

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

## Kennisnetwerk OBN

### De organische veenbasis

*Afbraakprocessen in relatie tot hydrologie*



# **De organische veenbasis**

*Afbraakprocessen in relatie tot hydrologie*



ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

© 2017 VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren

Rapport nr. 2017/OBN218-NZ  
Driebergen, 2017

Deze publicatie is tot stand gekomen met een financiële bijdrage van BIJ12 (de  
gezamenlijke provincies) en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit

Teksten mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Deze uitgave kan schriftelijk of per e-mail worden besteld bij de VBNE onder vermelding  
van code 2017/OBN218-NZ en het aantal exemplaren.

Oplage	50 exemplaren
Samenstelling	Jan van den Akker, Wageningen Environmental Research Rob Hendriks, Wageningen Environmental Research Bas van Delft, Wageningen Environmental Research
Druk	KNNV Uitgeverij/Publishing
Productie	Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE) Adres : Princenhof Park 9, 3972 NG Driebergen Telefoon : 0343-745250 E-mail : info@vbne.nl

# Voorwoord

Het doel van het Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit (OBN) is het ontwikkelen, verspreiden en benutten van kennis voor terreinbeheerders over natuurherstel, Natura 2000, PAS, leefgebiedenbenadering en ontwikkeling van nieuwe natuur.

Voor het behoud en herstel van hoogvenen zijn alle restanten van eertijds grotere hoogveengebieden opgenomen in het Natura 2000-netwerk. Het grootste oppervlak hoogveen wordt gerekend tot habitattype H7120 Herstellende hoogvenen. Het ligt in de bedoeling dit overwegend sterk verdroogde type om te vormen ten gunste van habitattype H7110A Actieve hoogvenen (hoogveenlandschap).

De afgelopen jaren zijn in veel hoogveengebieden al met succes specifieke maatregelen genomen om de hydrologie te verbeteren. Voor een duurzaam herstel is een (vrijwel) permanente verzadiging van de veenbasis met water essentieel. Gezien de hoge kosten van hydrologische herstelmaatregelen en de effecten van deze maatregelen op landgebruik in het omliggende gebied is meer kennis gewenst van de kwetsbaarheid van de veenbasis in hoogveensystemen. De kernvraag in dit onderzoek is dan ook: Hoe wordt de veenbasis aan de onderzijde aangetast als gevolg van een te geringe stijghoogte? Voor het ontwerp en de verantwoording van de maatregelen is het essentieel om per situatie aan te kunnen geven hoe hoog de grondwaterstanden moeten zijn om aantasting te voorkomen en wat de consequenties zijn van suboptimale standen.

Om antwoord te geven op de vraag hierboven zijn metingen verricht in het Natura2000 gebied het Wierdense Veld. De hoofdconclusie is dat in de praktijk geen aantasting is te verwachten van een organische veenbasis door zuurstof uit een onverzadigde laag tussen de grondwaterstand in de zandondergrond (stijghoogte) en de onderkant van de veenbasis of door met grondwater aangevoerd nitraat en sulfaat bij een volledig verzadigde zandondergrond. Ook blijken krimp en scheurvorming door uitdroging van de onderkant van de veenbasis geen wezenlijk gevaar te vormen voor de veenbasis.

Wat betreft krimp en scheurvorming van een organische veenbasis is de conclusie dat bij een permanent natte veenlaag op de veenbasis het gevaar voor scheurvorming afwezig is. Een permanent natte veenlaag is wel cruciaal. De grootste bedreiging van een organische veenbasis is het uitdrogen van de veenlaag op de veenbasis. Uit het onderzoek in het Wierdense veld blijkt dat "gaten" in de veenbasis door bijvoorbeeld de brandgang, de infiltratie van het veensysteem in ieder geval plaatselijk sterk kunnen verhogen en daling van de freatische grondwaterstand tot in de veenbasis sterk kunnen bevorderen. Een eerste actie om de situatie te verbeteren zou het opsporen en dichten van deze gaten en lekken in de veenbasis moeten zijn.

Ik wens u veel leesplezier.

Teo Wams

Voorzitter van de OBN Adviescommissie



# Inhoudsopgave

## Samenvatting

### Summary

### Uitgebreide samenvatting

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>12</b>
1.1	Aanleiding en doelstelling	12
<b>2</b>	<b>Methoden</b>	<b>14</b>
2.1	Veldwerk	14
2.2	Laboratoriumbepalingen	18
2.2.1	Organische-stofgehalte, vochtgehalte en volumieke massa	18
2.2.2	Hydraulische karakteristieken en doorlatendheid bij verzadiging	18
2.2.3	Krimpkarakteristieken	19
2.2.4	Afbraaksnelheden	21
2.3	Modelberekeningen	23
2.3.1	Modellen SWAP en ANIMO	23
2.3.2	Modelinvoer	23
<b>3</b>	<b>Beschrijving onderzoekslocatie</b>	<b>28</b>
3.1	Selectie onderzoeksgebied	28
3.2	Selectie meetlocatie	28
3.3	Beschrijving meetraai	31
3.4	Inrichting meetraai	34
<b>4</b>	<b>Resultaten en Discussie</b>	<b>35</b>
4.1	Veldmetingen	35
4.1.1	Grondwaterstanden, stijghoogten en vochtspanningen	35
4.1.2	Luchtdruk in C-horizont en effect daarvan op stijghoogte en vochtspanning	38
4.1.3	Zuurstofconcentraties in de lucht in de zandlaag onder de veenbasis	41
4.1.4	Concentraties opgeloste stoffen	42
4.2	Laboratoriumbepalingen	43
4.2.1	Organische-stofgehalte, vochtgehalte en volumieke massa	43
4.2.2	Hydraulische karakteristieken	45
4.2.3	Krimpkarakteristieken	47
4.2.4	Afbraaksnelheden	55
4.3	Modelberekeningen	57
4.3.1	Kalibratie van SWAP tegen gemeten grondwaterstanden	57
4.3.2	Analyse van de meetperiode	61
4.3.3	Analyse van kans op aerobe en anaerobe afbraak van de veenbasis	65
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>74</b>
	<b>Literatuur en bijlagen</b>	<b>77</b>





## Samenvatting

De veenbasis vormt een slecht tot zeer slecht doorlatende laag tussen de bovenliggende veenlaag en een onder de veenbasis liggend zandpakket. De veenbasis zorgt er voor dat het grondwater in het veen niet wegzakt naar de zandondergrond en het veen nat blijft en de omstandigheden voor veenvorming gunstig. Bij een grondwaterstand in het zand lager dan de veenbasis kan zich tussen die grondwaterstand en de veenbasis lucht bevinden. Een veenbasis die zijn slechte doorlatendheid dankt aan organisch materiaal zou daardoor kwetsbaar kunnen zijn voor biologische afbraak door blootstelling aan lucht (zuurstof). Omdat organische stof bij uitdrogen veel kan krimpen is een organische veenbasis ook kwetsbaar voor uitdrogen, waarbij krimp-scheuren ontstaan, waardoor de doorlatendheid voor lucht en water sterk toeneemt. Organische stof kan ook worden afgebroken door de zuurstof in nitraat en sulfaat die zijn opgelost in water. Ook bij een verzadigde ondergrond zou zo een organische veenbasis kunnen worden aangetast.

Uit het onderzoek blijkt dat in de praktijk de hoeveelheid zuurstof in een luchtbel onder een veenbasis te weinig is voor afbraak van een organische veenbasis. De toevoer van zuurstof vanaf de randen van het veensysteem naar de luchtbel onder de veenbasis is de beperkende factor. Ditzelfde geldt in nog sterkere mate voor de afbraak van een organische veenbasis bij een verzadigde zandondergrond met hoge concentraties nitraat en sulfaat. Ook daarbij is de hoeveelheid en toevoer van nitraat en sulfaat bij lange na niet genoeg om de veenbasis wezenlijk aan te tasten. Indien de veenlaag boven een organische veenbasis nat genoeg blijft, blijkt ook krimp van de veenbasislagen geen rol van betekenis te spelen. Geconcludeerd kan worden dat indien de veenlaag boven de veenbasis maar jaarrond nat blijft, een organische veenbasis niet wordt aangetast door afbraak of krimp.

Bij de onderzoeklocatie in het Wierdense Veld zakte de grondwaterstand in de veenlaag in de droge herfst van 2016 uit tot in de veenbasis. Dit werd veroorzaakt door drainage richting een nabijgelegen brandgang die tot in de veenbasis is gegraven en zo een gat in de veenbasis vormt. Het wordt aanbevolen om lekkage van het veensysteem via dit soort gaten zoveel mogelijk te beperken.

## Summary

The peat base forms a poor to very poorly permeable layer between the upper peat layer and a sand layer underneath the peat base. The peat base ensures that the groundwater in the peat doesn't infiltrate to the sand layer and the peat remains wet and the conditions for peat formation favourable. In the case of a groundwater level in the sand below the peat base, there may be air between this groundwater level and the peat base. A peat base that owes its poor permeability to organic material could therefore be vulnerable to biodegradation by exposure to air (oxygen). Organic matter can shrink a lot by drying out. Therefore an organic peat base is also vulnerable to drought resulting in shrinkage cracks and by this a significantly increasing the permeability to air and water. Organic matter can also be decomposed by the oxygen in nitrate and sulphate which are dissolved in water. This would also be a threat of degradation of an organic peat base in case of a saturated sand layer. The research shows that in practice the amount of oxygen in an air bubble under a peat base is not enough to decompose a significant part of the organic matter in the organic peat base. The supply of oxygen from the sides of the peat system to the air bubble under the peat base is also very low and in this way a limiting factor for degradation. The same applies even more to the degradation of an organic peat base in a saturated sand layer with high concentrations of nitrate and sulphate. Here too, the quantity and supply of nitrate and sulphate are by no means enough to affect the peat base substantially. If the peat layer above the peat base remains wet enough then shrinkage of the peat base will not play a significant role either. It can be concluded that if the peat layer above the peat base remains wet all year round then an organic peat base will not be affected by degradation or shrinkage.

At the research site in the Wierdense Veld, the groundwater level in the peat layer lowered into the peat base in the dry autumn of 2016. This was caused by drainage of the peat layer towards a nearby firebreak that was dug into the peat base and thus formed a hole in the peat base. It is recommended to limit leakage of the peat system via these types of holes as much as possible.

# Uitgebreide samenvatting

De veenbasis vormt een slecht tot zeer slecht doorlatende laag tussen een bovenliggende veenlaag en een onder de veenbasis liggende minerale laag. In Nederland is deze minerale laag meestal een zandlaag. Bij een stijghoogte van het water in het zand lager dan de freatische grondwaterstand in het veen is een slecht doorlatende veenbasis essentieel om de wegzijging te beperken en de freatische grondwaterstand zo hoog mogelijk te houden. Indien de stijghoogte in de zandlaag lager is dan de veenbasis, dan kan onder de veenbasis een onverzadigde laag met luchtgevulde poriën aanwezig zijn. De slechte doorlatendheid van een veenbasis wordt veroorzaakt door organisch of mineraal materiaal. Een organische veenbasis is in principe kwetsbaar voor biologische afbraak door blootstelling aan lucht (zuurstof), nitraat of sulfaat. Hoe kwetsbaar, was een doel van dit onderzoek. Omdat organische stof bij uitdrogen veel kan krimpen is een organische veenbasis ook kwetsbaar voor uitdrogen, waarbij krimpscheuren ontstaan, waardoor de doorlatendheid voor lucht en water sterk toeneemt en lucht dieper en gemakkelijker in de veenbasis dringt. Het onderzoek richtte zich op het gevaar dat een organische veenbasis vanaf de onderkant wordt aangetast door uitdroging en scheurvorming en door afbraak van organisch materiaal door zuurstof in zijdelings aangevoerde of opgesloten lucht onder de veenbasis of bij een verzadigde situatie door aanvoer van nitraat en sulfaat.

## *Monitoring en metingen*

In een raai in het Wierdense veld zijn stijghoogten in de zandlaag en de freatische grondwaterstand in de veenlaag gedurende meer dan 14 maanden gemonitord vanaf augustus 2015 tot november 2016. Deze raai begon in een bestaande brandgang en stak ca 35 m in het veengebied waarin voornamelijk pijpestrootje groeide. Op één punt (buis B) zijn daarbij ook de luchtdruk in de lucht onder de veenbasis en de vochtspanning net boven de veenbasis, onderin de veenbasis en in de zandlaag onder de veenbasis gemonitord. Bij dit punt zijn ook monsters van de veenbasis en het onderliggende zand genomen, waaraan verzadigde doorlatendheden, hydraulische doorlatendheids- en waterretentiekarakteristieken, krimpkarakteristieken en afbraak bij blootstelling aan luchtzuurstof, een nitraatoplossing en een sulfaatoplossing zijn bepaald. Het profiel bij B bestond uit 55 cm veen op een veenbasis van 10 cm gliede en 15 cm kazige B met daaronder de zandlaag.

Gedurende de wintermaanden stond de freatische grondwaterstand in het maaiveld, waarna einde voorjaar en in de zomerperiode de freatische grondwaterstand langzaam zakte omdat de verdamping groter was dan de neerslag. Gedurende een korte periode in augustus 2015 en van begin september 2016 tot eind oktober was de freatische grondwaterstand tot in de veenbasis gezakt en met name in die laatste periode in 2016 was de veenbasis aan het uitdrogen, waarbij de vochtspanning in de veenbasis zakte tot ca -80 cm waterdruk. In het laatste jaar van de monitoringperiode was de gemiddelde stijghoogte in de zandlaag 132 cm -mv (onder het maaiveld). In de winter steeg de stijghoogte tot 61 cm -mv en dus 19 cm in de veenbasis. In de herfst van 2016 zakte de stijghoogte tot 207 cm -mv. De luchtdruk in de opgesloten luchtlaag varieerde tussen +51 cm waterdruk in februari 2016 tot -40 cm waterdruk in augustus 2015. De stijghoogte minus de luchtdruk levert de stand van het grondwater in de zandlaag. Gemiddelde, minimum en maximum van de grondwaterstand in het zand waren respectievelijk 151, 108 en 206 cm -mv.

De gliede heeft een verzadigde doorlatendheid van 0,022 cm/dag en de kazige B van 0,026 cm/dag. Samen met een dun schalterveenlaagje boven de veenbasis is de verzadigde weerstand van de veenbasis 1900 dagen, wat aan de lage kant is. De krimpmetingen zijn

verricht met en zonder een belasting van 75 g/cm<sup>2</sup>, wat ongeveer overeenkomt met de druk (bovenbelasting) van een 50-70 cm natte veenlaag. De gliede blijkt kwetsbaar voor krimp en daaruit volgende scheurvorming, vooral als door uitdroging van de veenlaag de bovenbelasting afneemt. De kazige B blijkt in veel mindere mate gevoelig voor krimp en alleen bij sterke uitdroging treedt scheurvorming op en niet bij alle monsters. De aerobe afbraaksnelheden van het organisch materiaal in de gliede en de kazige B zijn bij 21° C bij beide ca 0,01 per jaar (1/jaar = eenheid van 1<sup>e</sup>-orde-afbraaksnelheidsconstante). De anaerobe afbraaksnelheden bij 21° C zijn door nitraat (100 mg/L) bij zowel de gliede als de kazige B ca 0,006 (1/jaar) en door sulfaat (200 mg/L) voor de gliede 0,003 en voor de kazige B 0,001 per jaar. De Q<sub>10</sub>'s – de factoren waarmee de afbraaksnelheid bij 10° C temperatuurstijging toeneemt - bij aerobe afbraak zijn ca. 3.

#### *Evaluatie luchtzuurstoftoetreding voor afbraak*

Voor aerobe afbraak van de onderkant van de veenbasis wordt zuurstof aan lucht onder de veenbasis onttrokken. Dit kan een opgesloten bel met lucht zijn of lucht die zijdelings door de onverzadigde zandlaag wordt aangevoerd. De hoeveelheid zuurstof in een luchtbel onder de veenbasis blijkt zelfs bij grof zand met veel luchtgevulde poriën zo weinig dat de veenbasis dan nauwelijks wordt aangetast. Voor aerobe afbraak is daarom toevoer van luchtzuurstof over een zekere periode noodzakelijk. Dit is alleen mogelijk vanaf de rand van het veengebied door diffusie of door een luchtstroom door een soort "ademhalen" van de luchtbel onder de veenbasis. Daarbij wordt er ingeademd als door daling van het grondwaterpeil in de zandondergrond een onderdruk ontstaat en uitgedemd door stijging van het grondwaterpeil. In de monitoringsraai in het Wierdenseveld bleek onder de veenbasis inderdaad lucht te zitten. De lucht die hieraan werd onttrokken in augustus 2015 bevatte slechts 0 – 2% zuurstof. Na augustus 2015 stegen zowel de freatische grondwaterstand in het veen als de stijghoogte in het zand en uit de toename van de luchtdruk en daarna stabiele luchtdruk onder de veenbasis blijkt dat deze lucht is opgesloten. In de zomer van 2016 nam door de dalende stijghoogte in het zand de luchtdruk af en werd zelfs in geringe mate negatief. Einde zomer 2016 en in de droge herfst 2016 werden wel hogere zuurstofgehalten gemeten (> 14%). Het "inademen" is waarschijnlijk de oorzaak voor de hogere gehalten aan zuurstof einde zomer 2016. Luchtintrede vindt dan plaats door de uitdrogende bodem bij de rand van de brandgang, waar de veenlaag bijna afwezig is en de aanwezige pijpenstrootje in de veenbasis wortelt.

Ook het wegvallen van de onderdruk in de lucht onder de veenbasis in deze periode duidt op "inademen". De eerdere luchtdrukmetingen waarbij een luchtdruk wordt opgebouwd bij een natter wordende veenlaag en stijgende stijghoogten duiden erop dat het "uitademen" niet goed lukt doordat de veenbasis wordt verzadigd en daardoor de lucht in het zand opsluit. Ook in de droge herfst van 2016 zijn hogere zuurstofgehalten gemeten, maar in die periode viel ook de veenbasis droog en raakte deze geheel onverzadigd. Dan ontstaan er blijkbaar ook mogelijkheden voor zuurstoftransport door de veenbasis heen. Een dergelijke situatie was geen onderdeel van dit onderzoeksproject, maar iets wat juist moet worden voorkomen omdat dan de veenbasis van boven ernstig kan worden aangetast door uitdroging, scheurvorming en afbraak bij een relatief gezien goede zuurstofvoorziening.

#### *Evaluatie met modellering hydrologie*

De resultaten van de monitoring en de metingen aan de eigenschappen van de veenbasis zijn geëvalueerd en getoetst met de simulatiemodellen SWAP en ANIMO en voor de situatie bij Buis B en C doorgerekend voor 2015 en 2016. De referentie was hierbij het bodemprofiel bij Buis B, waarbij de gemeten stijghoogte in de zandondergrond werd opgelegd en model SWAP werd gekalibreerd tegen de gemeten grondwaterstanden. De berekende waterstromen bij Buis B waren in 2016 wat betreft de horizontale afvoer respectievelijk 22 (runoff) en 163 mm (interflow) en wat betreft de infiltratie (wegzijging) 125 mm. De drainerende werking van de nabijgelegen brandgang is groot en een belangrijke oorzaak van de daling van de freatische grondwaterstand in het veen en het uiteindelijke uitdrogen van de veenlaag.



### *Evaluatie en modellering afbraak*

Om grip te krijgen op de mogelijke aerobe en anaerobe afbraak zijn modelberekeningen met SWAP-ANIMO uitgevoerd waarbij gebruik is gemaakt van de metingen. Daarnaast zijn 'worst case' situaties doorgerekend om de gevaren van afbraak van het organische materiaal voor het functioneren van de veenbasis te bepalen. Transport door diffusie van zuurstof vanaf de rand naar het middendeel van de veengebieden blijkt horizontaal niet verder te komen dan ca 1,1 m vanaf de rand, doordat de flux aan zuurstof door diffusie beperkt is en bovendien tijdens het transport zuurstof wordt gebruikt voor afbraak van organischestof in de zandlaag. Zelfs bij vervanging van het aanwezige fijne zand door een grover zand blijkt de zuurstof niet verder te komen dan ca 4 m en dan niet eens met relevante zuurstofconcentraties. Voor de simulatie van de situatie waarbij door de daling van het grondwaterpeil in de zandlaag lucht wordt aangezogen vanaf de rand, is de referentiesituatie (bij buis B in de monitoringsraai) aangehouden, waarbij de grondwaterstand in het zand 0,95 m onder de veenbasis ligt en er een constante aanvoer van luchtzuurstof met een gehalte van 21% zuurstof in de zandlaag plaatsvindt. Voor de vochtspanning aan de bovenkant van de veenbasis is nul aangehouden. Dan blijkt er geen afbraak op te treden in de gliede en blijkt de afbraak van de organische stof in de kazige B in 4 maanden tijd 0,04% te zijn. Er is ook een "worst case" scenario doorgerekend met grof zand waarbij de grondwaterstand 1,45 m onder de veenbasis ligt. Uitgaande van een geheel onverzadigde veenbasis (vochtspanning - 145 cm waterdruk) en constante aanvoer van zuurstof naar de zandlaag, blijkt de afbraak van de organische stof in de gliede en de kazige B in 4 maanden ca 0,2% te zijn. Wordt niet uitgegaan van een constante aanvoer van zuurstof, dan is met de zuurstof in de zandlaag de afbraak van de veenbasis beperkt tot maximaal 0,06%.

Bij de anaerobe afbraak blijkt de omvang van de toevoer van nitraat of sulfaat naar en in de veenbasis de limiterende factor te zijn voor de afbraak. Zelfs bij een modelscenario waarbij de stijghoogte onder de veenbasis zo (onrealistisch) hoog is dat in plaats van wegzijging een kwelstroom van 43 mm per jaar optreedt, de nitraat- en sulfaatconcentraties maximaal zijn (resp. 100 en 200 mg/L) en er geen organische stof in de zandlaag aanwezig is om nitraat en sulfaat volledig te verbruiken voordat het de veenbasis bereikt, leidt in dertig jaar tijd tot slechts 0,55% afbraak van de kazige B en 0,07% van de gliede door sulfaatreductie (nitraat wordt volledig afgevangen door de B-horizont onder de kazige-B).

### *Conclusies*

De organische veenbasis blijkt nauwelijks gevoelig voor aerobe afbraak en niet gevoelig voor anaerobe afbraak. De veenbasis is weinig gevoelig voor krimp en scheurvorming. Als de veenlaag boven de veenbasis maar nat blijft is er praktisch geen gevaar voor degradatie van de veenbasis.

Voor zowel een organische veenbasis als het gehele veensysteem en de ontwikkeling daarvan, is het voorkomen van uitdroging van de veenlaag en de veenbasis essentieel. De onderzochte situatie in het Wierdense Veld blijkt daaraan in de meetperiode niet te voldoen. Die wordt veroorzaakt doordat de meetlocatie wordt gedraineerd door een naastliggende brandgang die tot in de veenbasis is ontgraven. Het lek dat daardoor is ontstaan in het veensysteem met de daaronder liggende veenbasis, is de oorzaak van het uitdrogen tot in de veenbasis in 2016 en niet een te hoge wegzijging door de als weerstandbiedende laag matig functionerende veenbasis.

### *Aanbevelingen*

Maatregelen moeten er op gericht zijn om de freatische grondwaterstand in het veen hoog te houden en daarmee de veenbasis voor uitdrogen van bovenaf te behoeden. Het zoveel mogelijk dichten van eventuele "gaten" in de veenbasis, die zijn veroorzaakt door het vroeger graven van sloten, brandsleuven of veenontginningen, wordt aanbevolen. Een andere mogelijkheid is het verhogen van de stijghoogte in de zandondergrond om de infiltratie via de gaten in de veenbasis zoveel mogelijk te beperken.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en doelstelling

Voor het behoud en herstel van hoogvenen zijn alle restanten van eertijds grotere hoogveengebieden opgenomen in het Natura 2000-netwerk. Het grootste oppervlak hoogveen wordt gerekend tot habitatype H7120 Herstellende hoogvenen. Het ligt in de bedoeling dit overwegend sterk verdroogde type om te vormen ten gunste van habitatype H7110A Actieve hoogvenen (hoogveenlandschap). De hoogveengebieden maken ook deel uit van het Natuurnetwerk Nederland en hebben vanwege hun verdrogingsgevoeligheid een plaats in de provinciale TOP-lijsten voor antiverdrogingsbeleid. Ook in het kader van de PAS zijn hoogvenen volop in beeld. Buiten deze beleidsdoelen die gericht zijn op het behoud en herstel van natuurwaarden in de hoogveengebieden zelf, is het goed functioneren van hoogveensystemen van belang voor koolstofvastlegging en waterberging (WB21). De afgelopen jaren zijn in veel hoogveengebieden al met succes specifieke maatregelen genomen om de hydrologie te verbeteren. Voor een duurzaam herstel is een (vrijwel) permanente verzadiging van de veenbasis met water essentieel.

### *Kernvraag: de grondwaterstand onder de veenbasis*

Gezien de hoge kosten van hydrologische herstelmaatregelen en de effecten van deze maatregelen op landgebruik in het omliggende gebied is meer kennis gewenst van de kwetsbaarheid van de veenbasis in hoogveensystemen. In een literatuurstudie voorafgaand aan het onderzoek (Sevink et al. 2014) volgt dat vooral een organische veenbasis kwetsbaar is. Vervolgens zijn een aantal vragen en een kernvraag naar voren gekomen: Hoe wordt de veenbasis aan de onderzijde aangetast als gevolg van een te geringe stijghoogte? Voor het ontwerp en de verantwoording van de maatregelen is het essentieel om per situatie aan te kunnen geven hoe hoog de grondwaterstanden moeten zijn om aantasting te voorkomen en wat de consequenties zijn van suboptimale standen. Dit is dan ook de kernvraag van het onderzoek.

### *De kennisvragen*

Centraal staat de vraag in hoeverre het essentieel is dat de stijghoogte van het grondwater in het onderliggende pakket leidt tot permanente of vrijwel permanente verzadiging met water van de veenbasis. Daarbij is het de vraag in hoeverre de veenbasis wordt aangetast door afbraak en in hoeverre de doorlatendheid van de veenbasis afneemt door krimp en scheurvorming. De belangrijkste groepen processen die een rol spelen zijn:

- Chemisch-microbiële afbraak van organische stof in de veenbasis;
- Fysische processen, in het bijzonder krimp en scheurvorming.

In het project moeten daarom de volgende kennisvragen worden beantwoord:

1a. Onverzadigde zone. Wat is de mogelijke aeratie als gevolg van grondwaterstands daling en gegeven de waarden van relevante bodemfysische parameters van de veenbasis en minerale ondergrond?

2a. Krimp, zetting en scheurvorming. Wat is de relatie tussen krimp, watergehalte en pF-waarde en idem voor de relatie tussen scheuring en watergehalte/pFwaarde?

2b. Krimp, zetting en scheurvorming. Wat is de variatie in het bodemfysische gedrag van de veenbasis bij uitdroging?

3a. Aerobe/anaerobe afbraak. Is gasdiffusie in een zodanige flux mogelijk dat daardoor aerobe afbraak van de veenbasis van onderuit plaats kan vinden?

3b. Aerobe/anaerobe afbraak. Speelt een verhoogde verticale flux (kwel) een rol bij toename van electronen-acceptoren en verhoogde anaerobe afbraak van de veenbasis?

3c. Aerobe/anaerobe afbraak door gas en waterfluxen. In hoeverre hebben veranderingen in de hydrologie, met name aanvoer van water uit aangrenzende landbouwgebieden met hogere concentraties nutriënten (electronenacceptoren) een rol in versterkte afbraak van de veenbasis?

4a. Aerobe/anaerobe afbraak, gasfluxen. Wat zijn de potentiële zuurstoffluxen, welke hoeveelheid organische stof kan per tijdseenheid afgebroken worden en wat is het potentiële effect van de 'ademhaling'?

4b. Aerobe/anaerobe afbraak, gasfluxen. Wat is de invloed van de gasfluxen die het gevolg zijn van gasdiffusie samenhangend met concentratiegradiënten ('ademhaling')?

## 2 Methoden

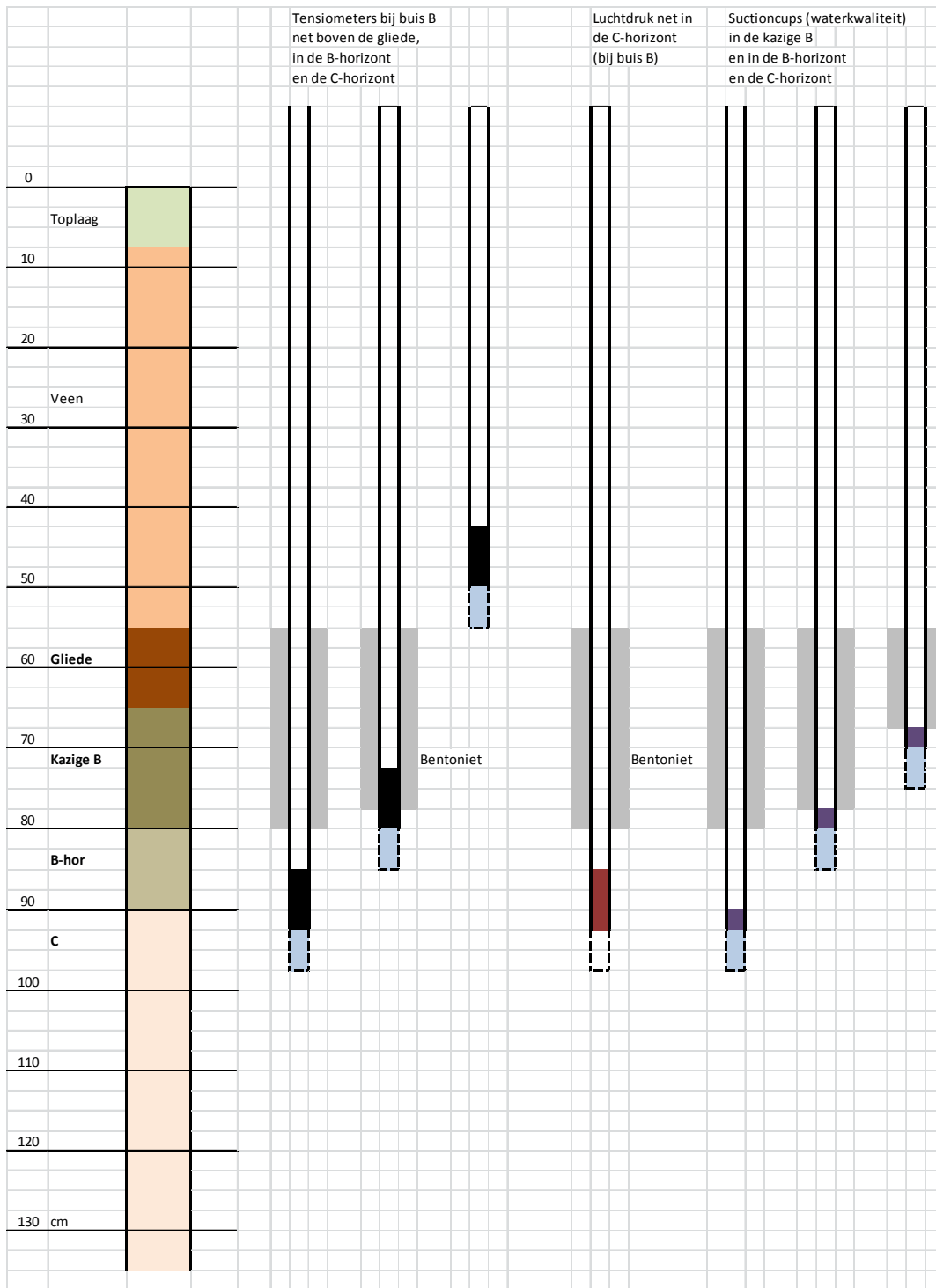
In dit hoofdstuk worden de methoden die zijn toegepast besproken. Het gaat daarbij om het uitgevoerde veldwerk (paragraaf 2.1), de in het laboratorium gedane metingen (paragraaf 2.2) en de uitgevoerde modelberekeningen (paragraaf 2.3). De selectie van het onderzoeksgebied en de meetlocatie, en de inrichting van de meetraai worden beschreven in hoofdstuk 3.

### 2.1 Veldwerk

In het veld zijn grondwaterstanden in het bovenliggende veenpakket gemeten, stijghoogten in het zandpakket onder de veenbasis, drukhoogten in verschillende lagen, zuurstofgehalten in onttrokken bodemlucht en opgeloste stoffen in bodemvocht. De inrichting van de meetraai is gegeven in hoofdstuk 3 figuur 6. De figuren 1a en 1b geven een schematisch overzicht van de meetinrichting langs de raai.

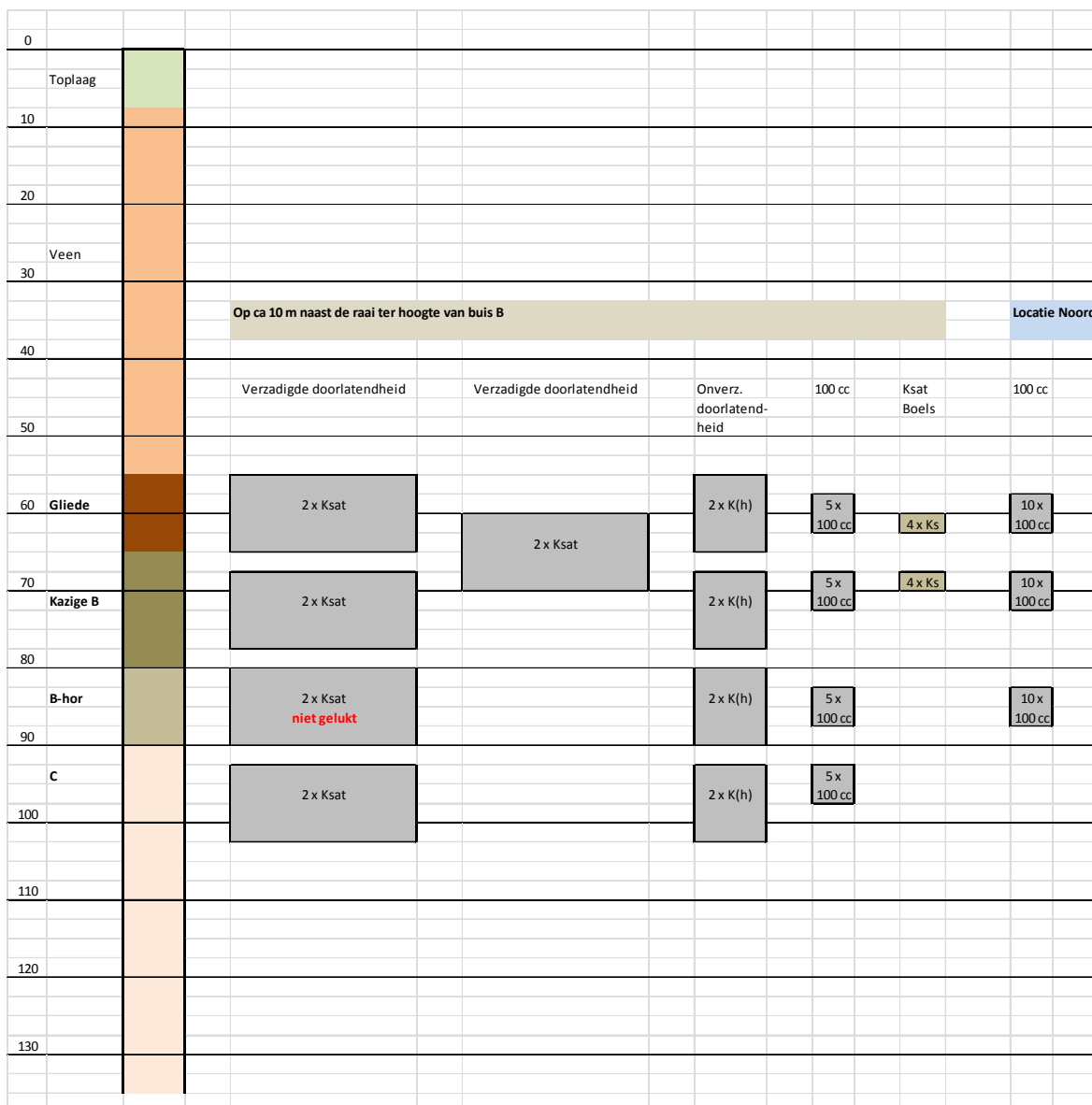
Grondwaterstanden en drukhoogten werden automatisch en continu geregistreerd vanaf 6 augustus 2015 met Keller drukopnemers en tensiometers. Lucht werd onttrokken uit in de bodem geplaatste luchtkamers en bodemvocht uit suctioncups. Het was niet altijd mogelijk om voldoende bodemlucht te onttrekken voor de metingen. Uiteindelijk werd bodemlucht onttrokken op 20 augustus 2015, 24 augustus 2016, 12 september 2016 en 29 november 2016. Bodemvocht werd onttrokken op 26 juni 2015, 20 augustus 2015, 26 juni 2016, 24 augustus 2016, 12 oktober 2016 en 29 november 2016. Ondanks het feit dat de suctioncups in tweevoud waren geïnstalleerd was het niet altijd mogelijk om voldoende water te onttrekken bij alle punten. Daarbij moet ook worden bedacht dat een aantal suctioncups in zeer slecht doorlatende grond was geplaatst.





Figuur 1b Schematische weergave van de meetinstallatie voor het veldwerk (zie raai in figuur 8 in hfst 3 voor de benaming en plaatsing van de buizen). Bij buis B waren tensiometers net onder de veenbasis in de C-horizont (diepte ca 0,95 m -mv) en in de B-horizont (diepte ca 0,85 m -mv) aangebracht om daar de vochtspanningen (negatieve waterspanningen) te meten. In het veen was een tensiometer (diepte 0,51 m -mv) aangebracht net boven de gliedelaag, zodat zelfs bij uitdrogen van de veenlaag tot op de veenbasis de vochttoestand kon worden gemeten. Verder was bij buis B een buis met een afgesloten luchtkamer geïnstalleerd met een luchtdrukmeter om de luchtdruk in de lucht opgesloten onder de veenbasis te monitoren. Met behulp van kunststoffen suctioncups kon in de C-horizont, de B-horizont en de kazige B-horizont watermonsters worden onttrokken op diepten van ca 0,95; 0,82 en 0,72 m -mv. De tensiometercups, de suctioncups en het geperforeerde luchtkamertje zijn in de figuur met streeplijnen aangegeven.

Figure 1b. Schematic presentation of the monitoring measurements in the field (see also figure 8)



Figuur 2 Monsternamen op verschillende diepten op ca. 10 meter ten zuiden van de raai nabij buis B en op een locatie aan de noordrand van het Wierdense Veld. De monsters voor de verzadigde doorlatendheid Ksat hebben een diameter van 20 cm en een hoogte van 10 cm. Met name de B-horizont was te hard en breekbaar voor een Ksat (verzadigde doorlatendheid) bemonstering. Voor de Ksat bemonstering van de C-horizont is uitgeweken naar de brandgang. De monsters voor de onverzadigde doorlatendheid K(h) hebben een diameter van 10 cm en een hoogte van 8 cm.

Figure 2. Sampling at several depths in the cross section nearby the groundwater tube B and in the location in the north of the Wierdense Veld

Gedurende het veldonderzoek zijn op drie locaties bemonsteringskuilen gegraven waarin op verschillende diepten monsters zijn gestoken voor diverse bepalingen in het laboratorium (tabel 1). De diepten van de monsters van locaties 1 en 3 zijn aangegeven in figuur 2.

Tabel 1 Codering en ligging van de bemonsteringslocaties (voor de ligging zie fig. 8)  
Table 1 Coding and location of the sampling sites (for the location see fig. 8)

Locatiecode	Omschrijving	Datum monsternamen
1	tien meter ten zuiden van de raai nabij buis B	5 augustus 2015
2	zeven meter ten noorden van de raai nabij buis B	6 september 2016
3	aan de noordrand van het Wierdense Veld ('locatie Noord' in fig. 2)	12 augustus 2015



De ringen van de ongestoorde monsters zijn voorzichtig met de hand of met een moker gelijkmatig in de grond gedrukt zodat de structuur van de grond behouden is gebleven. Daarna zijn de monsterringen rondom uitgegraven en met folie omwikkeld tegen vochtverlies en bij de kleine ringen in een speciale kistje klemvast opgeborgen. De monsters zijn dezelfde dag nog bij 4 graden °C opgeborgen voor verdere analyse in het laboratorium. Tijdens monsternamen is tevens een profielbeschrijving gemaakt.

## 2.2 Laboratoriumbepalingen

### 2.2.1 Organische-stofgehalte, vochtgehalte en volumieke massa

Het organische-stofgehalte is bepaald door het gloeiverlies van monsters te meten. Hierbij wordt een monster eerst gedroogd in een stoof bij 105 °C, gewogen en vervolgens gegloeid bij 550 °C in een gloeioven en dan weer gewogen. Het massaverlies van een stoofdroog monster door gloeien is een maat voor het organische-stofgehalte. Bij een hoog lutumgehalte of kalkgehalte moet worden gecorrigeerd voor verlies aan kristalwater of carbonaten.

Het volumetrisch vochtgehalte is meest aan ongestoorde monsters in 100-cc-ringen gemeten. Het gewicht bij het betreffende vochtgehalte wordt gemeten waarna het monster wordt gedroogd in een stoof bij 105 °C en vervolgens weer wordt gewogen. Het massaverlies is gelijk aan het vochtgehalte bij het volume van de ring (meestal 100 cm<sup>3</sup>). Voor bepaling van het vochtgehalte bij verzadiging wordt het monster eerst langzaam verzadigd op een pF-zandbak of in een bak water bij een waterstand tot de hoogte van het monster.

De volumieke massa is apart, maar vaak ook als vervolgstap na het vochtgehalte, bepaald door de massa van de droge stof na drogen te relateren aan het oorspronkelijke volume van het monster, meestal het volume van de ring.

### 2.2.2 Hydraulische karakteristieken en doorlatendheid bij verzadiging

#### **Hydraulische karakteristieken**

De hydraulische karakteristieken van waterretentie (pF-curve) en onverzadigde-waterdoorlatendheid zijn simultaan gemeten met de verdampingsmethode (ISO 11275, 2004). Hierbij wordt een onverstoord gestoken grondmonster van circa 600 cm<sup>3</sup> in een pvc-monsterring (h=8 cm, D≈10 cm) aan de boven- en onderzijde vlak afgewerkt, zodat een nauwkeurig bekend grondvolume ontstaat, en langzaam verzadigd in een bak met water (zie 2.1 voor herkomst monsters). Het verzadigde monster wordt op een elektronische weegschaal geplaatst en kan vrijelijk aan de bovenzijde verdampen in een ruimte bij 16 °C en een relatieve vochtigheid van 55%. Tijdens het udrogen van het monster worden het gewicht (maat voor vochtgehalte) en de drukhoogte op vier diepten in het monster (voor berekenen waterretentie en doorlatendheid) continu geregistreerd. Uit deze gegevens worden retentie- en doorlatendheidskarakteristiek berekend. De ondergrens van de drukhoogte waarbij betrouwbaar kan worden gemeten, bedraagt -600 tot -800 cm, afhankelijk van de grondsoort en kwaliteit van het monster. Voor de veldsituatie in het Wierdense veld is deze ondergrens voldoende.

Door de uitgewerkte gegevens van de metingen, is de waterretentiecurve van VanGenuchten gefit (Van Genuchten, 1980) en doorlatendheidscurve van Mualem-VanGenuchten (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980). De zo verkregen Mualem-VanGenuchten-parameters zijn gebruikt voor de modellering met SWAP.

#### **Doorlatendheid bij verzadiging**

De doorlatendheid bij verzadiging is voor het veenbasis-onderzoek een belangrijke parameter. Een grote weerstand tegen verticale wegzijging van water uit het bovenliggende

veenpakket is de belangrijkste kwaliteit van de veenbasis. Het was daarom essentieel om deze weerstand in de vorm van de doorlatendheid bij verzadiging goed te meten. Ook omdat informatie over waarden van deze grootheid voor veenbasislagen in Nederland in de literatuur schaars was.

In eerste instantie is de verzadigde doorlatendheid van alle relevante bodemhorizonten met de standaardmethode – de 'constant head method' – gemeten (zie 2.1 voor herkomst monsters). Hierbij worden ongestoorde grondmonsters in ringen van 10 cm hoog en met een binnendiameter van 19 cm op een opstelling geplaatst en waterverzadigd. Boven op het monster wordt een waterlaag met constante hoogte gehandhaafd. Bovendien wordt de onderzijde van het monster geheel verzadigd gehouden. Er wordt een constante stijghoogtegradiënt ingesteld door de uitstroomslang op een vaste positie te houden. Door de hoeveelheid uitstromend water per tijdseenheid te meten, kan de verzadigde waterdoorlatendheid volgens de wet van Darcy worden bepaald.

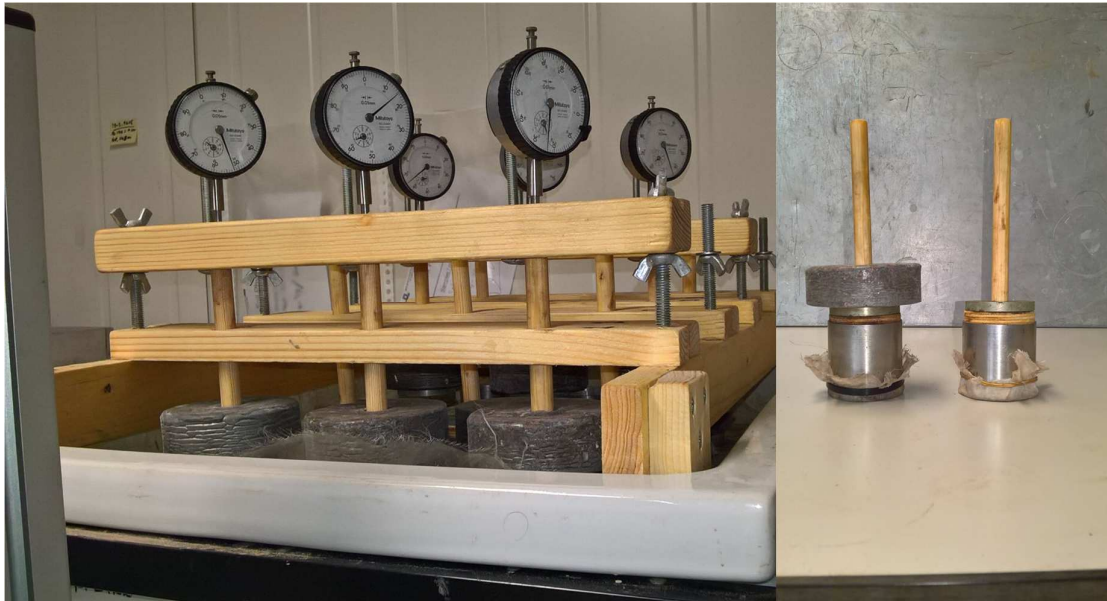
De resultaten van deze metingen voor de veenbasislagen waren onrealistisch hoog (zie 4.2.2). Daarom zijn aanvullende metingen gedaan in een aparte opstelling volgens de 'falling head method'. Hiervoor zijn kleinere monsters van 5 cm hoog en met diameter van 5 of 7,6 cm in even hoge ringen met binnendiameter 10,2 cm geplaatst met een vulmiddel tussen monster en binnenwand van de ring (mengsel van zeer fijn zand en bentoniet) (voor herkomst van monsters zie tabel 12 in 4.2.4). De monsters werden opgesloten in een speciale opstelling en verbonden met een buret gevuld met water. De waterstand in de buret werd op een beginhoogte ingesteld en de daling van de waterstand in de tijd werd gemeten. Ook werd het uitstromende water opgevangen en het volume ervan gemeten door weging. Uit alle gegevens konden verzadigde doorlatendheden worden berekend die realistisch laag waren. Deze waarden golden voor de temperatuur in de betreffende meetruimte van 21,5 °C. Ze zijn gecorrigeerd naar de gemiddelde jaartemperatuur in Nederland van 10 °C voor de viscositeit van water door vermenigvuldiging met een factor 0,743. Voor meer detail van methode en resultaten van deze metingen zie Hendriks en Van den Akker (in prep.).

### **2.2.3 Krimpkarakteristieken**

De krimpkarakteristiek is bepaald aan onbelaste en belaste monsters. De monsters waren afkomstig van de veenbasislagen gliede, kazige-B en schalterveen. De laatste is geen vanzelfsprekend en vast onderdeel van een organische veenbasis, maar kwam voor op bemonsteringslocatie 2. Er zijn drie duplo-monsterparen van gliede en kazige-B bemeten en één van schalterveen. De monsters zijn ongestoord gestoken met metalen 100-cc-ringen; de duplo's dicht bij elkaar en op dezelfde diepte (voor herkomst van monsters zie tabel 13 in 4.2.3). Van elk duplopaar werd één monster belast en het andere niet.

De belasting bedroeg 75 g per cm<sup>2</sup> wat neerkomt op 75 cm waterkolom. De niet-belaste monsters hadden een lichte belasting van 5 g per cm<sup>2</sup> die samenhang met de toegepaste methode. Deze twee toestanden van bovenbelasting van de veenbasis kunnen worden gezien als een situatie met een volledig verzadigd, deels veraard veenmosveenpakket van 70 cm dik en een vergelijkbare situatie, maar dan met een zeer sterk uitgedroogd veenpakket. Beide situaties en dus ook beide manieren van meten zijn relevant. De belastingen bestonden bij deze monsters met een horizontale oppervlakte van 20 cm<sup>2</sup> uit gewichten van 1500 gram en 100 gram. Bij beide belastingen is een ijzeren ring van 100 gram gebruikt om praktische redenen en bij de belaste monsters aanvullend een loden gewicht van 1400 gram.

Nadat de monsters waren verzadigd werd hun verzadigde gewicht gemeten, bij de belaste monsters eerst zonder en daarna met de belasting. Daarna werden ze op de zandbak geplaatst in de constructie getoond in figuur 3. De drukhoogte werd vanaf verzadiging, waarbij de waterstand tot halverweg de ringhoogte reikte zodat de gemiddelde drukhoogte in het monster 0 cm waterkolom was, in kleine stapjes verlaagd tot -100 cm. De



*Figuur 3 Meetopstelling voor meten van zakking door krimp op de zandbak. Door meten op de zandbak kon in stappen de drukhoogte worden verlaagd vanaf verzadiging tot -100 cm (pF 2) waardoor het vochtgehalte en de verticale krimp konden worden gerelateerd aan de drukhoogte. De meetklokjes konden tot 0,01 mm nauwkeurig meten. Rechter inzet: detail van de constructie met een verticale staaf verbonden met een horizontaal plaatje op het monsteroppervlak voor overbrenging van de zakking naar de klokjes. De ijzeren ring met gewicht van 100 gram paste precies in de metalen monsterring. De nylon doekjes aan de open onderkant dienden om het monster aan die kant te beschermen.*  
*Figure 3 Measurement set-up on the sandbox for measuring subsidence due to shrinkage.*

opeenvolgende drukhoogten waren 0,5 cm, -1 cm, -5 cm, -10 cm, -20 cm, -40 cm, -60 cm, -80 cm en -100 cm ten opzichte van het zandoppervlak. Voor de gemiddelde drukhoogte in het monster moet hier nog de helft van de ringhoogte (2,5 cm) vanaf worden getrokken. De reeks wordt dan -2 cm tot en met -102,5 cm. Na elke instelling van een nieuwe drukhoogte werd minstens twee dagen gewacht om de monsters op evenwicht te laten komen. Dan werd de meetwaarde van de klokjes (figuur 3) afgelezen in hondersten van een mm, de klokjes werden van de monsters gehaald, de monsters werden gewogen, waarna werd gecontroleerd aan onder- en bovenkant of er spleten tussen monster en binnenwand van de ring aanwezig waren die dan werden gemeten. Daarna werd de hele opstelling weer opgebouwd op de zandbak en werd de nieuwe initiële lezing van de klokjes gedaan. Als laatste stap werd de nieuwe drukhoogte ingesteld en werd een plastic kap over het geheel geplaatst.

Na de laatste drukhoogte van -102,5 cm werd de opstelling verplaatst naar een tafel waarbij de monsters met de open onderkant op absorberend papier werden gezet. De onbelaste monsters werden aan de bovenkant opengelaten zodat ze door verdamping sneller vocht konden verliezen.

De zakkingsmetingen met de klokjes werden per meetmoment omgezet in een zakking door van de meetwaarde de initiële waarde af te trekken. De totale zakking bestond dus uit een cumulatie van de zakkings van alle momenten. Om deze cumulatie te controleren werd ook steeds getoetst of de totale zakking ten opzichte van de bovenrand van de ring qua orde-grootte overeenkwam met de gecumuleerde, in principe preciezere zakking.

Het meten van de spleetvorming was moeilijk precies uit te voeren, en zeker aan het begin van de spleetvorming enigszins subjectief. Wel was het begin van de spleetvorming – het loskomen van de ringwand - heel duidelijk vast te stellen. Met een precisieschuifmaat werd de spleetbreedte op eentiende mm nauwkeurig ingeschat, op meerdere plaatsen langs de

omtrek van het monster indien de spleetbreedte onregelmatig was. De lengte van de spleet langs de omtrek werd gemeten en uit breedten en lengte werd een gemiddelde spleetbreedte langs de gehele omtrek berekend. Als er slechts aan een kant van het monster een spleet aanwezig was dan werd de spleetbreedte lineair afnemend met de hoogte van de ring verondersteld. Als spleetbreedte voor het gehele monster werd dan de helft van de eenzijdig gemeten spleet genomen. Zeker bij die situaties is de spleetbreedte eerder overschat dan onderschat door de aanname van lineaire afname met de hoogte. Zeker aan het begin van de spleetvorming was het goed mogelijk dat de spleet slechts enkele cm's doorliep. Bij spleten aan beide zijden van het monster werd in feite dezelfde procedure gevolgd door middeling van de twee spleetbreedten.

Toen organische-stofrijke monsters van gliede en schalterveen, en het sterk krimpemde monster van kazige-B zover waren gekrompen dat ze gemakkelijk voorzichtig uit de ring konden worden gehaald werd de meting van de spleet een stuk eenvoudiger en precieser. Met de schuifmaat werd op drie hoogten, 1 cm van de onderkant, het midden en 1 cm onder de bovenkant twee metingen van de monsterdiameter gedaan, de eerste willekeurig en de tweede daar loodrecht op. Uit de zes metingen werd de gemiddelde diameter berekend die werd omgerekend naar een spleetbreedte.

Na afloop van de metingen zijn van elk monster het gewicht van de droge stof en het gloeiverlies bepaald zoals hierboven beschreven in 2.2.1. Nadat de monsters waren gedroogd in de stoof bij 105 °C waren de monsters zo hydrofoob dat ze onder water konden worden gewogen zonder dat ze vocht opnamen. Bij negen van de veertien monsters was dit mogelijk. Deze meting leverde een precies eindvolume van de monsters. De monsters waarbij dit niet mogelijk was waren alle kazige-B-monsters. Drie daarvan zaten nog muurvast in hun ring.

Drie grote monsters van gliede, kazige-B en de overgangslaag hiertussen, met een hoogte van 10 cm en een doorsnede van 19 cm zijn gebruikt om het scheurgedrag van deze veenbasislagen te onderzoeken. Nadat ze waren verzadigd zijn ze onbelast met een open bovenkant te drogen gezet waarbij werd gevolgd of ze enig scheurgedrag vertoonden. De bedoeling was om de scheuren dan op te meten in lengte en breedte, en hun afstand tot de monsterwand en tot eventuele andere scheuren. Omdat de monsters niet scheurden, maar alleen als een geheel krompen, kon dit voornemen niet worden uitgevoerd.

#### **2.2.4 Afbraaksnelheden**

##### **Aerobe afbraak**

De biochemische karakteristiek aerobe afbraaksnelheid van de organische stof is bepaald aan 100-cc-monsters die zijn gehaald uit de veenbasislagen gliede en kazige-B, en uit de twee onderliggende horizonten B en C (voor herkomst van monsters zie tabel 14 in 4.2.4). Het was belangrijk om de afbraak van de organische stof van die twee diepere lagen ook te weten, omdat zuurstof die door de zandlaag wordt aangevoerd ook zal worden verbruikt voor organische-stofafbraak in die laag, waarna de overgebleven zuurstof door de B-horizont met rond de 5 massa-% organische stof moet diffunderen om de veenbasis te bereiken.

Het model ANIMO heeft waarden van potentiële snelheden nodig die gelden bij optimale zuurstof- en vochtvoorziening en bij een bekende temperatuur. Ook heeft het model  $Q_{10}$ -waarden nodig die aangeven met welke factor de afbraak toeneemt bij 10 °C temperatuurstijging.

Potentiële aerobe afbraaksnelheden zijn bepaald met de 'ademhalingsmethode' waarbij de koolzuur(CO<sub>2</sub>)-productie van een optimaal van zuurstof voorzien monster in een bepaalde periode wordt gemeten. De CO<sub>2</sub>-productiesnelheid is een maat voor de afbraaksnelheid. De monsters werden eerst op een zandbak bij -100 cm drukhoogte op een vochtgehalte

gebracht dat optimaal is voor de afbrekende micro-organismen. Daarna werden ze voorzichtig uit de ring gehaald en in glazen potten van 1 L gedaan.

De potten zijn twee dagen open weggezet om tot rust te komen. Door de monserbehandelingen was te verwachten dat tijdelijk een verhoogde activiteit van de micro-organismen zou optreden. Ze waren daarbij licht bedekt met papier om verdamping te beperken. Vervolgens zijn ze luchtdicht afgesloten met plastic deksels en weggezet in een ruimte bij een constante temperatuur van 21 °C. Op dat moment is het CO<sub>2</sub>-gehalte van de lucht in de labruimte gemeten om als referentie te dienen bij de berekening van de CO<sub>2</sub>-productie. Na 139 uur is door een septum in het deksel met een naald lucht aan de pot onttrokken met een foto-akoestische gasmonitor van ENMO die het CO<sub>2</sub>-gehalte in de onttrokken lucht mat. Deze procedure is twee keer herhaald met dezelfde potten met monsters waarbij na elke meting de pot een nacht licht bedekt open werd weggezet om in evenwicht te komen met het zuurstof- en CO<sub>2</sub>-gehalte van de lucht in de labruimte: de eerste keer voor 194 uur bij dezelfde temperatuur en de tweede keer voor 176 uur bij een temperatuur van 16 °C. Bij de relatief lage afbraaksnelheden van de onderzochte organische stof had de korte tijd van afbraak geen invloed op de hoeveelheid beschikbare organische stof voor afbraak.

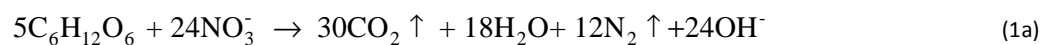
Na elke bepaling zijn de gewichten van de potten gemeten om de afname van het vochtgehalte te registreren. Na afloop van de ademhalingsmeting zijn van elk monster het gewicht van de droge stof en het gloeiverlies bepaald zoals hierboven beschreven in 2.2.1. Door per monster de CO<sub>2</sub>-productie te relateren aan de massa organische koolstof (C) in het monster is de fractie geoxideerd C berekend, waaruit de afbraaksnelheid is afgeleid. Hierbij is een C-fractie van 0,58 van de massa organische stof aangenomen. Uit de verschillen tussen de twee temperaturen zijn Q<sub>10</sub>-waarden berekend.

### **Anaerobe afbraak**

De anearobe afbraak met de alternatieve electronenacceptoren nitraat en sulfaat, die kunnen worden verwacht in drainagewater uit landbouwgronden, is gemeten bij een nitraatconcentratie van 100 mg/L en een sulfaatconcentratie van 200 mg/L aan ongestoorde grondmonsters van 100 cc in potten van circa 300 cc volledig gevuld met het grondmonster en de nitraat- of sulfaatoplossing. De metingen zijn gedaan aan monsters van gliedlagen, kazige-B-lagen en B-horizonten (voor herkomst van de monsters zie tabel 15).

Veldvochtige monsters zijn gewogen in de ring, voorzichtig uit de ring gedrukt en in een lege pot met bekend gewicht gedaan en opnieuw gewogen voor bepaling van het exacte gewicht van het monster en het eventuele verlies na uit de ring drukken. De nitraat- of sulfaatoplossing is voorzichtig in stappen in de potten gegoten tot net onder de bovenkant van de monsters om de monsters langzaam te verzadigen met de juiste oplossing. Na een dag is de oplossing voorzichtig afgegoten, is de pot gewogen en daarna tot de rand gevuld met een oplossing met de juiste concentratie in ontluicht, dus zuurstofloos water, waarna de pot luchtdicht is afgesloten en opnieuw is gewogen.

De potten zijn voor 328 uur (sulfaat) of 350-374 uur (nitraat) weggezet bij 21 °C. Daarna is met een spuit met naald ongeveer 25 mL oplossing uit de pot genomen waarin de nitraat- of sulfaatconcentratie is gemeten. Ook zijn deze concentraties in de toegediende oplossingen gemeten (waarin de concentraties iets waren toegenomen door verlies aan water tijdens het ontluichten). Uit de afname van de concentraties verrekend met de hoeveelheid toegediende oplossing is de nitraat- en sulfaatconsumptie berekend. Hiermee is op basis van de volgende chemische vergelijkingen de organische koolstof(C)omzetting berekend:



De stoichiometrische verhoudingen zijn dat 4 mol nitraat 5 mol organische koolstof kan omzetten en dat 1 mol sulfaat 2 mol organische koolstof kan omzetten.

Na afloop van de metingen zijn van elk monster het gewicht van de droge stof en het gloeiverlies bepaald zoals hierboven beschreven in 2.2.1. Door per monster de C-omzetting te relateren aan de massa organisch-C in het monster is de fractie omgezette C berekend, waaruit de afbraaksnelheid is afgeleid. Hierbij is een C-fractie van 0,58 van de massa organische stof aangenomen.

## 2.3 Modelberekeningen

### 2.3.1 Modellen SWAP en ANIMO

Met de modellen SWAP en ANIMO zijn de meetgegevens geïnterpreteerd en analyses gedaan om gevoeligheden af te tasten. De modellen zijn beschreven in Bijlage 3. Het model SWAP is aangepast op enkele punten om het geschikt te maken voor het specifieke doel van dit onderzoek. Voor de reguliere berekeningen van de grondwaterstand in de zandondergrond en een schijngrondwaterlichaam met schijnwaterspiegel in het veen boven de veenbasis is de beschrijving van de schijngrondwaterspiegel en de basis van het schijngrondwaterlichaam robuuster gemaakt. Een belangrijke aanpassing voor deze berekeningen waarbij simulaties getoetst werden aan meetgegevens van de schijngrondwaterspiegel was het inbrengen van het proces van interflow (ondiepe zijdelingse uitstroming door de top van het bodemprofiel) uit een schijngrondwaterlichaam. Hierbij is ook de mogelijkheid ingebouwd om de basisdiepte die de schijnwaterspiegel moet bereiken voor interflow op gaat treden, gevarieerd in de tijd op te geven. Dit was nodig voor een van de doorgerekende locaties. Tenslotte is voor de scenarioversie van deze berekeningen de optie ingebouwd om de drukhoogte in het onderste modelcompartiment op te geven als een sinusvormig verloop in de tijd om zo de jaarlijkse beweging van de stijghoogte te simuleren.

Verder is een versie van SWAP gemaakt waarin de zwaartekracht kan worden uigeschakeld. Deze is gebruikt om samen met ANIMO horizontale diffusie van zuurstof door een zandlaag te berekenen.

Voor ANIMO is de versie gebruikt die sulfaatprocessen als transport en reductie bij afbraak van organische stof onder zuurstofloze omstandigheden meeneemt in de berekeningen (Hendriks en Van den Akker, 2012)

### 2.3.2 Modelinvoer

De modelinvoer voor procesgeoriënteerde modellen als SWAP en ANIMO kan worden onderverdeeld in drie hoofdgroepen met een vierde groep voor ANIMO:

1. 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 en afbraaksnelheden in ANIMO, die worden gemeten in het lab. Het zijn ook de knoppen waaraan de gebruiker draait bij het kalibreren.
2. initiële waarden van toestandsvariabelen: dat zijn de waarden die de begintoestand van het systeem aangeven, bijvoorbeeld vochtgehalten en temperaturen in SWAP en voorraden van organische stof, zoals veenlagen, in ANIMO.
3. randvoorwaarden (forcing variables): dat zijn de processen aan de randen die het model aandrijven (forceren) zoals neerslag en verdamping, en stijghoogten in SWAP en intreding

van atmosferische zuurstof in de rand van een bodemkolom en concentraties van nitraat en sulfaat in kwelwater in ANIMO.

4. **hydrologische en temperatuurgegevens van SWAP:** het gaat om vochtgehalten, drukhoogten, waterstromen tussen compartimenten onderling en bodemtemperaturen. SWAP en vooral ANIMO hebben een grote hoeveelheid invoerwaarden nodig. De belangrijkste daarvan worden hieronder besproken. Enkele zijn in de teksten van de resultaten besproken, omdat ze daar meer op hun plaats zijn.

## SWAP

### 1. Modelparameters

De kern-modelparameters van SWAP zijn de hydraulische karakteristieken: de waterretentiekarakteristiek en de onverzadigdedoorlatendheidskarakteristiek. In dit onderzoek is ook met nadruk de doorlatendheid bij verzadiging van de veenbasislagen van groot belang. De eenvoudigste optie in SWAP is om de beschrijving van de hydraulische karakteristieken in de vorm van Mualem-VanGenuchten(MVG)-parameters op te geven. Die optie is hier ook gekozen. Hiervoor is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de metingen in het onderzoeksgebied. Dit zijn de waarden van de bepalingen beschreven in 2.2.2 en waarvan de resultaten zijn gegeven in tabel 10. De in de modellering gebruikte waarden zijn in tabel 2a voor locatie B gegeven en in tabel 2b voor buis C. Hierin zijn de bronnen van de waarden eveneens aangegeven. De horizontindeling is afkomstig van tabel 16 in 4.3.1.

*Tabel 2a Waterretentie- en hydraulische doorlatendheidskarakteristieken als waarden voor de Mualem-VanGenuchten-parameters zoals gebruikt voor de berekeningen van locatie B met bronnen van de waarden. De ALFA-waarden zijn verkregen door kalibratie (4.3.1). De twee schuin gedrukte regels voor de bovenste 50 cm betreft de invoer voor een veenmosprofiel.*

*Table 2a. Water retention and hydraulic permeability characteristics as values for the Mualem-VanGenuchten parameters*

Bodem-horizont	Diepte-traject	ORES (m3/m3)	OSAT (m3/m3)	ALFA (1/cm)	NPAR (-)	KO (cm/d)	LEXP (-)	ALFAW (1/cm)	Bron
Verw. veen	0-6	0,070	0,930	0,01590	1,380	1,9000	-2,70	0,35000	Dorland
Gereduc. veen	6-50	0,020	0,920	0,02500	2,820	1,0000	-1,79	0,08000	Dorland*
<i>Veenmosveen</i>	<i>0-20</i>	<i>0,020</i>	<i>0,880</i>	<i>0,47000</i>	<i>2,210</i>	<i>0,3000</i>	<i>-1,91</i>	<i>0,48000</i>	<i>Dorland</i>
<i>Gereduc. veen</i>	<i>20-50</i>	<i>0,020</i>	<i>0,920</i>	<i>0,02500</i>	<i>2,820</i>	<i>1,0000</i>	<i>-1,79</i>	<i>0,08000</i>	<i>Dorland*</i>
Schalt.veen	50-55	0,070	0,918	0,01590	1,380	0,0061	-2,70	0,10159	Dorl./met.
Gliede	55-65	0,147	0,606	0,00592	1,889	0,0215	0,19	0,10059	meting-g
Kazige B	65-80	0,132	0,512	0,00352	1,873	0,0262	1,00	-	meting-g
B-horizont	80-90	0,200	0,395	0,00920	2,610	0,0645	-0,78	-	meting-g
C-horizont 1	90-120	0,093	0,324	0,01257	3,968	9,7400	0,00	-	meting
C-horizont 2	120-240	0,088	0,303	0,01232	4,671	28,2270	0,54	-	meting

ORES = residueel volumetrisch vochtgehalte

NPAR = vormfactor n

OSAT = verzadigd volumetrisch vochtgehalte

KO = gefitte verzadigde doorlatendheid

ALFA = vormfactor  $\alpha$ , uitdroging

LEXP = exponent in doorlatendheidsfunctie

ALFAW = vormfactor  $\alpha$ , vernatting; bij hysteresis

Bronnen: Dorland: Dorland et al. (2015); Dorland\*, idem 10 keer kleinere ALFA; meting: tabel 10; meting-g, idem met gemiddelde van duplo's

*Tabel 2b Als 2a maar dan voor locatie C*

*Table 2b As 2a, however for location C*

Bodem-horizont	Diepte-traject	ORES (m3/m3)	OSAT (m3/m3)	ALFA (1/cm)	NPAR (-)	KO (cm/d)	LEXP (-)	ALFAW (1/cm)	Bron
Verw. veen	0-12	0,070	0,930	0,01590	1,380	1,9000	-2,70	0,40000	Dorland
Gereduc. veen	12-50	0,020	0,920	0,02500	2,820	1,0000	-1,79	0,10800	Dorland*
Schalt.veen	50-65	0,070	0,918	0,01590	1,380	0,0048	-2,70	0,10159	Dorl./met.
Gliede	65-75	0,147	0,606	0,00592	1,889	0,0125	0,19	0,10059	meting-g
Kazige B	75-85	0,132	0,512	0,00352	1,873	0,0153	1,00	-	meting-g

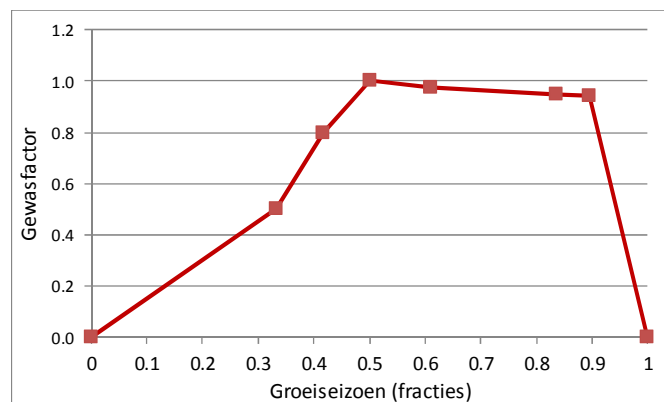


B-horizont	85-95	0,200	0,395	0,00920	2,610	0,0645	-0,78	-	meting-g
C-horizont 1	95-120	0,093	0,324	0,01257	3,968	9,7400	0,00	-	meting
C-horizont 2	120-240	0,088	0,303	0,01232	4,671	28,2270	0,54	-	meting

Voor de veenbasis en de onderliggende B- en C-horizont is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de in dit onderzoek gemeten waarden. Voor de boven de veenbasis liggende veenlagen met minder of meer verweerd veen, is gebruik gemaakt van de informatie uit de SWAP-studie van Dorland et al. (2015), die waarden uit de literatuur hebben gebruikt voor veenmosveen van Price et al. (2008) en Voortman et al. (2013). De waarden voor de verzadigde doorlatendheid K0 van de schalterveenlaag, gliedelaag, kazige-B-laag en B-horizont zijn bij locatie B de gemiddelden en voor locatie C de laagste waarden uit tabel 12. De opzet was om uit te gaan van de gemiddelden en als dat niet werkte andere waarden binnen het bereik van de gemeten waarden te gebruiken. Voor goede resultaten bij locatie C waren de laagste waarden nodig. De waarden voor ALFAW van de hysteresis-optie zijn verkregen door kalibratie.

Een probleem bij de doorlatendheidskarakteristieken van de veenbasislagen en de B-horizont was dat deze in de modellering zijn gebaseerd op de gemeten waarden uit de verdampingsmethode (tabel 10) behalve voor de verzadigde doorlatendheid K0 die uit tabel 12 is genomen. De veel lagere waarden die nu zijn gebruikt voor K0 verschuiven de hele doorlatendheidskarakteristiek naar beneden. Deze veel lagere doorlatendheidskarakteristieken zijn vergeleken met gemeten karakteristieken die Dekker et al. (1986) geven voor kazige-B-horizonten. Beide karakteristieken lijken genoeg op elkaar om vertrouwen te hebben in de in het model gebruikte karakteristieken.

Andere invoerwaarden voor belangrijke modelparameters van SWAP waarvoor geen standaardwaarden zijn gebruikt, zijn vooral de drempelhoogte voor optreden van oppervlakte-afstroming en de coëfficiënt van interflow. Deze zijn gekalibreerd en daarom behandeld in 4.3.1. Tenslotte zijn er nog de parameters die de transpiratie van de plant beschrijven. Voor alle berekeningen is uitgegaan van de huidige vegetatie op locatie B: Pijpestrooitje. Schouwenaars et al. (in prep.) geven gewasfactoren als functie van de tijd die gelden bij gebruik van de referentiegewasverdamping van Makkink. Voor Pijpestrooitje zijn die waarden geïnterpreteerd tot de waarden van figuur 4.



*Figuur 4 Gewasfactoren van pijpestrooitje voor de referentiegewasverdamping van Makkink gedurende het groeiseizoen*

*Figure 4 Crop factors of pipe sprout for the Makkink reference crop evaporation during the growing season*

Voor de bewortelingsdiepte van Pijpestrooitje is 20 cm genomen. De kritische drukhoogten waarbij de transpiratie van Pijpestrooitje afneemt, zijn voor het natte traject op hoge waarden gezet zodat Pijpestrooitje ook onder natte omstandigheden blijft doorverdampen. Aan de droge kant zijn de standaardwaarden voor natuurgas genomen.

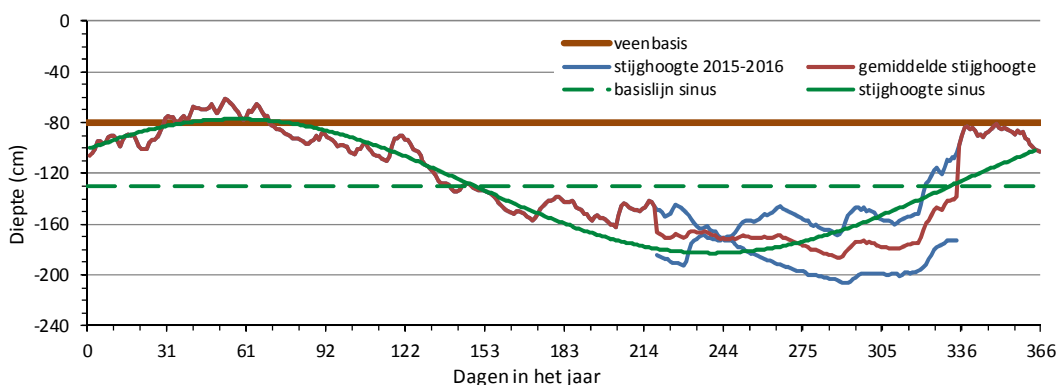
## 2. Initiële waarden

Omdat de toestandsvariabelen in SWAP zich snel instellen afhankelijk van de randvoorwaarden zijn deze waarden niet heel erg bepalend.

## 3. Randvoorwaarden

De belangrijkste randvoorwaarden van SWAP in dit onderzoek zijn de meteorologische condities en de stijghoogte. De weersgegevens zijn betrokken van weerstation Heino incidenteel aangevuld met neerslaggegevens van neerslagstation Hellendoorn (zie 4.3.1). Voor de verdamping is de referentiegewasverdamping van Makkink genomen.

De stijghoogte is bij de kalibratie en analyse van de meetjaren voor locatie B en C ingevoerd als tijdreeks van drukhoogten in het onderste modelcompartiment. Deze drukhoogten zijn afgeleid van de gemeten stijghoogten. Voor een groot deel van 2015 en een klein deel van 2016 waren geen gemeten stijghoogten beschikbaar. Daarvoor is een sinusvormig verloop van de drukhoogte door het jaar gebruikt. De sinusvorm is gefit op de gemeten stijghoogten van locatie B (figuur 5). De gefitte waarden om de sinus te beschrijven waren 130 cm -mv voor basislijn, 53 cm voor de amplitude en 57 dagen voor het moment dat de top van de sinus wordt bereikt. De afwijking tussen gemeten waarden en de fit bedroeg als RMSE 13,5 cm.



Figuur 5 Gemeten stijghoogten in de tijd van locatie B in de periode 1 augustus 2015 tot eind 2016 en de gemiddelde stijghoogten in de tijd voor het deel van het jaar waarvoor metingen van zowel 2015 als 2016 beschikbaar waren. Door de gemiddelde stijghoogten is een sinusvorm gefit, waarvan de basislijn ook is aangegeven.

Figure 5 Measured and fitted head heights of location B in the period 1 August 2015 to the end of 2016.

## **ANIMO**

### 1. Modelparameters

De kern-modelparameters van ANIMO in dit onderzoek zijn in de eerste plaats de afbraaksnelheden van de organische stof van de verschillende bodemlagen en de bijbehorende  $Q_{10}$ . Hiervoor zijn de gemeten waarden van tabel 14 genomen. Ook belangrijk waren de twee parameters die de zuurstofdiffusiecoëfficiënt als relatie van het luchtgehalte beschrijven. Deze zijn genomen van een onderzoek naar de kwetsbaarheid voor oxidatie van droogvallende veenlagen in een Tilburgse wijk (Bakker et al., 2017). Hiervoor zijn de gekalibreerde waarden van een grof-zandlaag genomen die zijn verkregen door kalibratie tegen gemeten zuurstofgehalten in de bodem. Deze waarden bedroegen:  $p_1 = 3,75$  en  $p_2 = 2,68$ . Voor het fijne zand van het Wierdense veld zijn deze waarden te gunstig voor

zuurstofdiffusie. De ANIMO-berekeningen voor het 'Wierdense zand' met deze waarden van zuurstofdiffusie vormen daarom een 'worst case' benadering.

## 2. Initiële waarden

De initiële waarden in de vorm van concentraties van stoffen in bodemwater en vooral van hoeveelheden organische stof in verschillende bodemlagen zijn in ANIMO uitermate belangrijk, de meeste omzettingsprocessen relatief langzaam verlopen. In dit onderzoek waren vooral de hoeveelheden organische stof in de veenbasislagen en de onderliggende B- en C-horizont van groot belang. Deze zijn verkregen per ANIMO-compartiment door organische-stofgehalten te verrekenen met volumieke massa's en compartimentdikten.

Initiële concentraties van nitraat en sulfaat waren van belang bij de berekeningen van aantasting van veenbasislagen door nitraat en sulfaat. Bij aanvoer van nitraat en sulfaat met kwelwater werden in een eerste modelberekening de initiële concentraties van deze stoffen in alle modelcompartimenten op de concentraties van het kwelwater gezet. Na deze berekening werden de resulterende concentraties, die lager waren dan de initiële door consumptie bij organische-stofafbraak, ingevoerd als initiële concentraties van de volgende berekening. Dit werd herhaald tot geen verandering in concentraties meer optrad. Het systeem was dan in evenwicht met de concentraties in het kwelwater. Met de evenwichtsconcentraties en de aanvoer van nitraat en/of sulfaat met het kwelwater werd de definitieve berekening uitgevoerd waarmee werd vastgesteld hoe groot de afbraak van de initiële hoeveelheid organische stof was.

## 3. Randvoorwaarden

De randvoorwaarden in de uitgevoerde ANIMO-berekeningen waren uitsluitend de standaardwaarde van het zuurstofgehalte in atmosferische lucht van 21 volume-% en de concentraties van nitraat en sulfaat in het kwelwater bij de betreffende berekeningen.

## 4. Waarden uit SWAP-berekeningen

Afhankelijk van de betreffende berekening werd door SWAP de informatie over vochthuishouding en temperatuur aangeleverd.

## 3 Beschrijving onderzoekslocatie

### 3.1 Selectie onderzoeksgebied

Voor het uitvoeren van de veldmetingen en de uit te voeren bemonsteringen werd eerst een geschikt natuurgebied gezocht. Uit de literatuurstudie voorafgaand aan dit onderzoek (Sevink et al. 2014) kwam een aantal criteria naar voren waar de onderzoekslocatie aan moest voldoen. Ook was een overzicht beschikbaar van een aantal hoogveengebieden die mogelijk in aanmerking kwamen. Op basis van een eerste voorselectie werden vijf gebieden nader bekeken en beoordeeld of zij aan de criteria voldeden. Deze analyse is opgenomen in Bijlage 1. Hieruit kwam het Wierdense Veld naar voren als meest geschikt gebied. Vervolgens werd binnen het Wierdense Veld gezocht naar de meest geschikte locatie om een meetraai in te richten.

### 3.2 Selectie meetlocatie

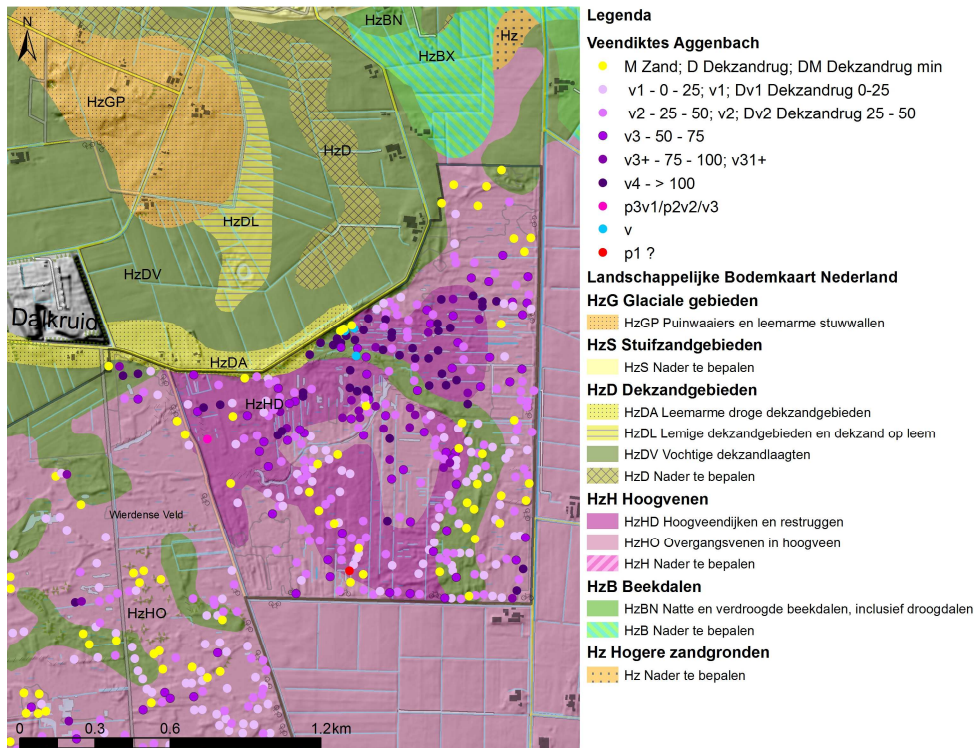
Na het maken van de definitieve keuze van het Wierdense Veld als onderzoeksgebied werd de onderzoekslocatie geselecteerd waar de meetraai werd uitgezet en een extra locatie voor aanvullende bemonstering. Hiervoor werd een aantal stappen genomen:

1. Op basis van een verkennende modelstudie werd eerst een inschatting gemaakt van de maximale afstand waarover transport van zuurstof door diffusie vanuit de rand van het veengebied naar het midden toe kon. Dat is o.a. afhankelijk van de aard van de ondergrond en het grondwaterstandsverloop ten opzichte van de veenbasis.

Uit de modelverkenning kwam naar voren dat al binnen enkele tientallen meters geen effect meer te verwachten was van zuurstoftransport vanuit de rand. Op basis daarvan werd besloten een meetraai van ca. 50 meter in te richten.

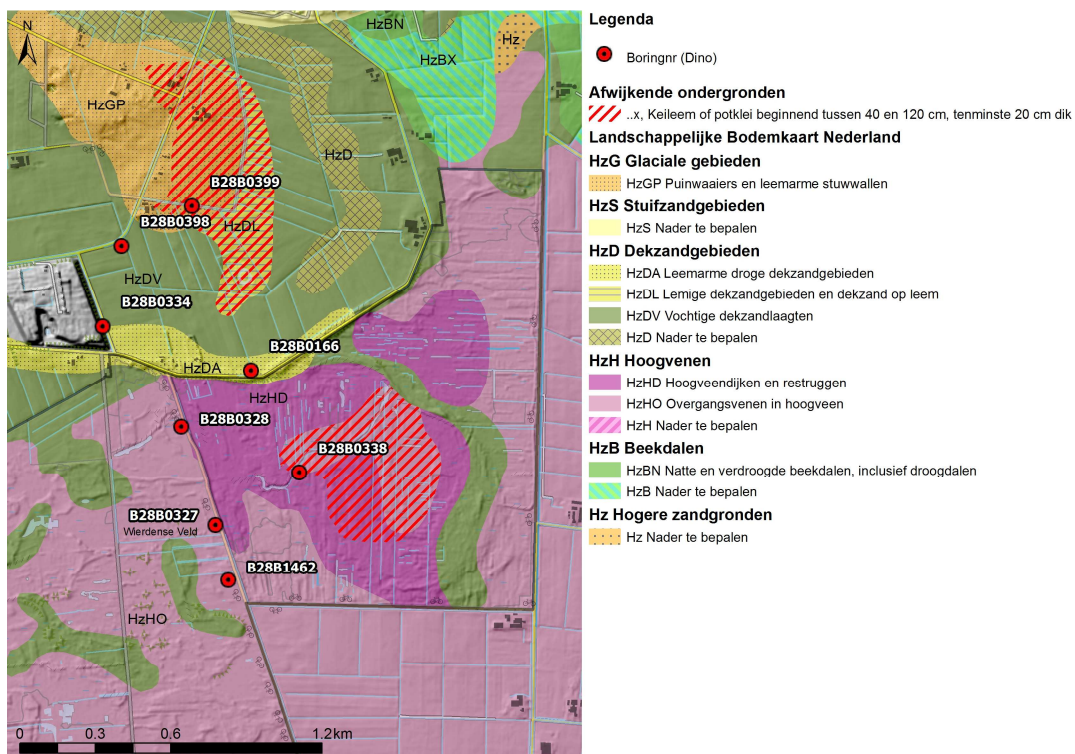
2. Vervolgens werd de ligging en de lengte van het transect gekozen van de rand van het veen tot de zone waar geen effect meer verwacht werd. Daarbij werd ook rekening gehouden met het voorkomen van de relevante habitattypen, maar ook met de bereikbaarheid in verband met het installeren van de meetpunten. Het voorkomen van bestaande peilbuizen langs het transect was een pré.

Voorafgaand aan het eerste veldbezoek zijn beschikbare boorgegevens bestudeerd. Voor de metingen was het noodzakelijk dat de stijghoogte van het freatisch grondwater in de zomer dieper was dan de veenbasis omdat er anders geen lucht kon voorkomen in het grensvlak. Eerst werd de veendikte vergeleken met de diepte van de Gemiddeld Laagste Grondwaterstanden in de peilbuizen. De Bodemkaart van Nederland (De Vries et al. 2014) en de daarvan afgeleide Landschappelijke Bodemkaart geven een indicatie van de veendikte. In de eenheid HzHD 'Hoogveendijken en restruggen' bedraagt de veendikte minimaal 40 cm (Figuur 6). Deze kaart is gebaseerd op een beperkt aantal boringen per ha. en daarom eigenlijk niet gedetailleerd genoeg voor dit doel. Door Aggenbach en Jansen (1991) is een groot aantal boringen gedaan om de dikte van het veenpakket vast te stellen. Deze zijn ook aangegeven in deze figuur. In het noordelijk en oostelijk deel van het Huurnerveld (het oostelijk deel van het Wierdense Veld) komen veenlagen voor tot meer dan 1 meter dikte. Omdat daar GLG-waarden voorkomen tot ongeveer 1 meter – mv. zal hier geen of weinig lucht toetreden onder het veen. Daarom werd gekozen om in het westelijk deel van het Huurnerveld een locatie te zoeken.



Figuur 6 Veendiktes volgens Landschappelijke Bodemkaart Nederland en boringen door Aggenbach en Jansen (1991), indeling Landschappelijke Bodemkaart volgens Kemmers et al. (2011) en Van Delft et al. (2015).

Figure 6 Peat thickness according to the Dutch Soil Map and drill profiles by Aggenbach & Jansen (1991)



Figuur 7 Selectie van geologische boringen uit Dino en het voorkomen van keileem binnen het Wierdense Veld. Verbreiding keileem volgens Bodemkaart van Nederland (De Vries et al. 2014), indeling Landschappelijke Bodemkaart volgens Kemmers et al. (2011) en Van Delft et al. (2015).

Figure 7 Selection of geological drill profiles from Dino and the occurrence of boulder clay within the Wierdense Veld



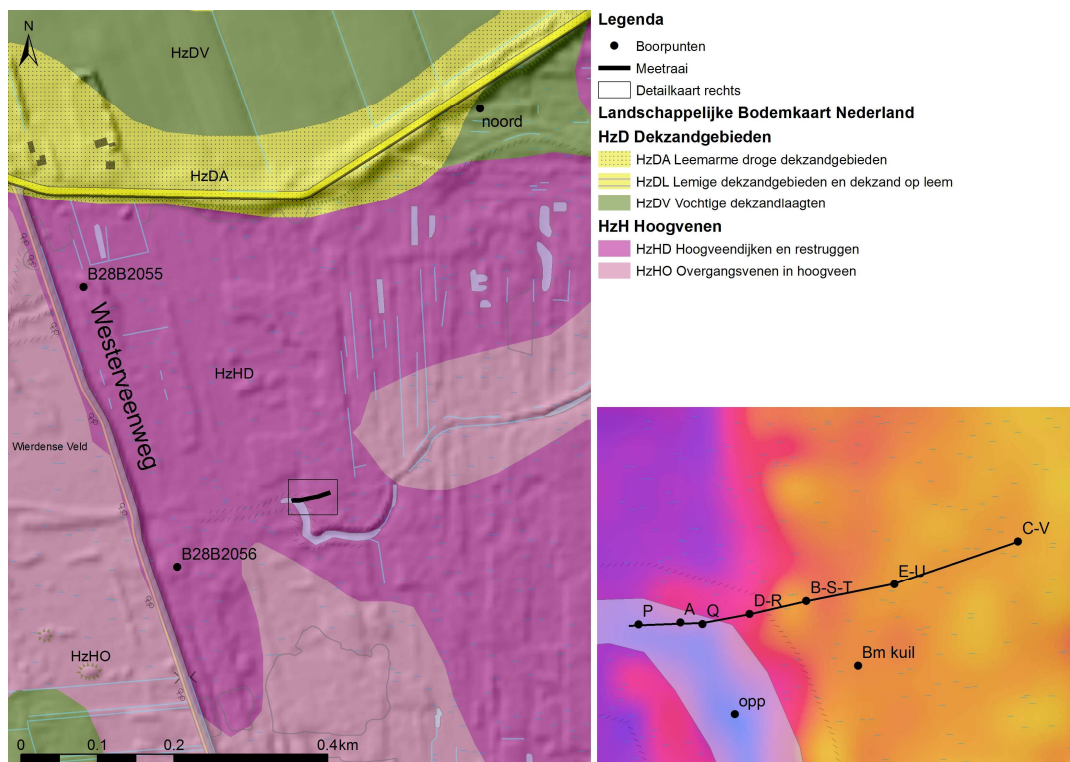
De meetraai moest aangelegd worden in een deel van het gebied waar een organische veenbasis voorkomt. Omdat lokaal keileem voor kan komen werd op basis van geologische boringen uit DINO en de verbreiding van keileem volgens de Bodemkaart van Nederland getoetst of keileem te verwachten was (zie figuur 7). In 3 zijn de kenmerken van deze boringen samengevat. Onder het geselecteerde deel van het Huurnensche Veld komt ondiep geen keileem voor.

Tabel 3 Samenvatting van de profielkenmerken in geologische boringen uit DINO (zie 7)

Table 3 Summary of profile characteristics in geological drill profiles from DINO (see 7)

Boring	Profiel
B28B0399	Dik pakket keileem met zandlaag tussen 110-180
B28B0398	Tot 4 m zand (midden categorie)
B28B0334	Tot 4 m zand (overwegend midden categorie met lagen fijn en grof)
B28B0166	2.6 m zand op keileem > 6.5
B28B0328	Tot 4 m zand (overwegend midden categorie met 2.70-2.80 matig zandige klei/keileem)
B28B0327	Tot 4 m zand (overwegend midden categorie met 3.20-3.50 matig zandige klei/keileem)
B28B1462	0.45 veen (40-45 zwart zandig=gliede?) Tot 2.5 zand
B28B0338	0.9 veen op zand tot 4.0 m

3. Met proefboringen en een beoordeling van de vegetatie (incl. moslaag) werd het gebied verkend om na te gaan of de profielopbouw en vegetatie overeenkomen met de verwachting op basis van de beschikbare gegevens. Dit is uitgewerkt in een eerste dwarsdoorsnede van het transect om de locaties en dieptes te kunnen beoordelen voor de installatie van meetapparatuur en het nemen van monsters.



Figuur 8 Ligging van de boringen en de meetraai (links) en de boringen binnen de meetraai (rechts). Als achtergrond bij de meetraai is de maaiveldhoogte volgens AHN2 aangegeven (Paars tot geel: 9.38 – 10.05 m + NAP).

Figure 8 Location of the drill profiles and the measuring turn (left) and the drill profiles within the measuring section (right).

Op 21 juli 2015 werd bij een veldbezoek een geschikte locatie gezocht. Eerst werd bij de peilbuizen B28B0255 en B28B0256 gezocht naar een locatie om de meetraai in te richten. Bij beide buizen bleek het veen veel te dun te zijn en bij de eerste buis groeiden boomwortels door het veen in de minerale ondergrond (zie Bijlage 2). Uiteindelijk werd gekozen voor een meetraai die begint in een voormalige brandgang waar het veen vrijwel geheel is verdwenen en van daaruit in oostelijke richting over een veenrestrug loopt (Figuur 8). In verband met extra bemonsteringen en de mogelijke invloed van nitraatuitspoeling werd aan de noordkant langs de Schaddenbeltsweg een extra meetpunt ingericht, aangeduid als 'Noord'. In augustus 2015 werd de meetraai verder ingericht en werden aanvullende profielbeschrijvingen gemaakt en de hoogten ingemeten. De beschrijving van alle boringen staat in Bijlage 2.

4. Met deze gegevens werden langs het transect zeven locaties geselecteerd waar de bemonstering en de veldmetingen plaatsvonden.

In § 3.3 wordt de meetraai beschreven en in § 3.4 is aangegeven hoe de meetraai is ingericht.

### 3.3 Beschrijving meetraai

Er is een meetraai uitgezet van ca 50 meter lengte vanuit een brandgang die in 1959 gegraven is bij de bestrijding van een veenbrand. De raai begint in de brandgang en loopt over een plateau met restveen. Ten westen van dit plateau is veel veen afgegraven, of bij de brand verloren gegaan. Het hoogteverschil tussen de brandgang en het plateau is volgens AHN ca 25 cm, maar bleek in werkelijkheid groter. Bij waterpassing in augustus bleek het hoogteverschil ongeveer 70 cm te bedragen. Buis B28B0256 kan bij waterpassing als vast punt gebruikt worden, maar deze buis werd tijdens de waterpassing niet aangetroffen, later wel. Voor de uitwerking van de raai is de AHN-hoogte van buis C (996 cm + NAP) als vast punt aangehouden en zijn de hoogtes ten opzichte daarvan uitgezet.



*Figuur 9 In het terrein komen enkele oude veenputjes voor waarin levend hoogveen voorkomt.  
Figure 9 There are a few old peat pits in the field with peatmoss growth*

Op het plateau komt ca 60 cm weinig tot niet veraard veenmosveen voor op een zandige gliedelaag van ca 10 cm en een kazige B-horizont, eveneens ongeveer 10 cm dik. Hoewel het plateau in juli goed te belopen was, was het veenpakket wel vrijwel geheel waterverzadigd. Dit wordt ook bevestigd door grondwaterstandsmetingen in de ondiepe buizen in augustus (met uitzondering van buis D). Het vegetatieaspect wordt bepaald door een mozaïek van Pijpestrootje op horsten afgewisseld met Dopheide, Struikheide en een enkele struik Kraaiheide. Hiertussen ook vrij veel Veenpluis, wat Witte snavelbies, Ronde zonnedaauw en plekken met veenmos. Door het voorkomen van Pijpestrootje op horsten heeft het maaiveld een hobbelig karakter, maar typische hoogveenslenken komen hier weinig voor, met uitzondering van een veenputje in de nabijheid van de profielkuil.

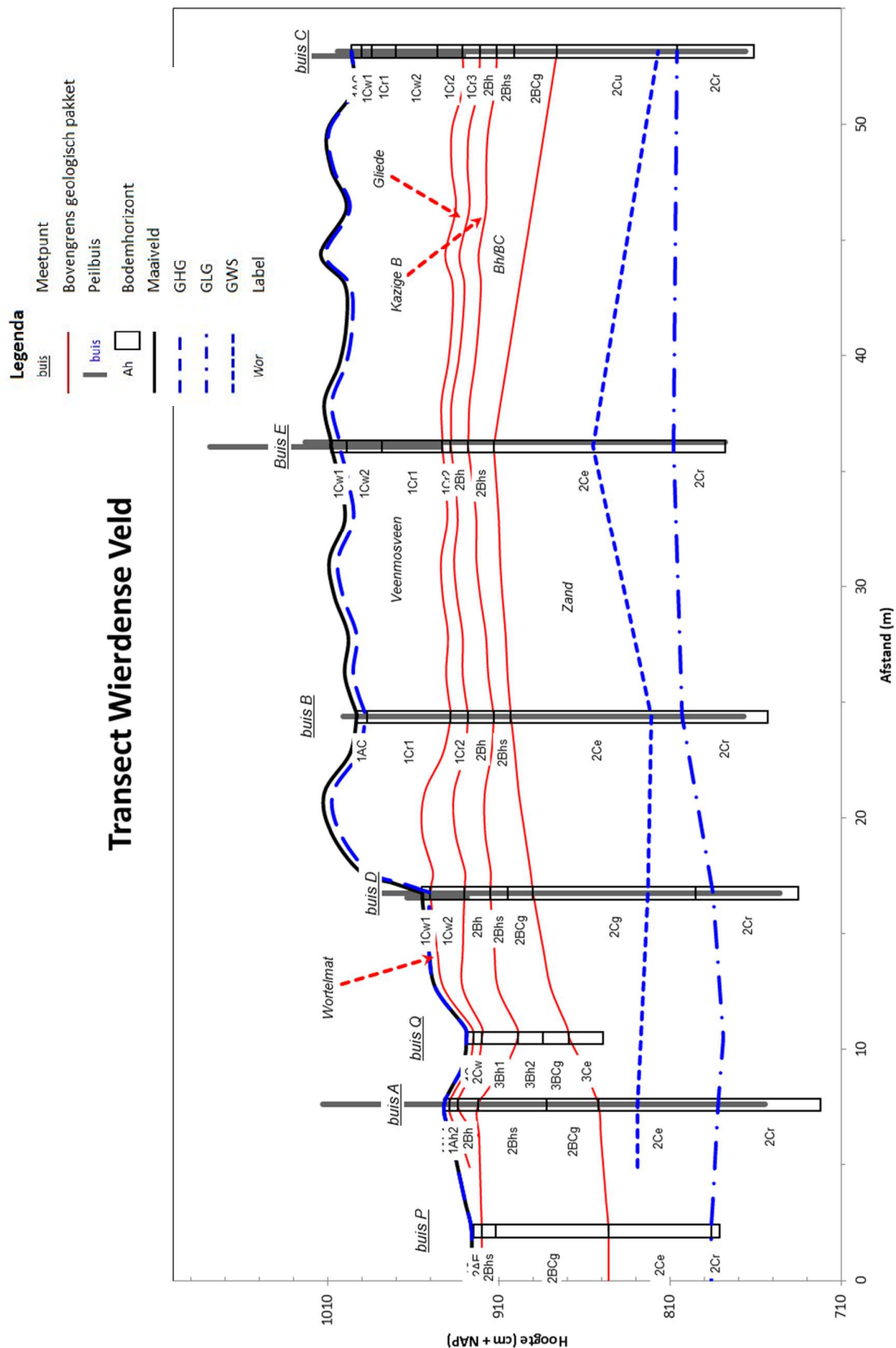
Er zijn geen volledige vegetatieopnamen gemaakt en de mossen zijn niet opgenomen waardoor de vegetatie niet goed te typeren is. Het komt wel vrij goed overeen met de Associatie van Gewone dopheide (11Aa2) in de Klasse der hoogveenbulten en natte heiden, wat geassocieerd wordt met ontwaterd hoogveen (Schaminée et al. 1995). In combinatie met het voorkomen van weinig veraard veenmosveen met hoge waterstanden voldoet het veenplateau aan de kenmerken van habitattype Herstellend hoogveen (H7120). Door het ontbreken van een actieve veenmoslaag (acrotelm) kan niet gesproken worden van een actief hoogveen (H7110).



*Figuur 10 Aspect van het restveenplateau met een mozaïek van o.a. Dopheide, Struikheide en Kraaiheide met Pijpestrootje op horsten. De foto is in westelijke richting genomen vanaf boring C. Op de achtergrond de Westerveenweg.*

*Figure 10 Aspect of the remaining peat plateau with a mosaic of among others Heather and Crowberry with Pipe Root.*





Figuur 11 Bodemopbouw en grondwaterstandsverloop in de meetraai. De rand van de brandgang ligt op ca x = 11.0 m De locaties van de boorpunten zijn weergegeven in Figuur 8 en de profielen worden meer in detail beschreven in Bijlage 2.

Figure 11 Soil structure and groundwater levels in the measuring section.

### 3.4 Inrichting meetraai

Tabel 4 Metingen per meetlocatie in de meetraai.

Table 4 Measurements per measurement location in the measuring section.

Buis:	P	A	Q	D en R	B, S en T	E en U	C en V	Noord -rand	Aan- tal
Opp. waterstand		1							1
Grondwaterstand veen				1	1	1	1		4
Stijghoogte zand		1		1	1	1	1		5
Lucht in kazige B					1				1
Lucht in B-horizont					1				1
Lucht in C-horizont	1		1	1	1	1	1		6
Tensiometer boven gliede					1 - 2				1 - 2
Tensiometer in B-hor					1 - 2				1 - 2
Tensiometer in C-hor					1 - 2				1 - 2
Luchtdruk in C-horizont					1				1
Suctioncups in kazige B					1 - 2				1-2
Suctioncups in B-hor				1 - 2	1 - 2	1 - 2		1 - 2	4 - 8
Suctioncups in C-hor.	1 - 2			1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2	6 - 12

#### Plaatsing

Buis P, lucht in C-hor	In brandgang, is het nulpunt van de raai
Buis A, peilbuis en peil- schaal	Peilbuis voor meting stijghoogte zandondergrond (C-horizont). Peilschaal voor de waterstand in de plas in de brandgang.
Buis Q, lucht in C-hor	Halverwege buis A en rand brandgang en begroeide deel met veen
Buizen D en R	Halverwege rand begroeid en buis B
Buis B (peilbuis), S en T	Hoofdopstelling. Hier wordt uitgebreid gemeten, dus ook vochtspanningen met tensiometers. Hier is ook de telemetrieopstelling 10 meter vanaf buis B richting buis C
Buizen E en U	
Buizen C en V	Buis C is het einde van de raai.

In figuur 2 in hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van de veldopstelling met de diepten en het bodemprofiel.

## 4 Resultaten en Discussie

### 4.1 Veldmetingen

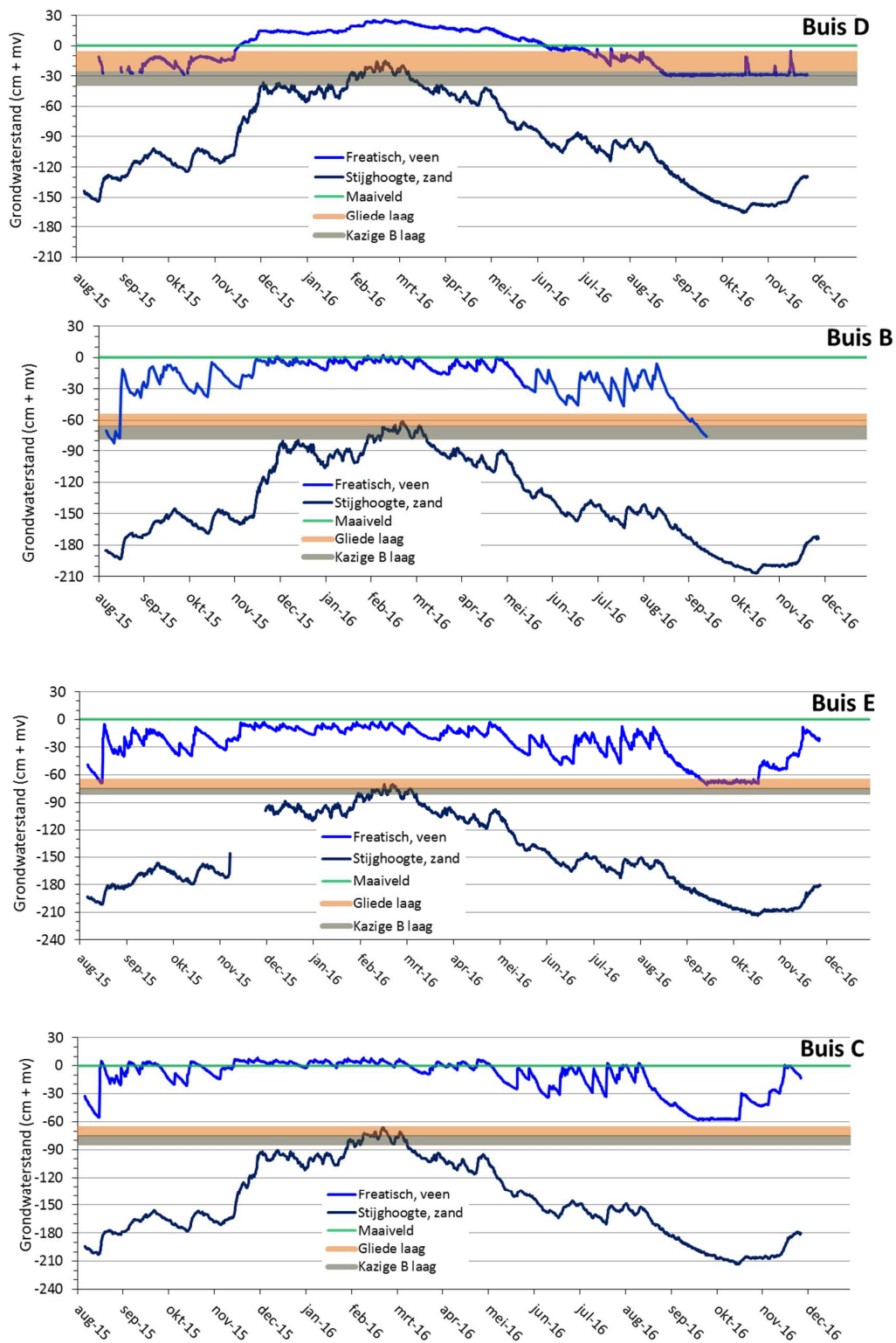
In deze paragraaf worden de resultaten van de veldmetingen besproken. Deze resultaten zijn het verloop van de grondwaterstanden, stijghoogten en drukhoogten in de tijd (4.1.1), metingen van zuurstofconcentraties in het zandpakket onder de veenbasis (4.1.2) en concentraties van stoffen in het water van de zandlaag (4.1.3).

#### 4.1.1 Grondwaterstanden, stijghoogten en vochtspanningen

De resultaten van het verloop in de tijd van grondwaterstanden in het veen en stijghoogten in het onderliggende zandpakket zijn gegeven in figuur 12. Het betreft de periode van 6 augustus 2015 tot 29 november 2016. In de grafieken zijn de dikten van de veenbasis in de vorm van de gliedelaag bovenop de kazige-B-horizont indicatief aangegeven. Van boven naar beneden is de volgorde van de meetbuizen die van de meetraai vanaf de brandgang. Buis D staat aan het begin van het veenpakket.

In het verloop van de stijghoogten in het zandpakket is duidelijk een droge en een natte periode te zien. De metingen starten op een droog moment in augustus. Op 12 augustus 2015 is bij buis B het diepste punt van 2015 bereikt op circa 110 cm beneden de veenbasis. Daarna begint een periode waarbij de stijghoogte langzaam toeneemt. Op 23 februari 2016 is het hoogste punt bereikt, waarbij de stijghoogte rond de grens tussen gliedelaag en kazige B-laag ligt. Daarna laat tot midden oktober 2016 de stijghoogte een geleidelijke daling zien, met op 19 oktober 2016 een diepste punt op 205 cm onder maaiveld. De stijghoogte ligt dan nog ruim boven de bovenkant van de filters van de peilbuizen. Er kan dus geen lucht van de onverzadigde zandlaag via de peilbuizen worden uitgewisseld met de atmosfeer. Na 19 oktober 2016 neemt de stijghoogte weer toe tot 170 cm onder het maaiveld. Buis E is gecorrigeerd met een verlaging van 28,7 cm om deze goed tussen de meetwaarden van de punten B en C te situeren. Van 8 november tot 4 december was de benodigde correctie plotseling 60 tot 90 cm. De oorzaak voor deze verschuiving kon niet worden vastgesteld en deze periode is verder buiten beschouwing gelaten. Gedurende de gehele meetperiode ligt de stijghoogte bij punt C 10 tot 15 cm lager dan bij D, waarbij het tussenliggende punt B een middenpositie aanneemt. Dit duidt op een stroming in het zandpakket van D naar C.

De freatische grondwaterstand in het veenpakket blijft bij buis C, aan het einde van de raai en circa 55 m vanaf de brandgang, waarschijnlijk altijd boven de veenbasis, hoewel dit op het einde van de droge herfst in 2016 niet goed kon worden gemeten omdat de grondwaterstandsbuis in het veen droog is gevallen. Bij buis B werd de freatische grondwaterstand niet alleen met een grondwaterstandsbuis, maar ook met behulp van tensiometers tot in de bovenkant van de veenbasis gemeten. Het blijkt dat de freatische grondwaterstand bij buis B in het begin van de meetperiode op 16 augustus 2015 net even in de veenbasis duikt, maar een natte periode maakt daar dan snel een einde aan waarna de freatische grondwaterstand tot eind 2015 langzaam stijgt met twee kortstondige enigszins dalende perioden in oktober en november. Gedurende de winter van 2016 ligt de freatische grondwaterstand tegen het maaiveld aan met schommelingen er net onder. Na 1 mei 2016 begint de freatische grondwaterstand langzaam te zakken, tot in half augustus een droge periode begint waardoor de daling wordt versneld en sterk doorzet. Alle freatische buizen behalve bij C vallen daarna in de periode half augustus begin oktober 2016 tijdelijk droog.



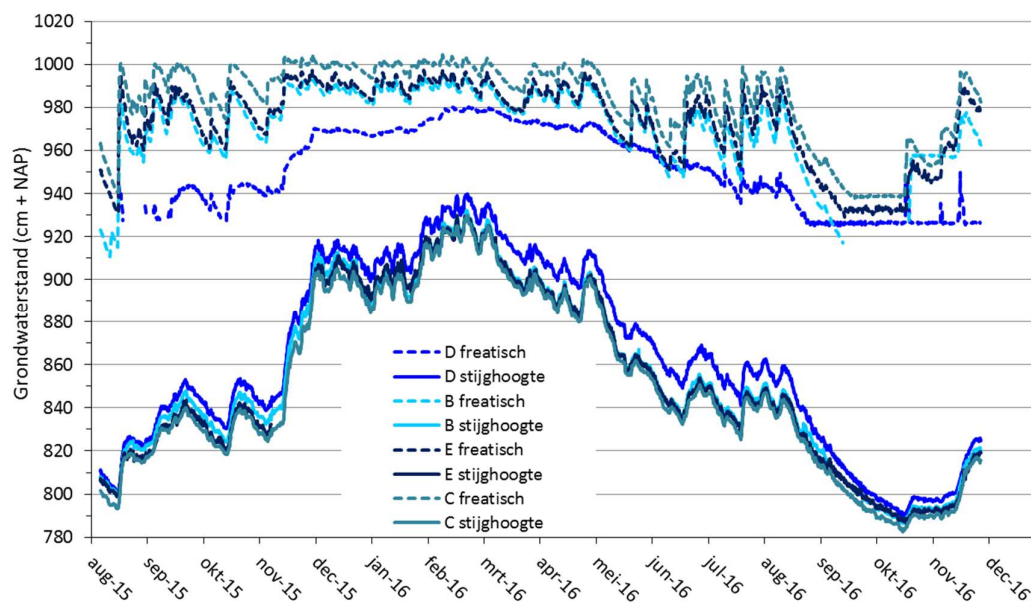
Figuur 12 Verloop in de tijd van gemeten freatische grondwaterstanden in het veenpakket boven de veenbasis en gemeten stijghoogten in het zandpakket onder de veenbasis. De volgorde van de meetbuizen van boven naar beneden is de volgorde van de buizen in de meetraai vanaf het begin in de brandgang (zie figuur 1). De grondwaterstand in het veen van buis B is van 19-12-2015 tot 16-5-2016 gebaseerd op de gemeten freatische grondwaterstanden en daarvoor en daarna berekend uit waarnemingen met een tensiometer net boven de veenbasis. Na 15-10-2016 komt de berekende freatische grondwaterstand onder de veenbasis en wordt daarom verder niet weergegeven.

Figure 12 Phreatic groundwater levels in the peat layer and head heights in the sand layer.

Terwijl de verschillen tussen de freatische grondwaterstand bij buis B en buis C vrij klein zijn blijkt de situatie bij buis C wel net wat natter en daardoor gunstiger te zijn voor het nat houden van de veenbasis en daarmee voor het behoud van de veenbasis. Bij C komt de freatische grondwaterstand in natte perioden in september 2015 en in de gehele winterperiode geregeld boven het maaiveld uit. Deze grondwaterstand ligt bij C dan ca 10 cm hoger dan bij B, zodat afstroming over het oppervlakt en ondiepe stroming (interflow) door de top van het veenpakket richting buis B en en verder richting brandgang plaatsvindt.

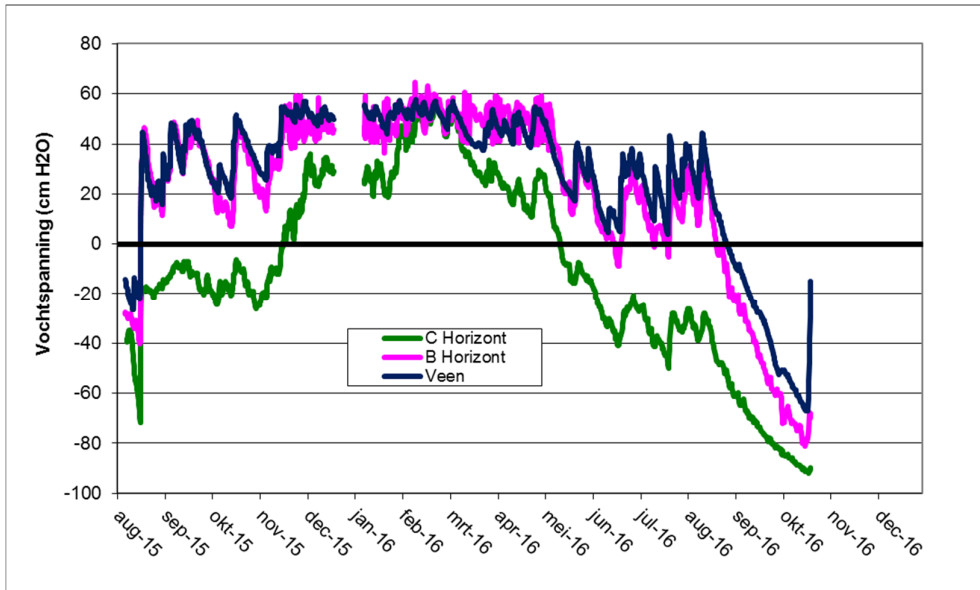
Bij buis D aan het begin van de raai is de situatie voor de veenbasis veel ongunstiger dan bij de buizen verderop in de raai. De veenlaag is duidelijk dunner en de freatische grondwaterstand zakt in augustus 2015 al tot in de dikke gliede laag en de buis in het veen valt tot half oktober 2015 herhaaldelijk droog. In 2016 valt de veenbasis vanaf eind augustus droog en pas op 21 oktober maakt een regenbui de veenbasis weer kortstondig nat. Tot het einde van de meetperiode op 29 november 2016 valt de veenbasis regelmatig droog. Omdat buis D aan de rand van het veenpakket staat op een wat lagere plek dan de overige buizen (zie figuur 11) geven de lagere freatische grondwaterstanden bij buis D niet aan dat de veenbasis hier 'lek' is. Niet alleen draineert het grondwater naar de nabij gelegen brandgang, maar bij stijgende grondwaterstand tot in het maaiveld en draineert grondwater en eventuele neerslag gemakkelijk via interflow en oppervlakte afstroming over het maaiveld richting de brandgang. De hoge freatische waterstand op 10-20 cm boven maaiveld in de winter komt overeen met de waterstand in de brandgang die eind februari 2016 een waterdiepte heeft van bijna 70 cm.

In de winterperiode staat het water in het veenpakket op alle meetplekken tot in of boven het maaiveld. De fluctuaties zijn over het algemeen gering, meestal maximaal 10 cm. In figuur 13 zijn de gemeten freatische grondwaterstanden van alle meetplekken weergegeven ten opzichte van NAP. Hiermee worden de posities van de waterstanden onderling duidelijk. De stijghoogte in buis D is het hoogste en deze neemt verder in raai af en is het laagste bij buis C op het einde van de raai. Bij de freatische waterstanden zijn de relatief lage waarden van buis D opvallend. De freatische grondwaterspiegel van buis C is het hoogst.



Figuur 13 Verloop in de tijd van alle gemeten freatische grondwaterstanden in het veenpakket boven de veenbasis en gemeten stijghoogten in het zandpakket onder de veenbasis weergegeven t.o.v. NAP. De grondwaterstand in het veen van buis B is in het begin en op het einde gebaseerd op vochtspanningen gemeten met een tensiometer net boven de veenbasis.

Figure 13 All phreatic groundwater levels in the peat layer and all head heights in the sand layer.



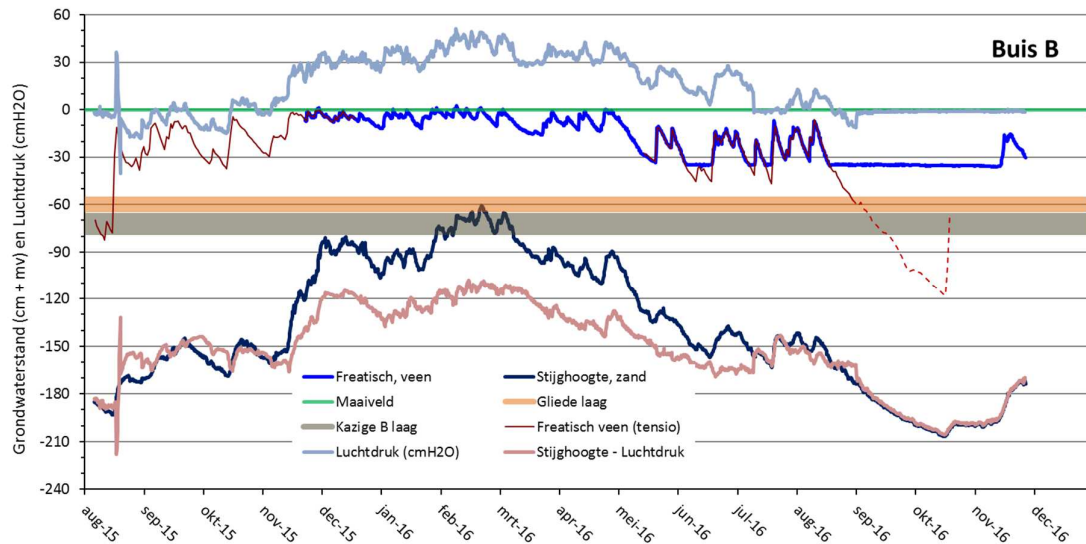
Figuur 14 Vochtspanningen gemeten in het veenpakket (diepte 51 cm -mv), in de B-horizont (diepte ca 85 cm -mv) en in het onderliggende zandpakket (C-horizont, diepte ca 95 cm -mv)  
 Figure 14 Soil moisture suctions measured in the peat layer (at a depth of 51 cm), in the B-horizon (at a depth of 85 cm) and in the underlying sand layer (C-horizon, at a depth of ca 95 cm)

Op enkele meters naast buis B zijn boven, in en onder de veenbasis tensiometers in duplo aangebracht om daar continu de vochtspanningen te meten. De bovenste tensiometer net boven de veenbasis, geeft in natte perioden de freatische grondwaterstand weer, welke kan worden vergeleken met de waarden in de freatische grondwaterbuis in het veen. In het onderzoek zijn deze vochtspanningen gebruikt om de freatische grondwaterstand te bepalen als de grondwaterstandsbuis droog viel. Zie figuren 12 en 13.

De gemeten vochtspanningen tot 21 oktober 2016 zijn weergegeven in figuur 14. Daarna zijn door een probleem met de stroomvoorziening geen vochtspanningen meer gemeten. Op 19 oktober begon een nattere periode, waarvan het begin nog net kon worden gemeten. Ook in de periode 15 december 2015 tot 7 januari 2016 was de stroomvoorziening uitgevallen en zijn geen metingen verricht. De positieve waarden in het veenpakket en in de B-horizont geven aan dat de tensiometers zich onder de freatische waterspiegel bevonden en dat er dus water bovenop de veenbasis stond. Echter, in augustus 2015 en in september en oktober 2016 treden negatieve vochtspanningen onderin het veen en in de veenbasis op. De veenbasis is dan aan de bovenkant aan het uitdrogen. Vooral de lange periode in 2016 vormt dan een gevaar voor de doorlatendheid van de veenbasis, temeer omdat in die periode de vochtspanning in de C-zand-horizont ook negatief is. Dat duidt erop dat de veenbasis ook vanaf de onderkant uitdroogt. Dit is ook aangetoond met vochtgehaltebepalingen aan bodemonsters van bemonsteringslocatie 2 van 6 september 2016 (zie figuur 17, 4.2.1). De negatieve drukhoogte in de C-zand-horizont duidt ook op een onverzadigde zone onder de veenbasis. Uit de metingen blijkt dit gedurende een groot deel van het jaar het geval te zijn. Wel is van december 2015 tot mei 2016 de vochtspanning in de C-horizont positief. Deze resultaten komen overeen met de meetresultaten van stijghoogten en freatische grondwaterstanden.

#### 4.1.2 Luchtdruk in C-horizont en effect daarvan op stijghoogte en vochtspanning

Bij punt B is ook een buis geplaatst tot in de C-horizont met onderin een luchtdrukmeter in een van boven afgesloten luchtkamer met van onderen een open verbinding met het zand in de C-horizont. Op deze wijze kan in het zand in de C-horizont de luchtdruk worden gemeten. Het resultaat is aangegeven in figuur 15.



Figuur 15 Verloop van de luchtdruk bij buis B in de zandondergrond (C-horizont) in de meetperiode uitgedrukt in cm waterkolom (cm H<sub>2</sub>O). Daarnaast zijn gepresenteerd de freatische grondwaterstand in het veen, de naar dit freatisch grondwater geschaalde tensiometerwaarde van de tensiometer bovenin de veenbasis (het gestreepte deel geeft aan dat de freatische grondwaterstand in werkelijkheid niet onder de veenbasis kan zakken), de stijghoogte in het zand zoals gemeten met de stijghoogtebuis B en de waterstand in de zandlaag (stijghoogte minus de luchtdruk in de zandlaag).

Figure 15 The air pressure at tube B in the sand layer (C-horizon) and the phreatic groundwater level in the peat layer and the head in the sand layer.

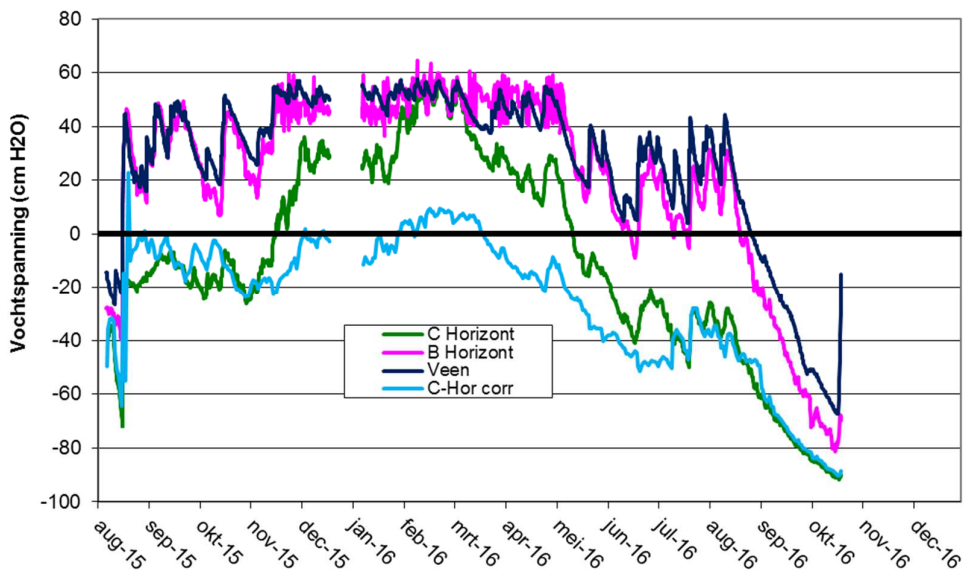
De luchtdruk in de zandlaag wordt gemeten ten opzicht van de atmosferische druk. In de eerste meetperiode is deze luchtdruk tot midden oktober 2015 negatief. Daarna wordt deze positief tot in de zomer van 2016, waarna de luchtdruk rond de nul schommelt en op 3 september 2016 stabiel nul wordt en deze tot het einde van de meting zo blijft.

In figuur 15 wordt een belangrijk aspect van een luchtonderdruk respectievelijk luchtoverdruk in de zandlaag onder de veenbasis aangegeven. Bij de installatie van de stijghoogtebuizen is er voor gewaakt dat het filter altijd onder water zou blijven. Een luchtoverdruk in de zandlaag drukt dan het water in de stijgbuis omhoog tot er evenwicht is met de luchtoverdruk ten opzicht van de atmosferische luchtdruk. De gemeten stijghoogte in de buis komt dus NIET overeen met de grondwaterstand in de zandlaag. Echter, de gemeten stijghoogte is WEL de stijghoogte zoals deze wordt gedefinieerd en hoeft niet te worden gecorrigeerd en in hydraulische berekeningen kan gewoon met deze potentiaal worden gerekend. Wel zal er rekening moeten worden gehouden met het feit dat het zand boven de grondwaterstand onverzadigd is en bijvoorbeeld een lagere waterdoorlatendheid heeft. In figuur 15 is de waterstand in de zandlaag geconstrueerd uit de stijghoogte minus de luchtdruk in de zandlaag. Deze grondwaterstand ligt in het algemeen lager dan is te verwachten op grond van de stijghoogtemeting. Alleen aan het begin en einde van de meetperiode treedt enige onderdruk op en is de grondwaterstand iets hoger dan de stijghoogte. Vanaf 3 september is de luchtdruk in de zandondergrond gelijk aan de atmosferische luchtdruk en komen stijghoogte en waterstand in de C-horizont overeen.

De luchtdruk in het zand onder de veenbasis wordt duidelijk beïnvloed door de grondwaterstand in het zand. Uiteraard zullen ook schommelingen in de atmosferische luchtdruk een direct effect op de meetwaarden hebben. Al met al is gedurende de periode eind november 2015 tot half mei 2016 de luchtoverdruk vrij stabiel 30 cm waterkolom met een periode in februari 2016 waarin deze oploopt tot maximaal 50 cm waterkolom. Na half mei zakt de luchtoverdruk gelijk met de grondwaterstand. Begin september zakt ook de freatisch grondwaterstand in het veen in de veenbasis. Het feit dat de uit de vochtspanningsmeting geconstrueerde freatische grondwaterstand bovenin de veenbasis



onder de veenbasis zakt, geeft aan dat de veenbasis van bovenaf gaat uitdrogen. Dit volgt ook uit figuur 16, waarin de vochtspanningsmetingen zijn weergegeven. De tensiometer bovenin de veenbasis en onderin het veen laten zien dat de vochtspanning in de veenbasis tot -60 cm waterkolom zakt. In figuur 16 is ook een gecorrigeerde versie van de gemeten vochtspanning in de C-horizont zien. Een tensiometer meet de vochtspanning ten opzichte van de atmosferische druk. In de kabel naar de drukopnemer in de tensiometer zit een slangetje die de ene zijde van de drukopnemer verbindt met de buitenlucht. De andere zijde van de drukopnemer staat in verbinding met het water in de tensiometercup. Feitelijk zou het slangetje niet met de buitenlucht in verbinding moeten staan, maar met de opgesloten lucht in de zandlaag. Door de overdruk in de zandlaag af te trekken van de meetwaarden van de tensiometer in het zand, wordt de werkelijke vochtspanning verkregen. De vochtspanning in de zandlaag blijkt dan tot 50 cm waterkolom lager te zijn dan in eerste instantie uit de meetwaarden volgde.



*Figuur 16 Vochtspanningen gemeten met tensiometers net boven de veenbasis (Veen, diepte tensiometer 51 cm –mv), in de veenbasis (B Horizont, ca 85 cm –mv) en onder de veenbasis (C Horizont, ca 95 cm –mv) en de gecorrigeerde meting van de vochtspanning in de C-Horizont, waarbij rekening is gehouden met de luchtdruk in de C-Horizont.*

*Figure 16 Soil moisture suctions in the peat layer and in the peat base and below the peat base and the corrected measurement of the soil moisture suction in the C-Horizon, taking into account the air pressure in the C-Horizon.*

Het zand in de ondergrond is dus duidelijk droger dan in eerste instantie verwacht. Dit komt overeen met de werkelijke waterstand in de zandlaag.

De luchtdrukmeting laat zien dat er daadwerkelijk lucht zit opgesloten onder de veenbasis. Het op- en neergaan van de grondwaterstand leidt tot een toename respectievelijk afname van de luchtoverdruk onder de veenbasis. Bij uitdrogen van de veenbasis blijkt de luchtover- of onderdruk onder de veenbasis naar nul te gaan en daarop te blijven. Hieruit blijkt dat de veenbasis op dat moment of 'lek' is en er uitwisseling van lucht plaatsvindt tussen de lucht onder de veenbasis en de buitenlucht door de veenbasis heen, of dat er lucht kan worden uitgewisseld vanaf bijvoorbeeld de rand van de brandgang. In het onderzoek wordt de situatie onderzocht waarbij het gevaar voor de veenbasis van onderen af komt. Het feit dat het uitdrogen van het veen boven de veenbasis en uiteindelijk van de veenbasis zelf een groot gevaar vormt voor het functioneren en voortbestaan van die veenbasis is niet in dit project onderzocht. Voor het project is de periode van belang waarin zich nog een duidelijke freatische grondwaterstand in het veen boven de veenbasis bevindt. Uit die natte periode



volgt dat de lucht onder de veenbasis blijft opgesloten en in ieder geval zeer weinig uitwisseling heeft met de buitenlucht.

#### 4.1.3 Zuurstofconcentraties in de lucht in de zandlaag onder de veenbasis

Deze zuurstofgehalten waren op 25 augustus 2015 in alle buizen P, Q, R en S (figuur 8) nagenoeg nul: de zuurstofgehalten varieerden tussen de 0 en 2 %; er zat geen zuurstof in de bodemlucht. In de natte periode daarna hebben geen (gelukke) bemonsteringen meer plaatgevonden. Op 29 juni 2016 kon bij buis B na een wat drogere periode voldoende lucht uit de zandondergrond worden gehaald om het zuurstofgehalte te bepalen. Deze had een zuurstofgehalte van 10,3%, iets minder dan de helft van het zuurstofgehalte in de atmosfeer. Ook op 24 augustus 2016, 12 oktober 2016 en 29 november 2016 kon de lucht van een aantal luchtkamers worden bemonsterd. Er is een aantal vrij lage, maar ook enkele hoge zuurstofgehalten gevonden. Problematisch is het feit dat alleen in wat drogere perioden lucht kan worden onttrokken. Het is dan niet duidelijk of de lucht onder de veenbasis werkelijk was opgesloten of dat er toch wellicht kortsluiting via macroporiën en scheurtjes in de veenbasis optreedt. Alleen 26 mei en wellicht ook 24 augustus stond er water op de veenbasis. Bij buis B op 26 mei en bij de buizen R, S en Q op 24 augustus zijn toen bemonsteringen gelukt en zuurstof gemeten, waarbij vooral bij de buizen R en S hoge zuurstofgehalten zijn gemeten.

*Tabel 5a en b. Zuurstofgehalten (a) en CO<sub>2</sub>-gehalten (b) van de lucht onttrokken uit luchtkamertjes in de zandlaag onder de veenbasis (C-horizont) en bij buis B daarnaast ook in de B-horizont en de Bk-horizont (kazige B). De buizen staan op volgorde van de afstand tot het begin van de raai (bij buis P)*  
*Table 5a and b. Oxygen (a) and CO<sub>2</sub> contents (b) of the air extracted from air chambers*

Buis	20-8-2015	26-5-2016	24-8-2016	12-10-2016	29-11-2016
P	0.0			3.1	15.0
Q	1.5		6.8	13.4	5.4
R = D	0.9		18.9	12.0	4.3
S = B(C-hor)	1.2	10.3	19.4	15.6	
T = B (B-hor)				7.1	
B (Bk-hor)				7.5	
U = E				20.9	

	12-10-2016		29-11-2016	
Buis	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)
P	3.1	1.35	15.0	0.92
Q	13.4	2.02	5.4	2.90
R = D	12.0	1.67	4.3	2.52
S = B(C-hor)	15.6	1.52		1.44
T = B (B-hor)	7.1	2.65		1.22
B (Bk-hor)	7.5	5.37		
U = E	20.9	2.54		0.07

#### 4.1.4 Concentraties opgeloste stoffen

De concentraties aan opgeloste stoffen in watermonsters onttrokken uit suction cups en soms aan buizen of luchtkamertjes zijn gegeven in tabel 6. Concentraties van nitraat (NO<sub>3</sub>) waren zeer laag. Voor zwavel geldt dat niet Nb en Nc, dus bij buis N in de noordelijke grens van het Wierdenseveld, waar deze grenst aan een landbouwgebied. Als al de S bij buis N voorkomt als sulfaat, dan wordt de hoogste concentratie 250 mg/l SO<sub>4</sub> op 20 augustus 2015 bij buis N gemeten. Ook de pH is bij hoge sulfaatconcentraties hoog. Op andere plekken (Bb, Ecl en Sbl) komen ook vrij hoge concentraties SO<sub>4</sub> voor, in de range van 25 tot 35 mg/l SO<sub>4</sub>. Bij een aantal buizen wordt op een bepaald moment na de zomerperiode een hoge IC gemeten.

*Tabel 6 Concentraties opgeloste stoffen onttrokken aan de bodem met suction cups en een enkele keer uit een buis (Ac en Ngws) of luchtkamer (Ccl, Ecl, Sbl en Tcl). Monsteromschrijving: de hoofdletter geeft de buis, de eerste kleine letter de horizont en de laatste kleine letter bijzonderheden. Deze bijzonderheden zijn: k (van bk) = kazige B; l = monster uit water uit luchtkamer; gws = grondwaterstandsbuis. Door de concentratie aan zwavel S met 3 te vermenigvuldigen krijgt men de concentratie aan sulfaat (SO<sub>4</sub>).*

*Table 6 Concentrations of solutes withdrawn from the soil with suction cups*

Datum	Monster-omschrijving	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Fe [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	pH [20±1 °C]	IC [mg/l]	N-NH4 [mg/l]	N-NO3 [mg/l]	Nts [mg/l]	P-PO4 [mg/l]
24-08-2016	Ac	1,64	1,2	1,21	0,02	0,88	5,19	0,6	0,60	0,06	1,9	-0,005
20-08-2015	Bb	2,06	3,0	0,41	0,01	12,60	4,17	3,4	1,00	0,10	2,0	0,001
26-05-2016	Bb	2,40	0,9	0,37	0,02	1,25			0,31	0,00	1,6	0,001
24-08-2016	Bb	2,98	4,2	0,37	0,03	1,94	5,40	0,3	0,32	0,07	2,3	-0,003
12-10-2016	Bb	3,63	3,9	0,49	0,21	2,65	4,97	0,0	0,33	0,03	2,7	0,040
26-05-2016	Bbk	1,21	2,1	0,45	0,06	1,19			0,48	0,04	1,7	0,027
24-08-2016	Bbk	1,28	1,0	0,33	0,02	1,23	-	-	0,53	0,08	2,2	-0,029
26-05-2016	Bc	4,16	3,5	0,56	0,08	2,73			0,39	-0,01	2,9	0,027
24-08-2016	Bc	4,93	3,7	0,59	0,05	2,96	6,17	0,7	0,18	0,89	3,8	-0,005
20-08-2015	Cc	1,70	1,7	0,92	0,04	1,62	5,25	10,6	0,56	0,06	2,3	-0,002
26-05-2016	Cc	1,41	1,8	1,67	0,02	1,59			0,45	0,00	1,7	-0,004
24-08-2016	Cc	2,27	0,9	1,80	0,02	1,88	5,44	2,9	0,41	-0,01	1,8	-0,005
12-10-2016	Cc	2,60	1,0	1,85	0,01	1,75	5,33	0,0	0,44	0,00	1,9	-0,008
29-11-2016	Cc	6,63	5,4	1,98	0,08	4,00	8,14	44,8	0,46	0,01	5,8	0,010
29-11-2016	Ccl	2,26	3,7	1,23	0,03	2,27	6,31	19,1	0,25	0,00	2,3	0,000
12-10-2016	Db	7,19	3,9	1,11	0,05	4,19	8,36	36,2	0,39	0,00	6,2	0,000
26-05-2016	Dc	3,45	3,1	0,23	0,04	3,45			0,31	0,74	3,5	0,002
24-08-2016	Dc	2,76	0,5	0,28	0,02	1,79	6,41	-	0,36	0,00	2,4	-0,005
20-08-2015	Eb	3,18	12,6	1,07	0,05	2,34	6,73	31,2	1,09	0,10	3,6	-0,002
26-05-2016	Eb	3,12	3,7	1,45	0,07	3,96			0,32	-0,01	3,7	0,023
24-08-2016	Eb	6,99	4,0	1,79	0,08	4,17	7,87	47,1	0,37	0,00	6,6	0,003
26-05-2016	Ec	3,10	2,8	0,37	0,03	2,14			0,24	0,00	2,5	0,003
29-11-2016	Ecl	10,90	7,8	4,02	0,10	8,10	4,90	6,5	0,04	-0,01	8,0	0,020
20-08-2015	Nb	1,22	7,3	1,58	0,22	84,40	7,47	6,2	2,88	0,01	5,0	0,088
26-05-2016	Nb	4,31	2,2	4,53	0,15	29,70			1,45	0,00	4,5	0,060
24-08-2016	Nb	8,41	4,8	2,26	0,13	26,30	7,71	44,8	1,37	0,00	6,5	0,038
12-10-2016	Nb	7,40	5,2	1,91	0,13	19,60	8,24	33,7	1,17	0,00	5,5	0,029
26-05-2016	Nc	0,71	3,9	1,73	0,04	38,20			2,32	0,14	3,0	-0,006
05-08-2015	Ngws	1,66	10,8	0,23	0,53	2,23	5,52		1,14	0,28	4,8	0,401
20-08-2015	Pc	1,28	2,5	0,02	-0,01	0,71	4,58	3,8	0,34	2,46	3,4	-0,003
26-05-2016	Pc	1,15	0,8	0,56	0,02	0,67			0,45	0,00	1,4	-0,002
12-10-2016	Pc	1,28	2,7	0,03	0,01	0,60	4,76	1,7	0,02	2,90	3,4	-0,008
29-11-2016	Sbl	8,82	14,8	3,50	0,20	11,80	5,93	16,0	0,32	0,01	12,6	0,040
29-11-2016	Tcl	2,25	42,9	0,52	0,07	2,83	7,30	47,6	0,20	-0,01	4,4	-0,010

## 4.2 Laboratoriumbepalingen

In deze paragraaf worden de resultaten van de laboratoriumbepalingen besproken. Het gaat om organische-stofgehalten, vochtgehalten en volumieke massa's (4.2.1), hydraulische karakteristieken (4.2.2), krimp karakteristieken (4.2.3) en afbraaksnelheden (4.2.4).

Bij weergave van resultaten in tabelvorm wordt de codering van monsterlocaties gehanteerd die in 2.2 is geïntroduceerd. Deze codering is hier beneden in tabel 7 nogmaals gegeven.

*Tabel 7 Codering van de bemonsteringslocaties (voor ligging locaties zie fig. 8)*

*Table 7 Codes of the sampling locations (locations see fig. 8)*

Locatiecode	Omschrijving	Datum monstername
1	tien meter ten zuiden van de raai nabij buis B	5 augustus 2015
2	zeven meter ten noorden van de raai nabij buis B	6 september 2016
3	aan de noordrand van het Wierdense Veld	12 augustus 2015

### 4.2.1 Organische-stofgehalte, vochtgehalte en volumieke massa

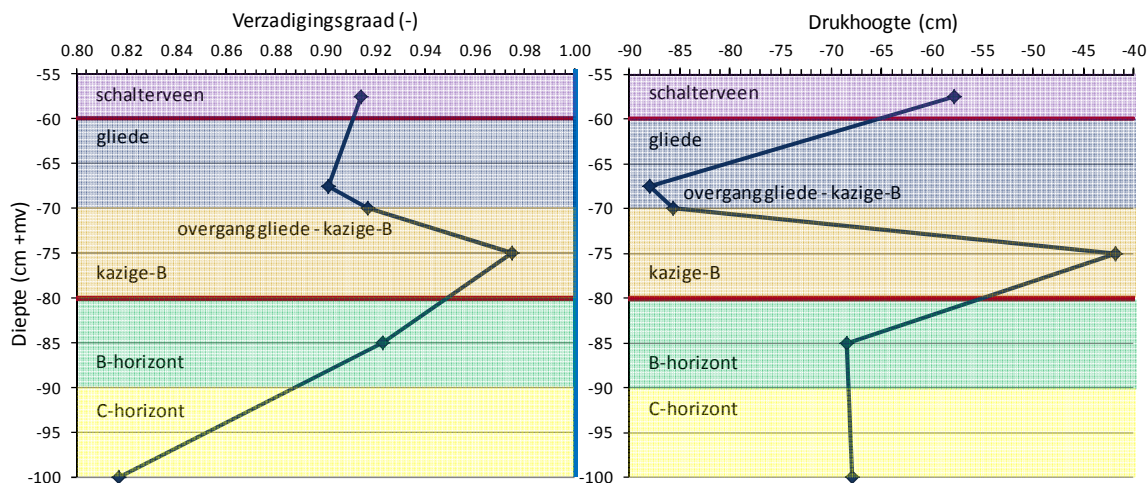
Er zijn ongeveer zeventig ongestoorde monsters gestoken in zes verschillende bodemlagen van de drie bemonsteringslocaties. Aan bijna vijftig daarvan zijn het organische-stofgehalte en de volumieke massa bepaald, en aan ruim dertig ook het volumetrische vochtgehalte bij verzadiging. Voor een groot deel waren dat monsters die in de eerste plaats zijn gebruikt voor het bepalen van andere bodemeigenschappen. Van deze monsters zijn organische-stofgehalten, volumieke massa's en verzadigde vochtgehalten gegeven in de relevante tabellen in paragrafen 3.2.2-3.2.4. Van tien monsters van locatie 2 zijn alleen die drie hier behandelde grootheden bepaald en het veldvochtgehalte tijdens nemen van de monsters op 6 september 2016. Tabel 8 geeft de resultaten van de bepalingen aan die monsters.

*Tabel 8 Resultaten van bepalingen van organische-stofgehalten, volumieke massa's en volumetrische vochtgehalten bij verzadiging en tijdens monsternamen op 6 september 2016 van zes bodemlagen. De verzadigingsgraad is de ratio tussen veldvochtgehalte en vochtgehalte bij verzadiging. Alle monsters zijn genomen op locatie 1 (zie tabel 7)*

*Table 8 Determined organic matter contents, volumetric masses and volumetric moisture contents*

Bodem- horizont	Diepte- traject (cm)	Organische- stofgehalte (massa-%)	Volumieke massa (kg/m <sup>3</sup> )	Volumetrisch vochtgehalte		
				verzadigd (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	veld 6-9-2016 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	verzadigingsgraad (-)
Schalterveen	55-60	97,6	113	0,918	0,839	0,914
Gliede	65-70	69,6	222	0,862	0,790	0,916
Gliede	65-70	59,8	243	0,848	0,751	0,886
Overgang gliede kazige-B	67,5-72,5	24,1	704	0,674	0,615	0,912
Overgang gliede kazige-B	67,5-72,6	24,5	694	0,710	0,654	0,921
Kazige-B	72,5-77,5	15,1	915	0,613	0,582	0,949
kazige-B	72,5-77,6	13,5	978	0,574	0,574	1,000
B-horizont	82,5-87,5	3,7	1514	0,409	0,384	0,938
B-horizont	82,5-87,6	4,1	1537	0,407	0,370	0,909
C-horizont	102,5-107,5	1,3	1694	0,358	0,292	0,817

Met veldvochtgehalten en verzadigd vochtgehalten zijn de verzadigingsgraden van tabel 8 berekend. De gemiddelde waarden van alle bodemlagen zijn uitgezet tegen de diepte in figuur 17. Tevens zijn de uit de gemiddelde vochtgehalten afgeleide drukhoogten uitgezet tegen de diepte. De drukhoogten zijn afgeleid met de parameters van tabel 10; die van het schalterveen met Bouwsteen O16 van de Staringreeks (Wösten, 2001).



Figuur 17 Verzadigingsgraden (links) en drukhoogten (rechts) op 6 september 2016 van bodemlagen van bemonsteringslocatie 2 uitgezet tegen de diepte. De verzadigingsgraden zijn de gemiddelden van de waarden van tabel 8 en de drukhoogten zijn hiervan afgeleid met de VanGenuchten-parameters van tabel 10. De twee vette rode lijnen markeren de veenbasis bestaande uit een gliedelaag en een kazige-B-laag, beide 10 cm dik. De verticale blauwe lijn rechts in het linker figuur geeft de verzadigingslijn aan.  
 Figure 17 Saturation rates (left) and pressure heights (right) on 6 September 2016 of soil layers from sampling location 2

Figuur 17 laat zien hoe in de droge periode van 2016 op 6 september de veenbasis op locatie 2 aan zowel boven- als onderkant droogviel. Dit was drie dagen nadat op 3 september de luchtoverdruk boven en onder de veenbasis bij buis B omsloeg in een luchtdruk van nul ten opzichte van de atmosfeer (zie 4.1.1). Midden in de kazige-B-laag was de verzadigingsgraad het hoogst; een van de twee monsters was zelfs verzadigd (tabel 8). De aflopende lijn naar boven toe verandert bij de bovengrens van de veenbasis: de schalterveenlaag had weer een iets hogere verzadigingsgraad dan de gliedelaag.

Deze speklaagstructuur van afwisselend natter en droger komt nog sterker tot uitdrukking bij de drukhoogten in de diepte. De kazige-B-laag had de hoogste drukhoogte. Zowel boven als onder deze laag was de drukhoogte lager. Water stroomde vanuit de kazige-B tegen de zwaartekracht i omhoog – de drukhoogtegradiënt bedroeg  $(85 - 41) / 5 - 1$  (zwaartekracht) = 7,8 cm per cm omhoog gericht - naar de gliedelaag en omlaag naar de B-horizont. De veenbasis was gemiddeld al onverzadigd en stond op 6 september op het punt om helemaal 'door te slaan', volledig onverzadigd te raken. Na deze datum was er een 41-daagse periode met een verdampingoverschot van 55 mm waardoor het waarschijnlijk is dat dit ook is gebeurd.

De lagere drukhoogte en grotere verzadigingsgraad van de schalterveenlaag is te verklaren uit een regenbui van 10 mm op 4 september na een droge periode met een verdampingoverschot van 48 mm die op 12 augustus begon en 25 dagen duurde. Op 6 december had het regenwater de onderkant van het veenpakket bereikt. Hoogstwaarschijnlijk heeft de zeer lage doorlatendheid van de schalterveenlaag (tabel 12) een rol gespeeld bij het drooghouden van de onderliggende gliedelaag. De drukhoogte in het zand komt vrij goed overeen met die is gemeten met de tensiometers in deze laag (fig. 16). Deze drukhoogte was gelijk aan de (geschatte) drukhoogte van de B-horizont. Waterstroming tussen deze beide lagen vond daarom vooral plaats door de zwaartekracht en zal gering zijn geweest.

Tabel 9 Samenvatting van alle resultaten van bepalingen van organische-stofgehalten, volumieke massa's en volumetrische vochtgehalten bij verzadiging. De samenvatting is in de vorm van een statistische analyse met parameters (verklaring daarvan onder de tabel).

Table 9 Summary of results of determined organic matter levels, volumetric masses and volumetric moisture contents at saturation.

Bodem-horizont	Organische-stofgehalte (massa-%)					Volumieke massa (kg/m <sup>2</sup> )					V. vochtgehalte bij verzadiging (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )				
	n	med	gem	sd	vc	n	med	gem	sd	vc	n	med	gem	sd	vc
Schalterveen	3	97,6	97,0	1,3	1	3	110	110	4	3	3	0,897	0,901	0	2
Gliede	16	87,5	79,6	13,5	17	16	203	204	61	30	10	0,836	0,793	0,10	13
Overgang G-KB	2	24,3	24,3	0,3	1	2	699	699	7	1	2	0,692	0,692	0,03	4
Kazige-B	15	11,2	11,5	3,2	28	15	1078	1100	183	17	10	0,567	0,569	0,04	8
B-horizont	11	4,1	4,5	1,0	23	11	1482	1472	57	4	4	0,408	0,402	0,02	5
C-horizont	2	1,6	1,6	0,4	26	2	1693	1693	1	0	3	0,324	0,328	0,03	8

n = aantal monsters

med = mediaan

gem = gemiddelde

sd = standaardafwijking

vc = variatiecoëfficiënt in % = 100% x sd / gem

Tabel 9 geeft een statistische samenvatting van alle resultaten van bepalingen van organische-stofgehalten, volumieke massa's en volumetrische vochtgehalten bij verzadiging. Op grond van de variatiecoëfficiënten vertonen de veenbasislagen gliede en kazige-B de grootste variatie gevolgd door de B-laag. Vooral de gliede springt er uit. De variatie is het grootst bij de volumieke massa gevolgd door het organische-stofgehalte.

De verklaring hiervoor moet vooral gezocht worden in het aantal monsters en de spreiding daarvan over de drie bemonsteringslocaties. Hoe groter het aantal monsters, hoe groter de variatiecoëfficiënt. Maar dan wel onder de voorwaarde dat variatie ook werkelijk voorkomt. En dat was blijkbaar het geval in dit relatief kleine stukje van het Wierdens veld. Gliede en kazige-B hadden het grootste aantal monsters en vooral de gliede-monsters waren het meest gelijkmatig verdeeld over de drie locaties (voor locaties 1, 2 en 3 resp. 17%, 28% en 55%). Dat gold ook voor de B-horizontmonsters (resp. 38%, 16%, 46%), maar die waren in aantal kleiner. De monsters van de kazige-B kwamen voor  $\frac{3}{4}$  van locatie 1 en  $\frac{1}{4}$  van locatie 2. Verwonderlijk is de relatief grote variatie niet, als het grillige verloop van de dikten van de verschillende lagen langs de meetraai in figuur 11 in beschouwing wordt genomen.

#### 4.2.2 Hydraulische karakteristieken

Tabel 10 geeft de resultaten van de verdampingsmetingen ter bepaling van waterretentie-(pF-curve) en hydraulische doorlatendheidskarakteristieken als de parameters van het Mualem-VanGenuchtenmodel dat in SWAP wordt gebruikt om deze karakteristieken te beschrijven. De curven die deze relaties weergeven, zijn gegeven in bijlage 4.

Een grote weerstand tegen verticale wegzijging van water uit het bovenliggende veenpakket is de belangrijkste kwaliteit van de veenbasis. Het was daarom essentieel om deze weerstand in de vorm van de doorlatendheid bij verzadiging goed te meten.

*Tabel 10 Waterretentie- en hydraulische doorlatendheidskarakteristieken als waarden voor de Mualem-VanGenuchten-parameters (alle monsters genomen op locatie 1)*

*Table 10 Water retention and hydraulic permeability characteristics as values for the Mualem-VanGenuchten parameters.*

Bodem-horizont	ORES (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	OSAT (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	ALFA (1/cm)	NPAR (-)	K0 (cm/d)	LEXP (-)
Gliede	0,150	0,562	0,00598	1,9604	1,725	0,362
Gliede	0,144	0,649	0,00586	1,8172	1,008	0,020
Kazige B	0,160	0,525	0,00353	1,9954	1,230	1,995
Kazige B	0,104	0,498	0,00351	1,7509	1,029	0,000
B-horizont	0,200	0,374	0,00967	2,5342	1,582	-0,728
B-horizont	0,199	0,416	0,00872	2,6850	0,772	-0,823
C-horizont	0,093	0,324	0,01257	3,9684	9,740	0,000
C-horizont	0,088	0,303	0,01232	4,6708	28,227	0,540

ORES = residueel volumetrisch vochtgehalte  
OSAT = verzadigd volumetrisch vochtgehalte  
ALFA = vormfactor  $\alpha$

NPAR = vormfactor n  
K0 = gefitte verzadigde doorlatendheid  
LEXP = exponent in doorlatendheidsfunctie

In tabel 11 zijn de waarden van de gemeten verzadigde doorlatendheden gegeven. Deze waarden zijn zeer hoog voor de gliede-laag en de kazige-B-horizont, en de overgang tussen deze twee. Ook de gefitte verzadigde doorlatendheden van tabel 10 zijn (zeer) hoog voor een slecht of ondoorlatende veenbasis. Bij bijvoorbeeld een 25 cm dikke veenbasis bestaande uit gliede op kazige-B met een doorlatendheid van 1 cm per dag hoort een weerstand tegen verticale stroming van  $25 / 1 = 25$  dagen. Dit is al zeer klein. Dorland et al. (2015) en Cirkel et al. (2016) berekenden hiervoor met SWAP wegzijgingsfluxen van 0,3 tot 0,75 mm per dag.

De waarden van tabel 11 geven bij deze dikte van 25 cm een weerstand van circa 2 dagen. Wegzijgingsfluxen die hiermee worden berekend zijn een factor tien hoger dan die uit de genoemde SWAP-studie. Bij fluxen van deze orde van grootte is geen sprake van een echte 'veenbasis' zoals deze in de literatuur wordt beschreven. Voor de veelgenoemde maximale wegzijging van 40 mm per jaar voor hoogveenbehoud in Nederland (Streefkerk en Casparie, 1987) berekenden Dorland et al. (2015) een weerstand van 20.000 dagen wat bij een 25 cm dikke veenbasis neerkomt op een verzadigde doorlatendheid van 0,0125 cm per dag.

*Tabel 11 Gemeten (bij 15 °C) waarden van de doorlatendheid bij verzadiging voor vier bodemhorizonten (alle monsters genomen op locatie 1 behalve van de C-horizont). Deze doorlatendheden zijn wat betreft de eerste drie bodemhorizonten veel hoger dan verwacht (zie tekst) en voor realistischere waarden wordt verwezen naar tabel 12.*

*Table 11 Measured (at 15 °C) values of the permeability at saturation for four soil horizons*

Bodemhorizont	Dieptetraject (cm)	Doorlatendheid bij verzadiging (cm/d)
Gliede	55-65	27,4
Overgang-gliede -kazige B	60-70	3,9
Kazige-B	70-80	4,5
C-horizont (kuil brandgang)	60-70	43,6

De aanvullende metingen van verzadigde doorlatendheden aan kleinere monsters met apparatuur en ontwikkelde methode om lage doorlatendheden te meten (2.2.2), leverde de resultaten van tabel 12 op voor vier veenbasislagen en de onderliggende B-horizont met ijzerinspoeling. Deze vier lagen zijn naast de hierboven genoemde drie lagen gliede, overgang van gliede naar kazige-B en kazige-B ook een 'schalterveenlaag' boven de gliede, die in 2016 is aangetroffen in een tweede bemonsteringskuil nabij lokatie Buis B. Deze laag bestaat uit zeer dicht plaatvormig Waterveenmosveen met duidelijk herkenbare vezelstructuren.

Tabel 12 Gemeten verzadigde doorlatendheden van vijf bodemhorizonten (herhalingen zijn aparte monsters) omgerekend naar waarden die gelden bij 10 °C

Table 12 Measured saturated conductivities of five soil horizons

Verzadigde doorlatendheid per bodemhorizont (cm/d)					
Herhalingen; tussen () monsterlocaties	Schalterveen	Gliede	Overgang- gliede-kazige-B	Kazige-B	B-horizont met ijzerinspoeling
1 (2 2 2 2 1)	0,00482	0,0121	0,0042	0,0152	0,0629
2 (2 2 2 1 1)	0,00727	0,0141	0,0192	0,0270	0,0661
3 (- 1 1 1 -)	-	0,0263	0,0280	0,0362	-
4 (- 1 1 - -)	-	0,0334	0,0457	-	-
Gemiddelde	0,00605	0,0215	0,0243	0,0262	0,0645
Variatiecoëfficiënt <sup>1</sup>	0,29	0,47	0,71	0,40	0,04

<sup>1</sup> standaardafwijking gedeeld door gemiddelde

De variatie in de meetwaarden van de veenbasislagen is vrij groot wat tot uitdrukking komt in de vrij hoge variatiecoëfficiënten (standaardafwijking gedeeld door gemiddelde). De waarden zijn veel lager dan de waarden van tabel 11, ook na correctie voor verschil in temperatuur (waarden van tabel 11 moeten worden vermenigvuldigd met 0,87 voor omrekening naar 10 °C). De laagste waarden hadden de overgang-gliede-kazige-B en de schalterveenlaag die niet voorkomt in tabel 11 en die niet altijd wordt genoemd bij de samenstelling van een veenbasis. Wel bekend is de zeer lage doorlatendheid van deze veensoort (Hendriks et al., (in voorbereiding) vonden lage waarden van < 0,005 cm per dag). In de betreffende bemonsteringskuil bij lokatie Buis B was de dikte 5 cm. Opvallend zijn de waarden van de B-horizont. Ze zijn de hoogsten van de tabel, maar zijn absoluut gezien zeer laag en kunnen worden gezien als een minerale toevoeging aan de veenbasis. De dikte ter plekke bij Buis B was beperkt tot 10 cm.

Voor de gebruikelijke organische veenbasislagen gliede en kazige-B en de overgang hiertussen zijn de waarden laag maar niet extreem laag. Dekker et al. (1986) en Dekkers (1988) vonden verzadigde doorlatendheden van kazige-B-monsters tussen 0,001 en 0,01 cm per dag, respectievelijk < 0,001 en 0,012 cm per dag. Dekkers et al. (1990) maten aan onderwatergenomen kazige-B-monsters bijna uitsluitend doorlatendheden van < 0,001 cm per dag. De laagste waarde uit tabel 12 tipt net aan de hoogste waarde van dit bereik uit de literatuur. Voor gliede-monsters vonden zowel Dekker et al. (1986) als Dekkers (1988) hogere doorlatendheden dan voor de kazige-B-monsters: respectievelijk 0,08-0,2 en 0,031-0,33 cm per dag. De laagste waarde van dit bereik is gelijk aan de hoogste van tabel 12. Al deze waarden uit de literatuur zijn gemeten aan 20 cm dikke monsters met een diameter van 19 cm die een speciale voorbehandeling – ringen insmeren met vet – of nabehandeling – monsterwand bedekken met bodemprofiellak – kregen. De temperatuur waarbij is gemeten, is nergens vermeld.

#### 4.2.3 Krimpcharacteristieken

De resultaten van de krimpmetingen worden hier in verschillende vormen weergegeven. Eerst in figuur 18 gezamenlijk de verticale krimp (zakking), horizontale krimp (spleetvorming) en volumekrimp (zakking + spleet) als functie van de drukhoogte. 'Spleet' slaat hierbij op de ruimte die bij horizontale krimp ontstond tussen monsterwand en binnenwand van de monsterring en die bij de metingen is gebruikt als maat voor de horizontale krimp (zie 2.2.3). Geen van de 51 mm hoge cilindrische monsters met diameter van 50 mm vertoonde duidelijke scheurvorming in het traject vóór drogen in de stoof bij 105 °C. Vervolgens worden de resultaten getoond in figuur 19 op de meer formele manier die wordt gebruikt om mee te rekenen in modellen als SWAP, maar die ook inzicht geeft in de verdeling tussen vaste stof, water en lucht in een bodemmonster of -laag. Daarnaast worden in tabel 13 bodemkenmerken en de krimpwaarden van de monsters bij pF 2 (-100 cm drukhoogte) gegeven.

Deze presentatie van de resultaten wordt steeds gedaan als vergelijking tussen belaste en onbelaste monsters die als duplo's zijn gestoken uit de drie mogelijk krimpende veenbasislagen gliede, kazige-B en schalterveen. De laatste is hier bij de organische veenbasis gerekend, omdat het een organische laag is die een zeer geringe doorlatendheid heeft. Deze laag is echter geen vanzelfsprekend en vast onderdeel van een organische veenbasis. De belasting bedroeg 75 g per cm<sup>2</sup> wat neerkomt op 75 cm waterkolom. De niet-belaste monsters hadden een lichte belasting van 5 g per cm<sup>2</sup> die samenhang met de toegepaste methode (zie 2.2.3). Deze twee toestanden van bovenbelasting van de veenbasis kunnen worden gezien als een situatie met een volledig verzadigd, deels veraard veenmosveenpakket van 70 cm dik en een vergelijkbare situatie, maar dan met een zeer sterk uitgedroogd veenpakket. Beide situaties en dus ook beide manieren van meten zijn relevant. En ook de vergelijking tussen deze twee toestanden is relevant.

Figuur 18a toont de verticale, horizontale en totale krimp van de veenbasislagen met veel organische stof – gliede en schalterveen – en figuur 18b dezelfde informatie voor de kazige-B lagen met een relatief gering organische-stofgehalte (zie tabel 13). De krimp is relatief uitgezet als percentage van de hoogte (51 mm), de diameter (50 mm) en het volume (100 cc) van het monster. Het linker figuur is steeds een uitvergroting van het rechter figuur. Links geeft het figuur op de x-as drukhoogten  $h$  in cm en rechts pF-waarden (logaritme met grondtal 10 van de absolute drukhoogte). De verticale scheidslijn in beide figuren maakt het onderscheid tussen gemeten drukhoogten en uit het gemeten vochtgehalte afgeleide drukhoogten met de pF-curven op basis van de waarden van tabel 10 (zie ook 4.2.1). De scheidslijn ligt bij  $h = -102,5$  cm (pF = 2,01, verder aangeduid als pF 2) (zie 2.2).

In figuur 18a is opmerkelijk dat gliede en schalterveen redelijk veel op elkaar lijken voor de algemene vorm van de volumekrimp, want de eerste bestaat uit structuurloze organischestof en de tweede heeft juist een hele sterke structuur van plaatvormige horizontale vezels. De gliede heeft meer 'stoel' – de kortdurende sterke krimp aan het begin van de uitdroging ( $x = 0$ ) – in de krimpcurve en vertoont ook een sterke S-vorm halverwege het uitdrogingstraject. De curve van het schalterveen verloopt daar vlakker. Het eindpunt van de volumekrimp bij pF 7 ligt bij gliede en schalterveen in dezelfde orde van grootte.

Het effect van de belasting is bij de gliede veel groter dan bij het schalterveen. In het begintraject van de krimp vindt tot pF 1 (-10 cm) bij de gliede onder belasting al (ruim) de helft van de totale krimp tot pF 2 plaats. pF 2 is van belang, omdat dat onder niet te extreme omstandigheden ongeveer de laagste drukhoogte in de veenbasis zal zijn als gevolg van zakking van de stijghoogte in het droge seizoen. De krimp bij de belaste monsters van gliede en schalterveen bedraagt bij pF 2 ongeveer 8% en bestaat volledig uit verticale krimp of zakking. Uitzondering vormt Gliede 3 waarbij dan een horizontale krimp of spleetvorming van 1% heeft plaatsgevonden. Bij de onbelaste monsters is de zakking bij pF 2 ongeveer de helft van die van de belaste monsters. De onbelaste monsters vertonen allemaal spleetvorming bij pF 2, met uitzondering van Gliede 1 waar deze vorm van krimp dan net begint.

Het vrijwel ontbreken van horizontale krimp bij belaste monsters tot pF 2 is een aanwijzing dat gliedelagen die aan de bovenkant belast zijn door een verzadigd veenpakket van minstens 70 cm dikte, maar waarin door een wegzakkende stijghoogte een drukhoogte van minimaal pF 2 ontstaat, niet snel zullen scheuren. Valt het veenpakket grotendeels droog, dan neemt die kans snel toe. Zeker als de gliedelaag ook van de bovenkant uitdroogt. Droogt de gliedelaag door een combinatie van een lagere drukhoogte aan bovenkant en aan onderkant uit tot pF-waarden groter dan 2 dan schiet de krimp zowel verticaal als horizontaal omhoog en is spleetvorming van gliedelagen hoogstwaarschijnlijk een feit. Een dergelijke situatie in wording toont figuur 17, maar dan voor de kazige-B-laag. Alle monsters vertonen de grootste krimp in het traject pF 2-pF 3. In dit traject vindt de omslag plaats van 'achterblijvende krimp' (subnormal shrinkage) naar 'inhaal-krimp' (supernormal shrinkage)



waarbij het verlies van porievolume groter is dan het verlies van watervolume, wat betekent dat lucht uit het monster wordt gedreven (Hendriks, 2004).

Figuur 18a laat nog veel interessante verschijnselen vanaf pF 3 zien, maar die zijn voor dit onderzoek minder relevant, omdat de kans klein is dat grotere pF-waarden dan 3 in veenbases in het veld optreden. Opvallend is onder meer dat de horizontale krimp van belaste en onbelaste monsters bij pF 7 nagenoeg gelijk zijn, terwijl de volumekrimp bij belaste monsters altijd groter is dan die van onbelaste. Uiteraard als gevolg van een grotere verticale krimp door belasting. Dit toont aan dat de interne krachten in het monster bij grote zuigspanning gemakkelijk het effect van verschil in belasting op horizontale krimp teniet kunnen doen.

De kazige-B-monsters van figuur 18b laten grotere verschillen tussen de monsters zien dan de gliedemonsters. Vooral Kazige-B 3 wijkt sterk af van beide andere monsters en lijkt, zeker voor het pF-traject 0-2, voor wat betreft de vorm van de krimpcurven op een tussenvorm van een gliede- en schalterveenmonster. Tot pF 2 gaat de omvang van de krimp van dit monster gelijk op met die van de gliede monsters; vanaf pF 2 blijft die omvang echter sterk achter. De eigenschappen organische-stofgehalte, volumieke massa en volumetrisch vochtgehalte bij verzadiging van dit kazige-B-monster zijn echter typisch die van een kazige-B (tabel 13). Een verklaring voor dit afwijkende gedrag is niet gevonden.

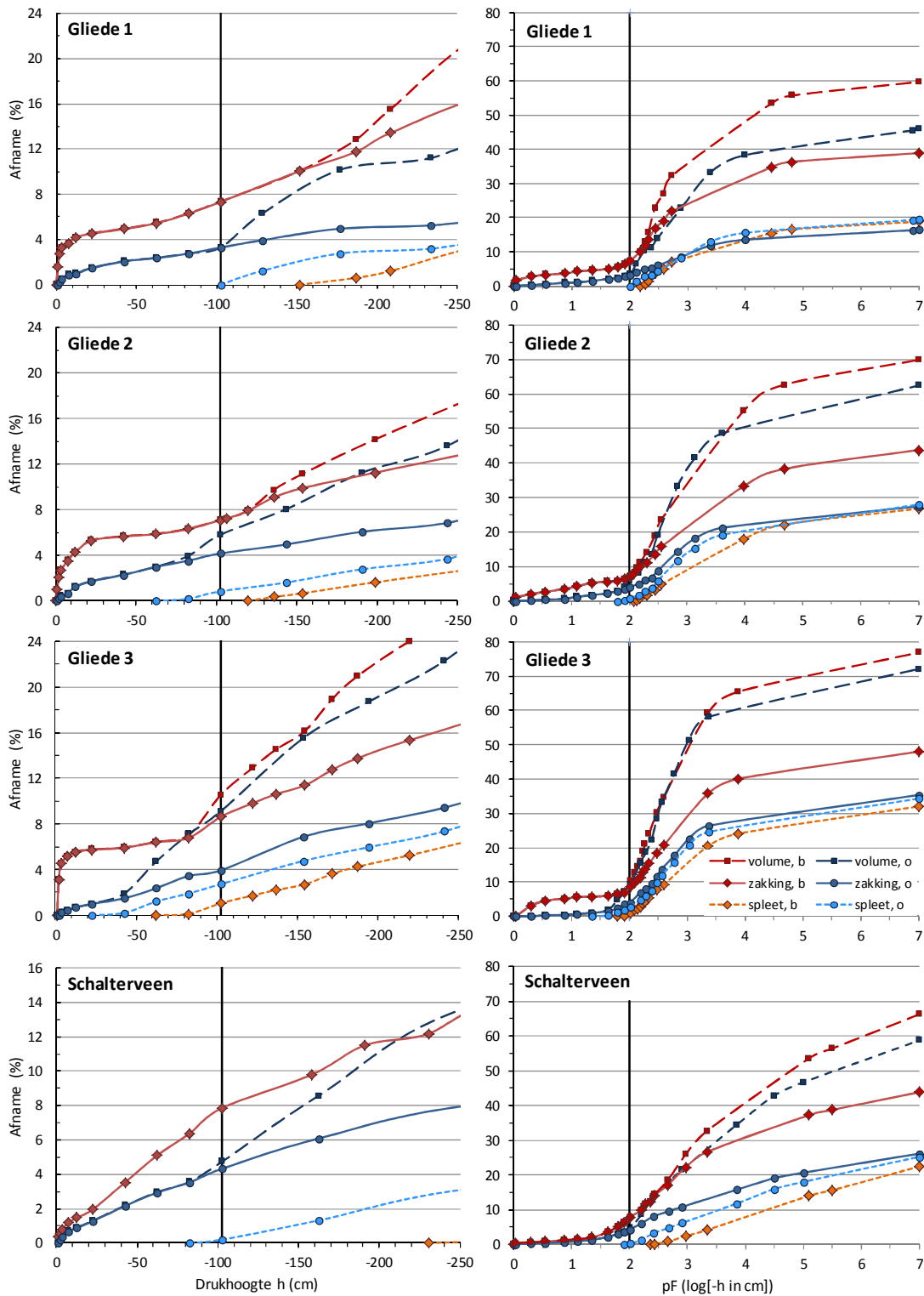
De andere twee kazige-B-monsters hebben gemeen dat hun krimp in alle vormen - volume, zakking en spleetvorming - zeer gering is. Tot pF 2 treedt slechts zeer geringe zakking van 2% bij de belaste en 1% bij de onbelaste monsters op; Kazige-B 2 krimpt dan nauwelijks meer. Alleen het onbelaste Kazige-B-1-monster krimpt horizontaal, maar pas vanaf pF 2,5 (-316 cm), ver na pF 2 dus. Op basis van deze twee monsters lijkt scheurvorming in kazige-B-monsters niet erg waarschijnlijk. Echter als Kazige-B 3 een algemeen voorkomende variant is, kan bij lage belasting geringe scheurvorming optreden. Toch kan op basis van deze resultaten worden geconcludeerd dat kazige-B-lagen een zekere bescherming tegen scheurvorming kunnen bieden aan gliedelagen bij verdroging van de veenbasis van onderaf (uitgaande van de natuurlijke positie van kazige-B-lagen onder gliedelagen).

*Tabel 13 Gemeten organische-stofgehalten, volumieke massa's, volumetrische vochtgehalten bij verzadiging en pF 2, en krimp bij pF 2 van de monsters waaraan de krimp is bepaald*

*Table 13 Measured organic matter contents and volumetric masses and volumetric moisture contents*

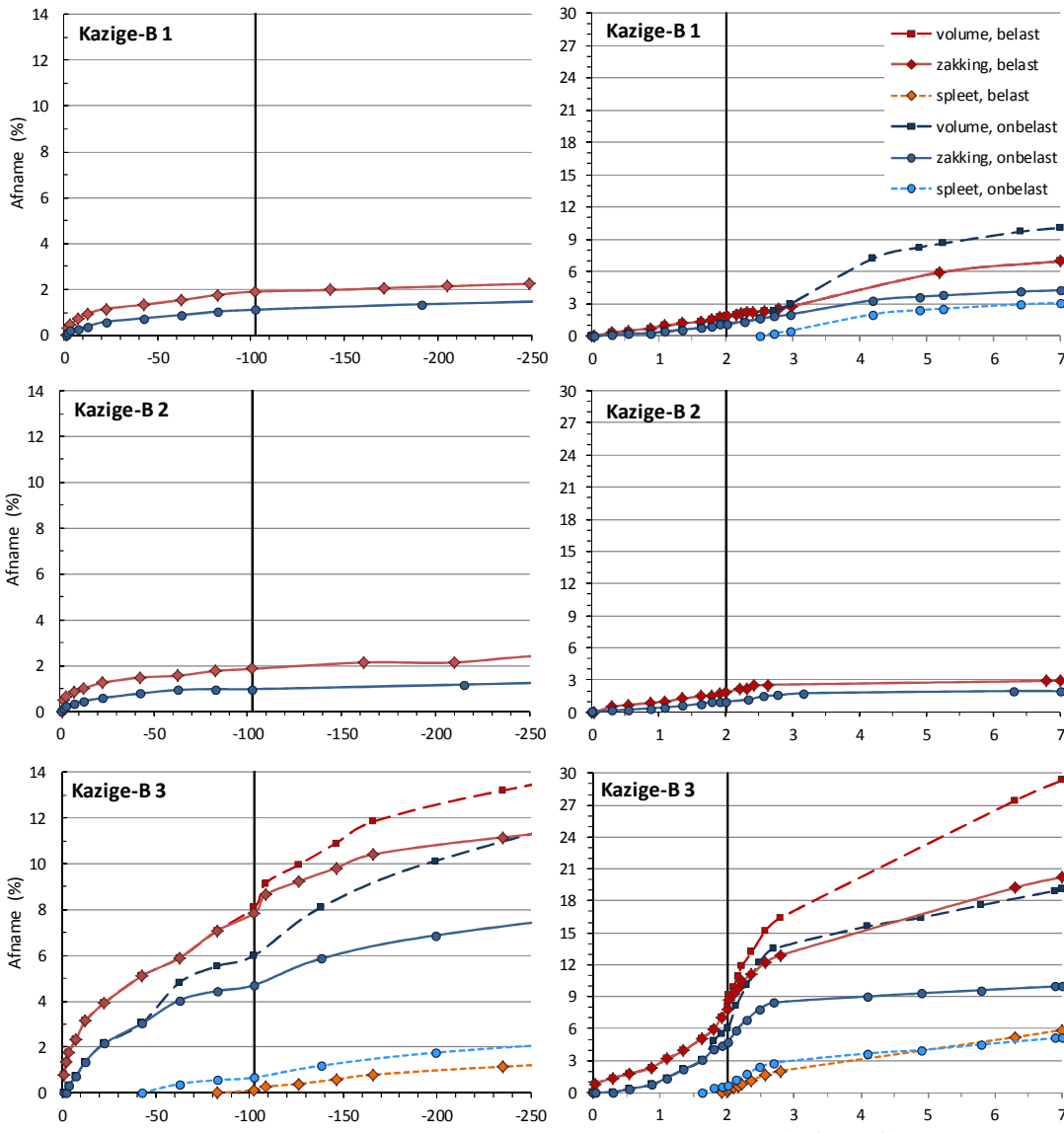
Bodem- horizont	Lo- ca- tie	Belast met 75 g/cm <sup>2</sup> ?	Organische- stofgehalte (massa-%)	Volumieke massa (kg/m <sup>3</sup> )	Volumetrisch vochtgehalte		Krimp bij pF 2		
					verzadigd (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	bij pF = 2 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )*	volume (%)	zakking (%)	spleet (%)
Schalterveen	2	ja	95,6	110	0,887	0,709	7,9	7,9	0,00
Schalterveen	2	nee	97,9	106	0,897	0,719	4,7	4,3	0,20
Gliede 1	2	ja	73,9	218	0,835	0,696	7,3	7,3	0,00
Gliede 1	2	nee	64,3	370	0,785	0,715	3,3	3,3	0,00
Gliede 2	3	ja	68,3	203	0,825	0,748	7,1	7,1	0,00
Gliede 2	3	nee	57,1	271	0,837	0,731	5,8	4,2	0,80
Gliede 3	3	ja	90,3	175	0,867	0,742	10,5	8,6	1,04
Gliede 3	3	nee	89,8	176	0,860	0,765	9,1	3,9	2,72
Kazige-B 1	2	ja	19,0	794	0,657	0,600	1,9	1,9	0,00
Kazige-B 1	2	nee	11,2	1090	0,552	0,506	1,1	1,1	0,00
Kazige-B 2	1	ja	9,8	1142	0,557	0,522	1,9	1,9	0,00
Kazige-B 2	1	nee	10,6	1078	0,584	0,547	1,0	1,0	0,00
Kazige-B 3	1	ja	10,9	913	0,570	0,501	8,1	7,9	0,13
Kazige-B 3	1	nee	9,7	992	0,564	0,464	6,0	4,7	0,68

\* t.o.v. het oorspronkelijke volume bij verzadiging



Figuur 18a Gemeten zakking en spleetvorming als percentage van de hoogte (51 mm) en de diameter (50 mm) van veenbasismonsters, en de daaruit berekende totale volumekrimp als percentage van het volume (100 cc) van de monsters, uitgezet tegen de drukhoogte  $h$ . Getoond zijn de monsters van de drie gliedelagen en van de schalterveenlaag. Het gaat steeds om een met 75 g per  $\text{cm}^2$  belast monster (b) en een onbelast duplomonster (o). Figuur 18b op de rechterpagina geeft de resultaten van de monsters uit de kazige-B-lagen. In het onderschrift van Figuur 18b staat een verdere uitleg over beide figuren.

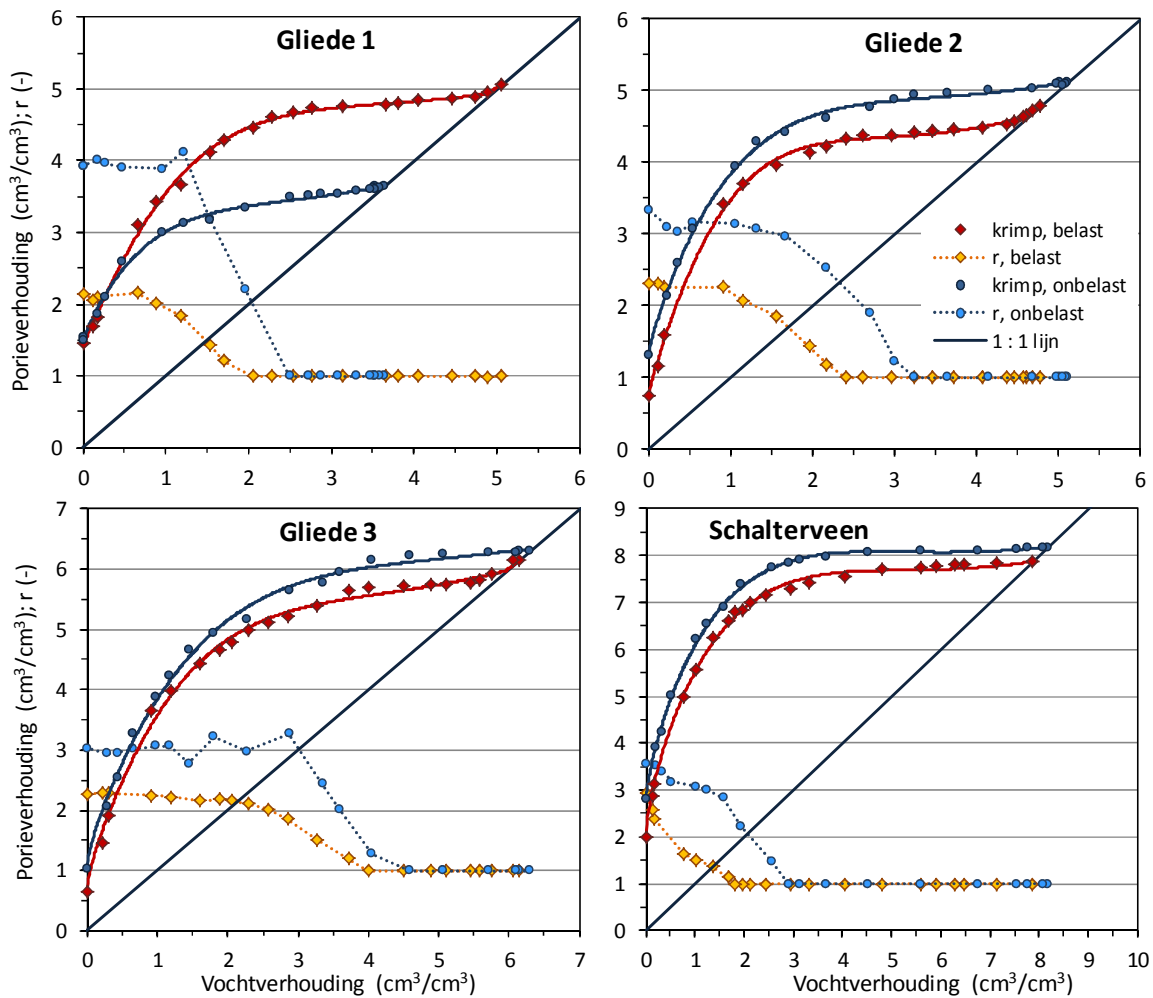
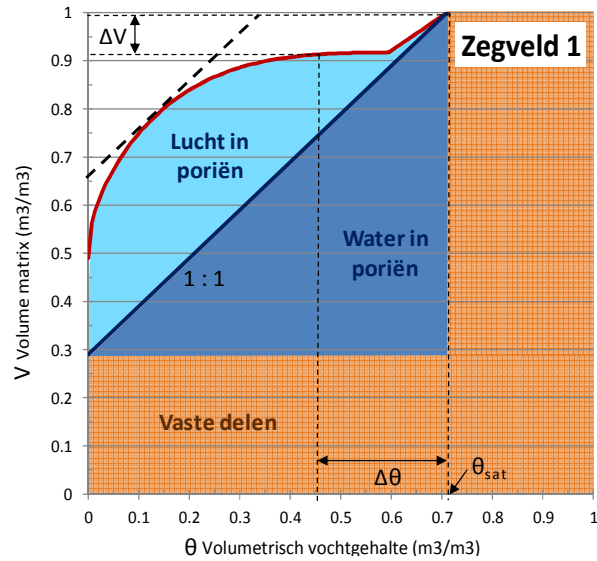
Figure 18a Measured vertical and horizontal shrinkage as a percentage of sample height and diameter of peat base samples



Figuur 18b Vervolg van Figuur 18a en het onderschrift daarvan. De getoonde resultaten van de monsters van de drie kazige-B-lagen. Het linker figuur is steeds een uitvergroting van het rechter figuur. De verticale scheidslijn in beide figuren maakt het onderscheid tussen gemeten drukhoogten  $h$  en uit het gemeten vochtgehalte afgeleide drukhoogten met de  $pF$ -curven op basis van de waarden uit tabel 10. De scheidslijn ligt bij  $h = -102,5$  cm ( $pF = 2,01$ ).  $pF$  is een maat voor de drukhoogte:  $pF 1 = -10$  cm en  $pF 2 = -100$  cm drukhoogte.

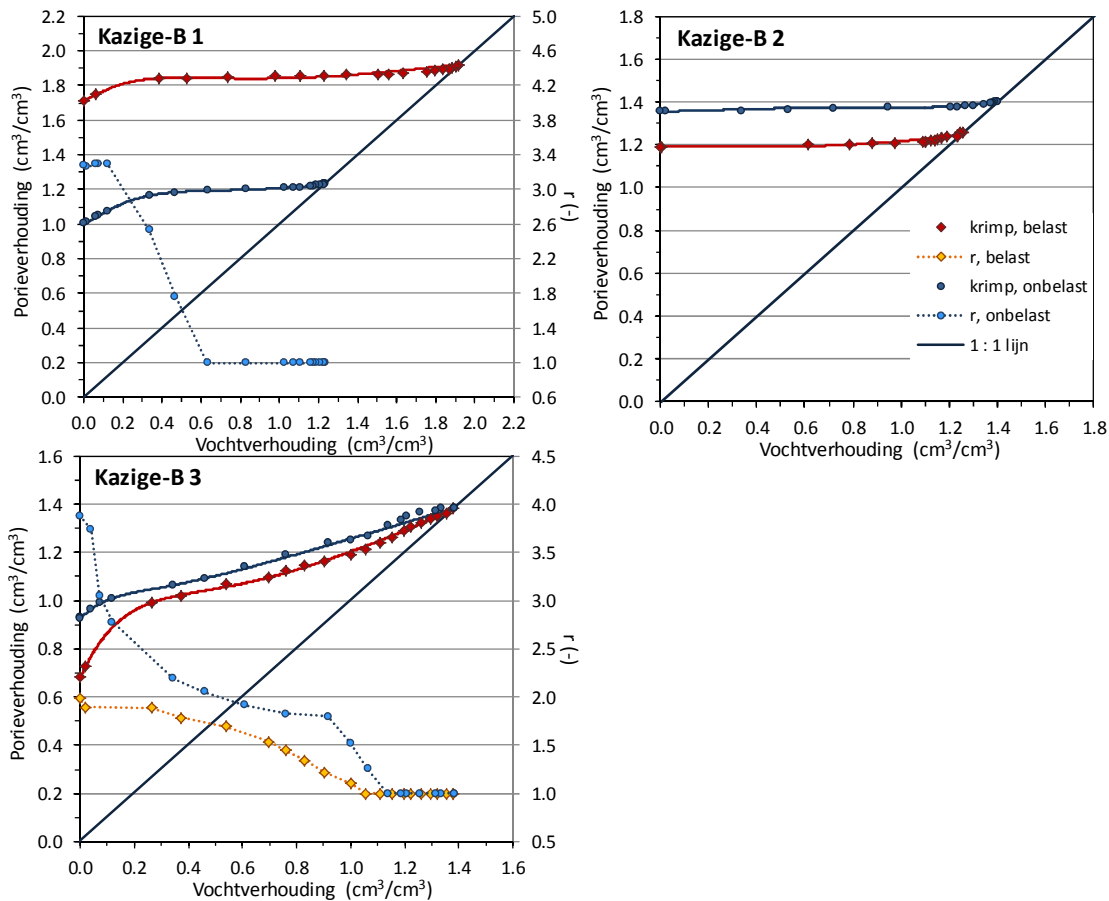
Figure 18b Continuation of Figure 18a. Samples of the layer underneath the peat base layer

Figuur 19 toont de resultaten van de volumekrimp op de meer formele manier waarbij de porieverhouding is uitgezet tegen de vochtverhouding. De porieverhouding geeft het volume poriën per volume vaste delen, de vochtverhouding het volume vocht per volume vaste delen. Om inzicht te geven in hoe deze krimpcurven kunnen worden geïnterpreteerd, is in figuur 19a bovenaan een meer schematische weergave van deze curven getoond die de verdeling geeft tussen vaste stof, water en lucht in een bodemmonster of -laag. Hierbij is het relatieve volume van de bodemmatrix uitgezet tegen het vochtgehalte  $\theta$ . Hierin is  $\Delta V$  de vermindering van het relatieve volume, de krimp dus, als gevolg van een vermindering van het bodemvocht met  $\Delta\theta$ . Het raakpunt aan de bolling van de curve van de onderbroken lijn evenwijdig aan de 1 : 1 lijn geeft het omslagpunt van *subnormal* krimp met een helling van de raaklijn  $< 45^\circ$  (rechts) naar *supernormal* krimp met een helling van de raaklijn  $> 45^\circ$ .



Figuur 19a De volumekrimp van de belaste en onbelaste gliede- en schalterveenmonsters weergegeven als de porieverhouding uitgezet tegen de vochtverhouding. Het figuur bovenaan illustreert de verdeling tussen vaste stof, water en lucht in een monster. Hierin is het relatieve volume t.o.v. volume bij verzadiging uitgezet tegen het vochtgehalte  $\theta$ .  $\Delta V$  is de volumekrimp door het vochtverlies  $\Delta\theta$ . Voor de betekenis van de onderbroken lijn evenwijdig aan de 1 : 1 lijn die de bolling van de curve raakt: zie hoofdtekst. Zie aanvullende informatie over de eigenlijke krimpfiguren het onderschrift van figuur 19b.

Figure 19a The volume shrinkage of the loaded and unloaded 'gliede' and 'schalterveen' samples



Figuur 19b De volumekrimp van de belaste en onbelaste kazige-B-monsters weergegeven als de porieverhouding uitgezet tegen de vochtverhouding. De punten zijn metingen en de lijnen zijn fits met het krimpmodel van Hendriks (2004). Ook weergegeven is de geometriefactor  $r$  als functie van de vochtverhouding (als terugschrijdend gemiddelde met periode 3). Let op de rechter y-as voor de geometriefactor. Kazige-B 1 belast en Kazige-B 2 belast en onbelast kennen alleen verticale krimp en hebben daarom geen geometriefactor.

Figure 19b The volume shrinkage of the loaded and unloaded 'kazige-B' samples

Bij verzadiging zijn vochtverhouding  $\vartheta_{sat}$  en porieverhouding  $e_{sat}$  gelijk en hebben de volgende relatie met het volumetische vochtgehalte  $\theta_{sat}$  bij verzadiging:

$$\vartheta_{sat} = e_{sat} = \frac{\theta_{sat}}{1 - \theta_{sat}} \quad (2)$$

Deze vergelijking geeft aan dat naarmate  $\theta_{sat}$  groter wordt  $\vartheta_{sat}$  onevenredig sterk toeneemt en dat vanaf  $\theta_{sat}$  is ongeveer 0,7  $\vartheta_{sat}$  exponentieel stijgt. Het gevolg is dat een relatief klein verschil in verzadigd vochtgehalte tussen de duplomonsters met en zonder belasting al een ander startpunt op de verzadigingslijn (1 : 1 lijn) van de krimp karakteristiek geeft. De extreemste voorbeelden zijn Gliede 1, Kazige-B 1 en 2. Dit moet in gedachten worden gehouden bij het interpreteren van de krimpcurven. Zie tabel 13 voor de  $\theta_{sat}$ 's van de duplo's.

In de krimpcurven is ook het verloop van de geometriefactor  $r$  met de vochtverhouding opgenomen. Deze factor geeft de verhouding tussen verticale krimp en horizontale krimp. Bij  $r = 3$  is de krimp isotroop en zijn verticale en horizontale krimp gelijk; bij  $r = 1$  treedt alleen zakking op. Het verloop van  $r$  met het vochtgehalte weerspiegelt het verloop van de spleetvorming met de drukhoogte van figuur 18. Omdat de metingen, vooral van de

horizontale krimp door meten van de spleten, niet precies genoeg waren, ontstond er bij de zeer gevoelige berekeningen van  $r$  veel en relatief grote ruis. Daarom is het terugschrijdend gemiddelde met periode 3, beginnend bij volledige uitdroging, weergegeven als schatter van  $r$ .

Het fitten van het krimpmodel van Hendriks (2014) op de gemeten curven van volumekrimp gaf goede resultaten wat extra vertrouwen schept in de meetresultaten (zie voor parameters van deze fits verder Bijlage 5). Dat was in zoverre nodig, dat het vooral aan het begin van de metingen moeilijk was om de kleine veranderingen in zakking en spleet nauwkeurig te meten. De gliedemonsters en het schalterveenmonster vertonen een krimpvorm die lijkt op die van laagveenmonsters, maar die extremer is in de uitersten: het stadium van 'achterblijvende krimp' vanaf verzadiging verloopt veel vlakker (meer horizontaal) en het daaropvolgende stadium van 'inhaal krimp' verloopt veel steiler dan bij het doorsnee laagveenmonster (voorbeelden o.a. in Hendriks, 2014). De betekenis hiervan is dat er in het beginstadium van de krimp vanaf verzadiging relatief weinig gebeurt bij de gliedemonsters en vooral bij het schalterveenmonster, maar dat die achterstand wel weer wordt ingehaald. Dit geldt voor de belaste en onbelaste monsters. Opvallend is verder dat alleen de belaste gliedemonsters aan het begin van de uitdroging duidelijk het stadium van 'near normal' krimp – krimp die dicht bij de verzadigingslijn blijft – laat zien dat typisch is voor laagveenmonsters.

Bij de monsters Kazige-B 1 en 2 loopt de rechte lijn van de krimp zeer vlak: de monsters krimpen nauwelijks. De krimplijn van Kazige-B 3 is ook voor het grootste deel van het uitdrogingstraject recht, maar loopt wel onder een hoek van circa 15 graden met de horizontaal wat duidt op volumeverlies van relevante betekenis.

De geometriefactor  $r$  van de belaste monsters blijft relatief langer op de waarde 1 (alleen verticale krimp) liggen dan die van de onbelaste monsters. Aan het einde van het uitdrogingstraject bereikt  $r$  van de belaste monsters een waarde van 2-2,5: zakking overheerst in het hele krimptraject van belaste monsters ( $r = 3$  wordt immers niet bereikt). De onbelaste monsters beginnen ook met een  $r$  van 1, maar komen al ruim voor het einde van het krimptraject op een waarde van 3 en eindigen meestal zelfs hoger op waarden van 3,5-4. Bij  $r > 3$  overheersen horizontale krimp en scheurvorming.

De drie grote onbelaste monsters van gliede, kazige-B en de overgangslaag hiertussen, met een hoogte van 10 cm en een doorsnede van 19 cm, die tot luchtdroog waren uitgedroogd door verdamping in het laboratorium, vertoonden geen enkel spoor van scheurvorming. Alle horizontale krimp kwam tot uiting in de vorm van spleetvorming. Dit is geen hard bewijs dat scheurvorming plaatsvindt op het niveau van bodempolygonen van minstens 19 cm in doorsnede. Het is hooguit een aanwijzing. In het veld zal een uitdrogende laag scheuren op de zwakste plekken. In het verleden volledig drooggevallen plekken die daardoor scheurden, blijven dan altijd zwakke plekken waarop scheurvorming zal aangrijpen bij eventuele geringe uitdroging van de laag.

De formule voor de scheurbreedte  $w_s$  gegeven de relatieve horizontale krimp  $V_h$  en de polygoondiameter  $d_{pol}$  (scheurafstand) is:

$$w_s = d_{pol} \left( 1 - \sqrt{1 - V_h} \right) \quad (3)$$

Bij een horizontale krimp van 1% en een polygoondiameter van 19 cm is de scheurbreedte 1 mm terwijl die bij een diameter van 10 cm 0,5 mm is. De ondergrens van de breedte van een macroporie – porie waarin capillairekrachten niet meer werken – is 0,1 mm. Beide voorbeeldscheuren zijn dus macroporiën en vergroten daarmee de waterdoorlatendheid enorm. Voor de doorlatendheid van lucht zijn kleinere haarscheurtjes nog van belang. Als de scheurbreedte er minder toe doet dan de scheurdichtheid per eenheid van oppervlakte is een grotere polygoondiameter van  $d1$  cm mogelijk minder bedreigend in termen van lekkage van

water en atmosferische luchtzuurstof dan een kleinere diameter van  $d_2$  cm. Hun verhouding in scheurdichtheid  $D_1 : D_2$  bedraagt dan  $4/d_1 : 4/d_2 = d_2 : d_1$ . In dit voorbeeld dus 0,53.

#### 4.2.4 Afbraaksnelheden

De afbraaksnelheden van tabel 14 laten de laagste waarden zien voor de gliedelagen, gevolgd door de kazige-B-lagen. De B-horizonten hebben de hoogste waarden, bij 16 °C bijna twee keer zo hoog als die van de kazige-B-monsters. Het C-horizontmonster heeft een afbraaksnelheid tussen die van B-horizont en kazige-B in. Deze twee minerale lagen, B- en C-horizont, kunnen als bescherming voor de veenbasislagen dienen door zuurstof en de alternatieve electronenacceptoren nitraat en sulfaat af te vangen bij aanreiking daarvan van onderaf. De afbraaksnelheden van de veenbasislagen gliede en kazige-B zijn duidelijk lager dan die van humus in de bodem en eutroof laagveen die 0,01-0,02 per jaar bedragen bij 10-20 °C (Vermeulen en Hendriks, 1997). En voor de gliedelagen ook lager dan die van niet-veraard veenmosveen in Friese laagveengebieden (halfwaardetijd bij 10 °C 150-200 jaar; Vermeulen en Hendriks, 1997). De verklaring voor deze relatief lage waarden moet worden gezocht in de ontstaanswijze van gliedelagen en in mindere mate kazige-B-lagen waarbij amorfe, fijn verdeelde of disperse organische stof inspoelt in de poriën van minerale lagen. Deze organische stof ontstaat bij anaerobe afbraak van veen (Sevink et al., 2014) en zal daardoor een relatief groot aandeel meer resistente organische verbindingen bevatten.

*Tabel 14 Gemeten aerobe afbraaksnelheden van de bodemorganischestof van drie bodemhorizonten als eerste-orde-snelheidsconstanten bij twee temperaturen en de daaruit berekende  $Q_{10}$  voor temperatuurinvloed. In vet gedrukt de gemiddelden van de bodemhorizont daarboven.*

*Table 14 Measured aerobic degradation rates of the soil organic matter of three soil horizons*

Bodem-horizont	Lo-atie	Org.stof-gehalte (massa-%)	Volumieke massa (kg/m <sup>3</sup> )	1 <sup>e</sup> -orde-afbraaksnelheidsconstante (1/ jaar)				Halfwaar- <sup>1)</sup> detijd (jaar)	$Q_{10}$ (-)
				Temperatuur 21 °C			T 16 °C		
				1 <sup>e</sup> meting	2 <sup>e</sup> meting	gemiddeld			
Gliede	1	31,6	1077	0,0059	0,0041	0,0050	-	504	-
Gliede	3	93,1	128	0,0126	0,0129	0,0128	0,00744	178	2,9
Gliede	3	87,5	205	0,0068	0,0065	0,0067	0,00356	414	3,5
Gliede	2	72,4	226	0,0102	0,0106	0,0104	0,00405	533	6,6
<b>Gemiddeld</b>		<b>71,2</b>	<b>409</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0085</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,00502</b>	<b>407</b>	<b>3,9<sup>2)</sup></b>
Kazige-B	1	11,7	1232	0,0170	0,0155	0,0163	-	100	-
Kazige-B	1	14,6	947	0,0085	0,0091	0,0088	0,00568	206	2,4
Kazige-B	1	11,7	1059	0,0089	0,0091	0,0090	0,00642	162	2,0
<b>Gemiddeld</b>		<b>12,7</b>	<b>1079</b>	<b>0,0115</b>	<b>0,0112</b>	<b>0,0114</b>	<b>0,00605</b>	<b>156</b>	<b>2,2<sup>2)</sup></b>
B-horizont	1	5,3	1442	0,0131	0,0109	0,0120	-	157	-
B-horizont	1	5,0	1497	0,0118	0,0156	0,0137	0,00999	101	1,9
B-horizont	1	5,8	1482	0,0096	0,0115	0,0106	0,00771	131	1,9
B-horizont	3	3,6	1512	0,0292	0,0265	0,0278	0,01493	98	3,5
B-horizont	3	4,0	1444	0,0209	0,0198	0,0204	0,01234	102	2,7
<b>Gemiddeld</b>		<b>4,6</b>	<b>1484</b>	<b>0,0179</b>	<b>0,0184</b>	<b>0,0181</b>	<b>0,01124</b>	<b>108</b>	<b>2,6<sup>2)</sup></b>
C-horizont	1	1,9	1692	0,0192	0,0078	0,0135	-	172	-

<sup>1)</sup> bij 10 °C, omgerekend met  $Q_{10}$ 's van eigen monster, of met gemiddelde  $Q_{10}$  van betreffende bodemhorizont

<sup>2)</sup> berekend op basis van de gemiddelden van de monsters met een meting bij zowel 21 °C als 16 °C

Uit de metingen bij verschillende temperaturen zijn de  $Q_{10}$ 's van tabel 14 berekend.  $Q_{10}$  is de factor waarmee de snelheid van het afbraakproces toeneemt bij 10 °C temperatuurstijging.  $Q_{10}$ 's zijn belangrijke substraateigenschappen bij dynamisch modelleren van organische-stofafbraak in het veld. De gevonden  $Q_{10}$ 's zijn aan de lage kant; vooral die van de kazige-B-lagen. Meestal worden voor de bodemorganischestof waarden rond 3 gevonden. Vermeulen en Hendriks (1997) maten aan ongestoorde laagveenmonsters waarden tussen 2,4 en 4,7.

Onrealistisch lijken de lage waarden daarmee niet. De waarde van 6,6 in tabel 14 is onwaarschijnlijk hoog en lijkt veroorzaakt door de meting bij 16 °C aangezien de herhalingen bij 21 °C nagenoeg gelijk zijn. Een verklaring voor deze hoge waarde, of feitelijk voor de relatief lage afbraaksnelheid bij 16 °C, is niet gevonden.

*Tabel 15 Gemeten anaerobe afbraaksnelheden van de bodemorganischestof van drie bodemhorizonten als eerste-orde-snelheidsconstanten K bij afbraak onder invloed van alternatieve electronenacceptoren nitraat en sulfaat, en de verhouding hier tussen en met de waarden van aerobe afbraak van tabel 14*  
*Table 15 Measured anaerobic degradation rates of the soil organic matter of three soil horizons*

Electronen-acceptor X	Bodem-horizont	Loca-tie	Org.stofgehalte (massa-%)	Vol. massa (kg/m <sup>3</sup> )	K (1/jaar)	Halfwaardetijd (jaar)	Verhoudingen	
							X : aeroob <sup>1)</sup>	sulfaat : nitraat
Nitraat	gliede	3	167	89,2	0,00622	111	0,64	
	gliede	3	155	92,2	0,00635	109	0,65	
	<b>gemiddeld</b>		<b>161</b>	<b>90,7</b>	<b>0,00629</b>	<b>110</b>	<b>0,65</b>	
	kazige B	1	1289	7,8	0,00665	104	0,70	
	kazige B	1	1319	7,5	0,00594	117	0,65	
	<b>gemiddeld</b>		<b>1304</b>	<b>7,7</b>	<b>0,00630</b>	<b>111</b>	<b>0,68</b>	
	B-horizont	3	1372	3,5	0,00778	89	0,57	
	B-horizont	3	1380	4,1	0,00701	99	0,52	
	<b>gemiddeld</b>		<b>1376</b>	<b>3,8</b>	<b>0,00740</b>	<b>94</b>	<b>0,55</b>	
	Sulfaat	gliede	3	147	94,0	0,00270	257	0,28
gliede		3	151	93,0	0,00316	219	0,33	0,50
<b>gemiddeld</b>			<b>149</b>	<b>93,5</b>	<b>0,00293</b>	<b>238</b>	<b>0,31</b>	<b>0,47</b>
kazige B		1	1372	6,5	0,00101	688	0,11	0,15
kazige B		1	1380	6,4	0,00094	737	0,10	0,16
<b>gemiddeld</b>			<b>1376</b>	<b>9,8</b>	<b>0,00098</b>	<b>713</b>	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>
B-horizont		3	1478	4,6	0,00000	∞	0,00	0,00
B-horizont		3	1536	3,5	0,00059	1180	0,04	0,08
<b>gemiddeld</b>			<b>1507</b>	<b>5,0</b>	<b>0,00030</b>	<b>2350</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>

<sup>1)</sup> gemiddelde van aeroob bij 21 °C van tabel 14

Tabel 15 geeft de anaerobe afbraaksnelheden van de organische stof bij beschikbaarheid van nitraat en sulfaat als alternatieve electronenacceptoren. Bij nitraat bedragen de waarden voor de veenbasislagen gliede en kazige-B 65-70% van de waarden van de aerobe afbraaksnelheid bij 21 °C. Bij de B-horizont is dit percentage 55.

Sulfaat laat duidelijk veel lagere waarden zien die slechts 30%, 10% en 2% van de aerobe afbraaksnelheden bedragen voor respectievelijk gliede, kazige-B en B-horizont. Opvallend bij sulfaat is het grote verschil tussen de bodemlagen. Dit komt ook tot uitdrukking in de verhouding tussen de afbraaksnelheden bij nitraat en bij sulfaat die in de genoemde volgorde van de drie bodemlagen afloopt van 45% naar 20% tot 4%. De organische stof van de B-horizont geeft dus nauwelijks bescherming aan de kazige-B-laag tegen afbraak door sulfaat, maar de organische stof van de kazige-B-laag zal zelf ook relatief langzaam door sulfaat worden aangetast.

De verschillen tussen de lagen onderling zijn wellicht niet volledig toe te schrijven aan verschillen in kwaliteit van de organische stof, maar ook het gevolg van de diffusiecapaciteit voor nitraat en sulfaat van de bodemlagen. De metingen zijn verricht aan ongestoorde monsters zonder ring. Het is niet duidelijk welke bodems de grootste diffusiecapaciteit voor nitraat en sulfaat hebben. De gemeten afbraaksnelheden zijn daarom actueel voor de structuur van de bodemlagen.



Dat de afbraaksnelheid onder invloed van nitraat groter is dan die onder invloed van sulfaat is in overeenstemming met de volgorde in sterkte van de electronenacceptoren in de bodem waarbij nitraat direct onder zuurstof staat en sulfaat vijf plaatsen onder nitraat. Mangaan en ijzer, die hoger staan in de volgorde van sterkte dan sulfaat, komen in het veenbasissubstraat in te geringe hoeveelheden voor om van betekenis te zijn (Sevink et al., 2014). Volgens Sevink et al. (2014) zal de anaerobe microbiële afbraak vooral bepaald worden door de concentraties van nitraat en sulfaat, die sterk samenhangen met de mate van vermessing van het oppervlakkige grondwater. Voor het onderzoek betekent dit dat nitraat en in mindere mate en blijkbaar niet voor alle vormen van organische stof ook sulfaat de potentie hebben om de organische stof van de veenbasis aan te tasten en af te breken. De afbraaksnelheid doet daarbij niet veel onder voor die met zuurstof. Waar het in de praktijk echter om gaat, is niet de processnelheid maar de beschikbaarheid van nitraat en/of sulfaat. Hoogstwaarschijnlijk is die nog meer beperkend dan in eutrofe landbouwkundig gebruikte laagveengronden waar de toch forse denitrificatie en sulfaatreductie nauwelijks bijdragen aan de bodemdaling door veenafbraak (Hendriks en Van den Akker, 2012, bijlage A).

In 4.3.4 wordt met modelberekeningen onderzocht wat onder realistische omstandigheden en in een 'worst case' de bijdragen kunnen zijn van nitraat en sulfaat aan de afbraak van de organische stof van de veenbasis.

## **4.3 Modelberekeningen**

In deze paragraaf worden de resultaten van de modelberekeningen gegeven. In 4.3.1 de kalibratie van SWAP tegen gemeten grondwaterstanden en stijghoogten, in 4.3.2 de analyse van de meetperiode, in 4.3.3 een scenario-analyse naar het functioneren en de bedreiging van de veenbasis afhankelijk van eigenschappen en randvoorwaarden van het veenpakket-veenbasis-systeem en 4.3.4 tenslotte, de analyse van de kans op aerobe en anaerobe afbraak van de veenbasis.

### **4.3.1 Kalibratie van SWAP tegen gemeten grondwaterstanden**

Model SWAP is gekalibreerd tegen de freatische grondwaterstanden in het veen op basis van de gemeten stijghoogten in het zand van meetbuizen B en C (zie figuur 11). De profielopbouw met de onderscheiden bodemhorizonten en de daaruit afgeleide modelhorizonten van deze locaties zijn opgenomen in tabel 16. De kalibratie en verdere berekeningen zijn gedaan met de aangepaste versie van SWAP zoals beschreven in paragraaf 2.3. In deze paragraaf zijn ook de waarden van de belangrijkste modelparameters en randvoorwaarden gegeven, en de bronnen waarvan ze zijn verkregen. Naast neerslag en verdamping van weerstation Heino zijn de gemeten stijghoogten de belangrijkste randvoorwaarden. De gekalibreerde parameters waren die waarvan de waarden niet (goed genoeg) bekend waren. Ze zijn opgesomd in tabel 17.

Tabel 16 Beschrijving van de bodemhorizonten op locaties B en C en de daaruit afgeleide modelhorizonten voor de berekeningen met model SWAP. De veenbasislagen zijn vet gedrukt.

Table 16 Description of the soil horizons at locations B and C

Locatie	Bodemhorizonten				Modelhorizonten		
	begin (cm)	eind (cm)	code	omschrijving	nummer	begin (cm)	eind (cm)
Buis B	0	6	1AC	verweerd veen	1	0	6
	6	50	1Cr1	gereduceerd veen	2	6	50
	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>1Cr2</b>	<b>schalterveen zeer dicht</b>	<b>3</b>	<b>50</b>	<b>55</b>
	<b>55</b>	<b>65</b>	<b>1Cr3</b>	<b>gliede</b>	<b>4</b>	<b>55</b>	<b>65</b>
	<b>65</b>	<b>80</b>	<b>2Bh</b>	<b>kazige-B</b>	<b>5</b>	<b>65</b>	<b>80</b>
	80	90	2Bhs	B met ijzerinspoeling	6	80	90
	90	190	2Ce	C zandondergrond	7	90	120
	190	240	2Cr	C zandondergrond	8	120	240
Buis C	0	6	1AC	iets veraard veen	1	0	
	6	12	1CW1	idem, wat compact	1		12
	12	26	1Cr1	oranje-bruin jong veen	2	12	26
	26	50	1Cw2	donkerroodbruin deels veraard veen	2	26	50
	<b>50</b>	<b>65</b>	<b>1Cr2</b>	<b>schalterveen, zeer dicht</b>	<b>3</b>	<b>50</b>	<b>65</b>
	<b>65</b>	<b>75</b>	<b>1Cr3</b>	<b>gliede</b>	<b>4</b>	<b>65</b>	<b>75</b>
	<b>75</b>	<b>85</b>	<b>2Bh</b>	<b>kazige-B</b>	<b>5</b>	<b>75</b>	<b>85</b>
	85	95	2Bhs	B met ijzerinspoeling	6	85	95
	95	120	2BCg	overgang B-C	7	95	120
	120	190	2Ce	C zandondergrond	8	120	
	190	240	2Cr	C zandondergrond	8		240

De simulatie van en kalibratie op de grondwaterstanden van locatie B vormden de 'hoofdkalibratie'. Buis B staat op de plek waarop de meeste metingen en bemonsteringen zijn verricht. Meetgegevens van bodemfysische grootheden vertegenwoordigden daarom vooral de situatie van locatie B. Locatie C is als een vorm van validatie gekozen om te toetsen of de parametrisatie van buis B gebruikt kon worden voor deze buis. Buis C was interessant vanwege een iets andere bodemopbouw en door een hoger en vlakker verloop van de veengrondwaterstand. Maar ook de hogere plek in de raai buizen gecombineerd met een ligging in een lokale depressie was interessant. De gekalibreerde parameterwaarden van locatie B voldeden niet volledig voor locatie C waardoor de beoogde validatie meer een kalibratie was.

Tabel 17 Waarden van de gekalibreerde SWAP-parameters en van de statistische maten

Table 17 Values of the calibrated SWAP parameters and statistics

Locatie	Hysteresis parameters						POND MX	COFINTFLB	MAE	RMSE
	ALFAW 1	ALFAW 2	ALFAW 3	ALFAW 4	SWHYST	TAU				
	(1/cm)	(1/cm)	(1/cm)	(1/cm)	(-)	(cm)	(cm)	(cm/d)	(cm)	(cm)
Buis B	0,35	0,080	0,1016	0,1006	2	0,2	0,2	0,08	2,9	4,6
Buis C	0,40	0,108	0,1016	0,1006	2	0,2	10	0,04	3,3	4,8
ALFAW 1	parameter $\alpha$ in de wetting curve van de MvG-vergelijking; 1= bovenste horizont, 2 = tweede horizont enz.									
SWHYST	optie voor vorm van hysteresis; 2 = initiële conditie is uitdroging									
TAU	minimale drukhoogteverschil voor omschakeling van uitdroging naar vernatting en vice versa									
POND MX	drempel voor optreden van runoff (oppervlakte afstroming)									
COFINTFLB	coëfficiënt voor interflow in cm/d omdat de exponent 1 is									
MAE	Mean Absolute Error, afwijking tussen gemeten en berekende grondwaterstand op dagbasis									
RMSE	Root Mean Squared Error, afwijking tussen gemeten en berekende grondwaterstand op dagbasis									

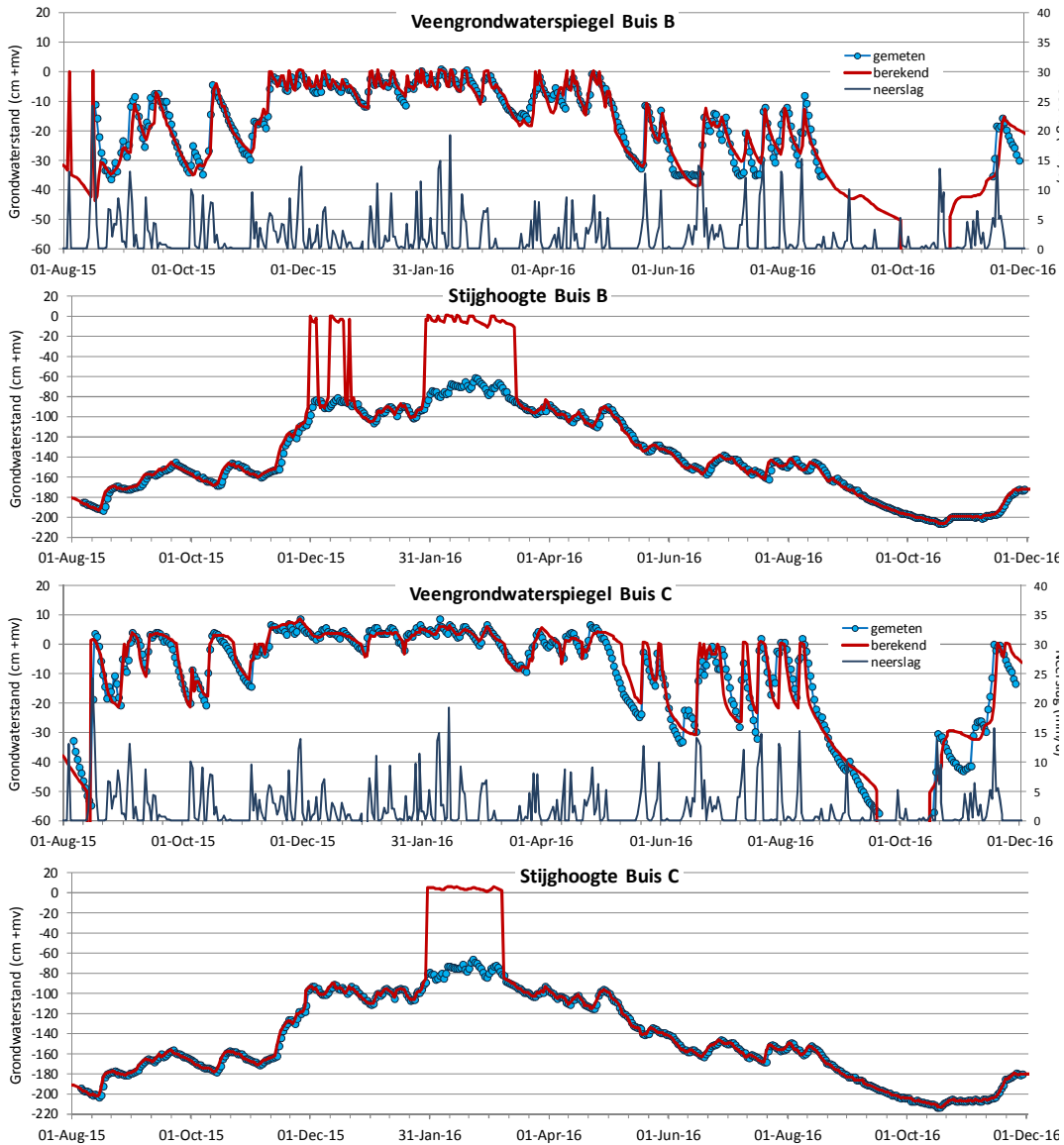
De waarden van de gekalibreerde parameters en statistische resultaten van de kalibratie zijn opgenomen in tabel 17. De resultaten van de kalibratie als tijddiagrammen van freatische grondwaterstanden in het veen en stijghoogten in het zand zijn gegeven in figuur 20. De stijghoogten zijn gegeven om aan te tonen dat SWAP de als invoer opgelegde drukhoogten onder in het modelprofiel (op de diepte van het filter van de potentiaalbuï) vertaald in een stijghoogte die door de geringe verticale weerstand van het zand overeenkomt met een grondwaterstand in het zand. Voor SWAP is dit de 'echte grondwaterstand'.<sup>1</sup> De grondwaterstand in het veen is de 'schijngrondwaterstand' van het schijngrondwaterlichaam boven de veenbasis dat van het 'echte grondwater' wordt gescheiden door een onverzadigde laag die in de tijd fluctueert in dikte afhankelijk van vooral de stijghoogte. Op het moment dat de grondwaterstand in het zand het schijngrondwaterlichaam in het (de) veen(basis) raakt, vloeien beide grondwaterlichamen samen en is er, voor SWAP, alleen nog maar 'echt grondwater'. In het figuur zijn dat de momenten waarop de rode lijn van de gesimuleerde stijghoogten omhoog schieten naar de veengrondwaterstanden. De veengrondwaterstanden zijn dan de echte freatische grondwaterstanden geworden. De onderbreking van de gemeten freatische waterstanden in het najaar van 2016 markeren de periode met grondwaterstanden beneden het filter van de grondwaterstandbuïzen.

SWAP kon de gemeten freatische grondwaterstanden zeer bevredigend simuleren. De MAE (mean absolute error) en RMSE (root mean squared error) zijn laag wat een gemiddeld geringe afwijking tussen gemeten en berekende waarden betekent. Toch zijn de simulaties niet perfect omdat belangrijke aspecten van de waterhuishouding van de lokaties niet of niet in detail bekend waren. Hiervoor zijn aannamen gedaan. Ook de neerslag van de lokatie was niet bekend. Simulaties met de neerslag van weerstation Heino waren veel beter (in timing) dan die met de neerslag van neerslagstation Hellendoorn dat dichterbij is gelegen. Soms gold het omgekeerde. Dan is de neerslag van Hellendoorn gebruikt.

Het goede resultaat is pas bereikt na inbrengen van bepaalde processen in SWAP. Voor enkele hiervan moest SWAP worden uitgebreid met nieuwe processen (interflow uit schijngrondwaterlichaam). Voor beide buïlokaties was het nodig om een zeer ondiepe laterale afvoercomponent (interflow) door de top van de veenbodem op te nemen. Deze draineert de toppen van de grondwaterstand tijdens intensieve en/of langdurige neerslagmomenten. Voor buï B was daarnaast ook nog de standaard oppervlakteafstroming (runoff) noodzakelijk. Bij buï C juist niet; daar was het omgekeerde verschijnsel nodig: runoff, tijdelijke aanvoer van water uit de directe omgeving tijdens heftige neerslag. Ook was hier een variabele drainagebasis voor de interflow nodig. Beide verschijnselen kunnen worden verklaard uit de geringe, lokale depressie die bij hevige neerslag kortstondig werd gevoed door uit de directe omgeving af- en uitstromend water.

---

<sup>1</sup> In de tekst bij figuur 16 is uitgelegd dat in de situatie met opgesloten lucht onder de veenbasis de stijghoogte en de grondwaterstand in de zandondergrond niet samenvallen; de werkelijke grondwaterstand is dan lager door de luchtdruk. SWAP neemt deze luchtdruk niet mee en berekent daardoor een grondwaterstand die samenvalt met de stijghoogte. Voor het potentiaalverschil tussen veengrondwaterstand en stijghoogte als aandrijver van de wegzijging maakt dat niet uit: SWAP berekent die correct. Het maakt wel uit voor de doorlatendheid van het bovenste deel van het zandpakket direct onder de veenbasis dat in werkelijkheid niet helemaal verzadigd was, maar door SWAP wel zo wordt beschouwd. SWAP neemt daarvoor de verzadigde doorlatendheid terwijl de werkelijke doorlatendheid die was bij de heersende hydrostatische druk. Deze is lager dan de verzadigde. In het ergste geval toen de stijghoogte zijn top had bereikt, was dit verschil in de hier beschreven situatie een 8% onderschatting van de weerstand en overschatting van de wegzijging; gemiddeld voor de natte periode zal dat hooguit de helft zijn geweest.



*Figuur 20 Gemeten en berekende grondwaterstanden in het veen en in het onder de veenbasis liggende zandpakket (stijghoogte) bij de locaties Buis B en Buis C, en de in de modellering gebruikte neerslag. De onderkant van de veenbasis van Buis B ligt op 80 cm -mv en die van Buis C op 85 cm -mv. De perioden in de metingen zonder waarden geven drooggevallen grondwaterstandbuizen in het veen aan. De grondwaterstand is dan dieper dan deze waarden.*  
*Figure 20 Measured and calculated groundwater levels in the peat layer and the head in the sand layer*

Voor de realistische modelresultaten waren de gemeten zeer lage doorlatendheden bij verzadiging van de veenbasislagen noodzakelijk. De verticale weerstanden van de veenbasis bedroegen voor locatie B (30 cm dikke veenbasis) 1857 dagen op basis van de gemiddelde waarden van verzadigde doorlatendheid van schalterveen, gliede en kazige-B van tabel 12 en voor locatie C (35 cm dikke veenbasis) 4580 dagen op basis van de laagste waarden van de doorlatendheden. Daarnaast bleek een ander belangrijk proces te moeten worden opgenomen in de modellering: hysteresis. Hysteresis is het verschijnsel dat de teruggaande weg anders verloopt dan de heengaande. In de onverzadigde-zone-hydrologie betekent dit dat het waterhoudendvermogen van de bodem dat voor uitdroging

bestond bij een bepaalde drukhoogte (zuigspanning) bij vernatting weer pas kan worden bereikt bij een (veel) grotere drukhoogte. Voor het veen kan dit worden verklaard uit ingesloten lucht, gasvorming zoals koolzuurgas en methaan, reversibele krimp en (tijdelijk) hydrofoob worden van het drogere veen. Hysteresis is een standaardoptie van SWAP.

De betreffende parameters voor hysteresis zijn gekalibreerd en opgenomen in tabel 17. Het gaat om de bovenste vier horizonten (tabel 16). De functie van de hysteresis in de twee veenbasislagen schalterveen en gliede was vooral om het water in het veen hoog te houden. Met hysteresis bleken de grondwaterstanden in de simulaties met SWAP met (veel) hogere doorlatendheden van de veenbasis toch hoog boven de veenbasis gehouden te kunnen worden. De functie van de hysteresis in de twee bovenste horizonten was vooral om de sterke toppigheid die SWAP simuleerde af te vlakken. Het zaagtandpatroon van de grondwaterstanden in de natte tijden van winter 2015-2016 aan de bovenkant van het veenpakket bij vooral locatie B bleek alleen goed te kunnen worden gesimuleerd met hysteresis.

#### 4.3.2 Analyse van de meetperiode

Met het gekalibreerde model is voor locatie B en deels locatie C een analyse gemaakt van het veenpakket-veenbasis-systeem. Het gaat om de waterbalansen van deze systemen voor de twee meetjaren 2015 en 2016, en om een analyse van de wegzijging door de veenbasis in relatie tot de freatische grondwaterstanden en de stijghoogten met een doorkijk naar de manier waarop regionale grondwatermodellen wegzijging uit schijnwatersystemen berekenen.

##### Waterbalansen

De waterbalansen van de veenpakket-veenbasis-systemen zijn opgesteld voor de twee meetjaren (tabel 18). De waterbalans geldt voor veenpakket en de onderliggende veenbasis tot de onderkant van de kazige-B-laag (80 cm -mv bij B en 85 cm -mv bij C). De wegzijging is de verticale neerwaartse waterstroming door de onderkant van de veenbasis.

*Tabel 18 Waterbalanstermen (mm) van het systeem van veenpakket met veenbasis (0-80 cm diep bij locatie B; 0-85 cm diep bij locatie C). Wegzijging is over de onderrand van de veenbasis. Verdamping bestaat uit verdamping van interceptiewater, bodemwater en water uit plassen op het maaiveld (ponding). Transpiratie is door Pijpestrootitje. Runoff is afstroming en runon toestroming over de oppervlakte. Interflow is ondiepe zijdelingse wegstrooming door de bovenste 5-10 cm van het veenpakket. Bergings  $\Delta$  = de verandering in de waterberging; onder **In** is dat vrijkomend water uit de bodem, onder **Uit** water dat in de bodem wordt geborgen.*

*Table 18 Water balance terms (mm) of the system peat layer with the peat base at locations B and C*

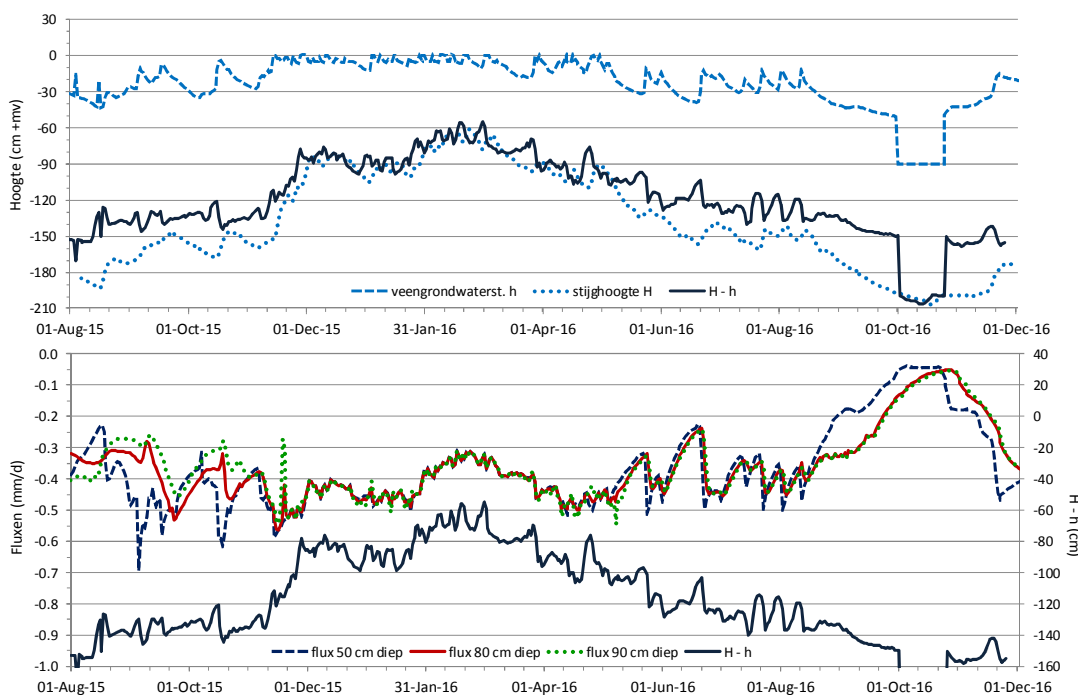
Locatie	2015				2016			
	In		Uit		In		Uit	
Buis B	Neerslag	815	Verdamping	153	Neerslag	689	Verdamping	136
			Transpiratie	242			Transpiratie	254
	Runon	0	Runoff	30	Runon	0	Runoff	22
			Interflow	170			Interflow	163
	Kwel	0	Wegzijging	140	Kwel	0	Wegzijging	125
	Bergings $\Delta$	0		80	Bergings $\Delta$	11		0
	Som	815	Som	815	Som	700	Som	700
Buis C	2015				2016			
	In		Uit		In		Uit	
	Neerslag	815	Verdamping	158	Neerslag	689	Verdamping	184
			Transpiratie	240			Transpiratie	289
	Runon	102	Runoff	0	Runon	160	Runoff	0
			Interflow	378			Interflow	348

Kwel	0	Wegzijing	64	Kwel	0	Wegzijing	59
Bergings $\Delta$	0		77	Bergings $\Delta$	31		0
Som	917	Som	917	Som	880	Som	880

Tabel 18 laat zien dat de twee systemen van de twee locaties, hoewel ze in dezelfde raai lagen, op details toch een andere waterbalans hadden. Ook de twee weerjaren verschilden duidelijk: 2015 had 126 mm meer neerslag en 70 mm minder potentiële verdamping, waardoor het neerslagoverschot op basis van potentiële verdamping in 2015 196 mm groter was. De verdamping en transpiratie waren bij locatie C ook groter in 2016 dan in 2015. Bij locatie B was dat niet het geval: door de droogte bleven actuele verdamping en transpiratie meer achter bij de potentiële dan bij locatie C. Reden hiervan was dat locatie C natter was dan B door het ontbreken van runoff en de incidentele extra aanvoer van water door runoff. C kende dan ook meer plasvorming en had daardoor een grotere verdamping van water op het maaiveld (onderdeel van term verdamping). Daarnaast was een andere belangrijke uitgaande term van de waterbalans bij C kleiner dan bij B: de wegzijing. Oorzaak hiervan was de 2,5 keer grotere weerstand van de veenbasis van C.

### **Wegzijing in relatie tot freatische grondwaterstanden en stijghoogten**

Figuur 21 toont voor locatie B het verloop in de tijd van de berekende freatische grondwaterstand in het veenpakket, van de gemeten stijghoogte in het zandpakket en van de berekende wegzijgingsfluxen op drie diepten in mm per dag. De diepten zijn 50 cm –mv of de bovenkant van de veenbasis, 80 cm –mv of de onderkant van de veenbasis en 90 cm –mv of de onderkant van de B-horizont met ijzerinspoeling en een zeer lage doorlatendheid.



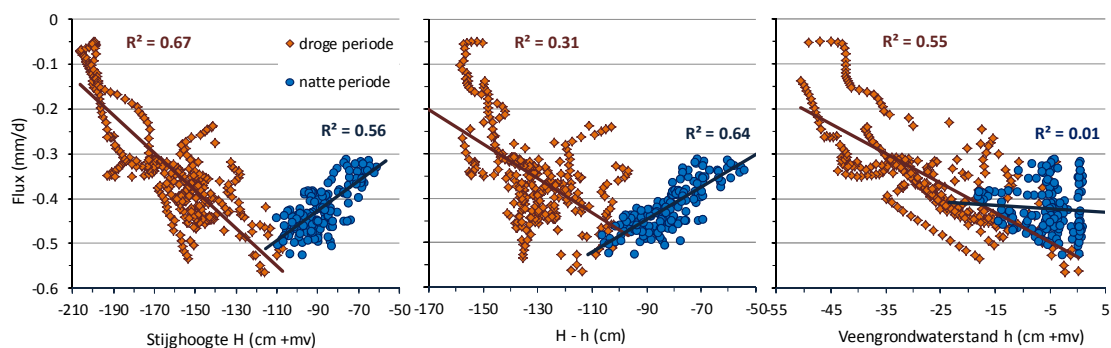
*Figuur 21 Met SWAP voor locatie B berekende grondwaterstanden  $h$  in het veen, gemeten stijghoogten  $H$  en daaruit berekende potentiaalverschillen  $H - h$  (boven) en met SWAP berekende wegzijgingsfluxen op drie diepten: 50 cm (bovenkant veenbasis), 80 cm (onderkant veenbasis) en 90 cm (onderkant B-horizont met ijzerinspoeling) en het potentiaalverschil  $H - h$  (onder). De scherpe, kortdurende uitzakking in de grondwaterstand vanaf 1 oktober 2016 geeft het 'doorslaan' van de veenbasis aan.*

*Figure 21 Groundwater levels  $h$  in the peat layer calculated with SWAP and the measured head  $H$*

In 'stabiele' perioden met kleine fluxen en weinig grote veranderingen in grondwaterstand, zoals van december 2015 tot mei 2016, liggen de wegzijgingsfluxen van de drie diepten

nagenoeg op elkaar wat duidt op een constante flux in de diepte. Bij snelle veranderingen in de grondwaterstand, zoals van augustus tot december 2015, ijlen de diepere fluxen na op hun bovenbuurman: de drukverandering geïnduceerd door een plotselinge verandering in de grondwaterstand verplaatst zich snel door de veenlaag naar de top van de veenbasis, maar wordt door de hoge weerstand daarvan afgeremd en bereikt vertraagd en verkleind de scheiding tussen veenbasis en B-horizont. Door de geringere afstand – 10 cm – en geringere weerstand – 155 dagen – van de B-horizont liggen de fluxen op 80 en 90 cm meestal dicht bij elkaar dan die aan boven- en onderkant van de veenbasis. Bij grote maar langzame grondwaterstandbewegingen, zoals bij het droogvallen en weer vollopen van het veenpakket in najaar 2016, loopt de flux door de top van de veenbasis sterk voor op die door de bodem van de veenbasis. De fluxen op 80 en 90 cm diepte zijn dan gelijk.

De beweging van de stijghoogte is bepalender voor de beweging van het potentiaalverschil dan de beweging van de grondwaterstand die veel vlakker blijft. Het lijkt vanzelfsprekend dat de wegzijgingsflux meebeweegt met het potentiaalverschil, er bestaat immers een lineaire relatie tussen beide grootheden (flux = potentiaalverschil gedeeld door verticale weerstand). Voor de natte periode van 24 november 2015 tot 4 mei 2016 gaat dit principe op: als de stijghoogte eind februari zijn hoogste punt bereikt, is het potentiaalverschil het kleinst (het minst negatief) en de wegzijgingsflux ook. Echter in de droge periode van zomer 2015 vanaf 1 augustus en najaar 2015, en voorjaar en zomer 2016 beweegt de flux tegen de beweging van het potentiaalverschil in.



*Figuur 22 Met SWAP berekende wegzijgingsfluxen uitgezet tegen gemeten stijghoogten  $H$ , grondwaterstanden in het veen  $h$  en daaruit berekende potentiaalverschillen  $H - h$  voor de droge en natte periode in 2015-2016 (natte periode 2-11-2015 tot 4-5-2016; droge periode de rest van 2015 vanaf 1 augustus en 2016). De lijnen zijn lineaire fits met determinatiecoëfficiënten  $R^2$ .*

*Figure 22 Seepage fluxes calculated with SWAP*

Om deze verschijnselen verder te onderzoeken zijn in figuur 22 de wegzijgingsfluxen gescheiden voor de twee perioden nat en droog uitgezet tegen de verklarende variabelen stijghoogte, potentiaalverschil en veengrondwaterstand. Door de twee puntengroepen zijn lineaire relaties gefit waarvan de determinatiecoëfficiënt  $R^2$  in het figuur is aangegeven. Hoe groter  $R^2$ , des te sterker is het verband tussen verklarende variabele en flux voor de betreffende periode. Uit de figuur is het volgende af te leiden voor de natte periode:

1. voor de stijghoogte is het verband met de flux matig sterk: hoe kleiner (meer negatief) de stijghoogte, hoe groter (meer negatief) de flux;
2. voor het potentiaalverschil is het verband redelijk sterk en het sterkst van de drie variabelen: hoe groter (meer negatief) het potentiaalverschil, hoe groter de flux;
3. er is geen verband tussen flux en freatische grondwaterstand in het veen.

Punt 2 voldoet aan de verwachting op basis van de vergelijking voor wegzijging: een groter potentiaalverschil veroorzaakt een grotere flux. Zoals opgemerkt, bepaalt vooral de stijghoogte de beweging van het potentiaalverschil, die staat dan ook op de tweede plaats van verklarende variabelen. De veengrondwaterstand is geen variabele die de fluctuaties in

de flux kan verklaren (dat laat onverlet dat hij belangrijk is voor de berekening van het stijghoogteverschil en dus de flux), omdat hij in de natte periode redelijk constant blijft op een niveau tussen 10 cm onder en enkele cm's boven maaiveld.

Voor de droge periode is het volgende te zien:

1. voor de stijghoogte is het verband met de flux het sterkst van de drie variabelen: hoe kleiner (meer negatief) de stijghoogte, hoe kleiner (dichter bij 0) de flux;
2. voor het potentiaalverschil is het verband het zwakst: het potentiaalverschil is niet erg bepalend voor de flux in de droge periode;
3. de veengrondwaterstand komt met een matig sterk verband met de flux op de tweede plaats: hoe lager de veengrondwaterstand, hoe kleiner de flux .

Dat stijghoogte en veenwaterstand er wel toe doen voor de grootte van de fluxen, maar hun verschil niet, geeft aan dat ze apart opereren in hun effect. Bij de stijghoogte gaat het om beïnvloeding van de flux aan de onderkant van de veenbasis: hoe dieper de stijghoogte, hoe kleiner de drukhoogte in de onderkant van de veenbasis en in de top van het zand en hoe lager de onverzadigde doorlatendheid van het bodemmateriaal van vooral de veenbasis (hoe kleiner de drukhoogte, hoe lager de doorlatendheid). De verticale weerstand van de veenbasis neemt hierdoor sterk toe en de flux af. Bij de veenwaterstand gaat het om de bovenkant van de veenbasis: hoe lager de veenwaterstand hoe kleiner de waterdruk en hoe kleiner de flux. De relevante waterdruk is het potentiaalverschil tussen veenwaterstand en het ondiepste punt in veenbasis of zandlaag waar de bodem onverzadigd is door het zakken van de stijghoogte; in dat traject geldt de verzadigde doorlatendheid, de hoogste doorlatendheid die mogelijk is. Het effect van het toenemen van de veenbasisweerstand overheerst blijkens de grootste waarde van  $R^2$  voor dit proces.

*Tabel 19 Hellingen (mm/d/cm) en determinatiecoëfficiënten (-) van de lineaire fits van berekende wegzijgingsfluxen tegen gemeten stijghoogten H, berekende veenwaterstanden h en het potentiaalverschil daar tussen H - h, voor locatie B en C*

*Table 19 Slopes (mm / d / cm) and coefficients of determination (-) of the linear fits of the calculated seepage fluxes*

Groot- heid	Periode: Locatie	Droog			Nat			Geheel		
		H	H - h	h	H	H - h	h	H	H - h	h
Helling	B	-0,0042	-0,0039	-0,0066	0,0033	0,0036	-0,0008	-0,0018	-0,0016	-0,0046
	C	-0,0015	-0,0009	-0,0005	0,0009	0,0007	0,0016	-0,0008	-0,0007	-0,0007
Det.coëf.	B	0,67	0,31	0,55	0,56	0,64	0,01	0,42	0,22	0,48
	C	0,55	0,20	0,37	0,18	0,12	0,05	0,49	0,33	0,39

Een vergelijkbare analyse is gedaan voor locatie C. Door de veel lagere wegzijgingsfluxen (tussen -0,01 en -0,26 mm/d) als gevolg van de 2,5 keer zo hoge veenbasisweerstand zijn de verbanden hier veel minder duidelijk. Ter vergelijking met locatie B zijn de hellingen en de determinatiecoëfficiënten van de lineaire fits van de wegzijgingsfluxen van beide locaties opgenomen in tabel 19. De hellingen zijn bij C allemaal een stuk kleiner dan bij B wat een kleiner effect van de verklarende variabelen op de fluxen aangeeft. Op grond van beide grootheden helling en determinatiecoëfficiënt lijkt voor C het voor B gevonden verband tussen wegzijgingsflux en stijghoogte in de droge periode ook te bestaan, maar minder uitgesproken. Met de veengrondwaterstand lijkt er slechts een zwak verband te zijn. De voor B gevonden verbanden voor de natte periode zijn bij C slechts zeer zwak. Fluctuaties in de tijd van stijghoogten en vooral grondwaterstanden zijn zo klein dat de drukhoogteverschillen aan beide kanten van de veenbasis sterk gedempt worden door de hoge weerstand van de veenbasis (zie figuur onder **SWAP** in bijlage 3). Daardoor ijlt de grootte van de wegzijgingsfluxen daarop na en fluctueert veel minder in de tijd dan bij B.



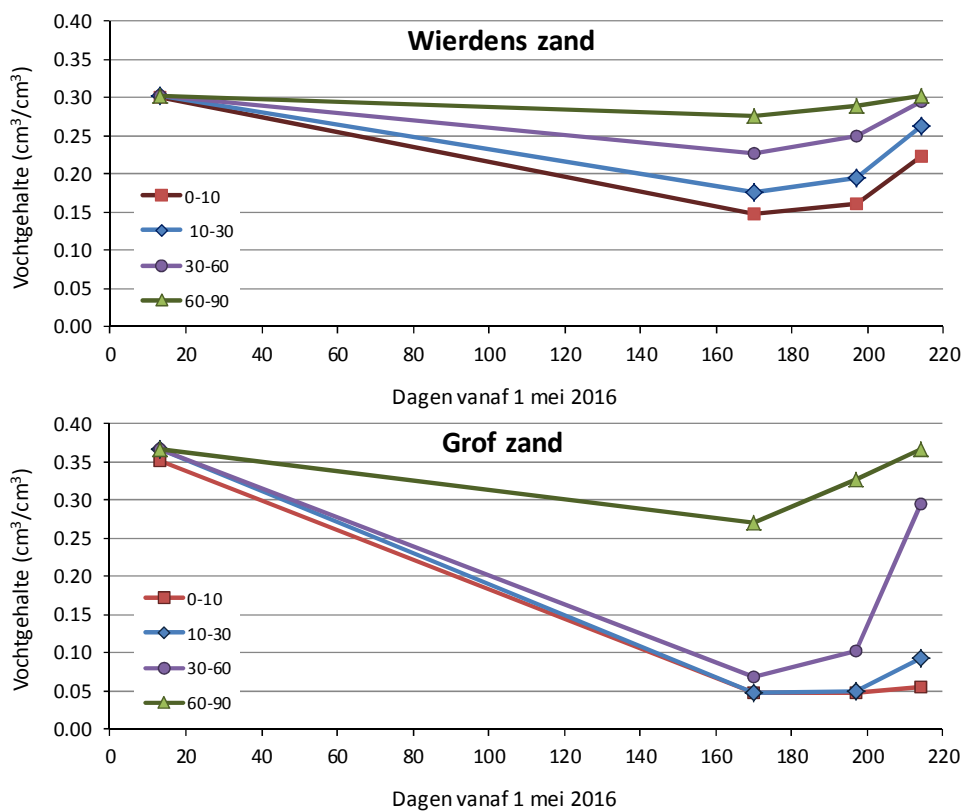
### **4.3.3 Analyse van kans op aerobe en anaerobe afbraak van de veenbasis**

In deze paragraaf wordt de kans onderzocht op aantasten van de veenbasis van onderaf door afbraak van organische stof door zuurstof en de alternatieve electronenacceptoren nitraat en sulfaat. Zuurstof kan zijdelings worden aangevoerd door de zandlaag onder de veenbasis als deze onverzadigd genoeg is. Nitraat en sulfaat kunnen worden aangevoerd met water uit landbouwgebieden met hoge concentraties van deze stoffen dat in voldoende mate toestroomt door de zandlaag tot onder de veenbasis. Of op deze manier voldoende zuurstof of nitraat en sulfaat kan worden aangevoerd voor substantiële afbraak van organische stof van de veenbasislagen wordt in het navolgende onderzocht.

#### ***Zijdelings transport van zuurstof door diffusie door de onverzadigde zandlaag***

Zijdelingse aanvoer van zuurstof door de onverzadigde zandlaag onder de veenbasis kan plaatsvinden vanaf een plek die in direct contact staat met luchtzuurstof zonder dat de lucht door een organische-stofrijke laag hoeft te stromen waarin de zuurstof volledig verbruikt kan worden voor organische-stofafbraak. Dat zal meestal ergens aan de rand van het veengebied zijn. Zuurstoftransport kan plaatsvinden door diffusie of door 'ademhaling' waarbij lucht wordt aangezogen door het dalen van de grondwaterstand in de zandlaag.

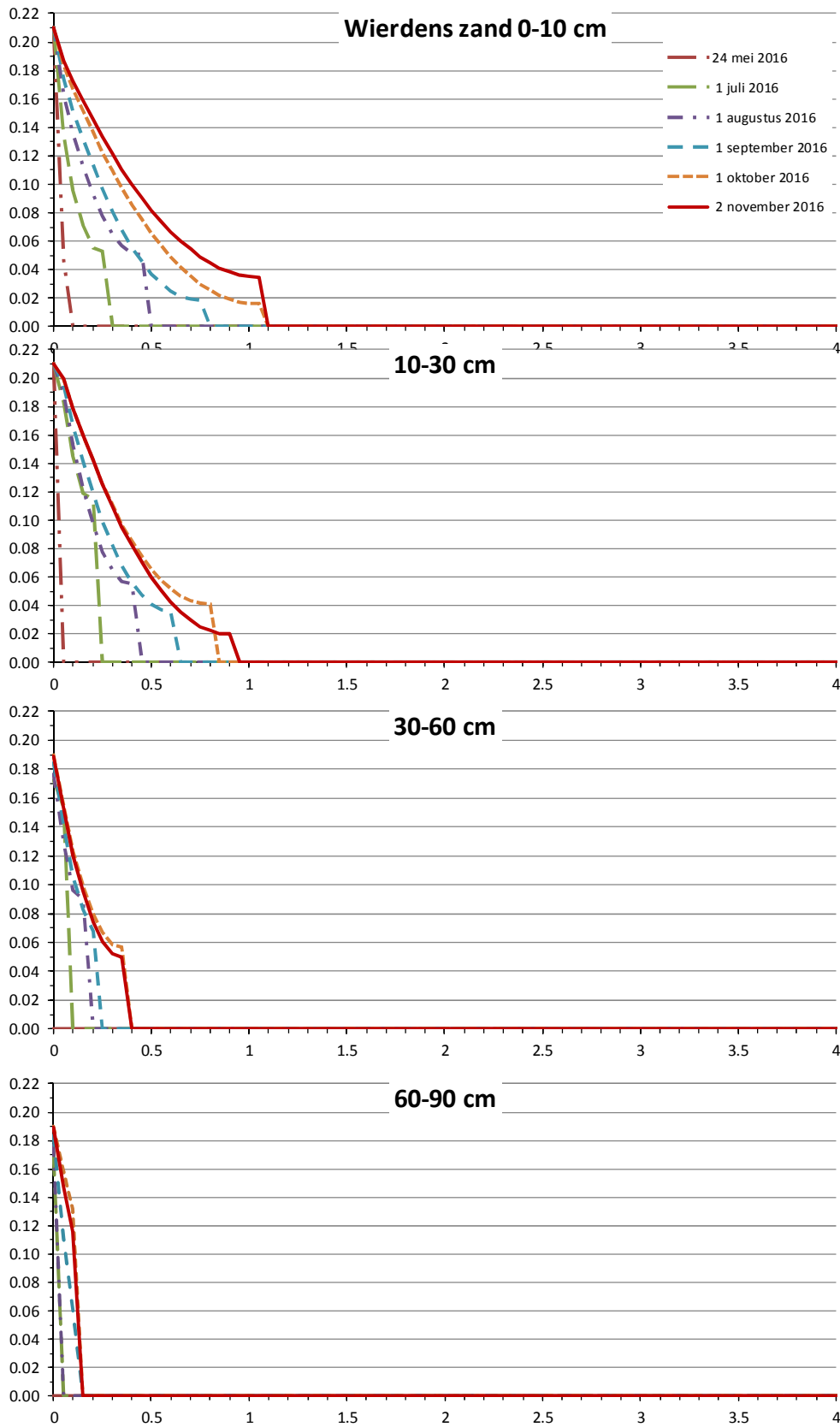
Hier wordt onderzocht hoever zuurstof door diffusie zijdelings in de zandlaag kan dringen in een realistische droge situatie zoals die zich heeft voorgedaan in het Wierdense veld. Hierbij is verondersteld dat in het droge najaar van 2016 vanuit de droge brandgang zuurstof toetrad in de zandlaag en richting de ruim tien meter verder gelegen locatie van buis B diffundeerde. De vraag is of zuurstof locatie B kon bereiken. Deze vraag is onderzocht met SWAP-ANIMO waarbij de zwaartekracht in SWAP is uitgeschakeld en de modelkolom op zijn kant is gelegd. Omdat door het dalen van de grondwaterstand in het zand de onverzadigde zone van het zandpakket steeds dikker wordt en de bovenkant steeds droger is dit een tweedimensionaal probleem. Om dit met de eendimensionale SWAP-ANIMO-combinatie te benaderen is het horizontale zandpakket in vier lagen opgedeeld van 0-10 cm, 10-30 cm, 30-60 en 60-90 cm onder de veenbasis. De met de verticale SWAP-kolom berekende vochtgehalten in diepte en tijd zijn aan de horizontale lagen opgelegd volgens onderstaand patroon voor het Wierdense zand en de grof-zand-variant uit de studie naar de veenlagen van Tilburg van 4.3.2.



*Figuur 23 Verloop van het vochtgehalte in de tijd in de droge periode van zomer/najaar 2016 voor vier lagen in het zand onder de veenbasis op de in de legenda aangegeven diepten onder de veenbasis voor twee varianten van de zandlaag: het oorspronkelijke zand van het Wierdense veld (boven) en het grofzand uit het onderzoek in Tilburg (onder)*

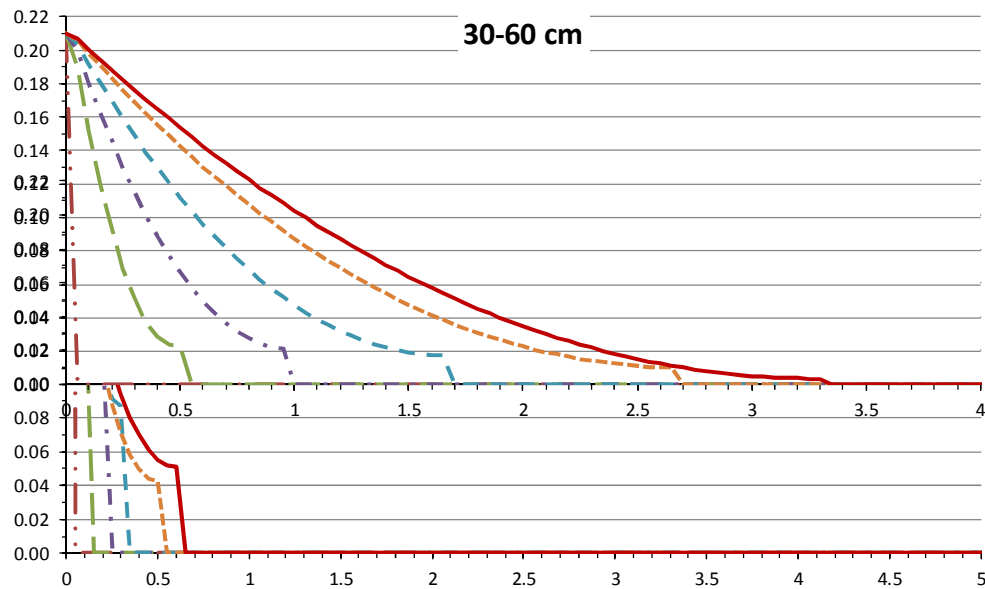
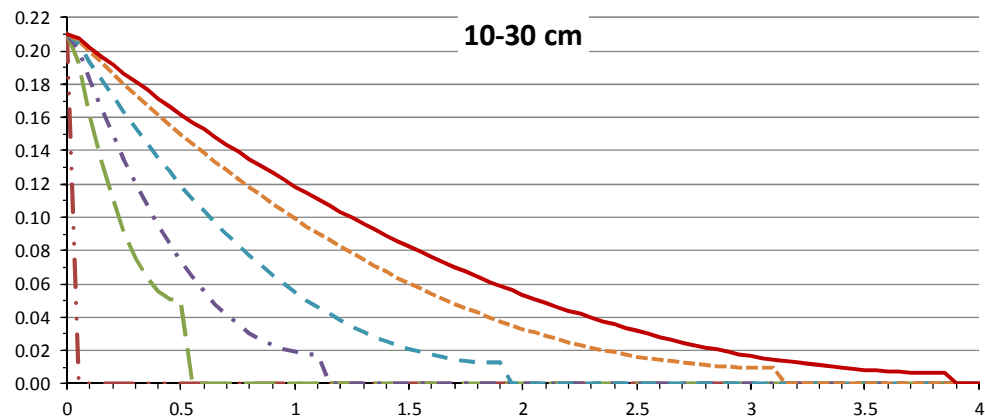
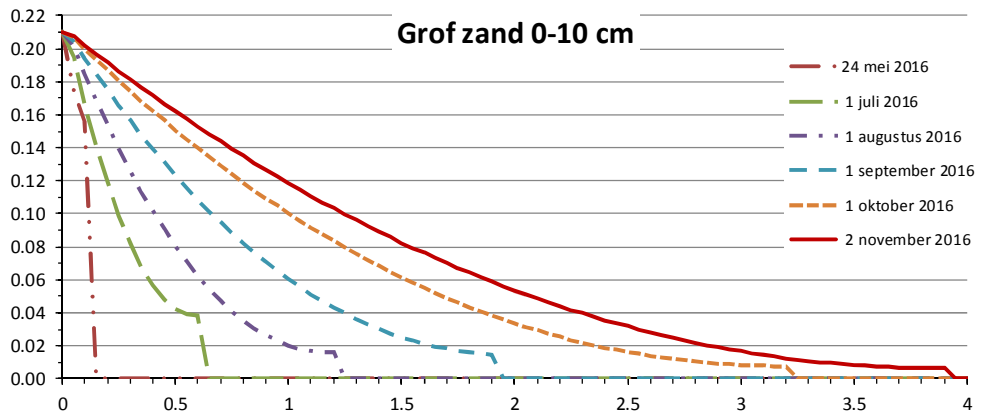
*Figure 23 The moisture content in the dry season of summer / autumn 2016 in four layers in the sand layer below the peat base*

Het verloop van de vochtgehalten uit figuur 23 is voor elke laag gesimuleerd met de horizontale SWAP door onttrekking van vocht aan een kant van de kolom en vanaf dag 170 ook aanvoer van vocht (voor details van deze simulatie zie 2.2.#). Op basis van deze vochtgehalten is voor elke laag de horizontale diffusie in de laag gesimuleerd met ANIMO waarbij aan een kant van de laag zuurstof kon toetreden in de laag. De resultaten zijn gepresenteerd in figuur 24.



Figuur 24a Doordringing van zuurstof in een horizontale deellaag van het zandpakket met de in de kop aangegeven positie onder de veenbasis in de periode 1 mei tot 2 november 2016. Variant met het zand van het Wierdense veld. Op de x-as staat de horizontale afstand in meters; op de y-as het zuurstofgehalte als volumefractie.

Figure 24a Penetration of oxygen in sandy horizontal sub-layers below the peat base



*Figuur 24b Doordringing van zuurstof in een horizontale deellaag van het zandpakket met de in de kop aangegeven positie onder de veenbasis in de periode 1 mei tot 2 november 2016. Variant met het grof zand van het Tilburgse onderzoek. Op de x-as staat de horizontale afstand in meters; op de y-as het zuurstofgehalte als volumefractie.*

*Figure 24b Penetration of oxygen in coarse sandy horizontal sub-layers below the peat base*

Figuur 24 laat zien dat zuurstof in het Wierdense zand krap 1 m zijdelings doordringt in de bovenste, droogste laag van het zandpakket. Het zuurstofgehalte is dan slechts 4% wat inhoudt dat daarmee weinig potentie voor organische-stofafbraak binnendringt. In het grofzand van Tilburg is de doordringing vier keer zo ver, maar dan met nog lagere zuurstofgehalten. De reden hiervoor is dat alle zuurstof wordt geconsumeerd door de micro-organismen voor afbraak van een deel van de 1,9% organische stof in het zand - 32 kg/m<sup>3</sup> bij een volumieke massa van 1691 kg/m<sup>3</sup> - met een afbraaksnelheid van 0,004 per jaar (halfwaardetijd 172 jaar bij 10 °C, tabel 14). Hoe dieper de lagen, des te minder ver zuurstof kan doordringen.

Hierbij moet worden bedacht dat de aanvoer van zuurstof vanaf de zijkant in deze berekeningen optimaal is. In werkelijkheid zal het nauwelijks voorkomen dat zuurstof vanuit de atmosfeer vrijelijk in een zandlaag kan diffunderen zonder eerst een organische-stofrijke laag te moeten passeren. De conclusie is dan ook dat zuurstof niet ver vanaf de zijkant van een veenpakket kan doordringen door diffusie in de zandlaag onder de veenbasis om de veenbasis ernstig aan te tasten. In ieder geval niet ver genoeg om vanuit de brandgang locatie buis B te bereiken met substantiële zuurstofhoeveelheden om daar ter plekke de veenbasis aan te tasten.

#### **Mogelijke afbraak van de veenbasis bij maximale aanvoer van zuurstof**

In het droge najaar van 2016 zijn incidenteel vrij hoge zuurstofgehalten tot 19,2 volume-% in de C-horizont bij locatie B gemeten (tabel 5). Het is niet duidelijk waar deze zuurstof vandaan kwam; een mogelijkheid die wordt geopperd bij bespreking van tabel 5 is via haarscheurtjes in de veenbasis toen die ook van boven was drooggevallen. Daarom is onderzocht hoeveel organische stof van de veenbasis kan worden afgebroken als er incidenteel en kortdurig veel zuurstof in het zandpakket onder de veenbasis kan dringen, bijvoorbeeld door aanzuiging bij 'ademhaling' van het zandpakket als gevolg van (snelle) grondwaterstanddaling in het zandpakket.

Omdat bleek dat ANIMO niet goed kan rekenen met opgesloten zuurstof in luchtgevulde poriën is met SWAP-ANIMO een *worst-case*-variant doorgerekend voor de laatste vier maanden van 2016. Hierbij is een constante aanvoer van zuurstof veronderstelt naar de zandlaag op 60 cm diepte onder de veenbasis in deze vier maanden in de droge periode eind 2016. Nadat deze zuurstof de 60 cm dikke zandlaag heeft gepasseerd, komt ze beschikbaar voor afbraak van de organische stof van de veenbasis.

ANIMO is doorgerekend op basis van een door SWAP berekend, in de vier doorgerekende maanden constant, vochtgehalte. Hierbij is een drukhoogtegradiënt opgelegd op basis van de gemiddelde stijghoogte in de vier maanden van 105 cm onder de veenbasis. In de zandlaag is een gemiddelde drukhoogte van -70 cm aangehouden, op de scheiding zand-B-horizont -95 cm en verder naar de top van de veenbasis twee varianten: 1. een toenemende gradiënt lineair naar een drukhoogte van 0 cm (boven de veenbasis heerst een verzadigde toestand) en 2. de rechte gradiënt waarbij door de gehele veenbasis een drukhoogte van -95 cm wordt gehandhaafd (deze toestand is fysisch moeilijk te verantwoorden, maar maakt de *case* nog sterker *worst*). Hiervan is nog een tweede variant doorgerekend waarbij de stijghoogte 50 cm lager ligt, een nog sterkere *worst-case*. Al deze combinaties van varianten zijn doorgerekend voor het Wierdense zand en het grof-zand uit Tilburg. De resultaten zijn gegeven in tabel 20.

Tabel 20 Resultaten van berekeningen met SWAP-ANIMO van afbraak van organische stof (in % en kg/m<sup>2</sup>) van diverse bodemlagen van en onder de veenbasis in vier maanden tijd, voor combinaties van twee drukhoogtegradiënten, twee stijghoogten en twee zandsoorten

Table 20 Results of calculations with SWAP-ANIMO of degradation of organic matter in several soil layers

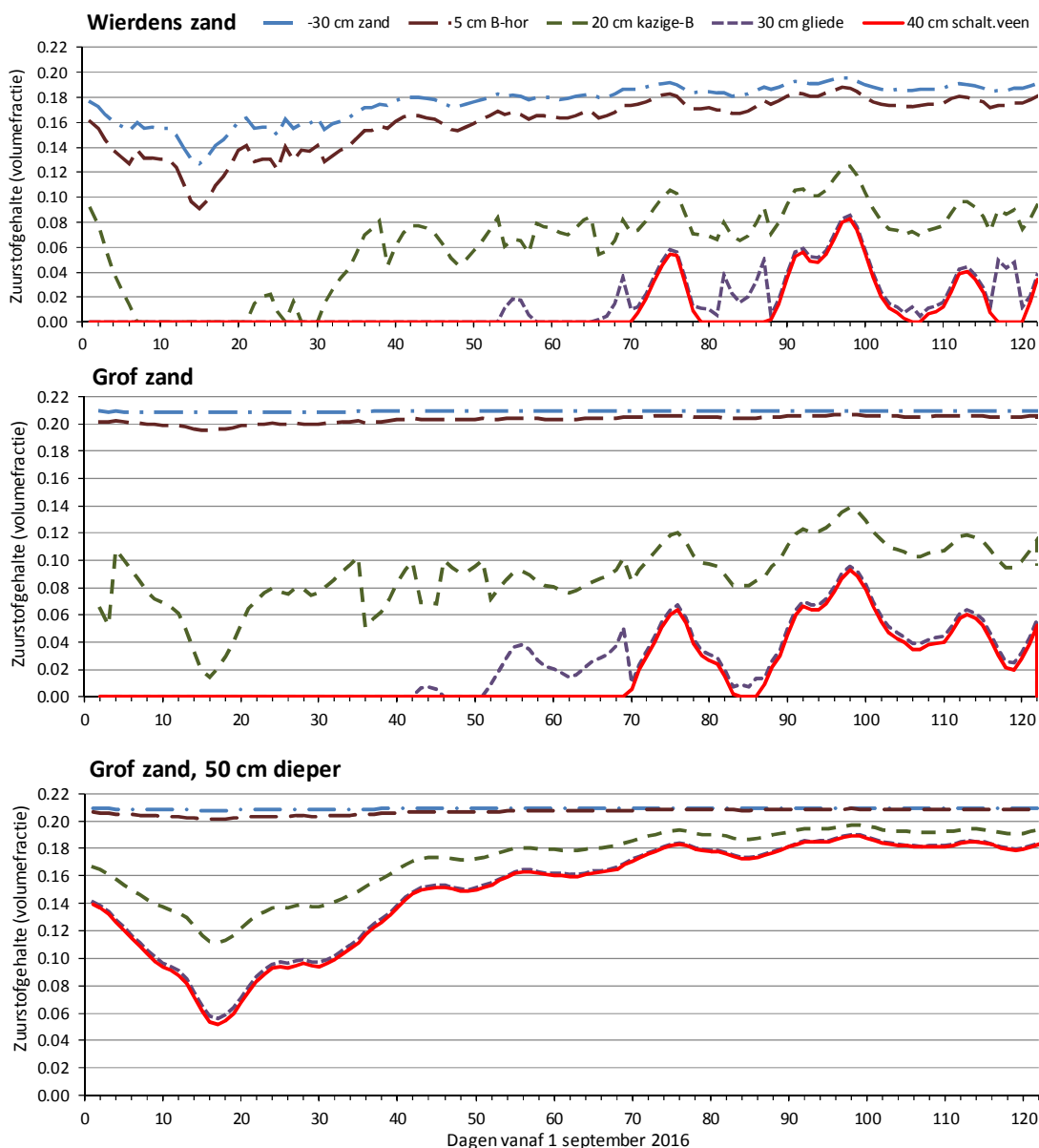
Zand- soort	Bodem- laag	Laag- dikte (cm)	Massa org.stof (kg/m <sup>2</sup> )	Huidige stijghoogte				Stijghoogte 50 cm dieper			
				toenemende gradient		rechte gradient		toenemende gradient		rechte gradient	
				(%)	(kg/m <sup>2</sup> )	(%)	(kg/m <sup>2</sup> )	(%)	(kg/m <sup>2</sup> )	(%)	(kg/m <sup>2</sup> )
Wier- dens zand	Schalteerv.	5	4,8	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,071	0,003
	Gliede	10	15,7	0,000	0,000	0,035	0,006	0,000	0,000	0,181	0,028
	Kazige-B	15	20,6	0,041	0,008	0,148	0,030	0,163	0,034	0,219	0,045
	B-horizont	10	7,0	0,322	0,023	0,321	0,022	0,322	0,023	0,322	0,023
	Zand C-hor.	60	19,3	0,115	0,022	0,115	0,022	0,115	0,022	0,115	0,022
Grof zand	Schalteerv.	5	4,8	0,000	0,000	0,014	0,001	0,000	0,000	0,072	0,003
	Gliede	10	15,7	0,000	0,000	0,047	0,007	0,001	0,000	0,184	0,029
	Kazige-B	15	20,6	0,063	0,013	0,182	0,037	0,172	0,035	0,222	0,046
	B-horizont	10	7,0	0,325	0,023	0,325	0,023	0,327	0,023	0,326	0,023
	Zand C-hor.	60	19,3	0,116	0,022	0,116	0,022	0,116	0,022	0,116	0,022

Tabel 20 laat zien dat zelfs in de *worst worst-case* de afbraak van organische stof van veenbasislagen minder dan 1% bedraagt. Aannemende dat voor een langere periode met afwisselend nattere en drogere jaren deze vier maanden zuurstofvoorziening per jaar het jaargemiddelde zou zijn, dan zou over 50 jaar in de kazige-B- en gliedelaag 10% van de organische stof afgebroken zijn. Dat is een niet-verwaarloosbare hoeveelheid. In de minder *worst-case* varianten zouden die percentages eerder 2-8 en 0 zijn. Echter, hierbij moet worden bedacht dat ook dan vier maanden lang vrij optimaal zuurstof aangevoerd moet kunnen worden en dat lijkt onder gemiddelde omstandigheden niet realistisch. Wordt niet uitgegaan van een constante aanvoer van zuurstof, dan volgt uit een berekening voor de situatie 'grof zand' en 'stijghoogte 50 cm dieper' dat met de hoeveelheid zuurstof in de zandlaag de afbraak van de veenbasis zich beperkt tot maximaal 0,06%.<sup>2</sup> De conclusie hieruit is dat de jaarlijkse afbraak onder invloed van zuurstof vanuit de onderkant van de veenbasis voor de kazige-B-horizont minder dan 0,04% bedraagt en dat deze voor de overige veenbasislagen 0 is.

Opvallend is dat in de zandlaag en de B-horizont de afbraak hetzelfde is voor alle varianten, inclusief de twee zandsoorten. Dat kan alleen betekenen dat in alle varianten de zuurstofvoorziening voor deze lagen optimaal is. De afbraaksnelheid bij de heersende temperatuur is de beperkende factor. Met de afbraaksnelheden van tabel 14 zijn dezelfde percentages inderdaad simpel te berekenen uitgaande van een temperatuur van 12-15 °C.

<sup>2</sup> Uit de SWAP-resultaten is berekend dat op het droogste moment in het grofzand over een onverzadigde diepte van 0,6 m per m<sup>2</sup> in totaal 0,184 m<sup>3</sup> lucht aanwezig is. Aannemende dat deze lucht het volume-% zuurstof van atmosferische lucht heeft van 21% met een soortelijk gewicht van zuurstofgas van 1430 gram per m<sup>3</sup> is er in deze luchtbel 55,3 gram zuurstof per m<sup>2</sup> aanwezig. Uitgaande van een volledige beschikbaarheid van deze zuurstof aan de afbraak van de organische stof dan kan  $55,3 * 12 / 32 = 20,7$  gram C per m<sup>2</sup> is  $20,7 / 0,58 = 35,8$  gram organische stof per m<sup>2</sup> worden afgebroken. Uitgaande van de verdeling van de afbraak over de veenbasislagen en de 0,6 m dikke onverzadigde zandlaag volgens de verdeling van de kolom rechtsonder in tabel 23, dan wordt 82% van de beschikbare zuurstof aangewend voor de afbraak van de veenbasislagen zodat  $0,82 * 35,8 = 29,4$  gram per m<sup>2</sup> wat gelijk is aan  $100% * 29,4 / (48,1 * 1000) = 0,06%$  van de organische stof in de veenbasis. Dit is eerder een overschatting, omdat op het moment dat zuurstof concentraties in het zand laag worden door afbraak van de organische stof van het zand de diffusie richting de veenbasis ook afneemt. De verdeling die uit de tabel is genomen geldt namelijk voor een situatie met constante zuurstofaanvoer naar gelang de behoefte van het gezamenlijke systeem zandlaag en veenbasis.

Ter illustratie zijn in figuur 25 voorbeelden gegeven van het verloop van het zuurstofgehalte in de tijd op verschillende diepten voor de twee zandsorten. Daarin is duidelijk te zien dat de zandlaag en B-horizont optimaal van zuurstof zijn voorzien. De variatie in de tijd is het gevolg van veranderingen in temperatuur. Zowel de snelheid van zuurstofdiffusie als die van zuurstofconsumptie zijn temperatuurafhankelijk. Aan de bovenkant van de veenbasis is de luchttemperatuur van weerstation Heino opgelegd en aan de onderkant een reeks van te Zegveld op 90 cm diepte gemeten temperaturen die begint op 9 °C in mei 2003 en oploopt tot 15 °C eind augustus en dan weer langzaam afloopt naar 10 °C op eind december.



Figuur 25 Verloop van de met SWAP-ANIMO-berekende zuurstofgehalten in de lagen van en onder de veenbasis. De getallen in cm in de legenda geven de diepte t.o.v. de onderkant van de veenbasis. De variatie in de tijd is het gevolg van veranderingen in temperatuur. Aan de bovenkant van de veenbasis is de luchttemperatuur van weerstation Heino opgelegd, aan de onderkant een reeks van te Zegveld op 90 cm diepte gemeten temperaturen die op 9 °C begint in mei en oploopt tot 15 °C eind augustus en dan weer langzaam afloopt naar 10 °C op eind december.

Figure 25 Course of the SWAP-ANIMO-calculated oxygen levels in the layers of and below the peat base.

### **Mogelijke afbraak van de veenbasis bij maximale aanvoer van nitraat en/of sulfaat**

Met SWAP-ANIMO is de aanvoer van nitraat- en sulfaatrijk water naar de zandlaag onder de veenbasis gesimuleerd. Voor de concentraties van nitraat en sulfaat zijn twee varianten aangehouden: 50 en 100 mg NO<sub>3</sub> /L en 100 en 200 mg SO<sub>4</sub> /L, apart en beide ionen gecombineerd.

Voor de aanvoer van water zijn met SWAP vier varianten doorgerekend met verschillende stijghoogten. De stijghoogten bepalen of en in welke hoeveelheid water door de zandlaag richting de veenbasis stroomt. Omdat het gaat om de vermeende aanvoer van drainage- of wegzijgingswater uit landbouwgebieden aangerijkt met grote hoeveelheden nitraat en sulfaat



is de stijghoogte hier gelijk aan de waterhoogte van de drainagemiddelen of de wintergrondwaterstand in het landbouwgebied. De betekenis van de vier varianten moet in dat licht worden gezien om hun realiteitsgehalte te beoordelen. De varianten zijn:

1. stijghoogte constant 1 cm in de veenbasis (79 cm beneden maaiveld);
2. stijghoogte constant 1 cm in het veenpakket (49 cm -mv);
3. stijghoogte constant 25 cm -mv;
4. stijghoogte constant 10 cm -mv.

Uitgaande van een goed gedraineerd, voor intensieve landbouw gebruikt landbouwgebied – want alleen dat kan de hoge nitraat- en sulfaatconcentraties verklaren – moet in al deze varianten het maaiveld van het landbouwgebied (veel) hoger liggen dan het maaiveld van het veengebied.

SWAP-ANIMO is doorgerekend voor de gebruikelijke 30-jarige weerreeks. De resultaten van de vier SWAP-varianten zijn getoond in tabel 21. Van de concentratievarianten is alleen het meest extreme getoond: de combinatie van 100 mg NO<sub>3</sub> /L en 200 mg SO<sub>4</sub> /L. Omdat deze extreme variant al geen afbraak van organische stof van veenbasislagen bewerkstelligt, was het niet zinvol om de minder extreme varianten te tonen. Tabel 21 geeft nog een extra variant: die waarbij verondersteld is dat de zandlaag geen organische stof bevat en daarmee geen nitraat en sulfaat verbruikt voor afbraak van organische stof.

*Tabel 21 Resultaten van de SWAP-ANIMO berekeningen van aanvoer van water met nitraat- en sulfaatconcentraties van 100 mg NO<sub>3</sub> /L en 200 mg SO<sub>4</sub> /L voor de vier SWAP-varianten van de stijghoogte, als water-, nitraat- en sulfaataanvoer als 30-jarig gemiddelde en de totale afbraak in 30 jaar van de veenbasislagen en de C- en B-horizont als percentage van de organische stof en de absolute hoeveelheid in kg/m<sup>2</sup>*

*Table 21 Results of SWAP-ANIMO calculations of water supply with nitrate and sulphate concentrations*

Aanvoer stoffen	SWAP 1, 1 cm in veenbasis			SWAP 2, 1 cm in veenp.			SWAP 3, 25 cm -mv			SWAP 4, -10 cm -mv			
	water mm/j	nitraat kg/ha/j	sulfaat kg/ha/j	water mm/j	nitraat kg/ha/j	sulfaat kg/ha/j	water mm/j	nitraat kg/ha/j	sulfaat kg/ha/j	water mm/j	nitraat kg/ha/j	sulfaat kg/ha/j	
kwel	0.1	0.1	0.2	2.7	2.7	5.4	23.1	23.1	46.2	43.5	43.5	87.0	
wegz.	69.0	0.0	0.0	28.9	0.0	0.0	7.3	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	
netto	-68.9	0.1	0.2	-26.2	2.7	5.4	15.8	23.1	46.2	43.0	43.5	87.0	
Afbraak o.s.													
V.b.laag	(%)	(kg/m <sup>2</sup> )		(%)	(kg/m <sup>2</sup> )		(%)	(kg/m <sup>2</sup> )		(%)	(kg/m <sup>2</sup> )	(%)	(kg/m <sup>2</sup> )
Gliede	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	0.07	0,011
KB	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	0,55	0,113
B	0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0	0,0	1,04	0,073
C	0.0	0.0		0.192	0.275		0.224	0.321		0.255	0.365	-	-

Te zien is dat zelfs in de meest extreme variant met 43 mm kwel per jaar en zeer hoge concentraties nitraat en sulfaat in het kwelwater, bij ontbreken van organische stof in de zandlaag de afbraak door nitraat en sulfaat van de veenbasis van onderaf wel de kazige-B en gliedelaag aantast, maar in slechts zeer geringe mate. Deze afbraak is volledig het gevolg van sulfaatreductie, omdat in de berekeningen sulfaat de B-horizont kan passeren zonder verbruikt te worden (conform de meetresultaten van tabel 15). Voor nitraat geldt dat niet; dat wordt volledig gereduceerd in de B-horizont en veroorzaakt daar voornamelijk de afbraak van de organische stof van die laag, en bereikt de kazige-B niet in relevante hoeveelheden.

Omdat de meest extreme variant niet erg realistisch is voor een doorsnee hoogveengebied is de conclusie dat aantasting van de veenbasis van onderaf door drainagewater uit landbouwgebieden geen reële bedreiging voor de veenbasis vormt.

## 5 Conclusies

De kernvraag van het onderzoek is: Wordt een organische veenbasis aan de onderzijde aangetast als gevolg van een te geringe stijghoogte?

Bij de aantasting wordt daarbij gedacht aan twee mogelijke processen:

- Chemisch-microbiële afbraak van organische stof in de veenbasis;
- Fysische processen, in het bijzonder krimp en scheurvorming.

### **Hoofdconclusie**

De hoofdconclusie is dat in de praktijk geen aantasting is te verwachten van een organische veenbasis door zuurstof uit een onverzadigde laag tussen de grondwaterstand in de zandondergrond (stijghoogte) en de onderkant van de veenbasis of door met grondwater aangevoerd nitraat en sulfaat bij een volledig verzadigde zandondergrond. Ook blijken krimp en scheurvorming door uitdroging van de onderkant van de veenbasis geen wezenlijk gevaar te vormen voor de veenbasis. Daarmee worden in hoofdlijnen de eerdere conclusies van de literatuurstudie van Sevink et al., 2014 bevestigd.

### **Deelconclusies**

De hiernavolgende deelconclusies geven samengevat de antwoorden op de deelvragen die zoals aangegeven in de Inleiding door Sevink et al., (2014) zijn geformuleerd.

Deelconclusie 1:

Laterale aanvoer van zuurstof door diffusie is alleen mogelijk als de zijrand(en) van het veensysteem onverzadigd zijn en kan dan slechts zeer gering zijn. Door consumptie van zuurstof bij afbraak van organische stof tijdens lateraal transport blijft de bodemlucht onder een natte (verzadigde) veenbasis nagenoeg zuurstofloos.

Ademhaling kan zeker aan de randen een rol spelen, vooral als het veensysteem gedegradeerd is of herstellende, maar het effect op de veenbasis is zeer beperkt.

Deelconclusie 2:

Bij een goede bovenafsluiting door een verzadigd veenpakket en enige afstand tot de rand van het veengebied wordt de bodemlucht in de zandlaag nagenoeg opgesloten en vindt geen verversing plaats door 'ademhaling' als gevolg van fluctuaties in de grondwaterstand in het zandpakket. Droogvallen van het veen en vervolgens de veenbasis moet worden voorkomen.

Deelconclusie 3:

Het is van groot belang dat de veenbasis van boven verzadigd blijft om scheurvorming, luchttoetreding en afbraak van organische stof door zuurstof te voorkomen.

Deelconclusie 4:

Aanvoer van water uit aangrenzende landbouwgebieden met hoge nitraat en sulfaatconcentraties vormen geen gevaar voor de veenbasis. Onder realistische omstandigheden kan nooit voldoende nitraat en/of sulfaat worden aangevoerd voor afbraak van de veenbasis van enige betekenis.

### **Onderbouwing**

De onderbouwing van de hoofdconclusie en conclusies was goed mogelijk met de monitoring van de meetraai in het Wierdense Veld en de modellering daarvan. De aanwezigheid van een brandgang en het feit dat de veenlaag vrij dun was maakten dat een kwetsbare situatie voor de veenbasis aanwezig was. Daarnaast bleek het najaar van het meetjaar 2016 zo droog dat de freatische grondwaterstand in de veenlaag tot in de veenbasis daalde.

Uit het onderzoek kan worden geconcludeerd dat zuurstof aangevoerd vanaf de zijkant van het veengebied door middel van diffusie slechts enkele meters horizontaal onder de veenbasis kan doordringen. In die enkele meters wordt de zuurstof door de (geringe) hoeveelheid organische stof in de zandlaag al opgebruikt: de aanvoer door diffusie kan de zuurstofconsumptie door de afbraak van organische stof gewoonweg niet bijhouden. Ook kan worden geconcludeerd dat stroming van lucht met zuurstof (het zogenaamde ademen door fluctuaties in de stijghoogte) onvoldoende is om voldoende zuurstof aan te voeren om de organische veenbasis wezenlijk te kunnen aantasten. Zelfs indien wordt aangenomen dat door een onverwachte gebeurtenis de lucht onder de veenbasis volledig wordt vervangen door atmosferische lucht en vervolgens weer afgesloten raakt, is de hoeveelheid zuurstof in de opgesloten lucht niet voldoende om serieuze afbraak van de veenbasis te veroorzaken. De conclusie dat bij aanvoer van hoge concentraties nitraat en sulfaat door een volledig verzadigde zandondergrond de aantasting van een organische veenbasis zeer beperkt is, is gebaseerd op het feit dat ook hier de afbraak sterk wordt gelimiteerd door de mogelijkheid van transport van nitraat en sulfaat naar en in de veenbasis. Bovendien wordt net als bij de situatie met zuurstof het nitraat en sulfaat tijdens het transport deels gebruikt voor de afbraak van organische stof in de zandondergrond.

Wat betreft krimp en scheurvorming van een organische veenbasis is de conclusie dat bij een permanent natte veenlaag op de veenbasis het gevaar voor scheurvorming afwezig is. Een permanent natte veenlaag is wel cruciaal. De grootste bedreiging van een organische veenbasis is het uitdrogen van veenlaag op de veenbasis. Een droge veenlaag is in de eerste plaats veel lichter dan een natte veenlaag, waardoor het onderdrukken van beginnende scheurvorming in de veenbasis wordt beperkt. Doorgaande uitdroging van de veenbovengrond zal er toe leiden dat uiteindelijk ook de veenbasis sterk gaat uitdrogen en gaat scheuren. Via scheuren in de droge veenlaag en via de scheuren in de veenbasis kan lucht en zuurstof diep doordringen in de veenbasis waardoor degradatie van de organische veenbasis een feit wordt. Atmosferische lucht met zuurstof kan zelfs door minimale scheuren gemakkelijk zijn weg vinden tot in de zandondergrond.

De ervaring met de meetraai in het Wierdense veld is dat in de relatief droge jaren van 2015 en 2016 de grondwaterstand in veenlaag is gedaald tot in de veenbasis. Een zeer ongewenste situatie, waarbij zelfs zuurstof in de zandondergrond is gevonden. Uit de metingen en de modelberekeningen volgt de conclusie dat de vrij dunne veenlaag en de relatief matige weerstand van de veenbasis wel een rol hebben gespeeld, maar dat de hoofdoorzaak de afstroming richting brandgang is geweest. De infiltratie door de bodem van de brandgang en wellicht ook horizontale afvoer via de brandgang resulteerde in een verlies van water uit het veensysteem en een lage freatische grondwater aan het begin van de droge periode. Geconcludeerd kan worden dat voor het hoogveensysteem met veenbasis dit soort "gaten" in de veenbasis een grote bedreiging vormen voor dit hoogveensysteem.

### **Aanbevelingen**

Uit het onderzoek in het Wierdense veld blijkt dat "gaten" in de veenbasis door bijvoorbeeld de brandgang, de infiltratie van het veensysteem in ieder geval plaatselijk sterk kunnen verhogen en daling van de freatische grondwaterstand tot in de veenbasis sterk kunnen bevorderen. Een eerste actie om de situatie te verbeteren zou het opsporen en dichten van deze gaten en lekken in de veenbasis moeten zijn. Welke methoden er zijn om deze gaten te dichten is ons niet bekend en wellicht moet naar goede methoden onderzoek worden verricht. Een andere effectieve methode is een rigoureuze verhoging van de stijghoogte in de zandondergrond. Daarbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de stijghoogte in de zandondergrond varieert en in de zomerperiode meestal op zijn laagst is.

De beoordeling van kwetsbare veensystemen met een veenbasis blijkt maatwerk. Het gebruikte modelinstrumentarium en modelopzet blijkt een krachtig instrument om het systeem te evalueren en te toetsen. Het modelinstrumentarium biedt ook mogelijkheden om

scenario's door te rekenen met huidige en toekomstige (klimaat-)situaties om zo oplossingsrichtingen te vinden om het systeem veel robuuster te maken.

# Literatuur

Aggenbach CJS, Jansen AJM (1991) Vegetatiekartering en hydro-ecologische analyse van het Wierdense Veld (Overijssel). KIWA Onderzoek en Advies, Nieuwegein

Cirkel G, Dorland E, Witte JP (2016) Schijnspiegeldynamiek van heideveentjes: over de complexe relatie tussen stijghoogte en schijnspiegel. *Stromingen* 26, nr 2.

Delft SPJv, Maas GJ, Waal RWd (2015) De Landschapsleutel OnLine. In: Alterra - WageningenUR. <http://landschapsleutel.wur.nl/> 2015

Eggelsmann, R., 1973. Die Rolle der Moore bei der Grundwasserneubildung. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, Jrg.177, Heft 5, s. 134-137.

Hendriks, R.F.A., 1991. Afbraak en mineralisatie van veen. Literatuuronderzoek. Rapport 199, DLO-Staring Centrum, Wageningen.

Hendriks, R.F.A. en J.J.H. van den Akker, 2012. Effecten van onderwaterdrains op de waterkwaliteit in veenweiden. Modelberekeningen met SWAP-ANIMO voor veenweide-eenheden naar veranderingen van de fosfor-, stikstof- en sulfaatbelasting van het oppervlaktewater bij toepassing van onderwaterdrains in het westelijke veenweidegebied. Wageningen, Alterra Wageningen UR, Alterra-rapport 2354.

Jansen AJM, Asmuth JRv, Bakel PJTv, et al. (2013) Het Wierdense Veld: Advies van de Commissie van Deskundigen. Provincie Overijssel/OBN, Zwolle/Driebergen

Kemmers RH, Delft SPJv, Riel MCv, et al. (2011) Landschapsleutel; Leidraad voor natuurontwikkeling. Alterra, onderdeel van Wageningen UR, Wageningen

Kieskamp, A.A.M. A.J.M. Jansen, J. Sevink, A.T.W. Eysink, 2015. Hydro-ecologische systeemanalyse Beerzerveld. Unie van Bosgroepen.

Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks & C.M.J. Jacobs, 2008. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Wageningen, Alterra. Alterra Report 1649.

Luten et al., 1984. Diepe grondbewerking op veengrasland met schalterlaag. Rapport nr. 95, Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij (PR), Lelystad.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Israel. Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3.

Van der Schaaf, S. 1999. Analysis of the hydrology of raised bogs in the Irish Midlands. A case study of Raheenmore Bog and Clara Bog. 375 pp., Diss. Wageningen.

Schaminée JHJ, Stortelder AHF, Westhof V (1995) De Vegetatie van Nederland; Deel 2. Plantengemeenschappen van wateren, moerassen en natte heiden. Opuluspress, Uppsala/Leiden

Sevink J, Delft Bv, Geujen C, et al. (2014) De veenbasis: kenmerken en effecten van ontwatering, in relatie tot behoud en herstel van de Nederlandse hoogvenen; Een literatuurstudie. Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE), Driebergen

Van Genuchten MTh (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.

Vries F de, Brus DJ, Kempen B, et al. (2014) Actualisatie bodemkaart veengebieden, Deelgebied 1 en 2 in Noord Nederland. Alterra Wageningen UR, Wageningen

Waal RWd, Hommel PWF (2013) Provinciaal meetnet verdroging Overijssel; Beschrijving en beoordeling van 56 meetpunten. WUR-Alterra, Wageningen

## Bijlage 1 **Selectie onderzoeksgebied**

Voor de selectie van het onderzoeksgebied zijn voor een aantal hoogveengebieden die volgens de voorbereidende literatuurstudie (Sevink et al 2014) in aanmerking komen de volgende criteria beoordeeld:

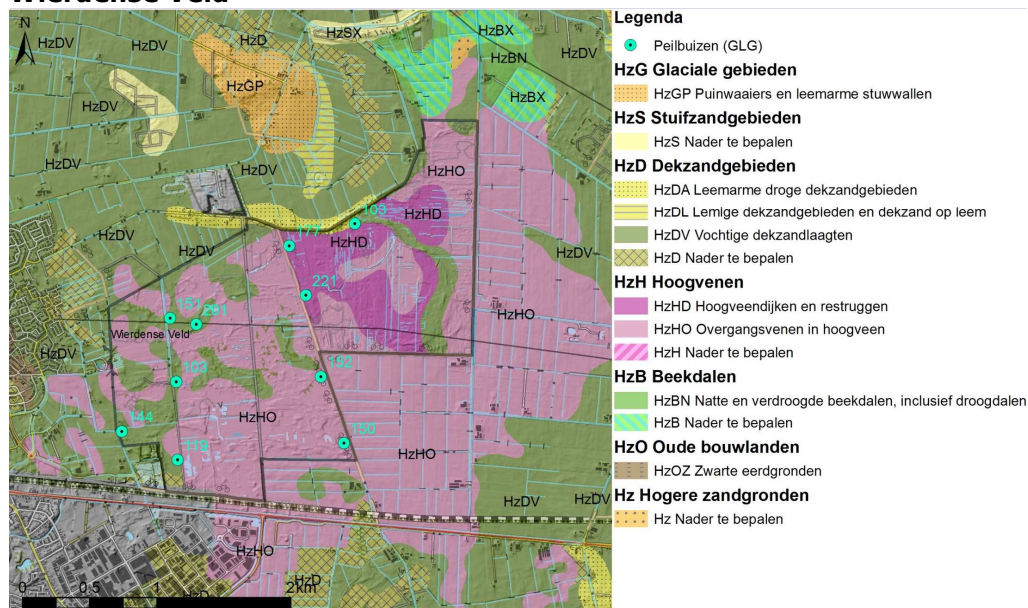
1. Organische veenbasis
2. Regionale stijghoogte > veenbasis
3. Homogene zandondergrond (leemarm of zwak lemig, evt. sterk lemig)
4. (Veenpakket niet zeer dik)
5. Voldoende opp, weinig beïnvloede kern
6. Peilbuizen met voldoende lange meetreeksen
7. Habitattypen aanwezig:
  - o H7110\_A Actieve hoogvenen,
  - o H7120 Herstellende hoogvenen
8. Geohydrologische beschrijving beschikbaar
9. Ontsluiting (ivm aanvoer materiaal)

Hierbij zijn de volgende bronnen geraadpleegd:

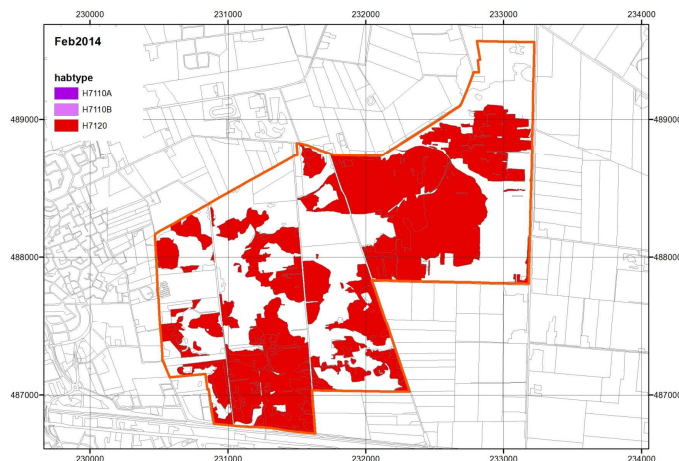
- Landschappelijke Bodemkaart Nederland (Kemmers et al 2011; Van Delft et al 2015)
- Actualisatie bodemkaart veengebieden, Deelgebied 1 en 2 in Noord Nederland (De Vries et al 2014).
- REGIS II v2.1 (DINO)
- Gebiedsanalysen PAS en habitatkaarten
- Peilbuisgegevens DINO (selectie)

Het Wierdense Veld voldoet het beste aan de gestelde criteria en is daarom gekozen als onderzoeksgebied. Hieronder volgt de beoordeling individuele terreinen. Voor de legenda-eenheden van de Landschappelijke Bodemkaart wordt verwezen naar Kemmers et al (2011) en Van Delft et al. (2015):

## Wierdense Veld



Figuur 2 Uitsnede Landschappelijke Bodemkaart Nederland voor Wierdense Veld met de GLG (cm - mv)  
Figure 2 Cut-out Soil Map for the Wierdense Veld with the GLG (cm - mv.)



Figuur 3 Habitatkaart (februari 2014) voor het Wierdense Veld.  
Figure 3 Habitat map (February 2014) of the Wierdense Veld

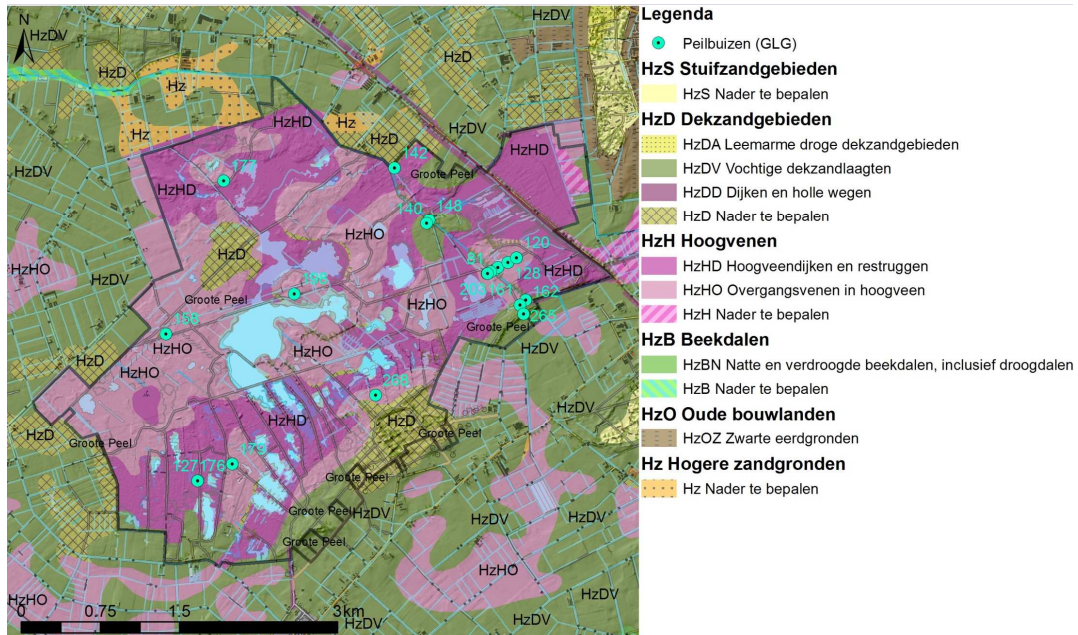
Tabel 1 Beoordeling van kenmerken voor het Wierdense Veld.  
Table 1 Assessment of characteristics of the Wierdense Veld

<b>Kenmerk</b>	<b>Beoordeling</b>
1. Veenbasis	Voornamelijk organisch
2. Stijghoogte	Ja, delen periodiek Droge zomer 1 m onder veenbasis. wegzijging in veenputten en sloten
3. Ondergrond	Leemarm/zwak lemig zand; in zuidoostelijk deel keileem op ca. 10 m (REGIS), lokaal < 120 cm Bodemkaart)
4. Dikte veenpakket	Overwegend < 40 cm, twee kernen 40 – 120, zie ook gebiedsanalyse
5. Omvang	419 ha
6. Peilbuizen	Meerderden beschikbaar
7. Habitattypen	H7120 Herstellende hoogvenen (212 ha; 54%)
8. Geohydrologie	Tomassen et al. 2005; Gebiedsanalyse
9. Ontsluiting	Enkele wegen noord/zuid
Opmerking	Foliescherm aan zuidzijde



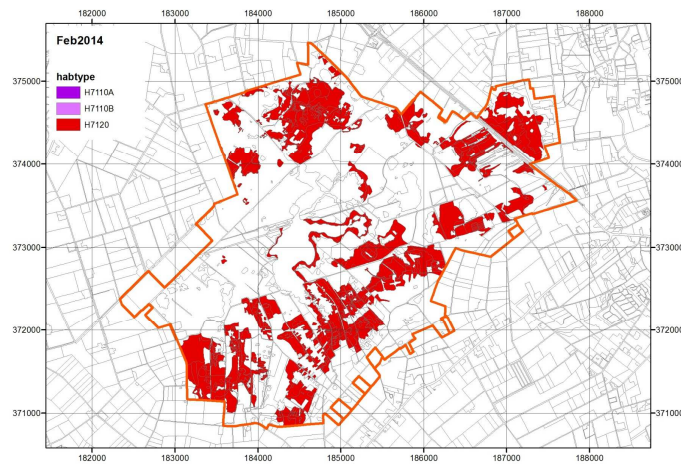


## Grote Peel



Figuur 6 Uitsnede Landschappelijke Bodemkaart Nederland voor de Grote Peel met de GLG (cm - mv.)

Figure 6 Cut-out of the Soil Map of the Grote Peel with the GLG (cm - mv.)



Figuur 7 Habitatkaart (februari 2014) voor de Grote Peel.

Figure 7 Habitat map (February 2014) of the Grote Peel

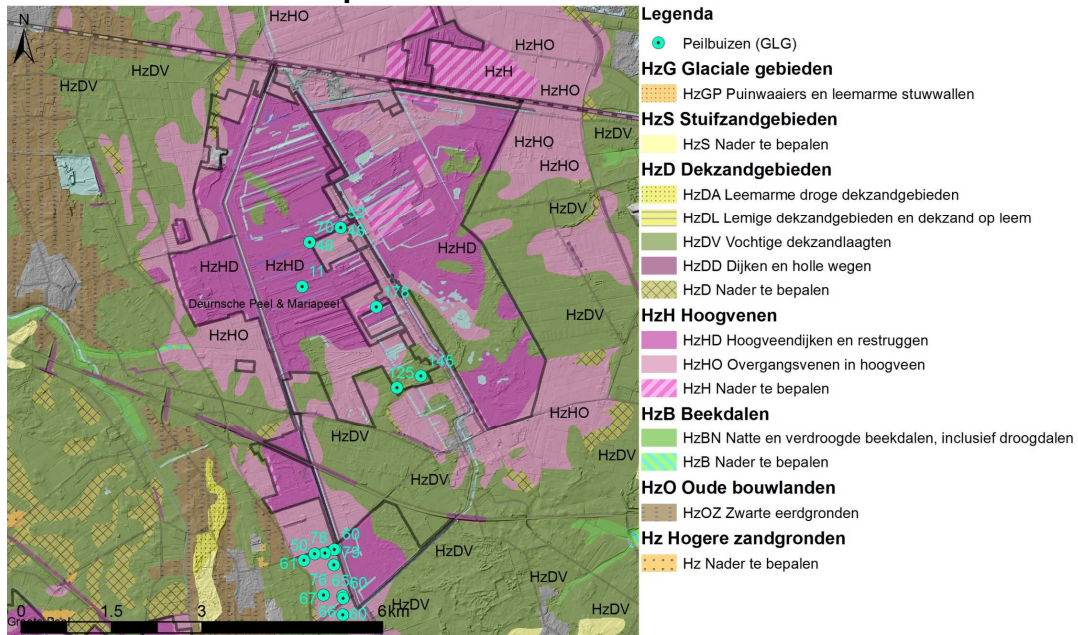
Tabel 3 Beoordeling van kenmerken voor de Grote Peel.

Table 3 Assessment of characteristics of the Grote Peel.

<b>Kenmerk</b>	<b>Beoordeling</b>
1. Veenbasis	Organisch
2. Stijghoogte	Deels
3. Ondergrond	Zand, deels lemig, met leemlagen
4. Dikte veenpakket	Vaak < 40 cm, delen 40 - 120 cm
5. Omvang	1350 ha
6. Peilbuizen	Verspreid, sommige in raaien
7. Habitattypen	H7120 Herstellende hoogvenen (352 ha; 78%)
8. Geohydrologie	
9. Ontsluiting	Redelijk

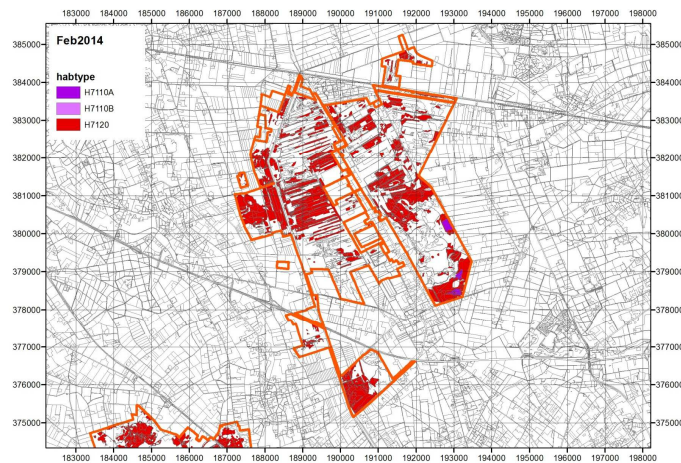


## Deurnsche Peel & Mariapeel



Figuur 8 Uitsnede Landschappelijke Bodemkaart Nederland voor de Deurnsche Peel & Mariapeel met de GLG (cm – mv.)

Figure 8 Cut out of the Soil Map of the Deurnsche Peel & Mariapeel with the GLG (cm - mv.)



Figuur 9 Habitatkaart (februari 2014) voor de Deurnsche Peel e& Mariapeel.

Figure 9 Habitat map (February 2014) of the Deurnsche Peel & Mariapeel.

Tabel 4 Beoordeling van kenmerken voor de Deurnsche Peel & Mariapeel.

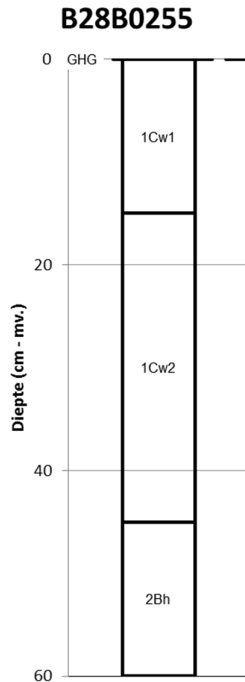
Table 4 Assessment of characteristics of the Deurnsche Peel & Mariapeel

<b>Kenmerk</b>	<b>Beoordeling</b>
1. Veenbasis	Organisch
2. Stijghoogte	Deels in veenbasis, veel buizen boven veenbasis?
3. Ondergrond	Zand
4. Dikte veenpakket	In kern 40 -120 cm, daarbuiten dunner
5. Omvang	2600 ha.
6. Peilbuizen	Beperkt
7. Habitattypen	H7110_A Actieve hoogvenen (11 ha; 1%) H7210 Herstellende hoogvenen (783 ha; 93%)
8. Geohydrologie	
9. Ontsluiting	Beperkt

## Bijlage 2 Beschrijvingen boorpunten

De beschrijving van de boorpunten betreft twee boorpunten die aan de oostzijde van de Westerveenweg zijn gelegen en de boorpunten in de meetraai (zie figuren 5 en 8)

**B28B0255** buis op rugje bij eik. Gws 166 -mv=bb. veendikte 45 cm, vanaf 15 gliede wortels tot 50. Locatie ongeschikt omdat wortels door veenbasis heen gaan.



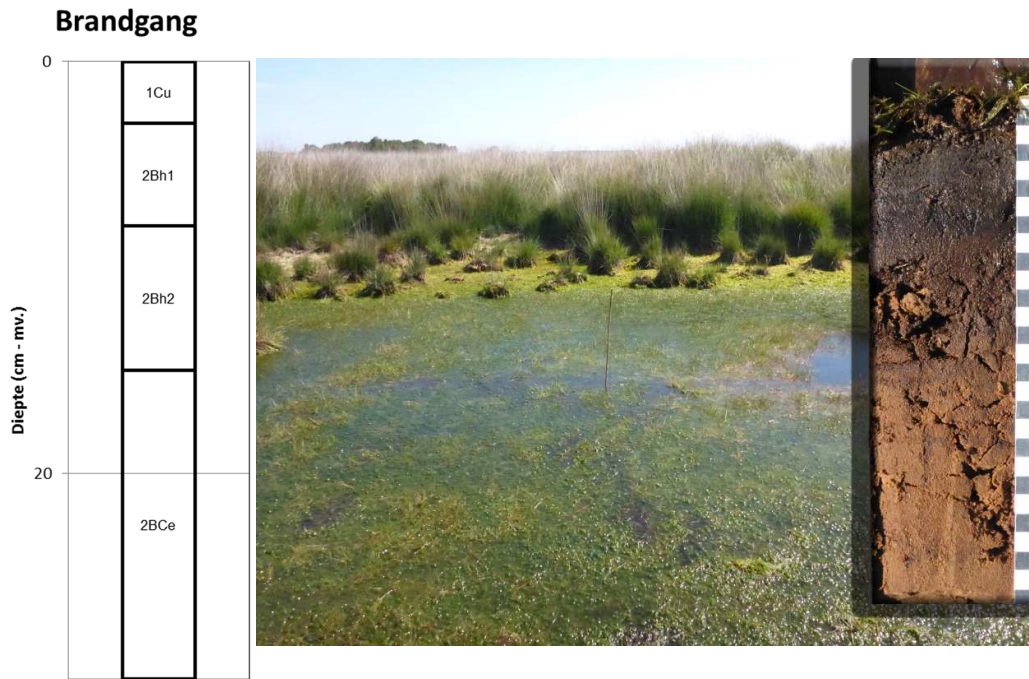
**B28B0256** buis met diver. hooguit 5 cm gliede op podzol  
Punt ligt op dekzandrug met weinig veen. Wel geschikt voor referentie stijghoogtemetingen  
Maaiveld bij B28B0256 = 972 cm + NAP volgens dino 981 cm volgens AHN. Meetpunt (bovenkant buis) = 976 cm + NAP. Dit punt gebruiken als vast punt voor waterpassing.





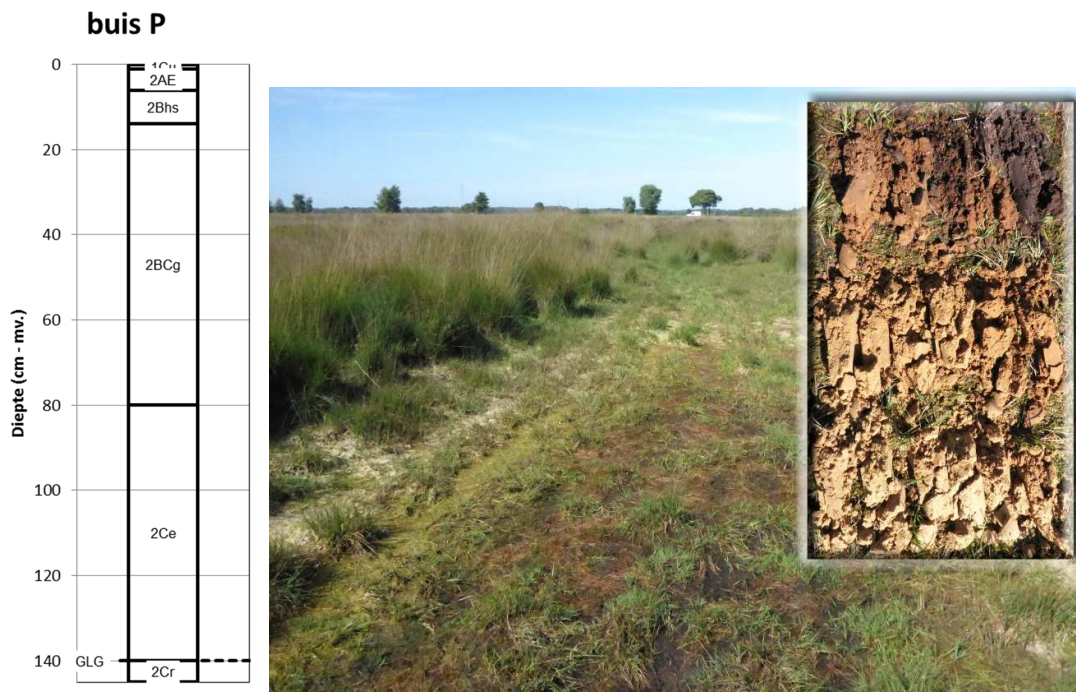
### Meetpunt oppervlaktewater in brandgang

Om het peilverloop van het oppervlaktewater in de brandgang te monitoren is hier een buis geplaatst op de bodem en het profiel daaronder beschreven. In de brandgang blijkt de gliedelaag te ontbreken en vindt stagnatie op op de kazige B-horizont.



### Buis P

Aan het begin van de raai, bij buis P, ontbreekt de veenrest. Zie verder bij A.



## Buis A

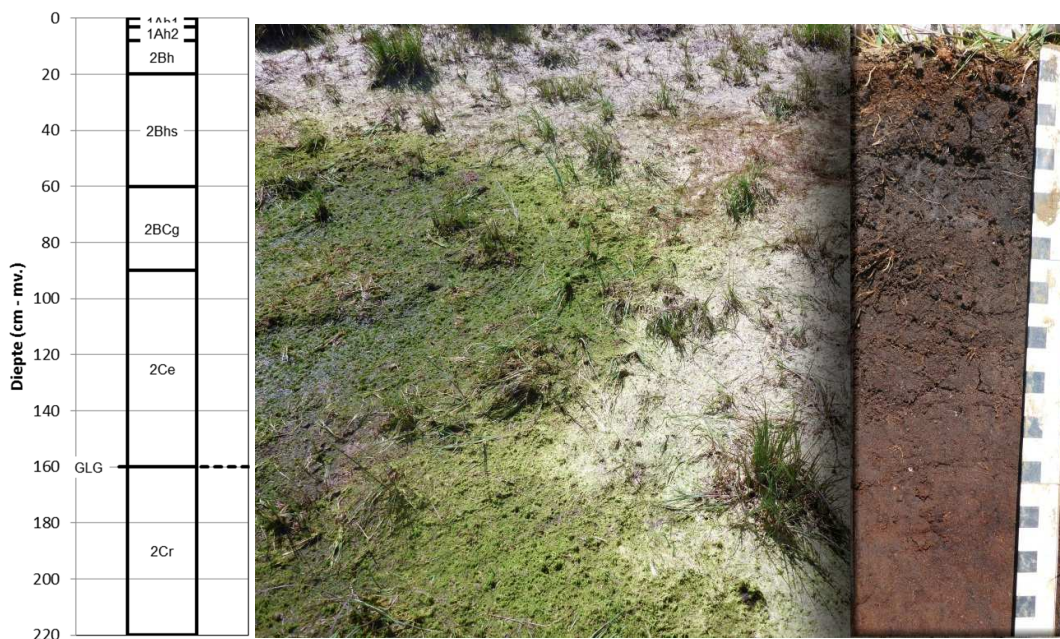


Buis A staat de in brandgang waar een dunne veenrest aanwezig is. Even verder in brandgang (in de lus aan de zuidkant) stagneert water op veenresten en vindt mogelijk veenvorming plaats. In het water groeien Veenmos en Moerasstruisgras. Deze vormen een plakkaat dat bij opdrogen van het water achter blijft (zie foto buis A). Elders in Wierdense veld is in een dergelijke situatie nieuwe hoogveen­vorming vastgesteld (De Waal & Hommel 2013).

De overgang van de brandgang naar veenplateau is ongelijk met geleidelijk oplopende veendikte, waardoor van een duidelijke rand geen sprake is (zie verloop tussen buis A en B).

Bij buis A komt een 8 cm dikke veenrest voor, die mogelijk deels uit gliede bestaat, maar ook uit veraard veen. Daaronder komt een 12 cm dikke kazige B-horizont voor waarop tijdelijk water kan stagneren. In juli 2015 stond het punt droog, maar aan de vegetatie is te zien dat hier ook enkele dm's water op kunnen staan. Ca. 5 meter naar het westen lijkt veenrest te ontbreken. Toetreding van lucht onder de veenbasis is vooral te verwachten vanaf delen van de slenk waar geen veenrest voor komt, of vanaf de ten westen gelegen dekzandrug. Door metingen in luchtkamers zal geprobeerd worden daar inzicht in te krijgen.

### buis A

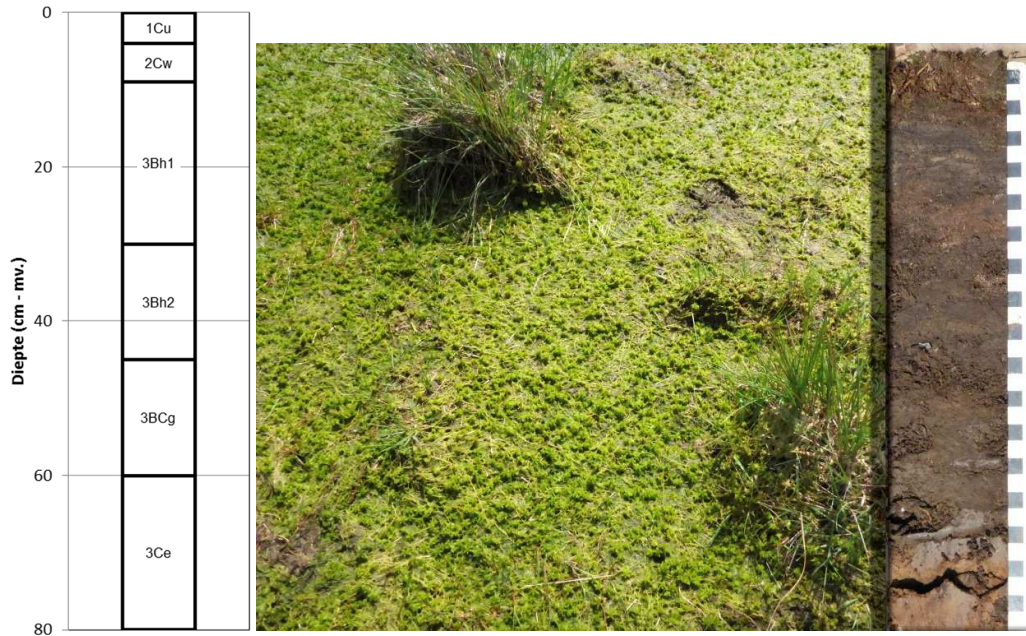




### Buis Q

Buis Q ligt ook in de voormalige brandgang, op een iets lager punt dan A en P waardoor hier een dunne laag veenmos voorkomt. Tot 30 cm komt hier een kazige B-horizont voor die enigszins gelaagd is. Omdat dit profiel dicht bij de rand gestoken is, is deze gelaagdheid mogelijk ontstaan door de graafwerkzaamheden voor de brandgang of latere verspoeling van het materiaal. Op deze kazige B komt een laagje gliede en een wortelmat voor.

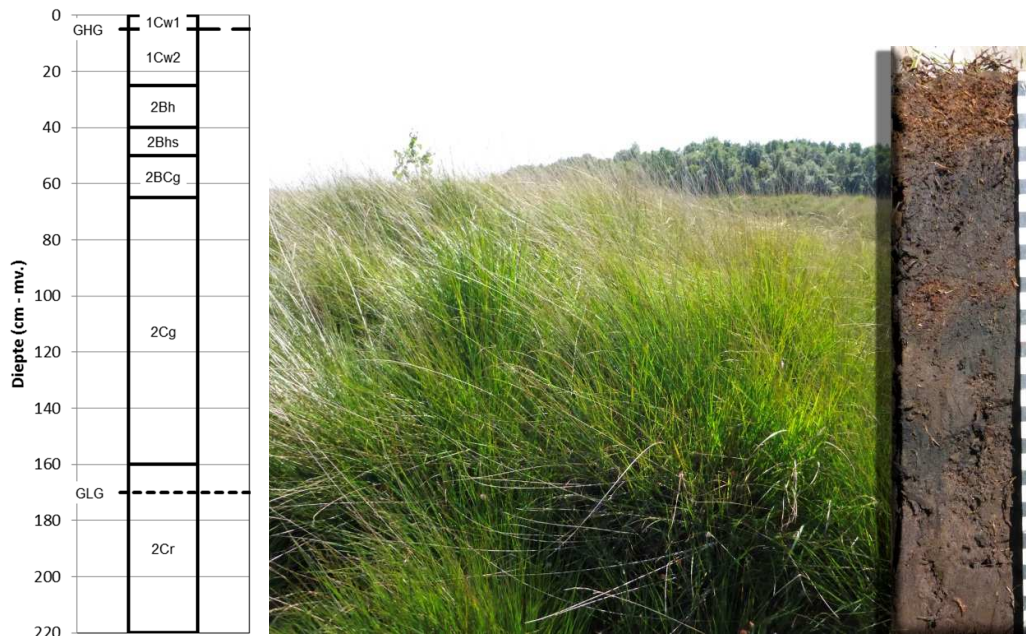
#### buis Q



### Buis D

Buis D ligt in de rand van het veenrestplateau en is zichtbaar beïnvloed door de graafwerkzaamheden (zie foto). Tot 25 cm komt een verwerkte laag voor die bestaat uit gliedemateriaal, vermengd met resten veenmosveen en B-materiaal. De bovenste 5 cm bestaan uit een wortelmat van Pijpestrootje, de dominante plantensoort in deze zône.

#### buis D



## Buis B

Buis B staat ca 7 meter van de rand van de brandgang. Tussen deze rand en de buis ligt nog een iets hogere strook, waar mogelijk materiaal is gestort bij graven van de brandgang in 1959. Op de hoogtekaart (fig 5) is deze rand vooral goed zichtbaar langs de zuidrand van het veenplateau. Het veenmosveen is nog sterk waterhoudend en lijkt vanaf 6 cm gereduceerd en heeft een roodbruine kleur. De bovenste laag is wel wat verweerd en donkerbruin. Van 55 tot 65 cm komt een zwarte, iets zandige gliedelaag voor op een 15 cm dikke donkerbruine kazige B-horizont. Deze lagen zijn erg compact en waarschijnlijk slecht doorlatend. Het ontbreken van actieve veenvorming en de iets verweerde bovenlaag wijzen op wegzijging of oppervlakkige afstroming van neerslagwater. De onderliggende Bhs en BC horizont zijn roodbruin en er lijkt ijzer ingespoeld.

Van dit profiel zijn enkele organische stofmonsters genomen:

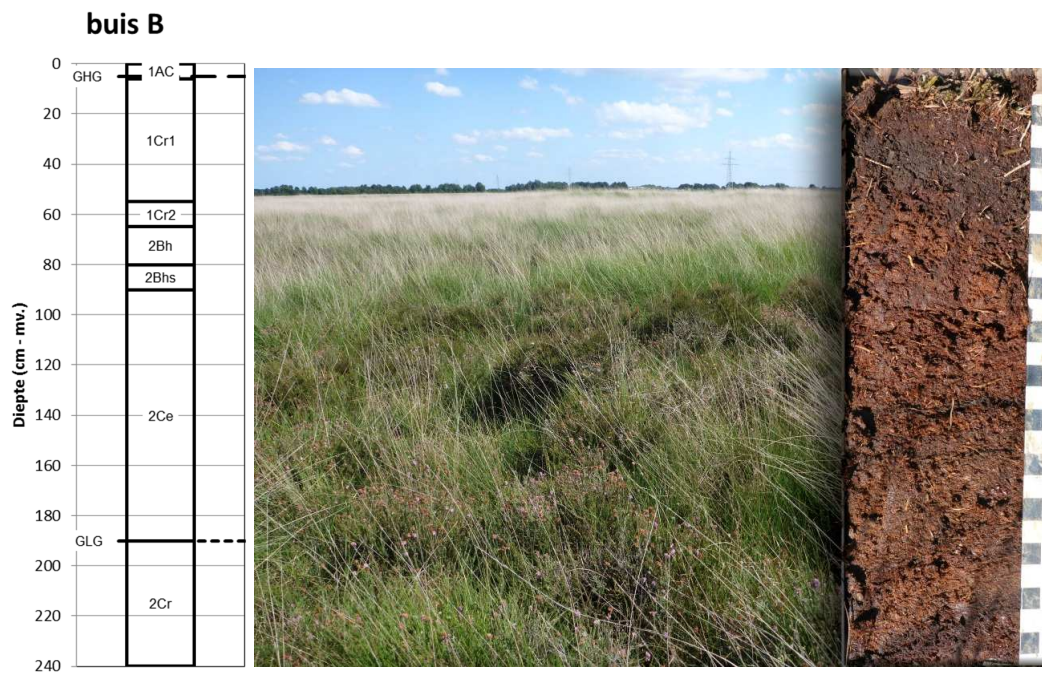
Gliede: 31,6%

Kazige B: 11,7%

B-horizont: 3,4%

Ondergrond: 0,9%

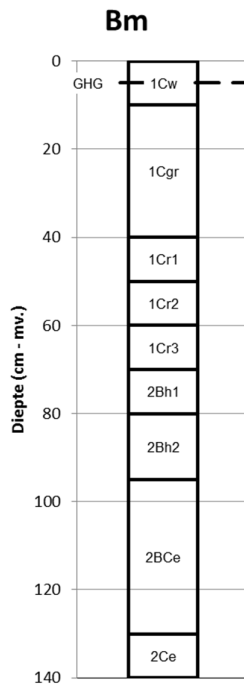
De GLG in het zand onder het veen bevindt zich 125 cm onder de veenbasis.





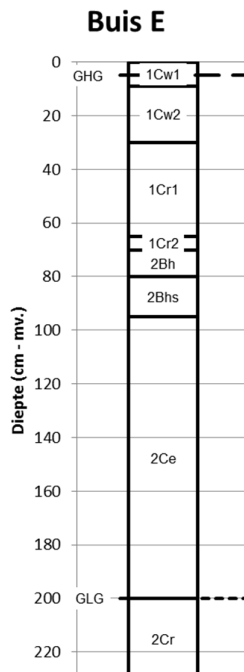
### Bm (profielkuil)

De profielkuil is gegraven ten zuiden van buis B, op vergelijkbare afstand van de rand. Hierin is de gelaagdheid van het veenpakket goed zichtbaar. In de oranje laag boven de donkergrijze gliedelaag treedt water uit. Het zand in de ondergrond is vochtig. De Bh-horizont is zeer hard verkit en was daarom niet te bemonsteren.



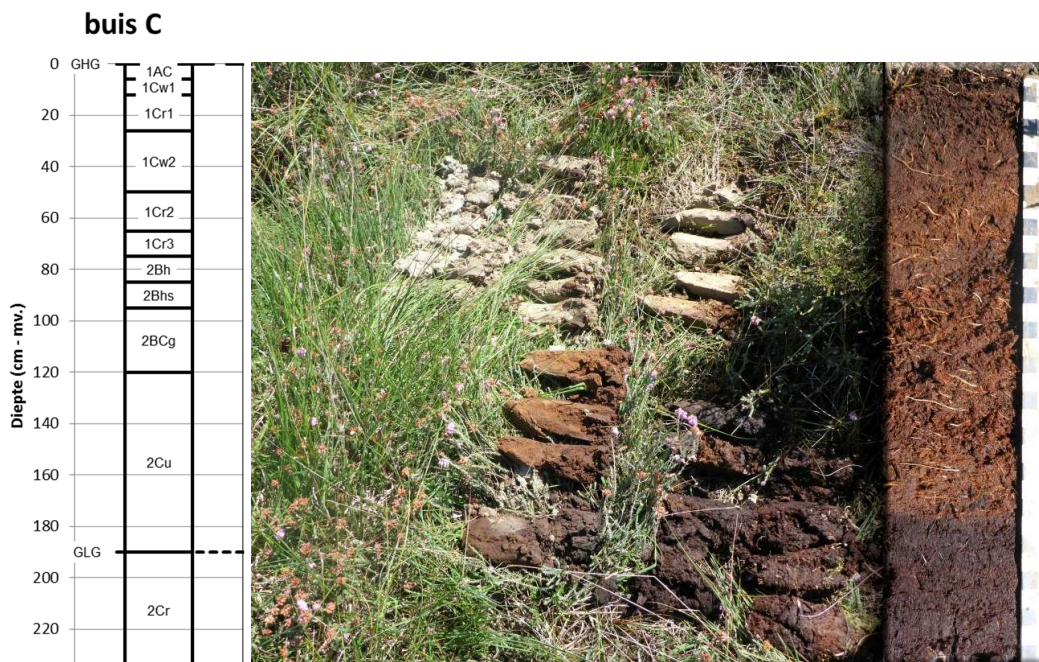
### Buis E

Bevindt zich tussen B en C in en heeft een vergelijkbare profielopbouw. Opvallend is een lichter gekleurde laag (Cw1) op een donkerder verweerde laag (Cw2). Bij buis B ontbreekt deze lichte laag en bij buis C is deze dikker en minder verweerd. Hoewel aanwijzingen voor levend hoogveen ontbreken lijkt de aangroei van jong veenmosveen groter te zijn naarmate de afstand tot de rand toeneemt.



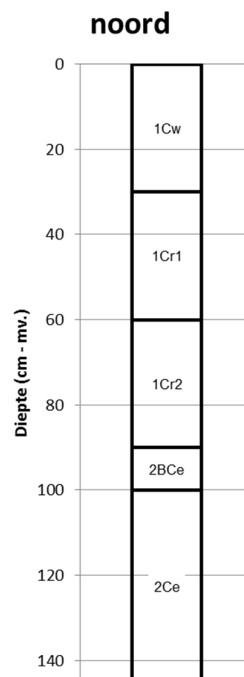
### Buis C

Buis C staat ruim 30 meter van de rand van het veenplateau en heeft in grote lijnen een vergelijkbaar profiel als buis B. Ook hier is de bovenste laag wat verweerd en vrij compact door uitdroging. Over het algemeen is dit pakket echter wel verzadigd met water. Opvallend is een scherpe grens op 26 cm waaronder donkerder roodbruin deels veraard veen met resten van veenpluis (lok) voorkomt. Kennelijk is er een eerdere veraardingsfase geweest, waarna de veengroei toch weer is verder gegaan. Boven de gliedelaag die op 65 cm begint, komt een 15 cm dikke laag niet veraard zeggeveen voor, wat wijst op tijdelijk wat voedselrijkere en meer gebufferde omstandigheden. De GLG ligt 115 cm onder de veenbasis.



### Meetpunt noord

Het extra punt in het noorden, bij de Schaddenbeltsweg is gekozen om het effect van aanvoer van nitraat en sulfaat via grondwater onder de veenbasis te kunnen bepalen. Uit schaarse metingen in de omgeving kon opgemaakt worden dat onder de veenbasis sulfaat voorkomt. Bij het uitboren van het profiel werd ook een sulfidegeur geroken. Metingen in een eerste watermonster bevestigen dit niet. In dit profiel komt een 30 cm dikke gliedelaag voor (60-90 cm), maar een kazige B en een verkitte Bh-horizont ontbreken.



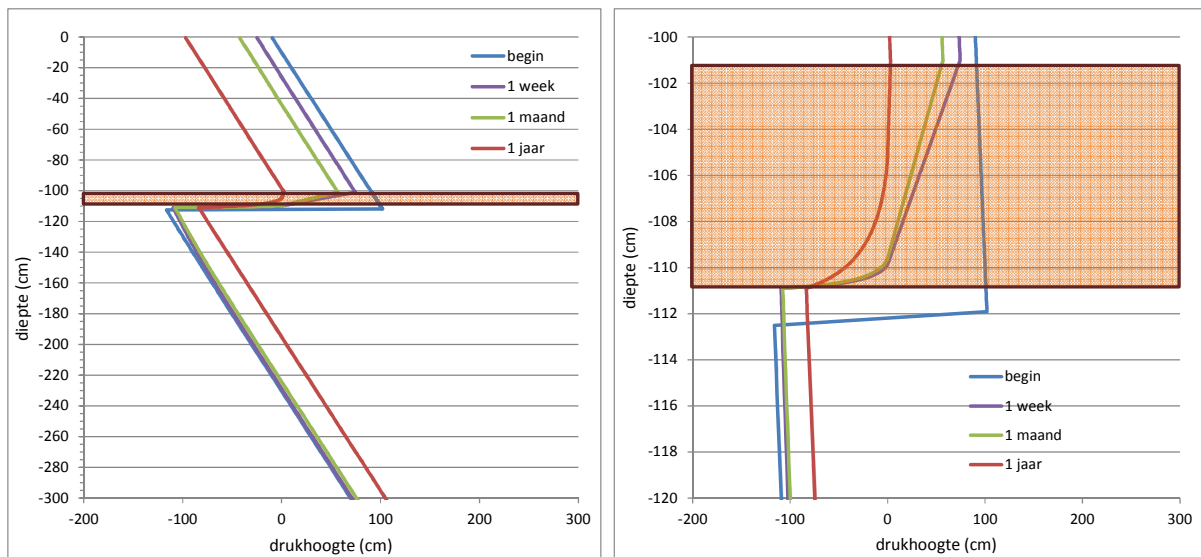
## Bijlage 3 De simulatiemodellen SWAP en ANIMO

### 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 (Van Dam et al., 2008; Kroes et al., 2008; [Website SWAP](#)). Het model wordt veelvuldig ingezet in projecten van de WUR en wereldwijd toegepast. Het vormt de hydrologische basis van het model STONE waarmee de mestwetgeving wordt geëvalueerd.

Verticale waterstroming in de bodemkolom wordt berekend met de Richards' vergelijking die fysisch is gebaseerd. 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 met dikte van 0,1-10 cm. Temporele discretisatie wordt verkregen met een dynamische tijdstapgrootte van  $10^{-7}$  tot 0,2 dag, afhankelijk van de dynamiek van het doorgerekende systeem.

Drukhoogte- en bodemvochtprofielen in de diepte in een kolom met bodemlagen met verschillende eigenschappen voor waterretentie en doorlatendheid zijn met het model goed te berekenen. Bijvoorbeeld een zeer slecht doorlatend laagje met relatief geringe dikte waarop een waterkolom staat in een goed doorlatende laag en dat aan de onderzijde wordt begrensd door een goed doorlatende (zand)laag waarin onderdruk heerst en luchttoevoer vanuit de randen heeft plaatsgevonden, is eenvoudig en snel door het model te berekenen (zie figuur).



Voorbeeld resultaat met SWAP: Drukhoogteverloop met de diepte over een 'veenbasis' met een doorlatendheid van 0,003 cm/d. Bruinige vlak is de diepte waarover de veenbasis (10 cm dik) zicht uitstrekt, 101-111 cm. De curven laten zien hoe het drukhoogteverloop zich in de tijd instelt.

Example of the result with SWAP: Pressure gradient versus depth over a peat base with a permeability of 0.003 cm/d.

Sterk punt van SWAP is de uitgebreide beschrijvingen van de waterwisseling met de randomeinen: atmosfeer aan de bovenrand, 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 oiv stijghoogte/drukhoogte) realistisch worden gesimuleerd.

Belangrijk aspect voor dit veenbasis-project is de uitbreiding van het model met beschrijving van zwel en krimp van de bodemmatrix en preferentieel transport van water door de krimpscheuren en andere macroporiën (uitvoerig beschreven door Hendriks in Kroes et al., 2008). Voor beschrijving van de krimp-karakteristiek van venig bodemmateriaal (veen, kleiig veen, zandig veen, venige klei of venig zand) is een wiskundige vergelijking ontwikkeld en gebruikt in het model (Hendriks, 2004).

## **Ad 2. ANIMO**

ANIMO (Agricultural Nutrient Model) is een dynamisch procesgeoriënteerd model dat is ontwikkeld om de relaties te kwantificeren tussen bemestingsniveau, bodemgebruik en de uitspoeling van de nutriënten stikstof en fosfor naar grond en oppervlaktewater. Het model is geschikt voor een groot bereik van bodemtypen onder zeer verschillende hydrologische condities (Groenendijk et al., 2005; Renaud et al., 2005; [Website ANIMO](#)). ANIMO vormt de kern van het model STONE waarmee de mestwetgeving wordt geëvalueerd.

Hart van ANIMO is de Conservation and Transport Equation (CTE-vergelijking), de wiskundige vergelijking die behoud van massa en verticaal transport van opgeloste stoffen beschrijft. ANIMO lost de CTE-vergelijking numeriek op met een semi-analytische benadering (Groenendijk et al., 2005). Deze benadering maakt grote tijdstappen mogelijk van 1-10 dagen (1 d in deze studie). Fysische dispersie wordt hierbij benaderd door de numerieke dispersie. Deze wordt geregeld met de dikte van de compartimenten, die bovenin het profiel 5-10 cm is. Waterbalansgegevens nodig voor oplossen van de CTE-vergelijking worden op dagbasis per compartiment aangeleverd door SWAP.

De organischestof/koolstof(C)kringloop is de hoofdkringloop in ANIMO; de kringlopen van stikstof (N) en fosfor (P) zijn gebaseerd op de C-kringloop. Dit maakt simuleren van uitspoeling van opgeloste (organische) C-, N- en P-verbindingen vanuit veenbodems mogelijk. Transformatie, accumulatie en transport zijn de belangrijke interne processen van de stofkringlopen.

Addities en initiële voorraden van organische materialen aan/in de bodem (zoals veen) kunnen worden beschreven als 'verse organische materialen'. De eigenschappen van deze materialen worden bepaald door hun samenstelling uit 'organische klassen'. Deze klassen worden gekenmerkt door de ingevoerde waarden van de eigenschappen eerste-orde-omzettingssnelheidsconstante, assimilatie-efficiëntie en N- en P-gehalte.

De algemene benadering bij simulaties van veengronden met ANIMO is de organische stof van veen te definiëren als een 'vers' materiaal dat uit twee of meer organische klassen bestaat met verschillende afbraaksnelheden en N-gehalten.

In ANIMO worden (bio)chemische omzettingsprocessen in de bodem beïnvloed door de omgevingsfactoren aeratie, vochtgehalte, temperatuur en zuurgraad. Het effect van elke factor wordt beschreven met een responsfunctie. Actuele snelheidsconstanten worden per bodemcompartiment verkregen door vermenigvuldiging van de potentiële constanten met alle responsfuncties. De responsfunctie voor aeratie wordt berekend als: 1 minus de fractie partiële anaerobiosis. De laatste wordt bepaald door een module die verticale en radiale diffusie van zuurstof berekent op basis van vochtgehalten en zuurstofvraag. Hierbij wordt de aanwezigheid van nitraat als alternatieve elektronenacceptor meegenomen.

Het model is uitgebreid met de simulatie van de maaiveldvaling in veengronden ten gevolge van afbraak van het veen en de emissie van de broeikasgassen CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O. Methanogenese en oxidatie van methaan, N<sub>2</sub>O-productie en -reductie, en transport van deze

gassen door de verticale bodemkolom door simultaan transport door advectie en diffusie in de waterfase en de luchtfase van de bodem zijn in het model ingebouwd (Hendriks et al., in prep.).

Voor het onderzoeken van de effecten van onderwaterdrains - voor het behoud van laagveen - op de nutriëntenuitspoeling is de uitspoeling van sulfaat in ANIMO ingebouwd (Hendriks en Van den Akker, 2012). Sulfaat is van belang voor het proces van interne eutrofiëring in waterkolom en waterbodem van veensloten. In ANIMO zijn de hoofdprocessen van de sulfaathuishouding in veenweiden ingebouwd: oxidatie van pyriet, transport en uitspoeling, en reductie van sulfaat. Hierbij is sulfaat volledig ingebed in de interactie tussen de kringlopen van C, N en P: als zuurstofverbruikende reductor in de vorm van pyriet en als alternatieve electronacceptor naast nitraat in de vorm van oxidator sulfaat.

## Bijlage 4 Curven van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken

### Wijze van presentatie van de waterretentie- en de doorlatendheidskarakteristieken

De waterretentie- en de doorlatendheidskarakteristieken zijn bepaald met behulp van de verdampingsmethode en worden beschreven met de volgende door Van Genuchten (1980) opgestelde empirische vergelijking:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^{l-1/n}}$$

De doorlatendheidskarakteristiek wordt beschreven met de volgende vergelijking (Van Genuchten, 1980):

$$K(h) = K_s \frac{((1 + |\alpha h|^n)^{l-1/n} - |\alpha h|^{n-1})^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{(l-1/n)(l+2)}}$$

Het subscript  $s$  heeft betrekking op de waarden van het vochtgehalte  $\theta$  en de doorlatendheid  $K$  bij verzadiging. Het subscript  $r$  heeft betrekking op de restwaarde van het vochtgehalte  $\theta$ .

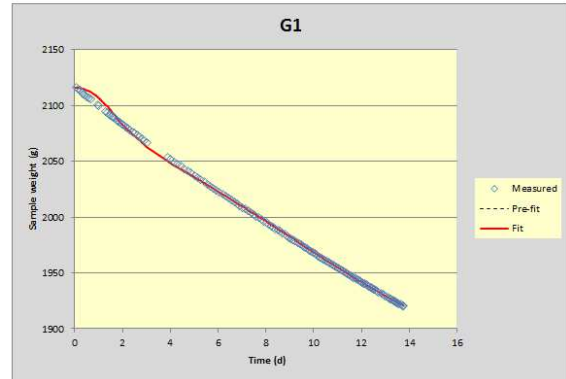
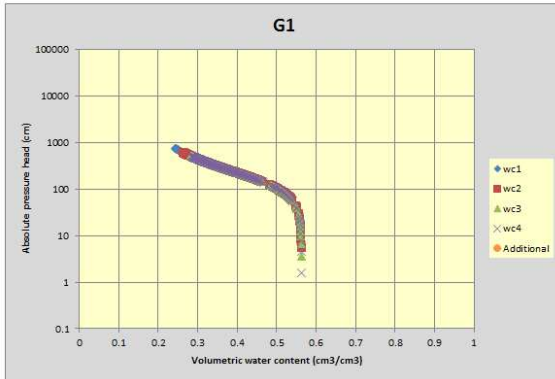
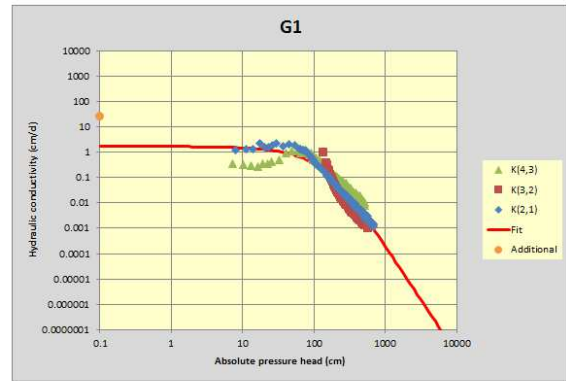
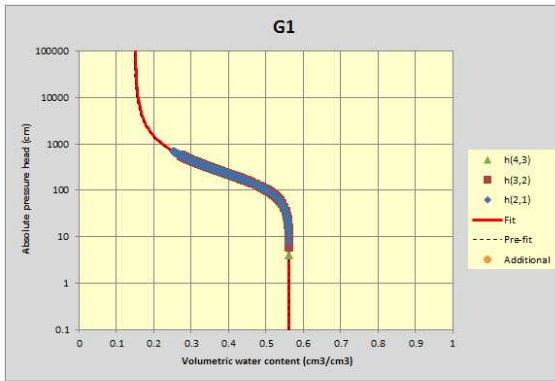
Per monster zijn de karakteristieken in grafieken gegeven en in een tabel zijn de Van Genuchten parameters gegeven. In de tabel zijn:

WCr = $\theta_r$	restvochtgehalte
WCs = $\theta_s$	vochtgehalte bij verzadiging
Alpha = $\alpha$	vormfactor
N = $n$	vormfactor
M = $m$	vormfactor
Lambda = $l$	vormfactor
Ks = $K_s$	waterdoorlatendheid bij verzadiging

# Monster G1

## RESULTS

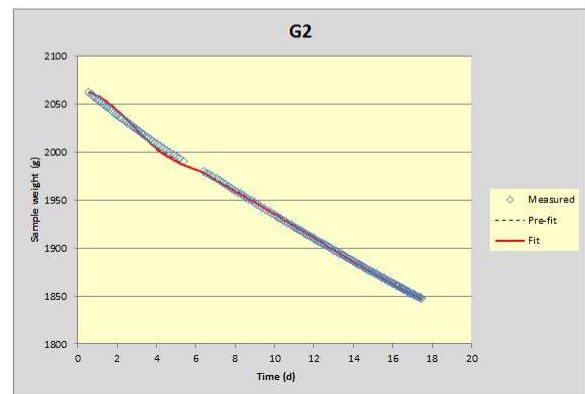
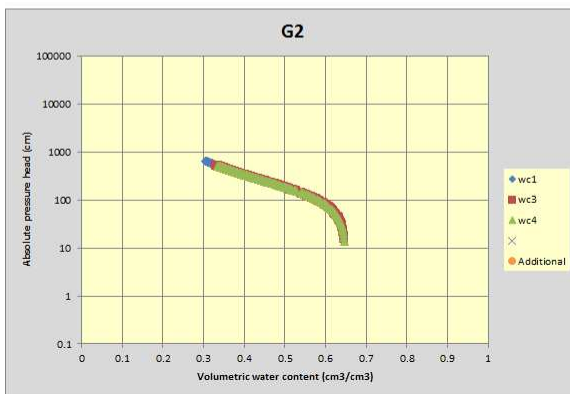
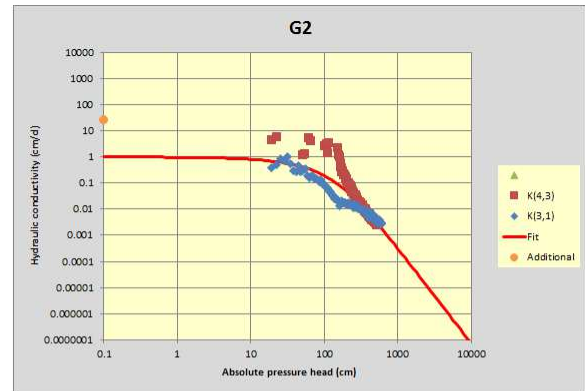
WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.15015
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.5624
Alpha	(1/cm)	0.00598
N	(-)	1.96043
M	(-)	0.48991
Lambda	(-)	0.36156
Ks	(cm/d)	1.72503



# Monster G2

## RESULTS

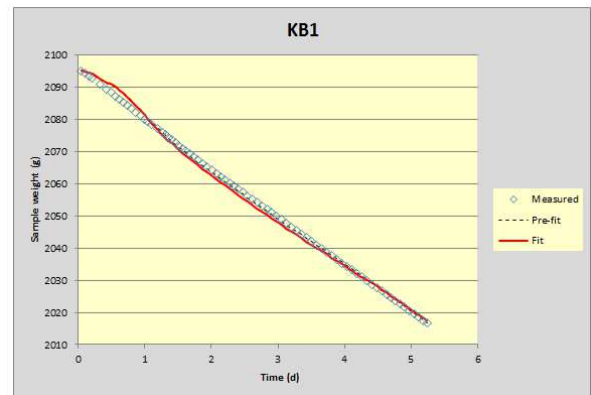
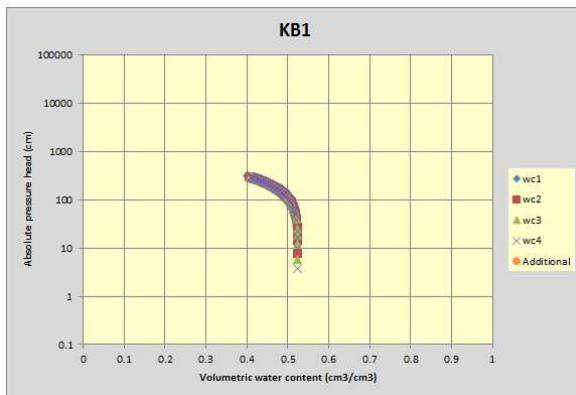
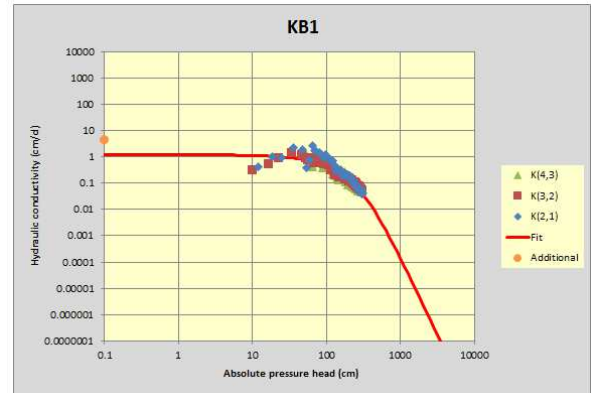
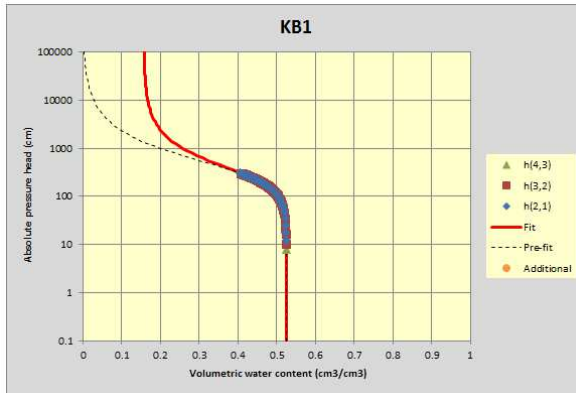
WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.14385
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.64921
Alpha	(1/cm)	0.00586
N	(-)	1.8172
M	(-)	0.4497
Lambda	(-)	0.01962
Ks	(cm/d)	1.00808





# Monster KB1

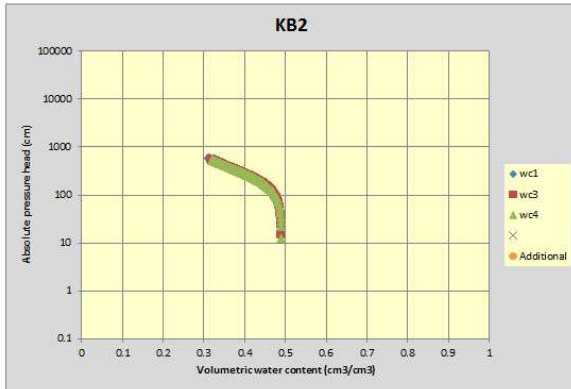
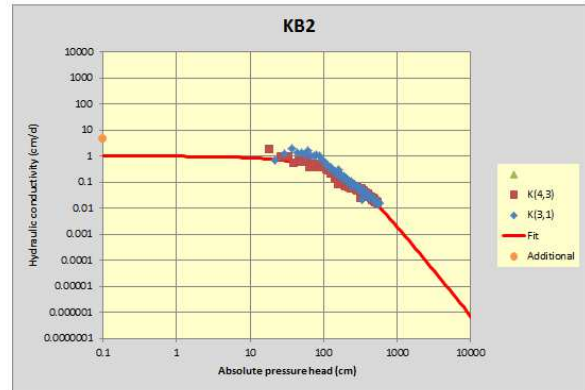
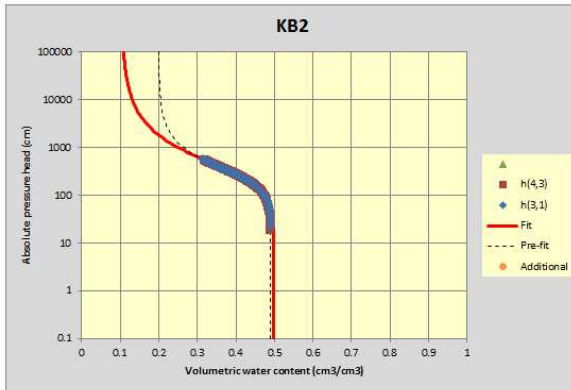
RESULTS		
WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.15681
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.52532
Alpha	(1/cm)	0.00353
N	(-)	1.99544
M	(-)	0.49886
Lambda	(-)	1.99547
Ks	(cm/d)	1.2296



# Monster KB2

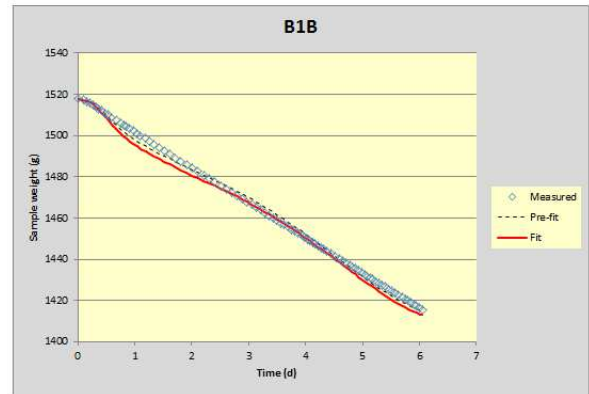
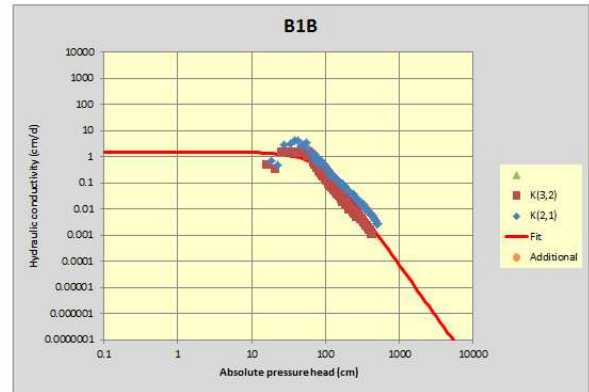
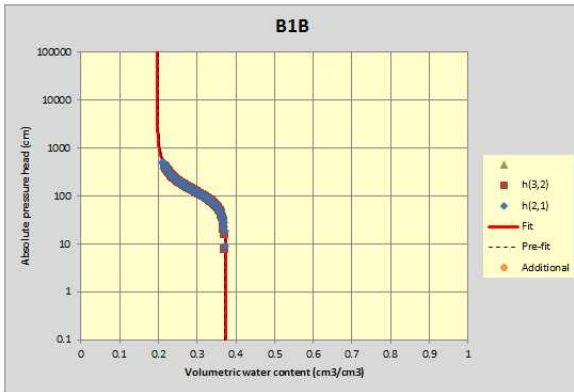
## RESULTS

WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.10418
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.49805
Alpha	(1/cm)	0.00351
N	(-)	1.75089
M	(-)	0.42886
Lambda	(-)	0.0001
Ks	(cm/d)	1.02892



# Monster B1B

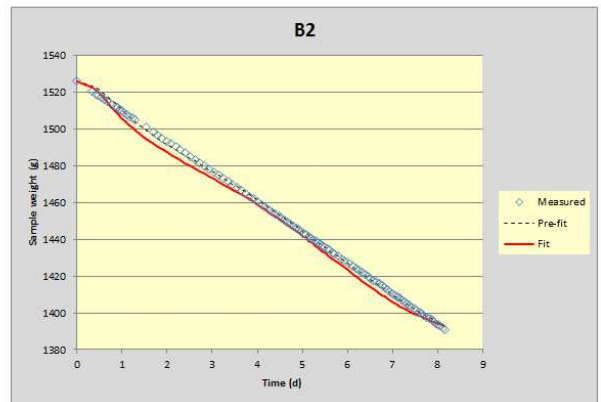
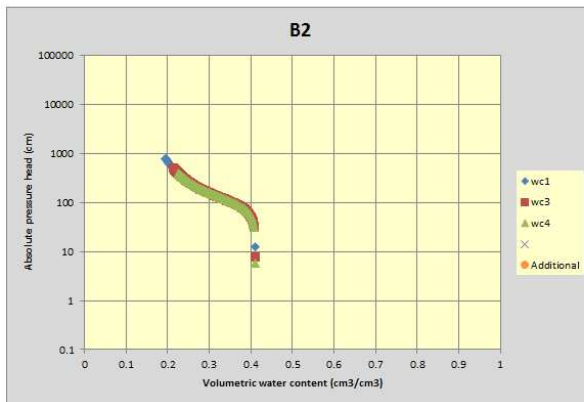
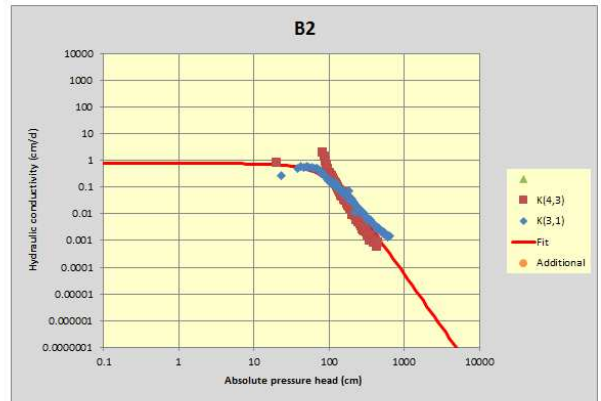
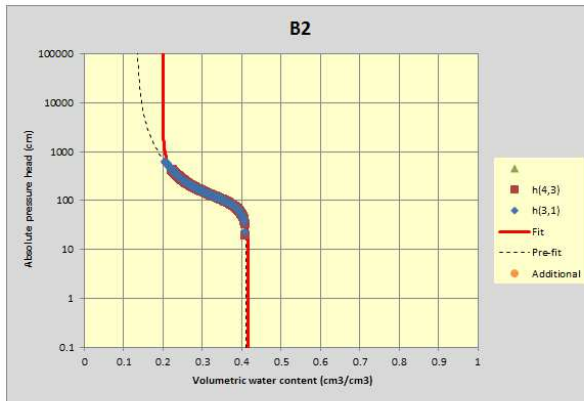
RESULTS		
WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.19682
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.37385
Alpha	(1/cm)	0.00967
N	(-)	2.53419
M	(-)	0.6054
Lambda	(-)	-0.7281
Ks	(cm/d)	1.58238



# Monster B2

## RESULTS

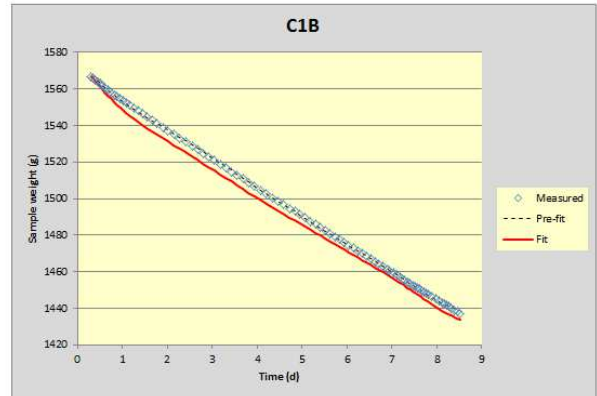
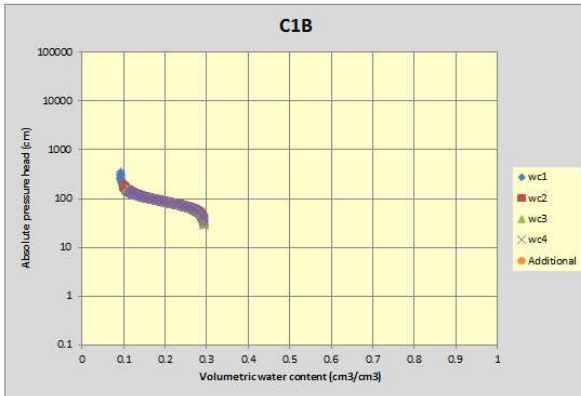
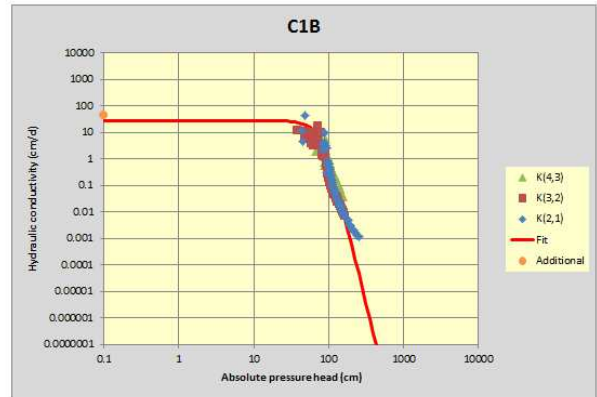
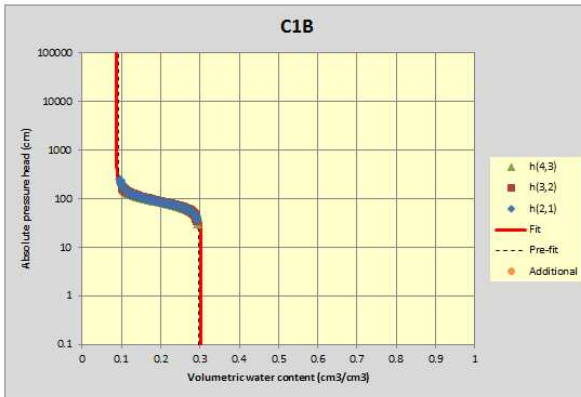
WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.19935
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.41603
Alpha	(1/cm)	0.00872
N	(-)	2.68499
M	(-)	0.62756
Lambda	(-)	-0.82248
Ks	(cm/d)	0.7718



# Monster C1B

## RESULTS

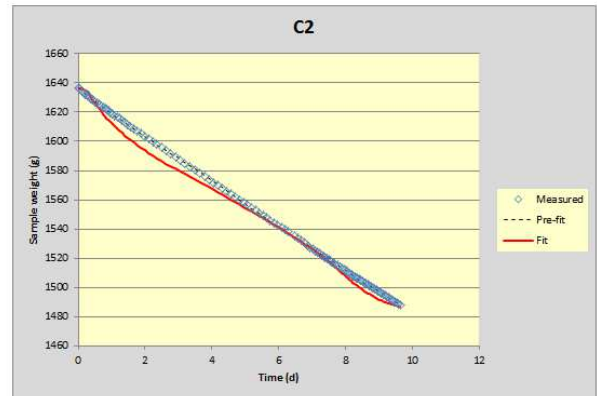
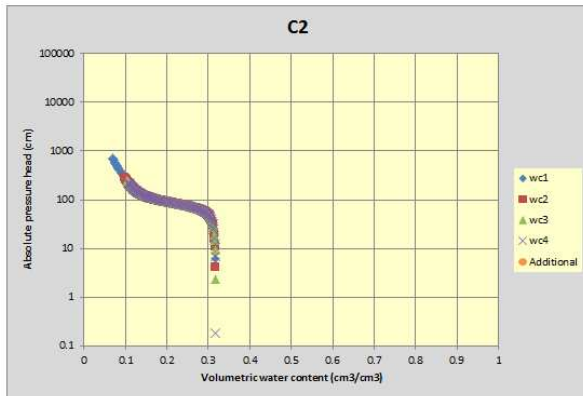
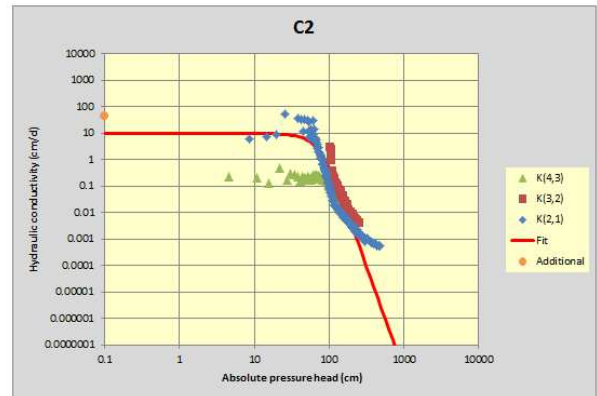
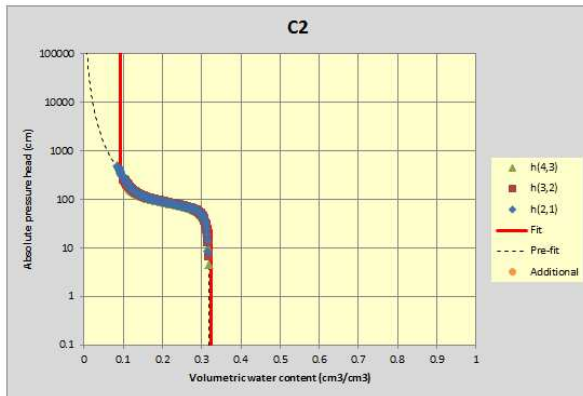
WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.08793
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.30296
Alpha	(1/cm)	0.01232
N	(-)	4.67084
M	(-)	0.78591
Lambda	(-)	0.54
Ks	(cm/d)	28.2269



# Monster C2

**RESULTS**

WCr	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.09298
WCs	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.32425
Alpha	(1/cm)	0.01257
N	(-)	3.96836
M	(-)	0.74801
Lambda	(-)	0.0001
Ks	(cm/d)	9.73872



ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

**Het Kennisnetwerk Ontwikkeling Beheer Natuurkwaliteit:**

- is een onafhankelijk en innovatief platform waarin beheer, beleid en wetenschap op het gebied van natuurherstel en -beheer samenwerken;
- ontwikkelt en verspreidt kennis met als doel het structureel herstel en beheer van natuurkwaliteit.



**Kennisnetwerk OBN wordt gecoördineerd door de VBNE en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en BIJ12**

**Vereniging van bos- en natuurterreineigenaren (VBNE)**

Princenhof Park 9  
3972 NG Driebergen  
0343-745250

drs. W.A. (Wim) Wiersinga  
Adviseur Plein van de kennis/  
Programmaleider Kennisnetwerk OBN  
0343-745255 / 06-38825303  
w.wiersinga@vbne.nl

M. (Mark) Brunsveld MSc  
Programma-medewerker Kennisnetwerk OBN  
0343-745256 / 06-31978590  
m.brunsveld@vbne.nl