

KWR 2023.084 | Oktober 2023

**Doorontwikkeling van  
de Waterwijzer Natuur  
voor laagvenen,  
beekdalen en plassen**



# Colofon

## Doorontwikkeling van de Waterwijzer Natuur voor laagvenen, beekdalen en plassen

KWR 2023.084 | Oktober 2023

### Opdrachtnummer

404574

### Projectmanager

Edu Dorland

### Opdrachtgever

Rijkswaterstaat

### Auteurs

Jelmer Nijp (KWR), Flip Witte (FWE), Yuki Fujita (NMI-Agro)  
Met medewerking van Gert-Jan Reinds (WENR)

### Keywords

Waterwijzer Natuur, ecohydrologie, modellen, waterbeheer, klimaat

Jaar van publicatie  
2023

Meer informatie  
dr. Jelmer Nijp  
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)

**KWR**

Oktober 2023 ©

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.

# Inhoud

<b>Colofon</b>	<b>2</b>
<b>Inhoud</b>	<b>3</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>4</b>
1.1 Achtergrond	4
1.2 Doel	5
1.3 Afbakening	5
1.4 Visie / Rationale	6
<b>2 Potentiële winst door uitbreiding effectmodules met processen</b>	<b>7</b>
<b>3 Voorstel dynamische bodem</b>	<b>12</b>
3.1 Relevantie	12
3.1.1 Kantelpunten in waterbeheer?	13
3.2 Beschikbare informatie en modellen	14
3.2.1 Keuze modelaanpak	15
3.3 Aanpak	17
3.3.1 Verwachtingen en beperkingen	20
3.3.2 Aandachtspunt toekomstige ontwikkelingen	21
<b>4 Literatuur</b>	<b>22</b>
<b>I Overzicht CENTURY</b>	<b>25</b>
<b>II Effect waterbeheer op bodemfysica</b>	<b>26</b>

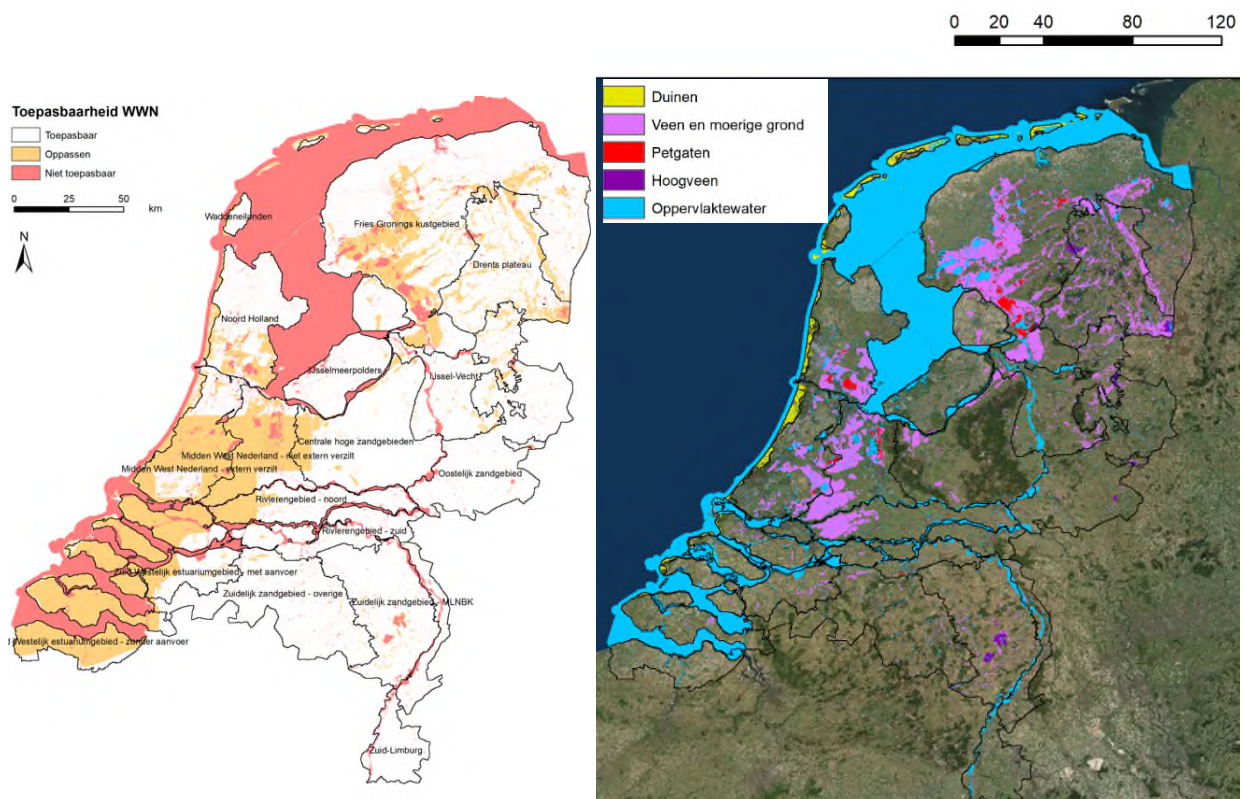
# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Klimaatverandering, 'bodem en water sturend', de watertransitie, stikstofdepositie, ruimtelijke adaptatie, en andere toekomstige ontwikkelingen zullen de waterhuishouding veranderen. De veranderde waterhuishouding heeft effect op vochtcondities in de wortelzone. Op hun beurt zal de veranderende vochtthuishouding processen in de bodem beïnvloeden. Hierdoor werkt een verandering in vochtcondities door op andere standplaatscondities, zoals zuurgraad en voedselrijkdom.

In het kader van het Deltaprogramma Zoetwater is een effectmodule natuur ontwikkeld om te kunnen voorspellen hoe veranderingen in waterbeheer en klimaat doorwerken op natuur. Voor terrestrische en grondwaterafhankelijke natuur is daartoe de Waterwijzer Natuur (WWN) toegepast op de Deltascenario's (Nijp e.a., 2019). Dit heeft tot zinvolle inzichten geleid. De toepasbaarheid van de landelijke effectmodules was echter begrensd. Dit was één van de bronnen die zorgen voor onzekerheid in de modeluitkomsten. Uit de voorgaande analyse kwam naar voren dat met name de toepasbaarheid in aquatische natuur, duinen, natuur onder invloed van brak water, en veengebieden begrensd is (Tabel 1-1 en Figuur 1-1).

Om de effectvoorspelling te verbeteren, met name in gebieden rondom oppervlaktewateren, is als doel gesteld om de Waterwijzer Natuur te verbeteren voor de landschapstypen laagveenmoerassen, beekdalen, en plassen. Verschillende doorontwikkelingen van de WWN zijn denkbaar, die ieder een aspect in de effectvoorspelling kunnen verbeteren.



Figuur 1-1. Ruimtelijk inzicht in de toepasbaarheid van Waterwijzer Natuur. Links: codering toepasbaarheid, rechts een uitsplitsing naar landschapstype.

## 1.2 Doel

Het doel van dit onderzoek is om te verkennen welke verbeteringen in de WWN kunnen leiden tot een verbeterde voorspelling in laagveenmoerassen en beekdalen. Op basis van een literatuuronderzoek is eerst bestaande kennis op een rij gezet. Vervolgens wordt bepaald hoe deze kennis kan worden ingezet, en welke informatie nog ontbreekt. Van te voren is door de opdrachtgever al voorkeur opgegeven om de dynamische bodem in te bouwen. De haalbaarheid van deze uitbreiding wordt daarom eerst beschreven en in detail uitgewerkt in een plan van aanpak.

Tabel 1-1. Toepasbaarheid van de Waterwijzer Natuur voor verschillende typen natuur. Overgenomen uit Nijp e.a. (2019)

Toepasbaarheid	Landgebruik	Argumentatie	Selectie
Ongeschikt	Oppervlaktewater	Geen terrestrisch milieu	Buitenwateren
	Buitendijks gebied / uiterwaarden	Directe invloed van oppervlaktewater op bodemchemie	Buitenwateren
	Kraggen	Directe invloed van oppervlaktewater op bodemchemie.	Bodemkaart petgat associatie
	Hoogveen	Bodemvorming wordt niet meegenomen in WWN	LGN6 'Hoogveen' en 'Bos in hoogveengebied'
	Kwelders en inlagen	Zout speelt een belangrijke rol, maar wordt niet beschouwd in WWN	Buitenwateren
Oppassen	Veen	Bodemeigenschappen veranderen door klimaatverandering	Grondsoortenkaart
	Brak binnendijks gebied	Saliniteit kan een rol spelen, maar wordt niet beschouwd in WWN	Grote delen Zeeland
	Duinen	Bodemkaart weinig informatief	Landgebruik Nederland
Geschikt	Overige		

## 1.3 Afbakening

Belangrijk is te melden dat in deze verkenning de nadruk ligt op het verbeteren van de Waterwijzer Natuur, en niet de nabewerking van de uitvoer ervan. Ook in de nabewerking zijn namelijk zinvolle verbeteringen om tot een betere effectvoorspelling te komen denkbaar. Deze zijn echter grotendeels buiten beschouwing gelaten in deze verkenning (zie ook sectie 1.4).

De Waterwijzer Natuur is ongeschikt voor toepassing op aquatische ecosystemen. Processen die in oppervlaktewater spelen worden namelijk niet meegenomen. We begrenzen deze verkenning daarom tot beekdalen en laagveenmoerassen. Er bestaan andere modellen die speciaal ontwikkeld zijn voor oppervlaktewater en derhalve veel geschikter zijn voor effectvoorspelling in plassen en meren dan de Waterwijzer Natuur. Alhoewel bij aquatische systemen andere stuurvariabelen relevant zijn, zou de generieke vegetatiemodule van de Waterwijzer Natuur (Witte e.a., 2007b) wél geschikt kunnen zijn om op uniforme wijze kansrijkdom van vegetatie te voorspellen in aquatische systemen.

## 1.4 Visie / Rationale

De visie van de Waterwijzer Natuur is om deze zo veel mogelijk ecohydrologische processen te baseren. In het verleden heeft deze gedachtegang geleid tot een klimaatrobuuster instrumentarium (Witte e.a., 2007a; Bartholomeus e.a., 2012; Witte e.a., 2015). Door de voorspellingen op processen te baseren, zijn deze robuuster dan kennisregels, omdat bijvoorbeeld interacties tussen variabelen kunnen worden meegenomen. Het ingewikkelde web van interacties en standplaatscondities die elkaar beïnvloeden is onmogelijk met kennisregels te ondervangen en vraagt om een procesmatige benadering.

## 2 Potentiële winst door uitbreiding effectmodules met processen

In de inleiding is beschreven in welke deelgebieden de toepasbaarheid van de WWN nog voor verbetering vatbaar is. De voornaamste verbetering is het dynamisch modelleren van de bodem, die in het volgende hoofdstuk (Hoofdstuk 3) wordt behandeld. In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op een aantal andere mogelijke verbeteringen op basis van literatuurstudie.

Tabel 2-1. Overzicht van processen die momenteel de toepasbaarheid van de effectmodule beperken voor laagveen, beekdal en plassen. Ook hoogveen is genoemd, gezien deze kan meeprofiteren van een aantal aanpassingen. Een + geeft aan dat de verwachting is dat het inbouwen van proces voor het betreffende landschapstype tot een betere voorspelling leidt. ++ geeft weer dat dit naar verwachting tot een veel betere voorspelling leidt. In de tabelheader geeft de kleur oranje weer dat momenteel de toepasbaarheid ‘oppassen’ is en rood dat de effectmodule ongeschikt is. De kleuren in de cellen geven weer wat een verbetering van het individuele proces toe zou leiden, waarbij oranje betekent dat code oppassen bereikt wordt en groen dat het toepasbaar wordt.

#	Proces	Benodigde inspanning	Laagveen en kraggen	Beekdal	Plassen	Hoogveen
1	Brak water invloed (oppervlaktewater en kwel)	+	+		++	
2	Terugkoppeling bodemeigenschappen – klimaat	+	++	++		++
3	Bodemeigenschappen van natuurbodems, ipv BOFEK	+	+	+		+
4	Invloed kwaliteit oppervlaktewater nutriënten (NPK) en zuurbuffering (Ca, Mg, Na)	++	++	+	++	
5	Overstromingseffecten op vochtregime	+	+	++		
6	Overstromingseffecten op zuurgraad en voedselrijkdom	+++	+	++		

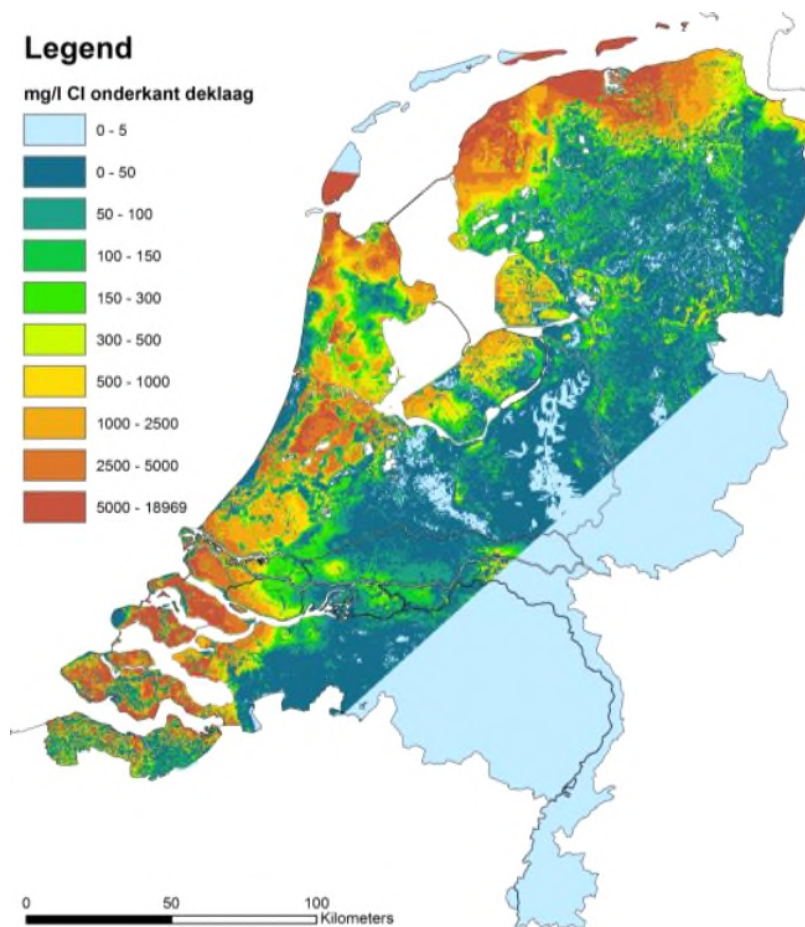
### 1 – Brak water

Brakke ecotoopgroepen worden momenteel niet meegenomen in de effectmodule. Het gehele proces van verzilting van de wortelzone wordt nog niet meegenomen. Vooral in de kustprovincies (Figuur 2-1) zullen hierdoor voorspelde effecten onzeker zijn. In het LHM wordt de zoutconcentratie van het oppervlaktewater gesimuleerd. Hoe deze in detail optreedt in laagveenmoerassen, gaat met de nodige onzekerheid gepaard.

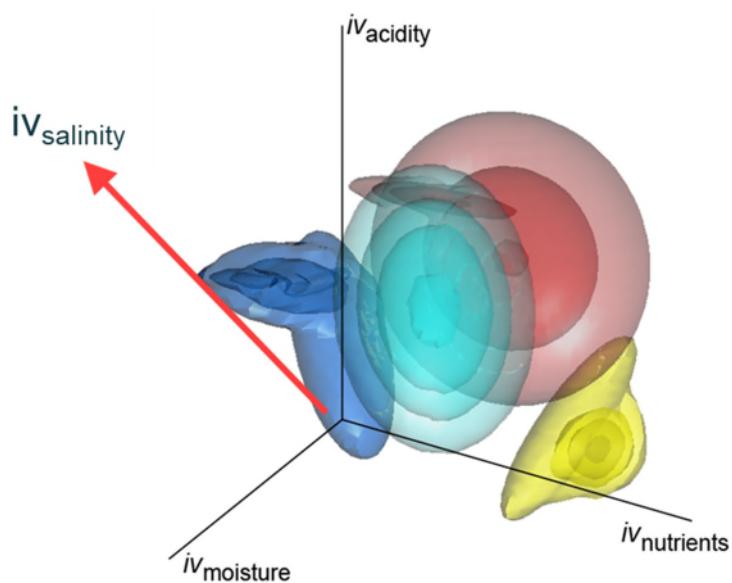
Theoretisch is het met SWAP mogelijk om zouttransport naar de wortelzone te simuleren. Dit zoutgehalte zou via indicatiewaarden voor saliniteit kunnen worden meegenomen om de kansrijkdom van vegetatie te voorspellen. Momenteel wordt de kansrijkdom nog gebaseerd op indicatiewaarde voor vocht, voedselrijkdom, en zuurgraad. Hoe de zoutconcentratie precies doorwerkt op de kansrijkdom van vegetatie is nog een kennisleemte, alhoewel mogelijk deels te ondervangen met databases (zie onderdeel 5). Bovendien is lateraal stoftransport lastig te simuleren met SWAP.

Een alternatief is om met geostatistiek verbanden te leggen tussen de vegetatieopnamen uit Landelijk Meetnet Flora (Anonymous, 2019) en geografische gegevens als het chloridegehalte van de laagveenplas en de afstand tot het oppervlaktewater. Dit betreft een benadering gebaseerd op kennisregels en is dus niet op processen gebaseerd.





Figuur 2-1. Overzicht van de chlorideconcentratie aan de onderkant van de deklaag (links) en chloride wellen (rechts). Hoog Nederland is buiten beschouwing gelaten (Deltares, 2014).



Figuur 2-2. Uitbreiding van voorspelling kansrijkdom met indicatiewaarde saliniteit. De verschillende kleurenbollen geven de kansdichtheidsfuncties weer van verschillende vegetatietypen voor de huidige indicatiewaarden (vocht, voedselrijkdom, zuurgraad).

## 2 – Terugkoppeling bodemeigenschappen – klimaat

In bodems met (veel) organisch materiaal heeft klimaatverandering en waterbeheer een dominant effect op de bodemstructuur en daarmee het hydrologisch functioneren. Gezien hydrologie ook bodemchemische processen stuurt, zal dit naast effect op waterhuishouding ook doorwerken op voedselrijkdom en zuurgraad. Bij droogte wordt er bijvoorbeeld organisch materiaal afgebroken, terwijl dat bij kletsnatte omstandigheden verhinderd wordt. Dit speelt met name in veengronden en moerige bodems, die aangetroffen worden in laagveenmoerassen, beekdalen, en hoogvenen.

Ook kan zo het effect van extremen doorwerken op standplaatscondities en kan een ecosysteem in een negatieve spiraal komen. Of omgekeerd: door goed waterbeheer in een positieve spiraal. Deze effecten worden niet meegenomen in huidige WWN. Daarmee kan niet goed worden gekwantificeerd hoe vernatting of verdroging, via verandering op bodemstructuur, doorwerkt op vegetatie. Op deze terugkoppeling wordt uitgebreid ingegaan in Hoofdstuk 3.

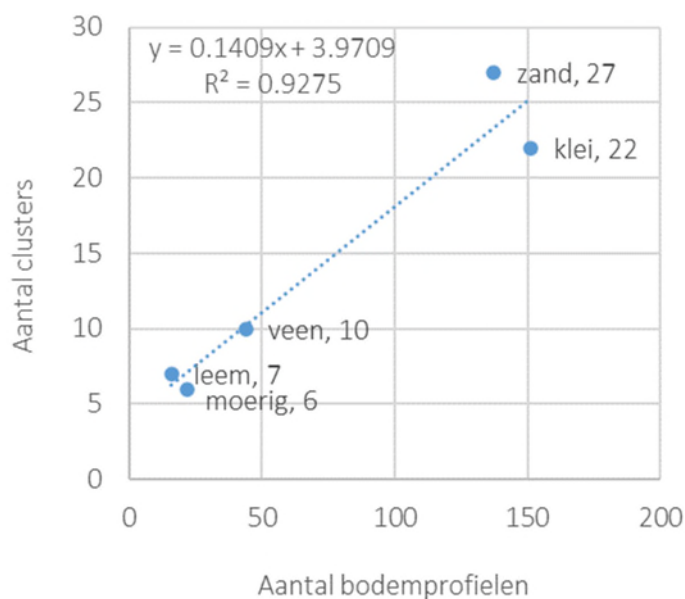
## 3 – Bodemeigenschappen op basis van natuurbodems

Momenteel zijn bodemeigenschappen afgeleid op basis van de bodemfysische eenheden. Elke bodemfysische eenheid is gekarakteriseerd op basis van een gemiddelde van meerdere metingen. Deze metingen zijn afkomstig van bodems met verschillend landgebruik, zowel natuur- als landbouwbodems. Doordat het landgebruik en daarmee de bodemeigenschappen kunnen afwijken, zal hierdoor ook de voorspelling in WWN systematisch afwijken. Voor meer natuurlijke veenbodems is bijvoorbeeld bekend dat de eigenschappen afwijken van gedraineerde landbouwbodems (Bijlage II).

De bodemfysische eenheden zijn gebaseerd op rond de duizend bodemmonsters afkomstig uit 370 profielen (Wösten e.a., 2013). Het overgrote deel, namelijk 78%, van de profielen waarop de BOFEK (2012) is gebaseerd, is afkomstig van klei- en zandbodems (Tabel 2-2). Het aantal bodemfysische eenheden dat met clusteranalyse onderscheid is binnen deze grondsoorten, hangt zeer sterk samen met het aantal profielen: hoe meer profielen, hoe meer bodemfysische eenheden (clusters) (Figuur 2-3). Dit geeft aan dat door de systematisch meer bemonsterde zand- en kleibodems ook het aantal bodemfysische eenheden dat erin onderscheiden wordt groter is. De diversiteit van veenbodems lijkt daarmee in de basis dus slecht onderscheiden.

Tabel 2-2. Overzicht van aantal profielen per bodemfysische eenheid in de huidige bodemfysische eenhedenkaart. Gegevens ontleend aan Wösten e.a. (2013).

Grondsoort	n profielen	% totaal	n BOFEK eenheden
moerig	22	6	6
veen	44	12	10
zand	137	37	27
klei	151	41	22
leem	16	4	7



Figuur 2-3. Relatie tussen het aantal bodemprofielen per grondsoort en het aantal onderscheiden bodemfysische eenheden.

#### 4 – Invloed oppervlaktewaterkwaliteit

Sinds de ontwikkeling van de derde versie van WWN is het mogelijk om rekening te houden met de aanvoer kwaliteit van kwelwater (5 klassen). Eventueel is hier ook aanpassing voor oppervlaktewaterkwaliteit mogelijk om hier rekening mee te houden. Echter, de hydrologie en waterkwaliteit in semiterrestrische natuur als trilvenen en veenmosrietlanden luistert erg nauw. De biogeochemische processen die in dergelijke systemen spelen worden bovendien (nog) niet meegenomen in de WWN. Hierdoor blijft het effect van bv eutrofiering en aanvoer van bufferende kationen onzeker in te schatten. De zuurgraad van de bodem wordt noodgedwongen, om enorme rekentijden te voorkomen, op een redelijk eenvoudige manier berekend. Veel redoxprocessen (en daarmee zuurproducerende/consumerende processen) worden niet meegenomen. Veelal gaat dit goed, maar vooral voor natte systemen, waaronder beekdalen en laagveenmoerassen zou dit tot een verkeerde inschatting van de zuurgraad kunnen leiden. In hoeverre dit de onzekerheid van voorspellingen beïnvloedt is nog onduidelijk.

#### Literatuur: laagveenplassen en kraggen

Het peil in laagvenen kan redelijk worden berekend met hydrologische modellen, maar grondwaterstanden binnen kraggen (die geheel of gedeeltelijk drijven) en legakkers zijn lastig te vangen in dergelijke modellen. Zowel de hydrologische processen als de mate van detail zijn daarbij begrenzend. De vegetatie wordt bovendien vooral bepaald door de waterkwaliteit in de wortelzone. Dat is een haast onmogelijke opgave om te nabootsen (Stofberg, 2017).

Als alternatief op een procesmatige aanpak kan er ook gebruik gemaakt worden van vuistregels die zijn ontwikkeld voor het model DEMNAT (van der Linden e.a., 1992). In die vuistregels wordt de verandering van de kansrijkdom van ecotoopgroepen (preciezer: van voedselrijkdomgroepen) berekend als functie van het verandering van het percentage gebiedsvreemd water (dat het LHM kan berekenen). De berekening houdt echter alleen rekening met de voedselrijkdom, dus niet met de gevolgen van verzilting.

Ook zijn er databases met standplaatscondities en plantensoorten. Deze kunnen gebruikt worden om statistische relaties tussen plantensoorten en allerlei chemische en fysische factoren op te stellen. RUU heeft daar veel onderzoek aan gedaan, wat heeft geleid tot de modellen ICHORS voor water- en oeverplanten (Barendregt en Wassen, 1989; Barendregt e.a., 1992), en ITORS (Ertsen e.a., 1998), voor planten van vooral laagveen. Het is twijfelachtig of deze benadering wat oplevert, mede door de correlatie tussen standplaatscondities.

## 5 – Overstroming

### Literatuur

Er is veel onderzoek gedaan naar relaties tussen het voorkomen van plantengemeenschappen en het regime van rivieren en beken, vooral door de gemeenschappen te correleren aan inundatieduur en inundatiefrequentie (o.a. De Graaf e.a., 1990; Jongman, 1993; Wolfert, 2001). Hier is ook fundamenteel onderzoek gedaan aan plantenfysiologie, zuurstoftransport, bodemchemie, en genetica (De Graaf e.a., 1990; Loeb, 2008). Verder is er veel beschrijvend onderzoek naar de vegetatie van beekdalen, i.h.b. de Drentse Aa, uit de Groningse school (Grootjans en Ten Klooster, 1980; van Diggelen, 1998) en abiotische grenswaarden van vegetatietypen voor natuur (o.a. Aggenbach e.a., 2008). Ook zijn er vegetatiekaarten in het rivierengebied (RWS) gecorreleerd aan bijvoorbeeld inundatiefrequentie, afstand tot de rivier en bodemtype (Van Amerongen, 2013). Dit geeft aan dat er op basis van correlatief onderzoek mogelijkheden zijn om inundatie in beekdalen te relateren aan vegetatie.

Een procesmatige aanpak wordt een lastiger verhaal. Respiratie- (RS) en transpiratiestress (TS) kunnen worden berekend, maar bestaan momenteel alleen voor binnendijks gebied. Hier zijn een aantal kennisleemten die nog ingevuld moeten worden. Wat doet een zomerinundatie met RS en TS? Hoeveel nutriënten slaan er neer met een inundatie? Hoe beïnvloedt inundatie de bodem-pH? Samenvattend is er veel bekend uit veldonderzoek, maar is het een lang traject om dit procesmatig te modelleren.

### Effecten op hydrologie

Dit proces speelt zowel in delen van beekdalen langs beken waar inundatie optreedt, alsook in laagveenmoerassen waar inundatie optreedt. Vanuit hydrologisch opzicht is hier rekening mee te houden mits er Deltascenario's voor inundatie beschikbaar zijn. Effecten van inundatie zijn door te voeren op het bodemvocht regime en zo op zuurstofstress en kansrijkdom van vegetatie.

Een ander aspect is dat grondwatermodellen vaak aannemen dat zodra water boven maaiveld komt, dit afgevoerd wordt en geheel verdwijnt uit het systeem. In werkelijkheid kan echter regenwater stagneren in landschapsdepressies. Hierdoor zou het grondwaterregime aan de droge kant ingeschat kunnen worden. Realistische oppervlakkige afvoer is onmogelijk te simuleren met een model van 250 m resolutie, maar een inschatting kan mogelijk gemaakt worden van maximale inundatiediepte op basis van AHN.

### Effecten op zuurgraad en voedselrijkdom

Effecten van inundatie op plantenfysiologie en competitie en op bodemchemie via aanvoer van nutriënten, zuurbufferende stoffen en beekslib, beslaan momenteel een dermate grote kennisleemte dat het momenteel onhaalbaar is daar met voldoende zekerheid uitspraken over te doen met procesmodellen.

## 3 Voorstel dynamische bodem

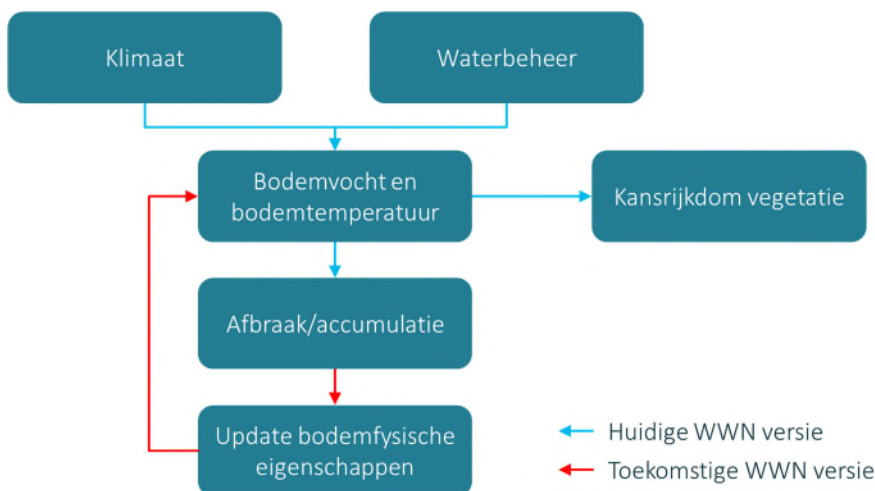
### 3.1 Relevantie

Momenteel wordt in de Waterwijzer Natuur als uitgangspunt genomen dat de bodem een constante is. Bodemfysische eigenschappen veranderen niet door de tijd. In de werkelijkheid zijn bodemfysische eigenschappen onderhevig aan het waterbeheer of het klimaat. De belangrijkste verandering van bodemeigenschappen wordt veroorzaakt door de afbraak en vorming van organisch materiaal. De dynamiek van organisch materiaal wordt in belangrijke mate gestuurd door vochthuishouding en bodemtemperatuur. Op hun beurt zijn deze afhankelijk van klimaat en waterbeheer, en bodemfysische eigenschappen (zie Figuur 3-1). In veengebieden is dit een bekende en belangrijke terugkoppeling die effect heeft op de waterhuishouding (en CO<sub>2</sub> emissies) in veengebieden (Ise e.a., 2008; Waddington e.a., 2015). Uit empirisch onderzoek is gebleken dat verandering in waterbeheer (bv drainage) belangrijk kan doorwerken op bodemeigenschappen die de waterhuishouding beïnvloeden (zie bv Bijlage II). De veranderingen in waterhuishouding in de wortelzone werken door op andere standplaatscondities en op de kansrijkdom van vegetatie.

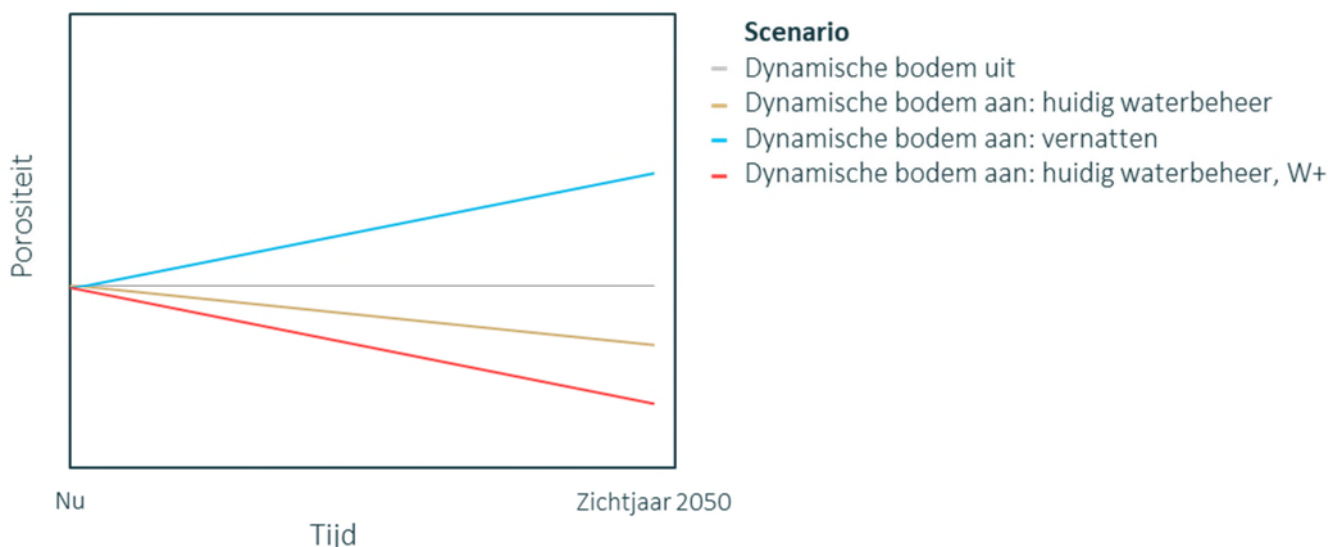
De indruk zou kunnen bestaan dat dit een proces is dat weinig relevant is, omdat het zo langzaam gaat. Zeker bij projecties in de toekomst (bv zichtjaar 2050), zullen bodemfysische eigenschappen veranderen door de tijd (Zie Figuur 3-2 voor voorbeeld). In sommige delen van Nederland, met name in de veenweidegebieden, daalt de bodem echter met meer dan 1 cm per jaar door oxidatie van veen. Bij dunne veenpakketten zal dit leiden tot een ander bodemtype: voor zichtjaar 2050, ten opzichte van 'huidig' klimaat (1981 – 2010), kan zo 50 cm aan bodem 'de lucht in gaan'. Veenbodems zullen dan overgaan in moerige bodems, en moerige bodems in minerale bodems. In dit traject wordt uitgegaan van enkele discrete veranderingen in bodemtype / bodemfysische eenheid. In werkelijkheid is het afbraakproces uiteraard meer gradueel, en gaat het bovendien niet alleen om de dikte van de organische laag maar ook de eigenschappen daarvan. De (verzadigde) doorlatendheid van veen kan met een factor miljoen variëren van zeer veraard en gecompacteerd veen (~0.001 m/d) tot levend veenmos (~1000 m/d) (Boelter, 1969; Päivänen, 1982; Beckwith e.a., 2003; Morris e.a., 2015; Baird e.a., 2016; Nijp e.a., 2017a). Een classificatie van 'organisch materiaal' of 'veen' volstaat niet om de enorme variabiliteit aan veentypen te beschrijven.

Gezien de actuele thema's rondom water vast houden, veenvernatting en urgentie om bodemdaling tegen te gaan in combinatie met omvorming naar natuur, is de terugkoppeling tussen bodemvocht en bodemvorming een belangrijk proces. Door rekening te houden met het effect van klimaat en waterbeheer op bodemeigenschappen, kan beter ingeschat worden wat de effecten van deze invloeden zijn op natuur. Bovendien is het niet onwaarschijnlijk dat behoud van veengebieden wordt opgenomen in Europese wetgeving in de Nature Restoration Law. Ook in het kader van het nationale klimaatakkoord (2019) en Klimaatakkoord van Parijs is dit relevant. Vernatting van venen is één van de maatregelen om broeikasgasemissies in venen te reduceren en zo binnen de beoogde 1.5 tot 2 °C te blijven. Als het wettelijk verplicht gaat worden verdere drainage van venen te voorkomen, dan heeft dat enorme gevolgen op de inrichting van het land- en waterbeheer in Nederland, en daarmee op natuur.

Overigens is een dynamische bodem niet alleen relevant voor veenbodems, maar is het net zozeer van betekenis op minerale bodems (van Oene e.a., 1999; Fujita e.a., 2016).



Figuur 3-1. Overzicht van processen in Waterwijzer Natuur. In blauw de processen die momenteel al zijn meegenomen, in rood de nieuwe processen bij een dynamische bodem.



Figuur 3-2. Hypothetische potentiële doorwerking van inbouwen dynamische bodem op porositeit van de bodemtoplaag in Waterwijzer Natuur bij een situatie met licht gedraineerd veen. Bij een statische bodem blijft deze gelijk (grijze lijn). Bij een dynamische bodem is het waarschijnlijk dat, door drainage en toenemende decompositie, de porositeit verder afneemt (oranje). Als daar nog eens klimaatverandering bovenop komt (rood), met extra droogte in de zomer die afbraak stimuleert, zou de porositeit hypothetisch nog verder kunnen afnemen. Daarentegen zou bij vernatting nieuw gevormd organisch materiaal kunnen ophopen, dat minder snel afbreekt waardoor de porositeit hoog blijft (blauw).

### 3.1.1 Kantelpunten in waterbeheer?

Dergelijke terugkoppelingen kunnen ze elkaar versterken: een drogere bodem kan zorgen voor meer afbraak van organisch materiaal en vermindert daarmee het watervasthoudend vermogen. Daardoor wordt de bodem nog droger, warmt sneller op, en breekt daardoor sneller af. Op deze manier kan de bodem relatief snel veranderen. Theoretisch kunnen dergelijke positieve terugkoppelingen leiden tot kantelpunten ('tipping points' (Scheffer e.a., 2001)): kritische waarden van klimaat of waterbeheer waarna het, indien overschreden, extra veel moeite kost om weer terug te keren naar de oorspronkelijke toestand. Bij klimaatverandering is het belangrijk deze punten te voorkomen: het is een mondiaal probleem en lastig lokaal bij te sturen. Met waterbeheer is dat een ander verhaal.

Anderzijds kunnen deze kantelpunten ingezet worden om zelfversterkende en zelfregulerende processen (= natuur?) op gang te helpen en beheer zodanig af te stemmen dat, vanaf bepaalde grenswaarden, ecosysteemherstel bevordert wordt. Eenmaal op gang geholpen, is de zelfregulatie van deze processen aantrekkelijk wegens beperkte kosten en energie die anders besteed zouden moeten worden aan intensief beheer.

Of dergelijke kantelpunten zullen optreden is nog een open vraag, maar uit Figuur 3-1 blijkt evident dat processen elkaar kunnen versterken. Voor veengebieden zijn er op Europese schaal aanwijzingen voor kantelpunten (van der Velde e.a., 2021). Ook uit metingen op veldschaal blijkt bijvoorbeeld dat, mits de waterhuishouding op orde is, bodem- en veenvorming snel kan gaan. Bij een grondwaterstand aan maaiveld kan zich daar in hoogveen in 4 jaar tijd een meer dan 12 cm dikke veenmoslaag ontwikkelen, die zich aan de onderkant reeds als een veenbodem manifesteert (Tomassen e.a., 2022). Dergelijke veenvorming speelt ook in laagveenmoerassen als in de Wieden, Weerribben, alhoewel dat andere veentypen betreft en het trager zal gaan. Desalniettemin onderstreept dit de relevantie van een dynamische bodem, zeker voor langetermijnsprojecties zoals voor zichtjaar 2050.

### 3.2 Beschikbare informatie en modellen

Alhoewel in de wetenschappelijke literatuur steeds meer onderkend wordt dat klimaat en waterbeheer belangrijke invloed hebben op bodemeigenschappen (bijv. Gelybó e.a., 2018), zijn er nog nauwelijks modellen beschikbaar die er goed rekening mee houden. Er zijn een paar modellen specifiek ontwikkeld voor veen die rekening houden met terugkoppeling tussen waterbeschikbaarheid en bodemeigenschappen (Frolking e.a., 2010; van der Velde e.a., 2021). Deze zijn op standplaats maar rekenen op jaarbasis en grotere tijdschaal (honderd tot duizend jaar).

In de Waterwijzer Natuur wordt nu gebruik gemaakt van SWAP om waterstroming in de onverzadigde zone te beschrijven op standplaatsniveau. Er zijn vele alternatieve modellen waarin de effecten van waterbeheer en klimaat op standplaatscondities gesimuleerd kunnen worden. Voor veengebieden zijn er specifieke modellen ontwikkeld waarmee de waterbalans, al dan niet in combinatie met de koolstofbalans, kunnen worden gesimuleerd (Yurova e.a., 2007; Heijmans e.a., 2008; Dimitrov e.a., 2010; St-Hilaire e.a., 2010; Nijp e.a., 2017b; Lippmann e.a., 2022). Deze modellen verschillen in detailniveau van hydrologische processen en de benodigde informatie die nodig is om ze te gebruiken.

Er zijn slechts weinig modellen waarin bodemfysische eigenschappen variëren door de tijd en waarin de waterhuishouding in de wortelzone wordt gesimuleerd, gekoppeld aan bodemchemische processen en afbraak (van Oene e.a., 1999; Ise e.a., 2008, en waar bovendien ook nog effecten op vegetatie worden meegenomen ; Fujita e.a., 2016; Mozafari e.a., 2023).

Dit is het model PROBE-3 (Fujita e.a., 2016), een aangepaste versie van PROBE dat onderdeel van de WWN ontwikkeld specifiek voor de wisselwerking tussen bodemontwikkeling en vegetatie in de duinen. Hierin is gebruikt van een koppeling tussen de modellen SWAP en CENTURY die respectievelijk bodemvocht en bodemafbraak simuleren (Fujita e.a., 2013). Kort samengevat worden in PROBE-3 effecten van waterbeheer en klimaat op bodemvorming als volgt meegenomen: het vochtgehalte wordt gesimuleerd met SWAP. Op basis van dit vochtgehalte wordt in CENTURY de decompositie van organisch materiaal berekend. Op basis van transferfuncties van Wösten (2003) wordt afgeleid hoe deze verandering doorwerkt op waterretentie en de doorlatendheidskarakteristiek, die jaarlijks wordt aangepast en in SWAP wordt gebruikt.

Naast een modelaanpak is ook een benadering op basis van kennisregels of empirische relaties mogelijk. Zo zijn er bijvoorbeeld zijn er bijvoorbeeld voor veenweidegebieden empirische relaties opgesteld tussen slootpeil en maaiveldval (van den Akker e.a., 2007). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen veenbodems met en zonder kleidek. Hiermee kan een eerste stap gemaakt worden om te bepalen hoe veranderingen in bodemfysische eenheden doorwerken op vegetatie. Deze empirische relatie is een grove schatting, alleen geldig voor huidig klimaat, zegt bovendien weinig over bodemfysische eigenschappen. Bovendien kan deze relatie niet worden toegepast in situaties waar meer water wordt vastgehouden of sprake is van vernatting.



Verder zijn er ook toekomstprojecties gemaakt van bodemdaling voor zichtjaar 2050 en 2100 onder huidig klimaat en toekomstig klimaat ('Waarheen met het veen' Woestenburg en Kwakernaak (2009)), en ook in het Deltaprogramma wordt bodemdaling berekend met het proces-gebaseerde model Atlantis (Bootsma e.a., 2020). In dit model wordt niet alleen veenoxidatie gemodelleerd, maar ook consolidatie als gevolg van diepere grondwaterstanden.

Ook wordt er op veel plekken, zowel in Nederland als internationaal, de uitwisseling van CO<sub>2</sub> tussen land en atmosfeer gemeten (eddy covariance en flux chambers). Dit gebeurt zowel in gedraineerde, vernatte, en natuurlijke veensystemen. De gasuitwisseling kan worden opgesplitst in plantengroei, autotrofe respiratie, en afbraak van organisch materiaal. De afbraak van organisch materiaal kan vervolgens, met transferfuncties, worden vertaald naar verandering in bodemeigenschappen. Deze aanpak is met de nodige onzekerheid gemoeid, omdat onbekend is uit welke bodemlagen de totale flux afkomstig is en behalve totaal bodemverlies weinig zegt over de hydrofysische eigenschappen.

### 3.2.1 Keuze modelaanpak

Uit voorgaande paragraaf blijkt dat er verschillende manieren zijn om de waterhuishouding te simuleren specifiek in venen of moerige gronden. In zekere zin komen deze modellen neer op een versimpeling van SWAP, dat ook in de Waterwijzer Natuur. Om rekentijd te besparen zou de vochthuishouding op een versimpelde manier kunnen worden aangepakt, en voor de zuurgraad en voedselrijkdom de bestaande modellen gebruikt worden. Hier kleven echter verschillende nadelen aan. Ten eerste maakt een veenspecifiek model de WWN complexer, omdat verschillende modellen op verschillende delen van Nederland moeten worden toegepast. Bovendien zal het veenareaal veranderen, waardoor door de tijd verschillende modelmodules aan/uit gezet moeten worden. Het vraagt ook om een aanpassing en nieuwe koppeling van modellen. Als het mogelijk is om gebruik te maken van de huidige modelomgeving, zou dat daarmee een voordeel zijn. De simulatie van bodemvocht zal, om aan te sluiten bij de WWN, nog vertaald moeten worden in zuurstofstress en transpiratiestress.

Voor zo ver bekend is er slechts één model dat in voldoende mate aansluit aan de vereiste eigenschappen om een dynamische veenbodem te kunnen modelleren (Tabel 3-1), en dat is PROBE-3 (Fujita e.a., 2016). Er zijn andere modellen beschikbaar, die soms op bepaalde onderdelen beter scoren, maar op andere onderdelen weer juist niet goed uitvallen. Over het algemeen lijkt PROBE-3 een zeer geschikte kandidaat: De koppeling tussen bodemvocht en bodemeigenschappen is al gemaakt en getest voor droge ecosystemen (duinen). PROBE-3 (SWAP) is een gedetailleerdere versie van veel andere modellen wat betreft mogelijkheden voor hydrologische processen, die vaak een versimpeling zijn van de processen die in SWAP worden beschreven<sup>(1)</sup>. Potentieel nadeel is een lange rekentijd, maar dat is overkomelijk. De belangrijkste verbetering die gemaakt moet worden is de parameterisatie, die momenteel alleen geschikt is voor duinen / minerale bodems. Recent zijn er transferfuncties specifiek voor veenbodems ontwikkeld (Liu en Lennartz, 2019). Deze kunnen worden ingezet om veenbodems mee te karakteriseren en dit aspect te verbeteren. Ook de parameterisatie van decompositiesnelheden van verschillende veentypen en decompositiestadia, en hoe deze afhangen van temperatuur en water verdient aandacht en zou moeten worden aangepast. Hier is veel aan gemeten en beschikbaar in literatuur, zie bv (Clymo e.a., 1998; Moore en Basiliko, 2006; Ise e.a., 2008).

De empirische relatie tussen bodemdaling en waterpeil (van den Akker, 2007) is alleen geldig bij huidig klimaat, is alleen gericht op bodemdaling, en geeft geen informatie over bodemfysische eigenschappen in de wortelzone.

---

<sup>(1)</sup> In SWAP is het ook mogelijk om andere processen die in laagvenen van belang zijn mee te nemen, zoals zwel-krimp, voorkeursstroming, waterafstotendheid. Voorlopig lijkt het niet verstandig deze vrij gedetailleerde processen op te nemen in PROBE. Het knelpunt is niet dat deze processen niet in de modelstructuur opgenomen kunnen worden, maar dat de benodigde parameters ervan voor de grote diversiteit aan (veen/moerige) bodems (nog) onbekend zijn. Metingen zijn vereist om hier een goed beeld van te verkrijgen.



Bovendien kan deze relatie niet worden toegepast in situaties waar meer water wordt vastgehouden of sprake is van vernatting. Empirische relaties zijn hierdoor ongeschikt.

Het bodemdalingsmodel Atlantis (Bootsma e.a., 2020), dat gebruikt wordt voor bodemdalingskaarten voor zichtjaar 2050 en 2100, doet uitspraken over verandering in bulk dichtheid. Dit model is echter gebaseerd op de hiervoor beschreven empirische relatie in Van den Akker (2007) en beschrijft geen opbouw van organisch materiaal. Modellen die bodemdaling beschrijven blijken ongeschikt door de nadruk op afbraak van organisch materiaal. Specifiek voor model Atlantis staat beschreven dat het juist voor natte natuur een slechte schatting van bodemdaling geeft. Verder is het wenselijk om de bodemvormingsmodule intern bij de WWN onder te brengen en niet uitvoer van een afzonderlijk model te gebruiken als invoer. Een afzonderlijk bodemvormingsmodel dat niet in WWN geïntegreerd is verlaagt het gebruiksgemak en maakt de procedure foutgevoeliger (afstemming invoer), inefficiënter, en daarmee duurder.

Tabel 3-1. Overzicht vereiste modeleigenschappen voor het simuleren van dynamische bodemeigenschappen in de Waterwijzer Natuur. Een kwalitatief oordeel is gegeven voor het belang van de processen en de score die PROBE-3 en andere modellen (bandbreedte) daarvoor hebben.

Vereiste modeleigenschappen	Belang (1-10)	Score (1 – 10) alternatieven	Score PROBE 3 (1-10)
Dynamische bodemeigenschappen al operationeel	10	1 - 8	8
Koppeling met bestaande WWN onderdelen mogelijk en haalbaar zonder onevenredig grote inspanning	9	1 - 6	10
Invoer is beschikbaar om model aan te sturen	9	3 – 10	10
Representatie veenspecifieke hydrologie in onverzadigde zone	5	3 – 10	7
Parameterisatie geschikt voor gedraineerde en natuurlijke laagveengebieden	3	1 – 8	3
Rekentijd	3	4 – 8	4
<b>Geschiktheid PROBE (gewogen gemiddelde)</b>			<b>8.1</b>

### Toekomstmuziek

Belangrijk te vermelden is dat veranderingen in vegetatie en bodem op hun beurt weer de waterhuishouding in de omgeving zullen beïnvloeden. De communicatie tussen hydrologische invoer en effectmodules is momenteel echter éénrichtingsverkeer: de scenario's bepalen hoe de waterhuishouding er uit ziet, maar deze wordt niet beïnvloed doordat aangepaste vegetatie (meer/minder verdamping) of andere bodem (meer/minder verdamping, meer/minder wegzijging of drainage).

Om dus écht effecten van klimaatverandering en waterbeheer door te rekenen over langeretermijn, zou het dus wenselijk zijn om natuur en bodem mee te laten veranderen in hydrologische modellen. Dat wordt al wel gedaan in zogeheten Land Surface Models (Fisher en Koven, 2020). Momenteel lijkt er in Nederland vooralsnog sprake te zijn van éénrichtingsverkeer en is wederzijdse communicatie tussen waterbeheer en natuur toekomstmuziek.

### 3.3 Aanpak

In deze paragraaf wordt een aanpak beschreven om te komen tot een Waterwijzer Natuur die rekening houdt met veranderingen in bodemstructuur als gevolg van klimaat en/of waterbeheer. Het onderzoek is ingedeeld in drie fases (Figuur 3-3), die hieronder worden toegelicht.

<b>Fase 1 Opstellen model</b>	Koppeling SWAP - CENTURY klaarmaken voor WWN
	Verkennen CENTURY alternatieven
	Parameterisatie transferfuncties aanpassen
	Parameterisatie decompositie aanpassen
	Modelverificatie
	Doorrekenen meerdere BOFEKS
	Gevoeligheidsanalyse parameters
	Vastleggen methodiek in rapport
	2x Overleggen BC
Meekoppelkans 1	Doorrekenen nieuwe BOFEKS
Meekoppelkans 2	Referentie correctie
<b>Fase 2 Beoordeling</b>	Demonstratie werking voor één / twee hypothetische situaties
	Vergelijking empirische relaties veenweide
	Vergelijking met aanpassen bodemfysische eenheden
	Vastleggen methodiek in rapport
	Overleggen
<b>GO/NO GO: haalbaarheid toepassing in WWN</b>	
<b>Fase 3 verder uitwerking</b>	(Initialisatie: eigenschappen huidige veenbodems)
	(Initialisatie: veendiktekaart )
	Modelsimulaties SWAP - CENTURY koppeling
	Opstellen nieuwe metarelaties veenbodems
	Zoeken relevant pilot gebied en bijbehorende gegevens
	WWN toepassen op pilot gebied (ruimtelijk)
	WWN toepassen op pilot gebied (puntlocatie)
	Rapportage incl verwerken commentaar

Figuur 3-3. Overzicht verschillende fases en onderdelen

#### Fase 1

In de eerste fase wordt de WWN geschikt gemaakt om de bodemeigenschappen aan te passen aan waterbeheer en klimaat. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de modelkoppeling tussen SWAP en CENTURY in PROBE-3 uit eerder onderzoek (Fujita e.a., 2016). Er zijn aanpassingen nodig om het deze procedure te laten werken binnen de Waterwijzer Natuur en de uitvoer te gebruiken. Belangrijk te vermelden is dat ook VSD+ (zuurgraad) dynamisch gemaakt zou kunnen worden. Dit vraagt echter grote inspanning in de modelstructuur. In dit onderzoek wordt daarom eerst gefocust op de koppeling SWAP – CENTURY om een dynamische bodem te simuleren. In eventueel vervolgonderzoek zou VSD+ aangepast kunnen worden. Een aantal kernactiviteiten zijn:

- 1 Bij de huidige PROBE-3 procedure verandert de positie van het maaiveld niet; alleen de eigenschappen van lagen veranderen. Er verdwijnt geen bodem door oxidatie; alleen de eigenschappen van de wortelzone worden aangepast. In de nieuwe procedure zal hier rekening mee moeten worden gehouden. De maaiveldpositie bepaalt namelijk de afstand tot het grondwater en daarmee vochtcondities in de wortelzone. Een keuze moet worden gemaakt of peilbeheer meebeweegt met bodemdaling/vorming, of dat de positie (tov NAP) gelijk blijft.

- 2 De WWN is gebaseerd op metarelaties, die voor verschillende zichtjaren de relaties tussen invoervariabelen en standplaatscondities beschrijven. In deze fase worden deze metarelaties opnieuw opgesteld voor BOFEKs die relevant zijn in het veengebied, rekening houdend met een dynamische bodem. In deze fase wordt slechts één BOFEK gebruikt, maar om de doorlooptijd te optimaliseren worden alvast alle relaties doorgerekend voor het vervolgtraject.

Meekoppelkans 1: Momenteel wordt in de WWN de geactualiseerde BOFEK2012 gebruikt. Ondertussen is er een nieuwe BOFEK uit. Metarelaties kunnen dus ook voor deze nieuwe BOFEK2020 worden afgeleid.

Meekoppelkans 2: In het meest recente WWN rapport (WWN versie e 3; Nijp e.a. (2022)) werd geadviseerd om de referentie te corrigeren voor depositie van stikstof en zuur. Momenteel wordt de kansrijkdom van voedselarme natuur namelijk te hoog ingeschat. Dat komt waarschijnlijk doordat de referentiesituatie nog alleen op kennisregels is gebaseerd, waarbij geen rekening wordt gehouden met depositiehistorie. Voor het afleiden van de nieuwe metarelaties moet het model VSD+ weer opnieuw worden doorgerekend. Hier doet zich een meekoppelkans voor, waar met beperkte inspanning naar verwachting een betere voorspelling van vegetatie in de referentiesituatie gedaan kan worden. Wij bevelen ten sterkste aan deze activiteit onderdeel te maken van dit project, aangezien het doorrekenen van deze metarelaties veel tijd in beslag neemt en dit al onderdeel is van activiteit 3.

- 3 De metarelaties worden afgeleid met meteorologische invoer van de KNMI'23 scenario's die in oktober 2023 beschikbaar zijn gesteld.
- 4 Deze worden afgeleid voor alle bodemfysische eenheden die betrekking hebben op veenbodems.
- 5 Afbraak van organisch materiaal wordt gesimuleerd in CENTURY, maar de parameterisatie ervan kan worden verfijnd. Op basis van literatuur zullen we de parameterwaarden aanpassen indien daar aanleiding voor is. In de PROBE-3 duinen versie worden bodemfysische eigenschappen aangepast op basis van transferfuncties voor minerale bodems. Er zijn ook transferfuncties specifiek voor organische bodems beschikbaar (Liu en Lennartz, 2019). Deze zullen worden ingebouwd in de CENTURY – SWAP koppeling in deze fase. Een meekoppelkans is het meenemen van denitrificatie- en nitrificatieprocessen. Deze worden momenteel in de WWN nog niet expliciet meegenomen om de voedselrijkdom te voorspellen, maar spelen vooral in veenbodems een grote rol.
- 6 Uit stap 3 blijkt dat er veel parameters nodig zijn voor CENTURY, wat een zeer gedetailleerd model is om bodemafbraak/vorming te simuleren. Deze parameters kunnen niet allemaal goed geschat worden en veranderen bovendien door de tijd. Dit levert extra onzekerheid. In literatuur bestaan veel alternatieven om afbraak/opbouw van organisch materiaal in veen te simuleren, variërend in complexiteit (Smith e.a., 1997; Clymo e.a., 1998; Frolking e.a., 2001; Ise e.a., 2008; St-Hilaire e.a., 2010; van der Velde e.a., 2021; Mozafari e.a., 2023). Om die reden wordt ook verkend of minder complexe alternatieven of aangepaste CENTURY versies een voldoende goede voorspelling van bodemdynamiek kunnen maken.
- 7 Om te bepalen hoe aanpassingen doorwerken op resultaten en welke parameters deze het meest beïnvloeden, zal een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd. Dit geeft aan welke parameters de beste schatting en eventuele ruimtelijke variatie zouden moeten ondervangen. Niet alleen parameters die decompositie beïnvloeden worden aangepast, ook de initiële bodemeigenschappen.
- 8 De eigenschappen van bodems zijn in WWN momenteel gebaseerd op de bodemfysische eenhedenkaart. Die parameterisatie is daardoor zeer grof, zeker voor veen. Er zijn meer bronnen voor bodemeigenschappen beschikbaar, zoals het Bodem Informatiesysteem (BIS), en databases van individuele onderzoekers die mogelijk kunnen worden ingezet (Aggenbach, Erkens e.a., 2016). Door koppeling van deze eigenschappen aan de bodemkaart, landgebruik, en/of veendikte zouden **bodemeigenschappen van veenbodems in de uitgangssituatie nauwkeuriger gemaakt kunnen worden. Wegens afweging van prioriteiten, doorlooptijd, en budget, vormt het verbeteren van de uitgangssituatie momenteel geen onderdeel van dit onderzoek.**

Van alle aanpassingen wordt geverifieerd of ze op de juiste manier zijn ingebouwd in het model. De methoden worden vastgelegd in een openbaar rapport. De belangrijkste opbrengst van deze fase is een aangepaste versie van PROBE met dynamische bodem.

## Fase 2

In de tweede fase wordt de werking van het model beoordeeld en geïllustreerd aan de hand van twee hypothetische maar realistische scenario's. In het eerste scenario wordt een droge situatie met bodemdaling gesimuleerd, in het tweede een natte situatie met – in potentie – veenvorming. Het verdrogingsscenario wordt zodanig ingericht dat de resultaten te vergelijken zijn met empirische relaties tussen slootpeil en bodemdaling uit van den Akker (2007) en andere projecties, zoals in 'Waarheen met het veen' voor zichtjaar 2050 en 2100 bij huidig klimaat en KNMI scenario W+ of bodemdaling volgens model Atlantis (Bootsma e.a., 2020). Ook wordt in deze vergelijking een verandering in bodemfysische eigenschappen op basis van kennisregels (discrete veranderingen in bodemfysische eenheden meegenomen) en een scenario met een statische bodem opgenomen. In deze fase vindt afstemming met de begeleidingsgroep en kennisinstellingen plaats om te komen tot relevante beschikbare scenario's. De totstandkoming van de toekomstige BOFEK wordt in de methoden beschreven. Door vergelijking van deze modelversies kan inzichtelijk gemaakt worden wat de voor- en nadelen van bepaalde benaderingen zijn, hoe ze zich tot elkaar verhouden, en of het überhaupt zinnig is om een dynamische bodem te simuleren. 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. De resultaten van de plausibiliteitstoets worden vastgelegd in een rapport.

## Go/ No go

Na de tweede fase komt een beslismoment waarin gezamenlijk wordt bepaald of het inbouwen van dynamische bodems meerwaarde heeft ten opzichte van een statische bodem. Hierbij worden ook aspecten als rekentijd, complexiteit, en onzekerheid rondom invoerparameters meegenomen.

## Fase 3

Als na de go/no go besloten wordt dat het rekening houden met interacties tussen bodemeigenschappen en waterbeheer & klimaat, dan wordt de derde fase in gang gezet. In deze fase worden metarelaties opgesteld voor de belangrijkste bodemfysische eenheden van venige bodems en moerige gronden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de procedures die zijn opgesteld in eerdere versies van WWN (Witte e.a., 2018; Witte e.a., 2020; Nijp e.a., 2022) en het aangepaste PROBE model in Fase 1. Eventuele kleine wenselijke aanpassingen uit voorgaande fases kunnen hier ook worden opgepakt. Voor het bepalen van de dikte van het organisch materiaal wordt gebruik gemaakt van een geactualiseerde veendiktekaart (Vries e.a., 2014). Alhoewel (nog) niet overal even actueel en de schatting vrij grof is, biedt dit de beste indicatie van de dikte van organisch materiaal.

Onderdeel van deze fase is een plausibiliteitstoets van de dynamische bodemeigenschappen op basis van een pilotgebied. Een goede toetsing van de nieuwe PROBE met dynamische bodem zou moeten bepalen hoe de bodem zich ontwikkeld heeft over een langere periode (ca 30 jaar) bij heersende waterhuishouding en weer, en welke natuur daarbij voorkomt. Zo kan worden bepaald hoe hydrologie (drainage of vernattingsmaatregelen) hebben doorgewerkt op bodemeigenschappen en natuurpotenties. Herhaalde metingen van bodemfysische eigenschappen zullen echter zeer schaars zijn, als ze al bestaan.

Een alternatieve benadering zou een chronosequentie zijn, waarbij ruimte de tijd vervangt. Hierbij worden locaties met verschillende tijdsduur sinds drainage/vernattiging geselecteerd waar bodemfysische eigenschappen gemeten worden. Zo kan worden bepaald hoe veranderingen in waterhuishouding hebben doorgewerkt op bodemeigenschappen, en kunnen deze metingen vergeleken worden met gesimuleerde bodems in de nieuwe bodemvormingsmodule van PROBE. Hiervoor is kennis van lokale drainage/vernattingshistorie benodigd. In overleg met beheerders en/of andere onderzoekers en gebiedsdeskundigen zouden relevante locaties gekozen kunnen worden die variëren in drainagehistorie maar waarbij andere eigenschappen (bodemopbouw, stikstofdepositie, kwel, etc) zo veel mogelijk gelijk zijn. Dit zou een degelijke plausibiliteitstoets vormen, maar is waarschijnlijk onhaalbaar

binnen huidig budget. Wat wél denkbaar is, is dat hier een studentenonderzoek voor wordt opgezet waarbij bodemfysische eigenschappen worden gemeten.

In welke mate een goede plausibiliteitstoets mogelijk is, is weinig concreet te maken zonder vervolgonderzoek. Omdat nog niet duidelijk is of Fase 3 uitgevoerd gaat worden en hoe deze nader ingevuld gaat worden, is het inrichten van de plausibiliteitstoets onderdeel van Fase 3.

Het eindproduct van deze fase is een werkende WWN versie voor de belangrijkste bodemfysische eenheden in 'venig en moerig' Nederland. Ook voor andere bodemfysische eenheden is een dynamische bodem relevant, maar gezien de relatief korte doorlooptijd en focus op laagveenlandschap en beekdalen heeft dat in dit onderzoek lagere prioriteit en wordt niet meegenomen.

### 3.3.1 Verwachtingen en beperkingen

- Momenteel wordt in Nederland het effect van klimaatverandering en waterbeheer bepaald, waarna vervolgens effectmodules worden toegepast (WWN, WWL). Er is sprake van éénrichtingsverkeer, waarbij scenario's van waterbeheer en klimaatverandering bv natuurwaarde en opbrengstderving beïnvloeden. In de werkelijkheid is er een interactie tussen natuur en/of landbouw en waterbeheer: als er minder water beschikbaar is, zal er bijvoorbeeld ook minder water verdampen, en zal de grondwaterstand minder diep uitzakken dan aanvankelijk gemodelleerd. Door de veranderde waterhuishouding verschuift de vegetatie naar een ander type, waardoor de hydrologie weer verandert, waardoor de vegetatie weer verandert, etc etc. Dezelfde wederzijdse beïnvloeding tussen vegetatie, bodem, en water treden op bij een dynamische bodem (Figuur 3-1). Eigenlijk vraagt een dergelijke modellering dus om wederzijdse communicatie tussen effectmodules (WWN) en hydrologische modellen (bijvoorbeeld LHM of andere grondwatermodellen). Dergelijke terugkoppelingen bestaan in zogeheten 'Dynamic Land Surface Models', zie o.a Fisher en Koven (2020). Op langere termijn zou het zeer wenselijk zijn interactie tussen grondwatermodellen en effectmodules volledig te laten terugkoppelen om scenario's goed te kunnen doorrekenen. Dit is een kanttekening die bij alle effectmodules (dus ook de WWN) geplaatst dient te worden. In dit onderzoek betekent het concreet dat een dynamische bodem anders ontwikkelt doordat de waterhuishouding niet mee verandert.
- Net als vaker het geval is bij vernieuwend onderzoek, is niet van te voren te garanderen dat het inbouwen van een dynamische bodem tot een verbetering leidt. Er zijn een aantal onzekerheden rondom parameterisatie en rekentijd die in dit project verkend moeten worden. Om deze reden is de GO/NO GO beslissing ingebouwd aan het eind van Fase 2.
- Alleen de koppeling tussen SWAP en CENTURY wordt verbeterd om te komen tot dynamische bodemeigenschappen. De veranderingen in bodemeigenschappen werken door in de waterbalans, en daarmee ook op de zuurgraad. De bodemeigenschappen in het model VSD+, dat de zuurgraad berekend, worden echter wel constant gehouden. Het is met de beschikbare middelen onhaalbaar om ook dit model dynamisch mee te laten draaien. In dit onderzoek wordt daarom eerst gefocust op de koppeling SWAP – CENTURY om een dynamische bodem te simuleren. In eventueel vervolgonderzoek zou VSD+ aangepast kunnen worden.
- Met het inbouwen van een dynamische bodem in de Waterwijzer Natuur wordt een belangrijke verbeterstap uitgevoerd doordat meer processen meegenomen om de standplaatscondities en daarmee de kansrijkdom van vegetatie in te schatten. Net als in eerdere WWN analyses zal echter ook hier spelen dat de hydrologische invoer op orde moet zijn voor een goede voorspelling. Juist in natte gebieden (i.e. venen) is een goede schatting van de waterhuishouding essentieel. Uitgangspunt bij de voorgestelde doorontwikkeling is dat het WWN-instrument zelf verbeterd wordt, onafhankelijk van of de invoer voldoende betrouwbaar is. In de tussentijd worden ook hydrologische modelinstrumenten en -voorspellingen verbeterd, wat ook de voorspellingen van natuurpotenties ten goede zal komen.
- Ook wat betreft de bodembeschrijving zijn we in de WWN afhankelijk van informatie van derden. Momenteel worden bodemfysische eigenschappen afgeleid uit een in 2020 geüpdatete versie van de nationale bodemfysische eenhedenkaart uit 2012 (BOFEK; Wösten e.a. (2013) en (Heinen e.a., 2021)). Deze is met name voor veenbodems nog grof en zal in onvoldoende mate de huidige bodemfysische eigenschappen van de toplaag in veenbodems kunnen beschrijven. Dezelfde kwestie speelt echter ook al bij de bodemfysische eigenschappen

in de huidige WWN: door minder intensief landgebruik zullen bodems in natuurgebieden systematisch poreuzer zijn dan in landbouwbodems. De BOFEK is echter gebaseerd op bodemmonsters verzameld in zowel natuur en (voornamelijk) landbouwkundig landgebruik. Met de gevoeligheidsanalyse in Fase 1 kan worden bepaald hoe belangrijk de initiële condities zijn voor voorspelde kansrijkdom.

- We beperken ons in dit onderzoek tot veenbodems, gezien de wens WWN voorspellingen in laagveenmoerassen en beekdalen te verbeteren. De WWN voorspellingen voor veenbodems worden aangepast, maar blijven gelijk voor minerale bodems. Bodemvormende processen spelen echter ook bij minerale bodems een belangrijke rol, en kunnen in een eventueel vervolgtraject worden meegenomen.
- Dit onderzoek resulteert in een aangepaste PROBE versie waarin rekening gehouden wordt met bodemontwikkeling. Deze aanpassing kan in vervolgonderzoek worden ondergebracht als optie bij de WWN interface.

### 3.3.2 Aandachtspunt toekomstige ontwikkelingen

Momenteel wordt in natuurwaarde in de WWN alleen uitgedrukt op basis van botanische waarden. Veengebieden vervullen echter ook een prominente rol in andere ecosysteemdiensten. Zo kunnen ze (in potentie) worden ingezet voor waterberging, bufferen van piekafvoeren, en leidt het vernatten van veengebieden tot vermindering van broeikasgasemissies of zelfs CO<sub>2</sub> vastlegging. Met de modellen SWAP en CENTURY worden zowel de water- als koolstofbalans doorgerekend en zijn. Momenteel gebeurt er nog niks met die uitvoer. Dat is zonde, want deze kan ruimtelijk inzichtelijk maken hoe veranderingen in klimaat en waterbeheer doorwerken op waterberging en klimaatmitigatie en veenvernatting kan worden ingezet als 'nature based solution'. **Gezien de focus op doorontwikkeling van dynamische bodem wordt voorgesteld deze meekoppelkans niet te benutten.**

## 4 Literatuur

- Aggenbach, C., H. Hunneman en M. Jalink (2008) Indicatieve plantensoorten voor habitattypen: rapport in het kader van het WOT programma Informatievoorziening Natuur io (WOT IN). Alterra.
- Anonymous (2019) Handleiding voor het Landelijk Meetnet Flora - Milieu- en Natuurkwaliteit. Herziene uitgave 2019. Centraal Bureau voor de Statistiek & Interprovinciale Werkgroep voor Inventarisatie en Monitoring van Natuur en Landschap (IAWM) Subwerkgroep Flora en Vegetatie.
- Baird, A.J., A.M. Milner, A. Blundell, G.T. Swindles en P.J. Morris (2016) Microform-scale variations in peatland permeability and their ecohydrological implications; in: *Journal of Ecology*, vol 104, no 2, pag 531-544.
- Barendregt, A., S. Stam en M. Wassen (1992) Restoration of fen ecosystems in the Vecht River plain: cost-benefit analysis of hydrological alternatives; in: *Hydrobiologia*, vol 233, pag 247-259.
- Barendregt, A. en M.J. Wassen (1989) Het hydro-ecologisch model ICHORS (versies 2.0 en 3.0): de relaties tussen water-en moerasplanten en milieufactoren in Noord-Holland; Interfacultaire Vakgroep Milieukunde, Rijksuniversiteit.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam, P. De Becker en R. Aerts (2012) Process - based proxy of oxygen stress surpasses indirect ones in predicting vegetation characteristics; in: *Ecohydrology*, vol 5, no 6, pag 746-758.
- Beckwith, C.W., A.J. Baird en A.L. Heathwaite (2003) Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. I: laboratory measurements; in: *Hydrological Processes*, vol 17, no 1, pag 89-101.
- Boelter, D.H. (1969) Physical Properties of Peat as Related to Degree of Decomposition; in: *Soil Science Society of America*, vol 33, pag 606-609.
- Bootsma, H., H. Kooi en G. Erkens (2020) Atlantis, a tool for producing national predictive land subsidence maps of the Netherlands; in: *Proc. IAHS*, vol 382, pag 415-420.
- Clymo, R.S., J. Turunen en K. Tolonen (1998) Carbon Accumulation in Peatland; in: *Oikos*, vol 81, no 2, pag 368-388.
- De Graaf, M., H. Van de Steeg, L. Voesenek en C. Blom (1990) Vegetatie in de uiterwaarden: de invloed van hydrologie, beheer en substraat; KU.
- Dimitrov, D.D., R.F. Grant, P.M. Lafleur en E.R. Humphreys (2010) Modeling the Subsurface Hydrology of Mer Bleue Bog; in: *Soil Science Society Of America Journal*, vol 74, no 2, pag 680-694.
- Ertsen, A., J. Alkemade en M. Wassen (1998) Calibrating Ellenberg indicator values for moisture, acidity, nutrient availability and salinity in the Netherlands; in: *Plant Ecology*, vol 135, no 1, pag 113-124.
- Fisher, R.A. en C.D. Koven (2020) Perspectives on the Future of Land Surface Models and the Challenges of Representing Complex Terrestrial Systems; in: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol 12, no 4, pag e2018MS001453.
- Frolking, S., N.T. Roulet, T.R. Moore, P.J.H. Richard, M. Lavoie en S.D. Muller (2001) Modeling Northern Peatland Decomposition and Peat Accumulation; in: *Ecosystems*, vol 4, no 5, pag 479-498.
- Frolking, S., N.T. Roulet, E. Tuittila, J.L. Bubier, A. Quillet, J. Talbot en P.J.H. Richard (2010) A new model of Holocene peatland net primary production, decomposition, water balance, and peat accumulation; in: *Earth Syst. Dynam.*, vol 1, no 1, pag 1-21.
- Fujita, Y., R.P. Bartholomeus en J.-P.M. Witte (2016) PROBE-3: A succession model for ecosystem services (BTO report). KWR.
- Fujita, Y., P.M. Van Bodegom, H. Olde Venterink, H. Runhaar en J.-P.M. Witte (2013) Towards a proper integration of hydrology in predicting soil nitrogen mineralization rates along natural moisture gradients; in: *Soil Biology and Biochemistry*, vol 58, no 0, pag 302-312.
- Gelybó, G., E. Tóth, C. Farkas, Á. Horel, I. Kása en Z. Bakacsi (2018) Potential impacts of climate change on soil properties; in: *Agrokémia és Talajtan*, vol 67, no 1, pag 121-141.
- Grootjans, A.P. en W.P. Ten Klooster (1980) Changes of ground water regime in wet meadows; in: *Acta Botanica Neerlandica*, vol 29, no 5-6, pag 541-554.
- Heijmans, M.M.P.D., D. Mauquoy, B. van Geel en F. Berendse (2008) Long-term effects of climate change on vegetation and carbon dynamics in peat bogs; in: *Journal of vegetation science*, vol 19, no 3, pag 307-320.
- Heinen, M., F. Brouwer, C. Teuling en D. Walvoort (2021) BOFEK2020-Bodemfysische schematisatie van Nederland: update bodemfysische eenhedenkaart. Wageningen Environmental Research.
- Ise, T., A.L. Dunn, S.C. Wofsy en P.R. Moorcroft (2008) High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback; in: *Nature*, vol 1, no 11, pag 763-766.
- Jongman, R.H. (1993) Landschapsecologie en ruimtelijke organisatie in riviersystemen: een onderzoek naar de landschapsecologie van riviersystemen en de overheidszorg daarvoor in planning en beleid; Wageningen University and Research.
- Lippmann, T.J.R., M. Heijmans, H. Dolman, Y. van der Velde, D. Hendriks en K. van Huissteden (2022) PVN 1.0: using dynamic PFTs and restoration scenarios to model CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions in peatlands; in: *Geoscientific Model Development Discussions*, vol 2022, pag 1-42.

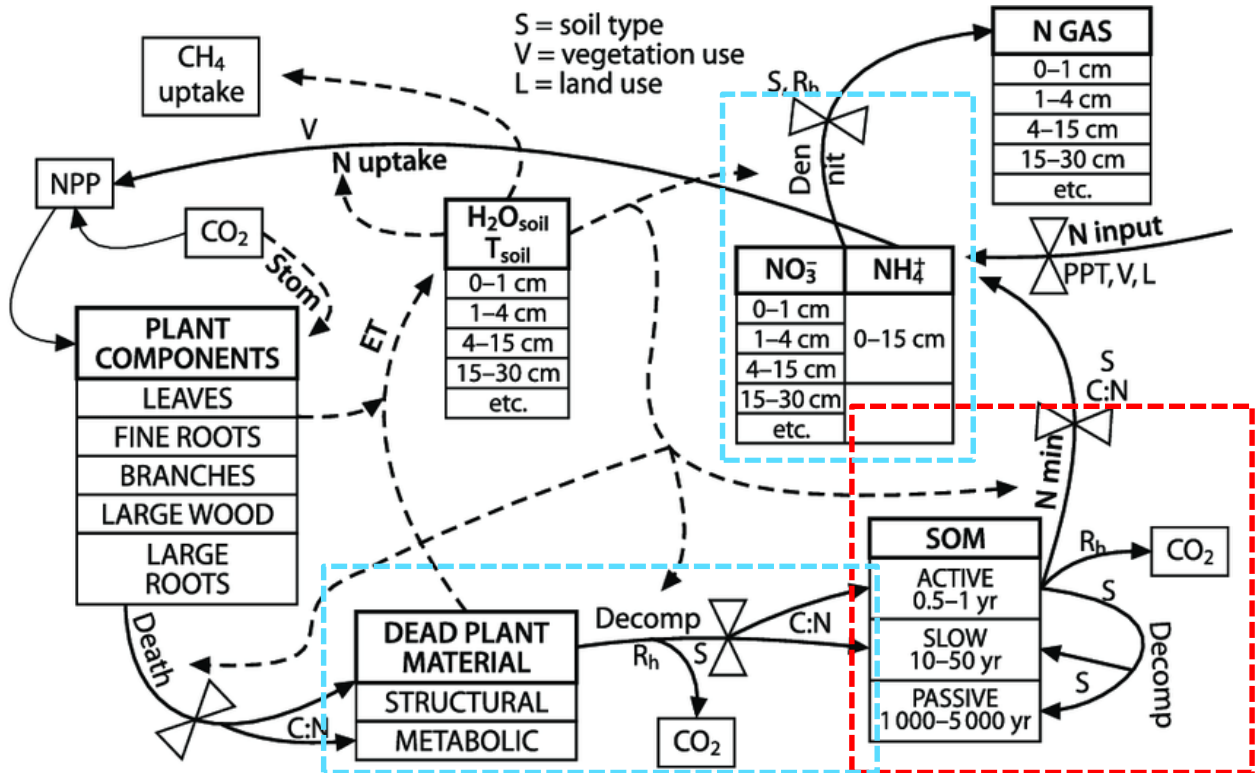


- Liu, H. en B. Lennartz (2019) Hydraulic properties of peat soils along a bulk density gradient—A meta study; in: *Hydrological Processes*, vol 33, no 1, pag 101-114.
- Loeb, R. (2008) On biogeochemical processes influencing eutrophication and toxicity in riverine wetlands; [Sl: sn].
- Moore, T. en N. Basiliko (2006) Decomposition in boreal peatlands; in: *Boreal peatland ecosystems*, ed. R. K. Wieder en D. H. Vitt, 125-143. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, DE.
- Morris, P.J., A.J. Baird en L.R. Belyea (2015) Bridging the gap between models and measurements of peat hydraulic conductivity; in: *Water Resources Research*, vol 51, no 7, pag 5353-5364.
- Mozafari, B., M. Bruen, S. Donohue, F. Renou-Wilson en F. O'Loughlin (2023) Peatland dynamics: A review of process-based models and approaches; in: *Science of The Total Environment*, vol 877, pag 162890.
- Nijp, J.J., M. de Haan en J.P.M. Witte (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). KWR Water Research Institute.
- Nijp, J.J., J. de Wit, S. Clevers, E. Dorland, G.-J. Reinds, H. Kros, Y. Fujita, P. Hoefsloot en J.-P.M. Witte (2022) Waterwijzer Natuur Fase 3 - Klimaatrobuuste modellering van effecten van zuur- en stikstofdepositie op natuur. KWR, WENR, NMI, FWE.
- Nijp, J.J., K. Metselaar, J. Limpens, H.P.A. Gooren en S.E.A.T.M. van der Zee (2017a) A modification of the constant-head permeameter to measure saturated hydraulic conductivity of highly permeable media; in: *MethodsX*, vol 4, pag 134-142.
- Nijp, J.J., K. Metselaar, J. Limpens, C. Teutschbein, M. Peichl, M.B. Nilsson, F. Berendse en S.E.A.T.M. van der Zee (2017b) Including hydrological self-regulating processes in peatland models: effects on peatmoss drought projections; in: *Science of The Total Environment*, vol 580, pag 1389-1400.
- Päivänen, J. (1982) Physical properties of peat samples in relation to shrinkage upon drying; in: *Silva Fennica*, vol 16, no 3, pag 247-265.
- Scheffer, M., S. Carpenter, J.A. Foley, C. Folke en B. Walker (2001) Catastrophic shifts in ecosystems; in: *Nature*, vol 413, no 6856, pag 591-596.
- Sherwood, J., N. Kettridge, D. Thompson, P.J. Morris, U. Silins en J. Waddington (2013) Effect of drainage and wildfire on peat hydrophysical properties; in: *Hydrological Processes*, vol 27, no 13, pag 1866-1874.
- Smith, P., J.U. Smith, D.S. Powlson, W.B. McGill, J.R.M. Arah, O.G. Chertov, K. Coleman, U. Franko, S. Frolking, D.S. Jenkinson, L.S. Jensen, R.H. Kelly, H. Klein-Gunnewiek, A.S. Komarov, C. Li, J.A.E. Molina, T. Mueller, W.J. Parton, J.H.M. Thornley en A.P. Whitmore (1997) A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments; in: *Geoderma*, vol 81, no 1, pag 153-225.
- St-Hilaire, F., J. Wu, N.T. Roulet, S. Frolking, P.M. Lafleur, E.R. Humphreys en V. Arora (2010) McGill wetland model: evaluation of a peatland carbon simulator developed for global assessments; in: *Biogeosciences*, vol 7, no 11, pag 3517-3530.
- Stofberg, S.F. (2017) Hydrological controls on salinity exposure and the effects on plants in lowland polders, Wageningen University and Research.
- Tomassen, H.B.M., J. Limpens, J.J. Nijp, G.A. van Duinen en A.J.P. Smolders (2022) Stimuleren van acrotelmontwikkeling in hoogveenrestanten; VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren, Driebergen.
- Van Amerongen, J.J. (2013) Modelling Succession of Ecotopes in Floodplains, Wageningen University & KWR.
- van den Akker, J.J.H., J. Beuing, R.F.A. Hendriks en R.J. Wolleswinkel (2007) Maaiveldddaling, afbraak en CO<sub>2</sub>-emissie van Nederlandse veengebieden. Leidraad bodembescherming, afl. 83.
- van der Linden, M., J. Runhaar en M. Zelfde (1992) Effecten van ingrepen in de waterhuishouding op vegetaties van natte en vochtige standplaatsen: ontwikkeling van dosis-effectfuncties ten behoeve van DEMNAT-2. Rijksuniversiteit.
- van der Velde, Y., A.J. Temme, J.J. Nijp, M.C. Braakhekke, G.A. van Voorn, S.C. Dekker, A.J. Dolman, J. Wallinga, K.J. Devito en N. Kettridge (2021) Emerging forest-peatland bistability and resilience of European peatland carbon stores; in: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol 118, no 38, pag.
- van Diggelen, R. (1998) Moving gradients: assessing restoration prospects of degraded brook valleys; in, vol, pag.
- van Oene, H., F. Berendse en C.G. de Kovel (1999) Model analysis of the effects of historic CO<sub>2</sub> levels and nitrogen inputs on vegetation succession; in: *Ecological applications*, vol 9, no 3, pag 920-935.
- Vries, F., D.J. Brus, B. Kempen, F. Brouwer en A. Heidema (2014) Actualisatie bodemkaart veengebieden: deelgebied 1 en 2 in Noord Nederland; Alterra Wageningen UR.
- Waddington, J.M., P.J. Morris, N. Kettridge, G. Granath, D.K. Thompson en P.A. Moore (2015) Hydrological feedbacks in northern peatlands; in: *Ecohydrology*, vol 8, no 1, pag 113-127.
- Witte, J.-P., J. Nijp, R. Bartholomeus, J. de Wit, H. Kros, G.J. Reinds en W. van de Vries (2020) Modelling van de effecten van klimaat en waterbeheer op de bodem-pH met de waterwijzer natuur. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Witte, J.-P.M., R.P. Bartholomeus, P.M. van Bodegom, D.G. Cirkel, R. van Ek, Y. Fujita, G.M. Janssen, T.J. Spek en H. Runhaar (2015) A probabilistic eco-hydrological model to predict the effects of climate change on natural vegetation at a regional scale; in: *Landscape Ecology*, vol 30, no 5, pag 835-854.



- Witte, J., J. Runhaar, R. Bartholomeus, Y. Fujita, P. Hoefsloot, J. Kros, J. Mol en W. de Vries** (2018) De waterwijzer natuur: Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op terrestrische natuur; Stowa.
- Witte, J.P.M., M. de Haan en M.J.M. Hootsmans** (2007a) PROBE: een ruimtelijk model voor vegetatiedoelen; in: *Landschap*, vol 24, no 2, pag 77-87.
- Witte, J.P.M., R.B. Wójcik, P.J.J.F. Torfs, M.W.H. De Haan en S. Hennekens** (2007b) Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values; in: *J. Veg. Sci.*, vol 18, pag 605-612.
- Woestenburg, M. en C. Kwakernaak** (2009) Waarheen met het veen: kennis voor keuzes in het westelijke veenweidegebied; Uitgeverij Landwerk.
- Wolfert, H.P.** (2001) Geomorphological change and river rehabilitation: case studies on lowland fluvial systems in the Netherlands; Wageningen University and Research.
- Wösten, J., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijkers en A. Bolman** (2013) BOFEK2012, de nieuwe bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra.
- Yurova, A., A. Wolf, J. Sagerfors en M. Nilsson** (2007) Variations in net ecosystem exchange of carbon dioxide in a boreal mire: Modeling mechanisms linked to water table position; in: *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, vol 112, no G2, pag G02025, doi:10.1029/2006JG000342.

# I Overzicht CENTURY



Overzicht van toestandsvariabelen (blokken) en fluxen (pijlen) in het DAYCENT model (dagwaarden gebaseerde versie van CENTURY). De toestandsvariabelen in het CENTURY model die in WWN zijn opgenomen zijn aangegeven met een rood vierkant (decompositie voor minerale bodems). In blauw een uitbreiding voor een meer veenrobuuste versie door rekening te houden met (de)nitrificatie en meenemen van organische bodemlagen.

## II Effect waterbeheer op bodemfysica

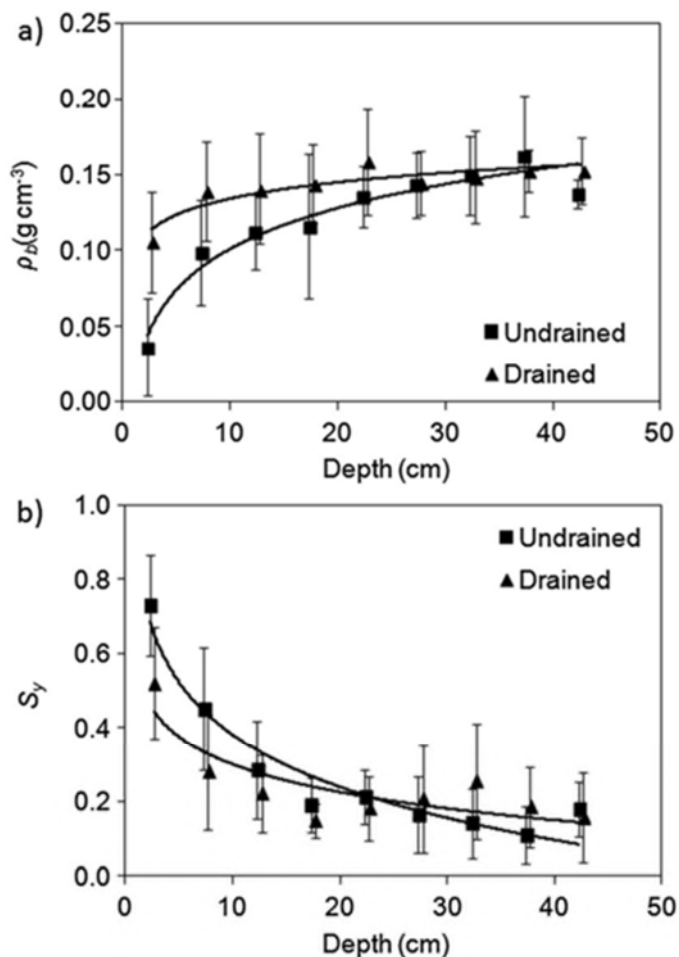


Figure 2. Average (a) bulk density and (b)  $S_y$  through the drained and undrained peat profiles with associated log-log relationship. Note that drained and undrained measurements are offset by 2 cm to make error bars clearly visible

Effect van drainage voor agrarisch landgebruik op eigenschappen van de bodemtoplaag in veen, in vergelijking tot niet gedraineerd veen. Overgenomen uit (Sherwood e.a., 2013).