

Toetsing isotachenmodel met gegevens van bodemdalingsmonitoringsites

Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groene Hart, project 42

Toetsing isotachenmodel met gegevens van bodemdalingsmonitoringsites
Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groene Hart, project 42

Auteur(s)
Henk Kooi



Toetsing isotachenmodel met gegevens van bodemdalingsmonitoringsites

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-0006
Pagina's	25
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Henk Kooi	

Samenvatting

Dit rapport doet verslag van een deelstudie die is uitgevoerd in project 42 van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart (RDBGH). Project 42 richt zich op verbetering van het modelinstrumentarium voor bodemdalingsberekeningen. In deze deelstudie zijn monitoringsdata van zes monitoringslocaties, die zijn ingericht in project 44 en project 10 van de RDBGH, gebruikt om beter inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van het compactiemodel dat wordt gebruikt in het modelinstrumentarium.

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 maaiveld daling. 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 geen sprake 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 gemodelleerd. Daarnaast is het isotachenmodel dat wordt gebruikt niet gevalideerd voor deze situaties met kleine belastingen.

Om meer zicht te krijgen op de toepasbaarheid van het isotachenmodel voor deze situaties is een analyse gedaan voor een zestal bodemdalingsmonitoringslocaties van de RDBGH. Bij de realisatie van de monitoringslocaties 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 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/precisie), en er is getoetst of deze schattingen realistisch zijn door ze te vergelijken met de gemeten bodemdalingssnelheid op deze locaties (validiteit).

De resultaten laten zien dat de in situ compactiebijdrage aan bodemdaling van individuele bodemlagen niet goed kan worden bepaald met isotachenparameters uit laboratoriumproeven en gedetailleerde karakterisatie van in situ grond- en waterspanningen. De onzekerheid van de bepaling bedraagt orde van grootte: of de kruipreksnelheid van een bodemlaag verwaarloosbaar klein is of 2 mm/jaar/m, of ergens ligt tussen een fractie van een mm/jaar/m en 10 mm/jaar/m, maakt vanzelfsprekend veel uit in een bodemdalingsprognose, vooral waar het slappe lagenpakket relatief dik is. Daarnaast laat de analyse zien dat het isotachenmodel in een aantal gevallen onrealistisch hoge kruipreksnelheden geeft die niet passen bij de gemeten bodemdaling. Dit duidt op invaliditeit. Dit is met name het geval voor veen, en geeft aan dat het isotachenmodel niet valide is voor bepaling van kruipreksnelheden in het overgeconsolideerde bereik (relatief hoge OCR).

Deze bevindingen hebben ook consequenties voor de prognose van de bodemdaling(sverandering) die wordt veroorzaakt door ingrepen met een kleine belasting. De prognose hiervan is gevoelig voor uitgangskondities. Onzekerheid over de uitgangskondities en mogelijke invaliditeit van het model voor die condities werken door in de prognose.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Regio Deal Bodemdaling Groene Hart project 42	7
1.2	Dit deelonderzoek	7
1.3	Leeswijzer	8
2	Toelichting isotachenmodel en parameters	9
2.1	Rekken en spanningen	9
2.2	Toestandsdiagram en parameters	10
3	Bodemdalingsmonitoringslocaties	12
4	Methode	13
5	Resultaten	14
5.1	Bleskensgraaf	14
5.2	Berkenwoude	15
5.3	Hazerswoude	16
5.4	Cabauw	17
5.5	Gouda	18
5.6	Proefvaklocatie Reeuwijk	19
6	Discussie en conclusies	21
6.1	Onzekerheid in kruipreksnelheid	21
6.2	Validiteit: toetsing aan gemeten maaiveldddaling	22
6.3	Gevolgen voor de bruikbaarheid van het isotachenmodel	22
6.4	Integratie met ander RDBGH onderzoek naar het isotachenmodel	23

1 Inleiding

1.1 Regio Deal Bodemdaling Groene Hart project 42

Het werk dat wordt gepresenteerd in dit rapport is uitgevoerd in het kader van het onderzoeksprogramma Regio Deal Bodemdaling Groene Hart (RDBGH) project 42: *Het voorspellen van bodemdaling en een nieuw ondergrondmodel van het Groene Hart*. Project 42 richt zich op het modelinstrumentarium voor bodemdalingsberekeningen. Bij instrumentarium moet gedacht worden aan software en de benodigde input die wordt gebruikt voor het maken van bodemdalingsvoorspellingskaarten over grote gebieden voor beleidsontwikkeling (Groene Hart, provinciaal, nationaal), maar ook aan software en rekenconcepten voor meer specifieke, lokale toepassingen zoals het maken van lange termijn zettingsverwachtingen bij renovaties (met name ophogen) van wegen en het bouwrijp maken van terreinen voor nieuwbouw. Praktische toepassingen van het instrumentarium betreffen dus vrijwel altijd voorspellingen (toekomstverwachtingen). Het onderzoek in project 42 richt zich specifiek op vragen over de kwaliteit van de gebruikte rekenmodellen voor bodemdaling. Het doel daarbij is tweeledig:

1. Meer inzicht verschaffen in de adequaatheid/beperkingen van de rekenmodellen;
2. Waar mogelijk de modellen of het gebruik ervan te verbeteren.

In project 42 wordt aandacht geschonken aan verbetering van het geologisch model (GeoTOP) voor de ondergrond van het Groene Hart, aan verbetering van procesmodellen zoals voor bodembeweging door krimp en zwel van klei en bodemdaling door oxidatie van veen, en aan parametrisatie en toetsing van het isotachenmodel (voor compactieberekeningen).

1.2 Dit deelonderzoek

Compactiebijdrage aan bodemdaling en het isotachenmodel

Dit deelonderzoek richt zich op parametrisatie van het isotachenmodel in het bodemdalingsinstrumentarium. Met compactie wordt de verdichting van het korrelskelet van het bodemmateriaal (veen, klei, leem, zand) bedoeld¹. Dit 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 aarden banen (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 daling waarbij er helemaal 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

¹ Compactie kan worden gezien als synoniem van samendrukking, een term die in de geotechniek gangbaar is. Compactie en het isotachenmodel beschrijft de verdichting van bodemmateriaal dat plaatsvindt in de (permanent) verzadigde ondergrond. Verdichting boven het freatisch niveau wordt aangeduid met de term krimp en vraagt om een andere rekenwijze.

worden gemodelleerd. Tegelijkertijd is het isotachenmodel zoals dat wordt toegepast, niet gevalideerd voor deze situaties.

Toetsing met gegevens van bodemdalingsmonitoringslocaties

Voor diverse bodemdalingsmonitoringslocaties van de Regio Deal (project 44 en project 10) is/wordt de ondergrond uitgebreid gekarakteriseerd. Dit omvat de bodemopbouw, volumiek grondgewicht en grondwaterpeilen en waterspanningen. Bovendien zijn voor diverse klei- en veenmonsters isotachenparameters en de preconsolidatiespanning bepaald in laboratoriumproeven (K0-CRS proeven). In de voorliggende studie is voor deze monsters en met deze gegevens de kruipreksnelheid bepaald volgens het isotachenmodel. Deze kruipreksnelheden zouden dus de 'actuele situatie' op deze locaties weerspiegelen; voor de proefvaklocaties voorafgaand aan de renovatie. Er is onderzocht hoe nauwkeurig de kruipreksnelheid kan worden bepaald met het isotachenmodel, en er is getoetst of deze schattingen realistisch zijn. Dit levert een antwoord op de vraag of met gedetailleerde veld- en laboratoriummetingen de actuele bodemdaling door compactie redelijkerwijs kan worden bepaald. Wanneer de schattingen onrealistisch zijn, levert de analyse een indicatie dat het isotachenmodel in de huidige vorm niet valide is voor de berekening van kruipreksnelheden voor geringe of afwezige belasting.

1.3 Leeswijzer

De verdere inhoud van dit rapport is als volgt.

- Hoofdstuk 2 geeft een (uitgebreidere) beschrijving van het isotachenmodel en introduceert de modelparameters.
- Hoofdstuk 3 introduceert de gebruikte bodemdalingsmonitoringslocaties.
- Hoofdstuk 4 beschrijft de methode van analyse.
- Hoofdstuk 5 presenteert de resultaten in de vorm van grafieken en een tabel.
- In hoofdstuk 6 wordt ten slotte bediscussieerd wat de toetsresultaten zeggen over de validiteit en de bruikbaarheid van het isotachenmodel voor bodemdalingstoepassingen.

2 Toelichting isotachenmodel en parameters

In dit hoofdstuk worden twee implementaties van het isotachenmodel toegelicht die zijn opgenomen in geotechnische en bodemdalingsapplicaties in Nederland:

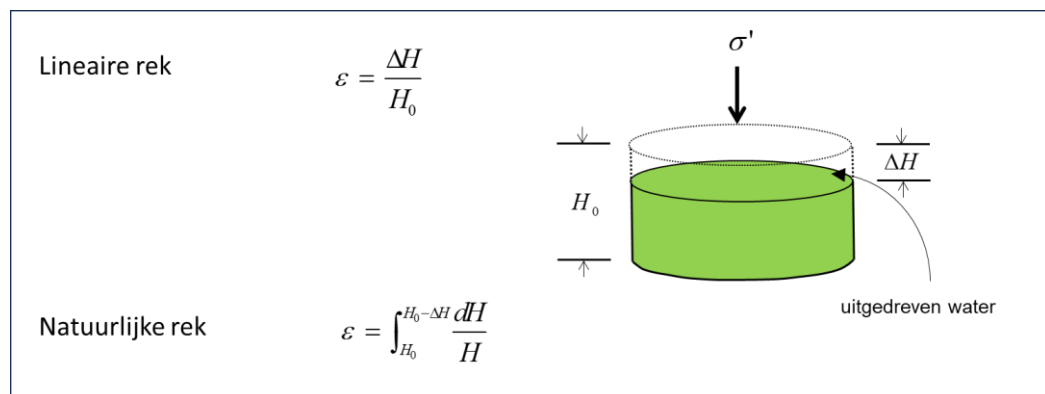
- abc-model (a, b, c parameters)
- Bjerrum-model (RR, CR, $C\alpha$ parameters)

Het verschil tussen deze implementaties betreft in hoofdzaak de rekdefinitie die wordt gebruikt.

2.1 Rekken en spanningen

Lineaire en natuurlijke rek

Net als in andere geotechnische verticale samendrukkingsmodellen wordt de mate van samendrukking (compactie) gekwantificeerd met de dimensieloze grootheid rek (Engels: strain). In de Nederlandse geotechnische adviespraktijk worden twee rekdefinities gebruikt, lineaire en natuurlijke rek (Figuur 2.1). Lineaire rek relateert de hoogte verandering aan de oorspronkelijke hoogte en varieert (wiskundig) tussen 0 en 1. Natuurlijke rek varieert tussen 0 en ∞ , omdat elke incrementele bijdrage aan de natuurlijke rek niet naar de oorspronkelijke monsterhoogte H_0 refereert, maar naar de momentane hoogte H die door de samendrukking afneemt.



Figuur 2.1 Twee manieren om rek te kwantificeren. Lineaire rek wordt gebruikt in het Bjerrum isotachenmodel; natuurlijke rek in het abc-isotachenmodel.

Elastische rek en inelastische of kruiprek

De totale rek in het isotachenmodel bestaat uit de som van twee delen, een elastische rek en een inelastische rek. De elastische rek is omkeerbaar (reversibel), de inelastische rek is permanent (irreversibel).

De elastische rek is gekoppeld aan verandering van de effectieve druk (wordt hieronder toegelicht). De inelastische rek volgt in het isotachenmodel uit de *kruipreksnelheid* en de tijdsduur waarvoor die snelheid van toepassing is. De kruipreksnelheid is afhankelijk van de grootte van de effectieve druk en van de totale rek, dit is de som elastische en kruiprek.

Effectieve druk

De spanningsvariabele in het isotachenmodel is de (verticale) effectieve druk; ook wel aangeduid met de naam verticale korrelspanning. De effectieve druk is het verschil tussen de verticale grondspanning en de poriedruk (druk van het grondwater).

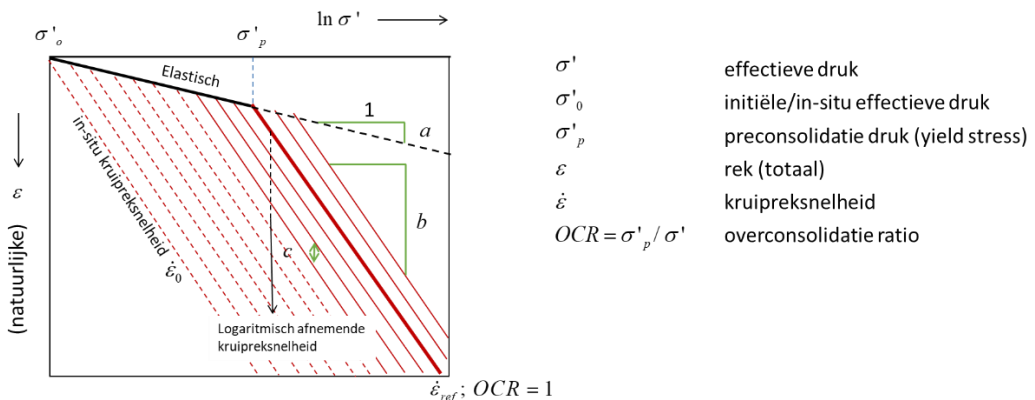
2.2 Toestandsdiagram en parameters

De essentie van het isotachenmodel kan in beeld gebracht worden met een toestandsdiagram. Figuur 2.2 toont het diagram voor het model op basis van natuurlijke rek. Punten in het diagram vertegenwoordigen een combinatie van de effectieve druk en de totale rek. Bij elk punt hoort ook een kruipreksnelheid. De rode lijnen zijn *isotachen*: lijnen die punten met eenzelfde kruipreksnelheid met elkaar verbinden. Bij de getoonde gelijke afstand tussen de isotachen verandert de kruipreksnelheid logaritmisch; voor het getoonde abc-isotachenmodel met een factor $e \approx 2,72$. Naar beneden en naar links neemt de kruipreksnelheid (sterk) af. De dikke rode lijn geeft de referentie isotache weer. Deze wordt in het laboratorium bepaald op basis van een gestandaardiseerde methodiek (IL (incremental loading) proeven; CRS (constant rate of strain) proeven). Hoewel verschillende definities van referentie isotache mogelijk zijn, wordt modelmatig de referentie isotache gedefinieerd als de zakkingslijn die na 1 dag in een standaard laboratorium wordt bereikt. Aan de referentie isotache is de preconsolidatiespanning gekoppeld. De isotachen zijn ook iso-OCR lijnen: lijnen van gelijke overconsolidatie ratio. De referentie isotache correspondeert met $OCR = 1$.

De samendrukkingseigenschappen van het (in-situ) bodemmateriaal wordt met het abc-isotachenmodel vastgelegd met drie samendrukkingsparameters a , b , c en OCR_0 . De samendrukkingsparameters zijn gevisualiseerd in het toestandsdiagram (Figuur 2.2). De kruipreksnelheid (dag^{-1}) volgt uit:

$$\dot{\varepsilon} = c \times OCR^{\frac{c}{b-a}} \quad (1)$$

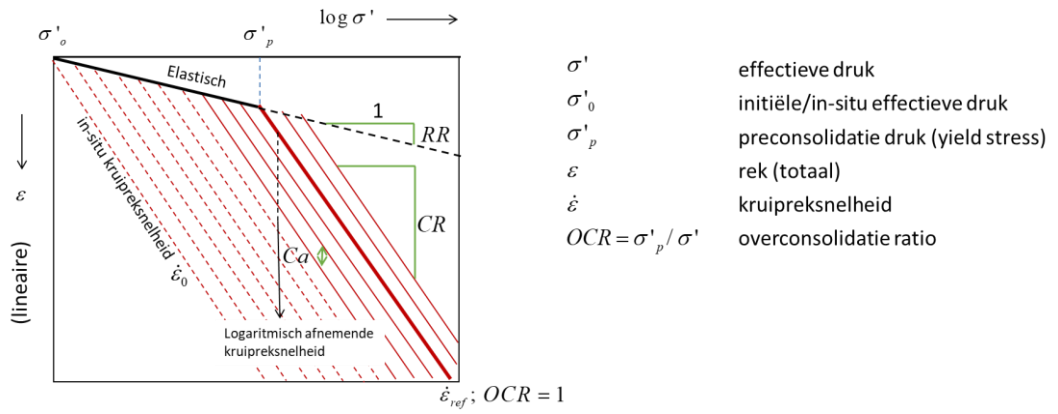
Voor de in-situ reksnelheid moet dan OCR_0 worden gebruikt.



Figuur 2.2 Toestandsdiagram voor het isotachenmodel op basis van natuurlijke rek. Voor toelichting zie hoofdstekst.

Figuur 2.3 geeft het diagram voor het isotachenmodel op basis van lineaire rek, in de Nederlandse context ook wel het NEN-Bjerrum model genoemd. De verschillen ten opzichte van het abc-model zijn het gebruik van lineaire rek en van een logaritme op 10-log basis in plaats van de natuurlijke logaritme. De kruipreksnelheid (dag^{-1}) volgt o.a. uit:

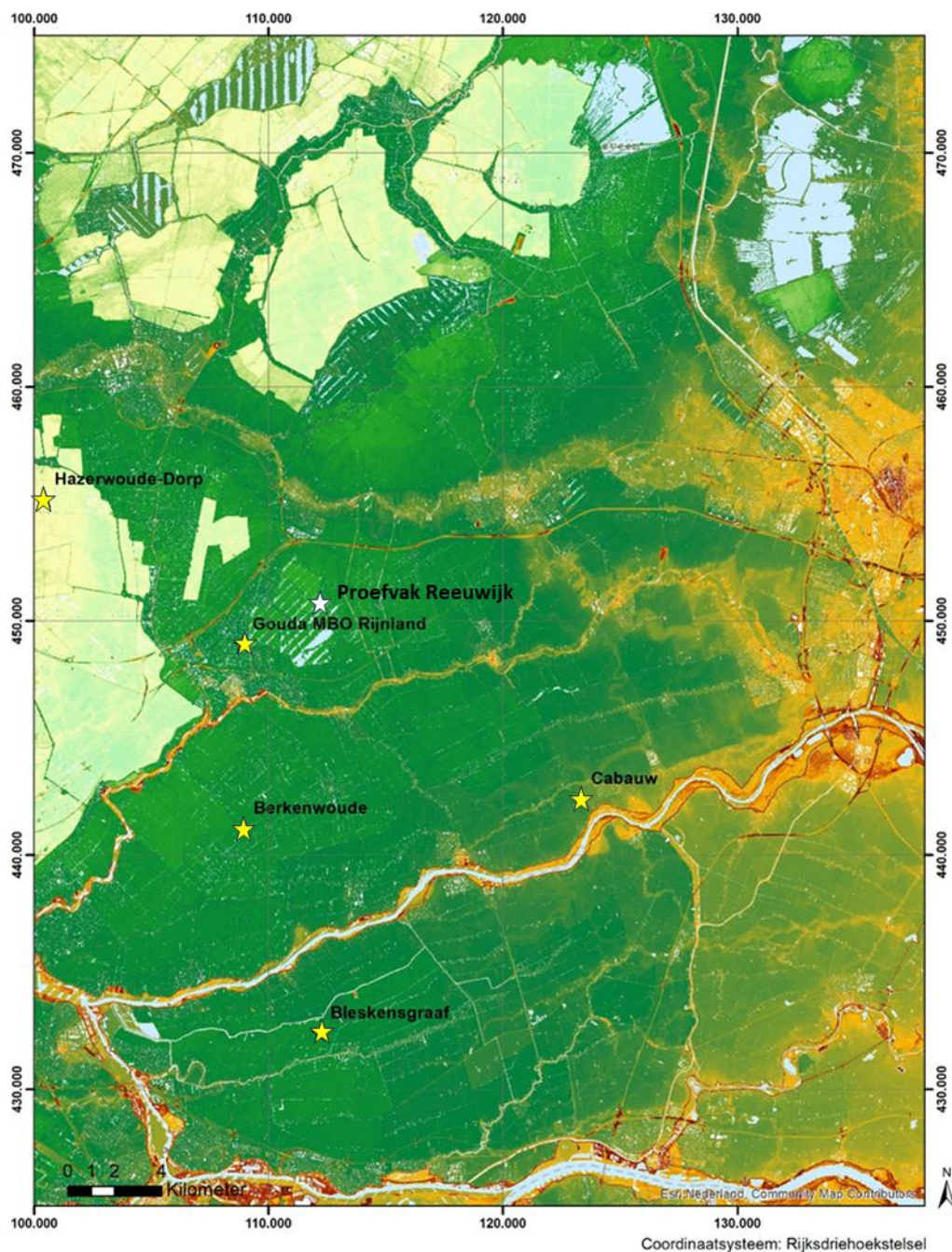
$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_a}{\ln(10)} \times OCR^{\frac{C_a}{CR-RR}} \quad (2)$$



Figuur 2.3 Toestandsdiagram voor het isotachenmodel op basis van lineaire rek. Voor toelichting zie hoofdstekst.

3 Bodemdalingsmonitoringslocaties

Het onderzoek is gedaan voor zes locaties die zijn aangegeven in Figuur 3.1. Het betreft vijf monitoringslocaties van RDBGH project 44 en één proefvak van RDBGH project 10. Uitgebreide informatie over de monitoringslocaties is te vinden in deelrapporten van deze projecten.



Figuur 3.1 Onderzoeklocaties. Geel: monitoringslocaties van RDBGH project 44. Wit: Eén van de proefvakken van RDBGH project 10. De achtergrondkaart geeft maaiveldhoogte weer (AHN).

4 Methode

De aanpak die is gebruikt voor alle monitoringssites is als volgt. Met vergelijkingen (1) en (2) zijn schattingen gemaakt van de (in situ) kruipreksnelheid van de monsters waarvoor parameterwaarden beschikbaar zijn uit K0-CRS proeven. De schattingen zijn op verschillende manieren gemaakt. Allereerst met de 'originele' schatting van de in situ effectieve druk die is gebruikt voor de bepaling van de gerapporteerde preconsolidatiespanning. Deze effectieve druk staat niet expliciet vermeld in de K0-CRS rapportages, maar was wel beschikbaar. Deze originele schatting is gebaseerd op een grondwaterstand 0,5 m beneden maaiveld, een hydrostatisch waterspanningsprofiel, en een schatting van de verticale grondspanning. Een fout-schatting wordt niet standaard gemaakt of gerapporteerd.

Om een indruk te krijgen van de fout c.q. onzekerheid van de in situ kruipreksnelheid is aanvullend het volgende gedaan voor het *abc*-isotachenmodel:

1. Er is met gedetailleerde informatie van de monitoringslocaties een nieuwe schatting gemaakt van de kruipreksnelheid. Er is een hoge (maximale) en lage (minimale) schatting gemaakt van de effectieve druk σ'_0 voor de monsters. Dat is gedaan met de boorbeschrijving van TNO (opgenomen in de BRO), gedetailleerde bepalingen (per 0,5 m) van het (natte) volumiek gewicht, en het gemeten freatisch niveau en stijghoogte op de monitoringslocaties. Voor de locaties van de proefvakken is daarbij ook gebruik gemaakt van waterspanningsmetingen binnen het Holocene pakket.
2. Voor de hoge en lage schatting van σ'_0 is de bijbehorende preconsolidatiespanning σ'_p bepaald volgens de standaard werkwijze. Samen met σ'_0 levert dit een hoge en lage schatting van OCR.
3. Met de lage en hoge schatting van OCR is een lage en hoge schatting van de kruipreksnelheid bepaald (vergelijking 1). Fouten in de compressieparameters zijn buiten beschouwing gelaten.

Reksnelheid is uitgedrukt in de eenheid mm/jaar/m; een waarde 1 wil dan zeggen dat een laag van één meter dik met deze eigenschappen 1 mm per jaar bijdraagt aan bodemdaling.

Voor elke site, met uitzondering van de locatie Hazerswoude, is een schatting van de maaiveldalingsnelheid bepaald. Voor de locaties van project 44 zijn de schattingen gebaseerd op de extensometer metingen. Voor de locatie van proefvak Reeuwijk is de schatting gebaseerd op InSAR data van het naast de boring gelegen op te hogen wegdek. De maaiveldalingsnelheid geeft een bovenschatting van de bijdrage van compactie (som van alle bodemniveaus) in de bodemdaling omdat ook andere processen zoals veenoxidatie of krimp van klei of veen kunnen bijdragen aan de daling.

5 Resultaten

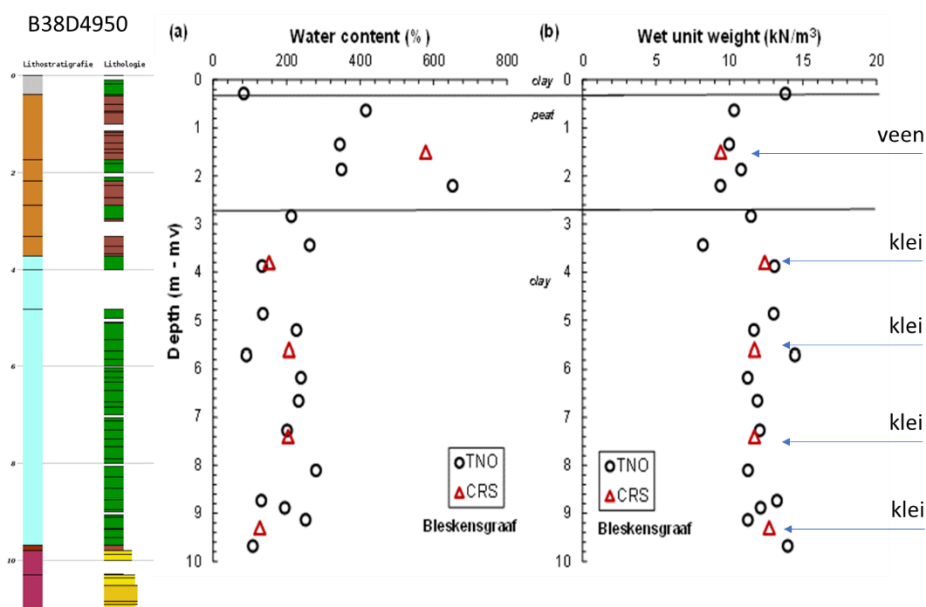
Per locatie worden de resultaten op de volgende pagina's grafisch weergegeven met twee figuren. De onderliggende data en berekeningen zijn beschikbaar in de vorm van spreadsheets, maar niet bijgevoegd.

Per locatie worden resultaten getoond op één pagina. De eerste figuur toont het boorprofiel, de bepalingen van watergehalte en nat volumegewicht. Ook zijn de monsters waarvoor K0-CRS proeven zijn gedaan aangegeven. De lithologie van de monsters (2 cm hoog) correspondeert met de bepaling die is gedaan voor de K0-CRS proef. Deze lithologie wijkt hier en daar af van de grovere lithologische lagen indelen die wordt getoond. De tweede figuur toont de schattingen van de kruipreksnelheid samen met de schatting van de maaiveldddaling. Ook zijn de bijbehorende schattingen van OCR weergegeven. De schattingen van de maaiveldddaling staan weergegeven in Tabel 1.

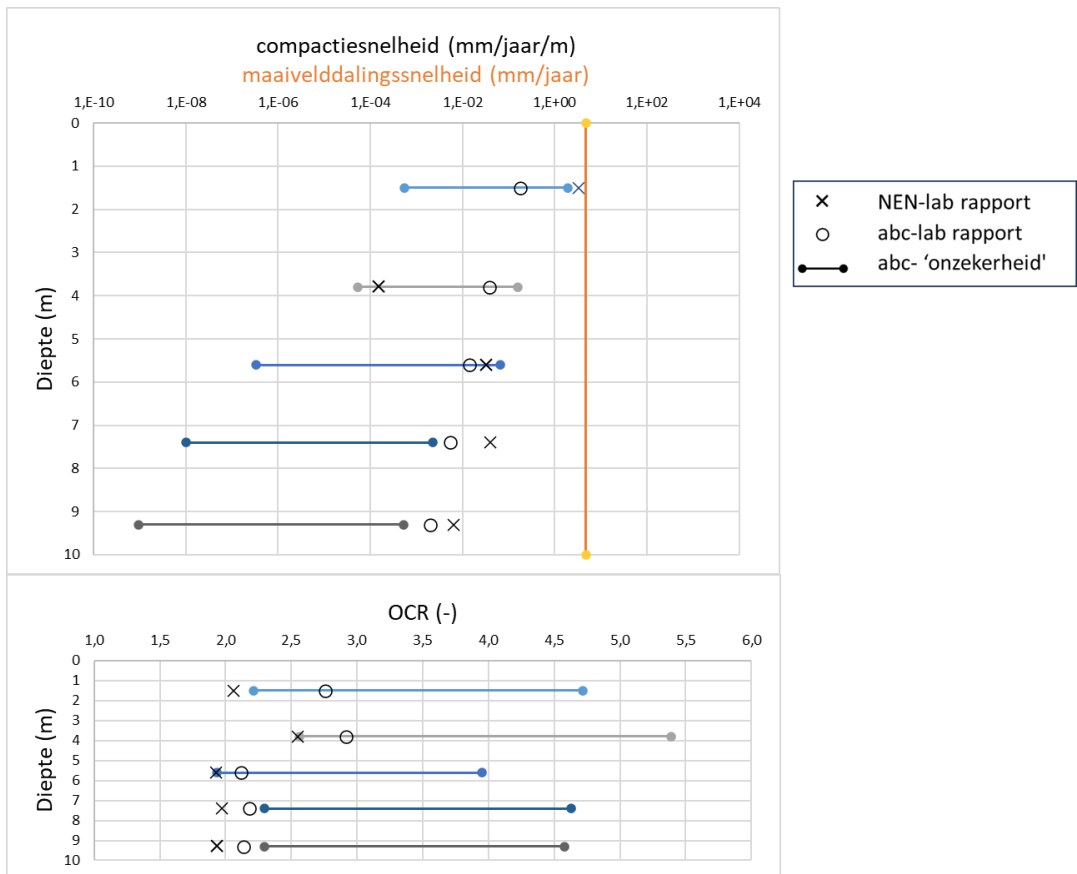
Tabel 1 Schattingen van de maaiveldddalingssnelheid voor de monitoringslocaties.

Locatie	Maaiveldddalingssnelheid (mm/jaar)	Type meting
Bleskensgraaf	4,8	extensometer
Berkenwoude	2,2	extensometer
Hazerswoude	-	extensometer
Cabauw	2,3	extensometer
Gouda	11	extensometer
Reeuwijk	15	InSAR

5.1 Bleskensgraaf



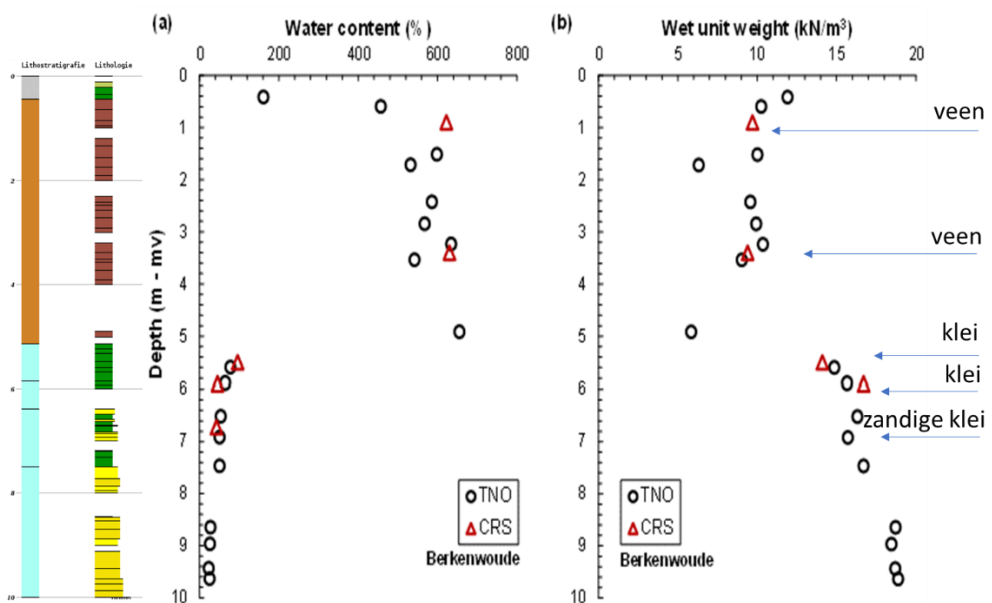
Figuur 5.1 Boorprofiel (Dinoloket) en bepalingen van watergehalten en (nat) volumegewicht. De bepalingen voor de vijf monsters waarop K0-CRS proeven zijn verricht zijn aangegeven met rode symbolen. Rechts is de lithologie vermeld.



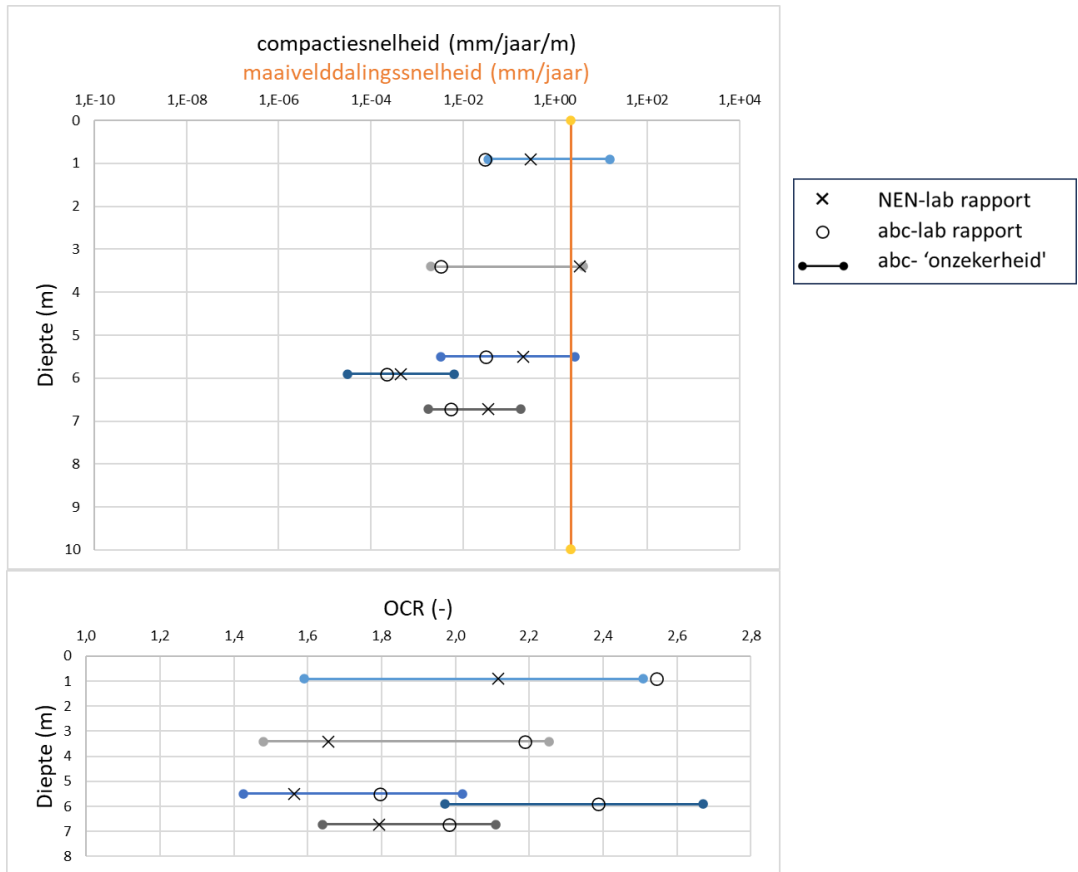
Figuur 5.2 Resultaten van schattingen van OCR en kruipreksnelheid (compactiesnelheid). Maaiveld dalingssnelheid op basis extensometer.

5.2 Berkenwoude

B38A2757

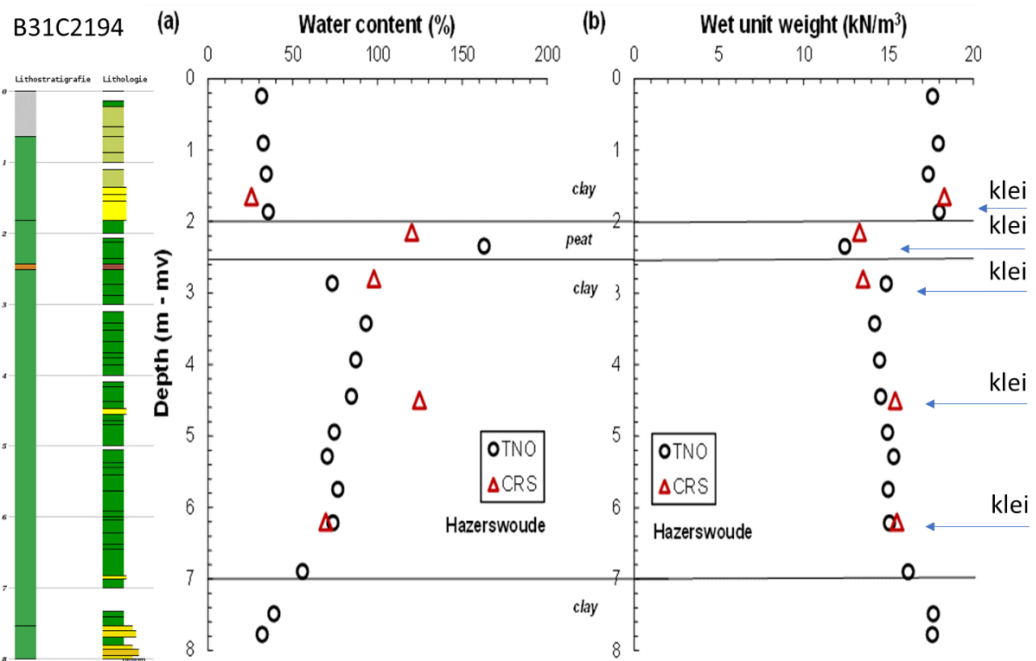


Figuur 5.3 Boorprofiel (Dinoloket) en bepalingen van watergehalten en (nat) volumegewicht. De bepalingen voor de vijf monsters waarop K0-CRS proeven zijn verricht zijn aangegeven met rode symbolen. Rechts is de lithologie vermeld.

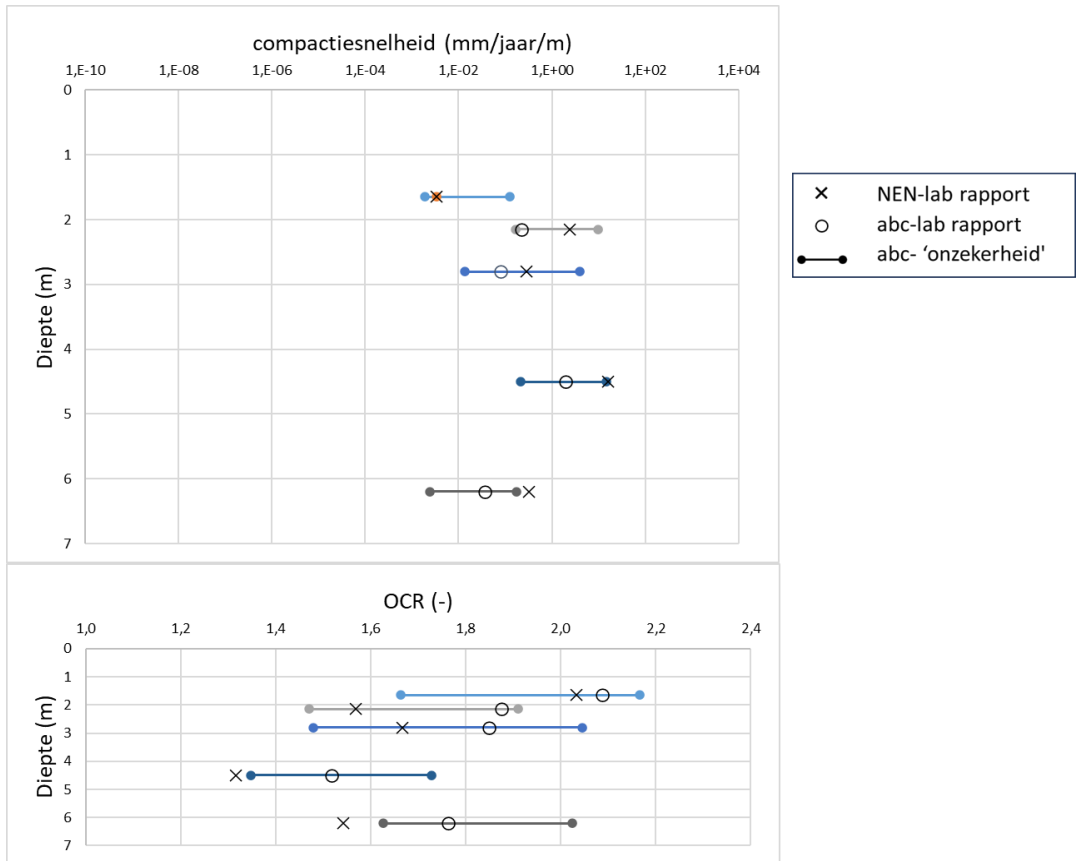


Figuur 5.4 Resultaten van schattingen van OCR en kruipreksnelheid (compactiesnelheid). Maaielddalingssnelheid op basis extensometer.

5.3 Hazerswoude

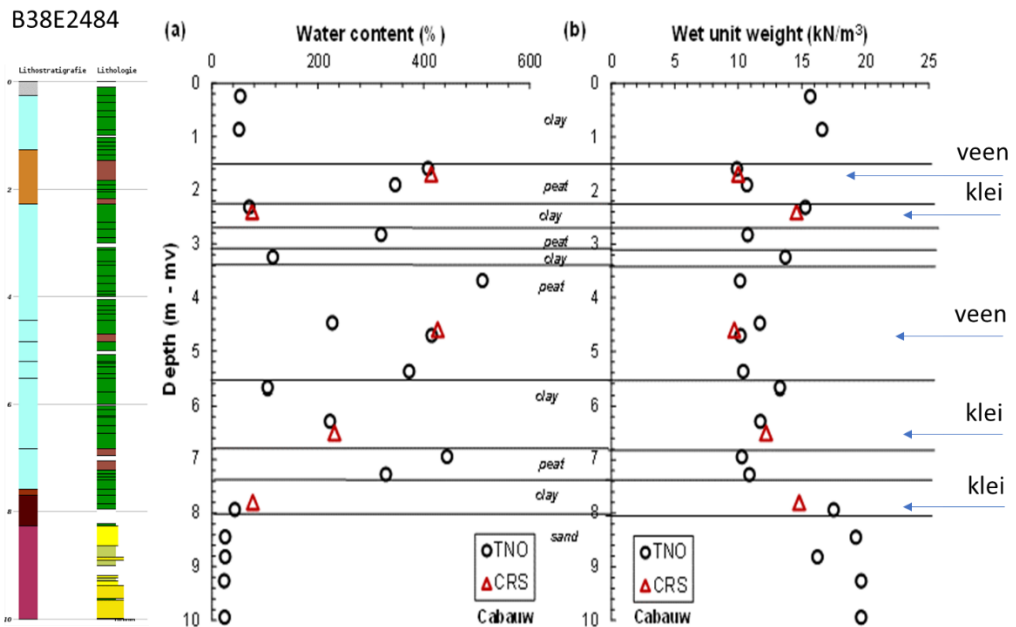


Figuur 5.5 Boorprofiel (Dinoloket) en bepalingen van watergehalten en (nat) volumegewicht. De bepalingen voor de vijf monsters waarop K0-CRS proeven zijn verricht zijn aangegeven met rode symbolen. Rechts is de lithologie vermeld.

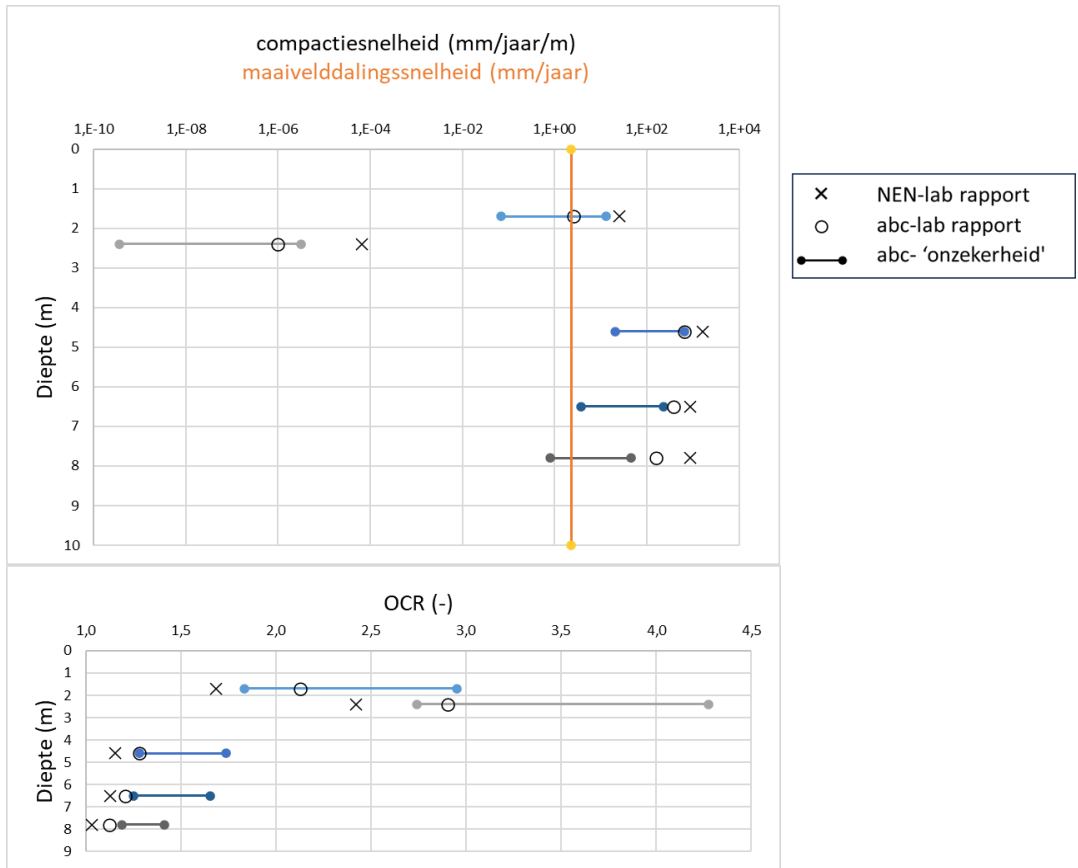


Figuur 5.6 Resultaten van schattingen van OCR en kruipreksnelheid (compactiesnelheid). Er is nog geen schatting van maaiveld daling. Naar verwachting zal deze niet groter zijn dan ca. 1 mm/jaar.

5.4 Cabauw

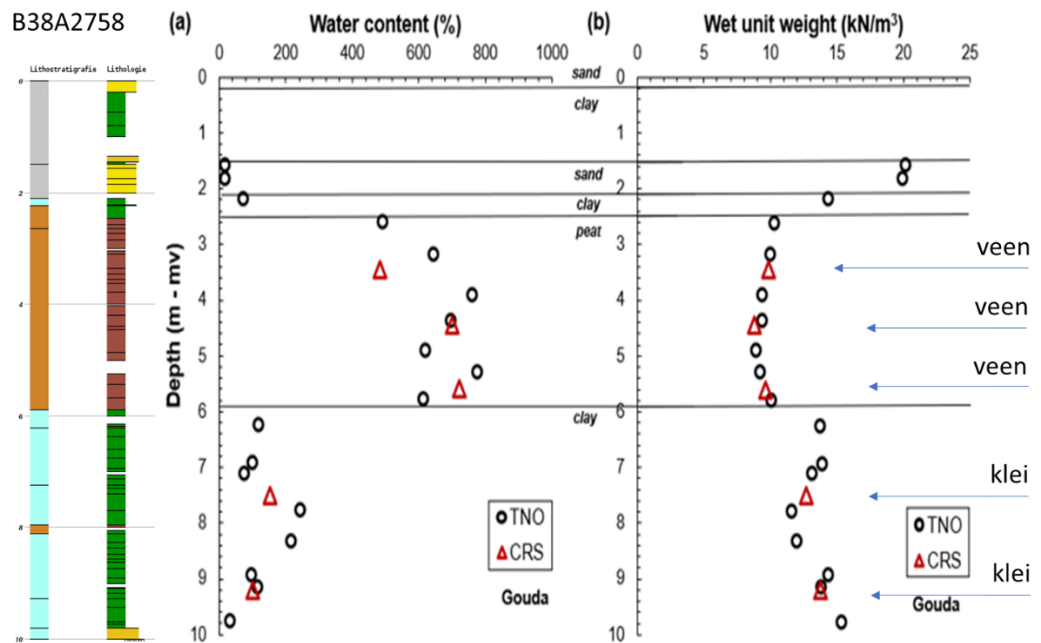


Figuur 5.7 Boorprofiel (Dinoloket) en bepalingen van watergehalten en (nat) volumegewicht. De bepalingen voor de vijf monsters waarop K0-CRS proeven zijn verricht zijn aangegeven met rode symbolen. Rechts is de lithologie vermeld.

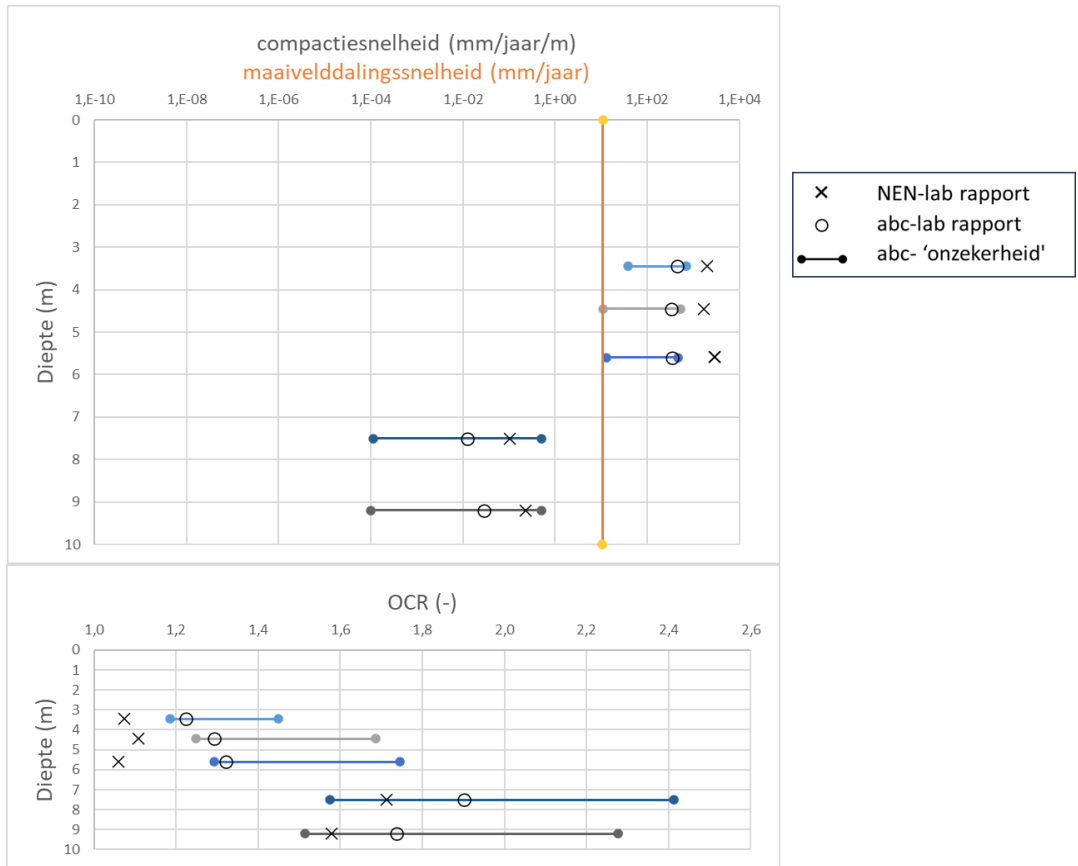


Figuur 5.8 Resultaten van schattingen van OCR en kruipreksnelheid (compactiesnelheid). Maaiveldalingssnelheid op basis extensometer.

5.5 Gouda

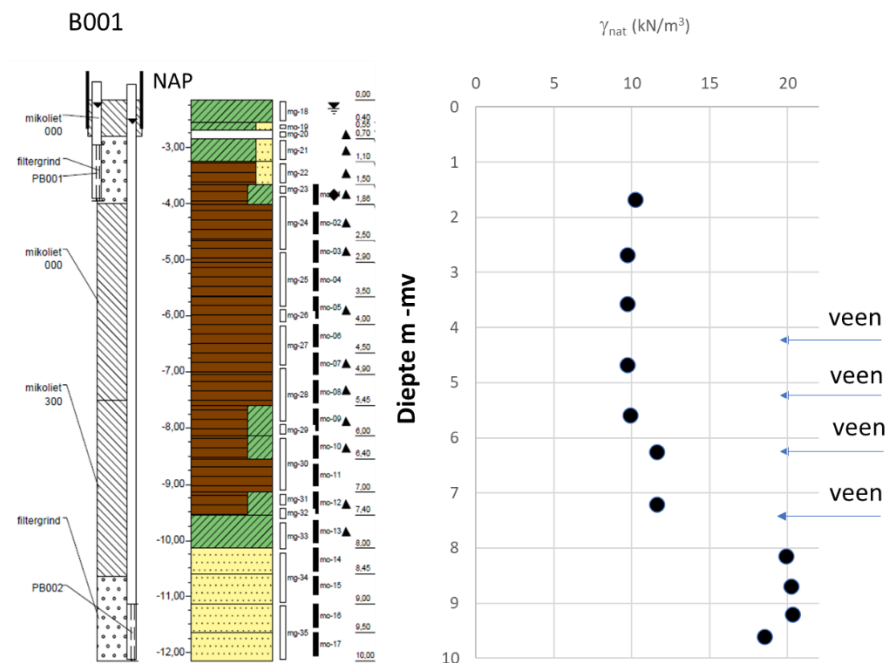


Figuur 5.9 Boorprofiel (Dinoloket) en bepalingen van watergehalten en (nat) volumegewicht. De bepalingen voor de vijf monsters waarop K0-CRS proeven zijn verricht zijn aangegeven met rode symbolen. Rechts is de lithologie vermeld.

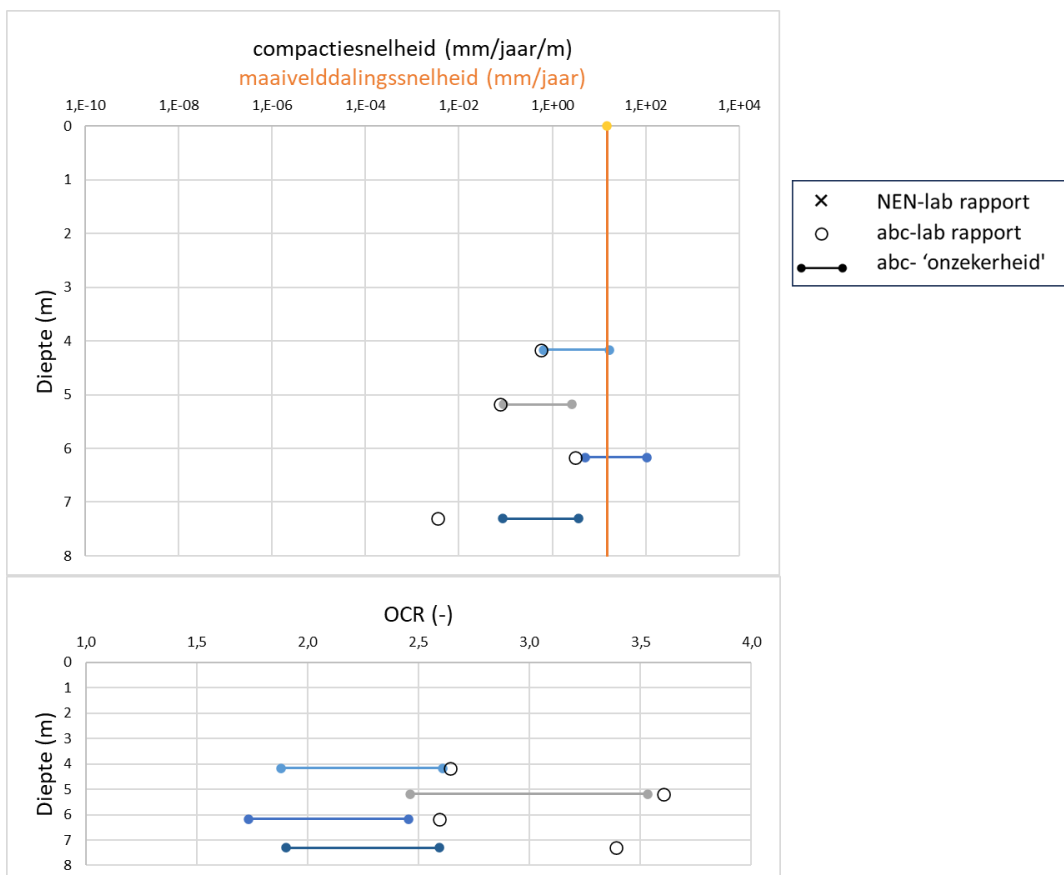


Figuur 5.10 Resultaten van schattingen van OCR en kruipreksnelheid (compactiesnelheid). Maaivelddalingsnelheid op basis extensometer.

5.6 Proefvaklocatie Reeuwijk



Figuur 5.11 Boorprofiel Leeksdijk en bepalingen van (nat) volumegewicht. De dieptes en lithologie van de vier monsters waarop K0-CRS proeven zijn verricht zijn recht aangegeven.



Figuur 5.12 Resultaten van schattingen van OCR en kruipreksnelheid (compactiesnelheid). Maaivelddalingssnelheid op basis InSAR voor het naastgelegen op te hogen wegdek.

6 Discussie en conclusies

In dit hoofdstuk worden aan de hand van de resultaten de volgende vragen bediscussieerd en beantwoord:

- Hoe nauwkeurig kan de kruipreksnelheid met het isotachenmodel worden geschat? M.a.w. wat is de onzekerheid van de kruipreksnelheid?
- Is het isotachenmodel binnen de onzekerheid valide?
- Wat betekent e.e.a. voor de bruikbaarheid van het isotachenmodel voor bodemdalingstoepassingen waarin sprake is van geringe belasting?

6.1 Onzekerheid in kruipreksnelheid

Wat opvalt in de resultaten is dat de OCR waarden en kruipreksnelheden die zijn bepaald met de 'originele' effectieve druk schatting die is gebruikt voor de K0-CRS lab-rapportages regelmatig buiten de bandbreedte van de nieuwe bepalingen vallen de zijn gedaan met gedetailleerdere informatie van de monitoringslocaties. Dit heeft waarschijnlijk hoofdzakelijk te maken met de sterke gevoeligheid voor, en minder nauwkeurige schattingen van het volumiek gewicht van de bodem en mogelijk ook deels door de nogal grove schatting van de waterspanning. In onderstaande bespreking wordt uitgegaan van de onzekerheid van de nieuwe schatting.

Relatieve onzekerheid. De resultaten laten zien dat de onzekerheid van de kruipreksnelheid die volgt uit de gebruikte methode een factor 50 tot soms meer dan 10.000 (4 ordes van grootte) bedraagt². De lage snelheden hebben dus een grote relatieve onzekerheid. De spreiding reflecteert de beperkte nauwkeurigheid waarmee OCR kan worden geschat en de zeer grote gevoeligheid van de kruipreksnelheid voor kleine verschillen van de OCR. Dit laatste houdt verband met het feit dat de exponent in vergelijkingen (1) en (2) zeer klein is, globaal tussen 0,04 en 0,1, en $OCR \geq 1$.

Absolute onzekerheid. De absolute onzekerheid van de geschatte kruipreksnelheid is veelal klein. Voor Bleskensgraaf geldt bijvoorbeeld voor het diepste monster (5), dat de relatieve onzekerheid bijna een factor van één miljoen bedraagt, wat correspondeert met een kruipreksnelheid tussen ca. 1×10^{-9} en 5×10^{-4} mm/jaar/m. De spreiding betreft dus waarden tussen vrijwel nul en extreem klein. De absolute onzekerheid is hier dus ook extreem klein: ca. 5×10^{-4} mm/jaar/m. In hoeverre doet die grote relatieve onzekerheid er dan toe voor bodemdalingsberekeningen? Het antwoord daarop is tweeledig:

- A. Zonder verdere belasting doet het er niet toe. De in situ bijdrage aan bodemdaling is en blijft ten slotte nihil tot extreem klein.
- B. Voor de bodemdalingsontwikkeling door verdere belasting doet het er wel toe. Voor de reksnelheid van 5×10^{-4} mm/jaar/m ($OCR = 2,3$ en $\sigma'_0 = 10$ à 20 kPa) levert een kleine belastingstoename al gauw een significante toename van de kruipreksnelheid en bodemdaling, terwijl voor de verwaarloosbare kruipreksnelheid van 1×10^{-9} mm/jaar/m ($OCR = 4,6$ bij dezelfde σ'_0) de toename van kruipreksnelheid en bodemdaling verwaarloosbaar of nihil is.

² Dit betreft in principe een lage schatting van de onzekerheid omdat alleen onzekerheid in de in situ effectieve druk in beschouwing is genomen in de analyse. Onzekerheid in de compressieparameterwaarden zullen de onzekerheid in principe vergroten.

Voor het ondiepste monster (1) op locatie Bleskensgraaf ligt de schatting van de kruipreksnelheid veel hoger: tussen ca. $5,5 \times 10^{-4}$ en 2,0 mm/jaar/m. In dat geval heeft de onzekerheid implicaties voor zowel de in situ daling als de reactie op belastingsveranderingen. De gevoeligheid daarvoor is ook groter omdat de effectieve druk en de preconsolidatiespanning meer dan twee maal kleiner zijn dan voor het diepe monster ($\sigma'_0 = 3,5$ à 8,5 kPa).

6.2 Validiteit: toetsing aan gemeten maaiveldaling

Voor vijf van de zes locaties was een bruikbare schatting van de maaiveldalingsnelheid beschikbaar. Daarmee is de volgende basale toetsing gedaan:

- Wanneer de met het isotachenmodel verkregen kruipreksnelheid voor een monster (voldoende) lager is dan de maaiveldsnelheid, dan is de kruipreksnelheid acceptabel/mogelijk, en is het onderliggende isotachenmodel valide in de zin dat het niet kan worden gefalsificeerd. Het resultaat wordt aangeduid als 'mogelijk'.
- Wanneer de met het isotachenmodel verkregen kruipreksnelheid hoger is dan de maaiveldsnelheid, dan is de kruipreksnelheid onrealistisch/onmogelijk, en is het onderliggende isotachenmodel niet valide. Het resultaat wordt aangeduid met de term 'te hoog'.
- Wanneer de met het isotachenmodel verkregen kruipreksnelheid gezien de onzekerheid zowel te hoog of te laag kan zijn, dan is het resultaat van de toetsing niet eenduidig. Het resultaat wordt met de term 'ambivalent' aangeduid.

Het resultaat van de toetsing is samengevat in Tabel 2. De monsternummering per locatie is van ondiep naar diep. Achter elk monster is de lithoklasse weergegeven (k=klei; v=veen; zk=zandige klei).

Tabel 2 Resultaten van toetsing reksnelheid aan gemeten maaiveldaling in drie klassen

	Bleskensgraaf	Berkenwoude	Cabauw	Gouda	Reeuwijk
1. mogelijk	1(v); 2(k); 3(k); 4(k); 5(k)	4(k); 5(zk)	2(k)	4(k); 5(k)	2(v); 4(v)
2. ambivalent		1(v); 2(v); 3(k)	1(v); 5(k)		1(v); 3(v)
3. te hoog			3(v); 4(k)	1(v); 2(v); 3(v)	

De tabel laat zien dat voor 12 monsters het resultaat 'mogelijk' is; voor zeven monsters het resultaat 'ambivalent', en voor vijf monsters het resultaat 'te hoog'. Vier van de vijf monsters met resultaat 'te hoog' betreffen veen. Dit betreft veen op de locaties Cabauw en Gouda. Ook in de klasse 'ambivalent' is lithoklasse veen dominant: vijf van de zeven. In de klasse 'mogelijk' is veen juist ondervertegenwoordigd: drie van de 12.

6.3 Gevolgen voor de bruikbaarheid van het isotachenmodel

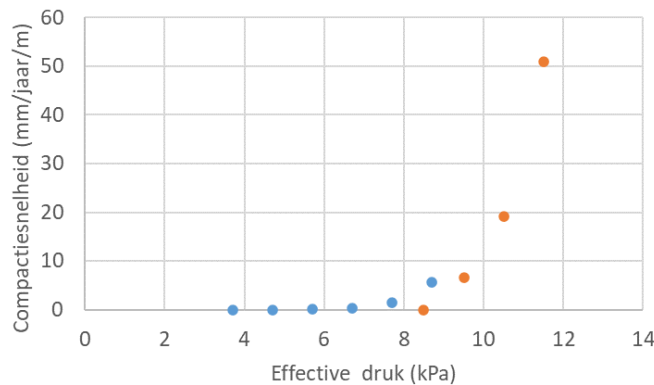
In situ bodemdaling

De resultaten illustreren dat de in situ compactiebijdrage aan bodemdaling van individuele bodemlagen niet goed kan worden bepaald aan de hand van isotachenparameters bepaald uit laboratoriumproeven en gedetailleerde karakterisatie van in situ grond- en waterspanningen. De onzekerheid van de bepaling is daarvoor te groot. Of de kruipreksnelheid van een bodemlaag verwaarloosbaar klein is of 2 mm/jaar/m, maakt

vanzelfsprekend veel uit in een bodemdalingsprognose, vooral waar het slappe lagenpakket relatief dik is. Daarnaast zijn er aanwijzingen dat het isotachenmodel niet valide is voor bepaling van kruipreksnelheden in het overgeconsolideerde bereik (relatief hoge OCR) en onrealistisch hoge kruipreksnelheden geeft. Dat laatste is met name het geval voor veen.

Impact van kleine belastingsveranderingen

In bodemalingstoepassingen is het gewenst om een betrouwbare en relatief nauwkeurige prognose te kunnen geven van de impact van kleine belastingsveranderingen zoals voor lichte ophogingen of veranderingen van de grondwaterstand. Uit de resultaten volgt dat ook hiervoor zo'n prognose veelal niet goed kan worden gemaakt met het isotachenmodel. De impact is zeer gevoelig voor de uitgangssituatie (in situ conditie). Deze uitgangssituatie kan slechts met een zeer beperkte nauwkeurigheid worden bepaald. Figuur 6.1 geeft een voorbeeld van deze grote gevoeligheid en onzekerheid voor het ondiepste monster op locatie Bleskensgraaf. De aanwijzingen dat het isotachenmodel waarschijnlijk niet valide is voor bepaling van kruipreksnelheden in het overgeconsolideerde bereik is hierin nog buiten beschouwing gelaten.



Figuur 6.1 Voorbeeld van de onzekerheid van de impact van een geringe belastingsverandering. Dit voorbeeld betreft het ondiepste monster voor de locatie Bleskensgraaf. De in situ effectieve druk voor dit monster ligt tussen de 3,7 kPa (blauwe symbolen) en 8,5 kPa (oranje symbolen). De grafiek toont de berekende toename van de compactiesnelheid bij stapsgewijze toename van de effectieve druk met 1 kPa. Dit komt overeen met een grondwaterstandsverlaging van 10 cm. Indien de lage in situ effectieve druk van toepassing is (blauw), dan zou een belasting van 5 kPa resulteren in een compactie toename van ca. 5,5 mm/jaar/m. Indien de hoge in situ effectieve druk van toepassing is (oranje), dan leidt een belasting van 3 kPa al tot een toename van meer dan 50 mm/jaar/m. De verwachting is dat de impact hier ergens tussen ligt, maar dus zeer onzeker is.

6.4 Integratie met ander RDBGH onderzoek naar het isotachenmodel

In RDBGH project 42 zijn naast het voorliggende onderzoek diverse andere studies gedaan naar het gebruik en toepasbaarheid van het isotachenmodel voor bodemdalingstoepassingen. In één project is de bruikbaarheid/validiteit van het isotachenmodel onderzocht met laboratoriumproeven en op basis van literatuuronderzoek³. In een tweede project is de bruikbaarheid van het isotachenmodel voor restzettingsvoorspelling onderzocht⁴. In een derde project is een methode ontwikkeld om de isotachenparameters in bodemdalingsmodellen te parametriseren met behulp van

³ Evaluation linear isotach model; laboratory study and literature review.

⁴ Casuonderzoek restzettingen; evaluatie werkwijzen en modelinstrumentarium.

radarsatellietmetingen van bodemdaling (InSAR)⁵. De resultaten van al deze studies zijn samengebracht in een overkoepelend integratierapport⁶.

⁵ Parametrisatie van het isotachenmodel in bodemdalingstoepassingen op basis van InSAR.

⁶ Toetsing isotachenmodel voor kleine belastingen – integratierapport.

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