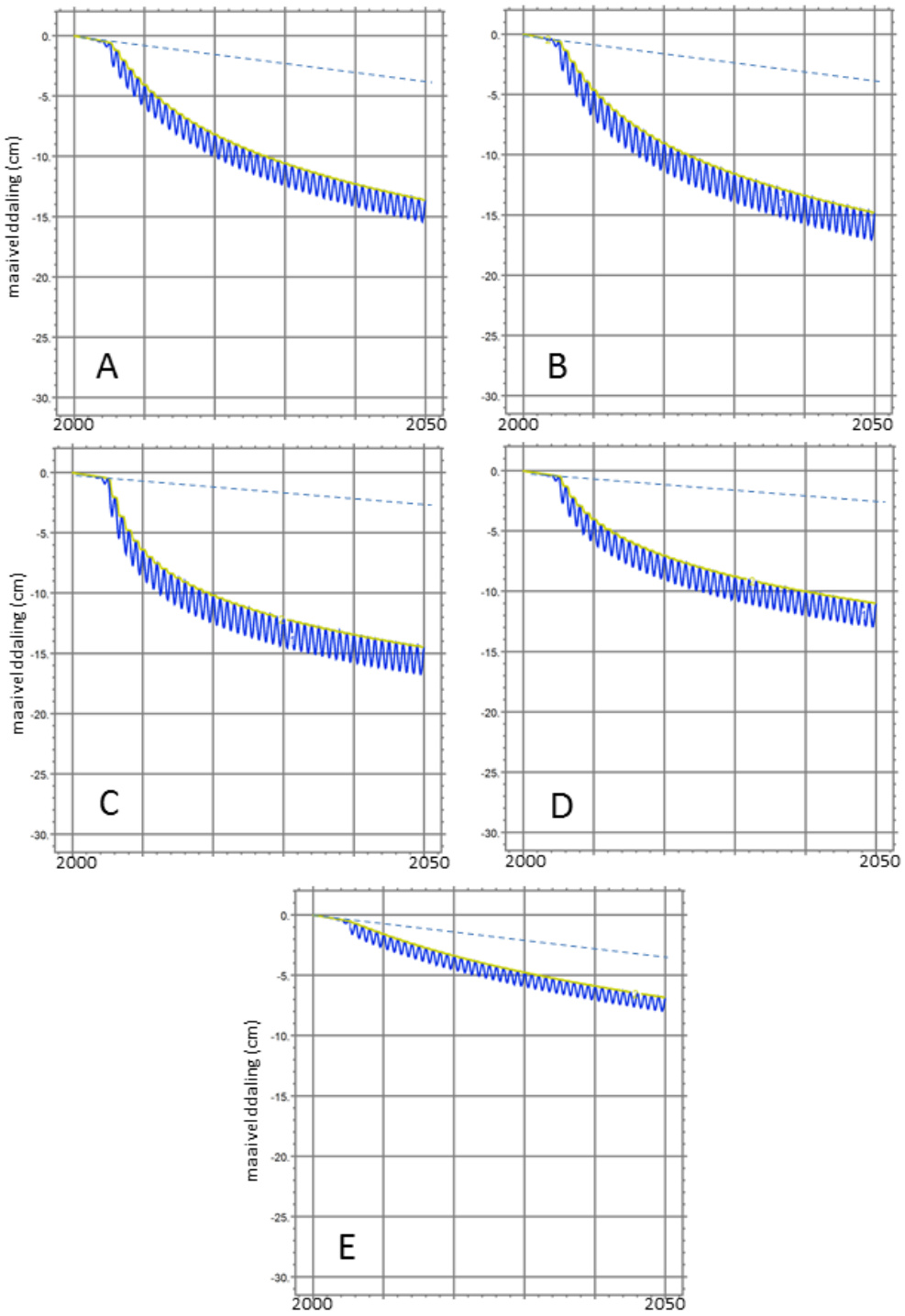
D Aanvullende grafieken van voorspelde bodemdaling



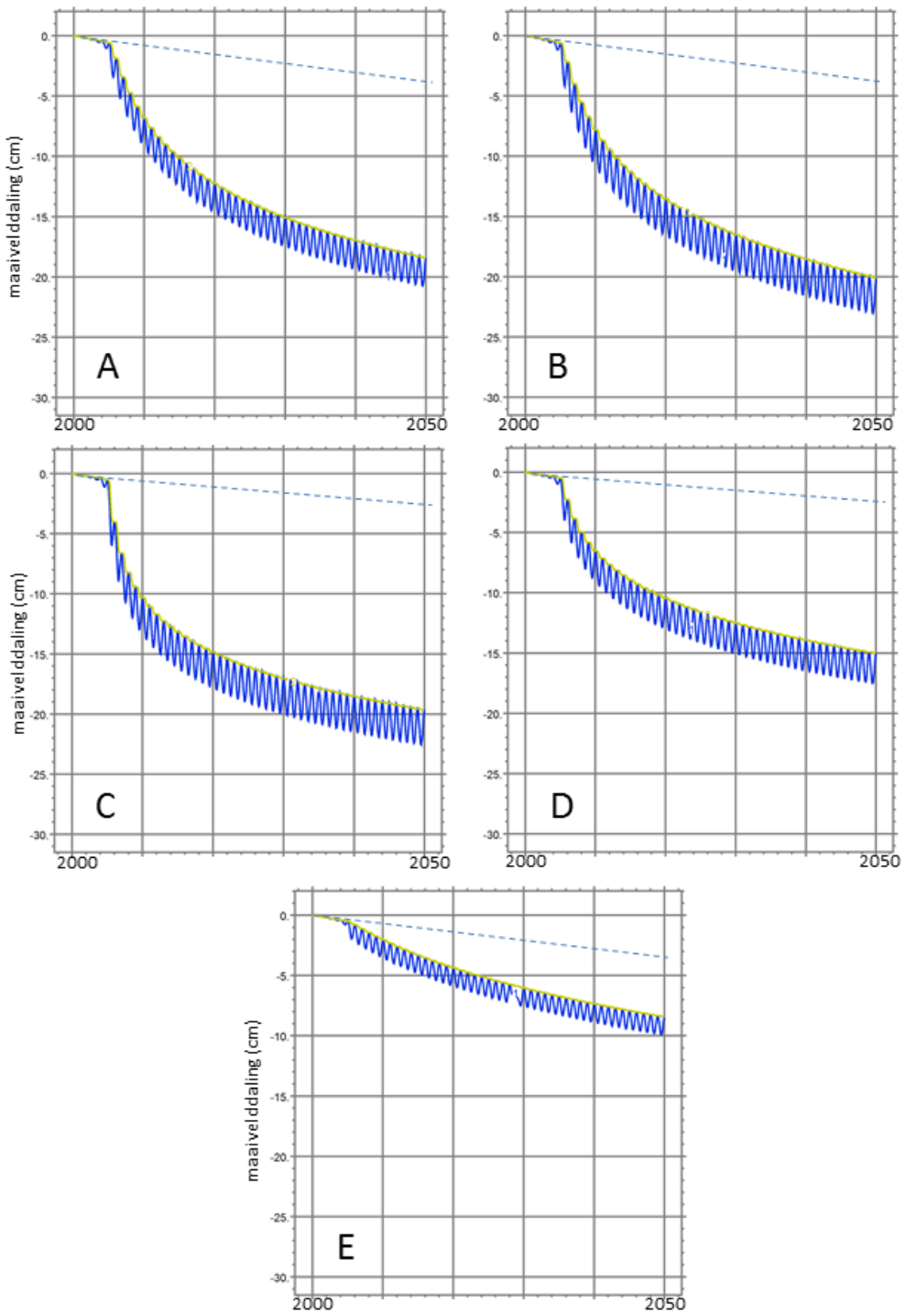
*Berekende maaivelddaling voor **Δh = 1 m** en snelle toename van de verlaging en default parameter waarden. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4).*



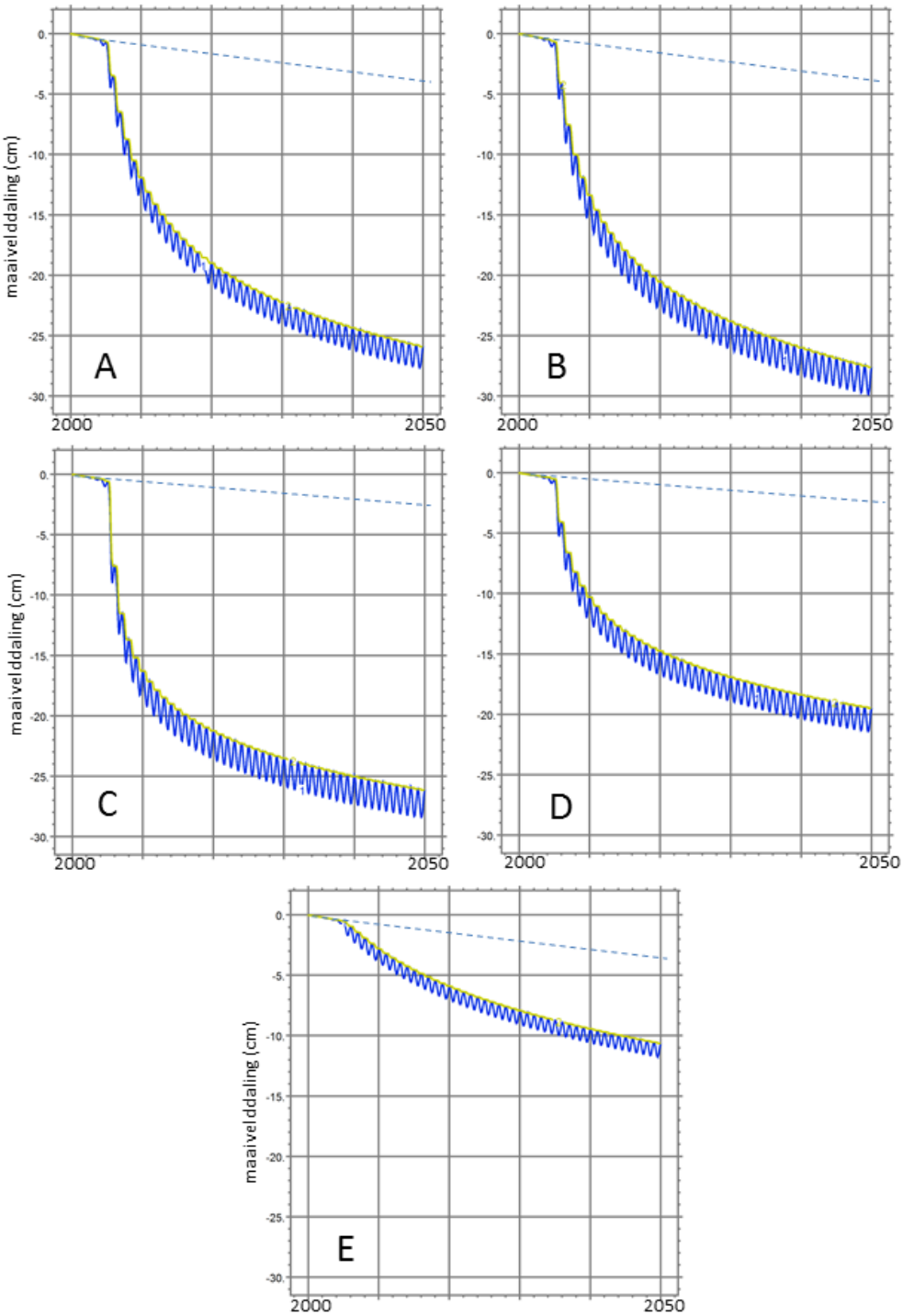
*Berekende maaivelddaling voor **Δh = 2 m** en snelle toename van de verlaging en default parameter waarden. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4).*



*Berekende maaivelddaling voor **Δh = 3 m** en snelle toename van de verlaging en default parameter waarden. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4).*

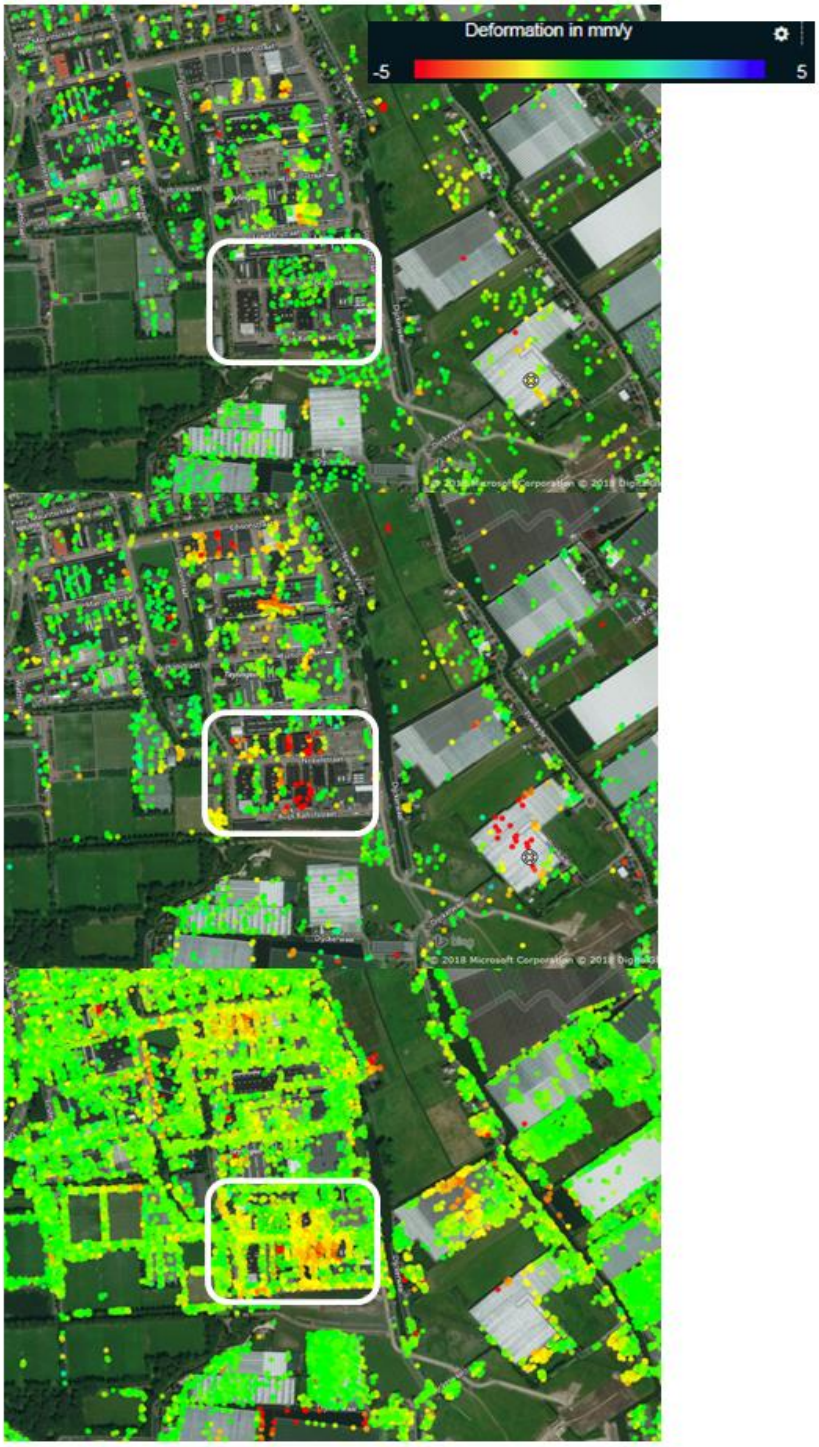


*Berekende maaivelddaling voor **Δh = 4 m** en snelle toename van de verlaging en default parameter waarden. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4).*

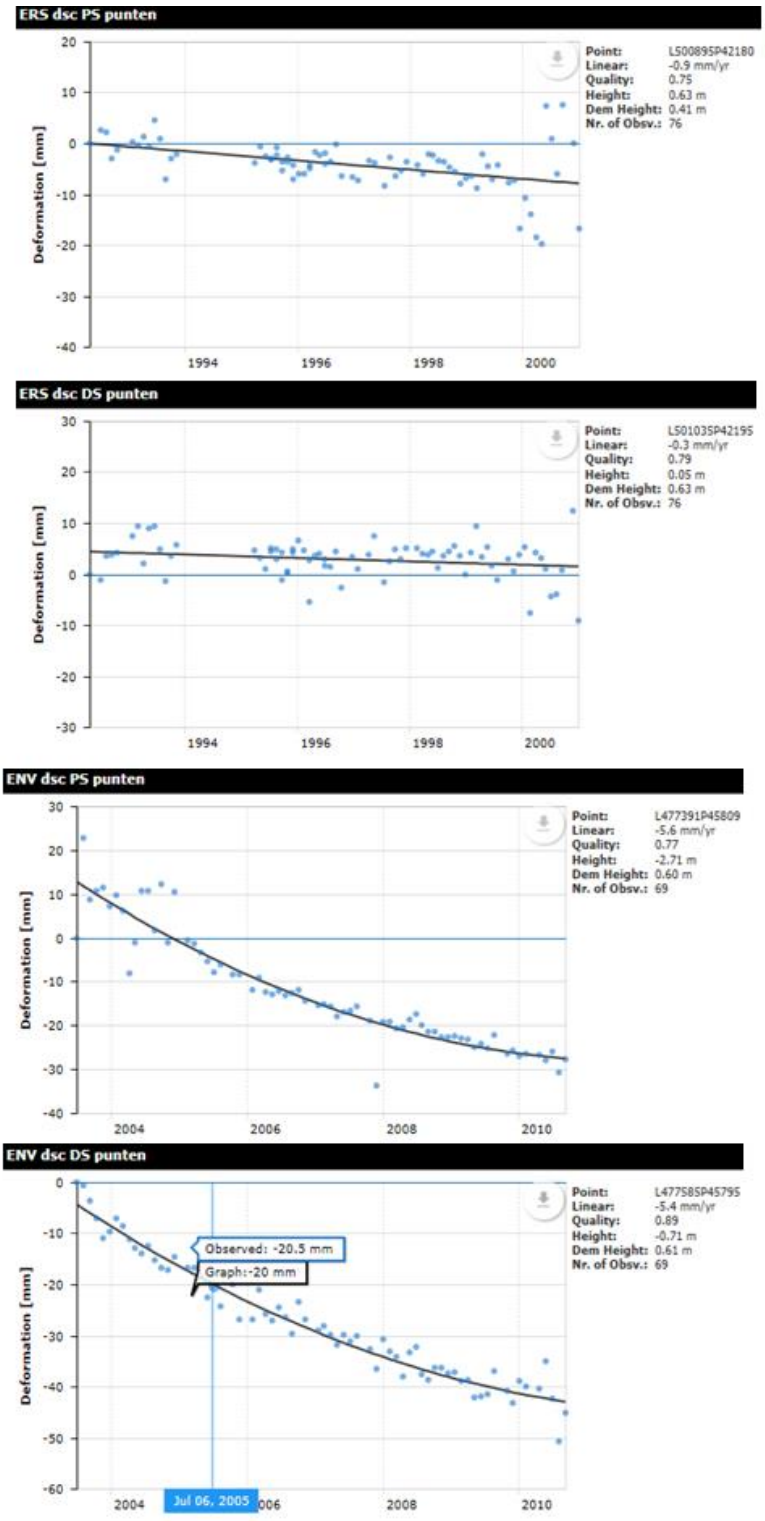


Berekende maaiveldaling voor ***Δh = 3 m*** *en snelle toename van de verlaging en parameterwaarden voor* ***slap klei en veen****. Merk op: verticale as tot -30 cm. Blauw: totale maaiveldbeweging door elastische vervorming en kruip. Geelgroen: daling door kruip (permanent deel van de beweging). Onderbroken lijn: autonome daling door kruip zonder invloed van de stijghoogteverlaging in het 1e watervoerende pakket. A t/m E correspondeert met de bodemopbouwtypen (Figuur 4.4).*

E Documentatie voor gebied D (Figuur 5.5)



Figuur E.1 Gebied C (ZO 's-Gravenzande). Van boven naar beneden: ERS, ENV, TSX (lage punten). Het witte kader toont een toename van snelheid voor ENV gevolgd door afname voor TSX. Zeer waarschijnlijk de invloed van ophoging op het industrieterrein.



Figuur E.2 Representatieve tijdreeksen voor het gebied met de grootse daling (rode punten ENV) in Figuur E.1. De bovenste twee reeksen zijn voor de ERS periode. De onderste twee voor ENV. Het dalingsgedrag is karakteristiek voor zetting na ophoging.