

Toetsing isotachenmodel voor kleine belastingen - integratierapport

Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groene Hart, project 42

Toetsing isotachenmodel voor kleine belastingen - integratierapport
Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groene Hart, project 42

Auteur(s)
Henk Kooi



Toetsing isotachenmodel voor kleine belastingen - integratierapport

Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groene Hart, project 42

Opdrachtgever	Provincie Zuid-Holland
Contactpersoon	De heer R.J.M. (Rob) Ligtenberg
Referenties	
Trefwoorden	

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	21-06-2024
Projectnummer	11206019-004
Document ID	11206019-004-BGS-0009
Pagina's	16
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Henk Kooi	

Samenvatting

Dit rapport maakt deel uit van project 42 van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart (RDBGH). Project 42 richt zich op verbetering van het modelinstrumentarium voor bodemdalingsberekeningen. In dit rapport zijn de resultaten van drie deelstudies samengebracht die inzichten hebben opgeleverd over de toepasbaarheid van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen.

Naast veenoxidatie en krimp van ondiepe bodemlagen door zuurstofindringing en uitdroging, levert compactie van verzadigd bodemmateriaal onder de grondwaterspiegel vaak een bijdrage aan bodemdaling. Compactie betreft de verdichting van het korrelskelet van het bodemmateriaal (veen, klei, leem, zand). Compactie gaat gepaard met verlies van poriënruimte en hoogteverlies van bodemlagen. Het hoogteverlies van bodemlagen resulteert in bodem- of maaiveldddaling. In het instrumentarium voor bodemdalingsberekeningen van Deltares wordt het isotachenmodel¹ gebruikt om de compactiebijdrage aan bodemdaling te kwantificeren. Het isotachenmodel bevat de meest actuele kennis over 'kruip', de tijdsafhankelijke compactie die o.a. bepalend is voor restzetting.

Het isotachenmodel is oorspronkelijk ontwikkeld om zetting van aardebanen (o.a. dijken) te modelleren. Dat zijn zware constructies. Bodemdalingsvraagstukken betreffen echter hoofdzakelijk situaties waarin er sprake is van zeer kleine belastingen van de ondergrond, bijvoorbeeld door een grondwaterstandverlaging, of door een lichte ophoging bij een renovatie. Of het gaat om 'onverstoorde bodemdaling', waarin helemaal geen sprake van een (nieuwe) belasting. Voor deze toepassingen blijft de effectieve druk (ruim) beneden de grensspanning (preconsolidatiespanning). Parametrisatie van het isotachenmodel voor deze situaties is een uitdaging omdat de zeer geringe compactiesnelheden door kruip daarin centraal staan en goed moeten worden gemodelleerd. Bovendien is het isotachenmodel dat wordt gebruikt niet gevalideerd voor deze situaties met kleine belastingen.

Om meer duidelijkheid te verkrijgen over de toepasbaarheid van het isotachenmodel voor deze situaties is in RDBGH project 42 een drietal deelstudies gedaan:

1. Een laboratorium- en literatuurstudie.
2. Een studie met gegevens van bodemdalingsmonitoringslocaties (projecten 10 en 44 van de RDBGH).
3. Casusonderzoek van restzettingen.

In dit rapport worden de resultaten van deze drie studies samengebracht en de implicaties ervan besproken.

De resultaten geven aan dat er diverse beperkingen en onzekerheden zijn rond het voorspellend vermogen van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen waarin sprake is van geringe belastingen.

- In de laboratoriumproeven, die zijn gedaan op klei van bodemdalingsmonitoringslocatie Bleskensgraaf, zijn bij toepassing van kleine belastingen kruipreksnelheden (compactiesnelheden) gemeten die enkele tot vele orden van grootte groter zijn dan de snelheid die volgt uit het model. Dit duidt op een tekortkoming van het model voor de condities die zijn gebruikt in de proeven. De literatuur geeft aanwijzingen dat deze tekortkoming verband houdt met ontlasting en

¹ Met 'het isotachenmodel' wordt hier de in Nederland toegepaste variant bedoeld. Internationaal bestaan er vooral voor wetenschappelijk onderzoek ook isotachenmodellen die afwijkend zijn van de Nederlandse variant.

zweel bij/na monstername waardoor het isotachenpatroon wordt verstoord. Of de onderschatting ook van toepassing is op veldsituaties met vergelijkbare kleine belastingsveranderingen is niet duidelijk.

De literatuur bevat daarnaast aanwijzingen dat het isotachenmodel de kruipreksnelheid bij geringe belastingen kan overschatten in situaties waarin geen sprake is van versturende effecten door ontlasting.

- In de studie met gegevens van de RDBGH monitoringslocaties is gevonden dat de in situ compactiebijdrage aan bodemdaling van individuele bodemlagen niet goed kan worden bepaald uit lab-gemeten isotachenparameterwaarden en bepaling van de in situ grond- en waterspanning. De onzekerheid van de schatting is onder de goed gedocumenteerde condities van de monitoringssites al gauw enkele orden van grootte. Een kleine fout of onzekerheid in de spanningstoestand levert een grote fout in de berekende compactiebijdrage. Een bandbreedte van de schatting van 0,1 tot 10 mm/jaar per meter laagdikte is bijvoorbeeld onpraktisch groot. Een bandbreedte van 0,001 tot 0,1 mm/jaar per meter laagdikte is in absolute zin klein, maar het verschil in de reactie op een kleine belastingsverandering kan heel groot zijn en is dus zeer onzeker. Met name voor veen is verder gevonden dat de laagste schatting van de compactiesnelheid vaak te groot is in vergelijking met de gemeten bodemdaling. Dit wijst op een andere tekortkoming van het isotachenmodel dan die is gevonden in de eerste deelstudie.
- In de derde deelstudie zijn zettingsmetingen bestudeerd van een wegrenovatie in Kamerik waarin vier ophoogmaterialen zijn gebruikt, verdeeld over vier 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. Er is gevonden dat met gebruik van karakteristieke, veilige parameterwaarden volgens de NEN richtlijn, het isotachenmodel de restzetting met ca. 50% (5 à 10 cm in 5 jaar) onderschat. Een goede prognose vereist bijzonder lage waarden voor 'equivalent age' (intrinsieke tijd) en een secundaire compressiecoëfficiënt voor veen die hoger is dan de hoog-karakteristieke waarde uit de richtlijn. Tegelijkertijd corresponderen deze waarden met onrealistisch hoge initiële kruipreksnelheden in vergelijking met (InSAR-gebaseerde) dalingssnelheid van het wegvak vóór de renovatie. Dit duidt op een tekortkoming van het isotachenmodel. Mogelijk speelt hier ontlasting van de wegdelen door ontgraving bij de renovatie een rol zoals ook gevonden in de laboratorium- en literatuurstudie.

Beknopt overzicht van gevonden beperkingen in het voorspellend vermogen van het isotachenmodel in de drie deelstudies en mogelijke verklaringen.

Deelstudie	Beperking modelberekende compactiesnelheid	Mogelijke verklaring
Lab- & literatuur	(a) Te laag tov metingen	(a) Metingen/isotachen verstoord door ontlasting (o.a. door monstername)
	(b) Te hoog tov metingen	(b) Niet constante afstand tussen isotachen
Bodemdalingsmonitoringslocaties (in situ compactie)	Regelmatig te hoog tov metingen, met name voor veen. Zeer grote bandbreedte/onzekerheid.	Preconsolidatiespanning in lab te laag en/of afname isotacheninterval met toenemende compactie (eindisotache concept)
Restzettingen Kamerik	Te laag tov metingen	Isotachen verstoord door ontlasting ontgraving

Met deze bevindingen kan worden geconcludeerd dat de lage kruipreksnelheden die centraal staan in bodemdalingsvraagstukken onvoldoende nauwkeurig zijn te voorspellen vanuit het

theoretische kader van het isotachenmodel. Het kruipgedrag van klei en veen is complex en moeilijk grijpbaar. Aanpassing van het isotachenmodel (en toename van de complexiteit ervan) biedt vooralsnog geen oplossing om de nauwkeurigheid van bodemdalingsvoorspellingen te verhogen.

Implicaties voor regionale of nationale lange-termijn bodemdalingsprognose

- Het isotachenmodel biedt nog steeds de beste basis om de compactiebijdrage aan regionale of nationale lange-termijn bodemdaling te voorspellen. De uitgevoerde studies hebben vooral meer 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 preconsolidatiespanning (of OCR) is een sterk bepalende parameter en kan het best worden toegekend op basis van onafhankelijke schattingen/metingen van de compactiebijdrage aan maaiveldddaling. Een methodiek daarvoor is ontwikkeld en gedemonstreerd in het deelproject '*Parametrisatie van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen op basis van InSAR*' van RDBGH project 42. Voor situaties waarin ook veenoxidatie bijdraagt aan bodemdaling is daarvoor een scheiding van de bijdrage van compactie aan maaiveldddaling nodig. Dit is vooralsnog een grote uitdaging voor het landelijk gebied, met name in de veenweiden. Het bodemdalingsmeetnetwerk en het dynamisch hoogtemodel (DDEM) dat is opgezet voor het Groene Hart in project 44 gaat hiervoor van grote waarde zijn. Preconsolidatiespanningswaarden verkregen uit laboratoriumproeven worden met deze werkwijze buiten beschouwing gelaten. Het is wenselijk om de parametrisatie te doen met een zo hoog mogelijke schatting van de bodemdaling door compactie. Dit levert de laagst mogelijke waarde voor OCR, en zorgt daarmee voor een maximale gevoeligheid voor (kleine) belastingsveranderingen.
- Er is geen garantie dat deze parametrisatie het effect van kleine belastingen zoals peil-/grondwaterstandsverlagingen (indexatie) lokaal of in gebiedsdelen niet alsnog onderschat.

Implicaties 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 ook in Nederland wordt gebruikt, biedt het isotachenmodel in principe een kader om de reductie van de compactiesnelheid te voorspellen². 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 is met name het geval voor ophogingen die vooraf worden gegaan door ontgraving/ontlasting van de bodem. Het is daarom wenselijk om tot een verbetering van de huidige werkwijze te komen. Daarvoor zien wij twee sporen: modelontwikkeling en uitbreiding van de ervaringsdatabase. De

² Kooi en Erkens (2020) Modelling subsidence due to Holocene soft-sediment deformation in the Netherlands under dynamic water table conditions. Proc. IAHS, 382, 493–498, 2020
<https://doi.org/10.5194/piahs-382-493-2020>

monitoring die is opgezet in RDBGH project 10 'Monitoring proefvakken' kan hier een belangrijke bijdrage aan leveren.

- Uitgebreide geotechnische karakterisatie leidt niet vanzelfsprekend tot nauwkeurige bodemdalings- of zettingsprognoses. Combinatie met goed gedocumenteerde maatregel-effect metingen is essentieel om meer grip te krijgen en nauwkeuriger te kunnen voorspellen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	9
2	Resultaten en bevindingen van de deelstudies	10
2.1	Lab- en literatuurstudie (D3B.1)	10
2.2	Toetsing met meetgegevens van bodemdalingsmeetsites van de RDBGH (D3B.2)	10
2.3	Evaluatie isotachenmodel voor restzettingsprognose (D3C)	11
2.4	Overzicht	12
3	Implicaties voor gebruik van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen	14
3.1	Implicaties voor regionale of nationale lange-termijn bodemdalingsprognose	14
3.2	Implicaties voor lokale maatregel-effect relaties (peilbeheer, grondwaterbeheer, lichte renovaties); ook stedelijke omgeving	14

1 Introductie

Naast veenoxidatie en krimp van ondiepe bodemlagen door zuurstofindringing en uitdroging, levert compactie van verzadigd bodemmateriaal onder de grondwaterspiegel vaak een bijdrage aan bodemdaling. Compactie staat voor de verdichting van het korrelskelet van het bodemmateriaal (veen, klei, leem, zand). Compactie gaat gepaard met verlies van poriënruimte en hoogteverlies van bodemlagen. Het hoogteverlies van bodemlagen resulteert in bodem- of maaiveldddaling. In het instrumentarium voor bodemdalingsberekeningen van Deltares wordt het isotachenmodel gebruikt om de compactiebijdrage aan bodemdaling te kwantificeren. Het isotachenmodel bevat de meest actuele kennis over 'kruip', de tijdsafhankelijke compactie die o.a. bepalend is voor restzetting.

Het isotachenmodel is oorspronkelijk ontwikkeld om zetting van aardebanen (o.a. dijken) te modelleren. Dat zijn zware constructies. Bodemdalingsvraagstukken betreffen echter hoofdzakelijk situaties waarin er sprake is van zeer kleine belastingen van de ondergrond, bijvoorbeeld door een grondwaterstandverlaging, of door een lichte ophoging bij een renovatie. Of het gaat om 'onverstoorde bodemdaling', waarin helemaal geen sprake van een (nieuwe) belasting. Voor deze toepassingen blijft de effectieve druk (ruim) beneden de grensspanning (preconsolidatiespanning). Parametrisatie van het isotachenmodel voor deze situaties is een uitdaging omdat de zeer geringe compactiesnelheden door kruip daarin centraal staan en goed moeten worden gemodelleerd. Daarnaast is het isotachenmodel dat wordt gebruikt niet gevalideerd voor deze situaties met kleine belastingen.

Om meer duidelijkheid te verkrijgen over de toepasbaarheid van het isotachenmodel voor deze situaties is in Regio Deal Bodemdaling Groene Hart³ (RDBGH) project 42 een drietal deelstudies gedaan:

1. Een laboratorium- en literatuurstudie (D3B.1)
2. Een studie met gegevens van bodemalingsmonitoringslocaties van projecten 10 en 44 van de RDBGH (D3B.2)
3. Casusonderzoek van restzettingen (D3C).

In dit rapport worden de resultaten van deze drie studies samengebracht en de implicaties ervan besproken.

³ <https://bodemdalingdebaas.nl/>

2 Resultaten en bevindingen van de deelstudies

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de drie deelstudies samengevat.

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 kruipreksnelheden 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. Het is daardoor nog niet duidelijk of deze onderschatting met het isotachenmodel ook van toepassing is op veldsituaties waarin zich een kleine belasting, zoals door grondwaterstandsverlaging, 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 isotachenmodel en zouden zorgen voor een overschatting van de kruipreksnelheid bij geringe belastingen.

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

De 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.

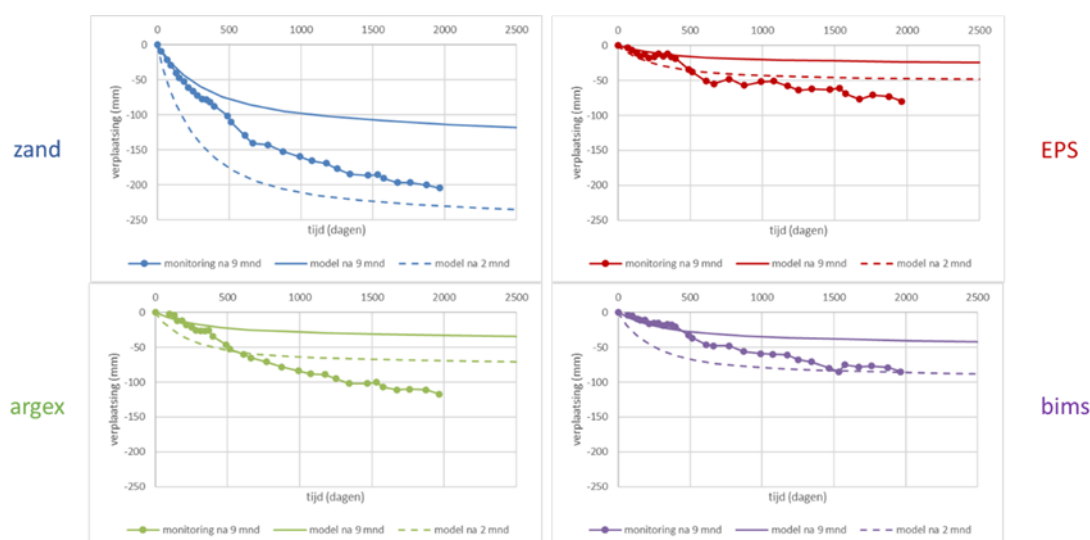
De bevindingen zijn als volgt:

- De in situ compactiebijdrage aan bodemdaling van individuele bodemlagen kan niet goed worden bepaald uit de lab-gemeten isotachenparameters en gedetailleerde karakterisatie van in situ grond- en waterspanningen. De redenen daarvoor zijn tweeledig:
 - 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.
- 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 uitgangscondities die slechts met een zeer beperkte nauwkeurigheid kunnen worden bepaald.

2.3 Evaluatie isotachenmodel voor restzettingsprognose (D3C)

De bevindingen zijn verkregen uit een casus studie uit 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 1). De zettingstrends lijken er ook op te duiden dat de onderschatting (in centimeters) verder zal toenemen naar de toekomst.



Figuur 1 Gemeten (symbolen) en de oorspronkelijke restzettingsprognose (continue lijn) voor de vier proefvakken in Kamerik.

De ontwerpberekeningen zijn gedaan met het Koppejan samendrukkingsmodel dat door Deltares en diverse andere partijen niet meer wordt gebruikt en dat ook niet geschikt is voor bredere bodemdalingstoepassingen. 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 – d.w.z. 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.
- 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 2.1)

2.4 Overzicht

De deelstudies hebben onafhankelijk van elkaar informatie opgeleverd over beperkingen in de voorspellende capaciteiten/waarde van het isotachenmodel voor bodemdalingstoepassingen. De hoofdbevindingen zijn samengevat in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Beknopt overzicht van gevonden beperkingen in het voorspellend capaciteiten van het isotachenmodel in de drie deelstudies en mogelijke verklaringen.

Deelstudie	Beperking modelberekende compactiesnelheid	Mogelijke verklaring
Lab- & literatuur	(a) Te laag tov metingen	(a) Metingen/isotachen verstoord door ontlasting (o.a. door monstername)
	(b) Te hoog tov metingen	(b) Niet constante afstand tussen isotachen
Bodemdalingsmonitoringslocaties (in situ compactie)	Regelmatig te hoog tov metingen, met name voor veen. Zeer grote bandbreedte/onzekerheid.	Preconsolidatiespanning in lab te laag en/of afname isotacheninterval met toenemende compactie (eindisotache concept)
Restzettingen Kamerik	Te laag tov metingen	Isotachen verstoord door ontlasting ontgraving

De tabel toont dat een aantal beperkingen die zijn gevonden in de deelstudies, en de mogelijke verklaringen daarvoor, op elkaar aansluiten. Zo is in de laboratoriumproeven en in de literatuurstudie gevonden dat ontlasten een significant hogere reksnelheid geeft, of kan geven, dan berekende reksnelheden. Dit effect lijkt ook aanwezig in de veldmetingen in Kamerik en wijst daarom mogelijk op dezelfde tekortkoming van het isotachenmodel. De literatuurstudie geeft daarnaast aan dat de reksnelheid bij constante spanning sneller afneemt dan de gebruikte implementatie van het isotachenmodel weergeeft. Dit biedt een

mogelijke verklaring voor de bevinding dat de in situ reksnelheid (met name van veen) op een aantal bodemdalingsmonitoringslocaties aanzienlijk lager is dan met het isotachenmodel wordt berekend.

Ondanks deze samenhang wordt geconcludeerd dat de lage kruipreksnelheden die centraal staan in bodemdalingsvraagstukken onvoldoende nauwkeurig zijn te voorspellen met de huidige implementatie van het isotachenmodel. Het kruipgedrag van klei en veen is complex en moeilijk grijpbaar. Aanpassing van het isotachenmodel (en toename van de complexiteit ervan) biedt vooralsnog geen oplossing om de nauwkeurigheid van bodemdalingsvoorspellingen te verhogen.

3 Implicaties voor gebruik van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen

In dit hoofdstuk wordt kort, puntsgewijs ingegaan op de implicaties van de bevindingen voor gebruik van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen. Daarin is onderscheid gemaakt tussen enerzijds toepassing in grootschalige, lange-termijn bodemalingsprognose (paragraaf 3.1) en anderzijds meer lokale toepassing voor vraagstukken rond maatregel-effect relaties (paragraaf 3.2).

3.1 Implicaties voor regionale of nationale lange-termijn bodemdalingsprognose

- Het isotachenmodel biedt nog steeds de beste basis om de compactiebijdrage aan regionale of nationale lange-termijn bodemdaling te voorspellen. De uitgevoerde studies hebben vooral meer 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 preconsolidatiespanning (of OCR) is een sterk bepalende parameter en kan het best worden toegekend op basis van onafhankelijke schattingen/metingen van de compactiebijdrage aan maaiveld daling. Een methodiek daarvoor is ontwikkeld en gedemonstreerd in het deelproject '*Parametrisatie van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen op basis van InSAR*' van RDBGH project 42. Voor situaties waarin ook veenoxidatie bijdraagt aan bodemdaling is daarvoor een scheiding van de bijdrage van compactie aan maaiveld daling nodig. Dit is vooralsnog een grote uitdaging voor het landelijk gebied, met name in de veenweiden. Het bodemdalingsmeetnetwerk en het dynamisch hoogtemodel (DDEM) dat is opgezet voor het Groene Hart in project 44 gaat hiervoor van grote waarde zijn. Preconsolidatiespanningswaarden verkregen uit laboratoriumproeven worden met deze werkwijze buiten beschouwing gelaten. Het is wenselijk om de parametrisatie te doen met een zo hoog mogelijke schatting van de bodemdaling door compactie. Dit levert de laagst mogelijke waarde voor OCR, en zorgt daarmee voor een maximale gevoeligheid voor (kleine) belastingsveranderingen.
- Er is geen garantie dat deze parametrisatie het effect van kleine belastingen zoals peil-/grondwaterstandsverlagingen (indexatie) lokaal of in gebiedsdelen niet alsnog onderschat.

3.2 Implicaties 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 ook in Nederland wordt gebruikt, biedt het isotachenmodel in principe een kader om de reductie van de compactiesnelheid te voorspellen⁴. In hoeverre zo'n prognose reële effectschattingen

⁴ Kooi en Erkens (2020) Modelling subsidence due to Holocene soft-sediment deformation in the Netherlands under dynamic water table conditions. Proc. IAHS, 382, 493–498, 2020
<https://doi.org/10.5194/piahs-382-493-2020>

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 is met name het geval voor ophogingen die vooraf worden gegaan door ontgraving/ontlasting van de bodem. Het is daarom wenselijk om tot een verbetering van de huidige werkwijze te komen. Daarvoor zien wij twee sporen: modelontwikkeling en uitbreiding van de ervaringsdatabase. De monitoring die is opgezet in RDBGH project 10 'Monitoring proefvakken' kan hier een belangrijke bijdrage aan leveren.
- Uitgebreide geotechnische karakterisatie leidt niet vanzelfsprekend tot nauwkeurige bodemdalings- of zettingsprognoses. Combinatie met goed gedocumenteerde maatregel-effect metingen is essentieel om meer grip te krijgen en nauwkeuriger te kunnen voorspellen.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl