

Resultaten Regio Deal Bodemdaling Groene Hart project 42 - Modelinstrumentarium

Synthese



Deltares

 **WAGENINGEN**
UNIVERSITY & RESEARCH

 **Geologische Dienst
Nederland**
Onderdeel van TNO



Resultaten Regio Deal Bodemdaling Groene Hart project 42 - Modelinstrumentarium Synthese

Auteur(s)

Henk Kooi¹
Gilles Erkens¹
Cor Zwanenburg¹
Reinder Reindersma²
Guido Bakema³

Partners

DELTAIRES, Utrecht/Delft¹
TNO, Utrecht²
WENR, Wageningen³

Datum: 28-6-2024



Deltares



Belangrijkste aanbevelingen

Dit rapport presenteert de resultaten van project 42 van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart. Op basis van de resultaten zijn de belangrijkste aanbevelingen met betrekking tot het bodemdalingsmodelinstrumentarium de volgende:

- Veenoxidatie is een hoofdoorzaak van bodemaling in de veenweidegebieden van het Groene Hart. Om effecten van maatregelen nauwkeuriger te kunnen voorspellen, moet het bestaande modelinstrumentarium dat gebruik maakt van empirische relaties worden uitgebreid met veenoxidatieprocesmodellen.
- Voor compactie zijn procesmodellen beschikbaar, maar nog ontoereikend om de bodemdaling als gevolg van veel voorkomende ingrepen en maatregelen betrouwbaar en nauwkeurig te kunnen voorspellen. Hierbij gaat het o.a. om grondwaterstandsveranderingen als gevolg van peilbeheer en toepassing van lichte ophoogmaterialen. Er zijn bijvoorbeeld diverse aanwijzingen dat het huidige instrumentarium restzettingen zowel aanzienlijk kan onder- als overschatten. Om aanknopingspunten te vinden om het instrumentarium te verbeteren moet worden ingezet op een reeks aan veldstudies waarin de gevolgen van bovengenoemde ingrepen nauwgezet worden gemeten en gemonitord.
- Het bodemdalingsmodelinstrumentarium kan niet zonder ondersteuning van doeltreffende metingen. Metingen zijn essentieel om de bodemdalingsprocessen te snappen, accurate input te genereren, en de voorspellingen te toetsen. Daarom moet er blijvend worden geïnvesteerd in het uitbouwen en onderhouden van meetnetwerken zoals ook zijn ingericht binnen de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart.

Inhoud

1	Introductie	5
2	Uitgevoerde deelstudies en producten	9
3	Overzicht van resultaten	10
3.1	Ondergrondmodel (D1)	10
3.2	Oxidatie (D2A)	11
3.3	Maaiveldynamiek (D2B)	12
3.4	Compactie (D3)	13
3.4.1	Parametrisatie isotachenmodel met gebruik van InSAR (D3A)	13
3.4.2	Toetsing isotachenmodel voor kleine belastingen (D3B)	14
3.4.3	Evaluatie isotachenmodel voor restzettingsprognose (D3C)	16
4	Waar staan we nu?	18
4.1	Voorspellend vermogen	18
4.2	Praktische betekenis	19

1 Introductie

Dit rapport presenteert een synthese van de resultaten van de deelstudies van project 42 van de *Regio Deal Bodemdaling Groene Hart*¹ (RDBGH). Het project en de studies waren gericht op verbetering van het modelinstrumentarium voor bodemdalingsberekening. De studies zijn door Deltares, TNO en WENR uitgevoerd tussen november 2019 en juni 2024.

De RDBGH is een initiatief van acht regionale overheidsorganisaties, gefinancierd door het Rijk, met als doel om bodemdaling in het Groene Hart en de negatieve effecten hiervan gezamenlijk aan te pakken. In de periode 2019-2023, hebben regionale overheden, kennisinstellingen, universiteiten, de agrarische sector, bewoners en het bedrijfsleven samengewerkt om vanuit verschillende projecten innovatieve maatregelen en nieuwe kennis te ontwikkelen om beter om te kunnen gaan met bodemdaling. De bodemdaling in het Groene Hart hangt samen met de slappe veen- en kleigronden die op uitgebreide schaal voorkomen in het gebied. Project 42 is één van ca. 28 projecten die binnen de RDBGH zijn uitgevoerd.

Bodemdaling

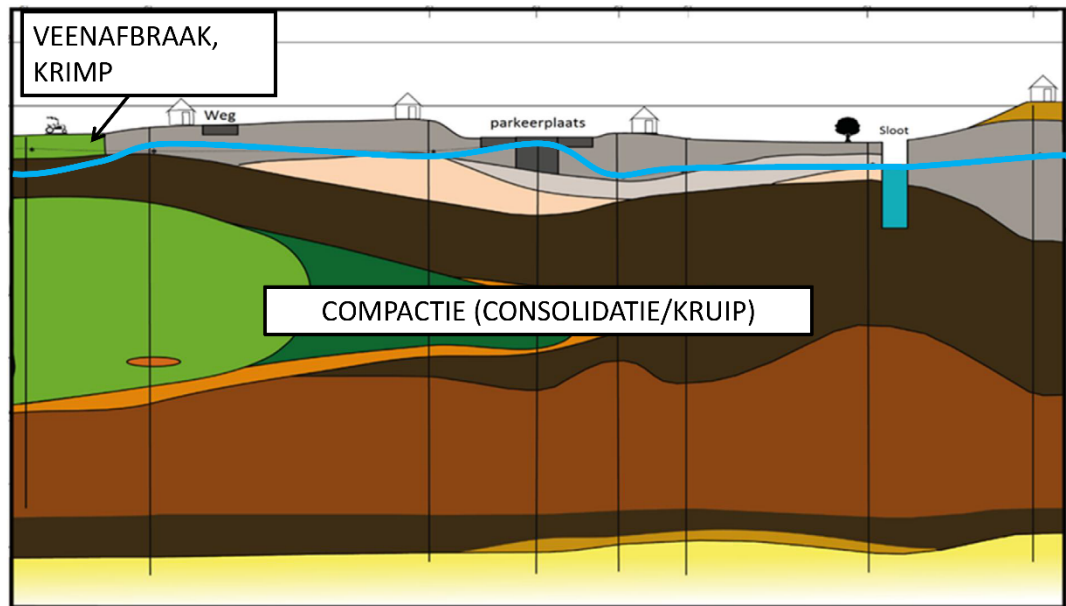
In grote delen van het Groene Hart daalt de bodem. De gevolgen zijn aanzienlijk: er ontstaat schade aan huizen, infrastructuur en de openbare ruimte. Ook dwingt de bodemdaling tot aanvullende investeringen in waterbeheer om een toename in het overstromingsrisico te vermijden en om de functionaliteit van het watersysteem te waarborgen. De bodemdaling is hoofdzakelijk het gevolg van menselijk handelen. Het begon al 1000 jaar geleden toen de veen- en kleigebieden structureel in cultuur zijn gebracht. De bodem daalt in het Groene Hart dus al 1000 jaar, en zal blijven dalen als er niks verandert. Om verdere oplopende schade door bodemdaling te vermijden wordt de urgentie gevoeld om bodemdaling de baas te kunnen worden. 'Samen bodemdaling de baas' is daarom de slogan van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart.

De twee menselijke ingrepen die in dit gebied tot de meeste bodemdaling leiden zijn i) het belasten van slappe veen- en kleilagen en ii) het ontwateren van veen- en kleigebieden. Het belasten van slappe lagen vindt bijvoorbeeld plaats bij bouwprojecten, als er een ophooglaag als fundering wordt aangelegd voordat ergens gebouwd wordt. In bebouwde gebieden zorgt het gewicht van de aanwezige ophooglaag ook nu nog voor bodemdaling (Figuur 1). Ook als er niet wordt opgehoogd kan de slappe ondergrond toch belast worden: een verlaging van de grondwaterstand wordt door de ondergrond gevoeld als een belasting en kan leiden tot bodemdaling. Het ontwateren van veen- en kleigebieden vindt plaats via sloten. Door het waterpeil in de sloten te reguleren wordt de draagkracht van het land vergroot, maar is de grondwaterstand ook kunstmatig verlaagd (Figuur 1). Door verdamping zakt de grondwaterstand in de lente en de zomer verder uit.

Als gevolg van het belasten van de slappe grond treden een aantal processen in werking: er vindt, met name onder de grondwaterspiegel, consolidatie en kruip (viskeuze vervorming) plaats (Figuur 1). Dit leidt tot volumeverlies en dus bodemdaling. Boven de grondwaterspiegel kan het veen en de klei gaan krimpen onder invloed van de verdamping en kan organisch materiaal onder invloed van zuurstof worden afgebroken door bacteriën, archaea en schimmels (Figuur 1). Ook deze twee processen leiden tot volumeverlies en daarmee tot bodemdaling. Maar op korte tijdschalen kan de bodem ook weer stijgen. Een deel van de vervorming in de verzadigde ondergrond (onder de grondwaterspiegel) is elastisch en dus reversibel. En er is zwel: de tegenhanger van krimp, waarmee een deel van

¹ <https://bodemdalingdebaas.nl/>

de krimp ook reversibel is. Op langere termijn is er wel sprake van bodemdaling omdat niet alle daling reversibel is.



Figuur 1 Visualisatie van diverse begrippen uit de hoofdstuk. Geologische doorsnede door Kanis (provincie Utrecht). Op ca. 7 meter onder het maaiveld is een stabiele zandlaag (geel) te herkennen. De bruine kleuren zijn meters dikke veenpakketten, plaatselijk onderbroken door kleiafzettingen (groene kleuren). In het dorp is een ophooglaag (grijs) op het veen aanwezig, terwijl in het veenweidegebied net buiten het dorp (geheel links) klei (groen) op het veen ligt. In het dorp is het gewicht van de ophooglaag de belangrijkste oorzaak van bodemdaling, in het veenweidegebied lage grondwaterstanden (blauwe lijn). Veenafbraak (oxidatie) en krimp dragen boven de grondwaterstand plaats bij aan permanente bodemdaling, compactie doet dat onder de grondwaterstand.

Handelingsperspectief en modelinstrumentarium

Om in te grijpen en de bodemdaling te baas te worden is niet eenvoudig. Het betekent een breuk met de manier waarop we al 1000 jaar wonen en werken in het Groene Hart. Het bewustzijn van de noodzaak om dingen anders te doen is groeiende, en veranderingen worden deels al doorgevoerd of beproefd. Om die ontwikkeling verder te brengen en op te schalen is er behoefte aan handelingsperspectief, opties voor de toekomst waarvan de kosten en baten duidelijk zijn. Met deze scenario's kan een maatschappelijke afweging worden gemaakt en kan bewuste besluitvorming over bodemdaling plaatsvinden. De scenario's die het handelingsperspectief bieden, starten met voorspellingen van de ontwikkeling van de bodemdaling. Deze scenario's worden opgesteld met het modelinstrumentarium; modellen, waarin de verschillende opties voor handelen kunnen worden nagebootst en vervolgens door algoritmes wordt berekend hoeveel bodemdaling er in de betreffende situatie optreedt. De onderliggende rekenmodellen maken gebruik van procesbegrip en/of van empirische relaties. Ze worden gevoed en getoetst met meetdata. Belangrijk is dat er rekenschap wordt gegeven van de betrouwbaarheid van de uitkomsten.

Project 42: verbetering van het modelinstrumentarium

Een actueel modelinstrumentarium is belangrijk voor goede voorspellingen die nodig zijn voor het handelingsperspectief en beleidsbeslissingen. Dit was de aanleiding om project 42 van de RDBGH specifiek te richten op het modelinstrumentarium.

Het modelinstrumentarium dat in project 42 is geactualiseerd bestaat uit bestaande ondergrondmodellen en rekenmodellen die in de periode voorafgaand aan de Regio Deal zijn

ontwikkeld in onderzoeksprogramma's en projecten. Sommige van de rekenmodellen zijn specifiek ontwikkeld voor een bepaalde toepassing, bijvoorbeeld het doorrekenen van zettingen bij lokale ophogingen of juist het voorspellen van regionale bodemdaling bij peilbeheer. Onderliggende concepten en het gebruikte mechanistische begrip is echter vaak hetzelfde bij deze modellen, hoewel de implementatie hiervan kan verschillen van model tot model. Een project als de RDBGH is erg waardevol voor verdere ontwikkeling van deze modellen, omdat in dit soort projecten gebruik gemaakt kan worden van brede expertise van verschillende partners, er voldoende tijd is voor diepgaande studie en omdat er ook wordt geïnvesteerd in bijvoorbeeld het uitvoeren van metingen die gebruikt kunnen worden bij de evaluatie en ontwikkeling van de modellen. Dergelijke programma's bieden de mogelijkheid om meerdere aspecten van het modelinstrumentarium tegelijkertijd en in samenhang aan te pakken: niet alleen de algoritmes, maar bijvoorbeeld ook de invoerdata en parametrisatieconcepten. Dit is in project 42 van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart gedaan. Deze notitie geeft een synthese van de behaalde resultaten in dit project en geeft aan wat de leerpunten waren. Ook worden mogelijke ontwikkelingstrajecten voor de toekomst besproken.

Er is in project 42 gewerkt aan:

- i. Verbeterde *invoerdata*: een nauwkeuriger geologisch ondergrondmodel van het Groene Hart. Bodem- en ondergrondopbouw staat aan de basis van vrijwel alle bodemdalingsberekeningen.
- ii. *Procesmodellen*: (A) Rekenwijzen om seizoenale en kortere bodembewegingen te modelleren/voorspellen. Dit betreft een nieuwe toevoeging aan het modelinstrumentarium. (B) Mogelijkheden voor betere rekenwijzen voor bodemdaling door veenoxidatie.
- iii. *Validiteit* van het isotachenmodel² dat in het instrumentarium wordt gebruikt voor de prognose van de compactiebijdrage in bodemdaling, en betere manieren om het isotachenmodel te *parametriseren*. Hierin is een koppeling gelegd met twee andere RDBGH projecten: project 44 *Bodemdaling in kaart en kijken in de bodem; meten, monitoring en ontrafelen van bodemdalingsprocessen*; project 10 *Uitbreiding monitoring proefvakken*.

Het studiegebied van projecten 42 en 44 van de RDBGH is weergegeven in Figuur 2.

² Het isotachenmodel wordt in de geotechniek gebruikt voor zettingsberekeningen: het zakken van het oorspronkelijke maaiveld onder aangebrachte grondlichamen (ophogingen) of andere constructies door samendrukking (compactie) van onderliggende bodemlagen. De naamgeving 'isotachen' verwijst naar een technisch aspect van het model: het geeft aan dat in het onderliggende wiskundige rekenmodel gebruik wordt gemaakt van 'lijnen met gelijke snelheid' (isotachen), waarbij de snelheid de relatieve samendrukkingssnelheid (reksnelheid) van bodemmateriaal betreft in het rek-spanningsdiagram. Het isotachenmodel onderscheidt zich daarin van oudere samendrukkingmodellen zoals het Koppejan-model.



Figuur 2 Studiegebied van projecten 42 en 44 van de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft eerst een overzicht van de verschillende deelstudies en producten van het project. Hoofdstuk 3 verschaft een overzicht van de resultaten en bevindingen van die deelstudies. Hoofdstuk 4 sluit af met een bespreking van de voortgang die met de studies is geboekt en wat dat betekent voor praktijkgebruik.

2 Uitgevoerde deelstudies en producten

Binnen de drie onderzoekslijnen zijn de volgende deelstudies uitgevoerd:

	Deliverable
1. Geologisch model	
- vernieuwd ondergrondmodel voor het Groene Hart	D1
2. Verbetering procesmodellen	
- beschouwing (verbetermogelijkheden) bodemdaling door aerobe <i>oxidatie</i>	D2A
- model voor <i>maaiveld</i> dynamiek (o.a. krimp-zwel)	D2B
3. Parametrisatie en toetsing <i>compactie</i> model	
- parametrisatie isotachenparameters m.b.v. InSAR	D3A
- evaluatie isotachenmodel voor kleine belastingen	
o lab- en literatuurstudie	D3B.1
o met gegevens RD42 (en RD10) meetsites	D3B.2
o overkoepelend syntheserapport n.a.l.v. toetsing isotachenmodel	D3B.3
- evaluatie isotachenmodel voor prognose restzettingen (cases)	D3C
4. Syntheserapport (deze rapportage)	D4

3 Overzicht van resultaten

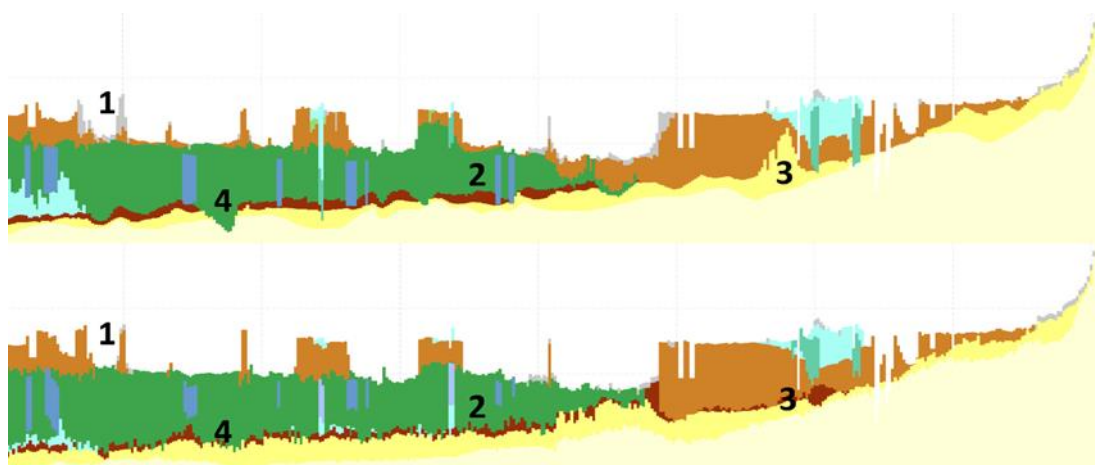
3.1 Ondergrondmodel (D1)

Voor het studiegebied is een nieuw ondergrondmodel gemaakt van de Holocene eenheden, waarin verbeteringen zijn doorgevoerd ten opzichte van het vigerende GeoTOP model (1.6). Naast nieuw beschikbare boringen is nu ook gebruik gemaakt van sonderingen. De sterke vergroting van datadichtheid zorgt voor een beter model. Verbeteringen betreffen onder andere:

- Een geactualiseerd terreinhoogtemodel gebaseerd op AHN3
- De verbreiding van Hollandveen (NIHO) en Basisveen (NIBA)
- Dikte en verbreiding van antropogene afzettingen (AAOP) – bv. ophooglagen
- Verbeteringen aan diverse generaties geulafzettingen (bv. oude Rijn lopen)

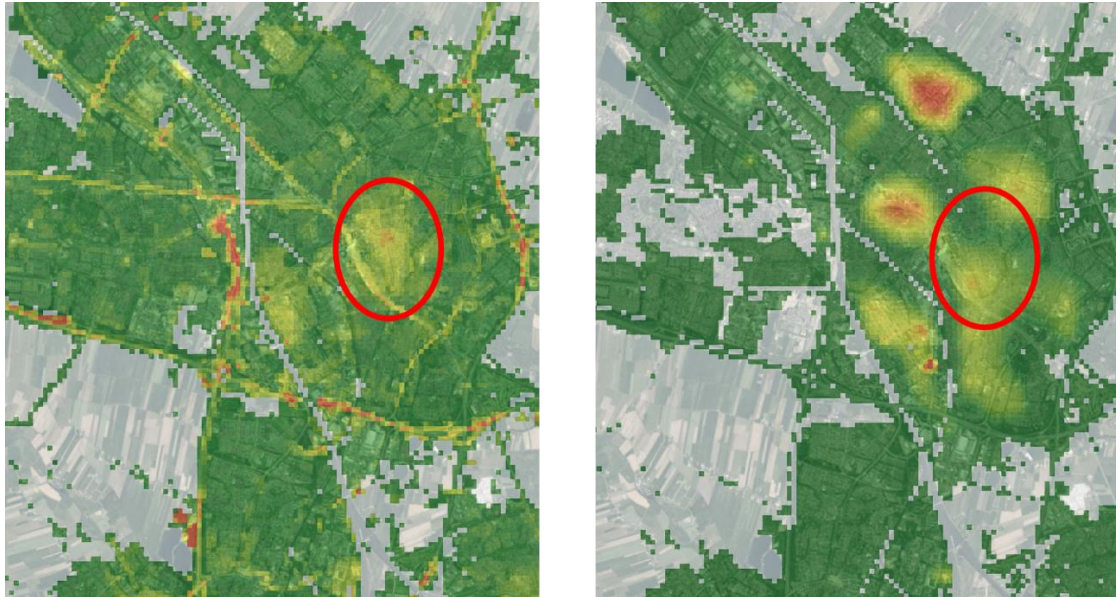
Figuur 3 en Figuur 4 tonen voorbeelden van deze verbeteringen.

Naast deze verbeteringen van de verbreiding van geologische eenheden en het daaraan gekoppelde voxelmodel³ met lithoklassen, is het organisch stofgehalte van veenvoxels opnieuw geparametriseerd. In de documentatie bij het ondergrondmodel zijn meer voorbeelden van verbeteringen te vinden.



Figuur 3 Verbeteringen in het Regiodeal-model (boven) ten opzichte van GeoTOP (onder) in het noordelijke deel van het projectgebied. De cijfers zijn voorbeelden van verbeteringen. 1= Diktes van ophooglagen; AAOP(grijs), 2= Voorkomen en dieptes van geulopvullingen (blauw), 3=Verbreiding van rivierduinafzettingen (geel), 4=Insnijdingen van zeekleiafzettingen (NAWO).

³ Een voxel is een 3D cel (100*100*0.5 m) waaraan eigenschappen (attributes) zijn toegekend.



Figuur 4 Dikte van de ophiolagen (AAOP) in en rond de stad Utrecht. Links het Regiodeal-model, waar nu duidelijk de historische binnenstad van Utrecht kan worden herkend binnen de rode ovaal. Dit was nog niet het geval in GeoTOP (rechts).

3.2 Oxidatie (D2A)

In deze deelstudie is een review gedaan van bestaande veenoxidatiemodellen en is vooruitgekeken naar de mogelijkheden om deze modellen te verbeteren.

Veenoxidatie, of veenafbraak, is een van de processen die leiden tot maaiveldaling.

Veenoxidatie wordt nu al meegenomen in bodemdalingsvoorspellingsmodellen. Een van de meest gebruikte rekenmethoden voor veenafbraak, zeker voor landelijke producten, zijn gebaseerd op gevonden empirische relaties tussen grondwaterdynamiek (gemiddeld laagste grondwaterstand) en bodemdaling, hoofdzakelijk in Zegveld (o.a. Van den Akker et al 2007). Een concept dat ook vaker wordt gebruikt in het modelleren van veenoxidatie is een zogenaamde *rate law*, waarbij elke tijdstap een bepaald deel van de hoeveelheid organische stof wordt verwijderd (oxideert) en dit wordt uitgedrukt in hoogteveranderingen.

Een nadeel van de bovengenoemde modellen voor het maken van bodemdalingprognoses is dat deze voornamelijk gebaseerd zijn op een beperkt deel van het veenweidegebied. Voor toepassing elders wordt daarmee steeds de aanname gedaan dat de bodemdaling daar reageert op veranderingen (peilbesluiten bijvoorbeeld) zoals dat is gemeten op de meetlocaties. Dat brengt onzekerheid mee. Een ander nadeel van het gebruik van empirische relaties is dat het onderliggende procesbegrip ontbreekt. Met goed procesbegrip kunnen met meer vertrouwen voorspellingen worden gedaan van veranderingen in veenoxidatie bij andere situaties. Tenslotte gelden de empirische relaties vooral voor langere perioden (>8 jaar) omdat bodemdaling en gebruikte grondwaterkarakteristieken alleen op die tijdschaal zijn vast te stellen.

Bodemfysische modellen, waarbij de stroming van water en stoffen in de bodem wordt gemodelleerd, bieden een mogelijkheid om meer mechanistisch veenoxidatie te modelleren. Een nadeel van deze modellen is dat deze rekenintensiever zijn. Het kost daardoor teveel tijd om grote gebieden door te rekenen. Deze modellen kunnen daardoor niet ingezet worden voor het maken van regionale en landelijke bodemdalingsprognoses. De wens is om mechanistische modellen te ontwikkelen waarin de bodemfysica vereenvoudigd kan worden weergegeven om voorspellingen van veenoxidatie op regionale of landelijke schaal mogelijk

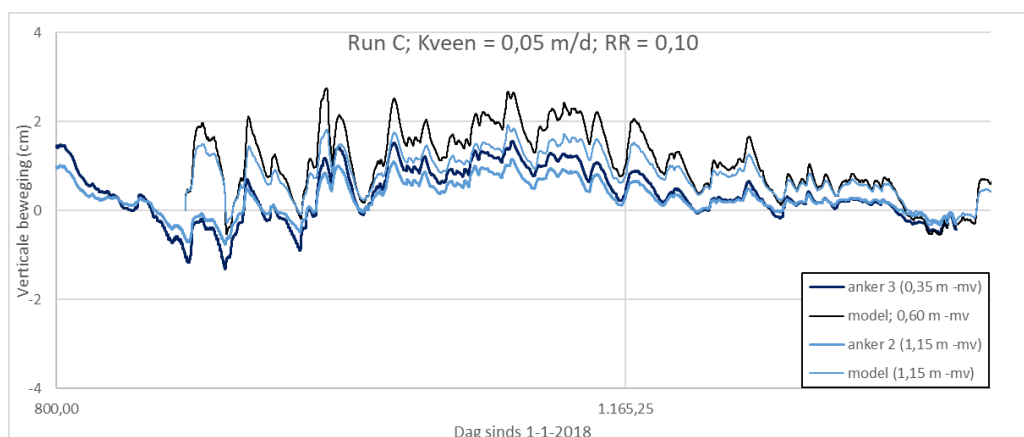
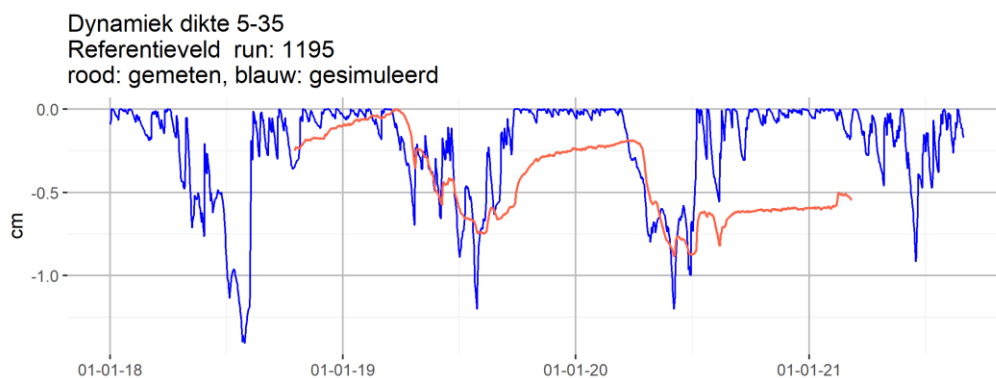
te maken. Er is al aardig wat kennis over de microbiële processen die ten grondslag liggen aan de veenoxidatie. Daarbij is ook kennis beschikbaar over de omstandigheden die veenoxidatie faciliteren of verhinderen. Een ontbrekende schakel is voornamelijk de vertaling van microbiële activiteiten naar volumeverlies. Dit is noodzakelijke informatie om veenoxidatieprocessen om te zetten in bodemdaling. Vervolgonderzoek zou zich hierop moeten richten. Daarbij zou het ook om de vraag moeten gaan of veenoxidatie zelf zorgt voor volumeverlies of dat dit plaatsvindt via andere (mechanische) processen.

3.3 Maaiveldynamiek (D2B)

Het onderzoek in de RDBGH richt zich op de daling van het maaiveld ten opzichte van een hoogterefereëntievlak zoals het NAP, die in zich in de loop van jaren tot decennia ontwikkelt door veenoxidatie, rijping en compactie van bodemlagen in het pakket Holocene afzettingen. Over kortere tijdsperiodes laten tijdreeksen van hoogteverandering van het maaiveld en ondiepe bodemniveau's echter zelden een simpele dalingstrend zien. De hoogteverandering is dynamisch, met perioden van stijging en daling, met name in gebieden met veen en/of klei nabij maaiveld zoals in het Groene Hart. In veengebieden kan het gaan om bewegingen tot circa één decimeter. In dit onderzoek is een model ontwikkeld om de dynamiek van het maaiveld als gevolg van krimp/zwel en elastische compactie/expansie te berekenen. Krimp/zwel vindt plaats boven de freatische grondwaterstand; de elastische bijdrage in verzadigde bodemniveau's beneden de freatische grondwaterstand. De eerste modelopzet is ontwikkeld en getoetst met data van de NOBV-site Rouveen in Noordwest Overijssel.

Voor de bijdragen vanuit de verzadigde en onverzadigde ondergrond worden (nog) twee softwarepakketten gebruikt: SWAP voor krimp-zwel en FlexPDE voor de elastische bijdrage aan de dynamiek. Het model, waarin berekeningen met de twee softwarepakketten worden gecombineerd, is geschikt voor 1D (verticaal profiel) modellering. Dit betreft dus de maaiveld- en bodemdynamiek op een 'puntlocatie'.

Figuur 5 geeft een indruk van modelleerresultaten voor Rouveen.



Figuur 5 Modelleerresultaten voor Rouveen. Boven: dynamiek door de bodemlaag tussen 5 en 35 cm -mv (krimp-zwel). Beneden: dynamiek door het bodempakket tussen het onderliggende (stabiele) zand en twee ankers op 35 en 115 cm -mv (elastisch).

Inzichten zijn vooralsnog beperkt tot deze meetlocatie:

- Het elastische deel, gedreven door waterspanningsveranderingen in het veen, is goed verklaarbaar/modelleerbaar met karakteristieke geotechnische parameters voor elastische vervorming van veen (onderste figuur in Figuur 5).
- De modellering van krimp/zwel overschat de dynamiek over korte tijdsperioden van dagen tot een week. En zwel verloopt in het veld trager dan krimp.

3.4 Compactie (D3)

In het modelinstrumentarium van Deltares voor bodemdaling wordt het isotachenmodel gebruik voor de compactiebijdrage aan bodemdaling. In deze sectie worden de resultaten en bevindingen van de diverse deelstudies toegelicht die betrekking hebben op het isotachenmodel.

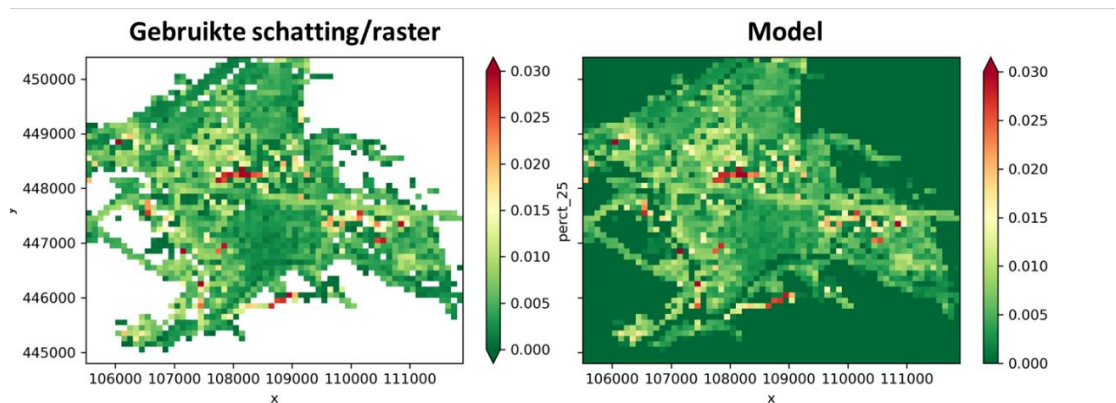
3.4.1 Parametrisatie isotachenmodel met gebruik van InSAR (D3A)

Een eigenschap van het isotachenmodel is dat de parameterwaarden die aan het bodemmateriaal worden toegekend zich (direct) vertalen in een compactiesnelheid⁴. Dit levert dus ook direct een bodemdalingssnelheid op. In modellering is daarom in feite altijd sprake van 'een vliegende start'. De gangbare aanpak in het gebruik van het modelleerinstrumentarium is/was om de parameterwaarden zo te kiezen dat de bijdrage door

⁴ Dit is de snelheid waarmee individuele lagen in de bodem in laagdikte afnemen.

compactie aan de initiële maaiveldaling overal bijzonder klein is. De compactie neemt dan in de loop van een berekening alleen duidelijk toe waar sprake is van belastingstoename, bijvoorbeeld door een grondwaterstandsverlaging of door een ophoging. Echter, voor gebieden waar de momentane compactiesnelheid op het moment waarop de modellering start duidelijk groter is, wordt de bodemdaling door compactie richting de toekomst met deze gangbare aanpak onderschat.

In dit deelproject is een methode ontwikkeld om de parametrisatie ruimtelijk te differentiëren op basis van bewerkte radarsatellietgegevens (InSAR data). De parameterwaarden worden dan zo toegekend dat de initiële maaiveldaling van een ruimtelijk model de ruimtelijke verschillen in de maaiveldaling weerspiegelt die is afgeleid uit de InSAR data. De methode is ontwikkeld en gedemonstreerd voor Gouda (Figuur 6). De case studie laat zien dat er geen eenduidig recept bestaat om de maaiveldalingssnelheid te schatten uit InSAR data, en welke aandachtspunten er zijn om tot een goede schatting te komen.



Figuur 6 Gemodelleerde initiële bodemdaling (rechts) in vergelijking met de schatting op basis van InSAR (links) voor Gouda. Bodemdalingssnelheid in m/jaar. Het verschil is overal < 1 mm/jaar.

3.4.2 Toetsing isotachenmodel voor kleine belastingen (D3B)

Het isotachenmodel is oorspronkelijk ontwikkeld om zetting van aardebanen (o.a. dijken) te modelleren. Dat zijn zware constructies die veel druk uitoefenen op de ondergrond. Bodemdalingsvraagstukken betreffen echter hoofdzakelijk situaties met beperkte belastingen van de ondergrond, bijvoorbeeld door een grondwaterstandsverlaging, of door een lichte ophoging bij een renovatie. Of het gaat om 'ongestoorde/doorgaande bodemdaling', waarin überhaupt geen sprake is van een (nieuwe) belasting. Parametrisatie van het isotachenmodel voor deze situaties is een uitdaging omdat de zeer geringe compactiesnelheden door kruip daarin centraal staan en goed moeten worden berekend. Bovendien is het isotachenmodel niet gevalideerd voor deze situaties. De volgende resultaten en bevindingen leveren meer inzicht in de validiteit en bruikbaarheid van het isotachenmodel in toepassingen met kleine belastingen.

3.4.2.1 Lab- en literatuurstudie (D3B.1)

Er zijn laboratoriumproeven gedaan op klei van de meetsite Bleskensgraaf van project 44 van de RDBGH. De resultaten kunnen als volgt worden samengevat:

- De gemeten kruipreksnelheden⁵ voor kleine belastingen waren veel groter (factor 100 of meer) dan de kruipreksnelheden die volgen uit het isotachenmodel. Deze proeven geven aanwijzingen dat het isotachenmodel niet zondermeer valide is voor toepassingen met kleine belastingen en de compactiebijdrage flink kan onderschatten.
- De met de proeven bepaalde 'ligging van de isotachen' heeft geen resultaten opgeleverd die strijdig zijn met het isotachemodel. Deze toetsing was echter alleen mogelijk voor kruipreksnelheden (=compactiesnelheden) die veel hoger zijn dan bodemdalingssnelheden die zich in de praktijk voordoen. Deze set proeven geeft dus geen uitsluitel over de validiteit van het isotachemodel voor 'echt kleine belastingen' die gangbaar zijn in bodemdalingstoepassingen.

In de literatuur zijn aanwijzingen te vinden dat de gevonden onderschatting wordt veroorzaakt door 'ontlasting' bij/na de monsternamen in het veld voordat ze worden herbelast in de proeven. Bij veel wegrenovaties wordt meestal eerst ontgraven voordat wordt opgehoogd en de nieuwe wegconstructie wordt aangebracht. Daar is dus ook eerst sprake van ontlasting voordat er herbelast wordt. De studie die is gedaan naar restzettingen (paragraaf 3.4.3) lijkt erop te wijzen dat onderschatting met het isotachenmodel zich ook in deze veldsituaties voordoet.

Daarnaast bevat de literatuur aanwijzingen dat de onderlinge afstand tussen isotachen afneemt naarmate de compactiesnelheid veroorzaakt door kruip afneemt. Er wordt zelfs gesproken over een eindisotache, wat aangeeft dat de compactiesnelheid helemaal kan stoppen. Deze gedragingen van compactie zijn niet aanwezig in het (huidige) isotachenmodel en zouden zorgen voor een overschatting van de kruipreksnelheid bij geringe belastingen wanneer het effect van ontlasting afwezig is.

3.4.2.2 Toetsing met meetgegevens van bodemdalingsmeetsites van de RDBGH (D3B.2)

Deze toetsing is gedaan voor de vijf bodemdalingsmonitoringslocaties van project 44 en voor één proefvak van project 10 (monitoring proefvakken met lichte ophogingen). Op deze meetsites is de ondergrond uitgebreid gekarakteriseerd. Dit omvat de bodemopbouw, specifieke grondgewichten en waterspanningen. Bovendien zijn voor diverse klei- en veenmonsters isotachenparameters en de preconsolidatiespanning bepaald met laboratoriumproeven. In deze studie zijn voor deze monsters kruipreksnelheden (=compactiesnelheden) afgeleid. Deze theoretische kruipreksnelheden geven in principe de actuele situatie op deze locaties weer. Er is onderzocht hoe nauwkeurig de kruipreksnelheid kan worden bepaald (onzekerheid), en er is getoetst of deze schattingen realistisch zijn door ze te vergelijken met de 'gemeten' bodemdalingssnelheid op deze locaties.

De bevindingen zijn als volgt:

- De in situ compactiebijdrage aan bodemdaling van individuele bodemlagen kan niet goed worden bepaald uit de laboratorium-gemeten isotachenparameters en gedetailleerde karakterisatie van in situ grond- en waterspanningen. Daar zijn twee verklaringen voor:
 - De onzekerheid van de compactiebijdrage is erg groot. Een kleine fout of onzekerheid in de spanningstoestand levert een grote fout in de berekende compactiebijdrage.
 - In een aantal gevallen, met name voor veen, is de laagste schatting van de compactiebijdrage nog onrealistisch hoog. Dit lijkt erop te wijzen dat voor die gevallen het isotachemodel niet valide is.

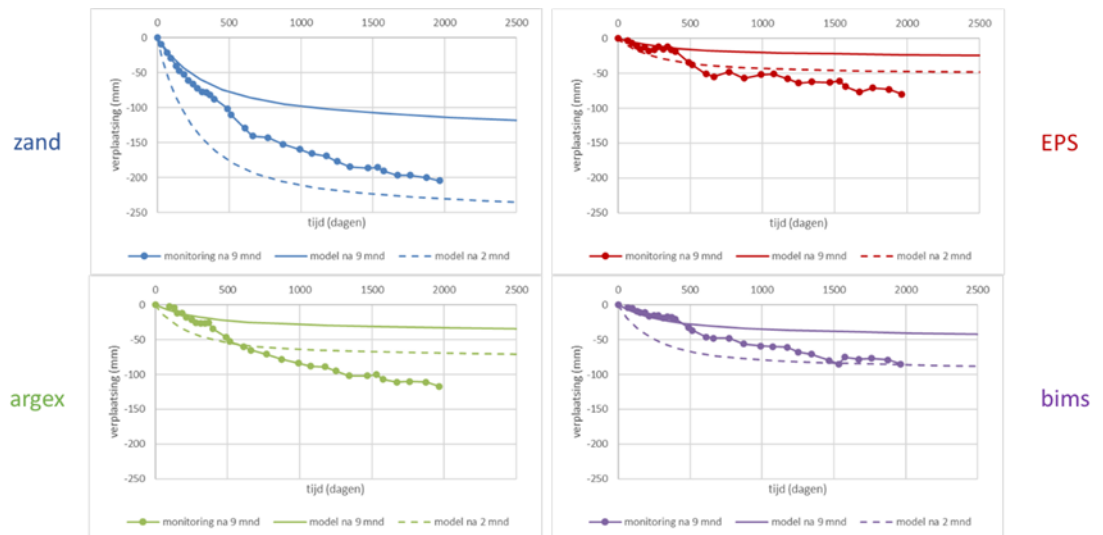
⁵ Kruip is de compactie (samendrukking) bij een vaste grondspanning. Kruiprek is de relatieve laagdikteafname (dikteafname gedeeld door de laagdikte). Kruipreksnelheid is de tijdsafgeleide daarvan.

- Deze bevindingen hebben ook consequenties voor de prognose van de bodemdaling(sverandering) die wordt veroorzaakt door ingrepen met een kleine belasting. Los van de aanwijzingen over het niet valide zijn van het isotachenmodel voor de modellering van kruipreksnelheden voor in situ condities, is de prognose van de invloed van een kleine belastingsverandering zeer onzeker door de grote gevoeligheid voor uitgangskondities die slechts met een zeer beperkte nauwkeurigheid kunnen worden bepaald.

3.4.3 Evaluatie isotachenmodel voor restzettingsprognose (D3C)

Inzichten zijn verkregen via een studie van een casus in Kamerik. De casus Kamerik betreft de renovatie/ophoging van een straat in 2016/2017. In de straat zijn vier ophoogmaterialen toegepast in evenzoveel proefvakken; een traditionele ‘zware’ ophoging met zand, en drie lichtere ophogingen met respectievelijk EPS, Argex en Bims.

De ondergrond van de wegfundering bestaat grofweg uit 5 m veen op zand. In elk proefvak is gedurende ruim 6 jaar de zetting gemonitord met een ondergrondse zakbaak. Vergelijking van de metingen met de zettingsverwachtingen die vóór de renovatie waren opgesteld laten zien dat de berekeningen de restzetting over ruim 5 jaar voor alle proefvakken ten minste 50% onderschatten (onderschatting tussen 5 en 10 cm, Figuur 7). De zettingstrends lijken er ook op te duiden dat de onderschatting (in centimeters) verder zal toenemen naar de toekomst.



Figuur 7 Gemeten restzetting (symbolen) en de restzettingsprognose (continue lijn) voor de vier proefvakken in Kamerik. De restzetting is de zetting vanaf het eind van de bouwfase. De bouwfase duurde 9 maanden. De onderbroken lijn toont aanvullend de oorspronkelijke restzettingsprognose waarin was aangenomen dat de bouwfase slechts 2 maanden zou duren. Om de restzettingsprognose te beoordelen moet metingen worden vergeleken met de continue lijn.

De ontwerpberekeningen zijn gedaan met het Koppejan samendrukkingsmodel dat door Deltares en diverse andere partijen niet meer wordt gebruikt. In de huidige studie is daarom vervolgens ook het isotachenmodel toegepast op deze casus om te onderzoeken of dit model tot andere inzichten en mogelijk een betere zettingsprognose zou leiden dan het oudere Koppejan model. Deze analyse leverde de volgende bevindingen op:

- Bij een vergelijkbare aanpak voor parametrisatie als in het oorspronkelijk geotechnisch advies – dat wil zeggen parametrisatie op basis van standaard

parameterwaarden uit NEN 9997-1 Tabel 2.b – levert het isotachenmodel geen betere prognose van de zetting op dan het Koppejan model. De restzetting wordt in vergelijkbare mate onderschat.

- Vrij goede prognoses van zowel de totale zetting als de restzetting zijn mogelijk, maar vereisen een bijzonder lage waarde voor 'equivalent age' (intrinsieke tijd). En voor 'de kruipparameter' moet een waarde worden gekozen die hoger is dan de hoog-karakteristieke waarde in Tabel 2.b in NEN 9997-1.
- De 'benodigde' parameterwaarden voor een goede prognose corresponderen echter met een onrealistisch hoge initiële kruipreksnelheid in verhouding tot de geringe achtergrondzetting. Dit wijst erop dat het isotachenmodel niet valide is voor deze casus. Bij de renovatie is de oude fundering eerst weggehaald voor de nieuwe constructie werd aangebracht. Mogelijk veroorzaakt ook hier ontlasting (van het veen) het afwijkend zettingsgedrag, net als waarschijnlijk het geval is bij de afwijkende resultaten van de laboratoriumstudie (paragraaf 3.4.2.1)

4 Waar staan we nu?

4.1 Voorspellend vermogen

De ultieme toets van het modelinstrumentarium ligt in het voorspellend vermogen ervan. Hebben we daar met dit onderzoek in het kader van de RDBGH vooruitgang geboekt? Of weten we beter waar de problemen zitten zodat er gericht gewerkt kan worden aan oplossingen? Beide vragen kunnen positief worden beantwoord.

Vooruitgang is onder ander geboekt met het vernieuwde ondergrondmodel van het Groene Hart. Een nauwkeuriger model van de ondergrondopbouw zorgt ervoor dat er minder kans is dat prognoses lokaal of in specifieke deelgebieden er flink naast zitten omdat lokaal de ondergrondopbouw niet klopt.

Vooruitgang is ook geboekt met betrekking tot voorspelling van seizoenale en kortere bodembewegingen (de bodemhoogtedynamiek). Er is voor het eerst een model waarmee die bewegingen procesmatig kunnen worden gesimuleerd. Ondanks dat het model alleen nog is toegepast voor een meetlocatie in Rouveen, buiten het Groene Hart, is veel geleerd over de mechanismen die de beweging bepalen, en de verschillen in het gedrag van de permanent verzadigde en variabel verzadigde bodem. De nog verse/korte meetreeksen van de nieuwe bodemdalingsmonitoringslocaties die zijn ingericht binnen het Groene Hart in project 44 leveren ook al nieuwe inzichten, bijvoorbeeld over de bijdragen van diepere, permanent verzadigde kleilagen aan de bodembeweging. Of de op- en neergaande bewegingen, variërend enkele millimeters tot bijna een decimeter, ook zonder directe meting daarvan goed te voorspellen zijn, vraagt om verdere studie. Met het nieuwe model en de monitoringsdata van de RDBGH is voor zo'n verdere studie een belangrijke basis gelegd.

Voor bodemdaling door veenafbraak (oxidatie) zijn de limitaties en de mogelijkheden beter in beeld gebracht. Het is ook duidelijk dat we aan het einde lopen van het inzetten van de huidige generaties modellen en dat verdere substantiële verbetering alleen kan plaatsvinden als meer gebruik wordt gemaakt van procesbegrip. Hiermee is het nu ook duidelijk in welke richting verder onderzoek moet plaatsvinden om verbeteringen door te voeren. Een belangrijke schakel is de vertaling van microbiële afbraak van veen naar volumeverlies. Deze vertaling kan onafhankelijk van bestaande modelconcepten plaatsvinden of juist via bekende mechanische processen, welke optie beter is moet nu verder worden uitgezocht. Tegelijkertijd met de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart liep ook het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV), waarbinnen veel bruikbaar procesbegrip is opgedaan rondom veenoxidatie en bepalende factoren. Dit heeft geleid tot verder inzicht en ideeën die in de regiodeal zijn gebruikt. Het is de wens dat de ideeën en concepten die opgedaan en ontwikkeld zijn binnen de regiodeal verder worden uitgewerkt en uitgetest binnen het NOBV.

Voor het instrumentarium voor bodemdaling door compactie (isotachenmodel), heeft het onderzoek vooral meer duidelijkheid en inzicht verschaft over de beperkingen van het instrumentarium voor bodemdalingstoepassingen waarin niet of nauwelijks sprake is van zware ingrepen of deze helemaal afwezig zijn (achtergrondaling). Die kennis is niet alleen cruciaal voor goed gebruik van het instrumentarium, maar is ook essentieel voor de zoektocht naar oplossingen/verbeteringen. Verbetering is hier vooral afhankelijk van goede veldmetingen van effecten van maatregelen waarbij de compactiesnelheid zowel vóór als na de toepassing van de maatregel nauwkeurig worden vastgesteld. Een belangrijk inzicht uit

het onderzoek is dat ontlasting van bodemlagen voordat deze worden herbelast mogelijk voor meer bodemdaling zorgt dan het huidige instrumentarium voorspelt (een onderschatting van de restzetting). De lopende monitoring van proefvakken die zijn gerealiseerd in project 10 van de RDBGH biedt unieke kansen om hierover de komende jaren meer duidelijkheid te verkrijgen.

4.2 Praktische betekenis

Ten slotte wordt hier kort, puntsgewijs ingegaan op de praktische betekenis van de bevindingen in het project. Daarin wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds toepassing in grootschalige, lange-termijn bodemalingsprognose en meer lokale maatregel-effect relaties.

Praktische betekenis voor regionale of nationale lange-termijn bodemdalingsprognoses:

- Het nieuwe ondergrondmodel is direct inzetbaar.
- Het isotachenmodel biedt nog steeds de beste basis om de compactiebijdrage aan regionale of nationale lange-termijn bodemdaling te voorspellen. Deze studie heeft vooral inzicht verschaft de (on)nauwkeurigheid van prognoses en de factoren die dat bepalen. Dit inzicht kan en moet worden benut om de 'bandbreedte' van prognoses beter te duiden.
- De studie heeft duidelijk gemaakt dat uitkomsten van laboratoriumproeven niet zonder meer geschikt zijn om rekenmodellen te parametriseren. Parametrisatie kan het beste worden gedaan op basis van schattingen van de actuele compactiebijdrage aan maaiveldaling, waar mogelijk op basis van metingen. Voor de stedelijke omgeving is uitgewerkt hoe dat kan met radarsatellietdata (InSAR). Met name voor veenweidegebieden ligt hier nog een flinke uitdaging omdat de compactiebijdrage aan de maaiveldaling daarvoor gescheiden moet worden van andere bijdragen zoals van veenoxidatie. Een belangrijk resultaat van RDBGH project 44 is dat de actuele maaiveldalingsnelheid voor het landelijke gebied voor het eerst goed geschat kan worden met het ontwikkelde dynamisch hoogtemodel D-DEM. De voorlopige resultaten van de bodemdalingsmeetsites in project 44 wijzen op een zeer kleine bijdrage van compactie in de bodemdaling in het landelijk gebied (Bleskensgraaf, Berkenwoude, Cabauw, Hazerswoude).
- Hoewel er voor de bodemdalingsmeetsites nog geen aanwijzingen zijn voor een duidelijke rol van oxidatie, wordt wel verwacht dat oxidatie in veenweidegebieden meestal een grotere bijdrage levert aan de bodemdaling dan compactie. Daarin is veenoxidatie niet apart te onderscheiden van irreversibele krimp van veen. Inmiddels zijn er ook (deels) landelijke modellen beschikbaar die de veenoxidatie met kleine tijdstappen berekenen. De ontbrekende schakel is vooralsnog de vertaling van microbiële veenafbraak naar volumeverlies. Verder onderzoek zou zich hier op moeten richten. De conceptvorming rondom deze ontbrekende schakel geeft wellicht ook nog aanleiding om de bijdrage van veenafbraak aan bodemdaling te beschouwen: draagt veenoxidatie direct bij en is het een onafhankelijk proces of draagt het bijvoorbeeld bij door de gevoeligheid van de ondergrond voor andere bodemdalingsprocessen te vergroten?
- Onzekerheid in bodemdalingsprognose zal nooit verdwijnen en informatie daarover is cruciaal voor goed gebruik van prognoses. Gebiedsdekkende schattingen van de bodemdaling/maaiveldaling (bijdrage van het Holocene pakket) op basis van metingen is essentieel om de onzekerheid te verkleinen.

Praktische betekenis voor lokale maatregel-effect relaties (peilbeheer, grondwaterbeheer, lichte renovaties), ook stedelijke omgeving:

- *Reductie van compactie-gedreven bodemdaling door grondwaterstandsverhoging.* In tegenstelling tot het Koppejan samendrukkingsmodel dat naast het isotachenmodel ook in Nederland wordt gebruikt, kan het isotachenmodel in principe worden ingezet om de reductie van de compactiesnelheid te voorspellen. In hoeverre zo'n prognose reële effectschattingen oplevert is echter onbekend. Het uitgevoerde onderzoek in de RDBGH verschaft hierover geen duidelijkheid. Toetsing met langjarige veldmetingen is noodzakelijk om grip te krijgen op de effecten van dit type maatregel.
- *Effecten van grondwaterstandsverlaging of lichte ophoging op compactie/zetting.* Er moet rekening mee worden gehouden dat de huidige ingenieurspraktijk, waarin veelal parameters uit de NEN9997-1 norm worden gekozen, restzetting in belangrijke mate kan onderschatten. Dat lijkt met name het geval voor ophogingen die vooraf worden gegaan door ontgraving van de bodem en/of oude constructie waardoor de bodem wordt ontlast. Voor de praktijk is het van belang om vast te stellen hoe algemeen deze effecten zijn, en of onderschatting van restzetting ook optreedt bij lichte constructies of grondwaterstandsverlaging zonder voorafgaande ontlasting van de bodem. Dat kan alleen met gerichte veldstudies waarin deze condities nauwgezet worden gemeten en gemonitord. De monitoring die is opgezet in RDBGH project 10 'Monitoring proefvakken' kan hier een belangrijke bijdrage aan leveren.