

KWR 2025.053 | Juni 2025

# Ontwikkeling van een veenmodule voor de Waterwijzer Natuur

**KWR**

Bridging Science to Practice

**stowa**



Rijkswaterstaat  
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat





## Colofon

### Ontwikkeling van een veenmodule voor de Waterwijzer Natuur

KWR 2025.053 | Juni 2025

#### Opdrachtnummer

404722/001

#### Projectmanager

Edu Dorland

#### Opdrachtgever

STOWA & Rijkswaterstaat-WVL

#### Auteurs

Jelmer J. Nijp, Yuki Fujita, Janine A. de Wit, Ruud P. Bartholomeus, Flip J.P.M. Witte

#### Kwaliteitsborger

Edu Dorland

#### Keywords

Waterwijzer Natuur, ecohydrologie, bodemvormende processen, veen, model, klimaatverandering, klimaatmitigatie

Jaar van publicatie  
2025

Meer informatie  
Dr. Jelmer Nijp  
T +31 30 606 9630  
E [jelmer.nijp@kwrwater.nl](mailto:jelmer.nijp@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)



Juni 2025 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

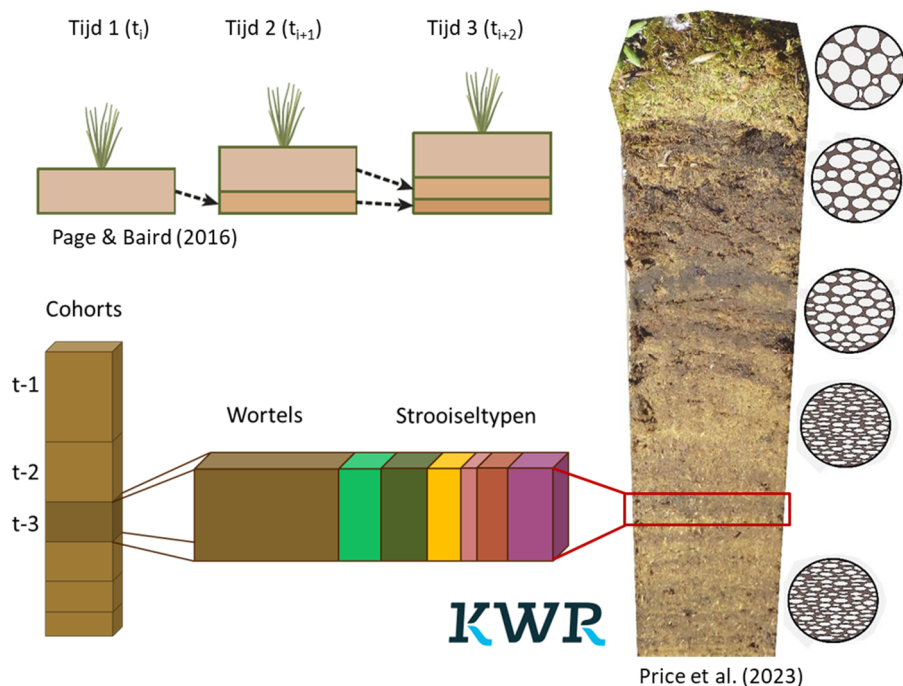
# Samenvatting

## Achtergrond

Door klimaatverandering, de watertransitie, 'bodem en water sturend', stikstofdepositie, ruimtelijke adaptatie, vernatting, en andere toekomstige ontwikkelingen zal de waterhuishouding in en om natuurgebieden veranderen. Om objectief en gestandaardiseerd te voorspellen hoe terrestrische natuur zich kan ontwikkelen onder invloed van toekomstig waterbeheer en klimaatverandering, worden effectvoorspellingen uitgevoerd met Waterwijzer Natuur (WWN). Uit eerder onderzoek is gebleken dat de voorspellingen van de WWN met de nodige onzekerheid gepaard gaan voor laagveenmoerassen, beekdalen, en petgaten. De oorzaak van deze onzekerheid is dat in modellen de bodem als constante wordt beschouwd, terwijl juist in organische bodems door afbraak en opbouw van nieuw veen de bodemeigenschappen zeer snel kunnen veranderen. De verandering in bodemeigenschappen werkt door in standplaatscondities en daarmee de voorspelde vegetatie.

## Doel

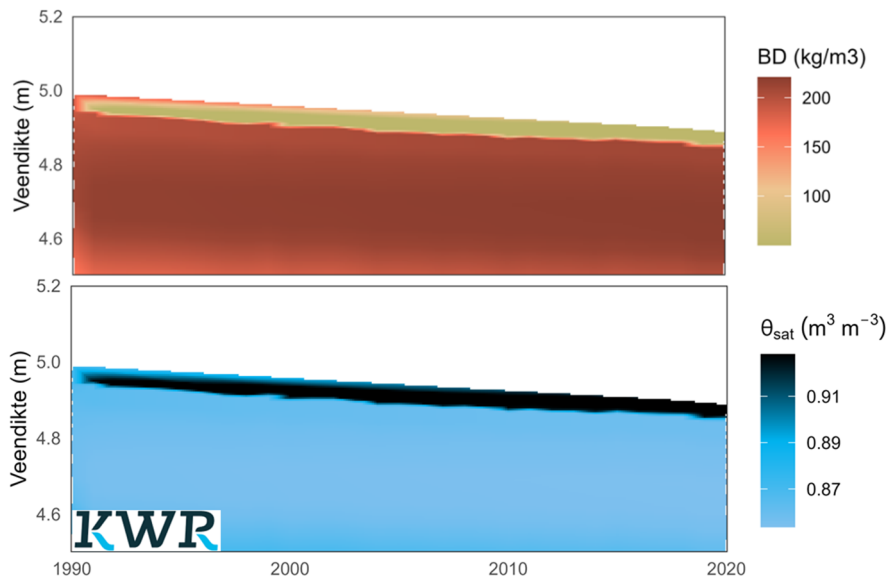
Om rekening te houden met de invloed van klimaatverandering en waterbeheer op veenvorming en veenafbraak, en daarmee op standplaatscondities en natuurpotenties, is in dit onderzoek een veenmodule ontwikkeld waarin bodemvormende processen dynamisch worden gesimuleerd (Figuur S1). In deze module worden interacties tussen water, vegetatie, en bodemvorming en processen die bodemvorming beïnvloeden expliciet gesimuleerd, evenals de koolstofvastlegging in de bodem. Hierbij wordt waar mogelijk gebruik gemaakt van – en aangesloten bij – bestaande (Nederlandse) modellen en gegevens (zoals het Peatland-VU-NUCOM model en het Holocene Peatland Model).



Figuur S1: Samenvattend overzicht van de veenmodule. Rechts: veenprofiel waarin te zien is dat recente veenlagen minder ver afgebroken zijn dan de diepere en oudere veenlagen. Linksboven: principe van de veenmodule waarbij ieder jaar nieuw gevormd strooisel voor vorming van nieuw veen zorgt, en het oorspronkelijke veen deels afgebroken wordt en in dikte afneemt. Linksonder: elk jaarlijks gevormd laagje veen (cohort) bestaat uit verschillende strooiseltypen en plantenwortels.

## Resultaat

De werking van de veenmodule is geverifieerd aan de hand van modelsimulaties voor een 'veenweideveenprofiel' met een veraarde top laag, bij een diepe grondwaterstand (gemiddeld 60 cm-mv) en huidig klimaat. Bij deze omstandigheden wordt een bodemdaling van 11 cm in 30 jaar (3.6 mm/jaar; Figuur S2) voorspeld, die goed overeenkomt met de bandbreedte van ca 2 – 5 mm/jaar in het westelijk veenweidegebied op de Bodemdalingskaart 1.0 (NCG, 2025). Daarnaast vormt zich een nieuwe strooisel/veenlaag met lagere bulkdichtheid die gepaard gaat met een hogere porositeit en doorlatendheid, en verloopt de dikte van deze veenlaag enigszins grillig afhankelijk van de jaarlijkse variatie in weersomstandigheden (Figuur S2). Hoewel veranderingen in bodemstructuur niet gevalideerd zijn met metingen, worden deze als plausibel beschouwd vanwege realistische waarden en tijdschaal waarop veranderingen plaatsvinden.



Figuur S2: Verandering van veendikte, bulkdichtheid (boven) en porositeit (onder) als gevolg van veenoxidatie. Uitgangspunt: dikke veengrond met moerige bovengrond (BOFEK 1006) met diepe grondwaterstand (60 cm-mv).

## Conclusie, en toekomstige ontwikkelingen

De nieuwe veenmodule is succesvol toegepast op één bodemfysische eenheid bij diepe grondwaterstanden. Een belangrijke vervolgstap is om de plausibiliteit van de modelresultaten te toetsen bij andere bodemfysische eenheden en in situaties waarin veenvorming kan plaatsvinden. Daarvoor is het noodzakelijk om initiële veenprofielen voor verschillende veenbodems te definiëren. Bovendien moet de huidige veenmodule worden aangepast zodat niet alleen 'pure' veenbodems (ca. 30% van het Nederlands veenareaal) ook veenbodems met minerale bestanddelen, zoals klei of leem, gemodelleerd kunnen worden. De veenmodule biedt nu al de mogelijkheid om standplaatscondities te simuleren waarbij rekening gehouden wordt met veranderingen in bodemstructuur. Een volgende stap is om te evalueren in hoeverre deze structurele bodemveranderingen doorwerken in de voorspelde kansrijkdom van vegetatietypen.

## Meerwaarde veenmodule voor toekomstbestendig landgebruik en klimaatopgaven

Naast toepassing van de veenmodule binnen de Waterwijzer Natuur en biodiversiteit kent de veenmodule veel andere toepassingen in actuele beleidsopgaven. Deze omvatten het tegengaan van bodemdaling, klimaatmitigatie en het terugdringen van broeikasgasemissies voor zowel natuur als veenbodems in agrarisch gebruik. Ook met het oog op de Nature Restoration Law, die Nederland verplicht tot grootschalige vernatting van veengebieden, groeit de behoefte naar betrouwbare langetermijnsvoorspellingen van veenvorming en koolstofvastlegging. Hiermee biedt deze veenmodule een waardevolle aanvulling op bestaande modellen (zoals SOMERS, Peatland-VU-NUCOM). De veenmodule biedt een wetenschappelijk onderbouwd en gestandaardiseerd model waarmee beleidsmakers, terreinbeheerders en waterschappen onderbouwde keuzes kunnen maken. De veenmodule kan zo overheden en uitvoeringsorganisaties ondersteunen bij transparant, effectief en toekomstgericht beleid voor natuurherstel, klimaatopgaven en een duurzame inrichting van het landelijk gebied.

# Inhoud

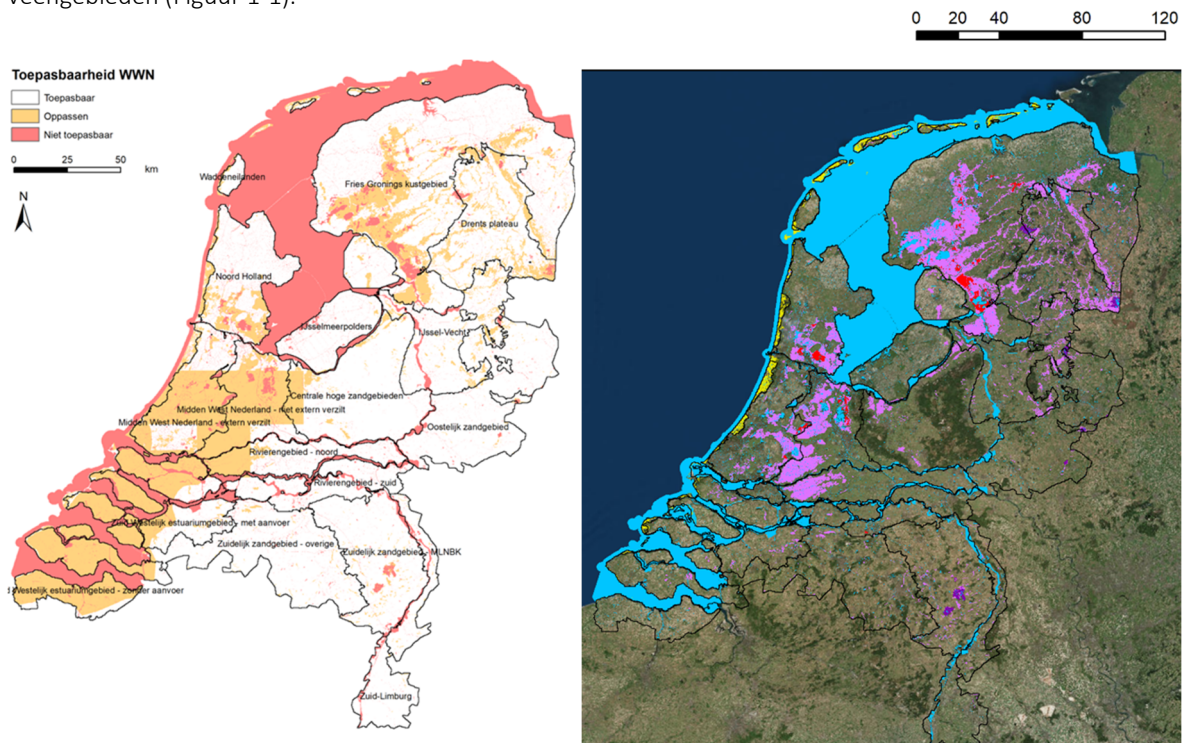
<b>Colofon</b>	<b>2</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Inhoud</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Achtergrond	7
1.2 Bodem als constante?	7
1.3 Doel	8
1.4 Meerwaarde veenmodule buiten het Deltaprogramma	8
1.5 Leeswijzer	9
<b>2 Ontwikkeling van veenmodule: theoretische achtergrond</b>	<b>10</b>
2.1 Algemeen	10
2.1.1 Vergelijking met andere (Nederlandse) modellen	11
2.1.2 Modelomgeving	12
2.2 Veenmodule met veenvorming en afbraak	13
2.2.1 Plantengroei en strooiselproductie	13
2.2.2 Simuleren van dynamische bodemeigenschappen	14
2.2.3 Mineralisatie van N en P	17
2.2.4 Vertaling afname veenmassa naar bodemdaling	17
2.2.5 Vertaling van bodemvorming naar bodemfysische eigenschappen	18
2.3 Initialisatie	18
2.4 Selectie bodemfysische eenheden	20
2.5 Actualisatie Waterwijzer Natuur	20
<b>3 Modelverificatie en plausibiliteit resultaten</b>	<b>22</b>
3.1 Plantencompetitie, groei, en strooiselproductie	23
3.2 Sturende factoren decompositie	24
3.3 Afbraaksnelheid en massa per cohort	24
3.4 Verzadigde doorlatendheid veenbodem	25
3.5 Voorspelde verandering van bodemeigenschappen	26
<b>4 Discussie</b>	<b>29</b>
4.1 Algemeen	29
4.2 Meerwaarde veenmodule voor klimaatmitigatie, bodemdaling, natuurherstel	29
4.3 Validatie	30
<b>5 Aanbevelingen</b>	<b>31</b>

<b>6</b>	<b>Conclusie</b>	<b>33</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>34</b>
<b>I</b>	<b>Afwegingen modelkeuzes</b>	<b>36</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Door klimaatverandering, de watertransitie, ‘bodem en water sturend’, stikstofdepositie, ruimtelijke adaptatie, vernatting, en andere toekomstige ontwikkelingen zal de waterhuishouding in en om natuurgebieden veranderen. Om objectief en gestandaardiseerd te voorspellen hoe terrestrische natuur zich kan ontwikkelen onder invloed van toekomstig waterbeheer en klimaatverandering, worden effectvoorspellingen gedaan met de Waterwijzer Natuur (WWN). Ook in het Deltaprogramma Zoetwater is de WWN toegepast in de Effectmodule Natuur om prognoses te maken van hoe de Nederlandse natuur er voor zou kunnen staan bij de verschillende Deltascenario’s (Nijp et al., 2019). Ondanks de zinvolle uitkomsten voor het overgrote deel van Nederland, geldt dat voor interpretatie van de uitkomsten van de WWN in sommige gebieden voorzichtigheid geboden is (Nijp et al., 2019). De belangrijkste deelgebieden waarbij de modeluitkomsten van de WWN onzeker zijn, betreffen laagveenmoerassen en andere veengebieden (Figuur 1-1).



Figuur 1-1. Ruimtelijke toepasbaarheid van de Waterwijzer Natuur. Links: codering toepasbaarheid, rechts: uitsplitsing naar landschapstype.

## 1.2 Bodem als constante?

De oorzaak waardoor de WWN uitkomsten in veengebieden nog voor verbetering vatbaar zijn, is dat de eigenschappen van veenbodems sterk kunnen veranderen als gevolg van waterbeheer en/of klimaat (Frolking et al., 2001). Bij droogte versnelt de afbraak van bestaand organisch materiaal, terwijl deze door vernatting tegengegaan wordt. In natte natuur kan vernatting bovendien voor de vorming van nieuw veen zorgen en zo koolstof vastleggen en klimaatverandering tegengaan. Dit blijkt uit natuurherstelprojecten (Tomassen et al., 2022), paludicultuur met bijvoorbeeld veenmosteelt (Temmink et al., 2024), en de doorgaans netto CO<sub>2</sub> opname in natuurlijke veensystemen met onverstoorde waterhuishouding (Nilsson et al., 2008; Roulet et al., 2007). Zo kan bijvoorbeeld veenmos bij de

juiste waterhuishouding hard groeien en een nieuwe veenlaag van ca 20 cm in 5 jaar tijd vormen (Figuur 1-2). Dit geeft aan dat bij toekomstverkenningen met bijvoorbeeld 2050 of 2100 als zichtjaar de bodem behoorlijk kan veranderen. De veranderde veensamenstelling als gevolg van veenopbouw of afbraak heeft effect op het watervasthoudend vermogen en de doorlatendheid van de bodem, wat vervolgens weer doorwerkt op standplaatscondities vocht, zuurgraad, en voedselrijkdom. Momenteel is er geen instrument dat rekening kan houden met hoe verandering in waterbeheer, en klimaat(extremen) doorwerken op bodem en biodiversiteit: vooralsnog wordt de bodem standaard als constant verondersteld.



*Figuur 1-2. Voorbeeld van veenvorming door veenmosgroei in een hoogveenherstelproject (Tomassen et al., 2022). In vijf jaar tijd heeft zich vanaf 'kaal' veen vanuit veenmosfragmenten een ca 20 cm dikke moslaag ontwikkeld (links) die onderin is afgestorven waarin de transitie van vegetatie naar bodem heeft plaatsgevonden (rechts).*

### 1.3 Doel

Het doel van dit onderzoek is om een nieuwe module te maken voor de WWN waarin bodemeigenschappen door de tijd veranderen als gevolg van omgevingsvariabelen. De verwachting is dat met deze zogeheten veenmodule de standplaatscondities en daarmee de voorspelde vegetatie voor de landschapstypen laagveenmoerassen en beekdalen sterk kan worden verbeterd.

Bij de ontwikkeling van de bodemvormingsmodule is de wens in acht genomen zo veel mogelijk aan te sluiten bij bestaande kennis, onder andere uit het Nationaal Onderzoeksprogramma Bodemdaling Veenweiden (NOBV). De nieuwe module (**veenmodule**) is geïnspireerd op een bestaande en gevalideerd model in wetenschappelijke literatuur waarin feedbacks tussen klimaat, water, vegetatie en bodenvorming worden gesimuleerd (Frolking et al., 2002; Frolking et al., 2001; Frolking et al., 2010; Quillet et al., 2013). Daarnaast maakt de veenmodule gebruik van modelconcepten die gevalideerd zijn met meetgegevens in het NOBV (Boonman et al., 2022; Lippmann et al., 2022). Verder is de module, waar mogelijk, zo simpel mogelijk gehouden.

### 1.4 Meerwaarde veenmodule buiten het Deltaprogramma

Niet alleen voor de landelijke voorspelling van effecten van klimaatverandering en waterbeheer op natuurpotenties in laagveenmoerassen is rekening houden met bodemvormende processen in venen van belang. Het sluit ook goed aan bij thema's en visies als 'bodem en water sturend', de 'watertransitie', klimaatadaptatie en het tegengaan van bodemdaling. Bovendien is in de Europese Nature Restoration Law sinds 18 augustus 2024 vastgelegd dat organische

bodems moeten worden hersteld en vernat (European Union, 2024). Lidstaten zijn wettelijk verplicht gesteld om uiterlijk 2030 herstelmaatregelen te treffen voor minstens 30% van alle landbouwbodems op veen, waarvan minstens een kwart vernat is. Daarnaast wordt hierin gesteld dat veengebieden en wetlands als natuurgebaseerde oplossing dienen te worden ingezet als middel voor kosteneffectieve klimaatadaptatie om broeikasgasemissies te verminderen. Bij dergelijke vernattingsmaatregelen is middels metingen enigszins in beeld hoe deze op korte termijn uitwerken op broeikasgasemissies. Langetermijneffecten van vernatting op bodemeigenschappen, compensatie van bodemdaling (of zelfs 'bodestijging'), koolstofvastlegging, standplaatscondities en bijbehorende biodiversiteit zijn nog zeer slecht in te schatten. Aangezien de doelstellingen op zeer korte termijn gerealiseerd dienen te worden, is het urgent dergelijke langetermijneffecten in kaart te kunnen brengen. De ontwikkelde veenmodule in de WWN sluit goed aan om besluitvorming te ondersteunen om effectieve vernattingsmaatregelen en gunstige effecten op biodiversiteit te realiseren.

## 1.5 Leeswijzer

Dit rapport doet verslag van de ontwikkeling van een veenmodule voor de Waterwijzer Natuur die ook breder inzetbaar is voor andere toepassingen. In het volgende hoofdstuk (Hoofdstuk 2) wordt de werking van deze veenmodule beschreven, waarbij de nadruk ligt op nieuwe rekenprocedures en niet op de werking van de oorspronkelijke Waterwijzer Natuur (zie daarvoor Witte et al. (2018) en Nijp et al. (2022b)). Ook wordt beschreven welke nieuwe informatie nodig is in de veenmodule (zie paragraaf 2.3). In dit hoofdstuk wordt verder een korte paragraaf gewijd aan een aantal aanpassingen die zijn doorgevoerd om de WWN te actualiseren (paragraaf 2.5). In hoofdstuk 3 wordt de veenmodule toegepast en de plausibiliteit ervan bepaald. Deze hoofdstukken worden gevolgd door een discussie (Hoofdstuk 4), aanbevelingen om de voorspellingen en toepasbaarheid te verbeteren (Hoofdstuk 5) en een conclusie (Hoofdstuk 6).

## 2 Ontwikkeling van veenmodule: theoretische achtergrond

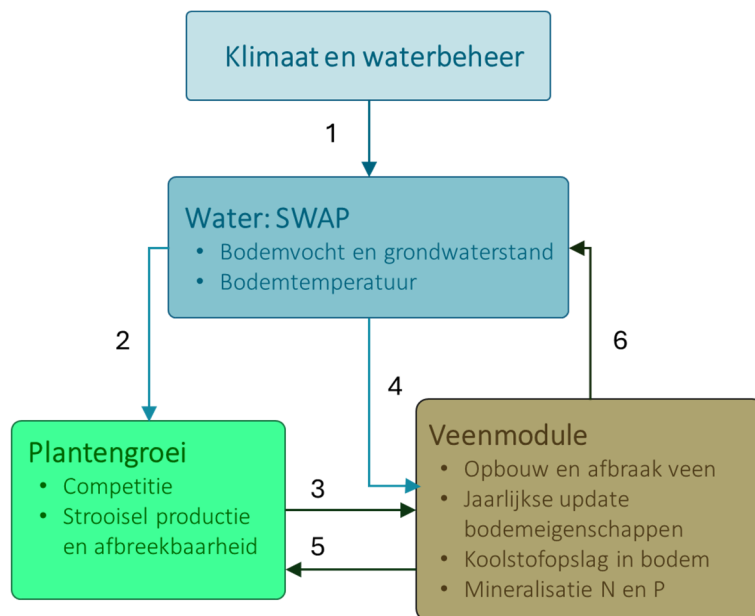
### 2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt de werking van de veenmodule beschreven waarmee de dynamische bodemvormende processen worden gesimuleerd. De belangrijkste afwegingen en keuzes komen hierin aan de orde. De werking van de Waterwijzer Natuur is in andere publicaties beschreven; we verwijzen naar Witte et al. (2018) en Nijp et al. (2022b) voor meer informatie en details omtrent de werking van de Waterwijzer Natuur.

In onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van alle onderdelen bij de totstandkoming van de veenmodule. In dit onderzoek zijn alleen de eerste drie onderdelen uitgevoerd; het laatste aspect (Aanpassen aansturing WWN) wordt dus niet behandeld.

Tabel 2-1. Overzicht aanpassingen en activiteiten om de veenmodule in de Waterwijzer Natuur – PROBE in te bouwen, onderverdeeld in drie onderdelen.

<b>1</b>	<b>Ontwikkeling strooiselproductiemodule (hoofdstuk 2.2.1)</b>
	Inbouwen PFT-specifieke plantengroei
	Inbouwen plantencompetitie
	Effect van nutriëntenbeschikbaarheid (N <sub>min</sub> ) op biomassa productie verdisconteren
	Inbouwen strooiselproductie
<b>2</b>	<b>Ontwikkeling veenmodule (hoofdstuk 2.2.2)</b>
	Decompositie van bestaand veen
	Berekenen N en P mineralisatie
	Veenvorming aan maaiveld
	Veenvorming in wortelzone
	Vertaling cohorts naar compartimenten
	Vertalen aanpassing bodem naar bodemfysische eigenschappen
<b>3</b>	<b>Initialisatie veenbodem (hoofdstuk 2.3)</b>
	Representatieve eigenschappen veenprofiel opstellen
<b>4</b>	<b>Aanpassen aansturing WWN</b>
	Deelmodules aaneen schakelen
	Dynamisch doorrekenen
	Nieuwe metarelaties afleiden
	Inbouwen in bestaande Waterwijzer Natuur structuur



*Figuur 2-1. Overzicht van gesimuleerde processen op hoofdlijn. Via scenario's van klimaat en waterbeheer verandert de waterhuishouding in de wortelzone en het veenprofiel (1). De waterhuishouding oefent invloed uit op plantengroei en daarmee op biomassa productie, strooiselproductie, vegetatiesamenstelling, en daarmee de kwaliteit en afbreekbaarheid van strooisel (2). Het jaarlijks gevormde strooisel, zowel bovengronds als ondergronds (wortels) zorgt voor nieuw gevormd veen (3). Het aanwezige organische materiaal in de bodem wordt afgebroken op basis van het vochtgehalte en bodemtemperatuur op de betreffende diepte (4). Bij deze afbraak komen stikstof en fosfor vrij, die de biomassa- en strooiselproductie beïnvloeden, naast stikstofdepositie (5). Op basis van de berekende afbraak en nieuw gevormde bodem worden de bodemfysische eigenschappen geactualiseerd (6).*

### 2.1.1 Vergelijking met andere (Nederlandse) modellen

Om te bepalen of de veenmodule meerwaarde heeft voor voorspellingen van kansrijkdom natuur, is deze afgewogen met een aantal beschikbare alternatieven. Deze afweging hangt af van een aantal aspecten, waarvan de belangrijkste in Tabel 2-2 worden weergegeven en een inschatting gemaakt is. Uit deze vergelijking blijkt de grote potentiële meerwaarde van de WWN veenmodule, maar komen ook de belangrijkste potentiële knelpunten naar voren:

- Er voor zover bekend nog geen enkel instrument bestaat waarmee bepaald kan worden hoe waterbeheer en klimaat de bodemfysische eigenschappen en daarmee waterhuishouding en standplaatscondities beïnvloeden.
- Door de urgentie van bodemdaling is 'stijging' van de bodem door veenvorming geen onderdeel van de bestaande operationele modelinstrumenten
- Doorgaans effecten van waterbeheer wel meegenomen worden maar effecten van klimaatverandering (nog?) niet worden verdisconteerd (behalve op kennisregels gebaseerd)
- De afweging wordt hier gemaakt op basis van verandering in bodemfysische eigenschappen van de wortelzone. Het gaat dus niet om het eindresultaat (kansrijkdom vegetatie); die kan namelijk alleen met alternatief 'Verandering BOFEK' worden bepaald.

Er zijn een aantal andere modellen beschikbaar in wetenschappelijke literatuur, die hier nog niet zijn meegenomen en omdat een aantal van de modelconcepten ervan in de WWN veenmodule worden ingebouwd (Chadburn et al., 2022; Froliking et al., 2010). Ook zijn pure bodemmechanische modellen buiten beschouwing gelaten. In Bijlage I zijn een aantal andere overwegingen en gemaakte modelkeuzes in overleg met de begeleidingsgroep weergegeven.

Tabel 2-2. Afwegingskader keuze aanpak (om rekening te houden met effect klimaat en waterbeheer op bodemfysische eigenschappen wortelzone). Onderstreept de alternatieven voor de WVN bodemdaling. Een + geeft aan dat het betreffende model geschikt is voor het betreffende aspect, een 0 dat het in principe geschikt is maar met de nodige mitsen en maren, en - dat het betreffende proces/aspect/aandachtspunt niet is verdisconteerd.

Aspect	WVN veenmodule	<u>Van den Akker rekenregels</u> <sup>1</sup>	<u>Atlantis</u> <sup>2</sup>	<u>Verandering BOFEK</u> <sup>3</sup>	SOMERS <sup>4</sup>
Procesbenadering i.p.v. kennisregels	+	-	-	-	+
Toepassing ander klimaat	+	-	0	-	0
Toepassing ander waterbeheer	+	+	+	0	+
Bodemvorming	+	-	-	-	-
Bodemdaling	+	+	+	0	-
Toepassing natuur	+	0	0	0	0
Rekensnelheid	-	+	+	+	+
Onzekerheid benodigde informatie	-	+	+	+	0
Dynamische bodemfysische eigenschappen	+	-	-	+	-
Gevalideerd?	-	+	0	-	+
<b>Eindoordeel *</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>

\* Eindoordeel is het aantal keer + minus het aantal keer -.

<sup>1</sup> Empirische relatie tussen slootpeil en bodemdaling door oxidatie voor huidig klimaat op (van den Akker et al., 2007)

<sup>2</sup> Bodemdalingsmodel voor Nederland dat verandering in grondwaterstand vertaalt naar primaire consolidatie en oxidatie (Bootsma et al., 2020)

<sup>3</sup> Alternatieve aanpak waarbij verandering in bodemfysische eigenschappen via veranderingen in bodemfysische eenheden worden opgelegd. Rekent niet dynamisch.

<sup>4</sup> Subsurface Organic Matter Emission Registration System (SOMERS) (Erkens et al., 2022): model dat focust op landbouwbodems, koolstofuitstoot, en geen bodemdaling/stijging simuleert.

### 2.1.2 Modelomgeving

Om een naadloze aansluiting met de huidige Waterwijzer Natuur te garanderen wordt gebruik gemaakt van dezelfde gekoppelde modellen: SWAP (versie 4.2.0) wordt gebruikt voor het simuleren van vochttransport (Kroes et al., 2017), een aangepaste versie van CENTURY voor voedselrijkdom (Fujita et al., 2013), en VSD+ voor het simuleren van de zuurgraad (Bonten et al., 2016). Deze modellen worden gezamenlijk aangestuurd in de programmeertaal R. De veenmodule en is daarom ook in R geprogrammeerd.

De veenmodule heeft effect op de berekening van bodemvocht en voedselrijkdom. Via vochtvoorziening heeft het ook indirect effect op de zuurgraad. De berekening van zuurgraad verandert echter niet, en voor VSD+ wordt nog uitgegaan van de oorspronkelijke parameterisatie en gesimuleerde processen. We verwijzen naar Witte et al. (2018) en Nijp et al. (2022b) voor meer informatie en details omtrent de werking van de Waterwijzer Natuur.

Door het expliciet simuleren van bodemvormende processen in veen neemt de rekentijd van de Waterwijzer Natuur toe. Ook het afleiden van metarelaties neemt enkele maanden in beslag. Om de benodigde rekentijd/doorlooptijd te verkorten is daarom een Azure Cloud ingericht waarop de berekeningen zijn uitgevoerd. De R programmatuur is tegelijkertijd zodanig ingericht dat parallel gerekend kan worden: rekenkracht van meerdere 'cores' kan gelijktijdig worden ingezet en opgeschaald worden. In dit geval zijn 48 cores gebruikt. Het gebruik van een dergelijke cloud brengt extra kosten met zich mee, mede om modeluitvoer (circa 1 TB) op te slaan.

## 2.2 Veenmodule met veenvorming en afbraak

### 2.2.1 Plantengroei en strooiselproductie

Veen vormt zich wanneer atmosferisch CO<sub>2</sub> wordt opgenomen en vastgelegd door planten, die na afsterven veranderen in strooisel en na verloop van tijd veranderen in veen en een bodem vormen. In de huidige WWN (WWN-3; Nijp et al. (2022b)) wordt plantengroei niet expliciet meegenomen. Voor veenvorming is de aanwezige vegetatiesamenstelling en de groei ervan van belang. Deze bepaalt namelijk de biomassa-productie, strooiselproductie en de afbreekbaarheid ervan. Om die reden is verandering van vegetatiesamenstelling en biomassa gesimuleerd. Om ook rekening te houden met effect van verandering in klimaat, die tot uitdrukking komt in droogte en natte perioden, wordt de biomassa-productie per dag bepaald. Dit is een belangrijke verbetering ten opzichte van het huidige Holocene Peat Model (Frolking et al., 2010) waarmee veenvorming gesimuleerd wordt.

Zoals eerder aangegeven is de wens uitgedrukt om bij de modelontwikkeling zo veel mogelijk aan te sluiten bij huidige onderzoeksprogramma's, waaronder het NOBV. Om aan deze wens te voldoen, hebben we ons voor plantengroei laten inspireren door het model Peatland-VU-NUCOM (PVN), dat ook is toegepast in het NOBV om broeikasgasemissies te schatten (Lippmann et al., 2022).

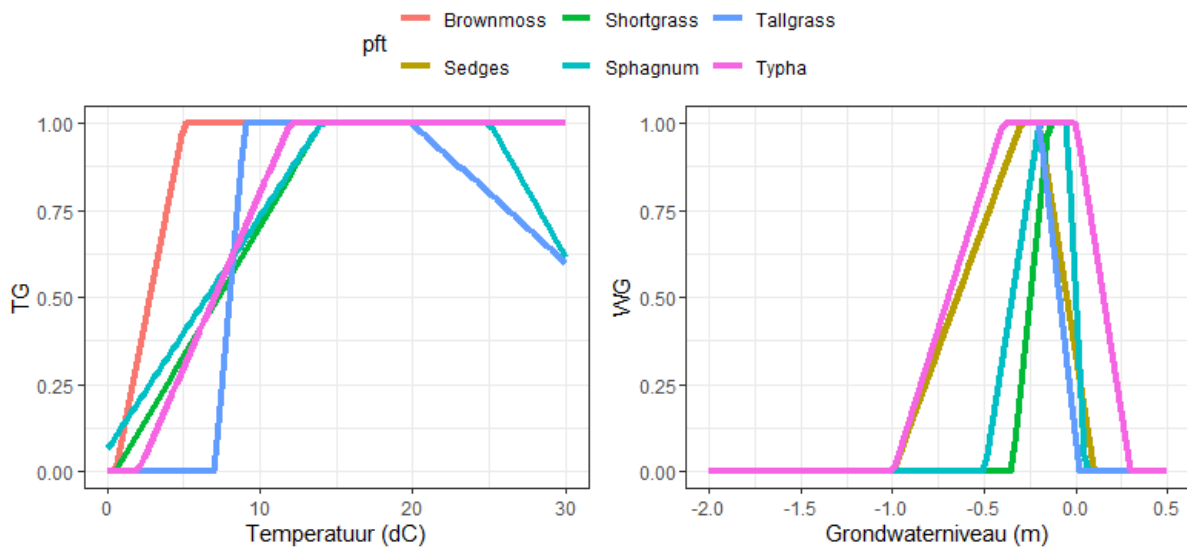
De strooiselproductie van de veenvegetatie werd gemodelleerd in dagelijkse tijdstappen voor zes plantfunctionele typen (PFTs). Dat zijn, overeenkomend met Lippman et al. (2022): Tall grass, short grass, sedges, *Typha*, brown moss and *Sphagnum* moss. Zowel het aantal als de precieze PFTs kunnen aangepast worden, maar hebben we voor nu gelijk gelaten om aan te sluiten bij het NOBV. Elk PFT heeft zijn specifieke voorkeur voor abiotische omstandigheden, groei-eigenschappen en afbreekbaarheid. We gebruiken de vergelijking en parameterwaarden volgens Lippmann et al. (2022).

#### Potentiële groei

Eerst wordt de potentiële groei per PFT berekend, die wordt beïnvloed door de maximale opbrengst en abiotische beperkingen door luchttemperatuur, waterbeschikbaarheid, en schaduw:

$$PG_p = Gmax_p \cdot TG_p \cdot WG_p \cdot SG_p$$

Hierbij is  $PG_p$  de potentiële groei van PFT  $p$  is (gC/m<sup>2</sup>/dag),  $Gmax_p$  de maximale biomassa-productie (zowel boven- als ondergronds) (gC/m<sup>2</sup>/dag),  $TG_p$  de reductieterm van temperatuur op plantengroei (fractie variërend tussen 0 en 1),  $WG_p$  de reductieterm van water op plantengroei (fractie), en  $SG_p$  de reductieterm van schaduw effect op plantengroei (fractie). De reductietermen voor temperatuur en bodemvocht worden beide bepaald door de PFT-specifieke minimum-, optimum- en maximumwaarde, zoals geïllustreerd in Figuur 2-2.



Figuur 2-2. Reductieterm van temperatuur (links) en waterniveau (rechts) op plantengroei voor 6 PFT's.

Het schaduweffect werd bepaald op basis van inkomend PAR (photosynthetically active radiation) dat wordt geabsorbeerd door andere voorkomende PFT's. De fractie inkomend PAR die door een PFT wordt geabsorbeerd,  $FPAR_p$ , wordt berekend op basis van de LAI (Leaf Area Index,  $m^2/m^2$ ), die varieert met de bovengrondse biomassa ( $g/m^2$ ) en de PFT-specifieke SLA-waarde ( $m^2/g$ ). De reductieterm van het schaduweffect op de groei van elk PFT wordt berekend als  $1$  min de som van  $FPAR_p$  van alle andere voorkomende PFT's.

Het stikstofgehalte in plantenbiomassa wordt berekend door het C-gehalte te vermenigvuldigen met PFT-specifieke C:N-verhouding. Voor de eenvoud nemen we aan dat de C:N-verhouding van de plant niet verandert in de loop van de tijd.

### Werkelijke groei

Het model van Lippmann et al. (2022) houdt geen rekening met nutriëntenlimitatie in de plantengroei. We hebben daarom beperking van groei door stikstof (N) meegenomen door de potentiële groei aan te passen aan de beschikbaarheid van minerale N in de wortelzone (bovenste 25 cm) om de werkelijke groei te berekenen. Voor de eenvoud berekenen we daartoe eerst de jaarlijkse beschikbaarheid van minerale N (afkomstig van zowel afbraak van organisch materiaal en atmosferische depositie), en beperken we de plantengroei wanneer de cumulatieve benodigde N voor de potentiële groei de jaarlijkse minerale N overschrijdt. Als N limiterend is wordt deze proportioneel verdeeld over de totale wortelbiomassa van de plantfunctionele typen.

### Strooiselproductie

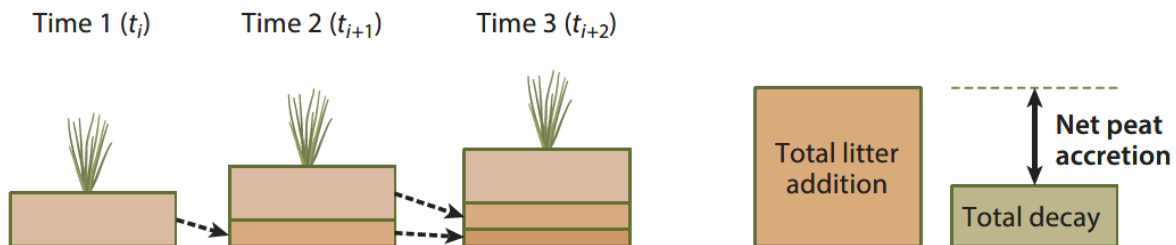
Biomassa van afgestorven bovengrondse planten komt in het strooisel terecht. Aangenomen wordt dat planten sterven met een PFT-specifieke constante senescentiesnelheid,  $BS_p$  (fractie/dag). In de herfst sterven planten van vasculaire soorten in de herfstmaanden af met een hogere constante senescentiesnelheid,  $KL_p$  (fractie/dag). Bij mossen is dit niet het geval.

### 2.2.2 Simuleren van dynamische bodemeigenschappen

In de veenmodule wordt rekening gehouden met zowel afbraak van bestaand organisch materiaal als vorming van vers organisch materiaal. De afbraak van bestaand organisch materiaal leidt tot bodemdaling, terwijl veenvorming leidt tot bodemstijging. Er zijn voor zo ver bekend in Nederland momenteel geen modellen beschikbaar die de 'stijging' van het maaiveld kunnen beschrijven.

De productie van strooisel (P) wordt op dagbasis per PFT berekend in de vegetatiemodule (zie paragraaf 2.2.1). Op jaarbasis wordt bepaald hoeveel strooisel er per PFT geproduceerd is. Dit strooisel vormt een nieuwe bodemlaag, dat

in de opeenvolgende jaren afgebroken wordt. Door afbraak verdwijnt organisch materiaal en ook de structuur van het verse oorspronkelijke plantenmateriaal, waardoor de bodemlaagjes met het verstrijken van de tijd dunner worden (Figuur 2-3). Deze jaarlijkse laagjes organisch materiaal noemen we cohorts. Na 30 jaar aan simulaties ontstaan dus 30 cohorts.



Figuur 2-3. Overzicht proces van strooiselproductie en bodemvorming. Elk jaar wordt een nieuwe veenlaag gevormd, terwijl de dikte van vorige lagen door afbraak afneemt. Figuur overgenomen uit Page and Baird (2016).

De afbraaksnelheid van organisch materiaal hangt af van de aard van het organisch materiaal (plantfunctionele type) en milieufactoren. Voor een representatieve schatting van de afbraaksnelheid per plantfunctionele typen baseren wij ons op de waarden in Frohling et al. (2010) voor venen in gematigd klimaat. Op basis van de jaarlijkse strooiselproductie per plantfunctionele groep (PFT) wordt het maaiveld geactualiseerd. De massaverandering per cohort wordt beschreven met onderstaande differentiaalvergelijking:

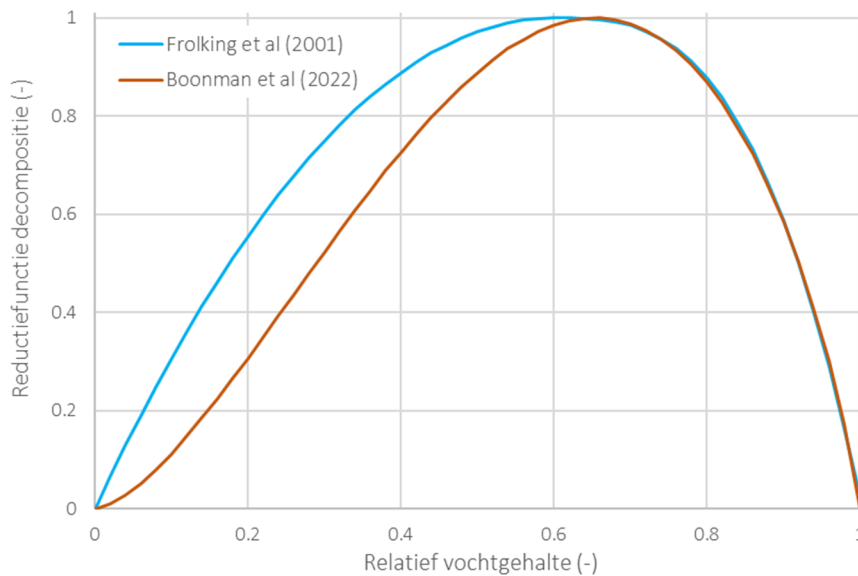
$$\frac{dM}{dt} = \frac{d(\sum_i m_i)}{dt} = \sum_{i=1}^n \left( P_i - k_{0,i} \left( \frac{m_i}{m_{i,0}} \right) m_i \cdot f(W) \cdot f(T) \right)$$

Hierin is  $M$  de totale massa van het betreffende cohort,  $P_i$  de jaarlijkse productie voor PFT  $i$  (kg),  $k_{0,i}$  de initiële afbraaksnelheid van vers strooisel ( $\text{dag}^{-1}$ ),  $m_{i,0}$  de initiële geproduceerde massa (kg) van PFT  $i$ ,  $m_i$  de resterende massa (kg). De reductiefuncties  $f(W)$  en  $f(T)$  zijn reductiefuncties die de potentiële afbraaksnelheid reduceren voor respectievelijk water ( $W$ ) en bodemtemperatuur ( $T$ ) in de cohort op de betreffende diepte. Om rekening te houden met het feit dat de afbraaksnelheid van organisch materiaal verminderd naarmate het meer afgebroken is doordat het makkelijk afbreekbare materiaal als eerst verdwijnt, wordt de initiële afbraaksnelheid  $k_0$  gereduceerd met de ratio  $m/m_0$ . Decompositie en resterende massa worden als volgt berekend per cohort, per PFT, per dag.

Voor de parameterisatie van deze reductiefuncties sluiten wij aan bij het NOBV. Voor bodemvocht is dat de beta-functie in Boonman et al. (2022), de temperatuurreductie is afkomstig uit de AAP module in het SOMERS model (Erkens et al., 2022):

$$f(T_{\text{bodem}}) = \frac{(0.05 (T_{\text{bodem}} - -10))^2}{(0.05 (20 - -10))^2}$$

Zowel bij te vochtige als te droge condities wordt de potentiële afbraak gereduceerd. In het natte bereik is deze 'NOBV' reductiefunctie van potentiële decompositie identiek aan die zoals toegepast in Frohling et al. (2001) voor veen in gematigd klimaat (Figuur 2-4). Hierbij is rond verzadiging de afbraaksnelheid een minimale afbraaksnelheid ( $0.025 \text{ jaar}^{-1}$ ; Frohling et al. (2010)) gehanteerd bij verzadiging om ook rekening te houden met anaerobe veenafbraak.



Figuur 2-4. Effect van vochtgehalte op decompositie voor grasland in agrarisch gebruik (veenweiden) in Nederland, zoals toegepast in het NOBV en (Boonman et al 2022) en voor Canadese veengebieden bij gematigd klimaat in Canada (Frolking et al, 2001).

Biomassa wordt niet alleen bovengronds geproduceerd; een zeer groot deel wordt ondergronds als wortels gevormd. Het is belangrijk met deze ondergrondse strooiselproductie rekening te houden, omdat wortels een (zeer) groot aandeel in de totale samenstelling van veen innemen. In overeenstemming met Frolking et al. (2010) wordt jaarlijks de wortelproductie berekend op basis van de ratio bovengronds:ondergronds, en uniform verspreid over de dagen in het jaar en over de wortelzone. De vorming van nieuw wortels zorgt voor zowel een verhoging van het beschikbare organische materiaal als de afbreekbaarheid ervan. Voor beide wordt gecorrigeerd in de veenmodule. Uiteindelijk wordt de afbraak dus bepaald per plantfunctioneeltype (inclusief wortels), per dag, per cohort. Deze tijdschaal lijkt misschien wat overdadig, maar is in elk geval voor de toplaag van belang om rekening te houden met klimaateffecten in de vorm van extreme(re) droogte of nattigheid op afbraak.

Naast vocht en temperatuur hebben ook nutriëntenbeschikbaarheid en zuurgraad effect op de afbraak. Van zuurgraad wordt vaak gedacht dat de afbraaksnelheid lager is bij hogere zuurgraad (lagere pH). In werkelijkheid ligt dit wat complexer: het effect van pH hangt bijvoorbeeld af van de precieze microbiële samenstelling (o.a. bacteriën versus schimmels), of de effecten van pH direct zijn via  $H^+$  of indirect via vrijgekomen  $Al^{3+}$ , en of het de labiele of recalcitrante deel van organisch stof betreft (zie o.a. Kooijman & Hedenäs, 2009; Walse et al., 1998). Daarnaast blijkt uit experimenten dat de N-mineralisatie zelfs kan toenemen bij hogere zuurgraad (lagere pH), zie (Kooijman & Hedenäs, 2009). Vooralsnog is besloten het effect van zuurgraad op decompositie buiten beschouwing te laten om focus op andere processen te behouden en omdat verschillen in de literatuur veroorzaakt kunnen worden bodemvocht- en temperatuurregime, zuurgraad, voedselrijkdom, samenstelling en afbreekbaarheid van het materiaal en samenstelling microbiële groepen (Kooijman & Hedenäs, 2009; Walse et al., 1998). Het is niet altijd eenvoudig om deze goed uit elkaar te trekken en in wetenschappelijke literatuur zijn alle parameters zelden tegelijkertijd gemeten, waardoor duidelijke conclusies over effecten van zuurgraad en voedselrijkdom niet meegenomen worden. Het is wel goed mogelijk om met een gevoeligheidsanalyse het belang van zuurgraad voor decompositie te bepalen aan de hand van bestaande relaties tussen zuurgraad en decompositie (Leifeld et al., 2008). Alhoewel zeer zinvol valt dit buiten de doelstelling van dit onderzoek.

### 2.2.3 Mineralisatie van N en P

Bij de afbraak van veen komen CO<sub>2</sub>, stikstof (N) en fosfor (P) vrij. In de veenmodule worden de stikstof- en fosfoformineralisatie berekend op basis van de CO<sub>2</sub> productie (gC/m<sup>2</sup>/dag, i.e. veenaafbraak), de efficiëntie van microbiële groei, en respectievelijk de CN en CP ratio van het organisch materiaal en microben. Omdat de CO<sub>2</sub> productie gebruikt wordt, betekent dit dat ook temperatuur en vocht effect hebben op de N- en P-mineralisatie. De CN en CP ratio van microben zijn vooralsnog gebaseerd op globaal gemiddelde waarden (Cleveland & Liptzin, 2007).

### 2.2.4 Vertaling afname veenmassa naar bodemdaling

Centraal in het geheel staat een vertaling tussen de massa van veen en de dichtheid ervan. Naargelang organisch materiaal verder afgebroken is, zal het door gebrek aan structuur (en samendrukking) compacter zijn. De relatie tussen bulkdichtheid en overblijvende massa wordt beschreven met een sigmoïde functie (Figuur 2-5):

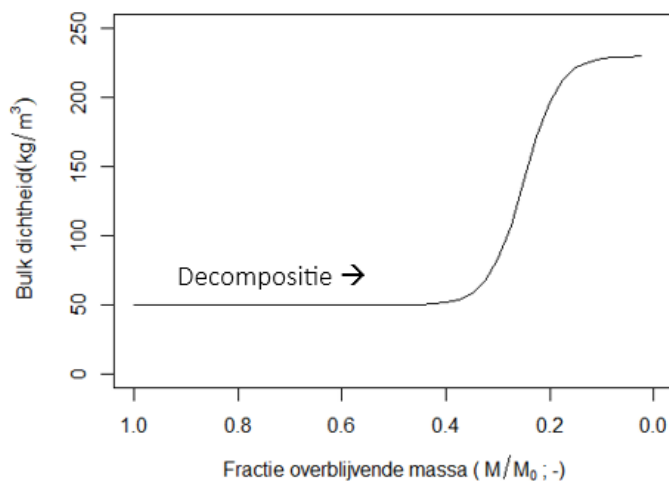
$$BD = BD_{min} + \frac{BD_{max} - BD_{min}}{1 + e^{-b_1 \left(\frac{M}{M_0} - t_1\right)}}$$

Waarbij BD<sub>min</sub> de minimale bulkdichtheid is, BD<sub>max</sub> de maximale bulkdichtheid, M/M<sub>0</sub> de overblijvende massa is, t<sub>1</sub> het kantelpunt waarbij de verandering van bulkdichtheid als functie van overblijvende massa maximaal is, en b<sub>1</sub> de maximale helling van verandering van bulkdichtheid als functie van overblijvende massa beschrijft. De parameterisatie van deze functie benadert de op basis van veenprofiel gekalibreerde parameters zoals beschreven in Froking et al. (2010) en Quillet et al. (2013).

Met deze relatie wordt een verandering in massa van alle cohorts gezamenlijk vertaald naar bodemdaling. Belangrijk te vermelden is dat deze relatie tot dusver alleen kan worden toegepast op bodems bestaande uit enkel organisch materiaal. De totale bulkdichtheid van de bodem betreft hier namelijk alleen organisch materiaal en is exclusief de minerale fractie. De minerale fractie wordt hier dus vooralsnog buiten beschouwing gelaten, wat de toepasbaarheid van de veenmodule vooralsnog beperkt tot veenbodems waarin de minerale fractie zeer klein is. Er zijn manieren om dit uit te breiden, maar dat valt buiten de focus van dit onderzoek.

Een aandachtspunt is dat zowel bij veenaccumulatie als bij veenaafbraak de afstand tussen maaiveld en het waterpeil in waterlopen verandert. Dit heeft ook gevolgen voor veenaafbraak of veenaccumulatie. Bij veenaccumulatie neemt bijvoorbeeld de afstand tussen maaiveld toe, waar de veenvorming plaatsvindt. Dat betekent ook dat deze toplaag verder van het grondwater is, het vochtgehalte lager is, en daardoor de veenvorming geremd wordt.

In de modellering dient hier een keuze gemaakt te worden of het opgelegde peil(a) meebeweegt met maaiveldsveranderingen, waardoor het waterpeil (ten opzichte van NAP) bij veenvorming steeds hoger komt te liggen of (2) het opgelegde peil gefixeerd blijft. In principe is deze modelkeuze flexibel en zijn beide opties mogelijk. Voor nu gaan we uit van optie 1, gezien de doelstellingen om veen te vernatten en in beleidsstukken meestal geredeneerd wordt in het opleggen van peilen ten opzichte van maaiveld.



Figuur 2-5. Relatie tussen overblijvende massa en bulkdichtheid.

### 2.2.5 Vertaling van bodemvorming naar bodemfysische eigenschappen

In de Waterwijzer Natuur (WWN-3) wordt tot dusver aangenomen dat de bodem niet verandert door de tijd. De bodemfysische parameterisatie is gebaseerd op de Staring reeks en de indeling van de geactualiseerde bodemfysische eenhedenkaart (Heinen et al., 2021). In SWAP wordt daartoe een bodemkolom ingedeeld in ca 70 compartimenten waaraan bodemfysische eigenschappen dienen te worden toegekend. In deze paragraaf wordt beschreven hoe rekening wordt gehouden met een dynamische bodemstructuur.

De verandering van bodemstructuur als gevolg van boven- en ondergrondse strooiselproductie van verschillende plantfunctionele typen en afbraak van organisch materiaal wordt verondersteld te kunnen worden beschreven op basis van verandering in bulkdichtheid. Verandering in bulkdichtheid wordt vertaald naar bodemfysische eigenschappen met een empirische relatie tussen bulkdichtheid en parameters in de van Genuchten-Mualem vochtretentie- en doorlatendheidskarakteristieken. Op basis van een meta-studie van vele studies aan veenbodems hebben Liu and Lennartz (2019) empirische relaties opgesteld tussen bulkdichtheid en van Genuchten-Mualem parameters. Er zijn verschillende opties voor verschillende veentypen. In dit onderzoek specificeren wij dit niet nader en gaan uit van de algemene relatie voor 'alle veentypen' met bulkdichtheid  $< 0.76 \text{ g/cm}^3$ .

De bodemfysische eigenschappen worden per SWAP bodemlaagje (compartiment) berekend. In de bovenste 20 cm is de bodem ingedeeld in compartimenten van 1 cm dikte. De dikte van de cohorts (jaarlijkse veenlaagjes) wordt apart bijgehouden. Omdat na meerdere jaren afbraak de dikte van een cohort slechts enkele millimeters is, worden cohorts samengevoegd per compartiment. Hiertoe wordt de bulkdichtheid van de compartimenten berekend op basis van een naar dikte gewogen bulkdichtheid van de cohorts in het betreffende compartiment. Jaarlijks worden zo per compartiment nieuwe bodemfysische eigenschappen afgeleid, rekening houdend met opbouw en afbraak van strooisel/veen.

Belangrijk te vermelden is dat deze transferfuncties alleen geldig zijn voor veenbodems, en een bereik hebben tot een bulkdichtheid van maximaal  $0.76 \text{ g/cm}^3$ : het minimale organisch stofgehalte is 20%, alhoewel het merendeel van de monsters waarop de transferfuncties zijn bepaald hogere organisch stofgehalten (gemiddeld 83%) en lagere bulkdichtheid (gemiddeld  $0.18 \text{ g/cm}^3$ ) hebben. In veel veenbodems, met name in het westen van het land met een historische zee-involed, of beekdalen met inundatie en sedimentatie van klei of beekleem, is de minerale fractie aanzienlijk. In deze bodems kan daardoor de veenmodule nog niet gebruikt worden (zie Tabel 2-3), wat overeenkomt met circa 70% van het Nederlands veenareaal. Er zijn manieren om rekening te houden met de minerale fractie in de bodemfysische eigenschappen, bijvoorbeeld door weging van relatief aandeel (REF). alhoewel onbekend is hoe dat precies doorwerkt en of deze aanpak gerechtvaardigd is.

## 2.3 Initialisatie

Om de afbraak van het aanwezige veen te kunnen berekenen, is informatie over de afbreekbaarheid nodig en hoe deze varieert over de diepte. Deze informatie kan op verschillende detailniveaus worden aangeleverd, die hieronder worden beschreven.

De initialisatie van de veenprofielen vraagt meer informatie dan de vorige WWN versies. In eerdere WWN versies was alleen informatie van de wortelzone m.b.t. bulkdichtheid en gehalten van C, N en P nodig. In de veenmodule zijn ook waarden nodig voor bulkdichtheid, de overblijvende massa  $M$  en initiële massa  $M_0$  (de jaarlijkse aanvoer van strooisel) per PFT, aandeel wortels, C:N en C:P ratio voor alle gedefinieerde compartimenten. Deze informatie is natuurlijk nooit in detail aanwezig, maar een grove inschatting volstaat om processen te simuleren. Uiteraard geldt dat modelvoorspellingen beter worden als deze parameters nauwkeuriger kunnen worden ingeschat.

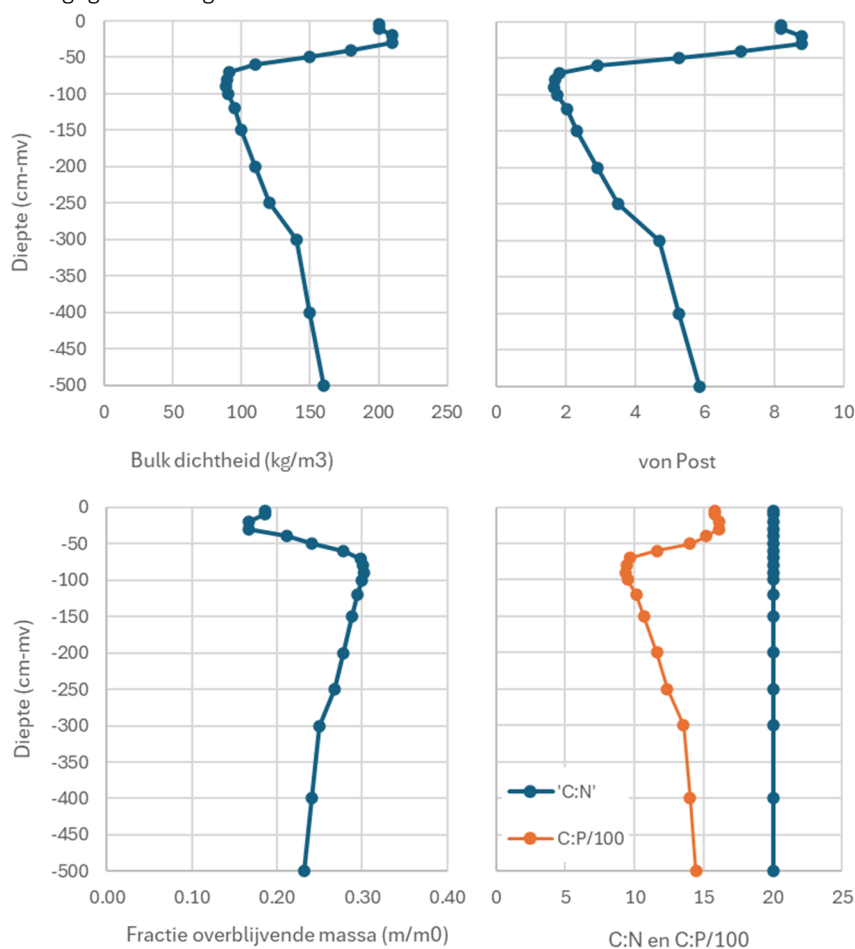
In wetenschappelijke literatuur wordt deze initialisatie vaak uitgevoerd door het model voor het hele Holoceen te draaien op basis van (al dan niet hypothetische en tijdsinvariante) historische gegevens van klimaat en hydrologie (Frolking et al., 2010; Quillet et al., 2013). Een dergelijke 'spin-up' periode is gangbaar in modellen die door de tijd rekenen (zo ook bij SWAP), maar dat voert te ver voor dit onderzoek.

In plaats daarvan volgen wij een pragmatischere aanpak waarin  $M$  en  $M_0$  op basis van bulkdichtheid en de relatie in Figuur 2-5 ingeschat worden. Bulkdichtheid en het verloop ervan met de diepte kan relatief eenvoudig en goedkoop gemeten worden. Nog pragmatischer is een vertaling van in het veld gebaseerde decompositiegraad volgens Von Post (1924) naar bulkdichtheid op basis van empirische relaties.

De bulkdichtheidsprofielen in dit onderzoek zijn gebaseerd op bulkdichtheidsmetingen in het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV) en het Veenweide Innovatiecentrum (VIC) in Zegveld, representatief voor een 'veenweidebodemp zonder kleidek' (Hefting et al., 2022; van den Akker et al., 2007), waarbij de toplaag veelal bestond uit veen met kleidek. Omdat de veenmodule nog niet met de minerale fractie mee om kan gaan (paragraaf 2.2.4 en 2.2.5), hebben we de bulkdichtheid naar beneden bijgesteld.

Het verdelen van de totale massa  $M$  over de verschillende PFT's en aandeel wortels is gedaan op basis van expert judgement: er is van uit gegaan dat een groot deel bestaat uit zeggeveen en PFT 'short grass' en wortels. Dit kan uiteraard op basis van botanische samenstelling bepaald uit bodemprofielen of paleoecologisch onderzoek met hogere nauwkeurigheid worden ingesteld. Doorgaans is de verandering van eigenschappen voor diepere veenlagen (<1 meter) op een tijdschaal van een periode van 25-100 jaar zeer gering ten opzichte van de toplaag ondieper dan 1 meter. Het benodigde detailniveau voor deze lagen is daarom ook gering voor deze toepassing.

Ook CN en CP ratio's zijn gebaseerd op basis van NOBV metingen en onderzoek aan veengebieden. Ook de CN ratio van de toplaag is naar beneden bijgesteld om te corrigeren voor het effect van bemesting op CN ratio in veenweiden die niet optreedt in natuurbodems. De CP ratio is geschat op basis van decompositiegraad (en bulkdichtheid) volgens een empirische relatie in Wang et al. (2015) op basis van 400 veenprofielen. De initialisatie van de veenweidebodemp is weergegeven in Figuur 2-6.



Figuur 2-6. Een aantal van de benodigde verticale profielen voor modelinitialisatie, afgeleid uit metingen uit het NOBV, VIC Zegveld, Froliking et al (2010) en Wang (2015). De Von Post humificatiegraad is gerelateerd aan bulkdichtheid en C:P ratio (schaal 1 – 10, waarbij 1 vers organisch materiaal is en 10 volledig gehumificeerd veen).

## 2.4 Selectie bodemfysische eenheden

De veenmodule voor Waterwijzer Natuur is in dit onderzoek ontwikkeld voor één karakteristieke veenbodem. Veen eigenschappen verschillen ruimtelijk door verschillen in botanische samenstelling, humificatiegraad, veendikte, en de mate van bijmenging van klei of leem in een marien of fluviatiel afzettingmilieu, en soms door antropogene invloed. Voorbeelden hiervan zijn BOFEK 1001 en 1018 (zie Tabel 2-3 en Figuur 2-7 voor de ligging ervan). BOFEKS waarvoor de huidige WWN geschikt toepassing geschikt is, zijn dus die zonder minerale toevoeging in de toplaag. Het betreft hier de veel voorkomende bodems zonder minerale bovengrond: 1006, 1002 en 1010 (Tabel 2-3), in totaal 31.4% van het totale areaal aan veenbodems. Voor het testen en parameteriseren van de WWN veenmodule baseren wij ons op BOFEK 1006.

## 2.5 Actualisatie Waterwijzer Natuur

Naast de ontwikkeling van de bodemmodule is de Waterwijzer Natuur op een aantal punten geactualiseerd:

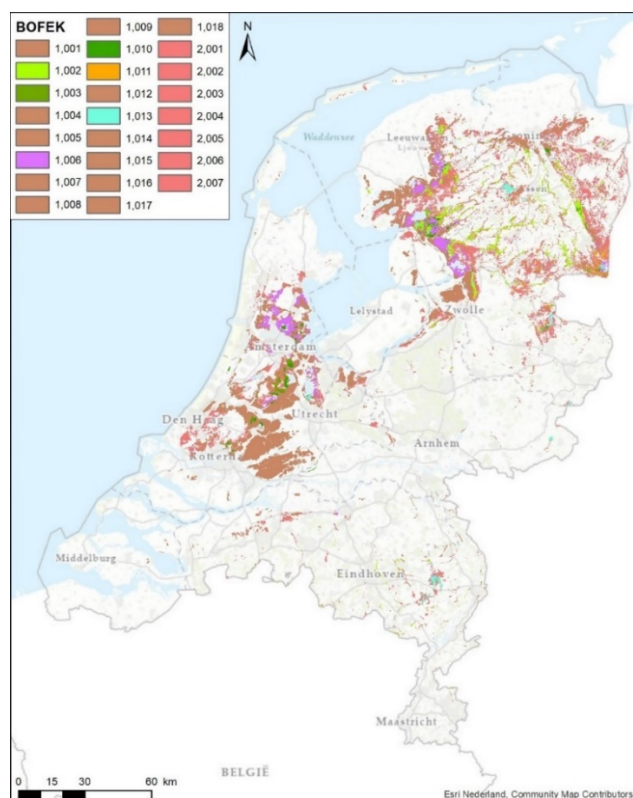
- Metarelaties zijn geactualiseerd op basis van de nieuwe KNMI'23 scenario's (Bessembinder et al., 2023). Het betreft de scenario's HD, HD, LN, en LD voor zichtjaar 2050 (2026 - 2065) en huidig klimaat (1990 – 2020) als referentie. Voor huidig klimaat zijn zowel voor gemeten als gemodelleerd klimaat beschikbaar.
- De modelcode is aangepast zodat met de nieuwe versie van SWAP (v4.0) gerekend kan worden.
- De metarelaties in de Waterwijzer Natuur zijn aangepast aan de nieuwe bodemfysische eenhedenkaart (Heinen et al., 2021).

Bij deze actualisatie is verder gebruik gemaakt van een Azure Cloud om metarelaties af te leiden. Hierdoor is de rekentijd aanzienlijk verminderd van langer dan een half jaar naar enkele maanden.

Tabel 2-3. Overzicht veengronden bodemfysische eenheden volgens BOFEK 2020 en bijbehorend areaal en aandeel in het totaal areaal aan veenbodems en of deze geschikt zijn om toe te passen met de huidige veenmodule.

BOFEK	Beschrijving	Areaal km <sup>2</sup>	Aandeel (%)	Geschikt?
1018	Dikke veengronden: kleidek op bos-/zeggeveen of klei	604.0	22.2	
1006	Dikke veengronden (kleilig) moerige bovengrond op veenmosveen	333.0	12.2	ja
1001	Dikke veengronden: kleilig moerige bovengrond op bosveen	318.7	11.7	
1002	Dunne veengronden: moerige bovengrond op veen op zand zonder podzol	286.5	10.5	ja*
1017	Dunne veengronden: kleilige bovengrond op veen op zand	233.5	8.6	
1015	Dikke veengronden: kleilig dek op veenmosveen	223.9	8.2	
1012	Dikke veengronden: kleibovengrond op bos-/zeggeveen	212.4	7.8	
1008	Dunne veengronden: kleibovengrond op veen op zand I	88.7	3.3	
1010	Dikke veengronden: moerige bovengrond op zeggeveen	84.3	3.1	ja
1005	Dunne veengronden: zandige- bovengrond op veen op zand zonder podzol	84.2	3.1	
1013	Dunne veengronden: moerige bovengrond op veen op zand met podzol	83.6	3.1	ja
1011	Dunne veengronden: veenkoloniaal dek op veen op zand met podzol	36.9	1.4	ja
1016	Dunne veengronden: kleibovengrond op veen op zand II	34.8	1.3	
1004	Dunne veengronden: kleilig moerige bovengrond op veen op klei	31.6	1.2	
1003	Dunne veengronden: moerige bovengrond op veen op klei	29.7	1.1	ja
1014	Dunne veengronden: zandbovengrond op veen op zand met podzol	27.1	1.0	
1007	Dikke veengronden zandige bovengrond op zeggeveen	11.3	0.4	
1009	Veenafbraakgebied (alleen in NOP)	0.4	0.0	

\* Ligging is met name in het noordoosten en beekdalen, daardoor minder relevant voor laagveenmoerassen

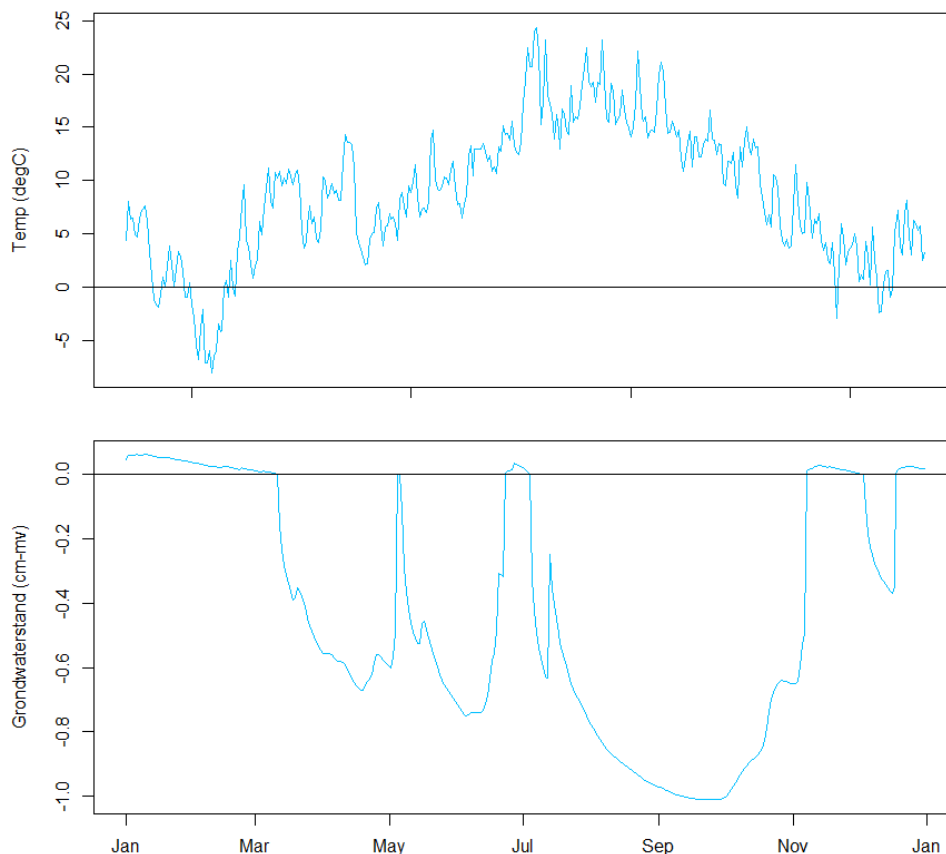


Figuur 2-7. Ligging veenbodems in Nederland. De getallen zijn de bodemfysische eenheden. De paarse BOFEK (1006) is gebruikt voor parameterisatie en modelverificatie.

### 3 Modelverificatie en plausibiliteit resultaten

Er zijn weinig directe meetgegevens beschikbaar om te valideren hoe bodemfysische eigenschappen veranderd zijn door de tijd als gevolg van klimaat/waterbeheer. Bovendien is naar verwachting op basis van herhaalde metingen middels (destructieve) bemonstering op dezelfde locatie het effect van tijd op bodemfysische eigenschappen niet goed te onderscheiden van het effect van ruimtelijke variabiliteit. Dergelijke validatie middels 'hindcasting' is mogelijk op basis van grotere datasets, maar valt buiten de focus van het huidige project. Het betreft hier een plausibiliteitstoets en geen validatie: er wordt getoetst of resultaten verklaarbaar en de ordegroottes van veranderingen logisch zijn, maar er wordt geen vergelijking gemaakt met observaties.

Om te bepalen of alle onderdelen van het model doen wat ze moeten doen zijn een aantal tests doorstaan. Het voert te ver alle modelverificaties te laten zien; in dit hoofdstuk worden daarom een aantal van de belangrijkste modelchecks, tussenresultaten en plausibiliteitstoets gedemonstreerd. Deze zijn gebaseerd op een SWAP simulatie van één jaar (1992) van een hypothetische veldlocatie. In onderstaand figuur is de seizoensdynamiek van luchttemperatuur en grondwaterstand weergegeven. Te zien is dat in de winter inundatie optreedt, maar de grondwaterstand diep wegzakt gedurende de zomermaanden, en met name in september.



Figuur 3-1. Gesimuleerde dagwaarden van luchttemperatuur en grondwaterstand van de hypothetische simulatie die gebruikt is voor modelverificatie.

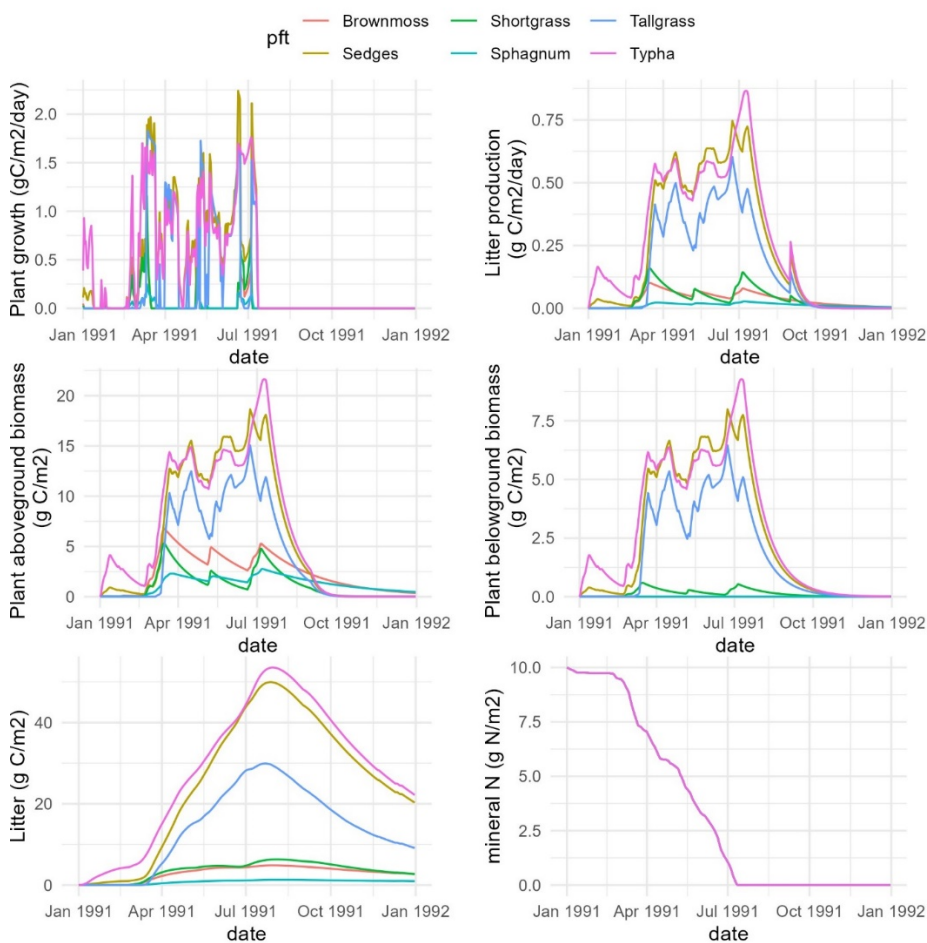
### 3.1 Plantencompetitie, groei, en strooiselproductie

De totale berekende jaarlijkse strooiselproductie in de plantmodule is plausibel. Deze is  $275 \text{ g C/m}^2$  ( $612 \text{ g biomassa/m}^2$ ), en komt redelijk in het bereik van de staande biomassa in een veenmosrietland in de Weerribben aan het eind van de zomer is ca  $150 - 500 \text{ g/m}^2$  (Nijp et al., 2022a). Merk op dat bij deze bandbreedte ook tussendoor nog biomassa afsterft en voor strooiselproductie zorgt.

De seizoenale dynamiek van strooiselproductie is wat minder plausibel (Figuur 3-2). De bovengrondse biomassa vertoont seizoenale dynamiek die wordt beïnvloed door temperatuur, grondwaterstand, voedselrijkdom (N) en biomassa in het verleden. Deels is dit verklaarbaar, maar deels ook niet. De verhouding van de biomassa van de plantfunctionele typen, met hoog productieve PFTs hogere biomassa en mossen een kleiner aandeel is plausibel. De plantengroei stopt in augustus/begin september abrupt, waardoor de biomassa sterk afneemt. Dit komt overeen met het moment waarop mineraal N op geraakt (rechtsonder). Enerzijds is het niet ondenkbaar dat beschikbaarheid van N aan het eind van het seizoen opgeraakt in natte veengebieden waarin N mineralisatie beperkt is. Anderzijds is het moment waarop dit gebeurt wat aan de vroege kant, en lijkt de consumptie van mineraal N overdadig.

Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat de jaarlijkse stikstofmineralisatie al vanaf het begin van de tijdreeks beschikbaar wordt gesteld, en niet over de tijd wordt 'uitgesmeerd'. Hierdoor groeien planten reeds snel in het groeiseizoen, en verbruiken daarmee extra voedingsstoffen, maar blijft er minder over voor de rest van het groeiseizoen. Voor de bodemmodule is de jaarlijkse strooiselproductie van belang.

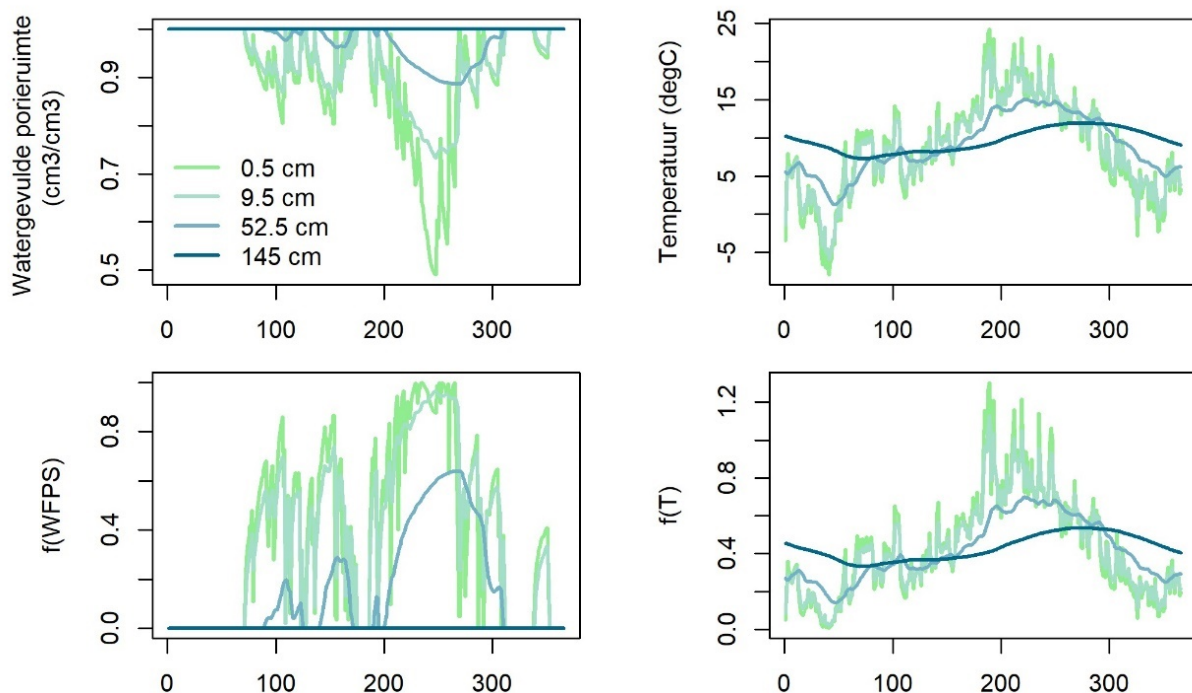
Voor deze eerste versie van de WWN wordt het model voldoende geacht om op voort te kunnen bouwen en/of verbetering aan te brengen.



Figuur 3-2. Simulaties van de plantenproductiemodule.

### 3.2 Sturende factoren decompositie

Veenafbraak en factoren die de afbraaksnelheid bepalen staan centraal bij bodemdaling. Daarom is bepaald hoe de met SWAP gesimuleerde temperatuur en vochtgehalten de reductiefuncties voor decompositie voor water  $f(W)$  en temperatuur  $f(T)$  beïnvloeden, en of deze realistisch zijn (Figuur 3-3). In de winter (dag in het jaar  $>300$  en  $<75$ ) is het dermate nat dat decompositie verwaarloosbaar is:  $f(W)$  is dan gelijk aan 0 op alle dieptes. In de zomer zijn er drogere perioden en is het vochtgehalte veel gunstiger voor afbraak. Door stabielere bodemtemperatuur is de afbraak op grotere diepte (145 cm) vrijwel continue 40 – 60% van de afbraak bij 15°C. in de wortelzone is de temperatuur in de zomer dermate hoog dat het tot een hogere afbraak zorgt. De waarden zijn plausibel en dit onderdeel lijkt naar behoren te functioneren.

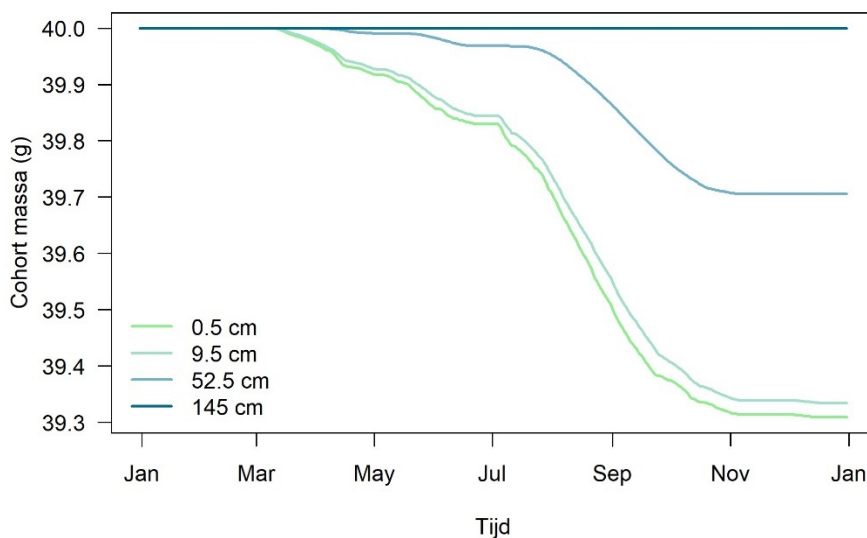


Figuur 3-3. Verloop van watergevulde porieruimte ('water filled pore space' WFPS) en bodemtemperatuur (bovenste rij) voor verschillende dieptes door de tijd (dag van het jaar) en de reductiefuncties van potentiële decompositie  $f(WFPS)$  en bodemtemperatuur  $f(T)$  (onderste rij).

### 3.3 Afbraaksnelheid en massa per cohort

In onderstaande figuur is de afbraak van veenlaagjes op verschillende dieptes weergegeven. Hieruit komt naar voren dat de afbraak plausibel gesimuleerd wordt:

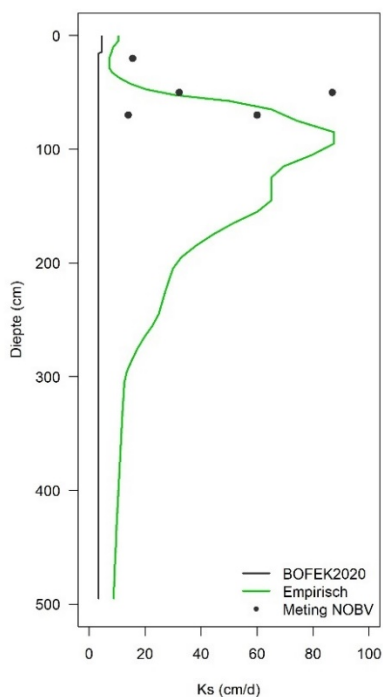
- (1) Meeste afbraak is in de top bodemlaag. Diepste lagen ondervinden geen / nauwelijks afbraak.
- (2) Seizoensdynamiek van afbraak is zoals verwacht: de meeste afbraak vindt plaats in de zomer (steilste verandering van cohort massa).
- (3) Orde grootte afbraak van de toplaag is 0.7 gram organisch materiaal per jaar, wat ongeveer overeenkomt met ca. 0.31 gC/m<sup>2</sup>/jaar (0.0031 tC/ha/jaar). Dat is geen onrealistische waarde voor een sterk veraard en relatief droog veenlaagje van 2 cm, gezien de totale uitstoot van grasland op veenbodem varieert van circa 0–3 tCO<sub>2</sub>-C/ha/jaar (Evans et al., 2021).



Figuur 3-4. Voorbeeld van verloop van cohortmassa door de tijd op verschillende diepten. Gebaseerd op SWAP simulatie uitvoer in Figuur 3-3. Veenafbraak vindt met name tijdens de zomermaanden plaats en in de toplaag.

### 3.4 Verzadigde doorlatendheid veenbodem

Om te verifiëren of de combinatie van bulkdichtheidsmetingen en de transferfunctie van (Liu & Lennartz, 2019) in een plausible doorlatendheid resulteert, is deze vergeleken met doorlatendheidsmetingen in veenweidegebied in het NOBV (van de Craats et al., 2022) en de BOFEK 2020 doorlatendheden voor bodemfysische eenheid 1006 () (Figuur 3-5). Uit deze analyse blijkt dat de verzadigde doorlatendheid zoals in de BOFEK 2020 sterk afwijken van gemeten waarden, en dat de vertaling van bulkdichtheid naar doorlatendheid een (veel) plausibeler schatting levert. De in dit onderzoek gehanteerde schatting van doorlatendheid lijkt dus beter uit te pakken dan gebruik van de reguliere BOFEK 2020 en is zeer plausibel. Merk overigens op dat de doorlatendheid van veen zeer sterk kan variëren, zoals ook blijkt uit de variatie van de NOBV metingen op dezelfde diepte (Figuur 3-5).

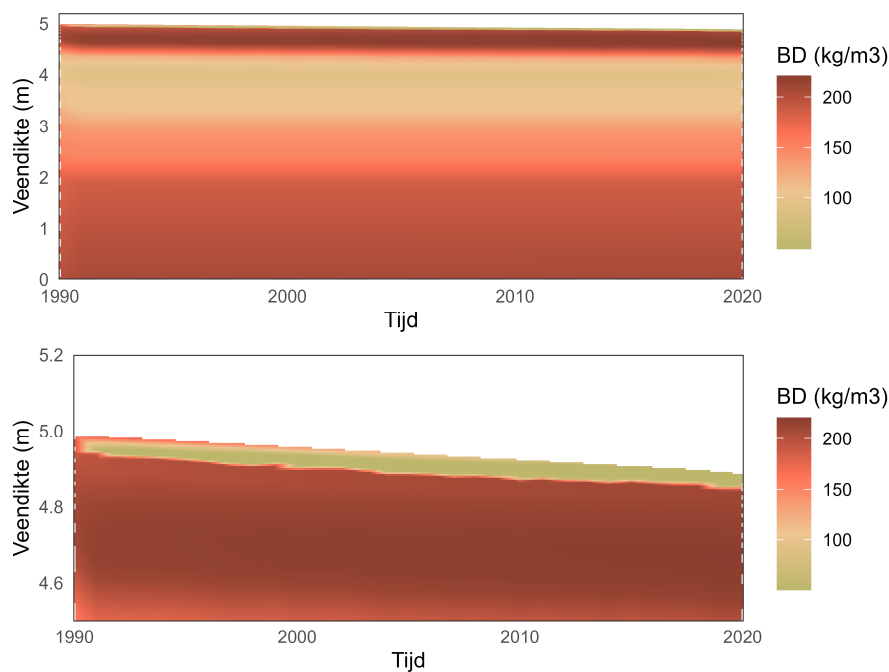


Figuur 3-5. Vergelijking van doorlatendheidsprofiel gebaseerd op Staring bouwstenen uit BOFEK2020 (zwart) voor BOFEK 1006, gebaseerd op genoemde bulkdichtheidsprofielen voor veen in veenweide (van den Akker et al 2008) en transferfunctie van (Liu & Lennartz, 2019) (empirisch). Zwarte cirkels geven metingen uit het NOBV weer (van de Craats et al., 2022) (pp 38).

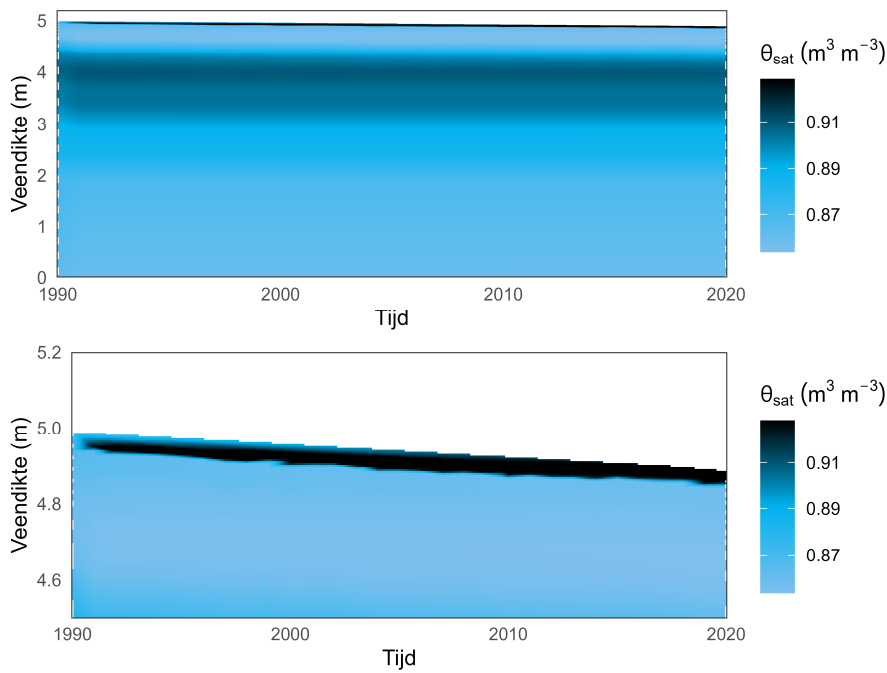
### 3.5 Voorspelde verandering van bodemeigenschappen

Op basis van de berekende veenvorming en veenaafbraak is een simulatie van 30 jaar uitgevoerd vanaf 1990 tot 2020 met als uitgangspunt de veenweidebodem zoals weergegeven in paragraaf 2.3. De grondwaterstand was gemiddeld circa 60 cm beneden maaiveld. Dagelijks gemeten neerslag en verdamping zijn gebruikt voor klimaatdistrict 1 (representatief voor centraal Nederland van noord naar zuid).

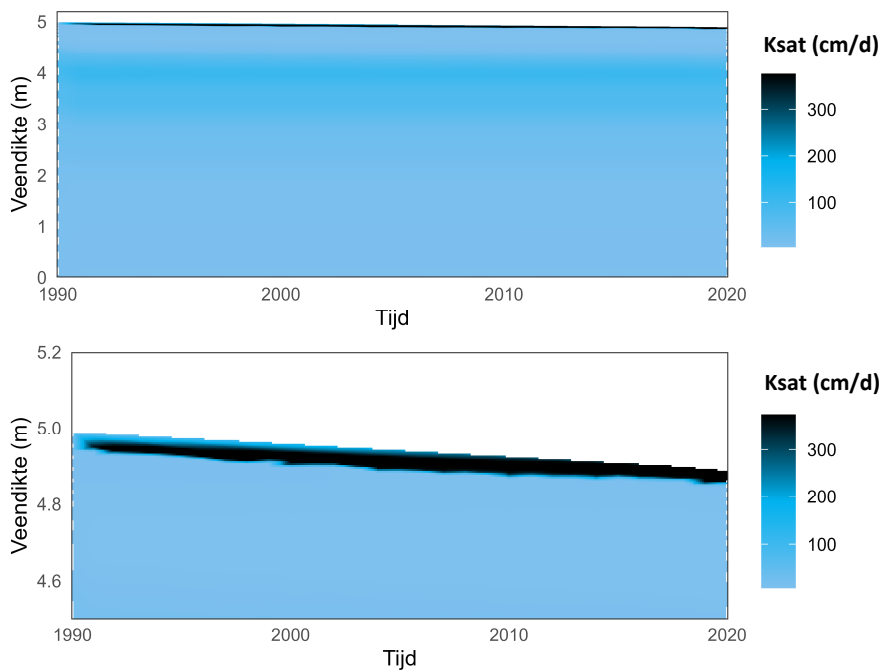
Bij dit scenario blijkt een netto bodemdaling op te treden van circa 3.6 mm/jaar (Figuur 3-6). Dit is een waarde die goed overeenkomt met de bandbreedte van ca 2 – 5 mm/jaar in het westelijk veenweidegebied op de Bodemdalingskaart 1.0 (NCG, 2025). Daarnaast vormt zich een nieuwe strooisel/veenlaag met lagere bulkdichtheid (Figuur 3-6) die gepaard gaat met een hogere porositeit (Figuur 3-7) en doorlatendheid (Figuur 3-8), en verloopt de dikte van deze veenlaag enigszins grillig afhankelijk van de jaarlijkse variatie in weersomstandigheden. Alhoewel deze verandering in bodemstructuur niet gevalideerd is met metingen, zijn deze modelresultaten plausibel bevonden.



Figuur 3-6. Gesimuleerde bulkdichtheid (kleur) door de tijd (x as) en over de diepte (y as) voor het gehele veenprofiel (boven) en ingezoomd op de bovenste ca halve meter (onder). Het betreft hier simulaties van een veraarde veenweidebodem BOFEK 1006 (dikke veengronden (kleiig) moerige bovengrond op veenmosveen) met een diepe grondwaterstand.

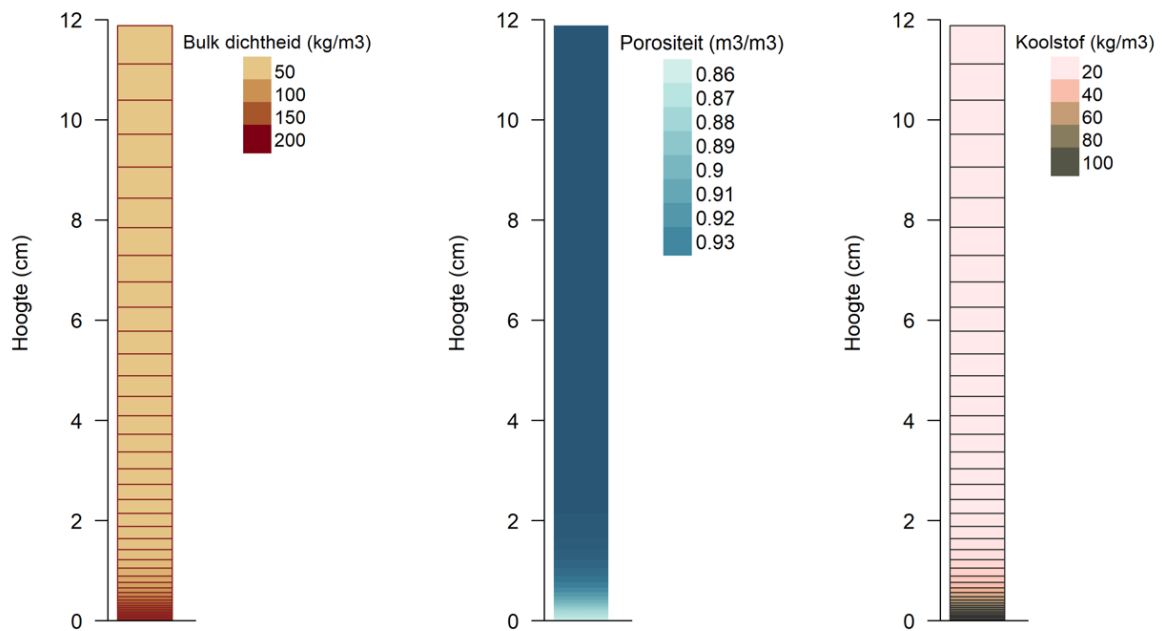


Figuur 3-7. Gesimuleerde porositeit (kleur) door de tijd (x as) en over de diepte (y as) voor het gehele veenprofiel (boven) en ingezoomd op de bovenste ca halve meter (onder). Het betreft hier dezelfde simulatie als voor bulkdichtheid (Figuur 3-6).



Figuur 3-8. Gesimuleerde doorlatendheid (kleur) door de tijd (x as) en over de diepte (y as) voor het gehele veenprofiel (boven) en ingezoomd op de bovenste ca halve meter (onder). Het betreft hier dezelfde simulatie als voor bulkdichtheid (Figuur 3-6).

Ook voor natte omstandigheden is een testsimulatie gedaan bij een constante strooiselproductie van één vegetatietype ('sedge') en niet-gelimiteerde decompositie en zonder wortelproductie. In 30 jaar heeft zich een 12 cm dikke laag organisch materiaal ontwikkeld (Figuur 3-9). De recentere veenlagen in de top hebben zoals verwacht een grotere dikte. Dieper in het profiel neemt de dikte van het resterende veenlaagje af doordat ze deels afgebroken zijn en het vastgelegde organisch materiaal in de atmosfeer is beland als CO<sub>2</sub>. De oudere, diepere lagen hebben een hogere bulkdichtheid, en daardoor een lagere porositeit. De toenemende veraardingsgraad gaat gepaard met een grotere koolstofdichtheid. Naast de weergegeven eigenschappen is per laag onder andere ook de afbraaksnelheid bekend, evenals de samenstelling van het veen (botanisch), de CN en CP ratio's en de humificatiegraad.



Figuur 3-9. Gevormd bodemprofiel na 30 jaar simulatie bij gelijkblijvend klimaat en natte omstandigheden.

## 4 Discussie

### 4.1 Algemeen

In dit onderzoek is een veenmodule ontwikkeld waarmee de afbraak van bestaand veen en vorming van nieuw veen voorspeld kunnen worden. Deze veenmodule is ontwikkeld voor de Waterwijzer Natuur, om zo beter rekening te kunnen houden met effecten van toekomstig waterbeheer en klimaat op de standplaatscondities in de wortelzone. Als gevolg van toegenomen droogte kan de veenbodem bijvoorbeeld harder afbreken, terwijl bij vernatting de afbraak lager wordt en organisch materiaal ophoopt. Dit heeft effect op de bodemeigenschappen en hoe goed de bodem water vast kan houden, en daarmee worden standplaatscondities vocht, voedselrijkdom en zuurgraad beïnvloed.

Een plausibiliteitstoets voor één veenbodemtype (BOFEK 1006; circa 12% van het totale Nederlandse veenareaal) bevestigt dat de verschillende onderdelen in de veenmodule realistische uitkomsten produceren. Daarmee is de ontwikkeling van de veenmodule succesvol. Vervolgstappen zijn nodig om de module in de Waterwijzer Natuur in te bouwen en operationeel toe te passen op meerdere typen veenbodems.

### 4.2 Meerwaarde veenmodule voor klimaatmitigatie, bodemdaling, natuurherstel

De veenmodule produceert een grote hoeveelheid informatie op verschillende aspecten die voor veel verschillende relevante maatschappelijke vraagstukken kan worden ingezet. Zo produceert deze tijdreeksen van grondwaterstand en tijdreeksen van diepteprofielen van vochtgehalte en bodemtemperatuur. Daarnaast worden over het hele bodemprofiel de afbraak en opbouw van veen (CO<sub>2</sub> emissie en opname) en daaraan gerelateerde stikstofmineralisatie, fosformineralisatie gesimuleerd. Ook worden de eigenschappen van het veen, zoals het koolstofgehalte, de CN en CP ratio's, de botanische samenstelling, de afbreekbaarheid van veen, en hoe die verandert door de tijd gesimuleerd.

Voor de informatie met betrekking tot CO<sub>2</sub> zijn prognoses gemaakt kunnen worden van de netto CO<sub>2</sub> vastlegging in de bodem en maaiveld daling of stijging op de lange(re) termijn, zoals 2050 of 2100.

De ontwikkelde veenmodule is niet alleen bruikbaar binnen de Waterwijzer Natuur, maar is ook inzetbaar bij bredere maatschappelijke vraagstukken, zoals:

- Het onderbouwen van keuzes voor maatregelen tegen bodemdaling in natuur- en landbouwgebieden.
- Het bepalen van effectieve en kostenefficiënte maatregelen voor natuurbehoud en -herstel in onder andere laagveenmoerassen, beekdalen, en hoogvenen.
- Het maken van slimme keuzes bij grootschalige vernatting van veengebieden in het kader van de Europese Nature Restoration Law (sinds 2024 van kracht; European Union (2024)).
- Bepalen van de effectiviteit van klimaatmitigatie via behoud en herstel van veen, gericht op langdurige CO<sub>2</sub>-vastlegging.
- Bepalen langetermijneffecten van paludicultuur op veenvorming en koolstofvastlegging met bijvoorbeeld lisdodde of veenmos (Geurts et al., 2019; Temmink et al., 2024).

Momenteel is het uitgangspunt van de veenmodule een typische veenweidebodem. Voor de ontwikkeling van de veenmodule kan het type veenbodem eenvoudig naar wens worden aangepast op basis van literatuurgegevens, expertkennis, of meetgegevens uit het veld.

### 4.3 Validatie

Zoals opgemerkt is de veenmodule alleen op plausibiliteit van de resultaten getoetst. Validatie aan de hand van observaties is (nog) niet uitgevoerd. Het is echter wenselijk om alle afzonderlijke processen en uitvoervariabelen (zie paragraaf 4.2) in de veenmodule voor zo ver mogelijk nader te valideren met observaties. Dit is goed mogelijk wat betreft abiotische standplaatsomstandigheden, zoals bodemvocht en grondwaterstanden, en voorspelde vegetatie voor huidig klimaat. Ook netto koolstofuitwisseling tussen land en atmosfeer kan gemeten en gevalideerd worden met eddy-covariantie torens of kamers evenals CO<sub>2</sub> productie en/of concentraties op verschillende dieptes (Hefting et al., 2022; van de Craats et al., 2022). Voor biomassaproductie en veranderende bodemeigenschappen is validatie minder voordehand liggend.

Tot dusver wordt de biomassaproductie in plantengroeimodellen voor natuurlijke vegetaties doorgaans gevalideerd op basis van jaarlijkse biomassaproductie (peak standing crop). Om te begrijpen hoe klimaat effecten, bijvoorbeeld droogte of andere extreme gebeurtenissen, inwerken op strooiselproductie en daarmee op veenvorming, wordt het steeds noodzakelijker de respons van biomassa- en strooiselproductie op kortere tijdschaal in kaart te brengen. Dergelijke meetgegevens ontbreken veelal voor natuurlijke veenvegetaties, waardoor de strooiselproductie component nog niet goed gevalideerd zal kunnen worden op het gewenste detailniveau. Meer empirisch onderzoek is hiervoor nodig.

Er zijn weinig directe meetgegevens beschikbaar om te valideren hoe bodemfysische eigenschappen veranderd zijn door de tijd als gevolg van klimaat en/of waterbeheer. Experimenteel onderzoek hiernaar is schaars, alhoewel in een recent gecontroleerd veldexperiment wel bepaald is hoe droogtes in de periode 2018 – 2024 hebben doorgewerkt op de bodemfysische eigenschappen van de toplaag van een sterk gehumificeerde hoogveenbodem (Meijendorst, 2025). Meer van dergelijk experimenteel onderzoek is nodig voor verschillende typen veen (veraarding, samenstelling).

Bovendien is naar verwachting op basis van herhaalde metingen middels (destructieve) bemonstering op dezelfde locatie het effect van tijd op bodemfysische eigenschappen niet goed te onderscheiden van het effect van ruimtelijke variabiliteit. Dergelijke validatie middels ‘hindcasting’ is mogelijk op basis van grotere datasets, maar viel buiten de focus van het huidige project. Een verkenning van Europese datasets en het Nederlands Bodeminformatiesysteem (BIS) zou waardevol kunnen zijn om te bepalen in welke mate dergelijke gegevens beschikbaar zijn. Als alternatief kan een chronosequentie benadering gebruikt worden: hierbij wordt de factor tijd ingewisseld door ruimte (‘space for time’). Een invulling hiervan zou een ‘tijd sinds drainage’ gradiënt kunnen zijn, waarbij recenter gedraineerd veen nog minder veraard is dan veen dat al langdurig is blootgesteld aan drainage. Zolang andere omstandigheden voldoende gelijk blijven (waterbeheer en klimaat), is dit een experimentele opzet waarmee het effect van waterbeheer en klimaatverandering op bodemfysische eigenschappen nagebootst zou kunnen worden.

Aanvullende meetgegevens en onderzoek is nodig om de werking op onderdelen te valideren en parameterwaarden mogelijk aan te scherpen.

## 5 Aanbevelingen

In onderstaande tekst doen wij aanbevelingen om de toepasbaarheid van de veenmodule te verbeteren. Deze zijn gerangschikt naar prioriteit, met hoogste prioriteit bovenaan.

### 1 Integreer de veenmodule in de Waterwijzer Natuur

De veenmodule is ontwikkeld en geeft succesvol plausible resultaten. Op grof niveau is deze geschikt voor 30% van het Nederlandse veenareaal, voor de specifieke bodemfysische eenheid circa 12%. De module is echter nog niet in de Waterwijzer Natuur geïntegreerd en kan daardoor nog niet in de WWN worden toegepast. Als tussenstap is het belangrijk de noodzaak van het inbouwen van bodemvormende processen en de simulatie ervan door de tijd te bepalen. Mocht namelijk blijken dat de bodemvormende processen geen effect hebben op standplaatscondities en voorspelde kansrijkdom, dan is het integreren van de bodemmodule in de Waterwijzer Natuur ook niet noodzakelijk. Concreet kunnen hiervoor modelsimulaties worden uitgevoerd (bijvoorbeeld voor een testgebied) en vegetatietypen met elkaar worden vergeleken waarbij de veenmodule aan en uit staat. Op basis hiervan kan worden bepaald onder welke omstandigheden de veenmodule wel/niet noodzakelijk is en wat de meerwaarde (of niet) ervan is. Wij adviseren om de plausibiliteit van voorspelde natuurpotenties in de Waterwijzer Natuur mét veenmodule te toetsen aan een actuele vegetatiekaart en gemeten standplaatscondities.

In aanvulling op bovenstaande kunnen in deze nieuwe WWN-versie de uitgevoerde actualisatie-acties worden meegenomen, waaronder de nieuwe KNMI'23 scenario's, de nieuwe bodemfysische eenhedenkaart (zie paragraaf 2.5).

### 2 Maak de veenmodule geschikt voor veenbodems met minerale delen.

De huidige veenmodule is toe te passen op circa 30% van alle veengronden (paragraaf 2.4). De overige veengronden bevat een minerale fractie in ten minste een deel van het veenprofiel. Voor deze bodems kan de veenmodule nog niet worden toegepast. Hiervoor dienen twee aspecten te worden aangepast: (1) de relatie tussen bulkdichtheid en degradatiestadium dient hiervoor geschikt te worden gemaakt. (2) De bodemfysische eigenschappen zijn nu afgeleid met transferfuncties die geldig zijn voor veen, tot een bulkdichtheid van  $0.76 \text{ g/cm}^3$ . In gevallen waarbij het organisch stofgehalte kleiner is, zoals bij een kleidek of beekleem, kan deze transferfunctie niet worden toegepast. Er zijn ook transferfuncties beschikbaar voor minerale bodems. Voor Nederland zijn dat bijvoorbeeld de Wösten et al. (2001) transferfuncties, maar deze zijn ongeschikt voor bodems met een lage bulkdichtheid of hoge organisch stofgehalten. Daarmee zijn ze ongeschikt voor veenbodems. Op Europese schaal zijn transferfuncties beschikbaar die kunnen worden toegepast op een grotere bandbreedte van organisch stof en bulkdichtheid (Szabó et al., 2021). Deze zijn niet specifiek ontwikkeld voor veenbodems; het is onbekend in hoeverre deze voldoende geschikt zijn om de bodemfysische eigenschappen van veenbodems te schatten uit bijvoorbeeld bulkdichtheid. Hiervoor zou een vergelijkend onderzoek moeten plaatsvinden tussen transferfuncties.

Een alternatief is om de uitkomsten van veen/minerale transferfuncties te wegen naar het aandeel van veen en minerale deel. Deze benadering is eerder toegepast in wetenschappelijke literatuur (Chadburn et al., 2022). Wij raden aan de naar veenaandeel gewogen transferfuncties toe te passen in de veenmodule om deze zo geschikt te maken voor minerale bodems. Met name in laagveenmoerassen en beekdalen zijn bodems aanwezig met een groot aandeel klei of leem in het veenprofiel. Uitvoeren van deze actie vergroot daarom de toepasbaarheid van de veenmodule voor andere veentypen enorm.

Een aandachtspunt is dat de werking van bovenstaande aanpak niet is gevalideerd, ondanks publicatie in peer-reviewed wetenschappelijke literatuur. Gezien de centrale rol van de bodemfysica in de standplaatscondities bevelen

we aan om de geschatte bodemfysische eigenschappen met verschillende transferfuncties en wegingen te vergelijken met gemeten bodemfysische eigenschappen om te komen tot een weloverwogen schatting.

In aanvulling op het geschikt maken van de gesimuleerde processen, dient ook de invoer geschikt gemaakt te worden voor andere veenbodems. Concreet betekent dit dat initiële veenprofielen voor andere bodemfysische eenheden opgesteld dienen te worden. Hiervoor zijn reeds de nodige gegevens beschikbaar. Met aanvullende en gerichte metingen kunnen deze eventueel nauwkeuriger in beeld worden gebracht.

### 3 Breid de uitvoer van Waterwijzer Natuur uit met netto koolstofvastlegging

Gezien de urgentie om bodemdaling tegen te gaan, natte natuur te herstellen, broeikasgasemissies terug te dringen en grootschalige veenvernating te realiseren, is er vanuit meerdere invalshoeken vraag naar langeretermijn prognoses (bijvoorbeeld 2050 of 2100) over netto koolstofopslag en bodemvorming en -afbraak. Met de in dit onderzoek ontwikkelde veenmodule kunnen zulke prognoses worden gemaakt. Bovendien kan zo met één modelinstrument een integrale afweging worden gemaakt van de impact van verschillende scenario's van klimaatverandering en/of waterbeheer en/of stikstofdepositie op biodiversiteit, broeikasgasemissies, en waterbeschikbaarheid.

Momenteel wordt in de veenmodule alleen de netto vastlegging bijgehouden. Deze uitvoer wordt tot dusver nog niet gebruikt, maar kan voor bovenstaande vragen worden ingezet. Met deze uitbreiding kan met slechts zeer kleine inspanning een kaart van netto CO<sub>2</sub> vastlegging of -emissie worden geproduceerd zodat ruimtelijk inzichtelijk is wat het effect van maatregelen is voor klimaatmitigatie op de langeretermijn.

### 4 Veenmodule ook toepasbaar buiten natuurgebieden voor bodemdaling en klimaatopgave en -mitigatie

De toepasbaarheid van de veenvorming/afbraakmodule is niet begrensd tot natuurgebieden, maar kan ook worden toegepast in andere delen van het landelijk gebied. Bij de klimaatimpact van vernatting dient niet alleen rekening gehouden te worden met CO<sub>2</sub>, maar ook andere broeikasgassen spelen een rol en veranderen als gevolg van waterbeheer en klimaatverandering. Hierbij is vooral het broeikasgas methaan (CH<sub>4</sub>) van betekenis, vooral bij projecties op kortere termijn, gezien het ca. 28x sterkere opwarmend effect van CH<sub>4</sub> in vergelijking tot CO<sub>2</sub> op een tijdschaal van 100 jaar. Om rekening te houden met methaan zijn reeds verschillende modelconcepten beschikbaar (zoals Peatland-VU-NUCOM; Lippmann et al., 2022), die net als de veenmodule in de huidige modelstructuur van de WWN kunnen worden geïntegreerd. Zo kunnen effecten van klimaat en vernattingsmaatregelen in CO<sub>2</sub> equivalenten worden uitgedrukt.

## 6 Conclusie

In dit onderzoek is een veenmodule ontwikkeld die de effecten van klimaatverandering en waterbeheer op veenbodems inzichtelijk maakt. Deze veenmodule simuleert zowel de afbraak van aanwezig veen als de vorming van nieuw veen, waarbij de afbreekbaarheid en hydrologische eigenschappen van de veenbodem door de tijd veranderen. Een plausibiliteitstoets laat zien dat de module realistische resultaten voor bodemvocht, bodemtemperatuur, afbraak, bodemdaling en verandering van bodemeigenschappen oplevert voor een typische veenweidebodem in laag Nederland. Dit betekent dat deze module geschikt is om onder te brengen in de Waterwijzer Natuur (WWN).

Om de toepasbaarheid van de veenmodule voor toepassing in de Waterwijzer Natuur (WWN) verder te vergroten, zijn een aantal vervolgstappen nodig. Daarnaast dient de veenmodule getest en geschikt gemaakt worden voor verschillende veentypen. Voor toepassing buiten puur organische bodems zou de veenmodule moeten worden uitgebreid naar veenbodems met minerale bijmenging, zoals klei of leem. Met kleine aanpassingen kan de module daarnaast kaarten genereren van netto koolstofvastlegging op de langere termijn (ca. 20-50 jaar) in veenbodems en effecten van toekomstig waterbeheer, vernatting, en klimaatverandering daarop.

Naast het verbeteren van de voorspelde standplaatscondities en kansrijkdom van vegetatietypen in de WWN is de ontwikkelde veenmodule van grote waarde bij andere urgente maatschappelijke vraagstukken, zoals:

- Het onderbouwen van keuzes voor maatregelen tegen bodemdaling in natuur- en landbouwgebieden.
- Het bepalen van effectieve en kostenefficiënte maatregelen voor natuurbehoud en -herstel in onder andere laagveenmoerassen, beekdalen, en hoogvenen.
- Slimme keuzes te maken bij grootschalige vernatting van veengebieden in het kader van de Europese Nature Restoration Law (sinds 2024 van kracht; European Union (2024)).
- Bepalen effectiviteit klimaatmitigatie via behoud en herstel van veen, gericht op langdurige CO<sub>2</sub>-vastlegging.

# Literatuur

- Bessembinder, J., Bintanja, R., Van Dorland, R., Homan, C., Overbeek, B., Selten, F., & Siegmund, P. (2023). KNMI'23 klimaat scenario's voor Nederland. In: De Bilt: KNMI.
- Bonten, L. T., Reinds, G. J., & Posch, M. (2016). A model to calculate effects of atmospheric deposition on soil acidification, eutrophication and carbon sequestration. *Environmental modelling & software*, 79, 75-84.
- Boonman, J., Hefting, M. M., van Huissteden, C. J., van den Berg, M., van Huissteden, J., Erkens, G., Melman, R., & van der Velde, Y. (2022). Cutting peatland CO<sub>2</sub> emissions with water management practices. *Biogeosciences*, 19(24), 5707-5727.
- Bootsma, H., Kooi, H., & Erkens, G. (2020). Atlantis, a tool for producing national predictive land subsidence maps of the Netherlands. *Proc. IAHS*, 382, 415-420. <https://doi.org/10.5194/piahs-382-415-2020>
- Chadburn, S. E., Burke, E. J., Gallego-Sala, A. V., Smith, N. D., Bret-Harte, M. S., Charman, D. J., Drewer, J., Edgar, C. W., Euskirchen, E. S., Fortuniak, K., Gao, Y., Nakhavali, M., Pawlak, W., Schuur, E. A. G., & Westermann, S. (2022). A new approach to simulate peat accumulation, degradation and stability in a global land surface scheme (JULES vn5.8\_accumulate\_soil) for northern and temperate peatlands. *Geosci. Model Dev.*, 15(4), 1633-1657. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1633-2022>
- Cleveland, C. C., & Liptzin, D. (2007). C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 85, 235-252.
- Erkens, G., Melman, R., Jansen, S., Boonman, J., Hefting, M., Keuskamp, J., Bootsma, H., Nougues, L., van den Berg, M., & van der Velde, Y. (2022). Subsurface Organic Matter Emission Registration System (SOMERS). *Beschrijving SOMERS*, 1.
- European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. *Official Journal of the European Union*, 1991, 1.
- Evans, C. D., Peacock, M., Baird, A. J., Artz, R. R. E., Burden, A., Callaghan, N., Chapman, P. J., Cooper, H. M., Coyle, M., Craig, E., Cumming, A., Dixon, S., Gauci, V., Grayson, R. P., Helfter, C., Heppell, C. M., Holden, J., Jones, D. L., Kaduk, J., . . . Morrison, R. (2021). Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature*, 593(7860), 548-552. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- Frolking, S., Roulet, N. T., Moore, T. R., Lafleur, P. M., Bubier, J. L., & Crill, P. M. (2002). Modeling seasonal to annual carbon balance of Mer Bleue Bog, Ontario, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(3), [doi:10.1029/2001GB001457](https://doi.org/10.1029/2001GB001457). <http://dx.doi.org/10.1029/2001GB001457>
- Frolking, S., Roulet, N. T., Moore, T. R., Richard, P. J. H., Lavoie, M., & Muller, S. D. (2001). Modeling Northern Peatland Decomposition and Peat Accumulation. *Ecosystems*, 4(5), 479-498. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0105-1>
- Frolking, S., Roulet, N. T., Tuittila, E., Bubier, J. L., Quillet, A., Talbot, J., & Richard, P. J. H. (2010). A new model of Holocene peatland net primary production, decomposition, water balance, and peat accumulation. *Earth Syst. Dynam.*, 1(1), 1-21. <http://www.earth-syst-dynam.net/1/1/2010/>
- Fujita, Y., Van Bodegom, P. M., Olde Venterink, H., Runhaar, H., & Witte, J.-P. M. (2013). Towards a proper integration of hydrology in predicting soil nitrogen mineralization rates along natural moisture gradients. *Soil Biology and Biochemistry*, 58(0), 302-312. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.12.013>
- Geurts, J. J., van Duinen, G., & Belle, J. v. (2019). Recognize the high potential of paludiculture on rewetted peat soils to mitigate climate change.
- Hefting, M. M., van Asselen, S., Keuskamp, J. A., Harpenslager, S. F., & Erkens, G. (2022). *Carbon stocks in sight - High-resolution vertical depth profiles to quantify carbon reservoirs in the NOBV research sites (Chapter 12 NOBV year report 2022)*.
- Heinen, M., Brouwer, F., Teuling, C., & Walvoort, D. (2021). *BOFEK2020-Bodemfysische schematisatie van Nederland: update bodemfysische eenhedenkaart (1566-7197)*.
- Kooijman, A., & Hedenäs, L. (2009). Changes in nutrient availability from calcareous to acid wetland habitats with closely related brown moss species: increase instead of decrease in N and P. *Plant and Soil*, 324, 267-278.
- Kroes, J., Van Dam, J., Bartholomeus, R., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R., Mulder, H., Supit, I., & Van Walsum, P. (2017). *SWAP version 4 (1566-7197)*.

- Leifeld, J., Zimmermann, M., & Fuhrer, J. (2008). Simulating decomposition of labile soil organic carbon: Effects of pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(12), 2948-2951.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.08.019>
- Lippmann, T. J. R., Heijmans, M., Dolman, H., van der Velde, Y., Hendriks, D., & van Huissteden, K. (2022). PVN 1.0: using dynamic PFTs and restoration scenarios to model CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions in peatlands. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2022, 1-42.
- Liu, H., & Lennartz, B. (2019). Hydraulic properties of peat soils along a bulk density gradient—A meta study. *Hydrological processes*, 33(1), 101-114.
- Meijenhorst, N. (2025). *Drought Effects on Soil Physical Properties in a Degraded Raised Peat Bog (MSc Thesis)*.
- Nijp, J. J., Aggenbach, C. A., van Dijk, G., Koks, A., Cusell, C., & Kanters, S. (2022a). *Bevloeiing ter bevordering van trilveenvegetatie in de Weerribben*.
- Nijp, J. J., de Haan, M., & Witte, J. P. M. (2019). *Effecten van klimaatverandering op terrestrische natuur in Nederland - Een landelijke toepassing van Waterwijzer Natuur in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater (KWR rapport 2019.050)*.
- Nijp, J. J., de Wit, J., Clevers, S., Dorland, E., Reinds, G.-J., Kros, H., Fujita, Y., Hoefsloot, P., & Witte, J.-P. M. (2022b). *Waterwijzer Natuur Fase 3 - Klimaatrobuuste modellering van effecten van zuur- en stikstofdepositie op natuur*.
- Nilsson, M., Sagerfors, J., Buffam, I., Laudon, H., Eriksson, T., Grelle, A., Klemedtsson, L., Weslien, P., & Lindroth, A. (2008). Contemporary carbon accumulation in a boreal oligotrophic minerogenic mire - a significant sink after accounting for all C-fluxes. *Global Change Biology*, 14(10), 2317-2332.
- Page, S. E., & Baird, A. (2016). Peatlands and global change: response and resilience. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 35-57.
- Quillet, A., Garneau, M., & Froking, S. (2013). Sobol' sensitivity analysis of the Holocene Peat Model: What drives carbon accumulation in peatlands? *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences*, 118(1), 203-214.  
<http://dx.doi.org/10.1029/2012JG002092>
- Roulet, N. T., Lafleur, P. M., Richard, P. J. H., Moore, T. R., Humphreys, E. R., & Bubier, J. (2007). Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatland. *Global Change Biology*, 13(2), 397-411.
- Szabó, B., Weynants, M., & Weber, T. K. (2021). Updated European hydraulic pedotransfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geoscientific Model Development*, 14(1), 151-175.
- Temmink, R. J., Vroom, R. J., van Dijk, G., Käärmelahti, S. A., Koks, A. H., Joosten, H., Krebs, M., Gaudig, G., Brust, K., & Lamers, L. P. (2024). Restoring organic matter, carbon and nutrient accumulation in degraded peatlands: 10 years Sphagnum paludiculture. *Biogeochemistry*, 167(4), 347-361.
- Tomassen, H. B. M., Limpens, J., Nijp, J. J., van Duinen, G. A., & Smolders, A. J. P. (2022). *Stimuleren van acrotelmontwikkeling in hoogveenrestanten* [Report]. VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren.
- van de Craats, D., van den Berg, M., van Huissteden, J., van der Velde, Y., & Boonman, J. (2022). *Process-based modelling of CO<sub>2</sub> fluxes in Vlist (Chapter 11 NOBV year report 2022)*.
- van den Akker, J. J. H., Beuving, J., Hendriks, R. F. A., & Wolleswinkel, R. J. (2007). *Maaiveldaling, afbraak en CO<sub>2</sub>-emissie van Nederlandse veengebieden. Leidraad bodembescherming, afl. 83*. S. Uitgevers.
- Von Post, L. (1924). Das genetische system der organogenen bildungen schwedens. *Comité International de Pédologie, IV Commission*, 22, 287-304.
- Walse, C., Berg, B., & Sverdrup, H. (1998). Review and synthesis of experimental data on organic matter decomposition with respect to the effect of temperature, moisture, and acidity. *Environmental Reviews*, 6(1), 25-40.
- Wang, M., Moore, T. R., Talbot, J., & Riley, J. L. (2015). The stoichiometry of carbon and nutrients in peat formation. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(2), 113-121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014GB005000>
- Witte, J., Runhaar, J., Bartholomeus, R., Fujita, Y., Hoefsloot, P., Kros, J., Mol, J., & de Vries, W. (2018). *De waterwijzer natuur: Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op terrestrische natuur*. Stowa.
- Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions. Bridging the gap between available soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251, 123-150.

# I Afwegingen modelkeuzes

In Tabel I.2 zijn een aantal overwegingen weergegeven

Tabel I.1. Overzicht van gebruikte afkortingen in Tabel I.2.

Acroniem	Betekenis	Informatie	Gebruikt in WWN?
CENTURY	-	Model dat de koolstof-, stikstof- en fosforcyclus simuleert.	ja
NOBV	Nederlands Onderzoeksprogramma Veenweiden	Onderzoek naar bodemdaling en daaraan gerelateerde broeikasgasemissies (en waterhuishouding) in veenweidegebied	
NUCOM-BOG	<b>NU</b> trient <b>C</b> ycling and <b>CO</b> mpetition	Model gebruikt voor competitie planten, C vastlegging en stikstofcyclus.	
PVN	Peatland-VU-NUCOM model	Model toegepast in NOBV o.a. om CO <sub>2</sub> en CH <sub>4</sub> emissies berekenen.	
HPM	Holocene Peatland Model	Cohort/laagjesmodel voor bodemopbouw. Ook versie met CO <sub>2</sub> en CH <sub>4</sub> emissies beschikbaar.	
SWAP	Soil-Water-Atmosphere-Plant model	Vochttransportmodel voor de (on)verzadigde zone.	ja
VSD	Very Simple Dynamic model	Bodemchemische module in de WWN.	ja

Tabel I.1. Overwegingen rondom modelconcepten, belang ervan (laatste kolom) en beargumentatie van gemaakte keuzes.

Hoofdonderdeel	Overweging	Keuze en beargumentatie	Inschatting belang voor bodemvorming
Decompositie	Parameters reductie van decompositie voor bodemvocht.	Parameterwaarden en processen zo veel als mogelijk gelijk houden met modellering in NOBV. Argument daarvoor is representativiteit voor (Nederlands) laagveen draagvlak. Voor decompositiesnelheid zijn aanvullend veel litterbag studies beschikbaar. Uit eerder onderzoek is gebleken dat klimaat, hydrologie en bodemeigenschappen sturend zijn in afbraak/bodemvorming	+++
	Aanpak bodemopbouw: vaste koolstofpools in bodem (zoals in CENTURY) of daadwerkelijk strooiselproductie simuleren (cohorts), zoals in Holocene Peatland Model (HPM)	Keuze Veel modellen gebruiken koolstof 'pools' voor modelleren organisch stof (o.a. PVN, CENTURY). Pools zijn bijvoorbeeld peat, humus, microbial biomass, litter and dead roots, root exudates. Cohort modellen houden per tijdseenheid bij hoe bodemlaagjes vormen en afbreken. Deze zijn daarom uiterst geschikt voor het betreffende doel en worden gebruikt in dit onderzoek. Alternatieven: acrotelm-catotelm concept, overgang van specifieke organische fracties en stofgroepen (lignin, cellulose, etc), empirisch.	++++
	Reductie van decompositie door bodem pH	CENTURY heeft geen reductiefunctie om de afbraak bij lage pH van de bodem te belemmeren, maar deze kan worden toegevoegd op basis van de literatuur (bijv. Walse et al. 1998). Dit vraagt om het mee-simuleren van bodem pH. Dat kan, maar vraagt extra werk en is niet de kern van dit onderzoek. Daarnaast is gevoeligheid voor bodem pH nog onduidelijk. Ondanks mogelijk belang daarom achterwege gelaten.	+/-
	Functie van P en N maken?	CENTURY heeft een module om afbraaksnelheid te compenseren voor stikstof. Decompositie is zelden gelimiteerd door beschikbaarheid van stikstof, alleen onder zeer voedselarme condities. Dit zou mogelijk spelen in (natuurlijk) hoogveen, maar waarschijnlijk minder relevant in Nederlandse situatie. We negeren gezien de focus op laagveen de keuze	-
	Afbraak simulatie over gehele veenprofiel of alleen de wortelzone	Afbraak vindt in het gehele veenprofiel plaats. Juist 'vers' veen rond de diepste grondwaterstand zal nog relatief goed afbreekbaar zijn, zal afbreken en tot bodemdaling leiden. Daarom in elk geval de bovenste ca 1 m meenemen, maar focus op wortelzone	+
	Afbraak organisch materiaal door NO <sub>3</sub> meenemen?	Naast zuurstof kan denitrificatie voor afbraak van organisch materiaal zorgen, onder zuurstofloze omstandigheden (zoals in veenbodems). Dit proces kan in CENTURY worden meegenomen maar is	+

Hoofdonderdeel	Overweging	Keuze en beargumentatie	Inschatting belang voor bodemvorming
		gestoeld op empirische relaties en niet procesmatig (daardoor niet robuust). Om modelcomplexiteit te beperken handhaven we deze CENTURY aanpak. Alternatieven zijn afbraak van organisch materiaal via nitraatreductie volgen concepten zoals geformuleerd in VSD of anders PEATBOG (Wu & Blodau).	
Biomassa productie / groei	Er zijn veel manieren om groei van vegetatie (en dus strooiselaanvoer en kwaliteit) te berekenen. Maar wat sluit het best aan bij de huidige toepassing? En (hoe) kunnen we dat parameteriseren op basis van beschikbare informatie?	<p>Biomassaproductie speelt een rol bij de aanvoer van vers organisch materiaal. In bijvoorbeeld PEATLAND-VU-NUCOM (toegepast in NOBV voor veenweidegebieden en gevalideerd) en HPM (gevalideerd in meerdere studies voor natuurlijke veensystemen) worden parameters voor specifieke functionele plantengroepen (Plant functional types, PFT's) gebruikt. Deze zijn redelijk te schatten op basis van experimentele gegevens, alhoewel uiteraard variatie binnen PFT's blijft bestaan. Het gaat uiteindelijk om de strooiselproductie en de afbraaksnelheid van het materiaal; het maakt in principe niet uit hoeveel biomassa er op het veen staat. In HPM wordt (op jaarbasis) aangenomen dat biomassaproductie = strooiselproductie. Met een volgroeide vegetatie is dat acceptabel. De biomassaproductie is PFT afhankelijk. Er is dus ook een competitie model nodig dat het aandeel PFT bepaald. Vochtvoorziening is daarin grotendeels sturend, en wordt bv ook in HPM en PVN als enige sturende factor genomen. PVN heeft geen stikstofkringloop, CENTURY wel.</p> <p>In dit onderzoek wordt PFT biomassaproductie berekend aan de hand van huidige CENTURY – om zo aan te sluiten bij eerdere WWN concepten. Biomassaproductie kan op zeer hoog detailniveau worden voorspeld. Wij kiezen voor een 'parsimonieuze' benadering: met zo min mogelijk parameters een zo goed mogelijke voorspelling doen.</p> <p>Per PFT wordt de biomassaproductie berekend, en gecorrigeerd voor milieuvariabelen temperatuur, waterstand, en nutriënten. Literatuurstudie geeft aan (o.a. Quillet et al (2013)) dat het belangrijk is naast waterstand ook voor temperatuur en nutriënten te corrigeren om te komen tot realistische strooiselproductie in natuurlijke veensystemen. Voor parameterisatie putten we in de basis uit HPM (Frolking et al 2010) en waar mogelijk verfijnd voor gegevens van laagveen uit Nederland/west Europa/zuid Scandinavie.</p>	+
	Dynamische vegetatiesamenstelling	Uit voorgaande blijkt dat vegetatiesamenstelling de afbreekbaarheid en aanvoer van organisch materiaal bepaalt en daarmee van belang is voor bodemvorming. Vegetatiesamenstelling verandert door de tijd en wordt dynamisch meegenomen. Hierin wordt competitie berekend via water en nutriënten (en evt zuurgraad).	+

Hoofdonderdeel	Overweging	Keuze en beargumentatie	Inschatting belang voor bodemvorming
		<p><b>Optie 1:</b> WWN - PARDENS</p> <p>In principe hebben we natuurlijk WWN die vegetatietypen voorspeld, die zouden kunnen worden meegenomen. Dat zou echter vragen om (1) een schatting te maken van gemiddelde plant-functional type (PFT) samenstelling per ecotoopgroep en (2) inbouwen van dynamische ecotoopgroepvoorspelling (PARDENS) met noodzaak van modelleren zowel zuurgraad en voedselrijkdom mbv VSD en CENTURY. Het eerste punt levert extra onzekerheid, want PFT samenstelling kan sterk variëren binnen ecotoopgroepen. Dit is een vrij indirecte manier om PFT samenstelling te schatten, kan net misschien beter direct via optimum van water (zoals in HPM) in combinatie met voedselrijkdom (zie onder)</p> <p><b>Optie 2:</b> <i>Vertaal gesimuleerde N<sub>min</sub> en P<sub>min</sub> naar indicatiewaarde via de ijkrelatie in WWN-3 en gebruik die om per soortengroep (bv Carex, Sphagnum, brown mosses) een gemiddelde indicatiewaarde te bepalen.</i></p> <p>Die indicatiewaarde kunnen we gebruiken om relatieve kans PFTs te bepalen. Nadeel: de ijkrelatie tussen N<sub>min</sub> en indicatiewaarde voedselrijkdom is (zeer) zwak te noemen en heeft dus grote onzekerheid. Anderzijds, we doen het er in de WWN momenteel ook mee.</p> <p><b>Optie 3</b> - <i>Baseren op modelconcepten in eerdere studies (Holocene Peat Model), NUCOM (Bijlage Heijmans (2008)).</i></p>	
	Parameters root:shoot ratio	Overnemen uit PVN en anders HPM	+/-
	Tijdschaal	Om klimaatveranderingseffecten goed mee te nemen (droogte) is het benodigd biomassa productie op dagbasis door te rekenen. Ook afbraak van aanwezig organisch materiaal wordt op dagbasis doorgerekend. De update van bodemfysische eigenschappen wordt jaarlijks gedaan.	++
Root exudates	Meenemen?	Wortels vormen (met name in groeiseizoen) een actieve bron van koolstof vormt en afbraak stimuleert. Dit effect nemen we hier niet mee omdat verwacht wordt dat het beperkt invloed heeft en parameterisatie grote onzekerheid heeft.	--
Minerale bodem	Hoe rekening mee houden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Organisch materiaal is licht, en een kleine fractie minerale bodem levert al snel een hogere bulk dichtheid. 'puur' veen komt tot bulk dichtheid van ca 200 kg/m<sup>3</sup>. Bij hogere bulk dichtheid is bijmenging van minerale bodem zeer waarschijnlijk. De transferfunctie van Liu et al is toepasbaar voor bulkdichtheid tot ca 200 kg/m<sup>3</sup>. Daarna is een minerale transferfunctie nodig. Wij beperken</li> </ul>	++

Hoofdonderdeel	Overweging	Keuze en beargumentatie	Inschatting belang voor bodemvorming
		<p>ons hier wegens tijd en kostenafweging tot 'pure veenbodems' voor bepalen hydraulische eigenschappen van de wortelzone. In veenweidegebied zal vaak veen met kleidek optreden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initialisatie van het model vraagt om een realistisch bulk dichtheidsprofiel (per BOFEK). Deze kunnen we niet baseren op gemeten bulk dichtheid omdat hier ook een minerale fractie in zit en te hoog uit valt.</li> <li>• Uiteraard speelt oxidatie geen rol in minerale fractie. Dat betekent dat afbraak bij minerale bodems lager zal uitvallen.</li> </ul>	
Zwel-krimp	Effect meenemen op maaiveldpositie?	<p>Maaiveldverandering wordt veroorzaakt door meerdere processen, veenoxidatie/vorming is daar slechts één van. Ook zwel-krimp in de onverzadigde zone en primaire consolidatie in het verzadigde veenpakket spelen mee. In SWAP wordt krimp allen middels vorming macroporiën gesimuleerd, maar er zijn andere procedures om relatief eenvoudig rekening te houden met volumeverandering in de verzadigde veenkolom (primaire consolidatie) (Nijp ea 2017). Voor natuurlijk hoogveen zijn hier waarden voor beschikbaar maar voor veenweide is de parameterisatie (nog) slecht bekend en wordt daarom nu niet meegenomen. Voor standplaatscondities van natte vegetaties kan seizoenale maaiveldfluctuatie belangrijk zijn, maar nu wordt er geen prioriteit aan gegeven.</p>	-
Peiladaptatie	Beweegt het oppervlaktepeil mee met maaiveld?	<p>Dit betreft een 'watermanagement' actie/beleidskeuze. Als het oppervlaktepeil meebeweegt met maaiveldpositie levert dat op langere termijn een wezenlijk andere standplaatscondities dan als het gefixeerd is op een vast peilregime. Hiervoor wordt één constant peil ingesteld (dus geen zomer- en winterpeil) zoals dat momenteel ook in de WWN gebeurt.</p> <p>Voorstel: focus is op peilregime beweegt mee met maaiveldontwikkeling (ontwateringsbasis blijft gelijk)</p>	++++