



Maaiveld dynamiek door krimp-zwel en elastische vervormingen, case Rouveen

Guido Bakema, Pim Dik en Henk Kooi



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Maaiveld dynamiek door krimp-zwel en elastische vervormingen, case Rouveen

Guido Bakema¹, Pim Dik¹ en Henk Kooi²

1 Wageningen Environmental Research

2 Deltares

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en Deltares in het kader van de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart en mede ondersteund door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoeksthema 'KB 34 Circular and Climate Neutral Society'.

Wageningen Environmental Research
Wageningen, augustus 2022

Gereviewd door:

Marius Heinen, wetenschappelijk onderzoeker bodemfysica

Akkoord voor publicatie:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van Bodem, water en landgebruik

Rapport 3181

ISSN 1566-7197

Het onderzoek in de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart richt zich op de daling van het maaiveld ten opzichte van een hoogterefereentievak zoals het NAP, die in de loop van jaren tot decennia tot stand komt door veenoxidatie, rijping en compactie van bodemlagen in het pakket Holocene afzettingen. Over kortere perioden laten tijdreeksen van de hoogteverandering van het maaiveld en ondiepe bodemniveaus 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 1 decimeter. In dit onderzoek is een model ontwikkeld om de dynamiek van het maaiveld als gevolg van krimp/zwel en compactie/expansie te berekenen. De eerste modelopzet is getoetst op basis van data van de NOBV-site Rouveen.

In the Regiodeal Bodemdaling Groene Hart deals with the subsidence of ground level in relation to a fixed level such as NAP. This ground level has developed over decades because of processes in soft soil layers in the Holocene. However, over shorter periods, time series of changes in the height of ground level rarely show a simple downward trend. The height change is dynamic with periods of rise and fall, especially in areas with peat and/or clay near ground level, such as in the Groene Hart. In peat areas, this can involve movements of up to approximately 10 cm. In this study, a model was developed to calculate the dynamics of the ground level because of shrinkage/swelling and compaction/expansion. The first model design was tested using data from the NOBV site in Rouveen.

Trefwoorden: bodemdaling, maaiveldynamiek, zwellen en krimpen veen/klei

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/567949> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2022 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem.

In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Algemeen	11
1.2 Doelstelling	12
1.3 Aanpak	12
1.4 Leeswijzer	13
2 Maaiveldynamiek: processen en modelleringswijzen	15
2.1 Algemeen	15
2.2 Krimp en zwellen van klei en veen	15
2.2.1 Procesbeschrijving krimp en zwel	15
2.2.2 Modelleren krimp en zwel	17
2.3 Elastische vervorming	20
2.3.1 Procesbeschrijving elastische vervorming beneden het freatisch niveau	20
2.3.2 Beschouwing mogelijkheden geïntegreerde modellering met krimp-zwel	22
2.3.3 Modelleren elastische vervorming	23
3 Karakterisatie bodembewegingsdynamiek Rouveen	26
3.1 Locatie Rouveen	26
3.2 Analyse extensometer-data	26
3.3 Maaiveldbeweging en grondwaterstand	29
4 Simulatie bodemvocht en krimp/zwel	31
4.1 Algemeen	31
4.2 Bodemvocht	31
4.3 Krimp en zwel	34
4.4 Analyse processen krimp-zwel	35
5 Simulatie elastische vervorming	40
5.1 Methode 1: Met waterspanningen via SWAP en externe berekeningen in Excel	40
5.1.1 Parametrisatie	40
5.1.2 Resultaten	40
5.2 Methode 2: Poro-elastisch grondwatermodel	41
5.2.1 Schematisatie en parametrisatie	41
5.2.2 Runs	41
5.2.3 Resultaten	42
6 Bevindingen, discussie en vervolgstappen	45
6.1 Bevindingen	45
6.2 Discussie	45
6.3 Vervolgonderzoek	47
Literatuur	49
Bijlage 1 Basisgegevens	50
Bijlage 2 Gevoeligheidsanalyse	63

Verantwoording

Rapport: 3181

Projectnummer: 5200046819

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: wetenschappelijk onderzoeker bodemfysica

naam: Marius Heinen

datum: 31 maart 2022

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 27 mei 2022

Woord vooraf

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en Deltares in het kader van de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart en mede ondersteund door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'KB 34 Circular and Climate Neutral Society'. Het onderzoek dat wordt gepresenteerd in dit rapport maakt deel uit van project 42 van het onderzoeksprogramma Regio Deal Groen Hart Bodemdaling (RDGHB). Project 42 richt zich o.a. op het modelinstrumentarium voor bodemdalingstoepassingen. Dit onderzoek is een eerste aanzet om de maaiveldynamiek van de specifieke site Rouveen (uit NOBV Nationaal Onderzoek Broeikasgassen Veenweide) te modelleren. In het verdere vervolg van de Regiodeal zullen ook andere sites worden gemodelleerd en zal gewerkt worden aan een gebiedsdekkend model dat gebruikt kan worden voor een dynamisch hoogtemodel (D-DEM).

Samenvatting

'Bodemdaling' is zonder verdere specificatie een vrij vaag huis-tuin-en-keuken-begrip waar iedereen, afhankelijk van achtergrond en voorkennis, iets anders onder kan verstaan. Binnen de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart (RDBGH) gaat de aandacht met name uit naar daling van het maaiveld ten opzichte van een hoogterefereentievlak zoals het NAP, die in de loop van jaren tot decennia tot stand komt door veenoxidatie, rijping en compactie van bodemlagen in het Holocene pakket.

Over kortere perioden laten tijdreeksen van de hoogteverandering van het maaiveld en ondiepe bodemniveaus 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 1 decimeter per seizoen.

Voor praktische vraagstukken rond bodemdaling zijn deze dynamische maaiveldbewegingen in principe 'ruis'; het beperkt het zicht op structurele bodemdaling. Wanneer periodiek maaiveldhoogtemetingen worden gedaan, moet vele jaren worden gemeten om de bodemdaling betrouwbaar te kunnen kwantificeren. Gebrek aan kennis over het dynamische gedrag van maaiveldbeweging in landelijk gebied maakt het ook moeilijk om bodembeweging en bodemdaling af te leiden uit radarsatellietbeelden (InSAR-techniek, Interferometric Synthetic Aperture Radar). Juist door deze beperkingen is het belangrijk om het karakter en de oorzaken van de maaiveldynamiek beter te begrijpen en bij voorkeur ook te kunnen voorspellen voor locaties waar niet wordt gemeten. Wanneer maaiveldynamiek bijvoorbeeld voldoende nauwkeurig gebiedsdekkend kan worden geschat door goede kennis van de onderliggende processen en de belangrijkste sturende factoren, kunnen daarmee de belemmeringen voor gebruik van InSAR worden verminderd of weggenomen.

Het doel van dit onderzoek is om op basis van bestaande concepten en software een eerste 1D (verticaal profiel) modellering uit te voeren voor locaties waar zo veel mogelijk monitoringsdata voor bodembeweging en onderliggende bodembewegingsprocessen beschikbaar zijn en te bepalen in hoeverre deze concepten en modellering in staat zijn om waargenomen bodemdynamiek te verklaren. Verder is het doel om aan te geven wat de resultaten betekenen voor de ambitie om te komen tot een modelleringstool die gebiedsdekkende schattingen van maaiveldynamiek kan leveren (dus met name gericht op locaties waar niet of nauwelijks monitoringsdata beschikbaar zijn), op basis van beschikbare informatie over bodemopbouw en meteorologische en hydrologische datasets.

De focus in dit onderzoek ligt op de analyse en modellering van dynamische/reversibele processen. Bij deze analyse en modellering is veel inzicht verkregen in de processen door een visuele beoordeling van metingen en simulaties. In een vervolg is het uitvoeren van een uitgebreidere gevoeligheidsanalyse en geformaliseerde kalibratie een volgende aan te bevelen stap.

De permanente bodemdaling door irreversibele krimp en veenoxidatie zijn geen onderdeel van deze studie. Deze permanente maaiveldaling staat centraal in het NOBV (Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden) en zullen ook worden onderzocht in andere projectonderdelen van de RDGHB.

Voor de modellering is gekozen voor de proeflocatie Rouveen van Deltares; deze locatie is ook opgenomen in het NOBV. Rouveen ligt niet in het Groene Hart, maar ligt wel in veenweidegebied en heeft een relevante bodemopbouw voor deze studie. Voor de modellering van maaiveldynamiek veroorzaakt door krimp en zwel is gebruikgemaakt van SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant). Voor de modellering van maaiveldynamiek veroorzaakt door elastische dikteverandering van lagen beneden de grondwaterstand is gebruikgemaakt van Poro-elastische principes zoals worden gebruikt in de huidige geotechnische praktijk/software.

In dit onderzoek is getracht op basis van een tijdreeksanalyse en modelberekening voor de casus Rouveen het dynamische gedrag van het maaiveld beter te doorgronden. Het is een eerste vingeroefening geweest waarbij meer inzicht is verkregen, maar waar nadrukkelijk ook nog veel vragen open blijven staan. De

bevindingen zijn daarom sterk gevormd door de eerste ervaring met deze casus en dienen in het vervolg van de Regiodeal, waar mogelijk, te worden aangepast en verfijnd. De belangrijkste bevindingen zijn:

- Het maaiveld in Rouveen gaat tussen de 30-40 mm op en neer gedurende het jaar. De maaivelddynamiek kent een duidelijk onderscheid tussen die in de verzadigde en die in de onverzadigde zone. De dynamiek van de onverzadigde zone, hier bestaande uit klei en veen, heeft een sterk afgevlakt verloop, met name door het waarschijnlijk trage proces van zwellen en krimpen van klei dan wel veen. De verzadigde zone vertoont veel sterkere pieken en dalen en reageert snel op verandering van drukken. Ten slotte blijkt uit de meetgegevens dat meer dan 65% van de dynamiek plaatsvindt in de verzadigde zone.
- Er is voor het verzadigde deel een zeer duidelijke correlatie met de waterspanning/grondwaterstand zoals die is geregistreerd met peilbuizen. De reactie op veranderingen is in dat deel snel, met een vertraging tussen de twee dagen en twee weken en is voor zowel de op- als neergaande snelheid vrijwel gelijk. Het onverzadigde deel reageert veel trager op verandering van de waterspanning en hierbij is duidelijk te zien dat krimp sneller verloopt dan zwel.
- De krimp-zwelmodellering met SWAP overschat de dynamiek over korte tijdsperioden van dagen tot een week; over langere tijdsperioden worden de gemeten bewegingen redelijk gevolgd. De verzadigd-elastische modellering reproduceert de gemeten dynamiek vrij goed over korte en langere tijdsperioden wanneer de gemeten freatische grondwaterstand en de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket worden gebruikt als input voor de simulatie.
- Voor toepassing van InSAR is het met name belangrijk om te weten of en op welk moment er zich tussen opvolgende satellietpassages (periode in de orde van enkele dagen) grote verticale maaiveldhoogteveranderingen voordoen (> 1 cm). Kleine hoogteveranderingen zijn minder cruciaal; daarvoor is het wel nuttig om informatie te hebben over de richting van beweging: stijging of daling. De voorspellende waarde lijkt vrij goed voor het elastische deel. De voorspellende waarde van het krimp-zweldeel is nog te laag. Dat is volgens de verwachting, omdat het model in ontwikkeling is en voorziene noodzakelijke verbeteringen nog niet in het model zijn aangebracht.
- Om de voorspellende waarde van het model te vergroten en verder te toetsen, zal de zwelrelatie van SWAP moeten worden verbeterd en worden getoetst aan kolomexperimenten. Vervolgens kan beoordeeld worden of deze modelaanpassing voldoende verbeteringen oplevert en of het daarmee geschikt is om andere sites uit de Regiodeal mee door te rekenen. Ten slotte zal er gewerkt moeten worden aan de opschaling van het hier ontwikkelde 1D-model naar een gebiedsdekkend model. Dit gebiedsdekkende model levert input voor het D-DEM (Dynamisch Digital Elevation Model).

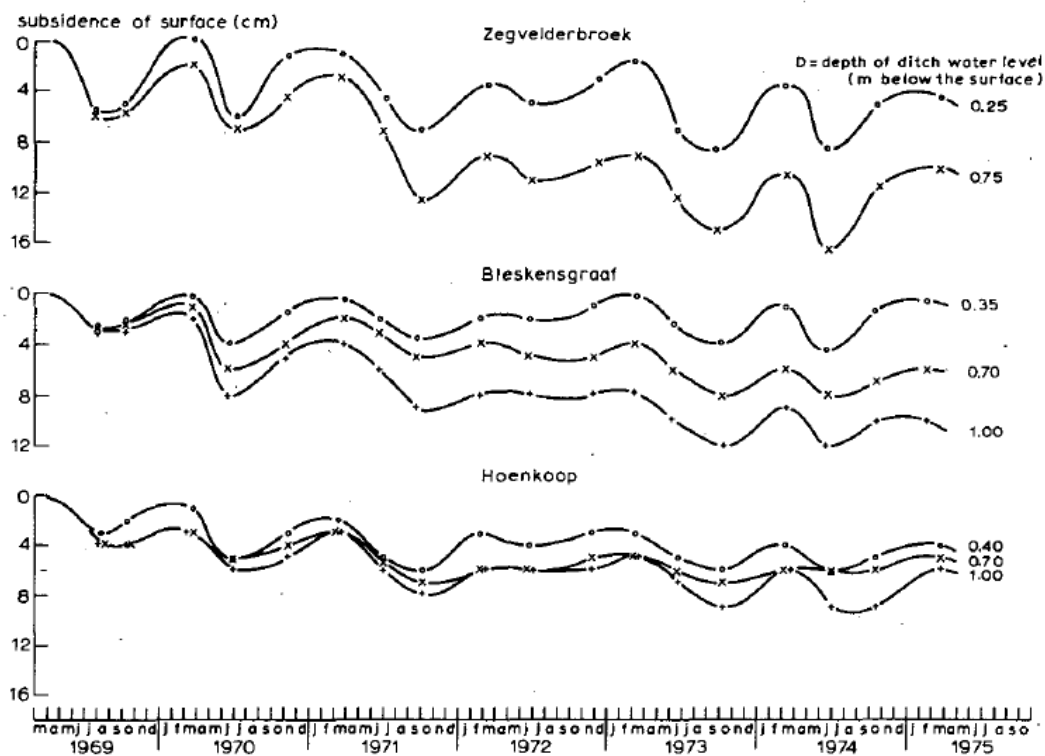
1 Inleiding

1.1 Algemeen

Het onderzoek dat wordt gepresenteerd in dit rapport maakt deel uit van project 42 van het onderzoeksprogramma Regio Deal Bodemdaling Groene Hart (RDBGH). Project 42 richt zich o.a. op het modelinstrumentarium voor bodemdalingstoepassingen. Het project bevat drie lijnen: (1) verbetering van het geologisch model, (2) verbetering van procesmodellen en (3) verbeterde parametrisatie. Een van de taken in lijn 2 is de ontwikkeling van een krimp-zwelmmodel. Dit beoogde model is gericht op het simuleren van maaiveldynamiek.

'Bodemdaling' is zonder verdere specificatie een vrij vaag huis-tuin-en-keuken-begrip waar iedereen, afhankelijk van achtergrond en voorkennis, iets anders onder kan verstaan. Binnen de RDBGH gaat de aandacht met name uit naar daling van het maaiveld ten opzichte van een hoogterefereentievlak zoals het NAP, die in de loop van jaren tot decennia tot stand komt door processen in slappe bodemlagen in het Holocene pakket. Vooral in stedelijk gebied is naast maaiveld daling ook daling van diepere bodemniveaus onder funderingen, pijpen en kabels relevant in verband met schade en onderhoud aan woningen en ondergrondse infrastructuur. Maar ook daar is de relevante bodemdaling de daling die zich over perioden van jaren tot decennia ontwikkelt. Over kortere perioden laten tijdreeksen van de hoogteverandering van het maaiveld en ondiepe bodemniveaus echter zelden een simpele dalingstrend zien (Figuur 1.1); 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 ca. 1 decimeter.

Voor praktische vraagstukken rond bodemdaling zijn deze dynamische maaiveldbewegingen in principe 'ruis'; het beperkt het zicht op bodemdaling. Wanneer periodisch maaiveldhoogtemetingen worden gedaan, zoals in de data die ten grondslag liggen aan Figuur 1.1, moet bijvoorbeeld vele jaren worden gemeten om deze ruis uit te middelen en de bodemdaling te kunnen kwantificeren. Kennis over het dynamische gedrag van maaiveldbewegingen in landelijk gebied is ook van groot belang voor het afleiden van bodembeweging en bodemdaling uit radarsatellietbeelden (InSAR-techniek). Het is dus belangrijk om het karakter en de oorzaken van de maaiveldynamiek beter te begrijpen en bij voorkeur ook te kunnen modelleren. Wanneer maaiveldynamiek bijvoorbeeld voldoende nauwkeurig gebiedsdekkend kan worden geschat door goede kennis van de onderliggende processen en de belangrijkste sturende factoren, dan kunnen daarmee de belemmeringen voor gebruik van InSAR worden verminderd of weggenomen. De gebiedsdekkende monitoring met InSAR voor het Groene Hart is onderdeel van project 44 van de RDBGH.



Figuur 1.1 Maaiveldbewegingen gemeten op drie locaties in veenweide voor verschillende slootwaterpeilen t.o.v. maaiveld (Schothorst, 1982).

1.2 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is op basis van bestaande concepten en software een 1D (verticaal profiel) modellering uit te voeren voor de locatie Rouveen waar veel monitoringsdata voor bodembeweging en onderliggende bodembewegingsprocessen beschikbaar zijn. Hiermee kan bepaald worden in hoeverre deze concepten en modelleringwijzen in staat zijn om de waargenomen bodemdynamiek te verklaren.

De focus ligt in dit onderzoek op de analyse en modellering van dynamische/reversibele processen. De permanente bodemdaling door irreversibele krimp en veenoxidatie is geen onderdeel van deze studie. Deze permanente maaiveldaling staat centraal in het NOBV (Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden) en zullen ook worden onderzocht in andere projectonderdelen van de RDBGH.

Daarnaast kan het te ontwikkelen model mogelijk worden ingezet voor educatieve doeleinden om kennis van de bodemdynamiek onder belanghebbenden en/of geïnteresseerde partijen te vergroten. Kennis over maaiveldynamiek is ook belangrijk voor studies waarin getracht wordt om bodemdaling uit datasets met hoogteschattingen (zoals de AHN, Actueel Hoogtebestand Nederland) af te leiden.

1.3 Aanpak

Voor de modellering is gekozen om gebruik te maken van data van de proeflocatie Rouveen van Deltares; deze locatie ook is opgenomen in het NOBV (Figuur 1.1). Monitoringsdata van de monitoringssites die worden gerealiseerd in RDBGH (project 44) waren bij aanvang van dit project nog niet beschikbaar en zijn naar verwachting pas op zijn vroegst in 2023 voldoende uitgebreid om voor deze modellering te kunnen worden ingezet. Rouveen ligt niet in het Groene Hart, maar ligt wel in veenweidegebied en heeft wel een relevante bodemopbouw voor deze studie (zie Bijlage 1).

Eerst zijn de monitoringsdata van de proeflocatie Rouveen bestudeerd door tijdreeksen te genereren van laagdikteverandering van de verschillende bodemlagen die zijn bemeaten met de extensometer. Deze tijdreeksen zijn grafisch weergegeven met tijdreeksen van grondwaterstand en bodemvocht om kwalitatieve verbanden te leggen.

Voor de modellering van maaiveldynamiek veroorzaakt door krimp en zwel is gebruikgemaakt van SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant, versie 4). SWAP bevat uitgebreide mogelijkheden voor het modelleren van bodemvocht en waterspanning in de onverzadigde zone (Kroes et al., 2017). Voor dit project is SWAP uitgebreid met een beschrijving van zwel en krimp van de bodemmatrix en preferentieel transport van water door de krimpscheuren en andere macroporiën (Kroes et al., 2017; Hendriks, 2004). Eerst zijn bodemvocht- en grondwaterstandtijdreeksen zo nauwkeurig mogelijk gemodelleerd. Vervolgens is de bijdrage van krimp-zwel aan maaiveldbeweging gemodelleerd. Parametrisatie, o.a. de krimp-karakteristiek van veen en klei, is daarin hoofdzakelijk gebaseerd op literatuur; er was geen locatie-specifieke karakterisatie beschikbaar.

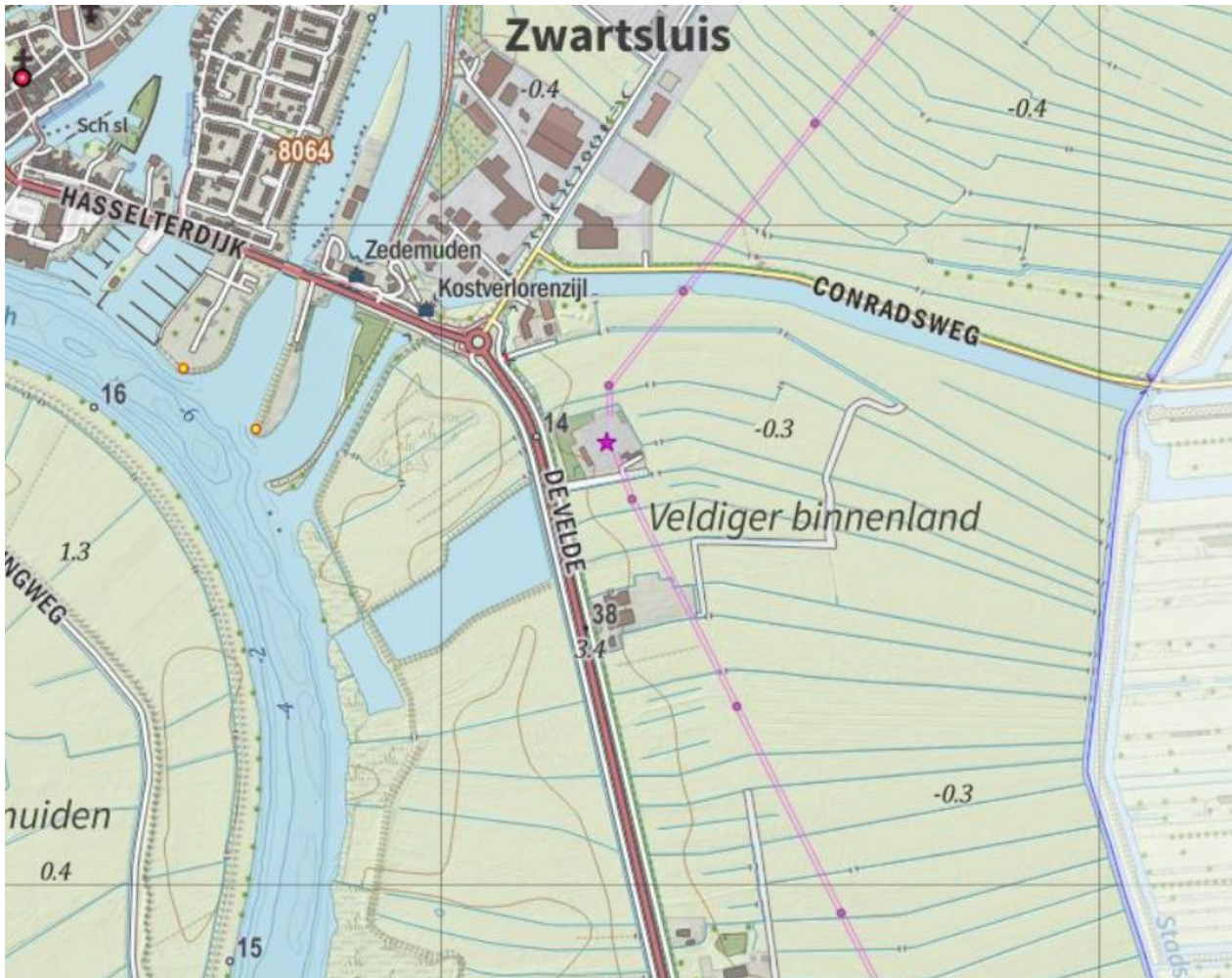
Voor de modellering van maaiveldynamiek veroorzaakt door elastische dikteverandering van lagen beneden de grondwaterstand is een aantal modelleringswijzen onderzocht. In alle methoden is gebruikgemaakt van poro-elastische principes zoals worden gebruikt in de huidige geotechnische praktijk/software. Er zijn berekeningen gedaan met waterspanningen verkregen uit de SWAP-modellering van krimp en zwel. En er zijn berekeningen gedaan met een formulering waarin waterspanningen en vervormingen gekoppeld worden berekend in de verzadigde bodemlagen op basis van randvoorwaarden die bestaan uit een gespecificeerde grondwaterstandtijdreeks aan de bovenzijde en een stijghoogtetijdreeks aan de basis van de bodemkolom. Voor de laatste methode is gebruikgemaakt van een commercieel softwarepakket FlexPDE.

1.4 Leeswijzer

Het rapport is opgebouwd uit een drietal onderdelen. Het eerste deel (hoofdstuk 2) bespreekt de processen die bepalend zijn voor de maaiveldynamiek en de gekozen modelleerwijze. De aandacht richt zich op het zwellen/krimpen van veen- en kleilagen als gevolg van de verandering van de vochtspanning in de onverzadigde zone en de elastische vervorming in de verzadigde zone in reactie op stijghoogteveranderingen. De meer permanente bodemdalingscomponenten zoals veenoxidatie en rijping van kleilagen vormen geen onderdeel van dit onderzoek, dat gericht is op bodemdynamiek.

Het tweede deel (hoofdstuk 3) presenteert de analyse van meetdata van de proeflocatie Rouveen. Daarin worden verschillen in dynamiek tussen de diverse diepte-intervallen in beeld gebracht, evenals correlaties met de grondwaterstand en vochtspanning.

Het derde deel (hoofdstuk 4 en 5) presenteert de modelleerresultaten. Hoofdstuk 4 betreft de modellering van krimp en zwel en hoofdstuk 5 de verzadigde elastische bijdrage. Ten slotte geeft hoofdstuk 6 de conclusies en een discussie van vervolgstappen. Daarin wordt o.a. ingegaan op de vraag of het ontwikkelde modelleerwijze perspectief biedt voor toekomstige berekening en welke verbeteringen moeten worden doorgevoerd. Verder wordt ook een doorkijk gegeven naar de geschiktheid van het model als input voor het D-DEM.



Figuur 1.1 Ligging locatie (topografische kaart) (paarse ster).

2 Maaiveldynamiek: processen en modelleringswijzen

2.1 Algemeen

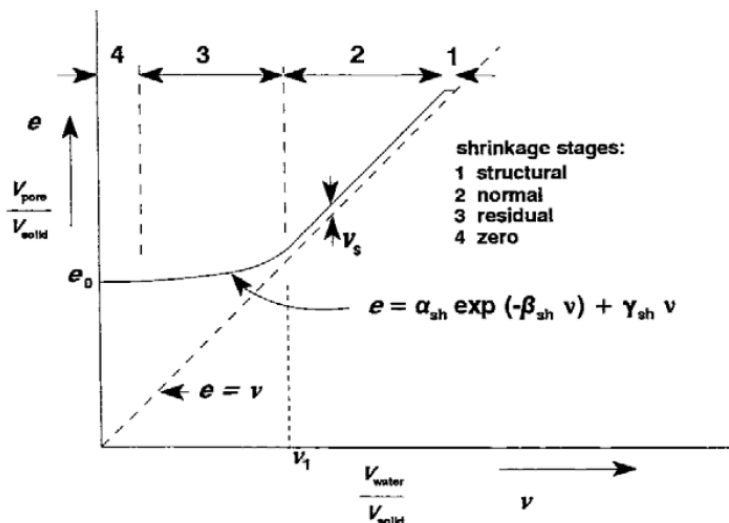
In dit hoofdstuk worden de belangrijkste processen beschreven die verantwoordelijk zijn voor de dynamiek van maaiveldhoogteverandering. Vervolgens is gekeken hoe die individuele processen kunnen worden gemodelleerd en hoe dit tot een gezamenlijk dynamisch model kan worden samengevoegd.

2.2 Krimp en zwellen van klei en veen

2.2.1 Procesbeschrijving krimp en zwel

Klei

Kleigronden hebben als eigenschap dat ze bij het uitdrogen krimpen. Het uitdrogen van de kleigrond resulteert in krimpscheuren en maaiveld dalingen. Bij bevochtiging van een uitgedroogde kleigrond zwellen de scheuren opnieuw gedeeltelijk of geheel dicht en komt het maaiveld weer omhoog. Het niet volledig opzwellen van de klei na uitdroging, waardoor de scheuren niet dichtzwellen, wordt irreversibele krimp genoemd. In feite is irreversibele krimp het laatste stukje rijping dat de grond ondergaat. De relatie tussen vochtgehalteveranderingen en volumeveranderingen van een kleigrond kan worden weergegeven in de krimpkarakteristiek (Figuur 2.1). Bij krimp worden van nat naar droog vier fases onderscheiden: structurele krimp, normale krimp, restkrimp en nulkrimp. Bij structurele krimp neemt het vochtgehalte af zonder dat het volume van de grond afneemt. In de fase van normale krimp nemen volume water en volume grond evenveel af, waarbij de aggregaten volledig verzadigd blijven en alleen de krimpscheuren (macroporiën) lucht bevatten. In de fases daarna komt er ook lucht in de aggregaten.



Figuur 2.1 Krimpkarakteristiek van een kleigrond. V_{pore} = poriënvolume, V_{solid} = volume vaste delen, V_{water} = vochtvolume (bron: Van den Akker et al., 2013).

De grootte van fase 2 hangt sterk van het lutumgehalte af. Hoe zwaarder de klei hoe kleiner de poriën en hoe groter fase 2 is. In enkele zware kleigronden treedt alleen normale krimp op, dit betekent dat in het veld de bodemaggregaten het gehele jaar door verzadigd zijn (Van den Akker et al., 2013).

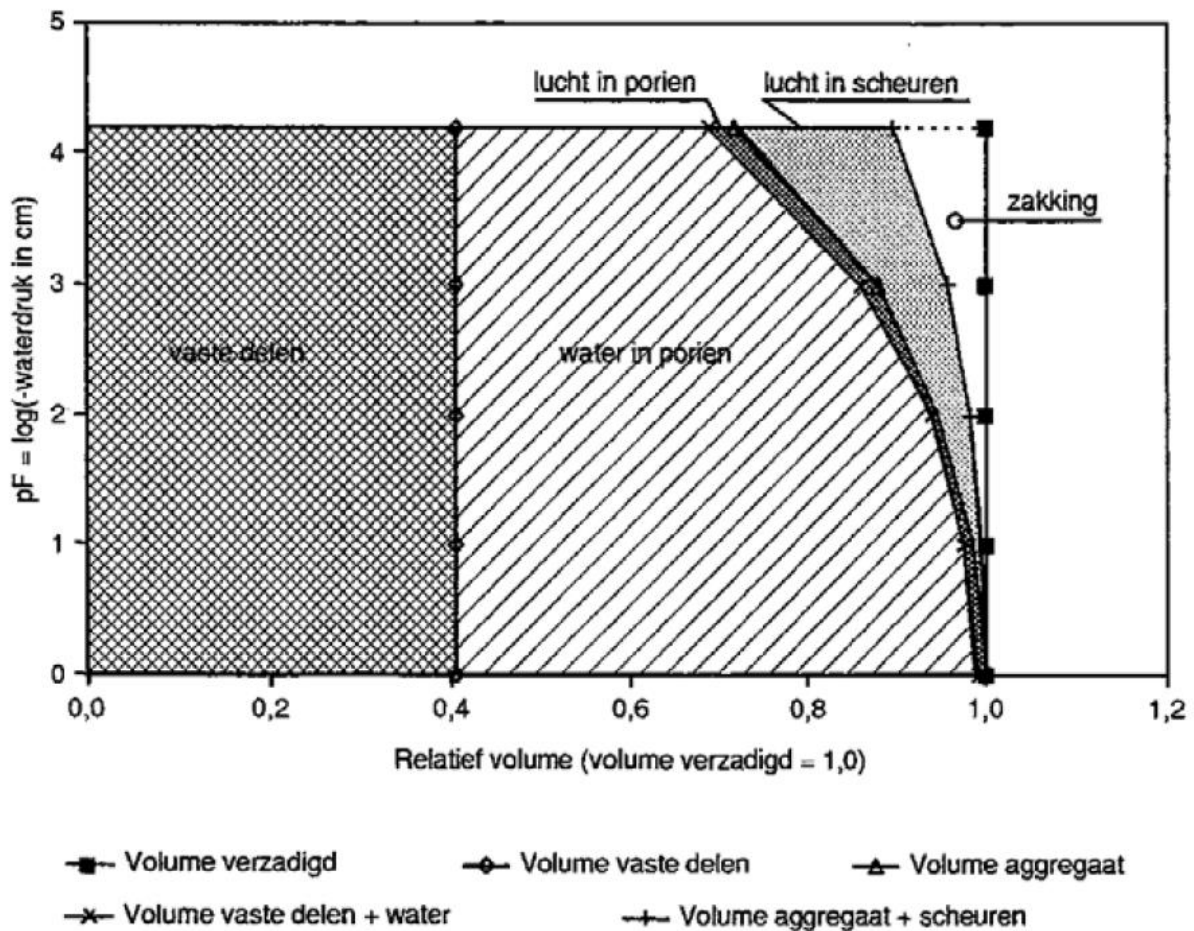
In hoeverre volumeafname van de bodematrix zichtbaar wordt als maaiveld daling of als scheurvorming

wordt bepaald door de geometrie van het krimproces. Boven in het bodemprofiel is de grond veelal droger en daarmee sterker en stijver dan op grotere diepte. Daarnaast is boven in het bodemprofiel de belasting van bovenliggende grond niet of in geringe mate aanwezig. Hierdoor zullen kripscheuren niet dichtgedrukt worden. De krimp is daarom boven in het bodemprofiel isotroop (in alle drie dimensies gelijk) en veroorzaakt in gelijke mate zinking en scheurvorming. Dieper in het bodemprofiel worden de scheuren dichtgedrukt door het bovenliggende gewicht van de grond, waardoor het gehele krimpvolume op die diepte wordt omgezet in bodemdaling aan het oppervlak. Onderzoek in Flevoland laat zien dat kripscheuren tot op 1,2 m -mv kunnen worden aangetroffen, maar dat juist ondiepe kripscheuren door grondbewerking (met name akkerbouw) weer kunnen verdwijnen of omgezet in kleinere luchtgevulde ruimtes (Van den Akker et al., 2011).

Of en hoeveel een grond of aggregaat krimpt (zwellt) door onttrekking (of toevoeging) van water hangt af van:

- De hoeveelheid water die door de plant aan het aggregaat kan worden onttrokken. Een grond kan wat dit betreft worden gekarakteriseerd door zijn waterretentiekarakteristiek waarmee het verband is gegeven tussen vochtspanning (drukhoogte) en vochtgehalte.
- De hoeveelheid water die in het aggregaat opgenomen kan worden door neerslag of door capillaire nalevering vanuit diepere lagen.
- De krimp (zwell) eigenschappen van de grond zoals weergegeven in de krimp karakteristiek.

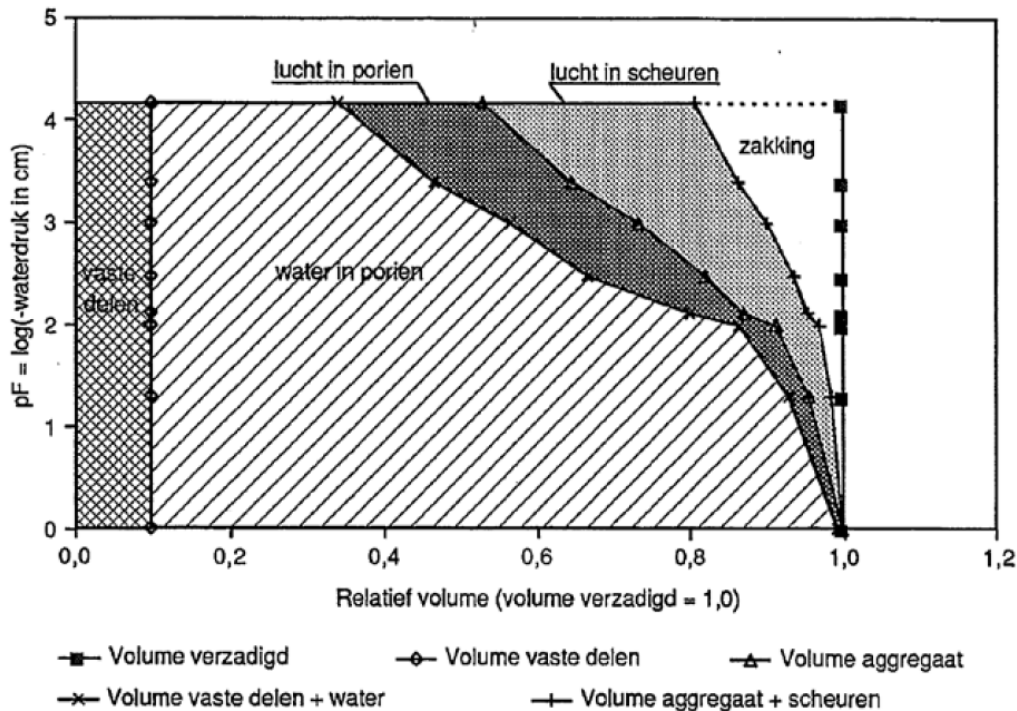
Uit de combinatie van waterretentiekarakteristiek en krimp karakteristiek volgt de verdeling van het relatieve volume bij verschillende vochtspanningen (Figuur 2.2). De geometriefactor bepaalt vervolgens de verdeling van de krimp over scheuren dan wel maaiveld daling.



Figuur 2.2 Verdeling van het relatieve volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van een zeer zware klei uit Bruchem (Van den Akker et al., 2013).

Veen

Van veengronden zijn het mogelijke waterverlies en krimp aanzienlijk hoger dan van kleigronden (Figuur 2.3). Dit volgt ook uit de krimpkarakteristiek (Figuur 2.4). De wiskundige beschrijving van de krimpkarakteristiek voor veen verschilt van die voor klei. Het blijkt dat voor een veengrond het traject waarin veel water aan het veen kan worden onttrokken (tot circa $pF=2$), zonder het optreden van grote krimp, veel groter is dan voor kleigronden. Bij de verdere uitdroging valt op dat veen veel water kan leveren waarbij ongeveer een derde van het volume geleverd water wordt omgezet in luchtgevulde poriën in de veenmatrix en ongeveer twee derde in scheurvolumen en maaiveldaling (Van den Akker et al., 2013). Bij zeer sterke uitdroging kan het veen tot wel 60% van het oorspronkelijke volume zijn gekrompen, waarbij 40% het volume aan scheuren en maaiveldaling is.



Figuur 2.3 Verdeling van het relatieve volume in vaste delen, water en lucht in relatie tot de vochtspanning van veen met een organischestofgehalte van 80% (Van den Akker et al., 2013).

Zwel versus krimp

De meeste onderzoeken naar het krimp- en zwelgedrag richten zich op het krimpproces. Dit betekent dat er relatief weinig gegevens bekend zijn van het zwelproces. Krimp wordt in het laboratorium gemeten door een aggregaat uit te drogen en de volumeverandering van het aggregaat te bepalen. Hieruit wordt de krimprelatie bepaald. Bij verdamping door gewassen wordt actief water aan de grond (aggregaten) onttrokken. Wellicht dat de wortels tot in de aggregaten aanwezig zijn. Bekend is dat veengronden sterk hydrofoob (waterafstotend) kunnen zijn (Dekker en Ritsema, 1996; Hoekstra et al., 2021). Voor het indringen van neerslag in het aggregaat kan dit zorgen voor een vertraagde opname van neerslagwater en dus een grotere afvoer via de krimpscheuren naar de ondergrond. Uitdroging van aggregaten kan dus van binnenuit door wateropname door wortels ontstaan en vernatting door neerslag zal van buitenaf plaatsvinden. Dit verschil in processen bij verdroging en vernatting kan tot een ander gedrag in krimp- en zwelomstandigheden leiden.

2.2.2 Modellerings krimp en zwel

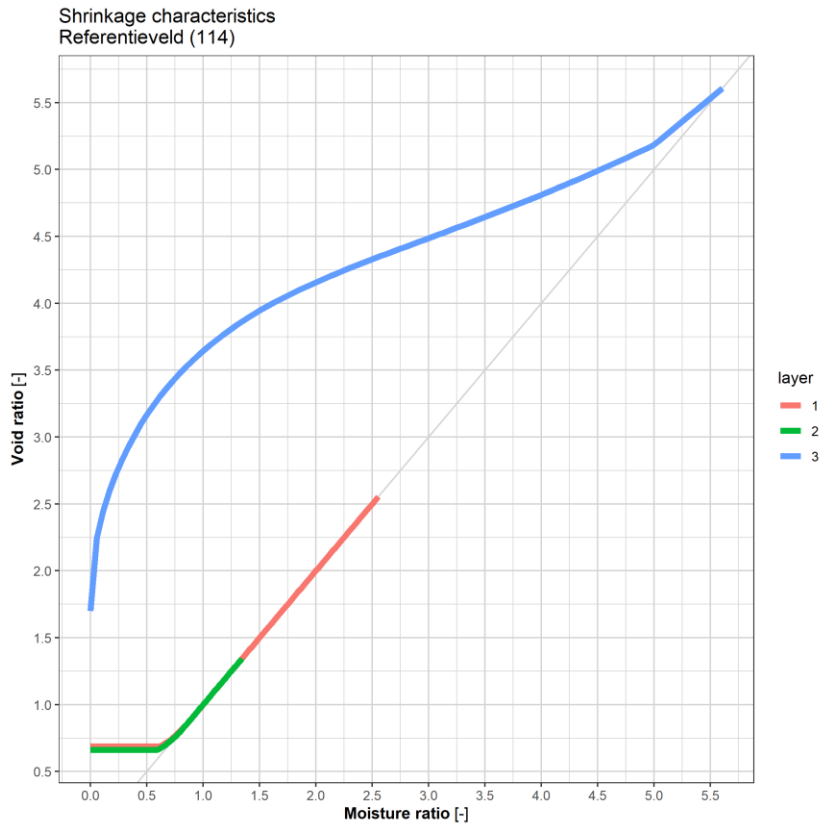
De drijvende kracht voor het zwel- en krimpproces is de verandering van de drukhoogte in de bodem. Om de vochttoestand en het krimp-/zwelproces te modelleren, is gebruikgemaakt van SWAP.

SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) is een gedetailleerd, dynamisch bodemfysisch model voor simulatie van verticaal transport van water, warmte en opgeloste stoffen in een afwisselend waterverzadigde en -onverzadigde bodemkolom op veldschaal (Kroes et al., 2017). Verticale waterstroming in de bodemkolom wordt berekend met de Richards' vergelijking. SWAP lost deze vergelijking integraal op voor de onverzadigde-verzadigde zone, met een numeriek schema op basis van ingevoerde karakteristieken voor waterretentie en onverzadigde doorlatendheid. Voor de verticale discretisatie is de bodemkolom opgedeeld in compartimenten. Het model berekent drukhoogte- en bodemvochtprofielen in de diepte voor een kolom met bodemlagen met verschillende eigenschappen voor waterretentie en doorlatendheid. In SWAP wordt gebruikgemaakt van uitgebreide beschrijvingen van de wateruitwisseling met de randdomeinen: atmosfeer aan de bovenrand in combinatie met verschillende gewasgroeimodules, ontwateringsmiddelen (open en/of drainagebuis) aan de zijrand en het diepere grondwater aan de onderrand. Zo kan interactie tussen processen aan de bovenzijde van de kolom (neerslag, verdamping) en aan de onderzijde van de kolom (kwel/wegzijing o.i.v. stijghoogte/drukhoogte) worden gesimuleerd. Van groot belang is ook de bewortelingsdiepte en wortelverdeling in de diepte, omdat de vochtonttrekking door wortels het vocht- en vochtspanningsprofiel in de diepte sterk bepaalt.

Belangrijk aspect voor dit project is de zwel en krimp van de bodemmatrix en preferent transport van water door de krimpscheuren en andere macroporiën (Kroes et al., 2017). Voor beschrijving van de krimp-karakteristiek van weinig bodemmateriaal (veen, kleiig veen, zandig veen, venige klei of weinig zand) is een wiskundige vergelijking ontwikkeld en gebruikt in het model (Hendriks, 2004).

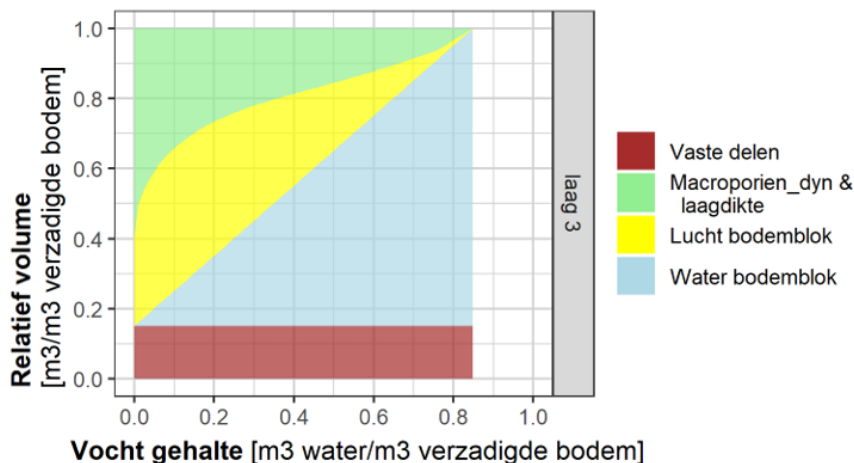
In SWAP is het ontstaan van de krimpscheuren en maaiveldvaling afhankelijk van het vochtgehalte in de bodemmatrix. In de zomer droogt de bovengrond uit en ontstaan krimpscheuren. Dit heeft tot gevolg dat neerslag voor een deel direct in de scheuren terecht komt en ook het deel van de neerslag dat niet aan maaiveld infiltreert en niet op maaiveld geborgen wordt, komt in de scheuren terecht. Het neerslagwater in de krimpscheuren stroomt vervolgens naar de ondergrond. De geometrie van de krimpscheuren bepaalt vervolgens op welke diepte dit water de aggregaten kan voeden. In de winter is er een neerslagoverschot en vult de bodemmatrix zich weer met water. Hierdoor neemt het volume aan krimpscheuren weer af.

Bij de simulatie staat de krimp-en-zwel-karakteristiek centraal. Net als in bodems zonder krimp neemt in de zomer de verdamping toe, droogt de bodem uit en treedt lucht toe. Bij krimpende bodems ontstaan macroporiën en zal het toetreden van lucht voor een belangrijk deel buiten de bodemaggregaten plaatsvinden. De mate waarin deze ontstaan, wordt weergegeven door de krimp-karakteristiek (Figuur 2.4). Deze karakteristiek relateert een bepaald vochtgehalte aan de verdeling van het luchtgehalte over macroporiën en lucht in het aggregaat.



Figuur 2.4 Krimp karakteristiek van (o.b.v. ratio volume vocht ten opzichte van volume vaste delen, maximum bij drukhoogte = 0) (blauw: veen, rood/groen: klei).

In Figuur 2.5 is de gebruikte krimp karakteristiek voor veen vertaald naar de relatieve volumeverdeling van lucht in macroporiën, vocht in aggregaat, lucht in aggregaat en vaste delen. Zo is te zien dat voor veen bij een vochtgehalte van $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ circa 20% lucht in het aggregaat zit en dat er krimpscheuren zijn voor circa 15%. De krimp kan ook in verticale richting plaatshebben. De verdeling van de krimp over de horizontaal en de verticaal wordt bepaald door de geometriefactor (zie Bijlage 1).



Figuur 2.5 Krimp karakteristiek (o.b.v. ratio volume vocht ten opzichte van volume vaste delen, maximum bij drukhoogte = 0). Het groene deel geeft zowel de krimp in de horizontaal als de verticaal weer.

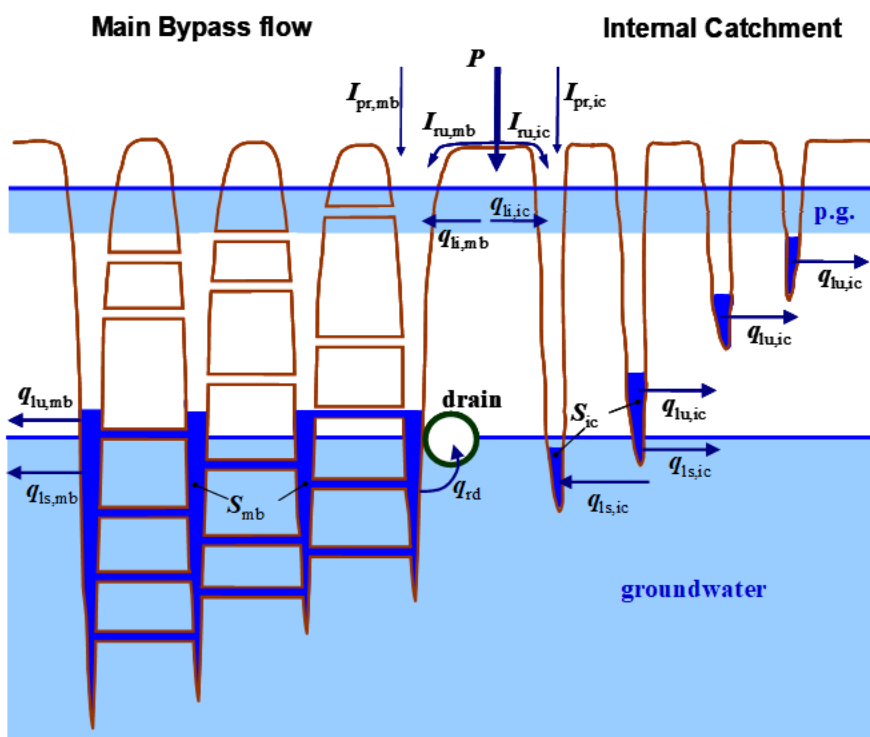
Voor het krimp-zwelgedrag, zoals in SWAP is geconceptualiseerd, is de waterbalans van de aggregaten en de macroporiën cruciaal. In Figuur 2.6 zijn de verschillende waterfluxen weergegeven.

In het SWAP-model omvat de waterbalans van de macroporiën de volgende processen:

- toevoer van water in macroporiën aan het bodemoppervlak;
- verticaal transport naar diepere lagen of het grondwater dat de bodemmatrix omzeilt;
- laterale infiltratie in en exfiltratie uit de bodemmatrix;
- snelle drainage naar drainagesystemen;
- wateropslag in de macroporiën.

Voor de aggregaten zijn het de volgende processen:

- infiltratie water aan maaiveld;
- bodemverdamping;
- opname van water door wortels;
- verticaal transport naar diepere lagen;
- laterale infiltratie in en exfiltratie uit de macroporiën;
- drainage via ontwateringssystemen;
- wateropslag in aggregaten.



Figuur 2.6 Waterfluxen in een bodem met macroporiën (zie voor details, Kroes et al., 2017).

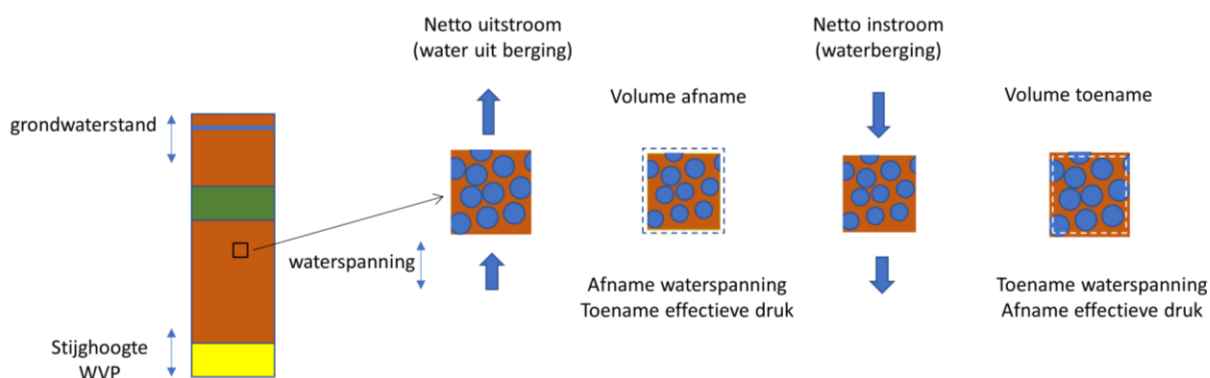
2.3 Elastische vervorming

2.3.1 Procesbeschrijving elastische vervorming beneden het freatisch niveau

Beneden de freatische grondwaterstand is over het algemeen sprake van volledige waterverzadiging van het bodemmateriaal; de poriën zijn volledig gevuld met water. Omdat de matrix (korrelskelet) niet volledig rigide is, vinden ook daar in meer of mindere mate volumeveranderingen plaats waarbij water wordt opgenomen (geborgen) of afgestaan (negatieve berging) (Figuur 2.7). Wanneer water wordt opgenomen (door netto instroom van grondwater), neemt het bodemvolume toe met de hoeveelheid geborgen water; het volume vaste stof blijft ongeveer gelijk. Wanneer water wordt afgestaan, neemt het bodemvolume weer af met het

volume water dat netto uitstroomt.¹ Dit gebeurt in een volledig gekoppeld samenspel van grondwaterstroming (Darcy), spanningsverandering en volumeverandering.

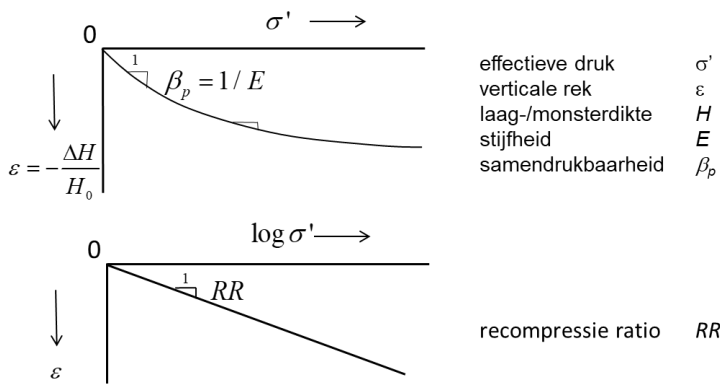
Mechanisch gezien worden de volumeveranderingen bepaald door veranderingen in de effectieve druk (ook: korrelspanning) in de verzadigde bodem en de stijfheid/rigiditeit van de matrix (korrelskelet) van de bodem. Effectieve druk is totale (grond)druk minus waterspanning: $\sigma' = \sigma - p$. Door fluctuaties in grondwaterstand, maar ook in de stijghoogte in een onderliggend watervoerend pakket, dringt afwisselend water in of wordt water afgevoerd uit het tussenliggende slappe lagenpakket. Daardoor verandert de waterspanning in de bodemlagen. Daarmee verandert ook de effectieve druk en vinden er volumeveranderingen en waterbergingsveranderingen plaats die tot maaiveldbeweging leiden. Dit zijn fundamentele concepten die, zij het meestal in iets andere toepassingen rond zettingsberekeningen (consolidatietheorie) en met grotere spanningsveranderingen, een centrale plaats hebben in de bodemmechanica (Verruijt, 2016), maar ook ten grondslag liggen aan bergingscoëfficiënten die worden gebruikt in tijdsafhankelijke grondwatermodellen in de hydrologie (Domenico and Schwartz, 1990) en bodemdaling door grondwateronttrekkingen (Kooi et al., 2018).



Figuur 2.7 Conceptuele weergave van elastische vervormingen in verzadigde delen van de ondergrond als onderdeel van niet-stationaire grondwaterstroming.

Holoceen klei- en veenmateriaal heeft over het algemeen een lage stijfheid (door gering bovengewicht en lage effectieve druk) (Figuur 2.8). Deze lagen kunnen daarom in principe sterk bijdragen aan maaiveldverandering. De snelheid waarmee dit gebeurt, wordt bepaald door de (verticale) doorlatendheid van de lagen, de laagdiktes en door de stijfheid van het veen en de klei. De aanwezigheid van vrij gas (methaan) in veen kan het modelleren van het poro-elastische gedrag verder compliceren (Yang en Liu, 2016). De kennis hierover is nog niet ver genoeg ontwikkeld om dit op een betekenisvolle manier mee te nemen in modellering. In algemene zin geldt dat wanneer vrij gas aanwezig is, er meer waterberging nodig is om een gegeven verandering van de waterspanning te verkrijgen. Die extra berging correspondeert niet met elastische expansie van het korrelskelet, maar met samendrukking (en deels in oplossing gaan) van het gas. Er is dus meer waterberging nodig om een bepaalde elastische vervorming van het korrelskelet te bewerkstelligen. Dat betekent dat vrij gas naar verwachting een dempende werking heeft op de maaiveldynamiek en ook zorgt voor grotere traagheid in de doorwerking van waterspanningsveranderingen in een veenpakket.

¹ Vergelijkbaar met normale krimp waarin het watergehalte ook verandert in verzadigde toestand, maar dan boven het freatisch niveau.

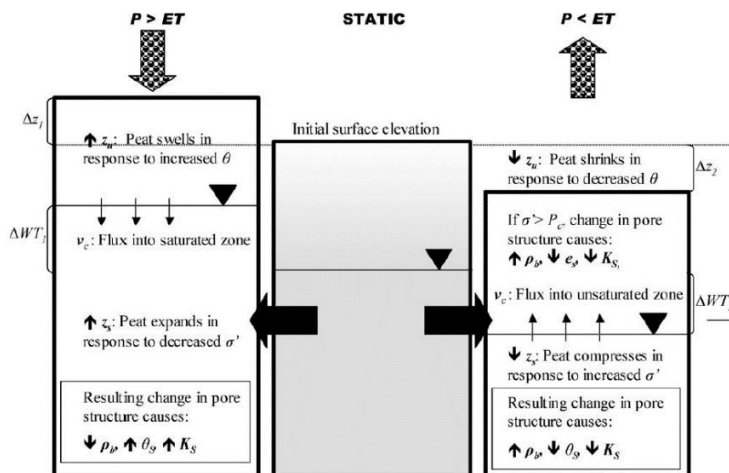


Figuur 2.8 Definitie van diverse elastische parameters die worden gebruikt voor verticale elastische vervormingen. Stijfheid en elastische samendrukbaarheid zijn spanningsafhankelijk; de stijfheid neemt toe en samendrukbaarheid af bij grotere effectieve druk (grootweg met diepte). De recompressie ratio *RR* is vrijwel spanningsonafhankelijk.

In SWAP worden waterspanningen en grondwaterstroming beneden het freatisch niveau berekend zonder elastische berging (rigide matrix).

2.3.2 Beschouwing mogelijkheden geïntegreerde modellering met krimp-zwel

Figuur 2.9 toont een conceptueel model voor maaiveldynamiek voor een veenbodem waarin zowel krimp-zwel als poro-elastische bijdragen deel van uitmaken, aangeduid met de termen *compression* en *expansion* (Kennedy en Price, 2005). De auteurs presenteren enkele, deels verouderde theoretische aspecten van volumeverandering als aanzet voor de ontwikkeling van een kwantitatief model, maar e.e.a. wordt verder niet uitgewerkt of toegepast.



Figuur 2.9 Conceptueel model voor maaiveldbewegingen in een veenbodem gedreven door variaties in netto neerslag en hydrologische condities (Kennedy en Price, 2005).

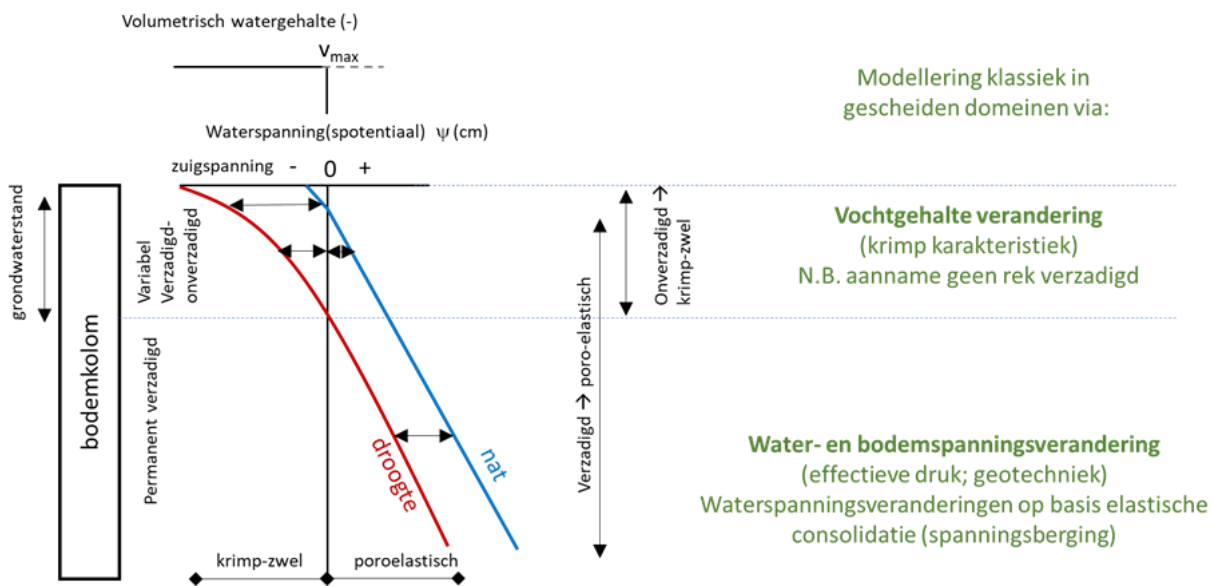
Hieronder wordt verder op de (on)mogelijkheden voor geïntegreerde modellering ingegaan.

Anders dan voor krimp-zwel, kunnen de elastische bijdragen aan volumeveranderingen en maaiveldynamiek niet worden gemodelleerd op basis van vocht- of watergehalte (Figuur 2.10). Poro-elastische berekeningen vereisen gebruik van spanningen (water- en totaalspanningen).

Gebruik van verschillende onafhankelijke variabelen – vochtgehalte en waterspanning – boven en onder het freatisch niveau maakt integrale modellering daardoor technisch lastig. Ook omdat het freatisch niveau op en

neer beweegt; tussen de hoogste en laagste grondwaterstand moet voor volumeverandering worden geswitcht tussen beide variabelen en bijbehorende formules.

Vochtgehalte is wel gekoppeld aan waterspanning middels pF-relaties; Figuur 2.10 toont schematische waterspanningsprofielen van maaiveld tot ruim onder het freatisch niveau. Waterspanning of waterpotentiaal zou daarmee in principe kunnen dienen als onafhankelijke variabele voor modellering van volumeveranderingen boven en onder het freatisch niveau. Veel makkelijker wordt het daarmee echter niet. De relatie tussen waterspanning en volume verandert sterk bij het freatisch niveau (nul waterspanning) en boven het freatisch niveau blijft het noodzakelijk om ook vochtgehalte te modelleren. In een modelstudie van veendynamiek voor een locatie nabij Venetië lijken Camporese et al. (2006) een poging te hebben gedaan tot de ontwikkeling van een geïntegreerd model, maar nadere bestudering van de mathematische formuleringen laat zien dat, net als in SWAP, alleen krimp-zwel wordt gesimuleerd en elastische berging en dynamica van het verzadigde veen afwezig is in het model.



Figuur 2.10 Relaties tussen diverse domeinen en variabelen die betrekking hebben op krimp-zwel en verzadigd-poro-elastische volumeveranderingen.

Er bestaat, voor zover bekend, nog geen consistente en integrale methodiek om tegelijkertijd krimp-zwel en verzadigd-elastische vervormingen in één raamwerk (softwarepakket) te modelleren. En voor zover zo'n methodiek wel valt uit te werken, zal het veel tijd en energie vragen het te implementeren en te testen. Er is vooralsnog gekozen om elastische bijdragen aan maaiveldbeweging gescheiden te modelleren van de krimp-zwelbijdragen die met SWAP worden gemodelleerd.

2.3.3 Modelleren elastische vervorming

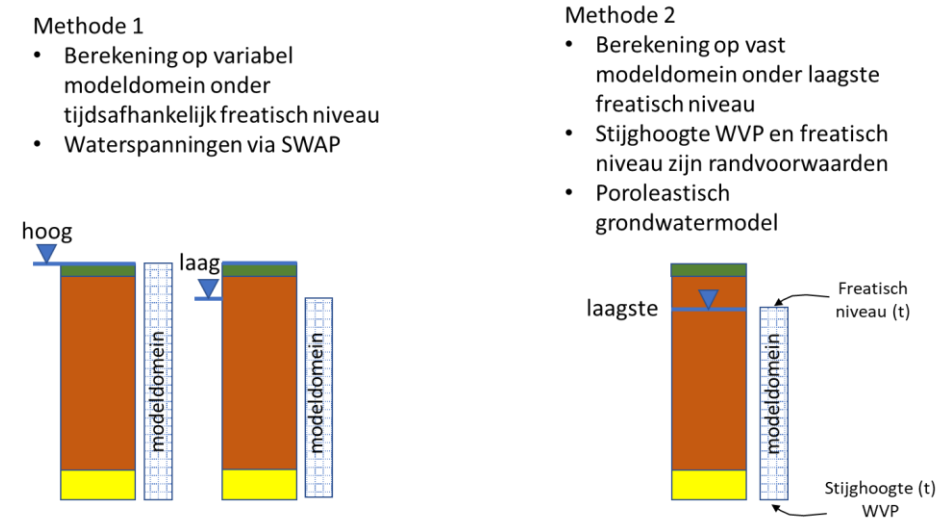
Elasticiteitsrelatie

De elastische bijdrage is gemodelleerd op basis van effectieve drukveranderingen en recompressie-ratio RR (Figuur 2.8). Dit is de standaard in zettingsberekeningen (Den Haan et al., 2004) en wordt o.a. gebruikt in geotechnische software als DSettlement. De recompressie-ratio wordt gebruikt in het NEN-Bjerrum samendrukkingsmodel.

$$d\varepsilon = -RRd \log \sigma' = -\frac{RR}{\ln(10)\sigma'} d\sigma' \quad (1)$$

Effectieve-drukveranderingen

Er zijn twee methoden gebruikt om effectieve druk-veranderingen te modelleren in een bodemkolom. De belangrijkste verschillen tussen de twee methoden zijn weergegeven in Figuur 2.11.



Figuur 2.11 Overzicht van onderscheidende aspecten van de twee gebruikte methoden.

Methode 1

Met waterspanningen via SWAP en externe berekeningen in Excel

SWAP berekent waterspanningen p (uitgedrukt als drukhoogte) binnen de hele bodemkolom, zowel boven als onder het freatisch niveau. Deze spanningen zijn voor de beste (krimp-zwel) run geëxporteerd en vervolgens geïmporteerd in Excel. Negatieve waterspanningen (zuigspanningen) zijn op nul gesteld, zodat alleen spanningsveranderingen beneden het freatische niveau worden meegenomen.

Aan elk rekencompartiment (gridcel) is een volumetrisch gewicht toegekend op basis van lithologie. Samen met de compartimentdikte is de totale (verticale) spanning σ door neerwaartse sommatie van gewichtsbijdragen van elk compartiment. Met $\sigma' = \sigma - p$ zijn de data omgezet naar effectieve druk.

Voor elk compartiment is per tijdstap de compartimentdikteverandering berekend met vgl (1). Sommering van de compartimentdikteveranderingen per tijdstap levert de bijdrage aan maaiveldhoogteverandering.

Pluspunt van deze methode is dat 'alle' bijdragen onder het op en neer bewegende freatische niveau (waterspanning nul) worden meegenomen (Figuur 2.11).

Nadeel van deze methode is dat SWAP waterspanningen berekent onder aanname van een rigide matrix (korrelskelet), zonder elastische berging.

Methode 2

Met een poro-elastisch grondwatermodel op basis van vgl (1)

De waterspanningsveranderingen worden, anders dan in SWAP, mede bepaald door de elastische berging. Het modeldomein is vast en wordt gekozen tussen de top van het onderliggende watervoerende pakket en de laagste grondwaterstand. Daardoor wordt geen elastische bijdrage gemodelleerd van het deel van de bodemkolom dat afwisselend boven en onder de grondwaterstand ligt.

De modelvergelijkingen zijn geschreven in termen van stijghoogte h . Aan de bovenzijde van het domein wordt een tijdreeks van freatische grondwaterstand toegepast als randvoorwaarde. Aan de onderzijde een tijdreeks voor de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket.

Darcy-gebaseerde waterbalans met bergingscoëfficiënt S_{se} en bronterm Q :

$$S_{se} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q \quad \text{met } h = z + \frac{p}{\gamma_w} \quad (2)$$

h	stijghoogte (m)
t	tijd (s)
z	verticale positie (of plaatshoogte) (m)
K_z	verticale doorlatendheid (m/d)
p	waterspanning (N/m ²)
γ_w	volumetrisch gewicht grondwater (N/m ³)
S_{se}	elastische bergingscoëfficiënt (m ⁻¹) – zie vgl. (3)
Q	bronterm (m ³ /m ³ /s) – zie vlg. (4)

Elastische berging:

$$S_{se} = \frac{RR}{\ln(10)\sigma'} \quad \text{zodat} \quad S_{se} \frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3)$$

RR	recompressie ratio (-) – zie Figuur 2.8
$\sigma' = \sigma - p$	effectieve druk (N/m ²)

Totale druk (grondspanning):

$$\sigma(z) = \sigma_{top} + \int_z^{top} \gamma d\zeta \quad (4)$$

σ_{top}	totale druk aan bovenzijde domein (nul indien maaiveld) (N/m ²)
γ	volumetrisch gewicht bodemmateriaal (inclusief water) (N/m ³)

De druk van bodemlagen boven de top van het domein (laagste grondwaterstand) σ_{top} varieert met de grondwaterstand door de wisselende hoeveelheid bodemvocht. Daardoor worden de onderliggende lagen afwisseld belast (bij stijging grondwaterstand) en ontlast (daling grondwaterstand). De veranderende gronddruk wordt in veen en kleilagen direct (snelheid van het geluid) overgedragen op de waterspanning (en daarmee stijghoogte). Dit is een fundamenteel aspect in consolidatietheorie en zettingsberekeningen. Dit wordt in de modelvergelijkingen mathematisch gerealiseerd door gebruik van de bronterm:

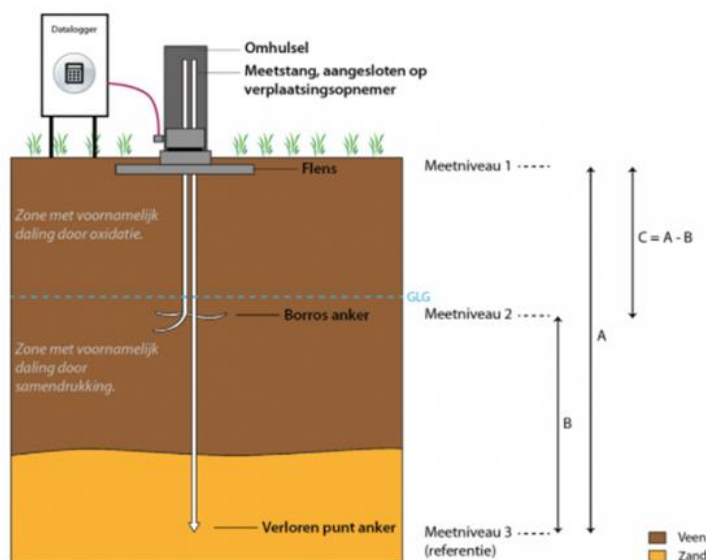
$$Q = S_{se} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (5)$$

Het model is geïmplementeerd in multi-physics software voor het oplossen van partiële differentiaalvergelijkingen [FlexPDE](#).

3 Karakterisatie bodembewegingsdynamiek Rouveen

3.1 Locatie Rouveen

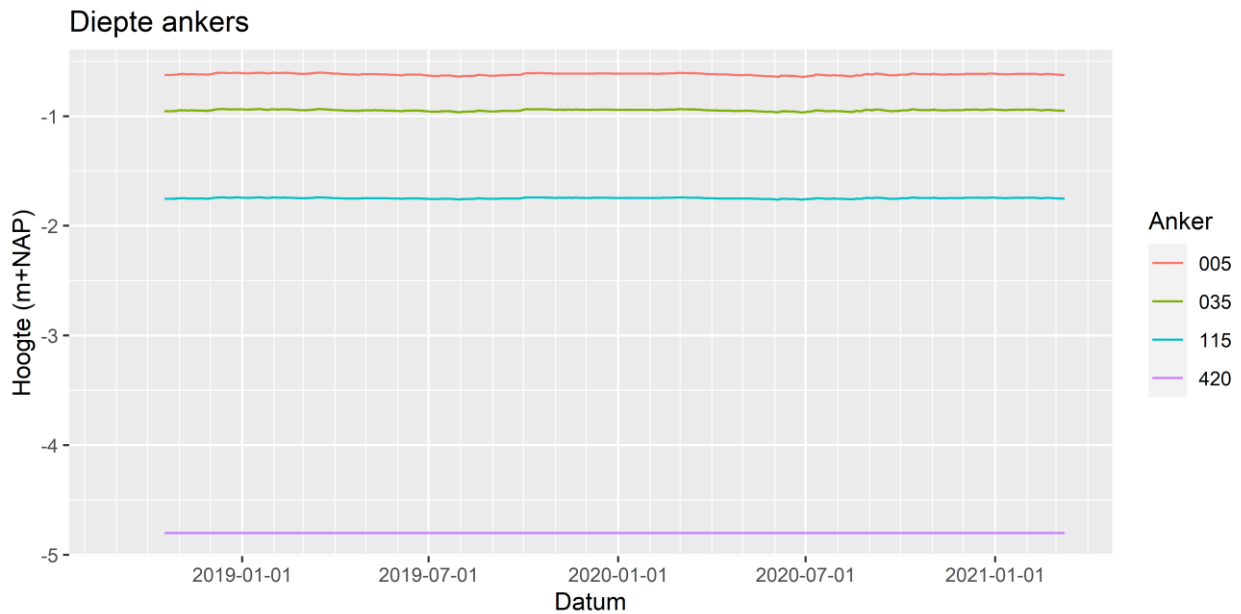
Rouveen is een van de onderzoekslocaties van Deltares die recentelijk is opgenomen in het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweide (NOBV). Op twee percelen worden bodembewegingen met de diepte gemonitord met extensometers. In dit onderzoek gebruiken we de meetdata van het referentieperceel waar geen onderwaterdrainage is toegepast. Naast vochtgehalte, vochtspanning en grondwaterstand wordt ook de maaiveldbeweging gemeten. Deze metingen worden uitgevoerd met een extensometer (Figuur 3.1). Er zijn ankers geplaatst op 5, 35, 115 en 420 cm -mv. De bodem bestaat uit klei met een dikte van circa 30 cm, vervolgens een veenlaag van ongeveer 300 cm dik en daaronder vaak een klei- of leemlaag met een dikte van 5 tot 10 cm. Het diepste anker is geplaatst in het onderliggende zandpakket. De verticale bewegingen van de ondiepere ankers worden geregistreerd ten opzichte van het diepste anker. Op deze manier wordt informatie verkregen over de bijdragen van de bodemniveaus boven het zandpakket aan de maaiveldbeweging. De hoogte van het diepste anker is na installatie van de extensometer ingemeten ten opzichte van NAP.



Figuur 3.1 Conceptueel beeld van een extensometer met ankers op diverse dieptes.

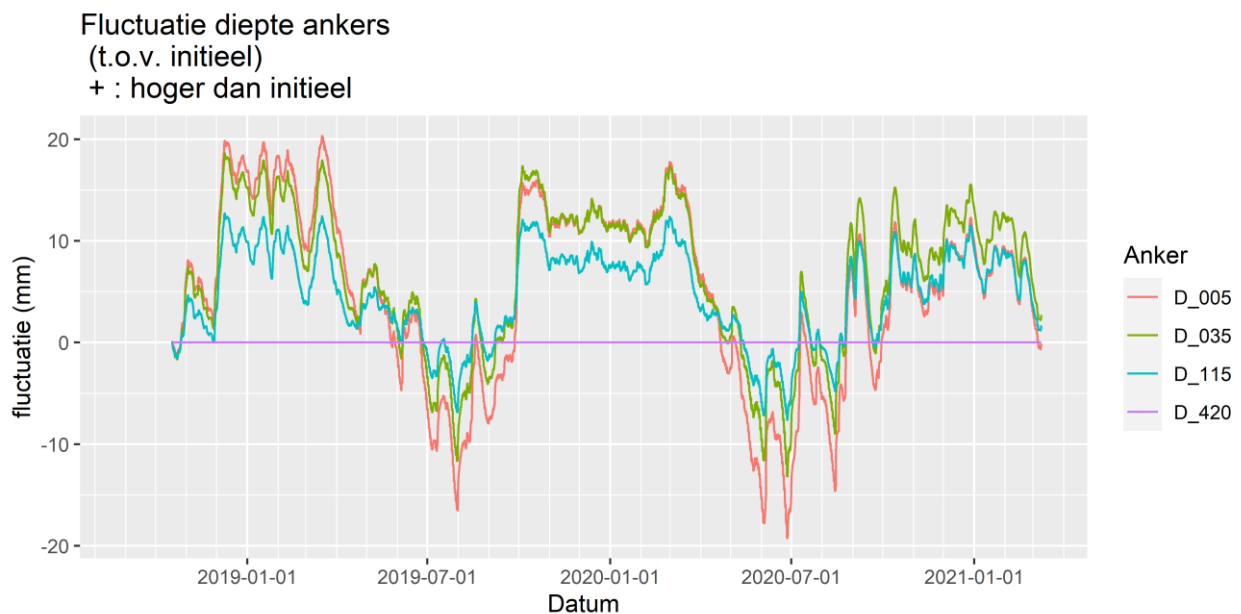
3.2 Analyse extensometer-data

Figuur 3.2 toont een grafiek van de anknerniveaus ten opzichte van NAP voor een periode van twee jaar. Met deze weergave zijn geringe verticale bewegingen zichtbaar.



Figuur 3.2 Hoogte van de ankers (NAP) als functie van de tijd.

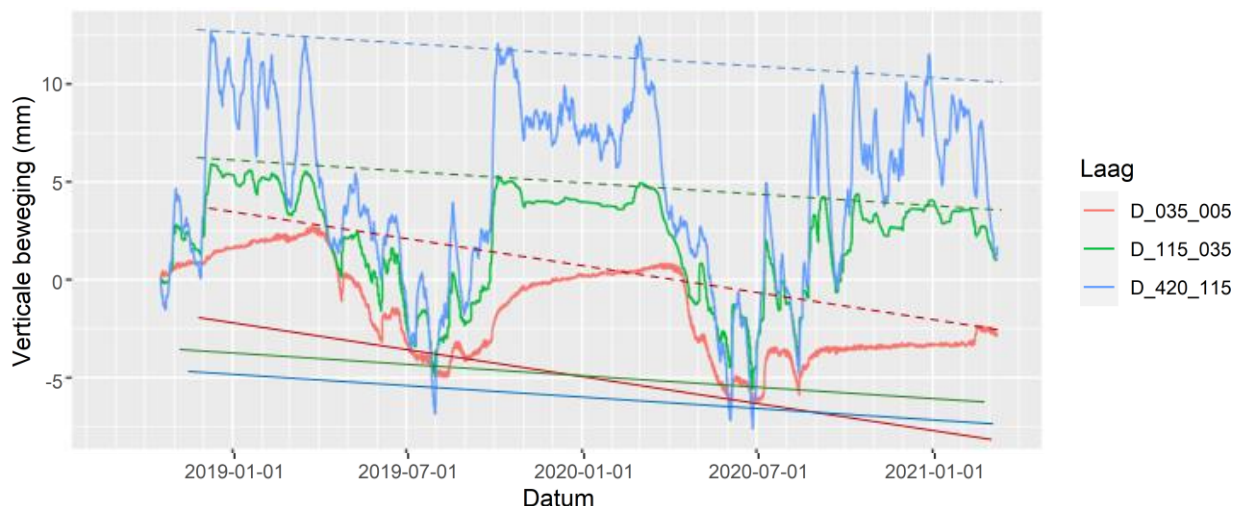
Beter zicht op de bewegingen wordt verkregen door de hoogteverandering per anker weer te geven ten opzichte van de eerste meting (Figuur 3.3). In de figuur zijn seizoenale bewegingen zichtbaar voor alle ankerniveaus binnen het slappe lagenpakket, maar ook hoogfrequentere bewegingen. Het grootste bewegingsbereik in de meetperiode van ca. 4 cm (+20 mm tot -19 mm) is geregistreerd voor het ondiepste anker (0,05 m -mv). Het bereik van het anker op 1,15 m -mv is ongeveer de helft daarvan.



Figuur 3.3 Hoogteverandering van ankerniveaus ten opzichte van de eerste meting en ten opzichte van het diepste anker (4,20 m -mv).

Figuur 3.4 toont tijdreeksen van hoogteverschillen tussen ankers. Op deze manier zijn dikteveranderingen van 'lagen' tussen de ankers zichtbaar. Een aantal karakteristieken is samengevat in Tabel 3.1.

Verticale beweging lagen
(t.o.v. initieel)
+ : laag dikker dan initieel



Figuur 3.4 Dynamiek en trend per laag (tussen ankers) (stippellijnen: bovengrens, doorgetrokken rechte lijnen: ondergrens, stippellijnen en doorgetrokken lijnen lopen evenwijdig).

Hieruit blijkt:

- Laag ca. 5 tot 35 cm -mv (dikte laag ca. 30 cm; rode lijn):
In de winter neemt de laagdikte steeds iets toe. Deze daalt dan aanzienlijk gedurende het daaropvolgende groeiseizoen. Aan het einde van het groeiseizoen vindt vervolgens een gedeeltelijk herstel plaats. De gemiddelde dikteafname is circa 2,5 mm/j, oftewel 0,8%/j (bepaald op basis van de toppen aan het einde van de natte winterperiode).
- Laag ca. 35 tot 115 cm -mv (dikte laag ca. 80 cm; groene lijn):
Ook deze laag vertoont een duidelijke seizoenale dynamiek, die groter is dan die van het ondiepere (en minder dikke!) bovenlaag. In de winter is deze laag verzadigd, in de zomer valt het bovenste deel droog (tot circa 55 cm -mv). De gemiddelde dikteafname is ca. 1 mm/j, oftewel 0,1%/j (bepaald op basis van de toppen aan het einde van de natte winterperiode).
- Laag ca. 115 tot ca 330 cm -mv (de veenlagen lopen tot ca. 330 cm -mv door, dikte laag ca. 215 cm; blauwe lijn): dit is de laag met de grootste dikte en de grootste dynamiek in dikte. Deze laag is constant verzadigd. De gemiddelde structurele dikteafname is ca. 1 mm/j, oftewel 0,05%/j (bepaald op basis van de toppen aan het einde van de natte winterperiode).

Mogelijk wijst de trend van laagdikteafname in de bovenste (en mogelijk ook de middelste laag) op processen als irreversibele krimp en oxidatie. Deze bijdragen aan maaiveldaling in deze en andere datasets staan centraal in het de NOBV en zullen ook worden onderzocht in andere projectonderdelen van de RDGHB, maar zijn geen onderdeel van deze studie (die zich richt op reversibele processen). Met de mogelijkheid dat de trend(s) in de Rouveen-data voortkomen uit irreversibele processen moet wel rekening worden gehouden. Omdat de oorzaak van de trend niet vaststaat, wordt er geen trendcorrectie toegepast.

Figuur 3.4 laat zien dat de diepere lagen het meest bijdragen aan de maaiveldynamiek (som van alle drie de lagen). Dat wijst op een significante bijdrage van poro-elastische volumeveranderingen beneden de grondwaterstand. Het feit dat de diepere lagen een aanzienlijk grotere dikte hebben dan de ondiepste laag speelt daarin mee.

Tabel 3.1 Overzicht jaarlijkse en trend in bodembeweging.

Laag cm-mv	Dikte mm	Dynamiek jaarlijks mm	Dynamiek jaarlijks %/j*	Daling trend mm per jaar	Daling trend %/j*
Ca. 5-35	Ca. 300	6	2	2.5	0.8
Ca. 35-115	Ca. 800	10	1.3	1	0.1
Ca. 115-330	Ca. 2150	17.5	0.8	1	0.05

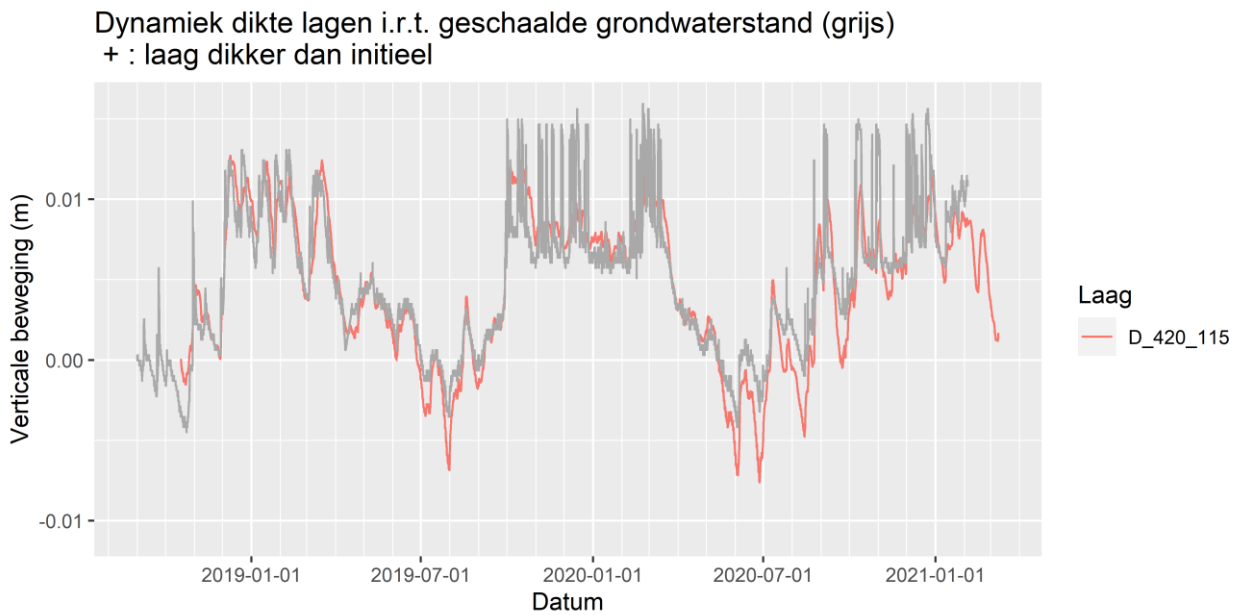
*Percentage van de dikte.

3.3 Maaiveldbeweging en grondwaterstand

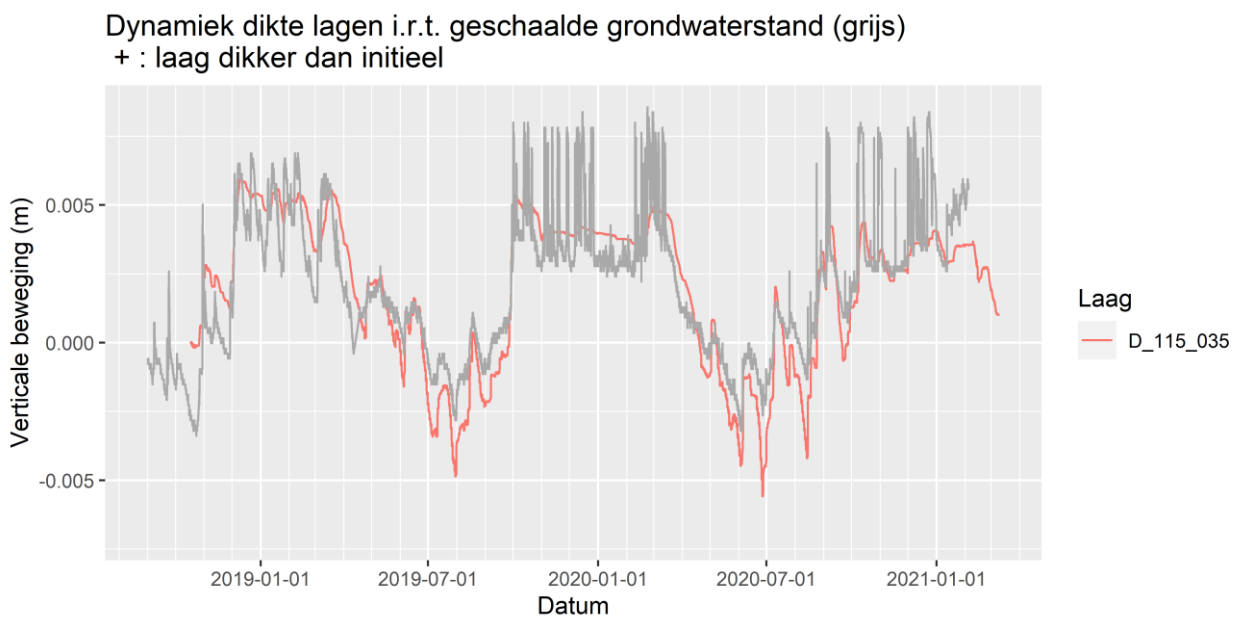
In Figuur 3.5, Figuur 3.6 en Figuur 3.7 is de dynamiek van de laagdikten en de grondwaterstand weergegeven voor een peilbuis ca. 14,5 m ten westen van de extensometer, waarbij de grondwaterstand zodanig geschaald is dat deze dezelfde gemiddelde en standaarddeviatie als de laagdikten krijgen. Op deze manier wordt inzicht verkregen in de relatie tussen de dynamiek in de grondwaterstand en de dynamiek in de dikte van de lagen. Hiervoor is de onderstaande conversie toegepast:

$$h_{o,scaled} = \frac{stdev(D_m)}{stdev(h_o)} \cdot (h_o - mean(h_o)) + mean(D_m) \quad (6)$$

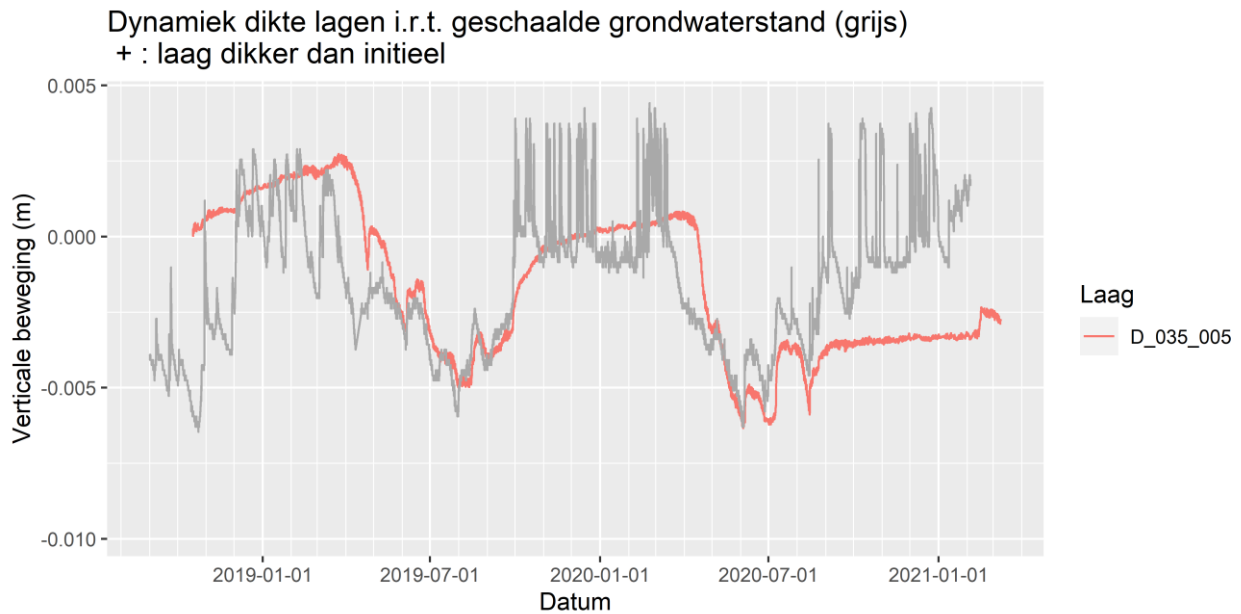
met D_m : dynamiek dikte; h_o : grondwaterstand.



Figuur 3.5 Relatie grondwaterstand en dynamiek dikte laag 115 tot 420 cm -mv.



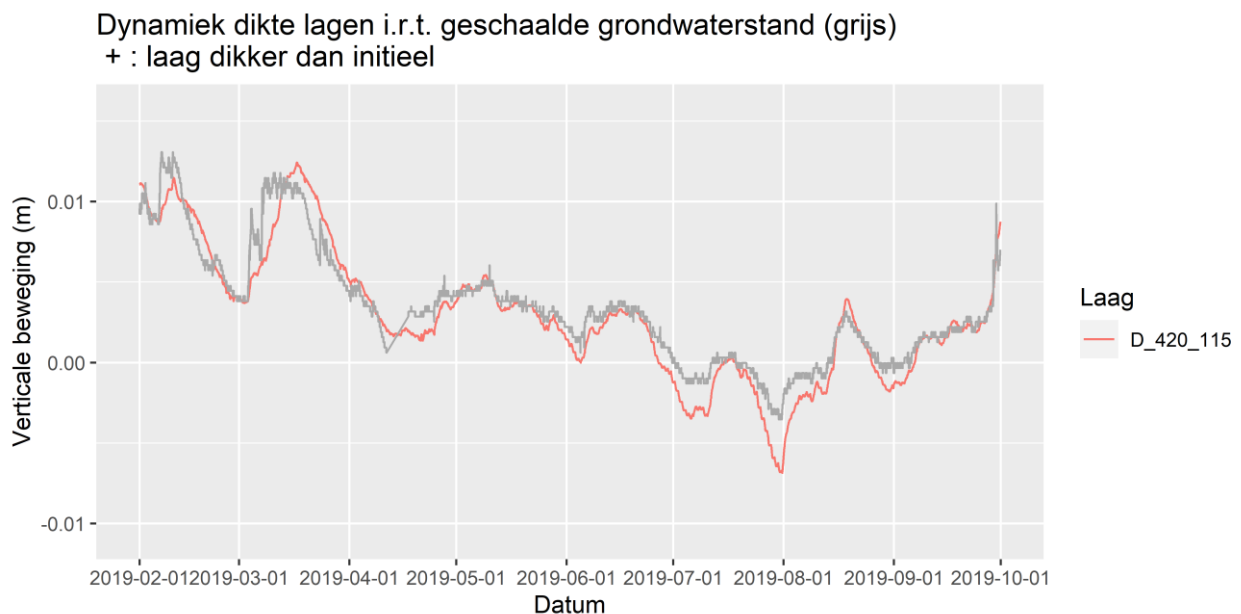
Figuur 3.6 Relatie grondwaterstand en dynamiek dikte laag 35 tot 115 cm -mv.



Figuur 3.7 Relatie grondwaterstand en dynamiek dikte laag 5 tot 35 cm -mv.

In de figuren voor de lagen 115-420 cm -mv en 35-115 cm -mv is er een duidelijke relatie tussen grondwaterstand en dynamiek in de dikte. Er is een faseverschil aanwezig van enkele dagen tot twee weken (Figuur 3.8).

Het diepe (volledig verzadigde) deel reageert snel op veranderingen van de waterspanning/ grondwaterstand zoals die is gemeten in de peilbuis². Ook is er weinig verschil tussen de op- en neergaande snelheid. Het ondiepe deel (grotendeels onverzadigd) reageert veel trager op veranderingen van de grondwaterstand. Het midden diepe deel is deels verzadigd en deels onverzadigd. Dit is een combinatie van bovenstaande zaken, al lijken de veranderingen in het verzadigde deel dominant.



Figuur 3.8 Relatie grondwaterstand en dynamiek dikte laag 115 tot 420 cm -mv over een gedeelte van 2019.

² Dit is relevant, want peilbuismetingen geven alleen een schatting van de freatische grondwaterstandveranderingen, omdat het een filter met eindige lengte betreft en grotendeels onder het freatisch niveau.

4 Simulatie bodemvocht en krimp/zwel

4.1 Algemeen

Input voor SWAP zijn zowel variabele drijvende krachten (neerslag, verdamping, temperatuur, oppervlaktewaterstanden) als vaste omgevingsfactoren (bodemopbouw, bodemeigenschappen), maar ook gegevens omtrent de gewassen en de ontwikkeling daarvan. De gemeten toestandsvariabelen (grondwaterstand, drukhoogten, maaiveldverandering en watergehalten) zijn te gebruiken voor de kalibratie van het model. Bij de kalibratie zijn er verschillende onzekere parameters die geoptimaliseerd worden.

De modelinvoer voor SWAP kan worden onderverdeeld in drie hoofdgroepen.

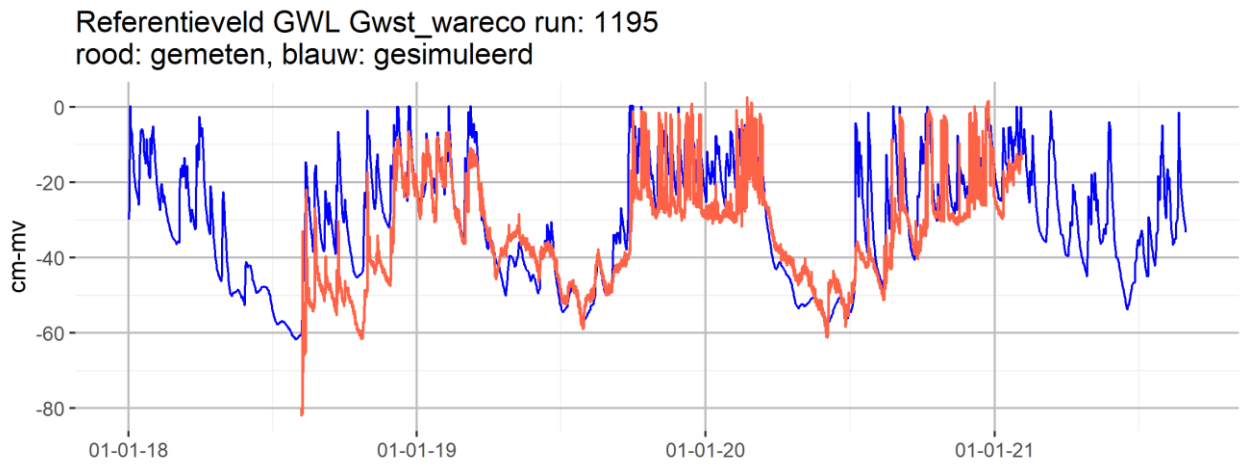
- Waarden van modelparameters: dat zijn invoerwaarden die meestal constant blijven gedurende de berekeningen en die de processen in het model sturen. Het zijn de bodemeigenschappen, zoals hydraulische karakteristieken in SWAP die worden gemeten in het lab. Het zijn ook de knoppen waaraan de gebruiker draait bij het kalibreren.
- Initiële waarden van toestandsvariabelen: dat zijn de waarden die de begintoestand van het systeem aangeven, bijvoorbeeld vochtgehalten en temperaturen in SWAP.
- Randvoorwaarden: dat zijn de processen aan de randen die het model aandrijven, zoals neerslag en verdamping en stijghoogten inclusief interactie met oppervlaktewater, al dan niet via drains.

Een overzicht van de diverse invoerparameters is weergegeven in Bijlage 1. Het bodemvochtmodel is gekalibreerd met behulp van de gemeten diepe grondwaterstand en de bodemvochtmetingen op diverse dieptes over de periode 2019-2021. Bij de kalibratie is gevarieerd met diverse parameters om te beoordelen hoe gevoelig bepaalde parameters zijn en of wijziging van de parameters tot een betere fit leiden (Bijlage 2). Vervolgens is het zwel-krimpmodel gekalibreerd met behulp van de gegevens van de meest ondiep bemeten laag van de extensometer (5 tot 35 cm -mv).

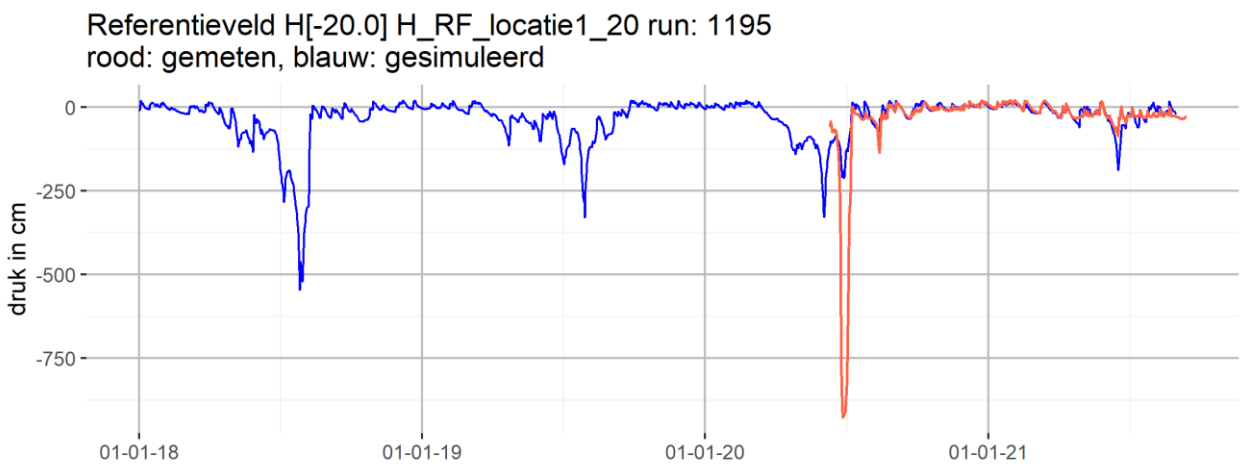
4.2 Bodemvocht

De run met de beste performance in vergelijking met de meetgegevens (grondwaterstanden en drukhoogten) is de variant met als bovengrond B10 en B11 voor laag 1 en 2 én de krimpkarakteristieken gebaseerd op Bronswijk & Evers-Vermeer (1987). Deze is als basisrun genomen.

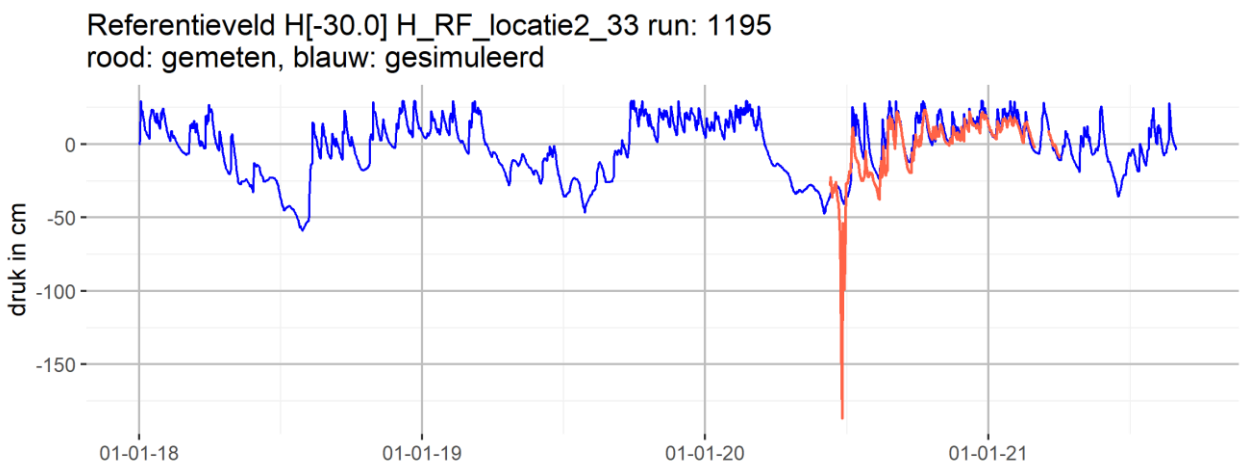
In de onderstaande figuren zijn de simulatieresultaten vergeleken met de metingen. Hieruit blijkt dat de simulaties heel goed de metingen weten te imiteren. Er zijn enkele verschillen, zoals enkele scherpe dalingen in drukhoogten op 20 en 33 cm -mv, die niet of niet geheel worden gesimuleerd. Opgemerkt wordt dat vooral die pieken erg gevoelig zijn voor kleine veranderingen in vochtgehalte die sterk lokaal variëren (zie Figuur 4.3 en Figuur 4.4, waar op 33 en 35 cm -mv wel en niet een piek in de drukhoogte is gemeten eind juni 2020). Dit betekent dat het simuleren van een scherpe daling belangrijker is dan de exacte grootte daarvan.



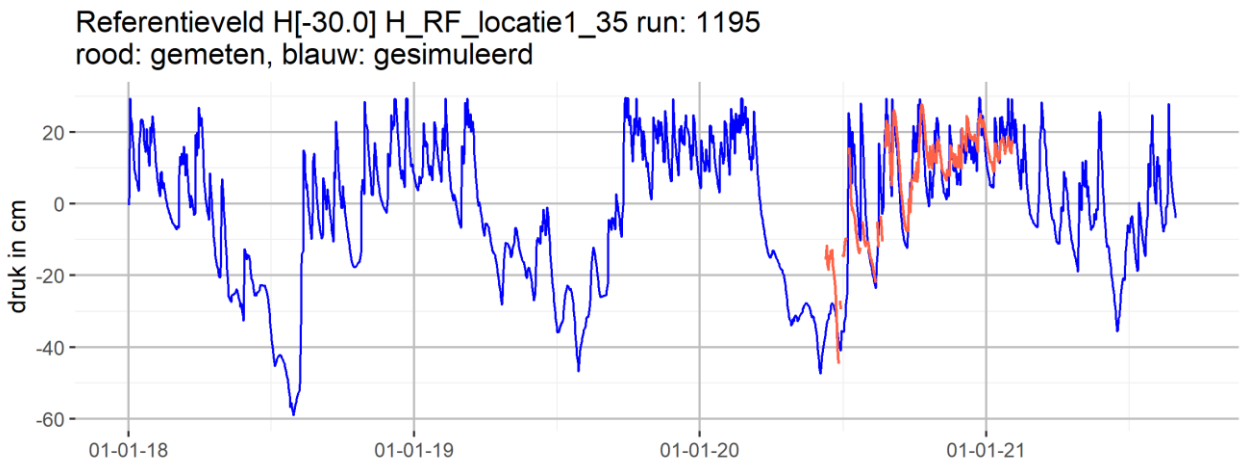
Figuur 4.1 Gemeten en berekende grondwaterstand (referentieveld).



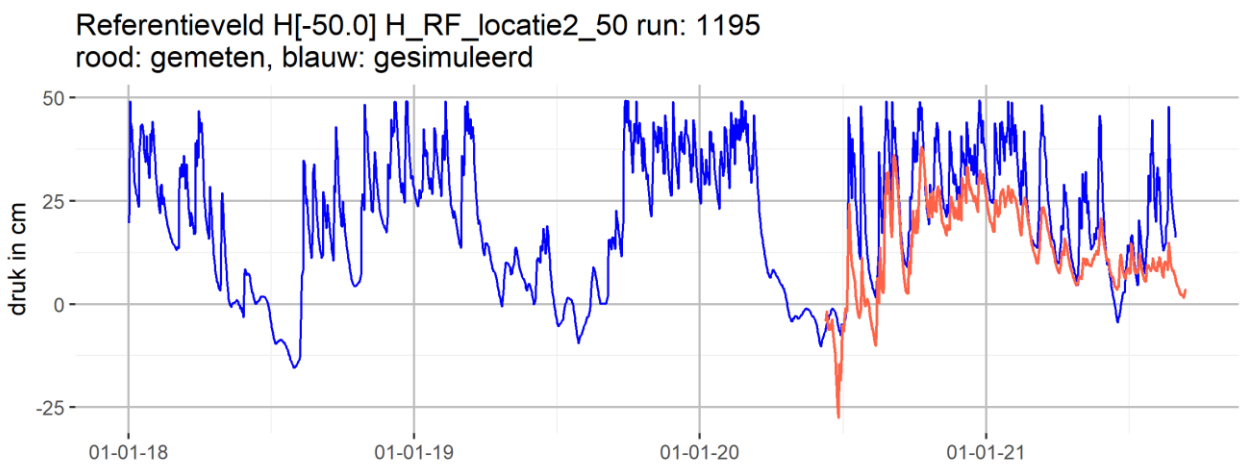
Figuur 4.2 Gemeten (op 20 cm -mv) en berekende drukhoogte (op 20 cm -mv) (referentieveld).



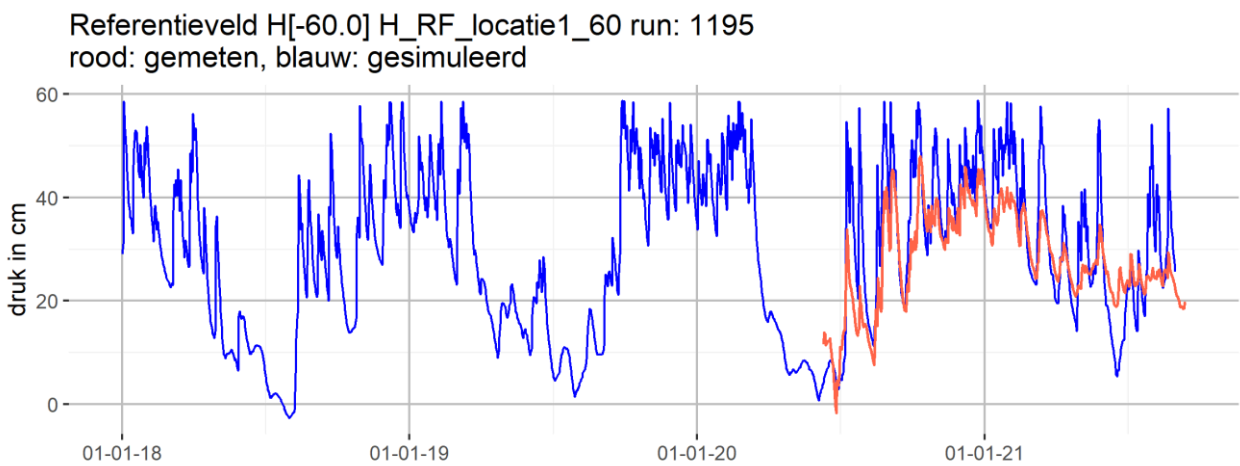
Figuur 4.3 Gemeten (op 33 cm -mv) en berekende drukhoogte (op 30 cm -mv) (referentieveld).



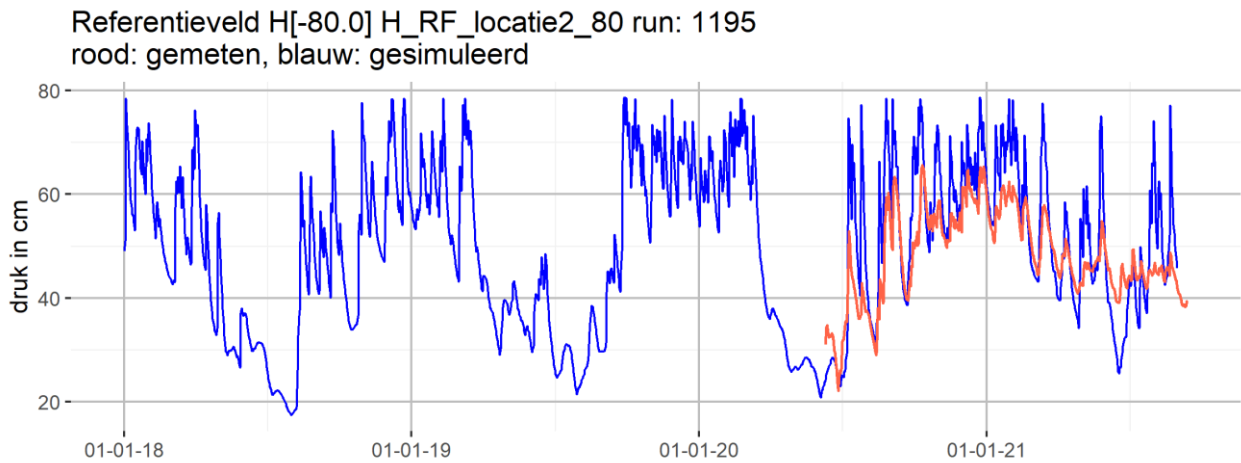
Figuur 4.4 Gemeten (op 35 cm -mv) en berekende drukhoogte (op 30 cm -mv) (referentieveld).



Figuur 4.5 Gemeten (op 50 cm -mv) en berekende drukhoogte (op 50 cm -mv) (referentieveld).



Figuur 4.6 Gemeten (op 60 cm -mv) en berekende drukhoogte (op 60 cm -mv) (referentieveld).

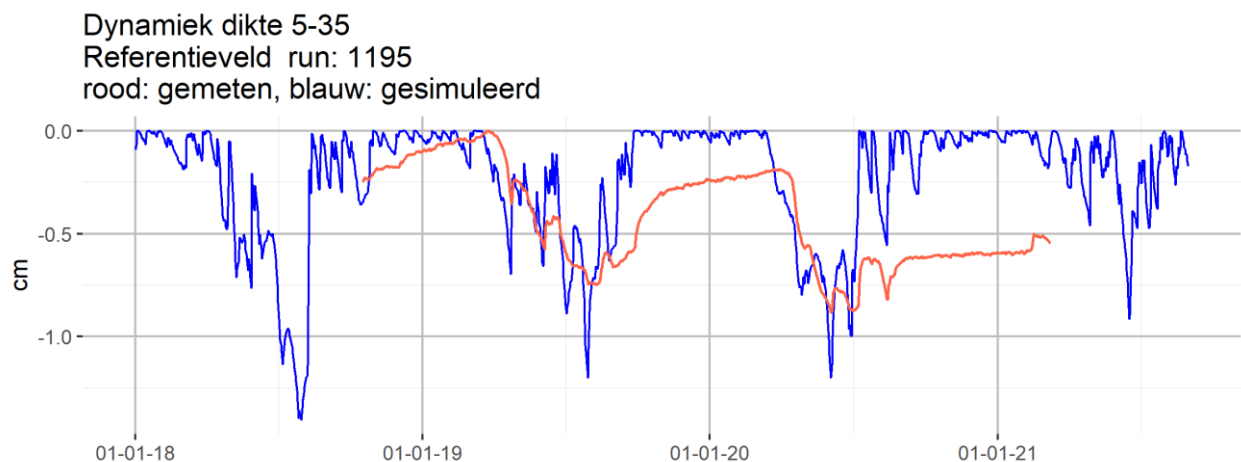


Figuur 4.7 Gemeten (op 80 cm -mv) en berekende drukhoogte (op 80 cm -mv) (referentieveld).

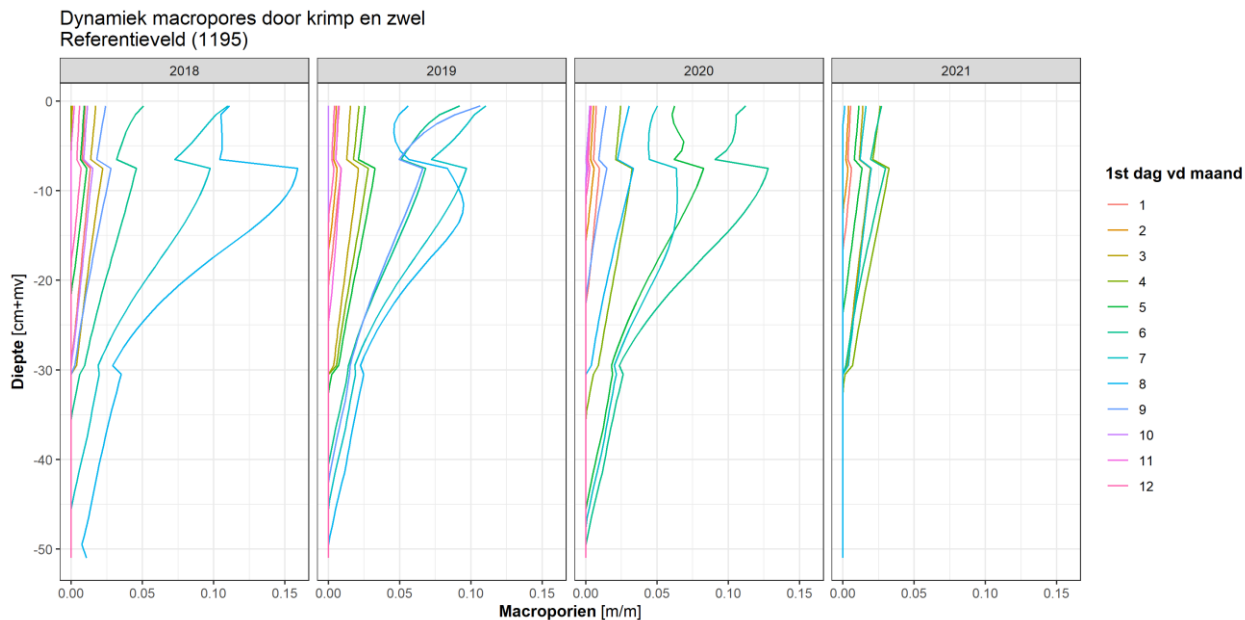
4.3 Krimp en zwel

In Figuur 4.8 is het effect van de krimp en zwel weergegeven op de verticale bodembeweging. De simulatie berekent geen trend over de jaren heen en laat een grotere dynamiek zien dan waargenomen in de metingen. In Figuur 4.9 is het effect van de krimp en zwel weergegeven op de horizontale bodembeweging. Hieruit blijkt dat:

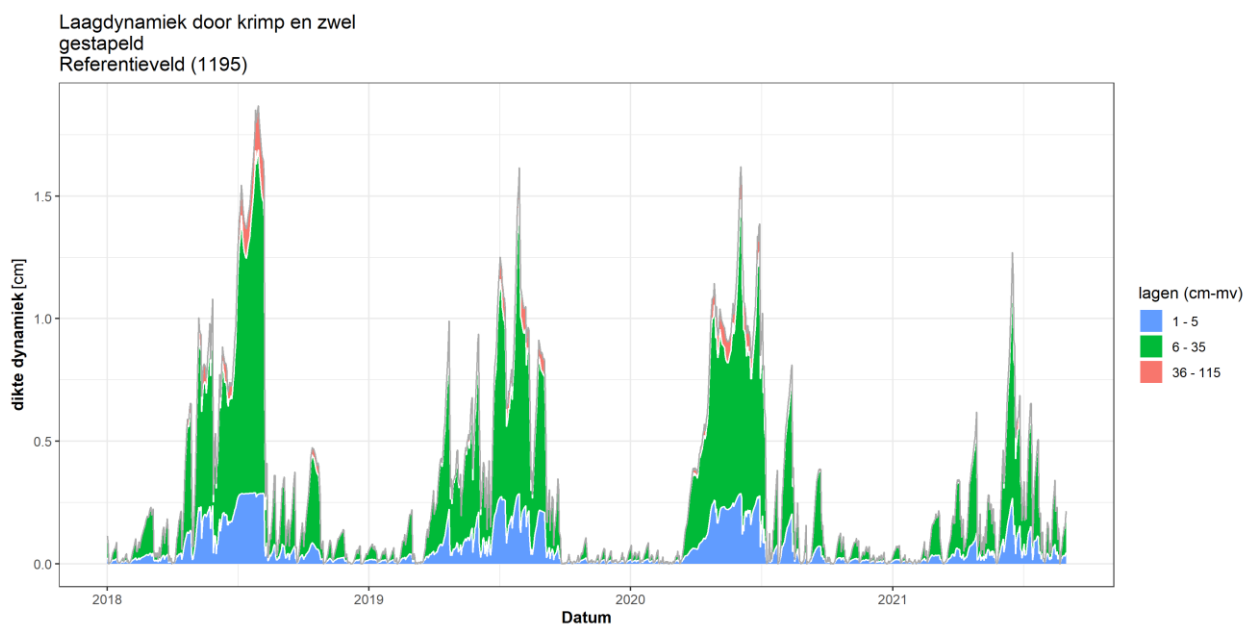
- De krimp en zwel vooral op de ondiepere lagen tot circa 30 cm -mv effecten heeft.
- In de droge jaren 2018 t/m 2020 macroporiën circa 3 à 4 maanden aanwezig waren (meer dan 10% van het oppervlak aan maaiveld). In het nattere jaar 2021 bijna geen macroporiën aanwezig waren (minder dan 5%). De specifieke jaarlijkse omstandigheden zijn dus zeer bepalend voor het voorkomen van macroporiën.
- Ter controle: het oppervlak horizontale krimp bedraagt voor 2018 ca. $0,15 \times 0,5 \times 0,5 = 0,0375$ m. De verticale krimp bedraagt de helft hiervan (geom_fac = 3) = 0,019 m, dat is ook gelijk de totale berekende zakking van het maaiveld (zie Figuur 4.10). In 2021 is de zwel-krimpcomponent veel beperkter.



Figuur 4.8 Gemeten en berekende verticale krimp voor laag 5-35 cm -mv (referentieveld, run 1195).



Figuur 4.9 Berekende horizontale krimp voor laag 5-35 cm -mv (referentieveld,) (voor januari 2018 tot en met augustus 2021).

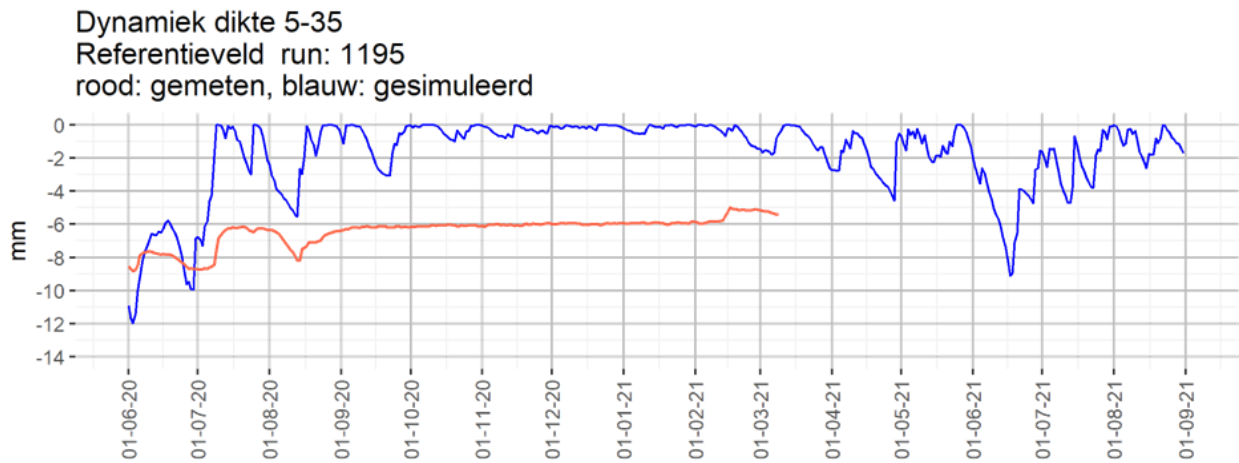


Figuur 4.10 Berekende verticale krimp voor de verschillende lagen (referentieveld, run 1195, gestapeld weergegeven).

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met doorlaatfactor laag 1 kleiner, grotere aggregaten, minder berging op mv, minder infiltratie vanuit macroporiën (laag 1-3), geen Darcy-uitwisseling tussen macroporiën en aggregaat. Hieruit bleek dat dit slechts beperkte effecten had op de berekende grondwaterstanden en krimp- en zwelgedrag.

4.4 Analyse processen krimp-zwel

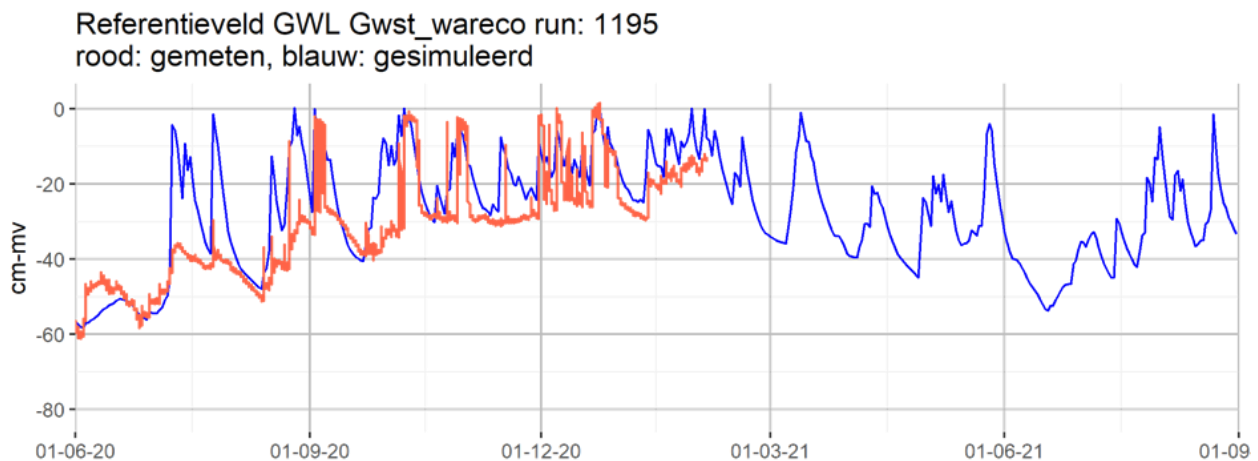
In vergelijking met de simulatie van de krimp-zwel zien we in de metingen een trager terugveren van de bodemmatrix. Ook de krimp laat in de metingen een grotere traagheid zien dan gesimuleerd wordt (de irreversibele daling buiten beschouwing latend).



Figuur 4.11 Gemeten en berekende verticale krimp voor laag 5-35 cm -mv (detail voor periode met drukhoogtemetingen, zie hieronder).

In de simulaties zien we een veel sneller terugveren van de bodemmatrix (Figuur 4.11). Er zijn twee processen te onderscheiden. Aan de ene kant de snelheid van opname van vocht door het aggregaat en ten tweede de starheid van de uitgedroogde matrix zelf en daardoor het trage opzwellen. Het betreft twee vormen van hysteresis: in de waterretentie en in zwel-krimpproces. Hydrofobie is een proces dat hieraan kan bijdragen. Hydrofobie kan ook effect hebben op de bypass-flow (zie hoofdstuk 6).

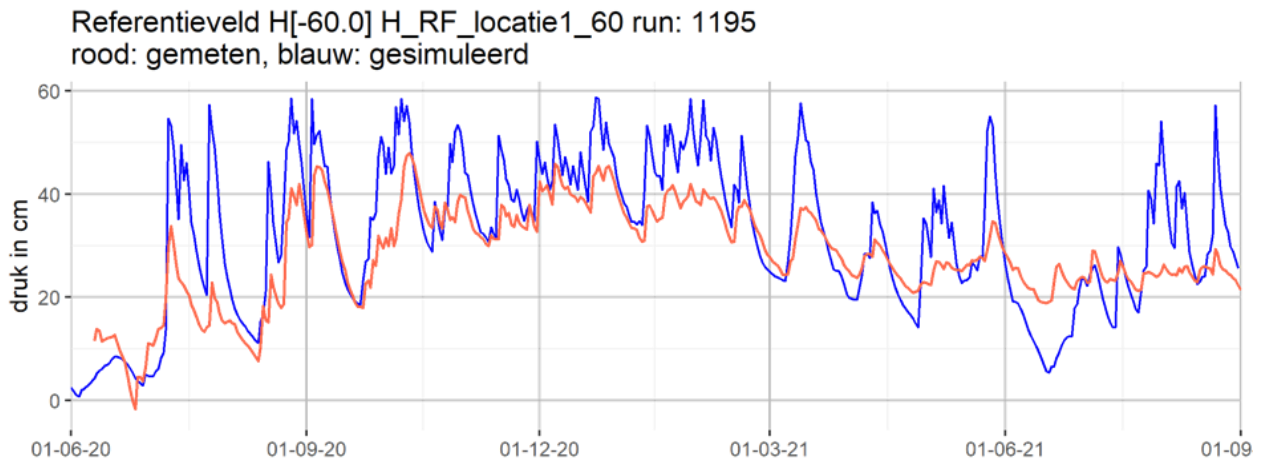
Uit de onderstaande figuur blijkt dat de gemeten grondwaterstand vaak trager reageert dan de gesimuleerde grondwaterstand, behalve bij piekneerslagen wanneer kortstondige pieken in de gemeten grondwaterstanden te zien zijn. Wellicht is de effectieve berging in werkelijkheid groter.



Figuur 4.12 Gemeten en berekende grondwaterstand (gemeten: Wareco-peilbuis).

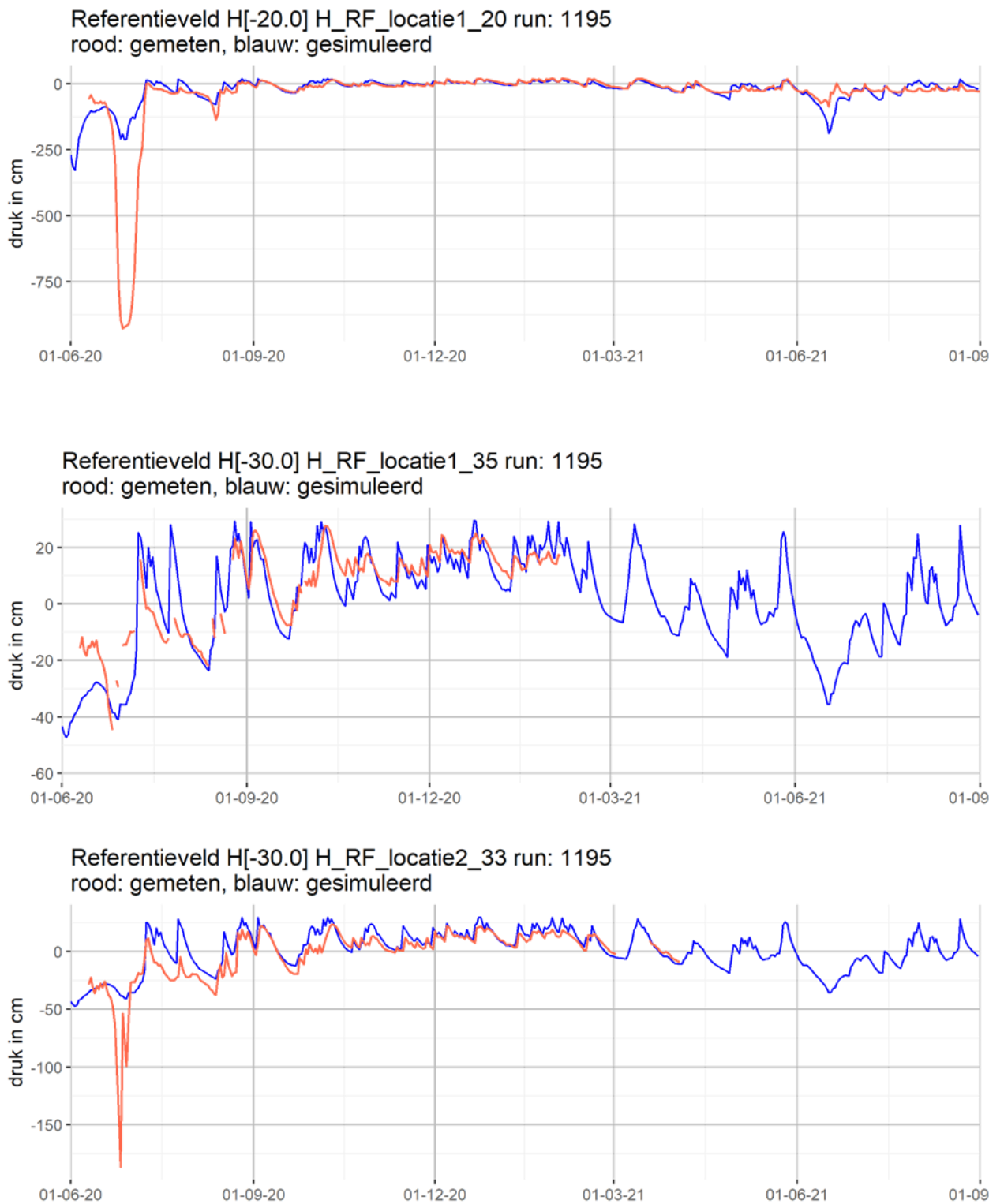
Ook de drukhoogten op 60 cm hebben een directe koppeling met de grondwaterstand. Deze is hieronder weergegeven. Hieruit blijkt dat de gesimuleerde dynamiek groter is dan de gemeten dynamiek. Dit kan verschillende oorzaken hebben:

- Directe voeding van grondwater via macroporiën is in het model groter dan in werkelijkheid.
- Bodemfysische relatie zorgt voor te weinig bergingsruimte.



Figuur 4.13 Gemeten en berekende drukhoogte op een diepte van 60 cm -mv (deze is sterk gecorreleerd met de grondwaterstand).

De vraag is of het model goed het vochtgehalte simuleert. Directe metingen van het vochtgehalte hebben we niet. Wel zijn drukhoogten gemeten, die hier direct mee gekoppeld zijn. Een voordeel van de meting van drukhoogten is dat deze een continu profiel hebben en niet geschaald zijn. Bij vochtgehalte kan er een duidelijke sprong zitten bij een laagscheiding. In de onderstaande figuren zijn de drukhoogten weergegeven. Hieruit blijkt dat de drukhoogten behoorlijk goed worden gesimuleerd. Grotere afwijkingen komen voor in perioden met droogte. Dit voorkomen van lagere drukhoogten loopt in de onderstaande figuren niet synchroon gedurende de drogere perioden. Dit geeft aan dat de variatie van plek tot plek sterk kan verschillen.



Figuur 4.14 Gemeten en berekende drukhoogten voor diepten tussen 20 en 30 cm -mv.

De grondwaterstanden worden qua dynamiek redelijk gesimuleerd, maar reageren in werkelijkheid minder snel. Aangezien de drukhoogten behoorlijk goed worden gesimuleerd, wordt aangenomen dat ook de vochtgehalten behoorlijk goed gesimuleerd worden. Dit voedt dan het vermoeden dat bij zwel vooral het vertraagd terugveren van de matrix een rol speelt. Ook bij krimp lijkt er sprake van een trager reageren.

Om mogelijk nieuw inzicht in de processen te verkrijgen, zijn er momenteel proeven in uitvoering, waarbij aan bodemkolommen metingen worden verricht. Tegelijkertijd worden hierbij nieuwe concepten in SWAP

geïmplementeerd, waaronder het definiëren van een separate zwelrelatie. Mogelijk dat met deze concepten de simulaties verbeterd kunnen worden.

Een tweede mogelijkheid is dat in een nabewerking een tijdsvertraging in de laagdynamiek wordt gebracht. De moeilijkheid is dan wel of deze aanpak eenvoudig geëxtrapoleerd kan worden naar andere sites (oftewel of de resultaten opgeschaald kunnen worden).

Ten derde zou mogelijk de traagheid in de krimp en de zwel op een fundamenteel andere manier beschreven moet worden. Hoe precies is niet te voorzien: wellicht moet dan het effect van hydrofobie op doorlaatfactor worden meegenomen en wellicht dat de droogtegraad ook de persistentie van hydrofobie beïnvloedt.

5 Simulatie elastische vervorming

5.1 Methode 1: Met waterspanningen via SWAP en externe berekeningen in Excel

5.1.1 Parametrisatie

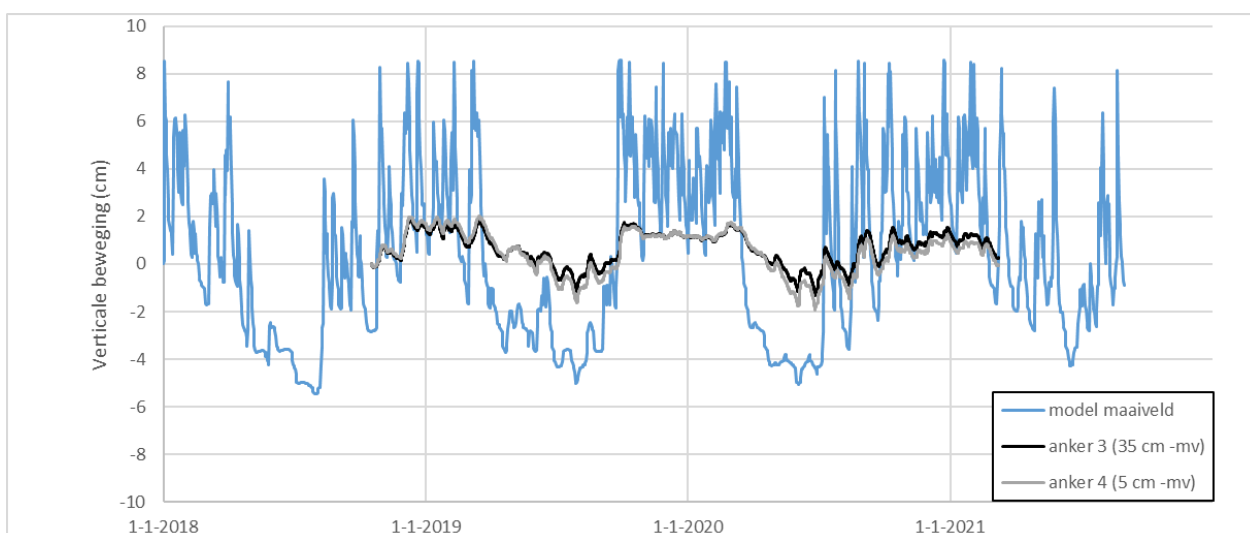
Benodigde parameters zijn volumetrisch gewicht γ en recompressieratio RR . De gebruikte waarden zijn gegeven in Tabel 5.1. De waarden voor RR zijn gebaseerd op de referentiewaarden van de Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut in de geotechnische normering voor ontwerp van gebouwen en civieltechnische werken (NNI, 2012; Tabel 2.b). Veen heeft de hoogste elasticiteit en is ook de dikste bodemlaag die bijdraagt aan de maaiveldbeweging. De gekozen waarde voor veen valt in de range voor matig voorbelast slap veen (RR -waarden 0,10-0,15).

Tabel 5.1 Parametrisatie voor methode 1; basisrun.

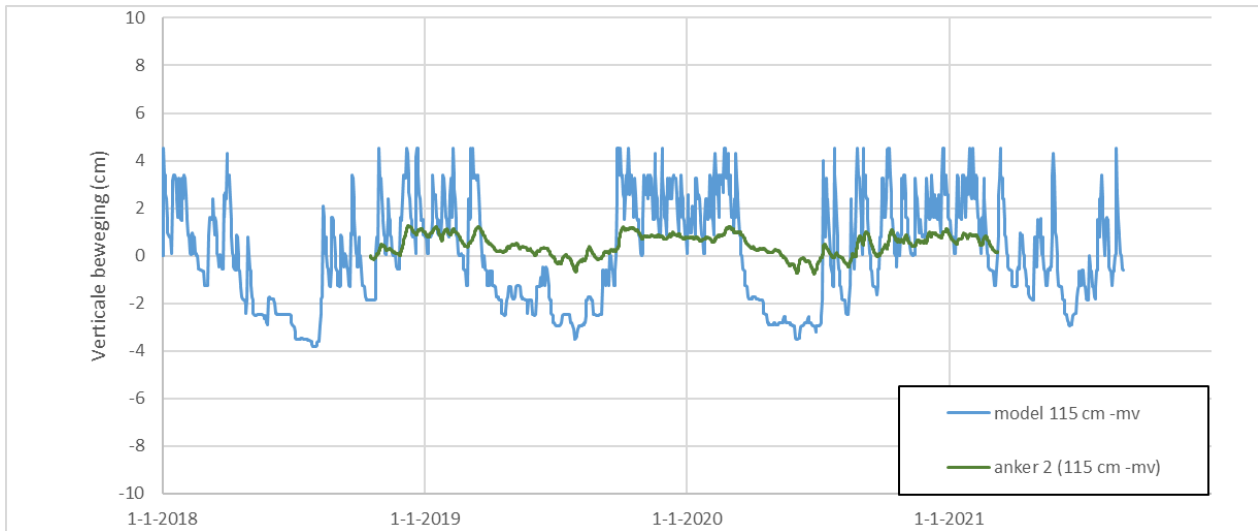
Dikte (cm)	Lithologie	g (kN/m ³)	RR (-)
7	Lichte klei	15	0,04
23	Matig zware klei	17	0,05
282	Mesotroof en eutroof veen	11,5	0,12
8	Zandige leem	19	0,04
280	Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	20	0,00

5.1.2 Resultaten

De resultaten laten zien dat de gemodelleerde dynamiek een te groot bereik heeft in vergelijking met de dynamiek die de ankers laten zien (Figuur 5.1, Figuur 5.2).



Figuur 5.1 Modelberekende maaivelddynamiek methode 1 (basisrun) en beweging van de ondiepste extensometer ankers.



Figuur 5.2 Modelberekende dynamiek op 115 m -mv; methode 1 (basisrun) en beweging van het extensometer anker op 115 m -mv.

5.2 Methode 2: Poro-elastisch grondwatermodel

5.2.1 Schematisatie en parametrisatie

De top van het model correspondeert met de laagste grondwaterstand: 60 cm -mv. In het model zijn twee lagen met onderscheidende parameterwaarden opgenomen, de veenlaag en daaronder een inelastische zandlaag (Tabel 5.2).

Tabel 5.2 Parametrisatie voor methode 2 (basis set).

Dikte (cm)	Top (cm mv)	Lithologie	g (kN/m ³)	RR (-)	K _z (m/d)
250	-60	Veen	11,5	0,12	0,01
100	-310	Zand	20	0,00	5

De tijdsafhankelijke totale druk aan de top van het model wordt gesimuleerd op basis van een 60 cm dikke laag waarin het volumetrisch gewicht onder en boven het freatische niveau respectievelijk 14 en 13 kN/m³ bedraagt. Dit correspondeert met een *specific yield* (freatische bergingscoëfficiënt voor volledige drainage) van 10%.

De initiële waterspanning in het model correspondeert met het initiële freatische niveau (randvoorwaarde) onder aanname van hydrostatische condities (geen kwel of wegzijgingscondities in de verzadigde bodem). Het werkelijke initiële waterspanningsprofiel zal daar iets van afwijken, doordat de initiële stijghoogte iets afwijkt van het initiële freatische niveau en door traagheid in het systeem waardoor ook dagen voorafgaand aan de metingen van invloed zijn. Na enkele dagen tot een week is de invloed van potentiële onnauwkeurigheden in het gebruikte initiële waterspanningsprofiel verdwenen; het model 'heeft zich dan ingeregeld'.

5.2.2 Runs

Er zijn drie basisruns gedaan (Tabel 5.3).

- Run A dient als check op consistentie met methode 1. Daarvoor is de elastische berging in de grondwaterberekening op nul gesteld, is de 'bovenlast' tijdonafhankelijk en zijn SWAP-resultaten voor freatisch niveau en stijghoogte gebruikt voor de top- en onderrandvoorwaarde.

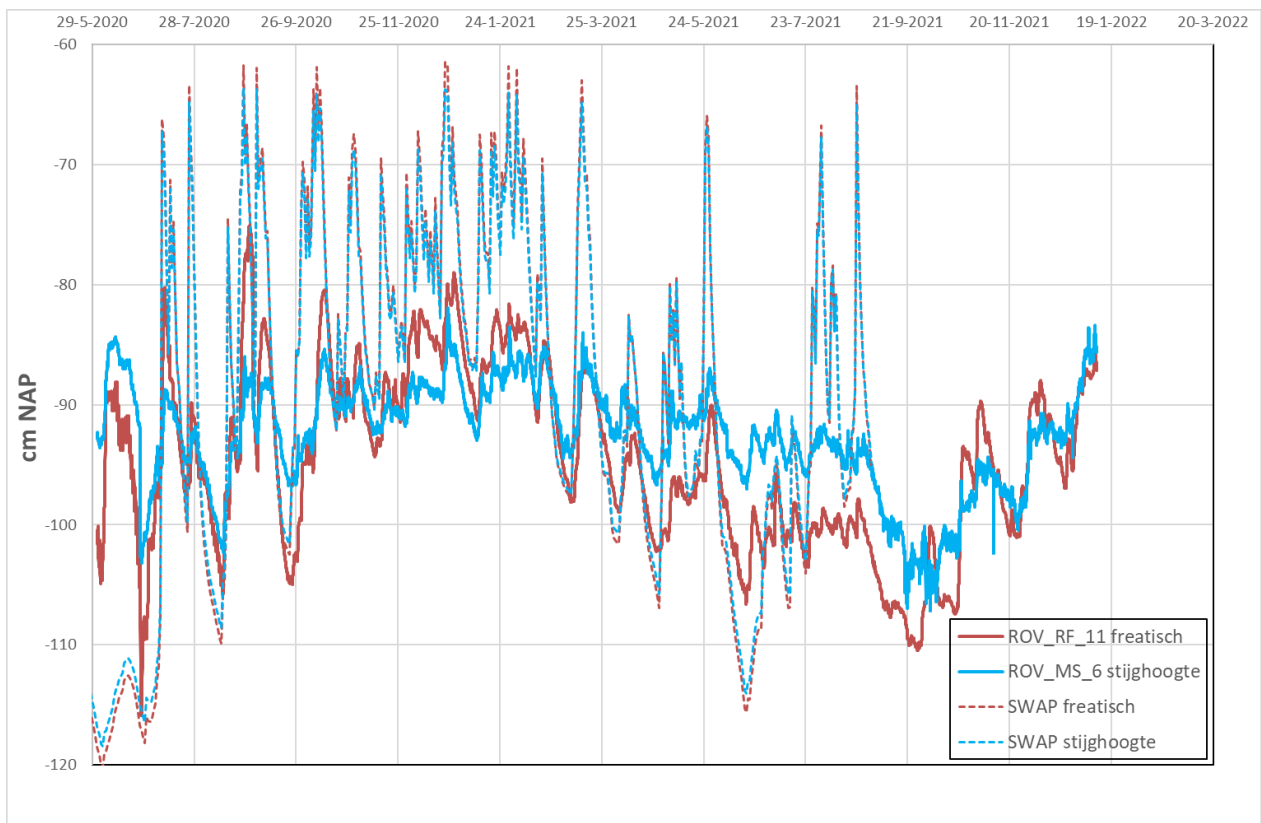
- Run B is een volledige run met de poro-elastische bergingseffecten.
- Run C is een run waarin de (peilbuis)gemeten reeksen voor het freatisch niveau en voor de stijghoogte in het watervoerende pakket zijn toegepast. Voor het freatisch niveau is peilbuis ROV_RF_11 gebruikt; in de SWAP-modellering is een peilbuis van Wareco gebruikt. ROV_RF_11 ligt dicht bij de extensometer (ca. 4 m), maar bevat een kortere tijdreeks.

Daarnaast zijn voor run C wat varianten doorgerekend waarin de doorlatendheid van veen en de recompressie-coëfficiënt zijn gevarieerd om een indruk te krijgen van de gevoeligheid voor deze parameters.

Figuur 5.3 toont de randvoorwaarden die zijn toegepast.

Tabel 5.3 Runs

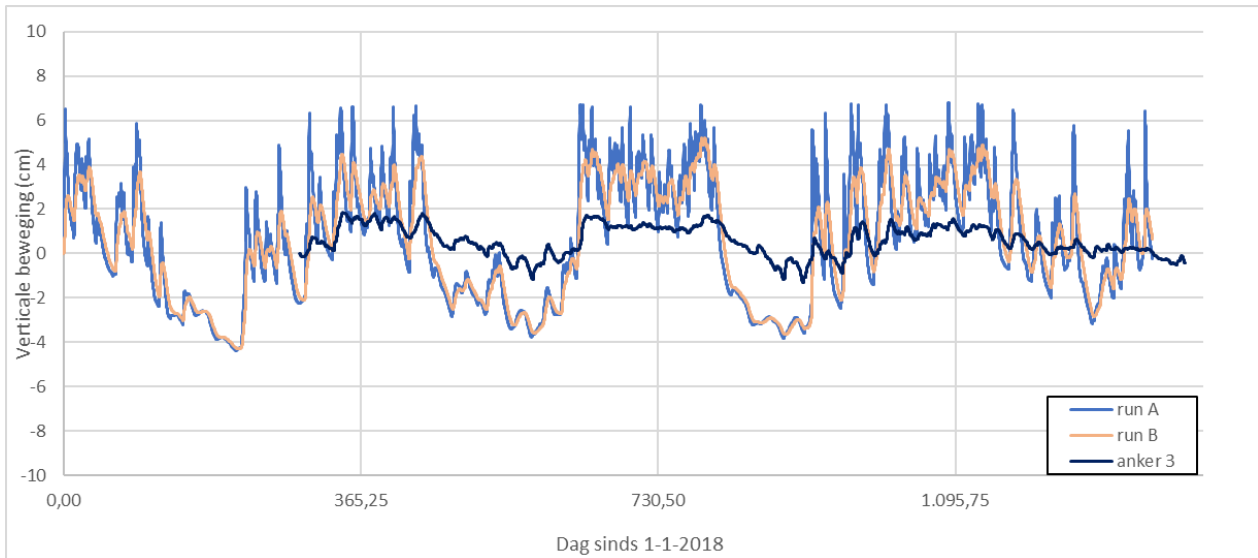
Run	Bovenrandvoorwaarde	Benedenrandvoorwaarde	Aanpassing t.o.v. basis parameterset
A	SWAP freatisch niveau	SWAP stijghoogte WVP	Sse = 0 m ⁻¹ ; s _{stop} = constant
B	SWAP freatisch niveau	SWAP stijghoogte WVP	geen
C	Gemeten freatisch ROV_RF_11	Gemeten stijghoogte ROV_MS_6	geen



Figuur 5.3 SWAP gemodelleerd freatisch niveau en stijghoogte (op basis van een freatische buis op ca. 14,5 m van de extensometer) en gemeten freatisch niveau in de meetplot (5 m van de extensometer) en gemeten stijghoogte in het zandpakket in een aanpalend perceel met onderwaterdrains. Het maaiveld bij ROV_RF_11 ligt op ca. -56 à -57 cm NAP in het voorjaar.

5.2.3 Resultaten

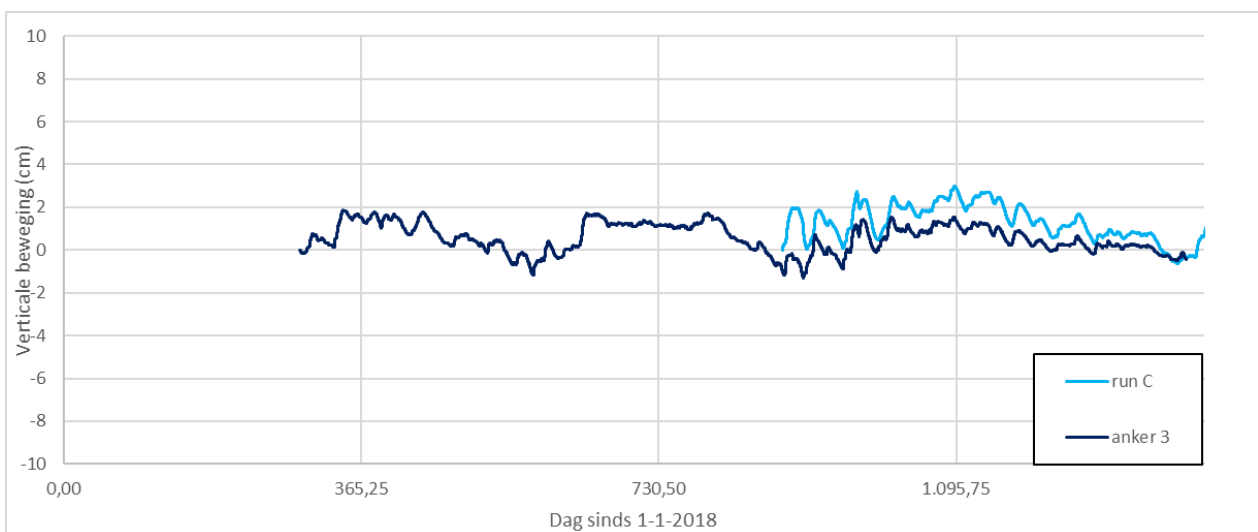
Het resultaat voor runs A en B is weergegeven in (Figuur 5.4). De dynamiek voor run A, zonder elastische berging, is zeer vergelijkbaar met methode 1 (Figuur 5.1). Het bereik van beweging is iets geringer. Dat is in overeenstemming met het feit dat bijdragen van elastische vervorming boven de diepste grondwaterstand hier niet aanwezig zijn.



Figuur 5.4 Modelberekende maaiveldynamiek methode 2, runs A en B en beweging van anker 3 (35 cm -mv). De gesimuleerde dynamiek is voor 60 cm -mv (top rekenmodel).

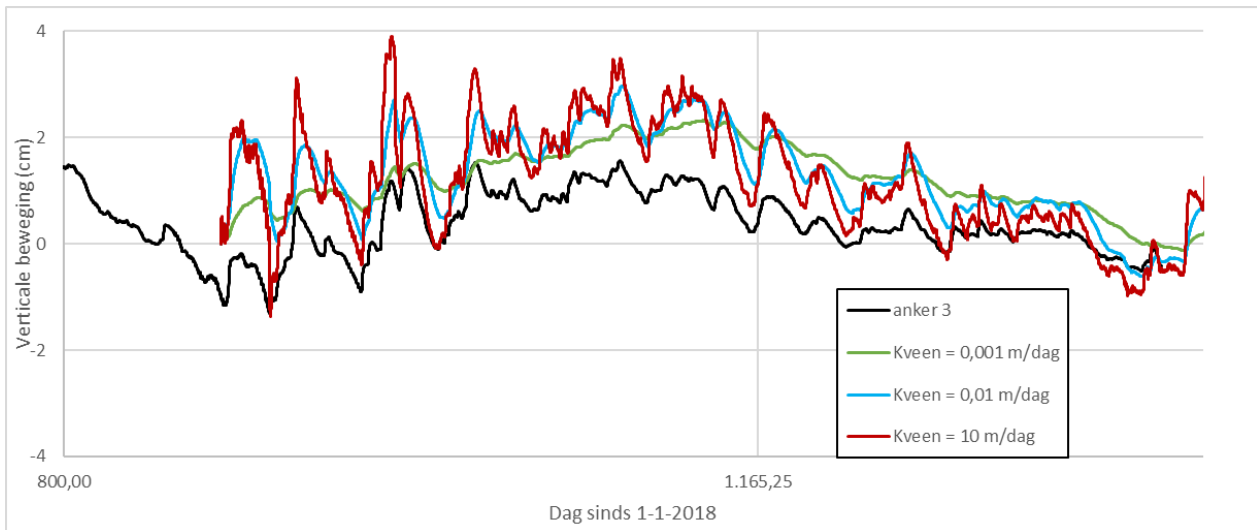
De tijdreeks voor run B laat zien dat de elastische berging een dempend effect heeft op de hoogfrequente componenten van beweging (vergelijk runs A en B). Dat wordt veroorzaakt door het feit dat de waterspanningsveranderingen in centrale delen van de veenlaag iets vertraagd en gedempt worden ten opzichte van de drijvende spanningsveranderingen aan de boven- en onderzijde van het veenpakket. Het bereik van beweging is daardoor iets kleiner, maar nog steeds erg groot in vergelijking met de beweging van anker 3. Er is wel een goede correlatie in de bewegingsrichting (op basis van visuele beoordeling).

Figuur 5.5 toont het resultaat voor run C op dezelfde schaal als runs A en B (Figuur 5.4). Het bereik van de beweging sluit beter aan bij de geregistreeerde beweging van anker 3 dan runs A en B. Dat wordt vooral veroorzaakt door het feit dat de dynamiek van de gebruikte peilbuisreeksen geringer is dan de dynamiek van de freatische grondwaterstand en van de stijghoogte uit de SWAP-modellering. Het feit dat het model systematisch een iets hogere waarde laat zien dan anker 3 heeft geen relevantie; voor het model is de beweging ten opzichte van het startniveau berekend; de waarnemingen hebben een ander, eerder en iets lager start- of referentieniveau. Omdat de initiële waterspanningen in de berekeningen vrij ad hoc zijn gekozen en niet helemaal in balans zijn met de randvoorwaarden in de periode ervoor, zijn er ook enkele weken nodig voor het model 'zichzelf heeft ingeregeld'.



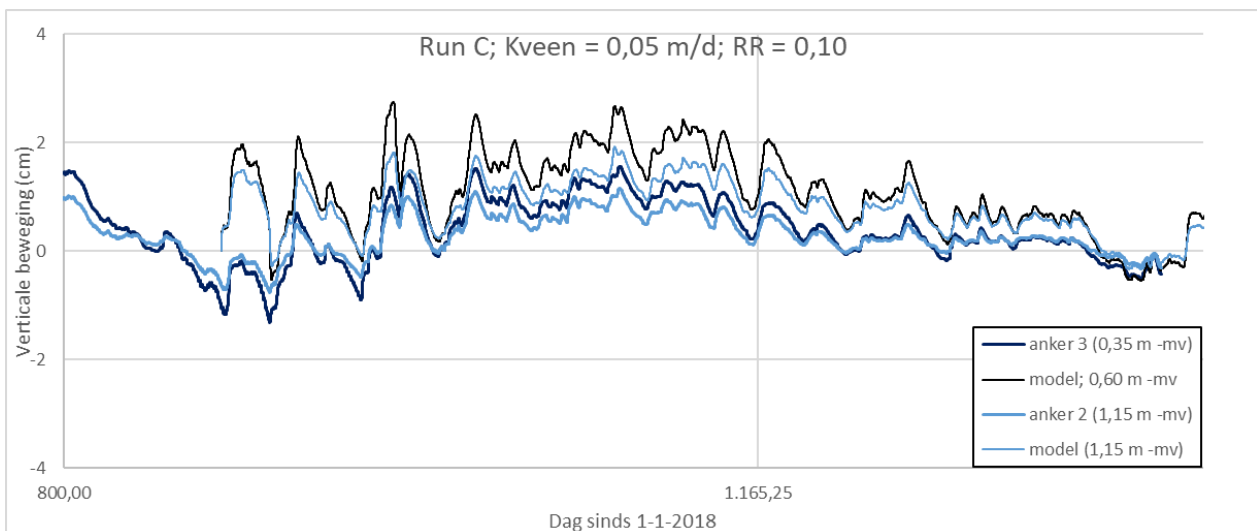
Figuur 5.5 Modelberekende maaiveldynamiek methode 2, run C en beweging van het anker op 35 cm -mv. Hierin is poro-elastische berging wel meegenomen in de drukhoogteberekeningen in het veenpakket. De gesimuleerde dynamiek is voor 60 cm -mv (top rekenmodel).

Figuur 5.6 toont het resultaat van run C in meer detail (blauwe curve). De figuur toont ook de gevoeligheid voor de verticale doorlatendheid van het veen door daarvoor extreme waarden (niet bedoeld als reële waarden) te kiezen. De resultaten laten zien dat een doorlatendheid van 1 mm/dag zorgt voor te sterke demping (en te grote faseverschuiving). Voor een doorlatendheid van 10 m/dag is de dynamiek heel direct, net als zonder elastische berging, en de magnitude de groot.



Figuur 5.6 Meer gedetailleerd beeld van het resultaat van methode 2, run C (blauw) samen met de beweging van het anker op 35 cm -mv, evenals rekenresultaten voor extreme waarden voor de doorlatendheid van de veenlaag.

Figuur 5.7 geeft ten slotte een resultaat voor een verticale doorlatendheid van 0,05 m/dag en een iets lagere waarde voor de recompressieratio $RR = 0,10$, waarbij de resultaten ook worden vergeleken met het diepere anker 2 (1,15 m -mv). De figuur laat zien dat deze run de bewegingsdynamiek van beide ankers over tijdsspannen van dagen tot een week goed benadert.



Figuur 5.7 Een voorlopig beste resultaat waarin resultaten worden vergeleken met twee ankerdieptes. In dit model is voor veen een verticale doorlatendheid gekozen van 0,05 m/dag en $RR = 0,1$.

6 Bevindingen, discussie en vervolgstappen

6.1 Bevindingen

In dit onderzoek is getracht op basis van een tijdreeksanalyse en modelberekening voor de casus Rouveen het dynamische gedrag van het maaiveld beter te begrijpen. Het is een eerste vingeroefening geweest waarbij meer inzicht is verkregen, maar waar nadrukkelijk ook nog veel vragen openstaan. De bevindingen zijn daarom sterk gevormd door de eerste ervaring met deze casus en dienen in het vervolg van de Regiodeal, waar mogelijk, te worden aangepast en verfijnd.

Welke maaiveldynamiek is zichtbaar bij de casus Rouveen?

Het maaiveld in Rouveen gaat tussen de totaal 30-40 mm op en neer gedurende het jaar. De maaiveldynamiek kent een duidelijk onderscheid tussen de verzadigde en onverzadigde zone. De onverzadigde zone, hier bestaande uit klei en veen, heeft een sterk afgevlakt verloop, met name door het waarschijnlijk trage proces van zwellen en krimpen van klei/veen. De verzadigde zone vertoont veel sterkere pieken en dalen en reageert snel op verandering van freatische grondwaterstanden en de daaruit volgende drukken. Ten slotte blijkt uit de meetgegevens dat meer dan 65% van de maaiveldynamiek plaatsvindt in de verzadigde zone.

Is er een correlatie tussen gemeten maaivelddaling en gemeten vochtgehalte/waterstanden?

Er is voor het verzadigde deel een zeer duidelijke correlatie van de gemeten maaivelddaling en de waterspanning/grondwaterstand zoals die is geregistreerd met peilbuizen. De reactie op veranderingen is in dat deel snel (vertraging tussen de twee dagen en twee weken en is voor zowel de op- en neergaande snelheid vrijwel gelijk). Het onverzadigde deel reageert veel trager op verandering van de waterspanning en hierbij is duidelijk te zien dat krimp sneller verloopt dan zwel; kleine en korte termijn veranderingen in waterspanningen hebben weinig invloed op de maaiveldbeweging. Vermoedelijk spelen hysteresis in de waterretentiecurve en de trage wateropname bij zwel hierin mee. Verder wijzen de extensometer-data erop dat veenoxidatie en mogelijk permanente krimp (?) ook belangrijke componenten zijn van hoogteverlies in de onverzadigde zone (irreversibel).

In hoeverre is de gekozen modelleeraanpak in staat om de gemeten dynamiek te reproduceren?

Krimp-zwel en verzadigde bodemdeformatie zijn gescheiden gemodelleerd; een integrale methodiek om tegelijkertijd verzadigde en onverzadigde deformatie te simuleren, ontbreekt. De krimp-zwel-modellering overschat de dynamiek over korte tijdsperioden van dagen tot een week; over langere tijdsperioden worden de gemeten bewegingen redelijk gevolgd. De verzadigd-elastische modellering reproduceert de gemeten dynamiek vrij goed over korte en langere tijdsperioden wanneer de gemeten freatische grondwaterstand en de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket worden gebruikt als input voor de simulatie. Dit is het geval zonder optimalisatie, met gebruik van standaard parameterwaarden.

6.2 Discussie

Hoe bruikbaar is de gebruikte modellering in combinatie met InSAR?

Voor toepassing van InSAR is het met name belangrijk om te weten of en op welk moment er zich tussen opeenvolgende satellietpassages (periode in de orde van enkele dagen) grote verticale maaiveldhoogteveranderingen voordoen (> 1 cm). Kleine hoogteveranderingen zijn minder cruciaal; daarvoor is het wel nuttig om informatie te hebben over de richting van beweging: stijging of daling. De voorspellende waarde lijkt vrij goed voor het elastische deel, maar dit moet breder worden getoetst voor locaties met een andere bodemopbouw. De voorspellende waarde hangt wel ook af van de vraag of de grondwaterstand en stijghoogtevariatie voldoende nauwkeurig kunnen worden voorspeld. Dit is hier niet getoetst, er zijn gemeten reeksen gebruikt. De voorspellende waarde van het krimp-zweldeel is nog te laag.

Dat is volgens de verwachting, omdat het model in ontwikkeling is en voorziene noodzakelijke verbeteringen nog niet in model zijn aangebracht. Het is belangrijk om het model werkelijk te verbeteren en te toetsen en of het bijvoorbeeld al beter gaat op locaties waar een kleidek ontbreekt of waar een andere klei zit. Het is belangrijk dat het korte-tijdschaal tijdgedrag goed kan worden voorspeld op basis van algemeen beschikbare datasets. Uiteindelijk is belangrijk dat de voorspellende waarde van de gecombineerde bijdragen aan de maaiveldynamiek voldoende nauwkeurig is. Op dit moment is alleen een kwalitatieve inschatting gemaakt van bruikbaarheid. Voor een gedegen toetsing zullen kwantitatieve toetsingscriteria moeten worden opgesteld en gebruikt.

Is de gebruikte modelleringsmethodiek geschikt voor het vervolgonderzoek en waar liggen de belangrijkste verbeteringen?

Er bestaat voor zover bekend nog geen consistente en integrale methodiek om tegelijkertijd krimp-zwel en verzadigd-elastische vervormingen in één raamwerk (softwarepakket) te modelleren. Er is daarom in dit project vooralsnog gekozen om elastische bijdragen aan maaiveldbeweging gescheiden te modelleren van de krimp-zwel-bijdragen die met SWAP worden gemodelleerd. Waarbij wel het uitgangspunt was om de waterspanningsveranderingen benodigd voor de elastische berekeningen te laten berekenen door SWAP. Doordat in SWAP geen elastische berging zit, geeft de berekende waterspanningsverandering veel te grote schommelingen. Uiteindelijk geeft een elastisch model waarbij waterspanningen op een meer complete wijze worden berekend op basis van tijdreeksen voor het freatisch niveau en voor de stijghoogte onder het slappe lagen pakket de nauwkeurigste resultaten. Dit betekent dat er op dit moment voor gekozen wordt geen gekoppeld model te gebruiken, maar uit te gaan van het losstaand berekenen van de krimp/zwel en de elastische vervorming.

Deze eerste modelopzet levert (nog) niet de gewenste nauwkeurigheid, maar geeft wel de mogelijkheid meer inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de uitkomsten voor variatie in modelparameters en de variatie in de maaiveldynamiek bij andere bodemtypes.

Om van de huidige ongekoppelde rekenmethode over te kunnen gaan naar een geïntegreerde methode, zullen er wijzigingen doorgevoerd moeten worden in SWAP. Dit zijn o.a. het meenemen van de elastische berging en het direct berekenen van de elastische vervorming (niet meer als nabewerking in Excel). Daarnaast moet het mogelijk worden om in SWAP een zwelrelatie in te voeren.

Is het mogelijk het krimp-zwelproces met SWAP voldoende nauwkeurigheid te simuleren?

De simulatie van de vochttoestand (onverzadigd) en grondwaterstand in SWAP vertoont een goede fit met de gemeten waarden, waarbij de beweging (op en neer) nauwkeuriger wordt gevolgd dan de absolute hoogte van de beweging. De gesimuleerde krimp en zwel volgt in hoofdlijnen de gemeten waarden, al vertonen de berekende waarden veel meer uitschieters. Verder wordt het krimpproces in de tijd goed gevolgd; het zwelproces is in werkelijkheid echter veel trager. Hier speelt mee dat in de huidige versie van SWAP geen aparte zwelrelatie zit en deze gelijk is gesteld aan de krimprelatie. Verder speelt mee dat van de locatie Rouveen geen krimprelaties en geometriefactoren van de diverse lagen bekend zijn, waardoor de parametrisatie op basis van literatuurgegevens heeft plaatsgevonden. Tevens kan ook hydrofobie een rol hebben in het vertraagd vernatten van de bodem: dit is echter een proces dat nog niet in SWAP is opgenomen. Ten slotte kan een verdere validatie van het model aan de andere testsite in Rouveen (met onderwaterdrainage) of NOBV-sites aanvullende informatie opleveren.

Zijn er andere processen die de maaiveldynamiek mogelijk beïnvloeden?

In het huidige model zitten de belangrijkste processen die de maaiveldynamiek bepalen. Er zijn echter processen waarvan op basis van literatuuronderzoek en expert judgement is verondersteld dat ze invloed hebben op de dynamiek. Nader onderzoek moet duidelijk maken hoe belangrijk deze processen zijn en of ze meegenomen kunnen worden in het huidige (processen) model of dat er modelelementen moeten worden toegevoegd.

- *Gasbellen*

Het samendrukken en expanderen van gasbellen kan invloed hebben op de dynamiek van maaiveldaling. Gasbellen (methaan) ontstaan door afbraak van organisch materiaal. De grootte van de gasbellen is afhankelijk van de waterdruk in een laag, die weer van de grondwaterstand afhangt. Bij een dalende grondwaterstand neemt de drukhoogte in diepere lagen af, waardoor de gasbellen groter worden. Ook de

atmosferische druk en de temperatuur beïnvloeden de grootte van de gasbellen. Bij een dalende luchtdruk zullen de gasbellen uitzetten, wat leidt tot een verhoogde grondwaterstand/stijghoogte. Verhoging van de temperatuur leidt tot grotere gasbellen door uitzetting en eveneens tot een minder grote oplosbaarheid van het gas in de waterfase, dus tot de overgang van het opgeloste gas naar de gasfase. Ten slotte beïnvloeden gasbellen de doorlatendheid van de veenbodem (Kettridge et al., 2013).

- *Hydrofobie*

Veenbodems kunnen extreem waterafstotend worden doordat deze een erg hoog gehalte aan organisch materiaal bevatten; het meeste organisch materiaal kan waterafstotend worden door uitdroging (Dekker en Ritsema, 1996). Hydrofobie kan ervoor zorgen dat een veenbodem erg traag vernat. Hierdoor kan het zwelproces sterk worden vertraagd.

- *Veenoxidatie*

Er is verondersteld dat veenoxidatie geen invloed heeft op de dynamiek, maar vooral op de permanente daling. Het lastige is wel dat in de bodemdalingsdata beide effecten zitten, waardoor ook analyse van de dynamiek complex is. In het vervolg van de Regiodeal wordt ook nog verder aandacht gegeven aan het modelleren van het veenoxidatieproces.

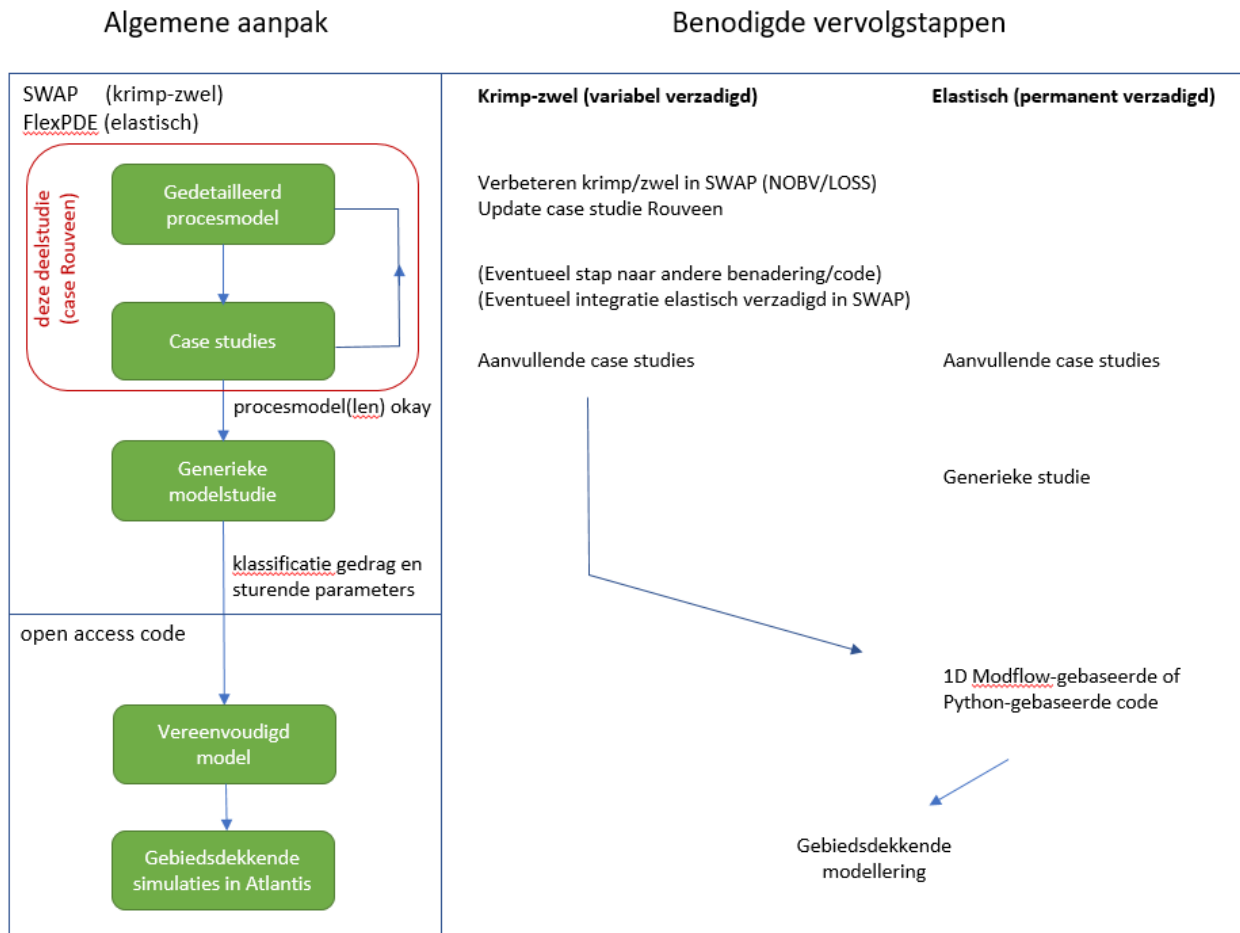
6.3 Vervolgonderzoek

Het doel van dit deelonderzoek was om een eerste dynamische 1D-bodembewegingsmodel te maken en deze te toetsen aan gemeten data. Hiermee is een eerste stap gezet naar gebiedsdekkende simulatie van de bodemdalingsdynamiek. In Figuur 6.1 is in de linker kolom weergegeven welke aanpak verder voorzien is om tot gebiedsdekkende simulaties te komen en welke plaats de huidige studie daarin inneemt (rode kader). In de rechterkolom zijn benodigde vervolgstappen die ons nu voor ogen staan wat meer geconcretiseerd. Daar kunnen parallelle paden worden bewandeld voor krimp/zwel en elastische bijdragen die, voor zover dat haalbaar blijkt, samen komen tot een eindproduct. Deze vervolgstappen worden hieronder verder toegelicht. Uitvoering van deze stappen zal vrijwel geheel buiten de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart moeten worden gerealiseerd.

Toelichting op de vervolgstappen:

1. Verbeteren modellering krimp/zwel in SWAP. In het kader van het project NOBV en LOSS (Living on Soft Soils) wordt in 2022 gewerkt aan een verbeterde versie van SWAP. Hierin wordt het zwelproces gesimuleerd met een aparte zwelrelatie en wordt ook de combinatie van hysteresis- en macroporiënmodules verbeterd. Het verbeterde model zal worden getoetst aan kolomexperimenten uit LOSS. Verder worden er in 2022 in het kader van de Regiodeal, NOBV en LOSS van diverse bodems zwel- en krimprelaties bepaald. Dit maakt dat het SWAP-model ook beter geparametriseerd kan worden.
2. Herberekening en gevoeligheidsanalyse casus Rouveen. In een vervolg is het uitvoeren van een uitgebreidere gevoeligheidsanalyse en geformaliseerde kalibratie een volgende belangrijke stap. Met het aangepaste (nog niet gekoppelde) model kan de casus Rouveen opnieuw worden doorgerekend. Daarnaast kan met een gevoeligheidsanalyse worden bepaald wat de invloed van de diverse parameters en randvoorwaarden (bijvoorbeeld kwel, drainage, etc.) is op maaiveldynamiek. Hiermee kan een eerste indruk ontstaan welke parameters en processen het bepalendst zijn en waar de focus op zou moeten liggen bij het nauwkeurig bepalen van die parameters en randvoorwaarden om te komen tot een gebiedsdekkend model. De herberekening geeft een beeld of het hernieuwde model voor de toepassing met InSAR voldoende nauwkeurige resultaten oplevert. Is dat nog onvoldoende, dan moet onderzocht worden of verdere modelverbeteringen mogelijk zijn of dat moet worden gezocht naar een andere benadering. Gedacht kan worden aan een tijdreeksmodel waarbij het gehele proces van krimp/zwel als black-box wordt beschouwd.
3. Doorrekenen andere cases. Mocht uit stap 2 blijken dat het SWAP krimp-zwelmodel (nog niet gekoppeld) bruikbaar is, dan kunnen ook andere NOBV-site of Regiodeal-sites worden doorgerekend. Hierdoor ontstaat een beter beeld of dit model ook voor andere bodemcondities aanvaardbare voorspellingen kan doen. Daarnaast kan een uitgebreidere gevoeligheidsanalyse nog beter bepalen welke parameters en processen bepalend zijn voor de maaiveldynamiek. Het is sowieso zeer wenselijk om het (verzadigd-)elastische model verder toe te passen op data van de andere NOBV-monitoringssites en er generieke analyses mee te doen die een beeld geven van de belangrijkste sturende factoren.

4. Verbeteren modellen. Of verdere modelverbeteringen noodzakelijk zijn, moet blijken op basis van de conclusies van stap 3, maar is wel waarschijnlijk. Daarnaast moet onderzocht worden of het wenselijk is een volledig gekoppeld model te ontwikkelen. Hierbij moet er aan SWAP elastische berging en een postprocessing, om de sommatie van bodembeweging van het onverzadigde en verzadigde deel, worden toegevoegd.
5. Van 1D- naar gebiedsmodel. Op basis van de modelresultaten voor de diverse sites kunnen algemenere en simpelere regels worden gedefinieerd. Dit zouden relaties kunnen zijn tussen bodemdaling en de meer constante parameter, zoals bodemtype, en de dynamischere parameters, zoals grondwaterspiegel en vochttoestand en landgebruik.



Figuur 6.1 Vervolgstappen dynamische modellering.

Literatuur

- Akker van den, J.J.H., T. Hoogland en F. Stoppelenberg, 2011. Berging in kleischeuren in de Flevopolders. STROMINGEN 16 (2011), nummer 3.
- Akker van den, J.J.H., R. Hendriks, J. Frissel, K. Oostindie en J. Wesseling, 2013. Gedrag van verdroogde kades; ontstaan en gevaar van krimpscheuren in klei- en veenkades. Alterra-rapport 2473. Wageningen.
- Bronswijk, J.J.B., J.J. Evers-Vermeer, 1987. Krimpkaracteristieken van kleigronden in Nederland. Rapport 22 ICW.
- Camporese, M., S. Ferraris, M. Putti, P. Salandin, P. Teatini, 2006. Hydrological modelling in swelling/shrinking peat soils. *Water Resources Research*, 42 doi:10.1029/2005WR004495
- Dekker, L. W., Ritsema, C. J. (1996). Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena*, 28(1-2), 89-105.
- Den Haan, E.J., H.M. van Essen, M.A.T. Visschedijk, J. Maccabiani (2004). Isotachenmodellen: help, hoe kom ik aan de parameters? *Geotechniek*, januari 2004, p. 62-69.
- Domenico, P.A. & F.W. Schwartz (1990). *Physical and Chemical Hydrology*, Wiley, New York.
- Hendriks, R.F.A. (2004). *An analytical equation for describing the shrinkage characteristics of peat soils*. In J. Päivänen (Ed.) *Wise use of Peatlands*. Proceedings of the 12th International Peat Congress. Tampere, Finland.
- Heinen, M., Brouwer, F., Teuling, C., Walvoort, D.J.J., 2021. BOFEK2020 - Bodemfysische schematisatie van Nederland: update bodemfysische eenhedenkaart. Wageningen: Wageningen Environmental Research, 2021. Rapport / Wageningen Environmental Research; 3056.
- Hoekstra, N., Joost Sleiderink, Joachim Deru, Maaïke van Agtmaal, Nick van Eekeren, 2021. Hydrofobie op veengrond: oorzaken en maatregelen Rapportage van labexperimenten in Project Integrale Bodemverbetering Feangreide. Louis Bolk Instituut.
- Kettridge, N., E. Kellner, J.S. Price and J.M. Waddington (2013). Peat deformation and biogenic gas bubbles control seasonal variations in peat hydraulic conductivity, *Hydrological processes* 27.
- Kennedy, G. W., and J. S. Price (2005). A conceptual model of volume change controls on the hydrology of cutover peats, *J. Hydrol.*, 302(1- 4), 13- 27.
- Kim, D.J., 1992. Characterization of swelling and shrinkage behaviour, hydraulic properties and modelling of water movement in a physically ripening marine clay soil. PhD thesis, Catholic University Leuven.
- Kooi, H., Bakr, M., de Lange, G., den Haan, E., and Erkens, G. (2018). User guide to SUB-CR; a MODFLOW package for land subsidence and aquifer system compaction that includes creep, Deltares internal report 11202275-008, available at http://publications.deltares.nl/11202275_008.pdf
- Kroes, J.G., J.C. Van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks & H.M. Mulder, 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Wageningen, Alterra. Alterra Report 2780.
- NNI (2012). NEN9997-1+C1: Geotechnical design of structures; Part 1: General rules (in Dutch). Nederlands Normalisatie Instituut (Dutch Normalization Institute), 306 p.
- Schothorst, C.J., 1982. Drainage and behavior of peat soils. Proc. Symp. on peatlands below sea level. ILRA publication 30 Wageningen, The Netherlands. 130-163.
- Wösten, H., en P. Groenendijk, 2019. "Deltafact: Belang van bodemorganische stof voor het waterbeheer", STOWA en Wageningen Environmental Research, 2019.
- Verruijt, A. (2016). Theory and problems of poroelasticity. Delft University of Technology.
- Yang, M. and K. Liu, (2016). Deformation behaviors of peat with influence of organic matter, SpringerPlus.

Bijlage 1 Basisgegevens

Invoergegevens voor SWAP

Tabel B1.1 Overzicht van de benodigde gegevens voor de beschrijving van de huidige situatie en de relatie met model-parametrisatie, kalibratie en validatie.

Groep	Grootheid	Hoe
1. Algemeen		
	Ligging percelen op diverse kaarten (topografisch, waterstaat, geohydrologie, bodem etc.)	Bureaustudie
	Maaiveldligging (bol, hol, vlak) als maaiveldhoogten, aanwezigheid greppels, sloot- en greppelafstanden	Veldobservaties
	Profielopbouw (bodemhorizonten en dikten)	Boring tot 1,5 m-mv
	Krimpscheuren, aggregaat-vorm/grootte	Veldobservatie
2. Beginwaarden		
	Worteldiepte en -dichtheid	Veldobservatie
	Vochttoestand	Veldmetingen
	Freatische grondwaterstand	Veldmetingen
3. Proces-parameters		
	Textuurgegevens (lutum, zand en organische stof), meerdere dieptes	Labmetingen
	Hydraulische karakteristieken: - waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek - hysterese waterretentiekarakteristiek - verzadigde doorlatendheid	Labmetingen
	Krimp- en zwelkarakteristiek	Labmetingen
4. Sturings-parameters		
	Neerslag (tijdreeksen)	Meteostation
	Verdamping uit straling temperatuur en wind (tijdreeksen)	Meteostation
	Slootpeilen (tijdreeksen)	Meter
	Stijghoogte diepe zandlaag	Eigen diepe peilbuis met diver
	Globale straling, min en max temperatuur, windsnelheid, luchtdruk	Meteostation
	Maairegime gras per perceel	Veehouder
	Beweidingsregime per perceel	Veehouder
5. Kalibratie-waarden		
	Vochtgehalten (tijdreeksen)	Vochtsensoren op diverse dieptes
	Vochtspanning (tijdreeksen)	Tensiometers op diverse dieptes
	Freatische grondwaterstanden (tijdreeks)	Eigen freatische peilbuis(zen) met diver(s)
	Maaiveldverandering (tijdreeks)	Extensometers op diverse dieptes

Ligging percelen

De locatie ligt circa 500 m ten zuidoosten van Zwartsluis (de Velde 3 te Zwartsluis).



Figuur B1.1 Ligging locatie (luchtfoto, zuid: MS-veld met drainage, noord: RF-veld referentie).

In Figuur B1.1 is de meetopstelling gegeven. In Rouveen is een referentieperceel ingericht en tevens een perceel met onderwaterdrainage. Het doel is de invloed van de onderwaterdrainage op de grondwaterstanden en de compactie van de bodemlagen weer te bepalen.

Meteorologische gegevens

De proeflocatie ligt direct ten zuidoosten van Zwartsluis. In de buurt ligt een aantal meteostations, namelijk Marknesse, Heino en Hoogeveen, waarvan Marknesse het dichtstbij ligt. Het neerslagstation Rouveen ligt op circa 6 km ten oosten van de locatie. Tevens wordt op de locatie zelf de neerslag gemeten. De ervaring leert dat zelf gemeten neerslaghoeveelheden goed gecontroleerd moeten worden op onvolkomenheden, waaronder de relatie met nabijgelegen neerslagstations. Bij de simulatie zijn de gegevens van het meteostation te Marknesse gebruikt.

Maaiveldhoogte

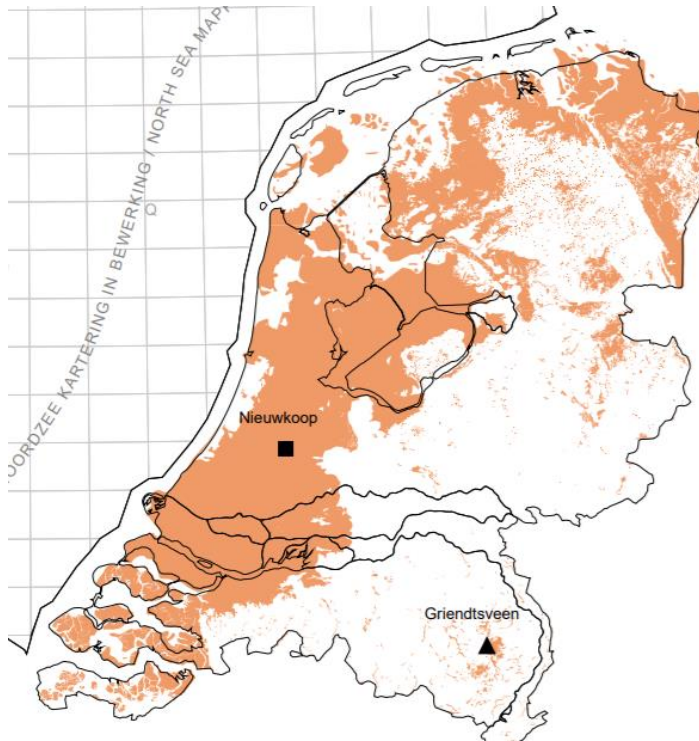
De maaiveldhoogte bedraagt circa NAP -48 tot -70 cm.

Bodemopbouw

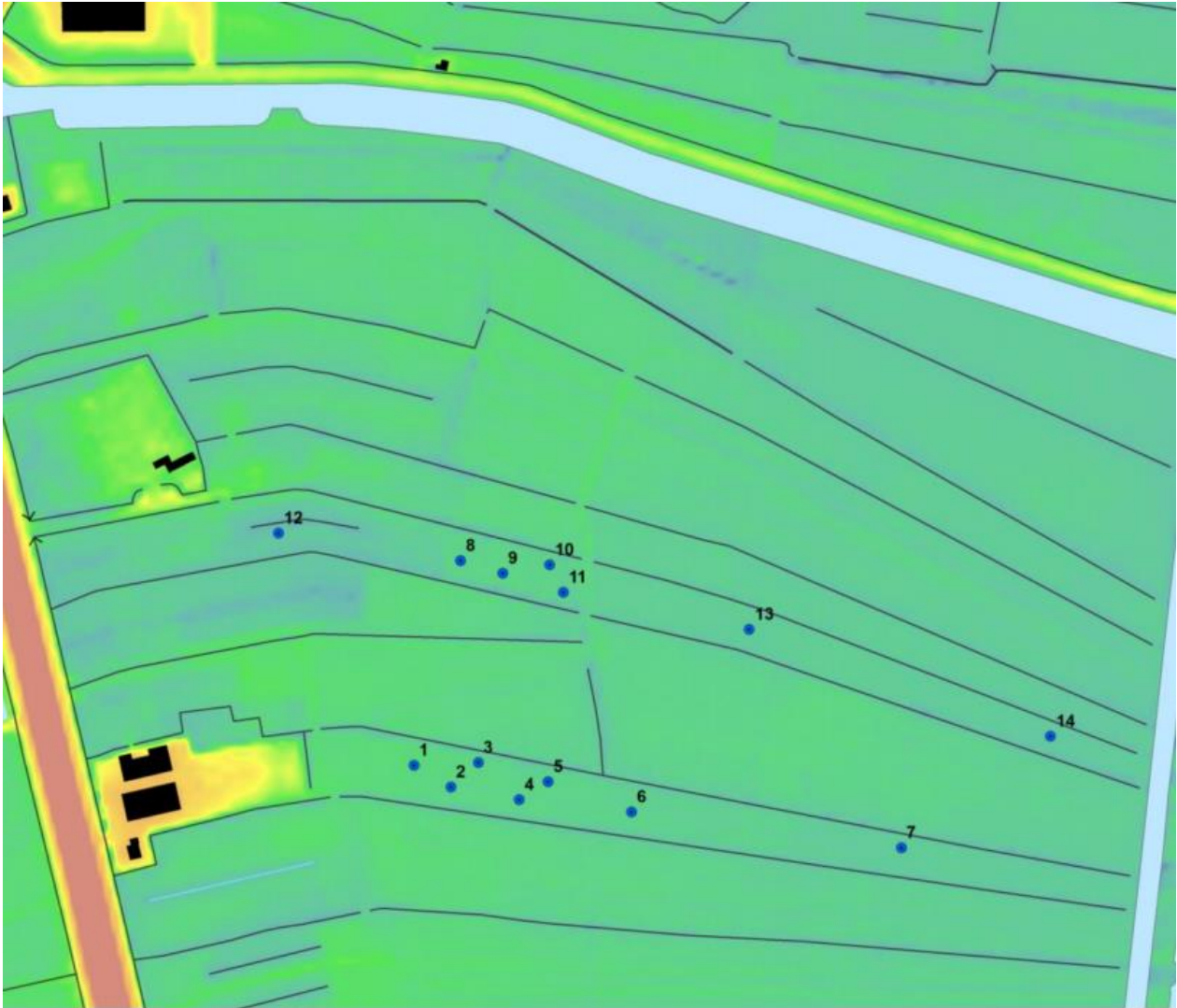
Op 17 januari 2020 heeft WENR (Wageningen Environmental Research) veertien grondboringen (zie voor locaties Figuur B1.3) verricht. Tevens is een aantal geologische boringen uitgevoerd. In Figuur B1.4 zijn de dikten van de opeenvolgende lagen van de bodem weergegeven. De toplaag bestaat uit klei met een dikte van circa 30 cm, vervolgens een veenlaag van ongeveer 300 cm dik en daaronder vaak een klei- of leemlaag

met een dikte van 5 tot 10 cm. Hieronder bevindt zich de zandondergrond. Deze zandlaag wordt beschouwd als basis die niet beïnvloed wordt door dynamische beweging.

Mogelijk dat de onderzijde van het pakket uit basisveen bestaat. Basisveen is een afzetting uit de Formatie van Nieuwkoop. Figuur B1.2 geeft aan waar de Formatie van Nieuwkoop voorkomt en geeft dus aan waar het basisveen **mogelijk** voorkomt.



Figuur B1.2 Voorkomen basisveen.



Figuur B1.3 Boorpunten.

De boring die het dichtst bij de extensometer voor de referentie ligt, is boring 9. Onderstaand is de boorbeschrijving gegeven.

Tabel B1.2 Profiel beschrijving boring 9, die het dichtst bij de extensometer in het referentieveld ligt.

LAAG_NR	BOVENGRENS	ONDERGRENS	HOR_CODE	ORG_STOF	VEEN_C	LUTUM	LEEM	M50	KALK	RIJPING	GEO_FOR_C	OPMERKING
1	0	7	1Ah	6.0	32				1	5	211	donkerbruingrijs
2	7	28	1Cg	3.0	45				1	5	211	oranjebruingrijs; roestig
3	28	40	2Cw	45.0	25				1		111	iets zegge onderin
4	40	70	2Cu1	90.0	15				1		131	
5	70	90	2Cu2	90.0	15				1		131	iets mossig; donkerder dan laag 4
6	90	340	2Cr	90.0	15				1		131	vanaf 280 iets meer slib
7	340	365	3Cr	10.0	7	30	170		1		413	leemband en houtresten
8	365	380	4Cr	0.5	2	6	250		1		531	bruingrijs

Bodemkundig bestaan de percelen uit veengronden met een kleidek. Het kleidek varieert in dikte van 20 tot 30 cm. De gemiddelde dikte van het kleidek bedraagt 28 cm. Bij de meest oostelijk gelegen boringen (7 en 14) bedraagt de kleidikte nog ongeveer 20 cm. Omdat de minerale eerdlaag dun is (dunner dan 15 cm) en er zich onder de humeuze tot humusrijke bovengrond een humusarme tot matig humeuze, zware, roestige kleilaag bevindt, worden de gronden tot de waardveengronden (bodemcode kVc) gerekend. De zware

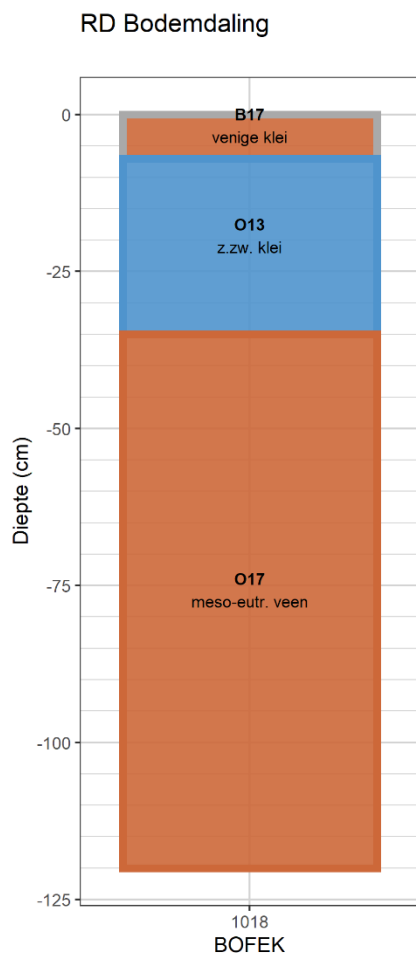
kleilaag bevat veel roest en is oranjeachtig van kleur. In Friesland wordt de kleilaag vaak aangeduid met 'knip' of 'knippig'.

Onder het kleidek treffen we een tussenlaagje aan van matig veraard, kleilig veen. Binnen 40 cm -mv gaat het laagje kleilig veen (veencode "DK") over in onveraard zegge- en/of rietzeggeveen. De veensoorten staan respectievelijk aangeduid met veencode "C" en "RC". Meestal begint binnen 80 cm -mv een iets donkerder veenlaag van ca. 30 cm dik. Deze veenlaag bestaat grotendeels uit veenmosveen (veencode "S"), al komen er ook wel zegge-achtige plantenresten in voor. Binnen 100 cm -mv gaat deze relatief armere veenlaag over in gereduceerd, bruin rietzeggeveen (mesotroof). Plaatselijk komen houtresten in de veenondergrond voor. Bij de meeste boringen begint de fluvio-(peri)glaciale zandondergrond tussen 300 en 400 cm -mv. Gemiddeld begint de zandondergrond op 350 cm -mv. Bij boring 4 en 12 zit het zand bijna 100 cm hoger. De eerste 40 cm van de zandondergrond is erg wisselend van samenstelling: het matig fijne zand wordt vaak afgewisseld met leem- en veenbandjes, meestal niet dikker dan 10 cm. Binnen 400 cm -mv begint meestal het leemarme, matig grove zand. Bij boring 10 is het humusarme zand zelfs zeer grof.

De kleilaag heeft lutumpercentages van circa 35-45%. In Tabel B1.3 zijn de karakteristieken van de dikten in de uitgevoerde boringen weergegeven.

Tabel B1.3 Karakteristieke dikten bodem (op basis van 25 boringen tot in de zandondergrond).

Dikten (cm)	Kleidek	Veenlaag	Kleilaag/leem
mediaan		28	300
gemiddeld		30	290
stdev		5	45



Figuur B1.4

De proefvelden liggen in het vlak met BOFEK-code 1018 (Heinen et al., 2021). Dat zijn "Dikke veengronden: kleidek op bos-/zeggeveen of klei". Het dominante profiel dat hier bij hoort, is weergegeven in Figuur B1.4. Dit profiel komt in grote lijnen overeen met de bodemopbouw zoals bij de boringen is vastgesteld, zijnde een bodem met een kleidek op veen. Voor de SWAP-simulatie leveren de uitgevoerde boringen de beste gegevens voor de bodem-karakterisatie.

Uit de bodembeschrijving volgt dat de eerste laag tot circa 7 cm-mv bestaat uit klei met een lutumgehalte van circa 35%, de laag hieronder tot circa 30 cm -mv bestaat eveneens uit klei, maar dan zwaarder (tot circa 45%). In de Staringreeks betreffen dat de bovengronden B10 en B11 bij. In de Staringreeks is per bouwsteen³ één parametrisatie gegeven, er kan overwogen worden de parametrisatie voor diepere lagen aan te passen (bv. lagere verzadigde doorlaatfactor). In Tabel B1.4 is de schematisatie van het bodemprofiel weergegeven, zoals in de SWAP-simulatie is gebruikt.

Tabel B1.4 Schematisatie bodem voor SWAP-simulatie (run 1195).

Dikte	Onderkant (cm -mv)	Staringreeks	Ondergrond
7	7	B10	Lichte klei
23	30	B11	Matig zware klei
282	312	O17	Mesotroof en eutroof veen
8	320	O14	Zandige leem
280	600	O02	Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand

Krimp/zwel

Een bodemlaag kan krimp-zwelgedrag vertonen. Krimp en zwel hebben effect op:

- Minder dan wel meer macroporiën. Een deel van de macroporiën is permanent en een ander deel dus afhankelijk de krimp en zwel.
- Maaiveldvaling.

Voor Rouveen zijn vooralsnog geen gemeten krimp-zwel-karakteristieken beschikbaar, daarom zijn de karakteristieken van andere locaties genomen voor een eerste inschatting. Voor de ondiepe bodem zijn drie bodemlagen onderscheiden (Tabel B1.5).

Tabel B1.5 Laagopbouw SWAP.

Laag	Dikte (cm)	Staringreeks	Ondergrond
1	7	B10	Lichte klei
2	23	B11	Matig zware klei
3	282	O17	Mesotroof en eutroof veen

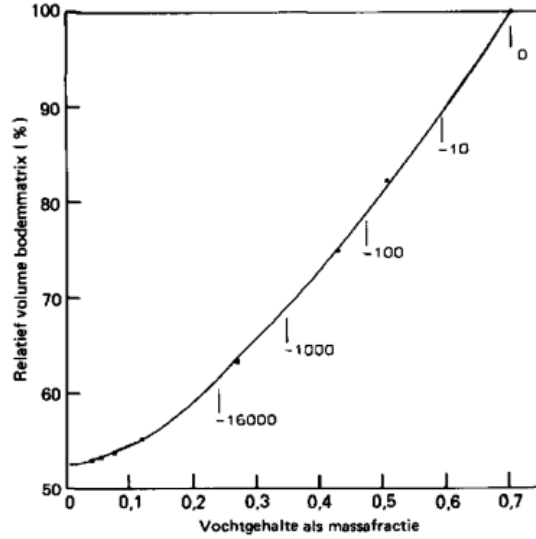
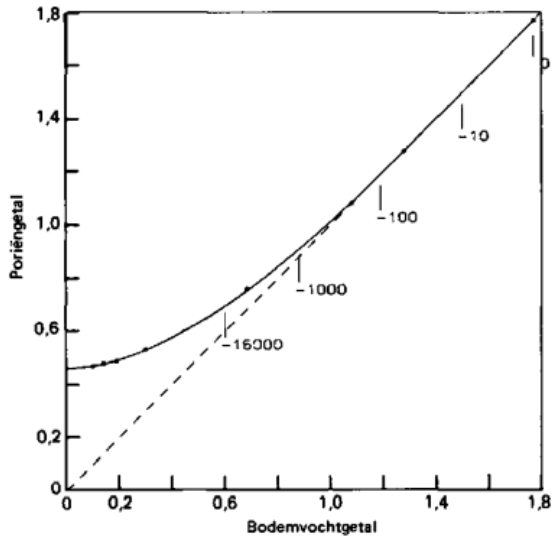
Voor deze drie lagen is ook een krimp-zwel-karakteristiek toegekend. De eerste twee lagen betreffen kleilagen. Hiervoor zijn tevens krimpkarakteristieken uit de rapportage van Bronswijk & Evers-Vermeer (1987) gebruikt met ongeveer hetzelfde lutumgehalte en hetzelfde dieptetraject (zie Figuur B1.5). Voor de derde laag zijn de gegevens uit Bijlage 11 van de SWAP-manual gebruikt, met een aangepaste waarde voor σ_a , zodat die past bij de bodemfysische parametrisatie van laag 3 (parameter θ_{sat} van MvG).

³ In totaal worden 18 bovengronden en 18 ondergronden onderscheiden. Voor de onderscheiden 36 bodemtypen zijn retentie- en doorlatendheidscurven beschikbaar. De curves zijn gebaseerd op verschillende monsters.

Profiel 1. Oosterend

Kalkloze poldervaaggrond; matig zware klei

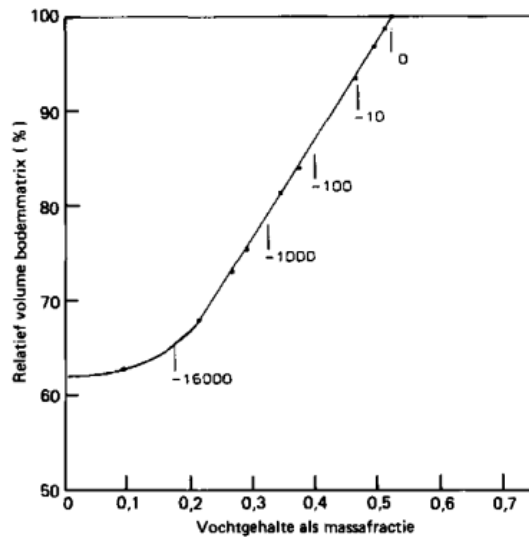
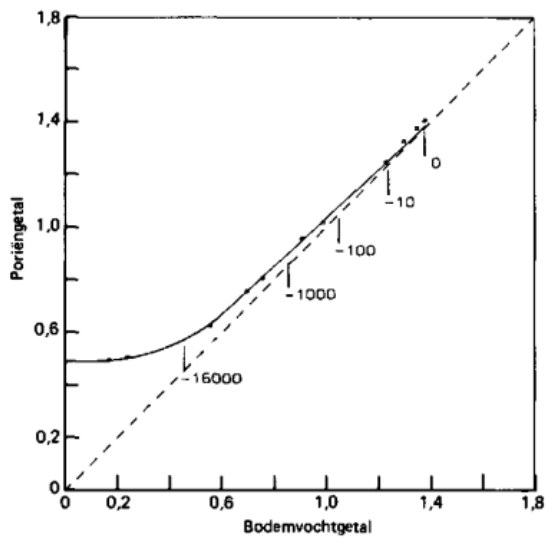
Horizont A11 (0-22 cm -mv)



Profiel 2. Nieuw-Beerta

Kalkrijke polder- tot nesvaaggrond; matig zware klei

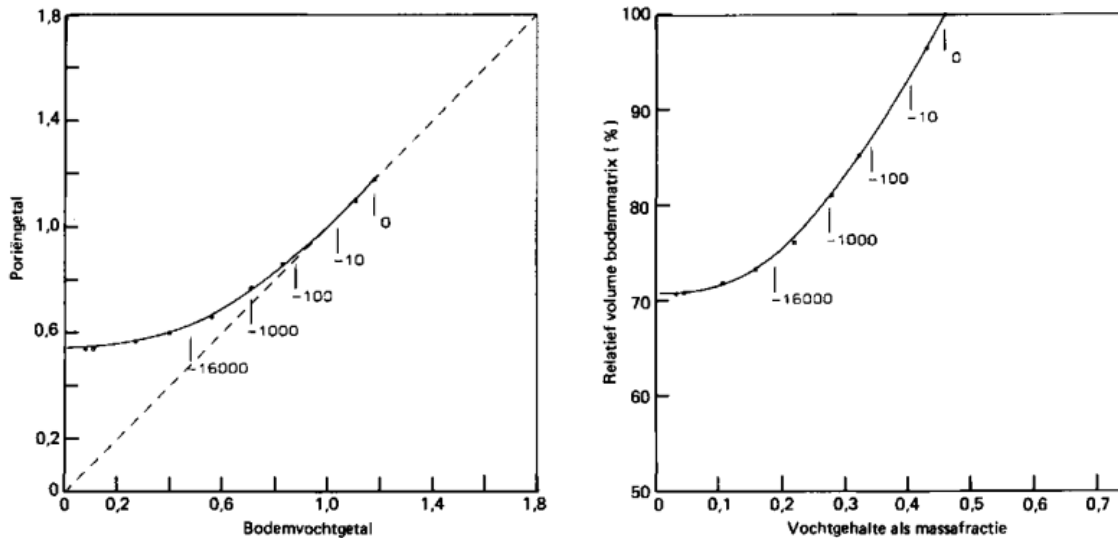
Horizont Ap (0-26 cm -mv)



Profiel 4. Schermerhorn

Kalkrijke poldervaaggrond; lichte klei

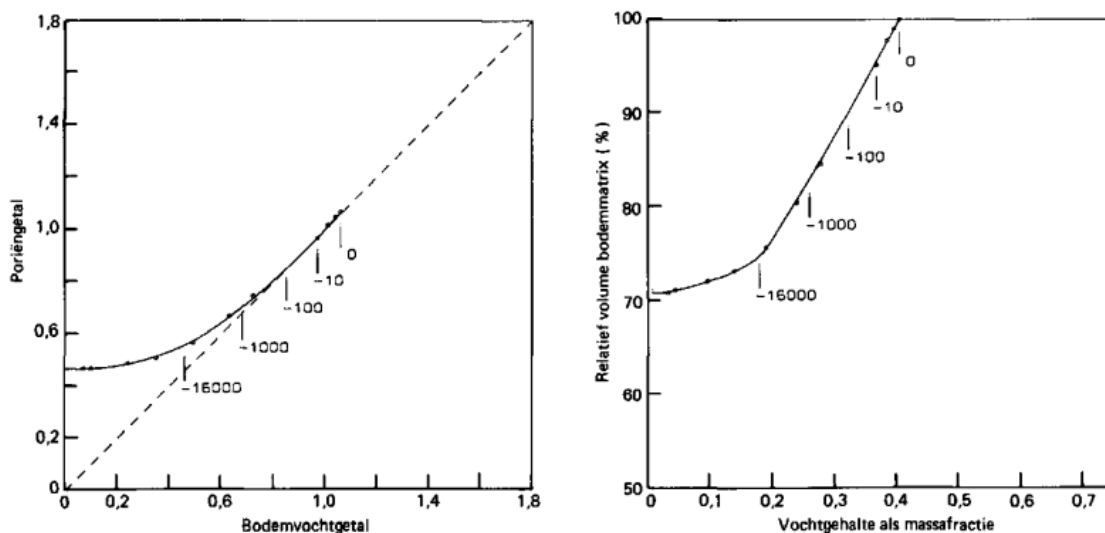
Horizont A11 (0-21 cm -mv)



Profiel 5. Dronten

Kalkrijke nesvaaggrond; matig zware klei

Horizont Ap1 (0-22 cm -mv)



Figuur B1.5 Krimpcharacteristieken klei (Bronswijk & Evers-Vermeer, 1987) (met lutumgehalte overeenkomend met proeflocatie).

De Bronswijk & Evers-Vermeer (1987) krimp-zwelmelingen leiden tot karakteristieken met een α_k van circa 0,48 en een σ_a van circa 0,9 (Tabel B1.6).

Tabel B1.6 Krimp-zwel-karakteristieken per laag.

Laag	SWSoilShr*	SwShrInp*	ThetCrMP*	GeomFac*	α_k	σ_a	Bron		
1	1 Klei	2	0.447	3	0.48	0.70	Bronswijk		
2	1 Klei	2	0.5907	3	0.48	0.90	Bronswijk		
Laag	SWSoilShr	SwShrInp	ThetCrMP	GeomFac	e_0	σ_a	σ_r	σ_p	P_H
3	2 Veen	1	0.84	3	1.7	5	0.42	3.13	0.55

* SWSoilShr : bodemtype (klei of veen)

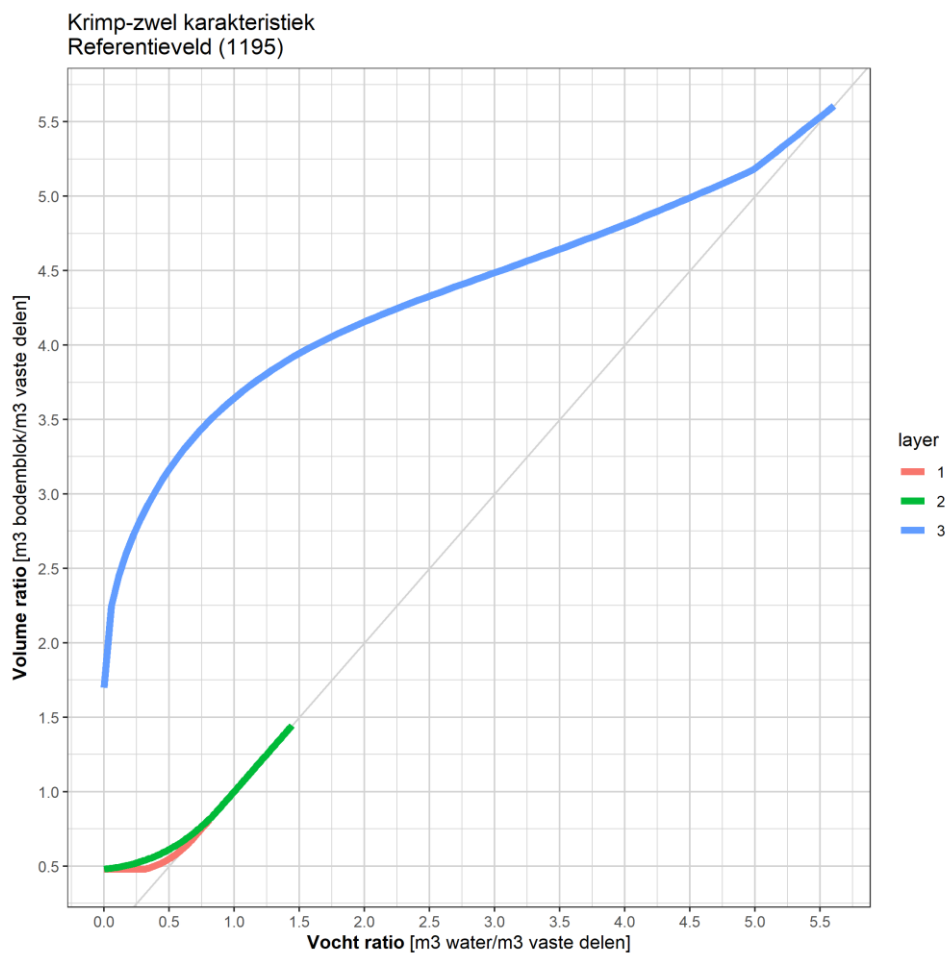
SwShrInp : nummer krimpcurve

ThetCrMP : drempelwaarde theta waarboven alleen verticale krimp optreedt

GeomFac : dimensionaliteit van volumeverandering

$\alpha_k, e_0, \sigma_a, \sigma_r, \sigma_p, P_H$: parameters krimp-zwel-karakteristiek

De krimp karakteristiek is weergegeven in Figuur B1.6. Dit geeft nog niet direct inzicht in de verdeling van vocht in aggregaat, lucht in aggregaat en macroporiën over het totale volume.



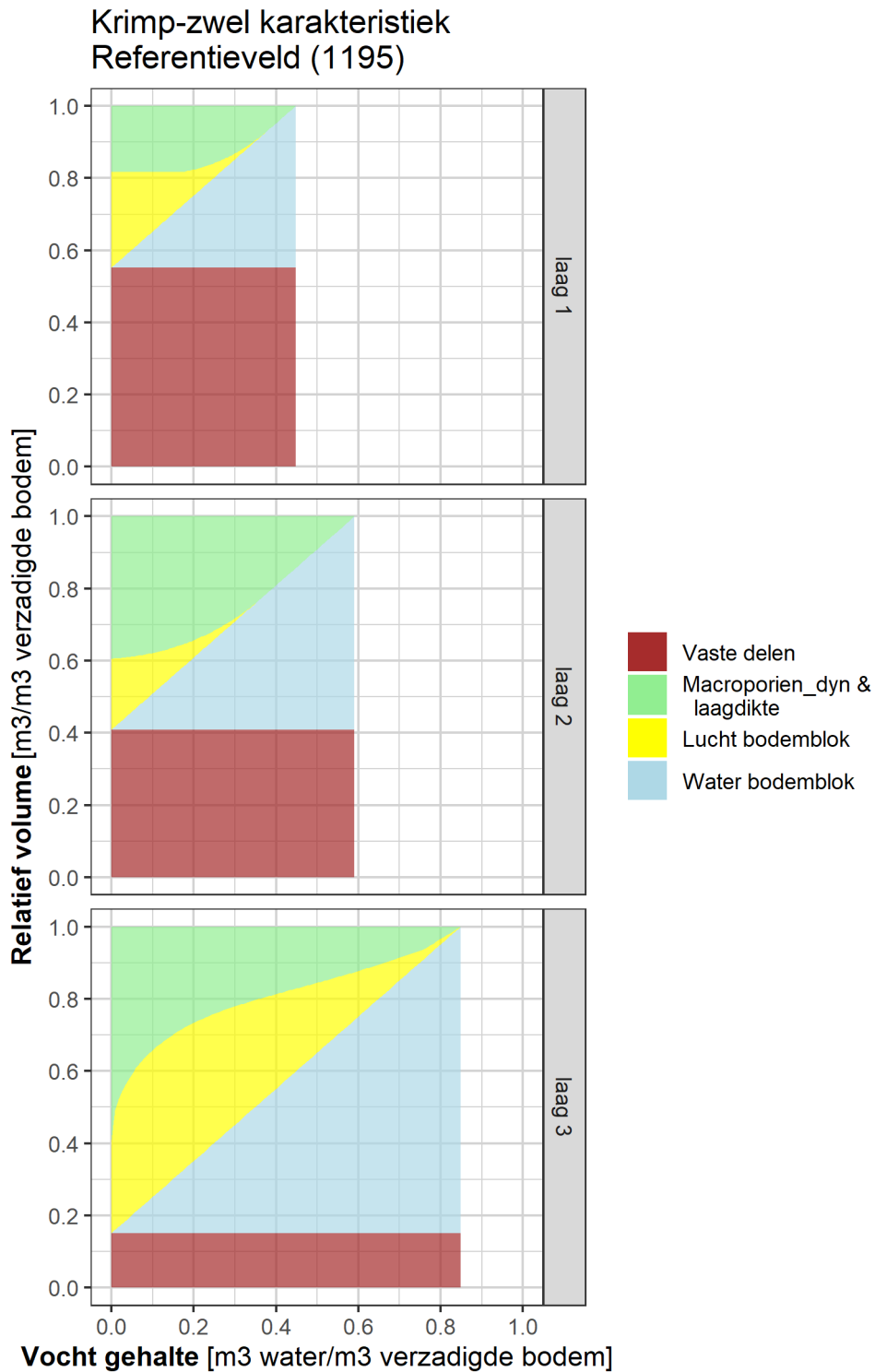
Figuur B1.6 Krimp karakteristiek (o.b.v. ratio volume vocht ten opzichte van volume vaste delen, maximum bij drukhoogte = 0).

Deze relatie is omgezet in een figuur met gekleurde vlakken, waarin de verdeling van vast, macroporiën en vocht in aggregaat is weergegeven. In Figuur B1.7 zijn de krimp karakteristieken van de drie lagen te zien. Zo is te zien dat voor laag 3 (veen) bij een vochtgehalte van $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ circa 20% lucht in het aggregaat zit en dat er kripscheuren zijn voor circa 15%.

Voor laag 3 is $\text{ThetCrMP} = 0.84$, dat betekent dat boven een vochtgehalte van 0.84 er alleen verticale krimp plaatsvindt. Uit Figuur B1.7 blijkt dat 0.84 ongeveer het maximale vochtgehalte is. Beneden dit vochtgehalte

wordt de verdeling van de krimp bepaald door de geometriefactor. Deze is in de simulatie gelijk aan 3 gekozen, zodat er sprake is van isotrope krimp:

- $\text{GeomFac} = 1$: alleen verticale krimp
- $1 < \text{GeomFac} < 3$: meer verticale dan horizontale krimp
- $\text{GeomFac} = 3$: isotrope krimp
- $\text{GeomFac} > 3$: relatief meer horizontale krimp



Figuur B1.7 Krimpkarakteristiek (fracties vocht, lucht, macroporiën t.o.v. maximum volume, i.e. bij drukhoogte = 0, exclusief statische macroporiën).

In onderstaand overzicht zijn de parameters weergegeven die in de SWAP-file zijn gebruikt om de macroporiën te simuleren.

Parametrisatie macroporiën (kopie uit SWAP-invoerfile, run 1195). Voor een toelichting op de parameters wordt naar de handleiding (Kroes et al., 2017) verwezen.

```
* Section 4.10: Preferential flow due to macropores
*-----
* all parameters that describe macropore geometry based on info of MACRO on macropore geometry

Z_AH =      0.00      ! Depth bottom A-horizon [-1000..0 cm, R]
Z_IC =     -50.00     ! Depth bottom Internal Catchment (IC) domain [-1000..0 cm, R]
Z_ST =     -50.00     ! Depth bottom Static macropores [-1000..0 cm, R]
VLMPSSTSS = 0.04     ! Volume of Static Macropores at Soil Surface [0..0.5 cm3/cm3, R]
PPICSS =    0.7      ! Proportion of IC domain at Soil Surface [0..0.99 -, R]
NUMSBDM =  10       ! Number of Subdomains in IC domain [0..MaDm-2 -, I]
POWM =     1.00     ! Power M for frequency distribut. curve IC domain [0..100 -, R]
RZAH =     0.00     ! Fraction macropores ended at bottom A-horizon [0..1 -, R]
SPOINT =   1.0      ! Symmetry Point for freq. distr. curve [0..1 -, R]
SWPOWM =   0        ! Switch for double convex/concave freq. distr. curve [0..1 -, I]
DIPOMI =   20.00    ! Minimal diameter soil polygones (shallow) [0.1..1000 cm, R]
DIPOMA =   20.00    ! Maximal diameter soil polygones (deep) [0.1..1000 cm, R]
PNDMXMP =  0.02     ! Threshold of ponding for overland flow into macropores [0.1..10 cm, R]

Z_MB50 =   -50.0    ! parameter to mimicMACRO for describing full macropore volume over total profile depth

* no shrinkage of soil, according to MACRO
ISOILLAY3  SWSoilShr  SwShrInp  ThetCrMP  GeomFac  ShrParA  ShrParB  ShrParC  ShrParD  ShrParE
1          1          2          0.447    3.00     0.48     0.70     0.0      0.0      0.0
2          1          2          0.59     3.00     0.48     0.90     0.0      0.0      0.0
3          2          1          0.84     3.00     1.700    5.000    0.42     3.13     0.55
4          0          2          0.39     3.00     0.688    0.863    0.0      0.0      0.0
5          0          2          0.38     3.00     0.688    0.863    0.0      0.0      0.0
* End of Tabel with shrinkage characteristics
ZnCrAr =   -5.00    ! Depth at which crack area of soil surface is calculated [-100..0 cm]

*-----
* Start of Table with sorptivity characteristics
* ISOILLAY4 = Indicator of soil layer
* SWSorp = Switch sorptivity function
*          1 = on base of hydraulic function with Parlange correction
*          2 = empirical function based on measurements
* SorpFacParl = Factor for modifying Parlange function (Optional, default 1.0) [0..100 -, R]
* SorpMax = Maximal sorptivity at theta residual [0..100 cm/d**0.5, R]
* SorpAlfa = Fitting parameter for empirical sorptivity curvee [-10..10 -, R]

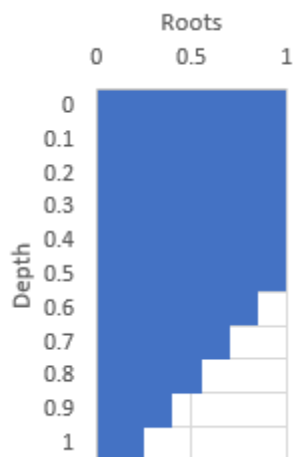
ISOILLAY4  SwSorp  SorpFacParl  SorpMax  SorpAlfa
1          1          1.0000    0.100    0.500
2          1          1.0000    0.100    0.500
3          1          1.0000    0.100    0.500
4          1          1.0000    1.000    0.500
5          1          1.0000    1.000    0.500
* End of Tabel with sorptivity characteristics

SWDARCY = 1          ! Switch for using Darcy flow for infiltration out of macropores
ShapeFacMp = 0.10    ! default
CritUndSatVol = 0.10 ! default
SwDrRap = 0          ! Switch for kind of drainage function [0..1 -, I]:
```

Gewas

Het perceel is in gebruik als grasland. Aangenomen is dat het gras een bewortelingsdiepte van 30-40 cm heeft. In deze studie is ervan uitgegaan dat de beworteling over de bovenste helft evenredig verdeeld is en vervolgens lineair afneemt naar een kwart, dat betekent dat 62% van de wortels⁴ in de bovenste helft zit (Figuur B1.8).

⁴ Ook schimmels kunnen de vochtopname van wortels vergroten. In het model wordt geen onderscheid gemaakt tussen vochtopname door wortels dan wel schimmels. Als hier gesproken wordt over vochtopname door wortels, dan is de hulp van schimmels hierbij inbegrepen.



Figuur B1.8 Relatieve wortelverdeling als functie van de relatieve diepte.

Oppervlaktewater en drainage

In Tabel B1.7 zijn de oppervlaktewaterpeilen gegeven o.b.v. de gemeten slootpeilen. De waterpeilen fluctueren enigszins onder invloed van neerslag en verdamping.

Tabel B1.7 Oppervlaktewaterpeilen (o.b.v. metingen).

Maaiveld	ZP	WP
cm+NAP	cm+NAP	cm+NAP
-60	-110	-120
cm-mv	cm+mv	cm+mv
0	-50	-60

Het zuidelijk veld (MS) is uitgerust met onderwaterdrainage op een diepte van 65 cm -mv en een drainafstand van 8 m. De drains komen dus uit onder het oppervlaktewaterpeil waardoor oppervlaktewater kan infiltreren.

Uit is gegaan van de volgende ontwateringssystemen:

- Sloten met een drainageweerstand van 250 dagen (tevens gelijk aan infiltratieweerstand) en oppervlaktewaterpeilen conform Tabel B1.7.
- Greppels (oftewel maaiveld drainage) op 5 cm -mv en een drainageweerstand van 10 dagen (geen infiltratie).
- Drains: de referentiesituatie is gesimuleerd. In deze situatie zijn geen drains aanwezig.

Grondwater en bodemvocht

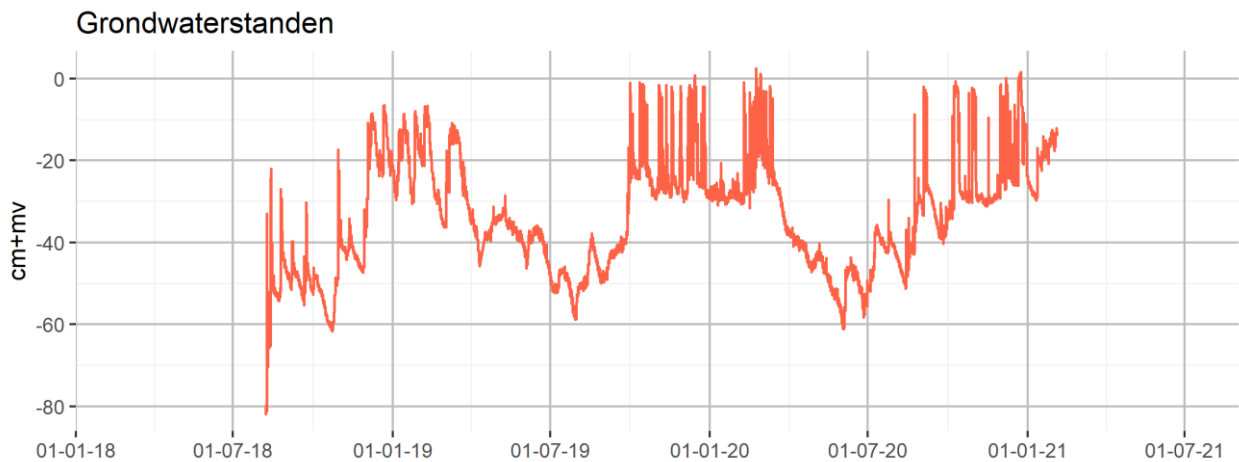
Grondwater

In Rouveen is op een aantal punten de grondwaterstand gemeten. De peilbuis van Wareco is het langst bemeten: vanaf 1 september 2018 (gegevens buis Tabel B1.8).

Tabel B1.8 Gegevens Wareco-peilfilter.

	m+NAP	m+mv
Maaiveld	-0.57	0.00
Bovenkant filter	-0.73	-0.16
Onderkant filter	-1.73	-1.16

Figuur B1.9 geeft de grondwaterstanden weer (Wareco-peilbuis). In de winterperiode bevinden de grondwaterstanden zich rond circa 0,1 tot 0,3 m -mv. In de zomerperiode zakt de grondwaterstand uit tot maximaal circa 0,5 à 0,6 m -mv. Mogelijk dat de hogere grondwaterstanden (mede) beïnvloed worden door de inloop van neerslagwater via de bovenkant van de peilbuis. De peilbuis is namelijk onder maaiveld afgewerkt.

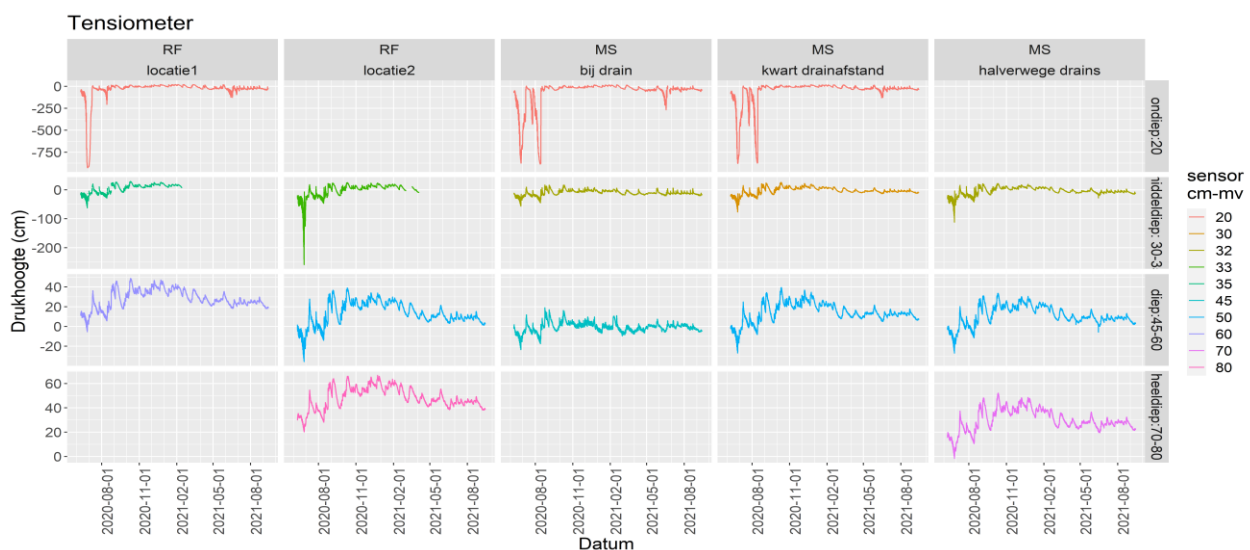


Figuur B1.9 Grondwaterstanden gemeten in de peilbuis van Wareco.

Drukhoogte onverzadigde zone

Op verschillende diepten zijn drukhoogten gemeten. In Figuur B1.10 zijn de meetgegevens weergegeven voor zowel de referentielocatie als de maatregellocatie. Uit de gegevens zijn verschillende zaken te concluderen:

- De ondiepe sensors (20 cm -mv) geven aan dat gedurende de zomer van 2020 de drukhoogte tot enkele honderden cm's onderdruk zijn gezakt. Ook geven de metingen aan dat dit van plek tot plek kan verschillen. De zomer van 2020 geeft aan dat de drukhoogten ook in de zomer niet onderuitgaan.
- Voor het maatregelveld (MS) is duidelijk dat de drain invloed heeft op de gemeten drukhoogte. Het effect van de drain op de drukhoogte op een kwartafstand van de drain lijkt beperkt (Figuur B1.10).



Figuur B1.10 Drukhoogte gemeten op de referentieplot (RF) en de maatregelplot (MS) voor verschillende sensordiepten. Merk op dat de y-as per laag verschillend is.

Bijlage 2 Gevoeligheidsanalyse

De parameters waar van het vermoeden is dat die het meest onzeker zijn en ook aanzienlijke invloed op de vochthuishouding hebben zijn:

- Drainage:
 - Oppervlaktewater
Bodemdiepte 90 cm -mv met een dr. en inf. weerstand van 250 dagen
Zomer- en winterpeil resp. -50 en -60 cm +mv
 - Afvoer over maaiveld
Maaiveldvariatie met een diepte van 5 cm en een drainageweerstand van 5 dagen.
- Kwel: er is uitgegaan van een kwel van 1 mm/d (gedurende het hele jaar). En er zal onderzocht worden of een seizoensafhankelijke (lees grondwaterstandsafhankelijke) kwelflux de metingen beter weet te simuleren.
- Transpiratieberekening:
 - Methode natschade berekening: twee methoden zijn voorhanden: Feddes en Bartholomeus.
De Feddes-methodiek is gehanteerd, omdat deze voor de natschade minder gevoelig is, resulterend in een betere gewasontwikkeling.
 - Compensatie van droogte en natschade. Gekozen kan worden voor compensatie of eigenlijk optimalisatie van de vochtopname door wortels. Het Jarvis-concept is gebruikt met een compensatiefactor (Alphacrit) van 0,7.
- Wortelverdeling en worteldiepte:
Een slecht bekende invoerparameter is de relatieve verdeling van de wortels over de diepte. Ook de worteldiepte zelf is niet gemeten; op basis van de meetgegevens van de drukhoogten en de aeratiegraad is deze aangepast naar 30 cm.

Gevoeligheidsanalyse

Verzadigde doorlatendheid (115)

De verzadigde doorlatendheid heeft ook invloed op de vulling van de macroporiën. In deze variant is de verzadigde doorlatendheid van de bovenste laag aangepast van 45 naar 10 cm/d.

Het effect van deze aanpassing is:

- De run-off neemt met 10 tot 20% per jaar af.
- De macroporiën worden in deze variant gevoed met extra neerslagwater doordat een deel van de neerslag niet infiltreert in de bodemmatrix, maar afstroomt naar de macroporiën. In de variant met de hoge K_{sat} betrof het ongeveer 30 mm/j en met de gereduceerde K_{sat} betreft het circa 50 mm/d.
- Andere effecten zijn verwaarloosbaar, met uitzondering van de rekentijd, die van 8 min. naar 36 min. gaat.

Krimp-zwel karakteristiek (1191)

Wat gebeurt er als er geheel geen krimp-zwel optreedt?

Het effect van deze aanpassing is zeer beperkt. De grondwaterstanden worden nauwelijks beïnvloed. Dat geldt ook voor de transpiratie en de run-off.

Drainageweerstand (116)

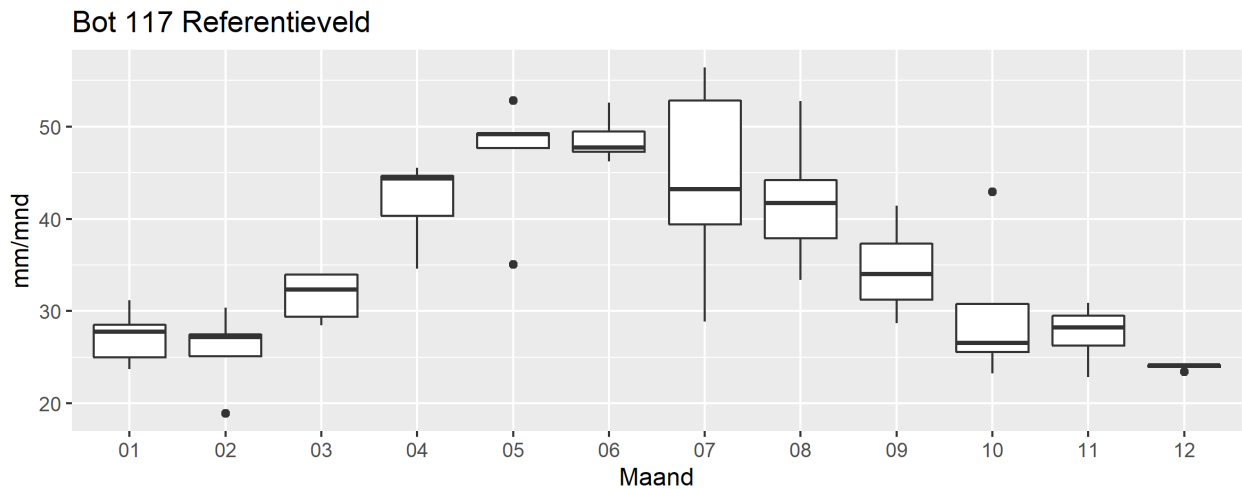
Wellicht dat de drainageweerstand lager zijn en dat daardoor de grondwaterstanden enigszins te hoog zijn berekend in de zomer.

Het effect van deze aanpassing is:

- De grondwaterstanden zijn in de zomer iets hoger dan in de referentie en in de winter iets lager (het betreft verschillen van enkele centimeters tot circa 5 cm tijdens hoge piekgrondwaterstanden in de winterperiode).
- De transpiratie verschilt maar iets (plus 1%) t.o.v. de referentie.
- De jaarlijkse run-off neemt met 10 tot 15% af.

Kwel (117)

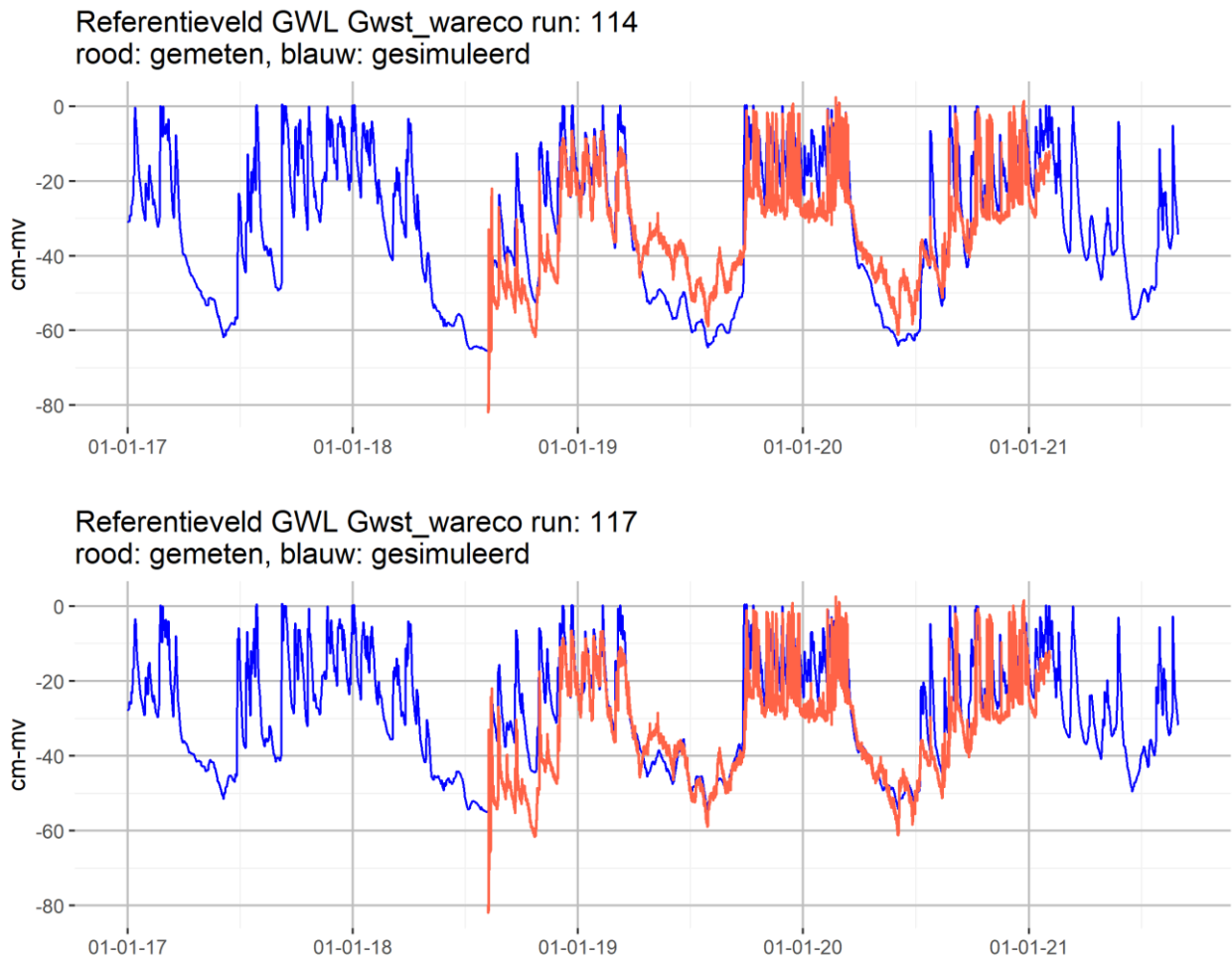
De basisvariant is berekend met een flux van 1 mm/d, onafhankelijk van de diepte. Waarschijnlijk is het realistischer om de flux afhankelijk van de grondwaterstand te maken: bij lage grondwaterstanden 1,5 mm/d en bij hogere grondwaterstanden (mv) 0,5 mm/d (Figuur B2.1). In run 114 was de kwelflux 1 mm/d.



Figuur B2.1 Berekende kwelflux.

Het effect van deze aanpassing is (Figuur B2.2):

- In de winter lagere en in de zomer hogere grondwaterstanden. Deze simulatie komt beter overeen met de meetgegevens.
- Transpiratie: in droge jaren (2018-2020) neemt deze iets toe (2 tot 5%), in het gemiddelde jaar 2017 neemt de transpiratie iets af (1%).
- Run-off: de run-off kan per jaar enigszins toe- dan wel afnemen.



Figuur B2.2 Gemeten en berekende grondwaterstand (referentieveld, run 114: basis, run 117: met aangepaste kwel).

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3181
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3181
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

