

De veenbasis: kenmerken en effecten van ontwatering, in relatie tot behoud en herstel van de Nederlandse hoogvenen

Een literatuurstudie

Jan Sevink,
Bas van Delft
Corine Geujen
Matthijs Schouten
Loekie van Tweel-Groot



ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit



© 2014 VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren

Rapport nr. 2014/195-NZ
Driebergen, 2014

Deze publicatie is tot stand gekomen met een financiële bijdrage van BIJ12 en het Ministerie van Economische Zaken.

Teksten mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Deze rapportage is online beschikbaar op www.natuurkennis.nl

Samenstelling Sevink, J., C. Geujen, B. van Delft, M.G. Schouten, L. van Tweel-
Groot, 2014. De veenbasis: kenmerken en effecten van
ontwatering, in relatie tot behoud en herstel van de Nederlandse
hoogvenen. Een literatuurstudie.

Productie Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE)
Adres : Princenhof Park 9, 3972 NG Driebergen
Telefoon : 0343-745250
E-mail : info@vbne.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting

Management summary

Inhoudsopgave 3

1 Inleiding 12

2 Hoogvenen in Nederland 15

- 2.1 Algemene beschrijving van ontstaan en kenmerken van Nederlandse hoogvenen 15
- 2.2 Hydrologie van de hoogvenen 18
 - 2.2.1 Hydrologie en hoogveenvorming op landschapschaal 18
 - 2.2.2 Hydrologie van het veenpakket en grootte van de wegzijging 21
 - 2.2.3 Verlaging van grondwaterstijghoogte en effecten daarvan op de hydrologie van hoogvenen 22
- 2.3 De veenbasis 25
 - 2.3.1 Typen veenbasis 25
 - 2.3.2 Bodemfysische kenmerken van de veenbasis 27

3 De Nederlandse hoogveengebieden en hun bodemkundig-hydrologische situering 33

- 3.1 Geografische verspreiding en algemene karakterisering 33
- 3.2 Hydrologie van de hoogveengebieden 33
- 3.3 De veenbasis van de Nederlandse hoogvenen 37
 - 3.3.1 Venen met stagnerende klei- of leemlaag (type 1) 37
 - 3.3.2 Venen met stagnerende placic horizon (type 2) 40
 - 3.3.3 Venen met een stagnerende podzol B horizont (type 3) 41
 - 3.3.4 Venen met stagnerende waterhardlaag (type 4) 43
 - 3.3.5 Venen met minerale ondergrond met lage hydrologische weerstand (type 5) 43
 - 3.3.6 Vegetatie bij veenvorming en relatie met organische veenbasis (gliede) 45

4 Afbraakprocessen in de veenbasis 47

- 4.1 Afbraak van organische stof en milieucondities in hoogvenen met type 3 en 4 minerale veenbasis 48
 - 4.1.1 Accumulatie en oplossing 48
 - 4.1.2 Microbiële afbraak: omgevingscondities en processen. 49
 - 4.1.3 Toegankelijkheid van de organische stof. 51
- 4.2 Afbraakprocessen in een organische veenbasis 52
- 4.3 Conclusies 52

5 De kennisvragen	54
5.1 Inleiding	54
5.2 Definitie en typologie van begrip 'veenbasis'	56
5.3 Typen veenbasis en hun gevoeligheid voor aantasting/afbraak	57
5.4 Factoren en processen bij mogelijke aantasting/afbraak van de veenbasis: kennis en kennisleemten.	58
5.4.1 Ontstaan van onverzadigde zone	58
5.4.2 Scheurvorming	59
5.4.3 Chemische afbraakprocessen (aerobe/anaerobe afbraak)	60
5.4.4 Gasfluxen en afbraak	61
5.4.5 Waterfluxen en -kwaliteit in relatie tot afbraak	62
5.4.6 Self-sealing	62
5.5 Gebiedsspecifieke kennisleemten	64
5.6 Slotopmerkingen	64
6 Geraadpleegde en geciteerde literatuur	68

Bijlagen

Bijlage 1: Karakteristieken van de hoogvenen in Nederland	74
---	----

Samenvatting

Het behoud en herstel van de grote hoogveenrestanten in Nederland lijkt langzaam de goede kant op te gaan. De habitattypen Herstellend hoogveen (H7120) en Actief hoogveen (H7110_A) worden in het kader van Natura 2000 beschermd en herstelmaatregelen worden geformuleerd. Een kennisvraag die reeds sinds het begin van het OBN-hoogveenonderzoek in 1997 is gesteld, maar nog niet beantwoord is, is de vraag naar mogelijke aantastingen van 'de veenbasis'. Dit rapport geeft geen antwoord op de vraag, maar biedt een literatuurstudie en kennisoverzicht van de processen die een rol kunnen spelen in de veenbasis en formuleert de onderzoeksvragen die naar het antwoord op deze vraag moeten leiden.

Hoogveenrestanten hebben vaak te maken met versterkte wegzijging naar het omliggende ontgonnen landschap, waardoor hun behoud en herstel wordt bedreigd. De mate waarin dat gebeurt hangt af van de omvang van het veengebied, het grondwaterpeil in de omgeving en de doorlatendheid van de ondergrond. Het onderste deel van het veenpakket en eventueel daaronder aanwezige slecht doorlatende minerale lagen bieden daarbij de meeste weerstand tegen wegzijging. Dit onderste deel van het veenpakket en deze slecht doorlatende lagen worden hier aangeduid als 'de veenbasis'.

Er wordt verondersteld dat de veenbasis op termijn meer doorlatend zal kunnen worden bij het verloren gaan van haar contact met het onderliggende grondwater, dat wil zeggen bij zodanig diepe ontwatering dat de grondwaterspiegel onder de veenbasis komt te liggen en lucht zijdelings zou kunnen toetreden. De toename van de doorlatendheid zou dan het gevolg zijn van de toename van microbiële afbraak van de in de veenbasis aanwezige organische stof en van scheurvorming, als gevolg van uitdroging en toetreding van zuurstof 'van onder af'. Deze toename van de doorlatendheid van de veenbasis zou het behoud of herstel van het desbetreffende hoogveen zeer bemoeilijken omdat het proces van veenbasisafbraak als in principe irreversibel wordt gezien. Bij pogingen tot voorkoming van een dergelijk verschijnsel wordt als maat de stijghoogte van het grondwater gebruikt, die dan dus tenminste tot in of boven de veenbasis zou moeten reiken, wil (verdere) afbraak voorkomen worden.

Een centrale vraag in het beheer van hoogveenecosystemen is in hoeverre het essentieel is voor een duurzaam behoud en herstel van deze systemen, dat de stijghoogte van het grondwater in het onderliggende pakket tenminste tot in het veen reikt. Overwegingen daarbij zijn dat de kenmerkende hydrologische condities van hoogveenecosystemen – permanente of vrijwel permanente verzadiging met water – (1) essentieel zijn voor een geremde afbraak van organische stof onder anaerobe condities, die de basis vormt voor het ontstaan en de instandhouding van veen en (2) veelal in hoge mate mede bepaald worden door de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag aan de 'veenbasis' (d.w.z. onderin het veen, bovenin de minerale ondergrond of tussen beide in), waarvan het voortbestaan mogelijk in sterke mate afhangt van het in stand houden van deze hydrologische condities.

In dit rapport wordt een literatuuroverzicht gegeven van het ontstaan en functioneren van hoogvenen en hun belangrijkste kenmerken. Dit wordt vervolgens uitgewerkt voor de nu belangrijkste gebieden met hoogveen in Nederland en de daarvan bekende hydrologische en bodemkundige gegevens, waaronder de kennis over de aanwezige veenbasis. Bijzondere aandacht wordt besteed aan afbraakprocessen in de veenbasis en condities die daarbij een rol spelen, alsook de potentiële effecten van grondwaterstandverlaging op deze processen.

De veenbasis wordt gedefinieerd op functionele gronden: het is de laag, die de belangrijkste hydrologische weerstand vormt, wegzijging belemmert en bij aantasting het er boven gelegen veenpakket mogelijk gevoelig maakt voor uitdroging door versterkte wegzijging. Deze veenbasis kan zijn het veenpakket zelf (de catotelm), een gliedelaag of een andere sterk organische laag direct aan de basis van het veen of een weerstandsbiedende laag onder het veen (bijv. slecht doorlatende kleilaag, leemlaag of laag met veel organische stof).

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de diverse typen veenbasis die in dit rapport worden onderscheiden. Voor de volledigheid is ook de situatie aangegeven, waarbij hoogveen is ontwikkeld, maar geen *stagnerende* minerale veenbasis aanwezig is (type 5), hetgeen kan voorkomen bij venen, die zijn ontstaan in topografische laagten met initieel hoge grondwaterstand.

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Organisch<ul style="list-style-type: none">o Veeno Verdichte veenlagen (doppleriet of gliede)- Mineraal<ul style="list-style-type: none">o type 1: stagnerende klei- of leemlaag (Brabant leem, keileem, etc.);o type 2: stagnerende placic horizon;o type 3: stagnerende podzol B horizont;o type 4: stagnerende waterhardlaag;o (type 5: <i>niet of zwak stagnerende bodem/lagen</i>) |
|---|

Uit de beschikbare informatie blijkt dat voor de huidige hoogveengebieden maar zelden informatie beschikbaar is over de veenbasis, d.w.z. welke typen veenbasis voorkomen en in welk patroon. Tevens blijkt dat relatief weinig informatie bestaat over de fysische en chemische eigenschappen van de verschillende typen veenbasis (zie bijlage 1).

We onderscheiden twee belangrijke groepen processen die tot afbraak kunnen leiden:

- Chemisch-microbiële processen (aeroob of anaeroob) waarbij organische stof afbreekt en als gevolg waarvan de fysische eigenschappen (in het bijzonder de doorlatendheid) veranderen;
- Fysische processen, in het bijzonder krimp en scheurvorming, waardoor de doorlatendheid kan veranderen.

Verder is er een wezenlijk verschil in typen met een minerale veenbasis en typen met een organische veenbasis, waarbij de eerstgenoemden aanzienlijk minder gevoelig zijn voor aantasting bij grondwaterstandsverlaging. De typen minerale veenbasis 1 en 2 zijn daarbij het minst gevoelig en feitelijk dusdanig dat zij verder buiten beschouwing kunnen worden gelaten. Het belangrijkste verschil tussen minerale veenbasis en organische veenbasis ligt in de potentiële gevoeligheid voor scheurvorming bij uitdroging, die bij de minerale veenbasis afwezig is. Verder speelt de positie in de veenbasis een rol – dat wil zeggen in de randzone van een veen of meer in de kern (zie ook hoofdstukken 1 t/m 4) - waarbij een sterkere uitdroging en sterkere microbiële afbraak mogelijk is in de randzone. Tot slot, er is weinig bekend over het fysische gedrag van veen bij uitdroging van onderaf. Ook over het fysische gedrag van veen in situaties met beperkte uitdroging en oplopende belasting door het bovenliggende pakket, in het bijzonder het mogelijke optreden van scheurvorming, is weinig bekend.

In hoofdstukken 1 t/m 4 is uitvoerig ingegaan op de diverse processen, die een rol (kunnen) spelen bij de mogelijke aantasting/afbraak van de veenbasis. Het betreft:

- Al dan niet ontstaan van een onverzadigde zone
- Scheurvorming
- Aerobe/anaerobe afbraak (chemische afbraakprocessen)
- Gasfluxen

- Waterfluxen/waterkwaliteit
- Self-sealing

In de paragrafen 2 en 3 van hoofdstuk 5 ligt het accent op het bestaande inzicht omtrent het optreden van deze processen in de diverse typen veenbasis die zijn onderscheiden.

Hoewel niet voor elk type veenbasis in detail duidelijk is of deze gevoelig is voor afbraak, is in hoofdstuk 5 toch een indeling op hoofdlijnen gemaakt op grond van veronderstelde gevoeligheid voor afbraak. In hoofdstuk 5 zijn tevens de onderzoeksvragen geformuleerd die antwoord moeten geven op de ontbrekende kennis met betrekking tot gevoeligheid voor afbraak. Deze zijn samengevat in tabel 5.2.

In tabel 5.2 is alleen het *generieke onderzoek* geformuleerd dat zou moeten worden opgepakt in OBN-verband. Voor zover het *veldonderzoek* betreft moet het plaatsvinden in enkele representatieve onderzoeksgebieden, die in samenspraak met beheerders en OBN-leden worden geselecteerd en waar tevens inventariserend *gebiedsgericht onderzoek* wordt uitgevoerd. Bij dit laatste gaat het om het toetsen van aannames via metingen in transecten vanaf de rand van het veen richting het centrum.

Het generieke onderzoek is nodig om het gebiedsgerichte onderzoek goed uit te kunnen voeren. Pas na uitvoering van dit onderzoek is er een goed beeld en een goede typologie van de veenbasis met daarbij de gevoeligheid voor o.a. scheurvorming.

In paragraaf 5.6 zijn belangrijke slotopmerkingen geformuleerd.

Summary

Although slowly, in the Netherlands nature management aiming at conservation and recovery of the remaining large raised bogs is moving in the right direction: within the framework of Natura 2000, the habitat types 'Recovering raised bogs' (H7120) and 'Active raised bogs' (H7110_A) are currently fully protected and remedial measures have been formulated to be implemented in management plans. A knowledge question that already existed from the start of the OBN-raised bog research program in 1997, but has not yet been tackled, concerns the potential impairment or degradation of the 'bog basis', particularly as a result of enhanced drainage. This report concerns a review of existing literature and knowledge on processes that are relevant for such impairment, and provides a coherent set of research questions that should be answered.

The conservation and recovery of raised bog remnants is often impeded by enhanced infiltration of groundwater towards the surrounding agricultural landscape and concurrent dessication of these remnants. Its extent depends on the size of the raised bog and permeability of its subsoil, and on differences in hydraulic heads between the raised bog and adjacent agricultural landscape. Within a raised bog, infiltrating water often stagnates on dense organic horizons in the lower part of the peat layer or on stagnative mineral horizons underneath. In this report, this complex of stagnative layers is defined as the 'bog basis'.

The general assumption is that over time this bog basis may become more permeable, if the groundwater level is lowered to such an extent that the contact with the bog basis is lost, and eventually air enters the capillary zone through lateral air influx. The increased permeability supposedly results from increased microbial decomposition upon aeration of the organic matter in the bog basis, that might also be enhanced by the development of fissures, induced by dessication of the peat 'from below'. Since these processes most probably lead to an irreversible change in the permeability of the bog basis, this phenomenon could seriously impede the conservation and recovery of raised bogs. Consequently, in attempts to prevent such bog basis degradation, the hydraulic head of the groundwater is seen as a key factor and it is generally assumed that this hydraulic head should reach into or even be above the bog basis to prevent its (further) degradation.

In this report, a review is presented of the literature on the genesis and functioning of Dutch raised bogs and of their main characteristics. This is followed by a concise description of today's main raised bogs areas, and their hydrological and pedological characteristics, with emphasis on the nature of the bog basis. Particular attention is paid to relevant decomposition processes in the bog basis and to the environmental factors controlling decomposition, as well as to the potential impact of the lowering of the groundwater level on these processes.

The definition of the stagnative layers in raised bogs as the 'bog basis' has a functional background: it is a layer with low hydraulic conductivity, limiting the infiltration of water to such an extent that water permanently stagnates on this layer. This bog basis may be organic and in that case consists of the peat layer itself (catotelm), a so-called gliede layer (greasy humus) or a highly organic dense layer at the base of the peat bog, or be a stagnative mineral layer (e.g. a stagnative clay or loam layer/horizon or a dense mineral layer cemented by illuviated organic matter such as a podzolic Bh horizon).

In the table below an overview is presented of the various types of bog basis that have been distinguished within the context of this report. Bogs may also form in the absence of a stagnative bog basis, such as in topographical depressions in which initial groundwater levels were high enough to induce peat accumulation, ultimately leading to raised bogs. Such raised bogs may well lack a stagnative bog basis and, for sake of completeness, have been distinguished as a separate type (type 5).

- Organic
 - o Peat
 - o Dense peat layers (dopplerite or greasy humus)
- Mineral
 - o type 1: stagnative layer of clay or loam (Brabant loam, glacial till, etc.);
 - o type 2: stagnative placic horizon;
 - o type 3: stagnative podzol B horizon;
 - o type 4: stagnative layer of waterhard (brown, cemented layer);
 - o (type 5: *non or slightly stagnative layer*)

From the literature review and consultations of experts it appears that for today's raised bog areas information on the nature of the bog basis and spatial patterns in bog basis properties is truly scarce. The same holds for the type specific (range in) physical and chemical properties (see appendix 1).

Two main groups of processes, potentially leading to bog basis degradation, can be distinguished:

- Chemical-microbial processes (aerobic or anaerobic) causing decomposition of organic matter and thus inducing changes in physical properties that enhance the hydraulic conductivity;
- Physical processes, in particular shrinkage and associated development of fissures, which enhance the hydraulic conductivity.

•

Fundamental differences exist between mineral and organic types of bog basis, the first being far less susceptible to enhancement of the permeability upon lowering of the groundwater level, because of the intrinsic lesser swell and shrink, as well as lower sensitivity to enhanced microbial decomposition. Among the mineral types, types 1 and 2 are truly stable, to the extent that they can be left out of consideration in the further analysis. An important factor is spatial variability in bog basis stability: in the border zone of a raised bog, with lowered groundwater level, dessication will be more pronounced and concurrent enhanced microbial decomposition may be much more prominent than in the core zone (see also chapters 1 to 4). Little is known about the physical behaviour of peat in a situation where dessication is 'from below', about thresholds for the occurrence of fissuring in terms extent of dessication and overburden, and about the reversibility of shrinkage and fissuring upon (seasonal) rewetting.

Chapters 1 to 4 extensively deal with the various processes that may be involved in the potential breakdown of the bog basis and include:

- Development of an unsaturated zone (below the bog basis)
- Development of fissures
- Aerobic/anaerobic decomposition (chemical decomposition processes)
- Gas fluxes
- Water fluxes/water quality
- Self-sealing

Paragraphs 2 and 3 of chapter 5 focus on the existing knowledge of the occurrence of these various processes in the types of bog basis distinguished. Though it is not yet fully clear to what extent these various types are sensitive to breakdown, induced by a lowered groundwater level, in chapter 5 a tentative classification is presented, based on an evaluation of the various potential processes involved. In addition, research questions are presented, linked to knowledge gaps with regard to this sensitivity to breakdown and summarized in table 5.2.

The research presented in table 5.2, which is to be addressed in the context of the OBN-program, is *generic* in nature and should precede *area-specific research* and enable a correct establishment of the field research set-up and key parameters to be studied. In dialogue between managers and OBN-members, representative raised bogs should be selected in which *field studies* are executed as well as *inventory area-specific research*. In the latter,

focus is on testing hypotheses by measuring and monitoring parameters along transects (from the borderzone to the interior).

Lastly, in para 5.6. major conclusive remarks and key issues are summarized.

Dankwoord

De auteurs willen graag de volgende personen bedanken voor hun bereidwillige medewerking. De deelnemers aan de workshop in december 2013 brachten een levendige discussie op gang – de visies vanuit de verschillende specialiteiten konden worden geïntegreerd. Daarbij waren de inbreng van Bas van Geel, Thomas de Meij, Nicko Straathof en Geert van Wirdum onontbeerlijk. Ook nadien kregen wij waardevol commentaar van hen. De leden van het OBN-Deskundigenteam Nat Zandlandschap hebben de conceptversie van dit rapport van commentaar voorzien, ook daarvoor dank.

De belangrijkste meedenker, commentator en trekker was André Jansen, onze voorzitter van het Deskundigenteam. Bedankt André, voor het weer in gezamenlijkheid klaren van deze klus!

1 Inleiding

Ooit waren grote delen van de hogere zandgronden bedekt met hoogveen, vooral in Groningen, Drenthe, delen van Overijssel, Noordwest Brabant en het Peelgebied (Bazelmans *et al.* 2011). Echter, sinds het begin van de Middeleeuwen is het grootste deel van die oorspronkelijke hoogvenen verdwenen door het afgraven van turf, ontwatering en landbouwkundige ontginning. Terreinen die zijn geclassificeerd als beheertype Hoogveen (N06.03) worden nu alleen nog binnen de hogere zandgronden aangetroffen (Schipper & Siebel 2009; Kemmers *et al.* 2011) en deze hoogveenrestanten hebben vaak te maken met versterkte wegzijging naar het omliggende ontgonnen landschap, waardoor hun behoud en eventueel herstel wordt bedreigd. De mate waarin dat gebeurt hangt af van de omvang van het veengebied, het grondwaterpeil in de omgeving en de doorlatendheid van de ondergrond. Het onderste deel van het veenpakket en eventueel daaronder aanwezige slecht doorlatende minerale lagen bieden daarbij de meeste weerstand tegen wegzijging. Deze slecht doorlatende lagen worden hier aangeduid als 'de veenbasis'.

In veel van de huidige hoogveengebieden in Nederland ligt de regionale grondwaterstijghoogte thans onder het niveau van de veenbasis als gevolg van ontwatering in de omgeving. Deze ontwatering heeft in combinatie met het grootschalig afgraven van veen in veel gebieden geleid tot verdroging van het veen 'van bovenaf', d.w.z. vanaf het oppervlak. Verder wordt verondersteld dat de veenbasis op termijn meer doorlatend zal kunnen worden bij het verloren gaan van haar contact met het onderliggende grondwater, dat wil zeggen bij zodanig diepe ontwatering dat de grondwaterspiegel onder de veenbasis komt te liggen en lucht zijdelings zou kunnen toetreden. De toename van de doorlatendheid zou dan het gevolg zijn van de toename van microbiële afbraak van de in de veenbasis aanwezige organische stof en van scheurvorming, als gevolg van uitdroging en toetreding van zuurstof 'van onder af'. Deze toename van de doorlatendheid van de veenbasis zou het behoud of herstel van het desbetreffende hoogveen zeer bemoeilijken omdat het proces van veenbasisafbraak als in principe irreversibel wordt gezien. Bij pogingen tot voorkoming van een dergelijk verschijnsel wordt als maat de stijghoogte van het grondwater gebruikt, die dan dus tenminste tot in of boven de veenbasis zou moeten reiken, wil (verdere) afbraak voorkomen worden.

Een tweede reden om de regionale grondwaterstand hoog in het veenpakket te houden is dat daarmee wegzijging van veenwater naar de ondergrond en laterale afstroming door het veenpakket wordt verminderd. Beperking van de wegzijging leidt tot stabiele grondwaterstanden in het veen, wat nodig is voor ontwikkeling van een goed functionerende acrotelm.

Zolang niet vaststaat dat een 'stijghoogte tot in de veenbasis' geen absolute vereiste is, en zolang niet bekend is wat de invloed van kortere onderschrijdingen van de gewenste stijghoogte op de 'stabiliteit van de veenbasis' is, en wat de diepteligging en kenmerken van de veenbasis in specifieke gebieden zijn, geldt het voorzorgsprincipe en moet vanwege de NB-wet 1998 aan de eis van 'stijghoogte tot boven de veenbasis' voldaan worden voor zover het hoogveendoelstellingen in N2000-gebieden betreft. Om de stijghoogte terug te brengen tot dat niveau, d.w.z. tot boven het niveau van de huidige regionale stijghoogte, blijken echter vaak forse bufferzones nodig te zijn, met name als de stijghoogte permanent, dus ook in de zomer, boven de veenbasis moet staan.

De hiervoor geschetste noodzaak tot stijghoogteherstel leidt met regelmaat tot moeizame onderhandelingen over instelling en beheer van bufferzones tussen natuurbeherende instanties en andere belanghebbenden en landgebruikers. Voorbeelden van hoogveenengebieden waar dit een onderwerp van onderhandeling is of is geweest zijn Bargerveen, Engbertsdijksvenen, Peelvenen en Haaksbergerveen. Het is daarmee van maatschappelijk groot belang om te weten of een permanent hoge regionale stijghoogte ter voorkoming van veenbasisafbraak een noodzakelijke voorwaarde is voor hoogveenontwikkeling en –behoud en of dit voor alle typen veenbasis geldt, alsook om een goede onderbouwing van de dimensies en het beheer van bufferzones te kunnen geven. Bij de huidige wetenschappelijke kennis van de kenmerken en stabiliteit van de veenbasis kan hierop geen eenduidig antwoord gegeven worden.

Samenvattend, een centrale vraag in het beheer van hoogveenecosystemen is in hoeverre het essentieel is voor een duurzaam behoud en herstel van deze systemen, dat de stijghoogte van het grondwater in het onderliggende pakket tenminste tot in het veen reikt. Overwegingen daarbij zijn dat de kenmerkende hydrologische condities van hoogveenecosystemen – permanente of vrijwel permanente verzadiging met water - (1) essentieel zijn voor een geremde afbraak van organische stof onder anaerobe condities, die de basis vormt voor het ontstaan en de instandhouding van veen en (2) veelal in hoge mate mede bepaald worden door de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag aan de ‘veenbasis’ (d.w.z. onderin het veen, bovenin de minerale ondergrond of tussen beide in), waarvan het voortbestaan mogelijk in sterke mate afhangt van het in stand houden van deze hydrologische condities.

In dit rapport, dat zich primair richt op ‘de veenbasis’ wordt een overzicht gegeven van de achtergrondinformatie die is verzameld ten behoeve van de kennisverhelderingsactie ‘aantasting veenbasis’. Het vormt de weerslag van een drietal deelrapporten op respectievelijk het gebied van de hydrologie (C. Geujen), bodem (B. van Delft) en processen (J. Sevink). Deze deelrapporten vormden de basis voor een nadere analyse en definiëring van de onderzoeksvragen tijdens een workshop op 19 december 2013 waaraan een groep deskundigen¹ deelnam. Resultaten hiervan zijn samengevat door C. Geujen, M.G. Schouten en L. van Tweel, en komen in hoofdstuk 5 van dit rapport aan de orde. J. Sevink heeft de 3 deelrapporten en het workshopverslag herschreven tot een samenhangend geheel.

In de hoofdstukken 2 t/m 4 wordt als eerste een overzicht gegeven van het ontstaan en functioneren van hoogvenen en hun belangrijkste kenmerken. Dit wordt vervolgens uitgewerkt voor de nu belangrijkste gebieden met hoogveen in Nederland en de daarvan bekende hydrologische en bodemkundige gegevens, waaronder de kennis over de aanwezige veenbasis. Bijzondere aandacht wordt besteed aan afbraakprocessen in de veenbasis en condities die daarbij een rol spelen, alsook de potentiële effecten van grondwaterstandverlaging op deze processen.

In hoofdstuk 5 worden de kennislacunes benoemd en mogelijkheden voor daaraan gerelateerd onderzoek beschreven.

Tot slot moet vermeld worden dat in relatie tot de vraagstelling de informatie wordt beperkt tot:

¹ Deelnemers aan deze workshop waren: B. van Delft, B. van Geel, C. Geujen, T. de Meij, M. Schouten, J. Sevink, N. Straathof, L. van Tweel en G. van Wirdum.

1. Grote veensystemen d.w.z. geen zeer lokale hoogvenen, die gekoppeld zijn aan eveneens zeer lokale specifieke situaties en condities (bijv. hellingveentjes van stuifzandduinen).
2. Veensystemen, die niet reeds van oorsprong zijn ontstaan onder invloed van een schijngrondwaterspiegel, zoals bijvoorbeeld veel kleine veentjes op de Veluwe. Daar waar een weerstandbiedende laag van minerale oorsprong aanwezig is en niet direct op een met water verzadigde ondergrond rust, zal daling van de regionale grondwaterspiegel geen effect hebben op de eigenschappen van deze laag en is dus geen sprake van 'aantasting van de veenbasis' door verlaging van de grondwaterstand.
3. De processen die in of onder de veenbasis optreden, wanneer de grondwaterstand in de minerale ondergrond tot onder de veenbasis zakt. Immers, de processen die bij verdroging optreden in de bovengrond van een veenbodem zijn ruimschoots bekend (scheurvorming en aeratie, toenemende biologische activiteit gepaard gaand met mineralisatie en eutrofiëring, bypass flow door scheuren, etc.) en behoeven in het kader van de 'aantasting van de veenbasis' geen uitgebreide behandeling.

Kort samengevat, de gepresenteerde informatie concentreert zich op de veenbasis in grote hoogvenen en besteedt niet meer dan incidenteel aandacht aan hangwatervenen en kleine hoogveenrelicten.

2 Hoogvenen in Nederland

Hier wordt eerst een kort overzicht gegeven van het ontstaan en de algemene kenmerken van Nederlandse hoogvenen, gevolgd door een overzicht van de relevante typen 'veenbasis' en van de thans nog bestaande veengebieden en hun typologie.

2.1 Algemene beschrijving van ontstaan en kenmerken van Nederlandse hoogvenen

Accumulatie van organische stof treedt op wanneer de productie van organische stof groter is dan de afbraak, hetgeen in het Nederlandse klimaat en daarin voorkomende begroeiingen het geval is onder slecht geaereerde omstandigheden, die optreden in met water verzadigde systemen. In geheel of grotendeels met regenwater gevoede, natte en zure systemen leidt dit tot de vorming van hoogveen.

Met water verzadigde systemen kunnen gebonden zijn aan topografische laagten, waarbij in eerste instantie met grondwater gevoede systemen zich geleidelijk ontwikkelen tot door regenwater gevoede oligotrofe systemen: dit is de klassieke ontwikkeling van laagveen naar hoogveen, en wel lenshoogveen, zo genoemd vanwege de vorm van het hoogveenlichaam. Een meer gebruikelijke naam voor de Nederlandse hoogvenen is overigens 'plateauvenen'. Ook kan waterverzadiging optreden wanneer wegzijging van het netto neerslagoverschot verhinderd wordt door aanwezigheid van een stagnerende laag. Voorbeelden hiervan zijn waterstagnatie op keileem of de Brabantse leem, alsook op slecht doorlatende podzolen met een dichte placic horizon (ijzerbandje).

De belangrijkste factor voor het ontstaan van lenshoogvenen is het uitgroeien boven de regionale grondwaterspiegel, wat vooral te danken is aan de lengtegroei van de veenmossen, hun grote waterhoudend vermogen en de grote weerstand tegen afbraak van het celmateriaal van deze plantjes. De lengtegroei van veenmosplanten ligt, sterk afhankelijk van de soort veenmos en groeiomstandigheden, in de grootteorde van centimeters tot zelfs meer dan een decimeter per jaar.

De bovenste veenlaag bestaande uit levend en weinig vergaan veenmos wordt in het algemeen de acrotelm genoemd. Hoewel een "typische" acrotelm een dikte van 3 dm heeft, komen, ook in Nederland, dikten voor van aanzienlijk meer dan 5 dm, waarin het veen hydraulisch als acrotelm te beschouwen is (Schouten 2002). De veenmosplantjes houden een grote hoeveelheid water in hun zogenaamde hyaliene cellen en tussen de takblaadjes vast, terwijl de grotere open ruimtes zorgen voor een snelle afvoer van het neerslagoverschot, zodat de plantjes niet verdrinken. In droge perioden kan het mosdek iets inzakken en drogen de kopjes van de veenmosplantjes van boven uit. Zowel de waterafvoer als de verdamping worden hierdoor gereduceerd (Schouten 2002; Robroek 2007; Joosten 1993).

Zolang de veenwaterstand niet door drainage, vergrote wegzijging of anderszins meer dan 3 dm beneden de top van de acrotelm zakt blijft de acrotelm voortbestaan. Als een acrotelmdikte van 3 dm of meer aanwezig is, indiceert dat bij de gegeven klimaatsomstandigheden een beperkte netto wegzijging en een beperkte hydraulische

gradiënt van centrum naar veenrand (Van der Schaaf 2002). De combinatie van een eventuele weinig doorlatende basis, de stijghoogte van het onderliggende grondwater, de potentiaal van het freatische water in de omgeving en de verdamping voldoet dan. Wanneer het veen meer dan 3 dm boven de stijghoogte van het grondwater uitgroeit, ontstaat door zetting (compactie) en geleidelijke humificatie (als gevolg van gedeeltelijke afbraak) een minder, uiteindelijk zelfs nauwelijks doorlatend veen, de zogenaamde catotelm.

Vanwege de geringe doorlatendheid is deze catotelm van minstens zo groot belang voor de overleving van het hoogveen, als de acrotelm. De catotelm kan bij zeer langdurige droogte capillair nog enig water naleveren naar de acrotelm en vertoont, als hij dik is, als gevolg daarvan ook enige seizoensgebonden zwel en krimp, de zogenaamde veenademhaling. Tijdens de veengroei kan door langzame verplaatsing van humus in het onderste deel van de catotelm een verdere verdichting van het veen optreden, soms in de vorm van een dopplrietlaag (amorphe humusverbindingen).

De oudste ombrotrofe veenmospakketten, het zogenoemde zwartveen, zijn sterk gehumificeerd. Vermoedelijk zijn veenmossen uit de *Acutifoliagroep*, vooral Rood veenmos (*Sphagnum rubellum*) de belangrijkste veenvormers geweest (Joosten & Bakker 1987). Rond 500 voor Chr. daalde de temperatuur aanzienlijk en werd het bovendien natter. Dit bevorderde de groei van hoogvenen, maar zorgde ook voor een wezenlijke verandering in de samenstelling van de hoogveenvegetatie: het aandeel hogere planten verminderde en veenmossen van de *Cymbifoliagroep* zoals Bultveenmos (*Sphagnum austinii*) en Wrattig veenmos (*Sphagnum papillosum*) kwamen tot overheersing (Joosten & Bakker 1987). Deze veranderde vegetatiesamenstelling resulteerde in een minder sterk gehumificeerd veen, het zogenoemde witveen.

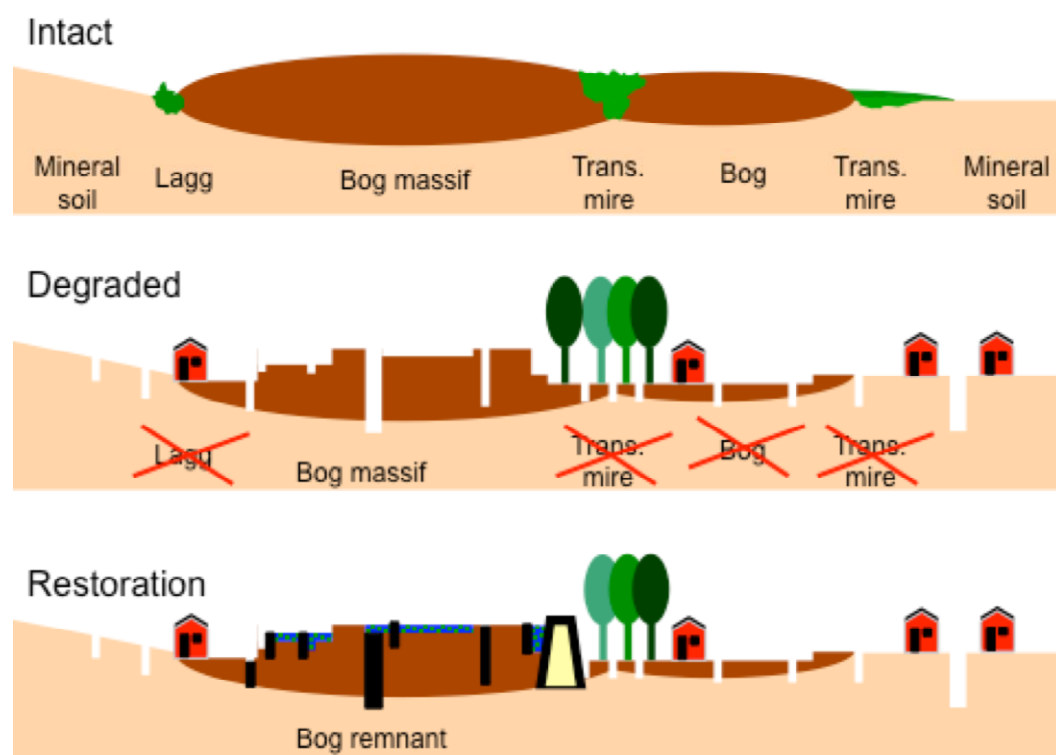
Venen ontwikkelen zich dus in de tijd, waarbij vegetatie en waterkwaliteit sterk kunnen veranderen, net als de eigenschappen en samenstelling van het gevormde veen. Zo kan een eenmaal ontstaan gliedelaagje² in een sterk seizoensgebonden vochtige laagte in het dekzand aanleiding geven tot beginnende veengroei met voornamelijk Pitrusvegetatie, die later overgaat in veenmosveen, waarbij de vernatting zich geleidelijk over het aangrenzende landschap uitbreidt. Een ander voorbeeld is de op regionale schaal opgetreden geleidelijke uitbreiding van veen vanuit topografische laagten over het aangrenzende landschap door de verslechterde afvoer van water en stijgend grondwater bij voortgaande ontwikkeling, wat bekend is van o.a. het Drentse plateau en de Peel. Deze ontwikkeling gaat veelal gepaard met een afnemende invloed van lithodien grondwater en een toename van regenwater, en daaraan gekoppelde veranderingen in de vegetatie met uiteindelijk een dominantie van veenmossen.

Tijdens de veenvorming kunnen slecht doorlatende lagen of veenpakketten ontstaan, die wegzijging belemmeren en daarmee de vernatting, ook op meer regionale schaal, bevorderen. Zo worden veenlagen die bestaan uit waterveenmos (*Sphagnum cuspidatum*) gekenmerkt door een zeer lage verticale doorlatendheid, samenhangend met de structuur en pakking van dit veentype. Ook compactie onder invloed van belasting (door het gewicht van het bovenliggende veenpakket) kan tot afname van de doorlatendheid leiden.

² Gliede bestaat uit min of meer disperse, versmeerbare organische stof (d.w.z. min of meer structuurloos), waarvan de genese niet geheel duidelijk is. Het werd wel opgevat als een, na bedekking door veen, verder gehumificeerde bovengrond van bijvoorbeeld een heideprofiel of door pitrus gedomineerde bovengrond. Van Heuvelen (1962) toonde echter aan dat het ook een forse component ingespoelde amorfe humus kan bevatten en zette daarmee het begrip 'podzolering in veen' op de kaart. De feitelijke genese van in hoogveen voorkomende gliede is echter voor de vraagstelling (afbraak van de veenbasis) niet van belang. Wel voor de kennisvraag over selfsealing.

Complexer is het effect van verticaal transport van fijn verdeelde of disperse organische stof, die ontstaat bij anaerobe afbraak. Inspoeling van zulke organische stof kan leiden tot verdichting van veenlagen. Dan wordt gesproken van doppleriet of gliede en wanneer inspoeling optreedt tot in de minerale ondergrond van waterhard (Koopman 1986 en 1988; Dekker *et al.* 1991). Ook dergelijke verdichte lagen belemmeren de wegzijging en kunnen aanleiding geven tot verdere vernatting.

Hoogveengebieden vertoonden oorspronkelijk regionale geografische patronen, die samenhangen met hun ontwikkeling in de tijd en de geomorfologie van het landschap. Als voorbeeld weer het Drentse plateau: dikke veenpakketten op van oorsprong hydromorfe bodems (vaak ondiep op keileem) in de oorspronkelijke, laaggelegen kernen; dunnere pakketten op 'verdronken' goed ontwikkelde podzolbodems in dekzand op voormalig hogere delen van de ondergrond. De huidige hoogveenrestanten vormen een min of meer toevallige uitsnede uit dergelijke complexe regionale systemen en vertonen daarmee een zeer gevarieerde genese, die uiteen kan lopen van een restant van op regionaal niveau ook initieel al natte systemen (van oorsprong laag gelegen en slecht gedraineerde depressies in het landschap), tot pas in een laat stadium van een dergelijke ontwikkeling ontstaan veen (bijv. hogere delen van keileemplateaus). Daarmee vertonen ze ook een grote variatie in opbouw van het veenpakket, en daarmee ook in aard en samenstelling van 'de veenbasis'. Deze situatie wordt verbeeld in bijgaande illustraties. Deze geven een overzicht van de genese en kenmerken van huidige hoogveenrestanten (zie figuur 2.1) en van de verbreiding van veen omstreeks 100 na Christus (zie figuur 2.2).

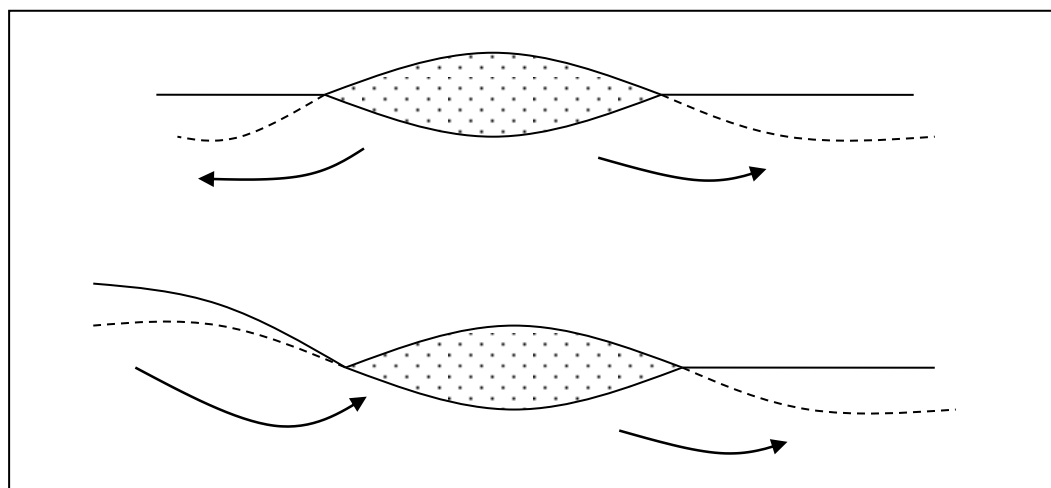


Figuur 2.1: De ontwikkeling van huidige hoogveenrestanten in Nederland. Uit: G.A. van Duinen (2013).

Figure 2.1: The development of the current bog remnants in the Netherlands. After: G.A. van Duinen (2013).

Gedurende het Holoceen was de stijging van de drainagebasis onder invloed van zeespiegelstijging een belangrijke oorzaak van de uitbreiding van hoogveen, in het bijzonder waar en wanneer die niet groter was dan de groeisnelheid van hoogveen (heel grofweg: ca. 1 mm/jaar). De vernatting werd nog versterkt door veenvorming in de grondwatergevoede laagten van het zandlandschap. Ook de vlakheid (het gebrek aan helling) van het zandlandschap veroorzaakte natheid.

Naarmate het veen groeit, zorgt het dikke veenpakket zelf ook voor weerstand en neemt de invloed van het omringende grondwater af en raakt het veen geïsoleerd ten opzichte van zijn omgeving. Het wordt dan volledig gevoed door regenwater. Alleen in de randzones is er direct contact tussen veenwater en grondwater, en kan kwel van grondwater een rol spelen. Dit is afhankelijk van de hoogteligging van het veenpakket ten opzichte van zijn omgeving en de regionale stijghoogte in die omgeving (zie figuur 2.3). Echter aan de randen van het hoogveen is het volume van het uit het veen afstromende water veel groter dan de hoeveelheid uittredend grondwater. Desondanks zijn in zulke randzones gradiënten in waterkwaliteit en vegetatie ontwikkeld.



Figuur 2.3: Ligging van een hoogveen t.o.v. het omringende landschap en de gevolgen voor de grondwaterstroming.

Figure 2.3: Position of a bog with respect to the surrounding landscape and its implications for groundwater flow.

Toestroom van grondwater belangrijk voor veenvorming vanwege methaan en CO₂

Uit veldonderzoek en experimenten (zie o.a. Smolders *et al.* 2001) blijkt dat een verhoogde concentratie van CO₂ in het grondwater groei van *Sphagnum* bevordert. Deze CO₂ komt vrij door microbiële afbraak van organische stof in de acrotelm, d.w.z. het bovenste losse, grotendeels uit veenmos bestaande pakket hoogveen. Dieper in het veenpakket treedt geen microbiële afbraak op die gepaard gaat met significante CO₂ vorming. Op grond van deze waarnemingen wordt aangenomen dat aanvoer van CO₂ of bicarbonaat van buiten het systeem via grondwater de groei van veenmos en daarmee veen bevordert. Verder lijkt ook methaan een belangrijke rol te spelen via methanotrofe microbiële binding van N en daarmee stikstoffixatie, die eveneens de groei van *Sphagnum*

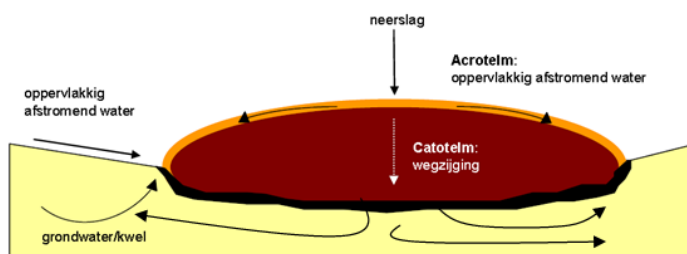
bevordert (zie o.a. Larmola *et al.* 2010 en 2014). Ook methaan kan via grondwater worden aangevoerd.

In centrum van venen met een dik pakket veen

Hier is sprake van wegzijging (en dus geen kwel) en er treedt stroming en dus afvoer op vanuit het veen naar het onderliggende minerale substraat. CO₂ en methaan ontstaan door respectievelijk aerobe afbraak (bovenin) en anaerobe afbraak (dieper) van het veen. Bij ouderdomsbepalingen (o.a. Franzén & Malmgren 2011) werd gevonden dat de ouderdom van veen van onder naar boven regelmatig afneemt, waarmee geconcludeerd kan worden dat aanvoer van CO₂ ontstaan door afbraak van organische stof in diepere lagen inderdaad een zeer ondergeschikte rol speelt in dit soort dikke veenpakketten wanneer geen kwel optreedt. Immers, bij een significante aanvoer van 'oude' CO₂ dieper uit het veenpakket, zou dit zich moeten vertalen in een schijnbaar hoge ouderdom van het ondiepe veen. Hiervoor werden geen aanwijzingen gevonden. In deze situatie is dus nauwelijks van belang wat er aan of in de veenbasis aan CO₂ en methaan ontstaat: wegzijging domineert en dus treedt geen aanvoer via grondwater op.

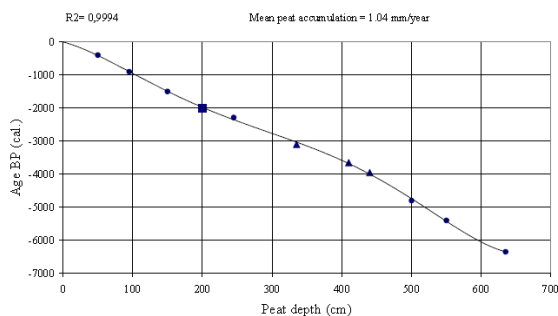
Langs randen van venen en in situaties met nauwelijks veengroei

Zoals in bijgaande figuur wordt verduidelijkt, kan aan de randen van hoogvenen vanuit aangrenzende gebieden met minerale bodems aanvoer van water optreden in de vorm van oppervlakkig afstromend grondwater of van grondwater van grotere diepte. Wanneer het gaat om relatief basenrijk, bicarbonaathoudend grondwater, dan zal dit de afbraak van organische stof versterken (zowel aeroob als anaeroob) en is de productie van CO₂ en methaan hoger. Verlaging van de grondwaterstand en/of stijghoogte van het diepere grondwater heeft in dergelijke situaties tot gevolg dat het effect van de aanvoer van basenrijk grondwater vermindert of zelfs kan verdwijnen.



Figuur 7. Schematische weergave van waterstromen in de minerale omgeving en de acrotelm en catotelm van een intact lenshoogveen.

*Schematic representation of water flows in the mineral surroundings and the acrotelm and catotelm of an undisturbed lense-shaped bog. Changed after Smolders *et al.* (2004).*



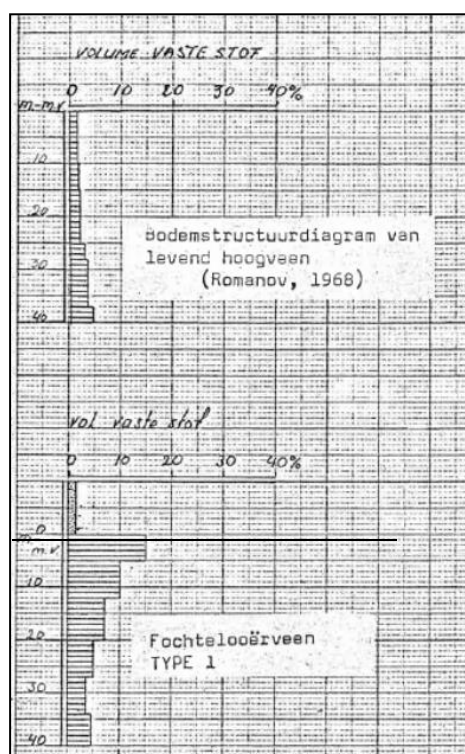
Ouderdom van veen. De koolstof bovenin is jonger dan onderin. Uit: Franzén et al. (2011). The age of peat. The carbon at the top is younger than that below. After: Franzén et al. (2011).

2.2.2 Hydrologie van het veenpakket en grootte van de wegzijging

Voor stabiele veengroei moet de waterstand in een hoogveen zich dicht onder het veenmosdek bevinden en zeer stabiel zijn opdat de mossen 's zomers niet uitdrogen en vaatplanten met wortels niet de overhand krijgen. In een intact veensysteem zorgen de fysische eigenschappen van de bovenste lagen van het veen, de zogenoemde acrotelm, alsmede de grote weerstand tegen wegzijging van de catotelm voor een zeer kleine fluctuatie van de veengrondwaterstand.

De bodemfysische eigenschappen van de acrotelm vertonen bovenin nauwelijks verschil met die van het levende veenmosdek: hoge porositeit, doorlatendheid, zwel/krimpvermogen (zie figuur 2.4). In een natuurlijk systeem heeft het veenpakket bovenin dus een zeer grote porositeit en bergingscoëfficiënt, en deze nemen in een ongestoord hoogveen exponentieel af met toenemende diepte, vaak met een "sprong" op de overgang naar de catotelm. In een verdroogd systeem is het contrast tussen bijvoorbeeld de bulk density ³ van levend veen en die van de het oude veen eronder zeer abrupt. Door verdroging is de oude veenlaag ingeklonken en veraard. Dit leidt tot lagere porositeit, lagere bergingscoëfficiënt, lagere doorlatendheid (meer surface runoff). Ook in niet door menselijke invloed gestoorde hoogveenprofielen zijn soortgelijke contrasten te vinden, op plekken waar de veengroei kennelijk geruime tijd vertraagd of onderbroken is geweest.

Binnen Nederland worden witveen en zwartveen onderscheiden. Het witveen heeft een hogere doorlatendheid dan het zwartveen (zie paragraaf 2.1). De weerstand van het veenpakket is vooral hoog in de veenbasis, waarin een meerbodem, gliede- of dopplrietlagen kunnen voorkomen en waartoe in dit onderzoek ook zwartveen (catotelm) wordt gerekend. De verticale doorlatendheid van het onderste zwartveen of de gliedelaag kan wel honderd keer zo laag zijn als die van witveen (dus een zwartveenlaag van 2 cm heeft evenveel weerstand als een witveenlaag van 2 meter).



Figuur 2.4: Bodemstructuurdiagrammen van levend hoogveen en van het Fochteloërveen (bron: schriftelijke communicatie Nicko Straathof).

Figure 2.4: Soil structure diagrams of an active bog and of the Fochteloërveen (Source: written communication Nicko Straathof). Vertical axis: depth below the soil surface; horizontal axis: volume solid matter as a percentage.

De neerslag in een hoogveen verdwijnt voor het grootste deel door verdamping en de rest via oppervlakkige afvoer en wegzijging. Het is niet bekend wat de maximaal toelaatbare wegzijging mag zijn. Dit hangt onder meer af van de condities van het veen. In een veen met een goed ontwikkelde acrotelm kan de wegzijging namelijk hoger zijn dan in een verdroogd hoogveen. In de literatuur wordt gesteld dat de wegzijging in een goed functionerend hoogveen in ons klimaat verwaarloosbaar klein is, in orde van grootte 30 tot 40 mm/jaar. De achterliggende verklaring is wellicht dat bij een grotere wegzijging onvermijdelijk te grote grondwaterstandfluctuaties gaan optreden in het veen (groter dan 30 cm) en de grondwaterstand in het veen dan in de zomer te laag is voor de groei van veenmos (Streefkerk & Casparie 1989).

Voorbeelden van waterbalansstudies laten zien dat waterbalansbepalingen zeer sterk uiteenlopen en lastig vertaald kunnen worden naar een schatting van de wegzijging voor het hele gebied (zie o.a. Schouwenaars 1990). Het feit dat waterbalansstudies lastig zijn en zeer diverse uitkomsten geven en het feit dat er een relatie is tussen de wegzijging en de grootte van de oppervlakkige afvoer, roept de vraag op waar het genoemde criterium voor wegzijging vandaan komt. Het vraagt om een nadere onderbouwing van deze vuistregel.

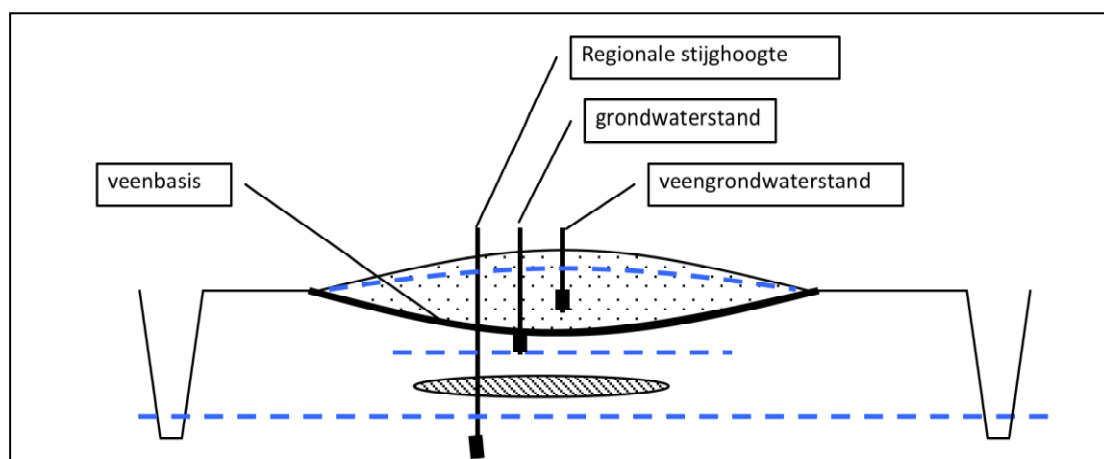
2.2.3 Verlaging van grondwaterstijghoogte en effecten daarvan op de hydrologie van hoogvenen

In veel hoogvenen lag de stijghoogte van het grondwater nog niet zo lang geleden, toen de hoogvenen nog in een redelijke staat van instandhouding verkeerden, vermoedelijk boven de veenbasis. In veel gevallen is de stijghoogte inmiddels gedaald en ligt nu niet zelden tenminste een deel van het jaar beneden de veenbasis. Deze hoogvenen zijn gevoelig voor een stijghoogtedaling van het grondwater, ook wanneer die zich nog boven de veenbasis bevindt, omdat bij gelijkblijvende hydraulische kenmerken van het profiel de wegzijging bij een dergelijke daling toeneemt. Die toename van de wegzijging wordt niet gecompenseerd omdat het hoogveen zelf gevoed wordt door neerslag, zonder substantiële aanvoer uit de omgeving. Het gevolg is dat de veenwaterstand in droge perioden verder zakt, het veen van boven uitdroogt en behoud, herstel of nieuwvorming in gevaar komen.

Overigens moet hierbij worden gemeld dat een daling van de stijghoogte geen *direct* effect hoeft te hebben op de hydrologische eigenschappen van het hoogveen als geheel (Tomassen *et al.*, 2011a). De wegzijging door de veenbasis kan in eerste instantie groter worden, met als gevolg een daling van de gemiddelde veenwaterstanden, maar beide effecten worden verminderd of mogelijk teniet gedaan door de afname van de doorlatendheid van het onderste veen door zetting.

Het probleem van de wegzijging (en daaruit resulterende veranderingen in groeicondities voor veen) is hydrologisch bekend en in beginsel goed door te rekenen, ware het niet dat de hydrologische kenmerken van het profiel meestal onvoldoende bekend zijn (zie o.a. Von Asmuth *et al.* 2012). Het gaat daarbij in de eerste plaats om de ligging, dikte en doorlatendheid van de meest weerstandbiedende, en daardoor meest bepalende laag of lagen, hier als 'de veenbasis' aangeduid.

Het watervoerend pakket onder het veen is daarbij vaak niet homogeen. Zandpakketten onder een hoogveen zijn doorgaans afgezet onder periglaciaire omstandigheden en zijn dan ook heterogeen en gelaagd. Op geringe diepte onder de veenbasis komt vaak keileem voor waardoor de grondwaterstand onder de veenbasis hoger is dan de regionale stijghoogte die onder de weerstandbiedende laag gemeten wordt en die kan worden berekend met modellen. Het fenomeen is ook terug te zien in metingen, bijvoorbeeld in het Huurnerveld (een deel van het Wierdense Veld, Overijssel), waar over een ondiepe beekleemlaag een stijghoogteverschil van enkele decimeters wordt gemeten. Ook onder het Fochteloërveen is onder de veenbasis een met grondwater verzadigde minerale bodem aanwezig, maar dit kan niet als de regionale stijghoogte worden beschouwd. Dat is de stijghoogte van het grondwater, gemeten onder de keileem. Het is dus van belang onderscheid te maken tussen veengrondwaterstand, grondwaterstand en stijghoogte op verschillende diepten (zie figuur 2.5). Vaak is er een beperkte kennis van veenwaterstanden, freatische grondwaterstanden en de stijghoogten, en eventueel toch aanwezige laterale aan- en afvoer boven de veenbasis.

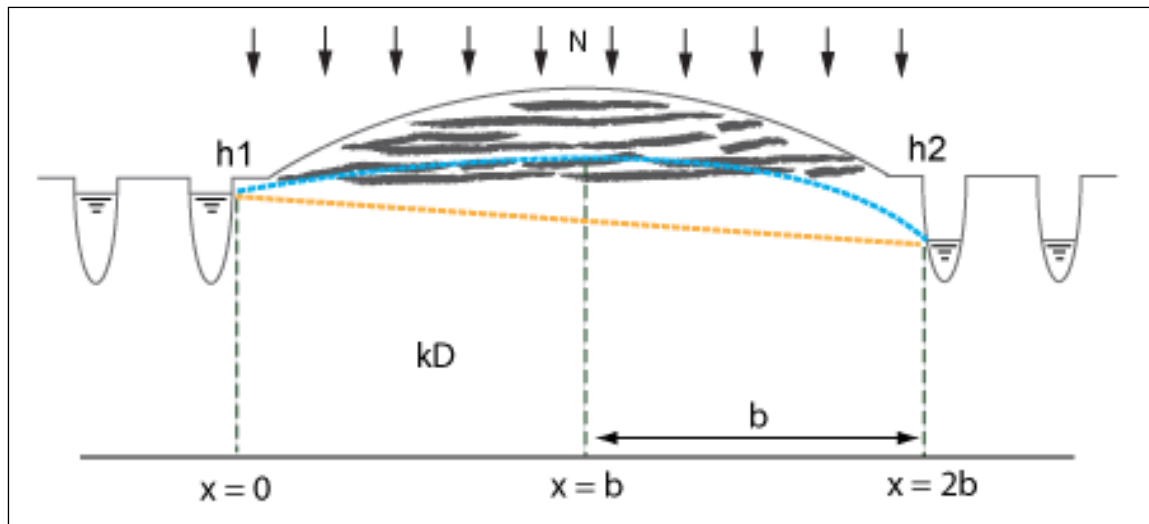


Figuur 2.5: Schematische weergave van (grond)waterstanden in en onder een hoogveen.

Figure 2.5: Schematic representation of (ground)waterlevels in and below a bog.

In hydrologische studies wordt meestal verondersteld, dat zich onder de veenbasis een regionaal grondwatersysteem bevindt, waarvan de stijghoogte kan worden gemeten met een peilbuis onder de veenbasis of berekend met een grondwatermodel. Het niveau van de regionale stijghoogte onder een veengebied wordt in de eerste plaats bepaald door het niveau van de grondwaterstand in de omgeving; deze ligt ongeveer op het niveau van de waterspiegel in de sloten (zie oranje lijn in figuur 2.6). Echter onder het veen kan het regionale grondwater opbollen als gevolg van voeding vanuit het veen naar de ondergrond of door het voorkomen van lokaal onder het veen voorkomende minder doorlatende laagjes. Voordat geconcludeerd wordt dat de stijghoogte onder de veenbasis ligt, is het dus van belang over de juiste peilbuismetingen te beschikken.

De grootte van de opbolling wordt bepaald door de grootte van de voeding, de grootte van het veengebied (de afstand tussen de randen) en het doorlaatvermogen van de ondergrond. Over het algemeen zal de opbolling in de ordegrrootte van centimeters tot decimeters zijn. Deze is ook afhankelijk van de wegzijging. Ver van de randen van het veengebied (d.w.z. onder het centrum van het veen) is de opbolling het grootst.



Figuur 2.6: Verloop van de regionale grondwaterstand onder een hoogveen (oranje lijn: het lineaire verloop tussen de niveaus aan de randen van het veen; in blauw de schematische voorstelling van de opbolling door wegzijging).

Figure 2.6: Course of the regional groundwater table below a bog (orange line: the linear course in between the tables at the edges of the bog; blue line: schematic view of the convex groundwater course due to infiltration).

In veel hoogvenen is de weerstand van de veenbasis zo groot, dat een stijghoogteverlaging, ook tot beneden de veenbasis, volgens bovenstaande berekeningen geen groot effect zou hebben op de wegzijging. Voor zover uit het veenpakket al wegzijging van betekenis optreedt, stroomt die lateraal af boven de weerstandbiedende veenbasis. Van deze situaties wordt nu vaak gesteld dat (niet uitgesloten kan worden dat) een stijghoogteverlaging tot beneden de veenbasis leidt tot een geleidelijke vermindering van de weerstand in de veenbasis ('aantasting van de veenbasis') en daardoor op termijn ook tot een grotere wegzijging. Er zijn bij het deskundigenteam overigens geen gevallen bekend, waar weerstandsvermindering van de veenbasis al eenduidig is vastgesteld.

Een complicerende factor bij het vaststellen van de noodzakelijke stijghoogte is dat in de meeste hoogvenen door de turfwinning en daarmee samenhangende verdroging van bovenaf het weerstandbiedende deel van het veenprofiel dunner is geworden en eventueel zelfs gescheurd is. Dan is de weerstand in het profiel kleiner geworden en zou voor herstel of ontwikkeling van hoogveen wellicht een grotere stijghoogte van het grondwater nodig zijn, dan wanneer het veendek nog onaangetast zou zijn geweest. We beschouwen dit als een bijzonder geval van uitdroging 'van bovenaf', waar eveneens voor geldt dat het met bestaande middelen voldoende beschreven kan worden zodra de relevante hydrologische parameterwaarden bekend zijn.

De bijzondere situatie, dat de stijghoogte onder het veen daalt doordat de voeding vanuit het veenpakket stagneert en dus niet als gevolg van ontwatering van de omgeving van het veen, wordt hier buiten beschouwing gelaten. Dit kan zowel het gevolg zijn van een autonome toename van de weerstand in de veenbasis (bijvoorbeeld door ontwikkeling van een zeer slecht doorlatend veentype), als door oppervlakkige ontwatering van het veen. Het eerste is over de termijn en gebieden, waarin de problematiek speelt, naar alle waarschijnlijkheid verwaarloosbaar en als het tweede aan de orde is, moet in de allereerste plaats de ontwatering aangepakt worden. Beide situaties vallen buiten de huidige kennisvraag.

2.3 De veenbasis

De wegzijging uit een hoogveen moet in ons klimaat gering zijn om te grote fluctuaties in de grondwaterstanden te voorkomen (zie 2.2.2). Die wegzijging hangt af van stijghoogteverschillen tussen het veen en de ondergrond maar ook van de doorlatendheid van het veenpakket en van het direct onderliggende pakket, wat als 'veenbasis' de belangrijkste hydrologische weerstand vormt (zie ook 2.2, o.a. 2.2.1).

We maken onderscheid tussen a) een veenbasis bestaande uit dicht, slecht doorlatend veen of vergelijkbaar organisch materiaal ('organische veenbasis') en b) een veenbasis bestaand uit dichte minerale horizonten ('minerale veenbasis') direct of op geringe diepte onder het veen. Tot de typen veenbasis – organisch of mineraal – waarvoor de onderzoeksvragen relevant zijn, behoren die typen waarbij ontwatering tot beneden de veenbasis effect heeft – op de doorlatendheid en op de in de veenbasis optredende processen, die tot veranderingen in die doorlatendheid kunnen leiden. Dit is niet het geval voor elk type veenbasis, in het bijzonder de minerale typen, zoals hieronder toegelicht zal worden.

Ook voor het beheer en het beleid is het van belang onderscheid te (kunnen) maken tussen de diverse typen veenbasis en hun inherente stabiliteit. Daarom wordt als eerste een overzicht gegeven van de verschillende typen veenbasis en hun kenmerken. Verder is het noodzakelijk de relevante bodemfysische karakteristieken van de verschillende typen veenbasis te kennen: zowel de verticale doorlatendheid en porositeit van de veenbasis, als de dikte van de waterverzadigde zone boven het freatische grondwater in relatie tot de aard van het materiaal in en direct onder de veenbasis.

2.3.1 Typen veenbasis

Zoals hieronder wordt toegelicht moet onderscheid worden gemaakt tussen minerale en organische veenbases op grond van hun grote verschillen in potentiële gevoeligheid voor degradatie.

Organische veenbasis

In veen kunnen om diverse redenen slecht doorlatende en daarmee stagnerende horizonten voorkomen. Hiertoe behoren o.a. de zogenoemde gliedelagen, ontstaan door inspoeling van disperse humus op enige diepte in het veenpakket of in een organische laag op of in de top van het onderliggende zandoppervlak. Hoewel de ontstaanswijze van gliede niet altijd precies bekend is, leidt het ontstaan ervan tot slechte doorlatendheid door verdichting en opvulling van poriën. Nabij de overgang van veen naar zand wordt ook regelmatig dopplriet, een pikzwarte gel van humus uit het bovenliggende veen, aangetroffen, niet zelden als een over grote afstand voorkomende laag.

Ook ruim boven de bovenzijde van de minerale ondergrond kunnen, naast gliedevorming in het veenpakket, belangrijke slechtdoorlatende lagen voorkomen. Een duidelijke catotelm, die verscheidene meters dik kan zijn, kan door de sterke humificatie van het ter plaatse gevormde veenmosveen ook zeer slecht doorlatend zijn. Ten slotte kunnen in het veenpakket platerige veenlaagjes voorkomen, vaak gevormd door waterveenmos

(*Sphagnum cuspidatum*) en veelal maar enkele millimeters tot centimeters dik, die de verticale doorlatendheid zeer sterk beperken.

Venig materiaal verschilt in zijn gedrag bij ontwatering sterk van minerale bodemhorizonten: scheur en krimp, en daarmee gepaard gaande verhoogde doorlatendheid en toetreding van lucht en nutriënten, spelen een belangrijke rol. Het is bovendien niet beschermd tegen deformatiekrachten (bv. door zwaartekracht of gewicht van het bovenliggende materiaal), ook als het materiaal zelf nog niet verdroogd is. Reeds bij beperkte ontwatering is daarom een serieuze aantasting van een 'organische veenbasis' te verwachten als resultaat van scheurvorming en versterkte mineralisatie vanuit het oppervlak. Voor een bespreking van de potentiële effecten van diepere ontwatering en mogelijke afbraak van deze organische veenbasis onder invloed van processen, die direct samenhangen met een daling van de grondwaterstand tot onder deze veenbasis, d.w.z. 'van onderaf', wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Minerale veenbasis

Bij nadere beschouwing van de typen 'minerale veenbasis' kan onderscheid gemaakt worden tussen een tweetal hoofdtypen:

1. die waarbij stagnatie is opgetreden door accumulatie van organische verbindingen/stoffen
2. die waarbij sprake is van stagnatie door verkitting met ijzer (bijv. placic horizon, McKeague & Wang 1980; Kaczorek *et al.* 2004) dan wel van een door de textuur bepaalde stagnatie (bijv. Brabantse leem of een kleiige meerbodem aan de basis van het veen).

Overigens hoeft de minerale veenbasis niet per se slecht doorlatend te zijn, aangezien hoogveenvorming volgend op een initieel topografisch bepaalde veenvorming, die op termijn overgaat in hoogveen, ook kan plaatsvinden bij afwezigheid van een dergelijke ondoorlatende minerale laag. Dit leidt tot een onderscheid in typen 'minerale veenbasis' als genoemd in figuur 2.7.

Typen veenbasis	
- Organisch	
o Veen	
o Verdichte veenlagen (dopleriet of gliede)	
- Mineraal	
o Type 1: Stagnerende klei- of leemlaag (Brabant leem, keileem, etc.)	
o Type 2: Stagnerende placic horizon	
o Type 3: Stagnerende podzol B horizont	
o Type 4: Stagnerende waterhard laag	
o Type 5: Niet of zwak stagnerende bodem/lagen	

Figuur 2.7: Typen veenbasis.

Figure 2.7: Types of bog footings.

De minerale typen 1 en 2, die stagnatie veroorzaken zijn feitelijk niet gevoelig voor effecten van ontwatering en/of vernatting, d.w.z. niet op een voor het natuurbeheer en – beleid relevante tijdschaal, en kunnen daarmee buiten beschouwing worden gelaten bij de beoordeling van de potentiële effecten van verdroging op de 'veenbasis'. Voor het beoordelen van de mogelijke effecten van ontwatering in specifieke situaties is een onderscheid tussen deze typen echter wel van belang.

Verdichte minerale horizonten, waarvan de verdichting het gevolg is van *accumulatie van organische stof*, kunnen bodemhorizonten zijn van 'verdrongen' profielen of met ingespoelde organische stof verkit moedermateriaal. Bodems met een verdichte minerale bodemhorizont (type 3) behoren tot de podzolen die onder hydromorfe omstandigheden gevormd zijn/worden (De Bakker en Schelling 1989; zie ook Buurman & Jongmans 2005). Zij kunnen ontstaan onder uiteenlopende omstandigheden:

- Door podzolering onder initieel *natte* omstandigheden, leidend tot de vorming hydromorfe podzolen met dichte Bh horizont (spodic B) waarop stagnatie en vervolgens veenvorming optreedt.
- Ook kan een van oorsprong onder relatief droge omstandigheden gevormde podzol door stijging van de grondwaterspiegel vernatten, gepaard gaande met verdichting van de Bh horizont en ontijzing, eveneens gevolgd door veenvorming.
- Door podzolering die initieel optreedt onder relatief *droge* omstandigheden, maar waarbij onder invloed van een door humusinspoeling steeds slechtdoorlatender wordende podzol B horizont geleidelijk stagnatie optreedt met na verloop van tijd vorming van een hydromorfe, dichte Bh horizont, gevolgd door veenvorming. In deze situatie zal veelal sprake zijn van hangwatervennen, waarbij mogelijk initieel ook stagnatie op een placic of dichte Bhs horizont is opgetreden, maar geen placic en/of Bhs meer wordt gevonden.

Niet altijd is duidelijk wat de precieze ontstaanswijze van deze verdichte minerale bodemhorizonten (type 3) is; in veel gevallen is de genese complex. Ook latere inspoeling van 'waterhard' kan bijvoorbeeld bijgedragen hebben tot de verdichting. Kenmerkend blijft echter het voorkomen van een dichte humeuze, ontijzerde Bh horizont.

Het laatste type verdichte laag (type 4) staat bekend als 'waterhard' en kan op vrij willekeurige diepte in de minerale ondergrond voorkomen (zie Koopman 1986, 1988 en Dekker *et al.* 1991). Waterhard onderscheidt zich hiermee van podzolhorizonten, als zijnde niet gekoppeld aan een specifieke pedogenetische horizont. Het gaat namelijk om ingespoelde disperse organische stof, die afkomstig is uit het bovenliggende veenpakket en de eventueel aanwezige podzolbodem, en soms aantoonbaar jonger is dan het begin van de veengroei.

Veeenvorming zal ook kunnen optreden onder invloed van waterstagnatie in topografische laagten, waarbij weliswaar ook hydromorfe podzolbodems gevormd werden, maar niet per se een stagnerende inspoelingshorizont ontstond (type 5). Een dergelijke situatie zal bijvoorbeeld kunnen optreden bij keizand over keileem in depressies op het Drentse plateau, waarbij in het grofzandige keizand geen stagnerende inspoelingshorizont gevormd hoeft te zijn. Ontwatering van dergelijke systemen zal tot versnelde veenafbraak via verhoogde mineralisatie leiden, waarbij veranderingen in de veenbasis echter niet leiden tot een verandering in de hydrologie van het systeem. De processen die hier optreden zijn ruimschoots bestudeerd in het kader van de effecten van drainage/ontwatering van veen.

2.3.2 Bodemfysische kenmerken van de veenbasis

Bij beantwoording van de vraag in hoeverre een lagere regionale stijghoogte leidt tot toename van de wegzijging van water uit het veenpakket is vooral de *verticale doorlatendheid* van het profiel van belang. Ook als de regionale stijghoogte gedaald is tot onder de veenbasis, kan het profiel nog vrijwel volledig verzadigd zijn als gevolg van

capillaire opstijging vanuit het grondwater. Hierdoor wordt aeratie en aerobe afbraak van de veenbasis voorkomen. Overigens speelt hierbij ook de *porositeit* een belangrijke rol, daar de mobiliteit van micro-organismen en daarmee de microbiële activiteit sterk afhankelijk is van het voorkomen van grotere poriën (zie ook 4.1.2 en 4.1.3).

Voor de bodemfysische karakteristieken is gekeken naar waarden voor de dikte van de *verzadigde zone* (z) volgens de Staringreeks (Wösten *et al.* 2001) en naar de verticale *doorlatendheid* (K_{sat}) volgens BOFEK2012 en de Staringreeks. Verder is gekeken naar de *poriënverdeling*. Tot slot worden nog enige opmerkingen gemaakt over de *kritieke z-afstand* (Z_{95}).

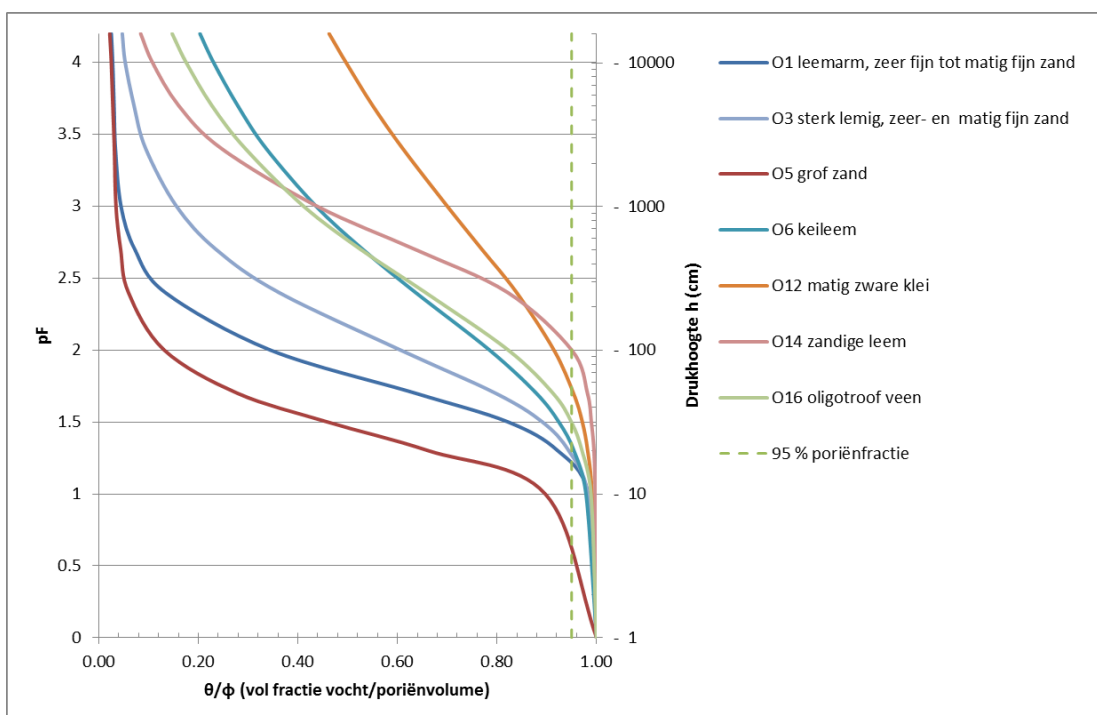
In BOFEK2012 zijn 315 bodemeenheden van de Bodemkaart van Nederland bodemfysisch geschematiseerd met bouwstenen van de Staringreeks en vervolgens gedclusterd tot 72 functioneel vergelijkbare eenheden. Hiervan is een GIS bestand beschikbaar dat gebaseerd is op de Bodemkaart van Nederland (schaal 1:50 000). Het is daarom goed bruikbaar voor beschrijving van gebieden. Het betreft algemene schematisaties en de waarden voor specifieke lagen kunnen daarvan afwijken. Een belangrijke oorzaak van afwijkingen is hier dat de genoemde bronnen in beginsel steeds de bovenste 1,2 m van het bodemprofiel in aanmerking nemen, waarin zich meestal een freatische grondwaterspiegel beweegt, terwijl de veenbasis in niet ontgonnen gebieden vaak dieper ligt en het grondwater hierin niet freatisch hoeft te zijn. Daarom is in de literatuur ook naar meer specifieke waarden gezocht, die worden vermeld in de beschrijving van specifieke typen veenbasis (zie 3.3).

De hoogte tot waarop de poriën in de onverzadigde zone zijn gevuld met water (z) kan worden ingeschat op basis van de vocht karakteristieken. In figuur 2.8 zijn de pF-curven (de zuigspanning oftewel de kracht waarmee het water in de bodem wordt vastgehouden) uitgezet voor een aantal ondergrond bouwstenen uit de Staringreeks (Wösten *et al.* 2001). Deze figuur laat zien hoe in verschillende grondsoorten de verzadigingsgraad afneemt naarmate de hoogte boven de grondwaterspiegel groter is. Ook hier is de voorstelling die van een kolom met een freatische grondwaterspiegel. Hierbij is op de horizontale as de vochtfractie θ uitgezet als aandeel van het poriënvolume ϕ (relatieve verzadiging). De linker verticale as geeft de pF waarde, de rechter verticale as de bijbehorende drukhoogte. Deze drukhoogte is negatief en omgekeerd evenredig met de hoogte boven het freatisch grondwaterniveau. Hieruit blijkt dat het vochtgehalte in grof zand (O5) al bij een geringe drukhoogte sterk afneemt en bij pF 1.5 de poriën op 31 cm boven het grondwaterniveau voor de helft met lucht gevuld zijn. Zandige leem (O14) blijft veel langer verzadigd met water en is bij pF 3 nog voor de helft verzadigd op 10 m boven het grondwaterniveau. Bij matig zware klei (O12) verloopt het gehele traject veel steiler.

De hoogte tot waarop de poriën in de onverzadigde zone zijn gevuld met water (z) nemen we hier als maat voor de geschatte diepte tot waar het grondwater onder de veenbasis kan dalen zonder dat de veenbasis bedreigd wordt door mogelijk versnelde aerobe microbiële afbraak vanwege de aanwezigheid van met lucht gevulde poriën. Deze dikte is hier gedefinieerd als de hoogte boven het freatisch grondwater waar 95% van het poriënvolume zou zijn gevuld met vocht (Z_{95}) indien het een freatische kolom van dezelfde grondsoort was. De Z_{95} waarde, wordt ook wel de *kritieke z-afstand* genoemd, d.w.z. de diepte tot waar de grondwaterspiegel kan zakken onder de wortelzone, terwijl bij een vochtspanning van pF 4.2 (verwelkingspunt) aan de onderzijde van de wortelzone een capillaire opstijging met een zekere flux (bijvoorbeeld 2 mm per dag) mogelijk blijft.

Op basis van de vocht karakteristieken van de Staringreeks is de Z_{95} waarde (tabel 2.1) berekend door interpolatie van de stijghoogten tussen twee waarden waarbij de relatieve verzadiging juist hoger en lager is dan 95%. De poriënfraction is afgeleid van het

vochtgehalte θ bij volledige verzadiging ($pF = 0$). In figuur 2.8 is de waarde Z-95 aangegeven met een groene, verticale streepjeslijn. Voor de afgebeelde grondsoorten loopt deze dikte dus uiteen van ca. 3 tot ca. 100 cm.



Figuur 2.8: pF-curven voor een aantal ondergrondbouwstenen uit de Staringreeks (Wösten et al. 2001), waarbij de vochtfractie Theta is uitgedrukt als fractie van de poriënfractie Phi (relatieve verzadiging S_e). Hiermee wordt bepaald welk deel van de poriën gevuld is met vocht en welk deel met lucht.

Figure 2.8: pF-curves of some subsurface units from the "Staringreeks" (Wösten et al. 2001), in which the moisture part Theta is depicted as part of the pore portion Phi (relative saturation S_e). Thus, the part of the pores which is occupied by moisture and by air is being determined.

De Z95 maat wordt normaal gebruikt om een indruk te krijgen van de mogelijke opwaartse (water)flux tussen het grondwater en de wortelzone. Analoog aan deze benadering gebruiken we deze nu als maat voor de opwaartse flux tussen het freatische grondwater en de veenbasis. Wij wijzen er nadrukkelijk op dat deze parameter niet geschikt is als kritische maat voor de diepte tot waarop het freatisch grondwaterniveau kan dalen zonder dat schade aan de veenbasis optreedt als gevolg van uitdroging en daardoor op gang gebrachte processen. Ze is wel geschikt voor de vergelijking van de gevoeligheid voor verdroging van de diverse bodems.

In tabel 2.1 worden naast de Z95 ook gegevens gepresenteerd over de verticale verzadigde doorlatendheid (K_{sat})⁴. De vocht karakteristieken van de Staringreeks zijn

⁴ Deze K_{sat} is onder hydrologen bekend als de k (doorlatendheid). Deze doorlatendheid is afhankelijk van de grondsoort en korrelgrootte. De onverzadigde doorlatendheid is bij droogval van de veenbasis ook een belangrijke maat. Deze is afhankelijk van de verzadigde doorlatendheid, de poriënverdeling in de grond en het vochtgehalte. Dit wordt beschreven door de doorlaat karakteristiek van de grond waarbij de doorlatendheid sterk kan afnemen bij een dalend vochtgehalte. Hier wordt verder niet op ingegaan in de tabel.

echter gebaseerd op gemiddelde waarden van een groot aantal monsters, waarin een meer of minder grote spreiding kan voorkomen. In het begeleidend rapport (Wösten *et al.* 2012) wordt bijvoorbeeld aangegeven dat de gemiddelde verzadigde doorlatendheid voor keileem (O6) in de Staringreeks mogelijk overschat is vanwege de vrij grote variatie in meetwaarden; enkele hoge waarden in wat zandige keileem hebben bij de middeling met lage waarden een relatief grote invloed.

Bouwsteen	ϕ	Z95	Ks	Equivalente poriënverdeling				
	cm ³ /cm ³	cm	cm/d	> 100 μm	30-100 μm	5-30 μm	0.2 - 5 μm	<0.2 μm
O1 leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	0.36	15	15.22	0.178	0.478	0.278	0.042	0.025
O2 zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	0.38	15	12.68	0.155	0.374	0.328	0.088	0.055
O3 sterk lemig, zeer en matig fijn zand	0.34	18	10.87	0.109	0.285	0.386	0.172	0.047
O4 zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	0.35	20	9.86	0.091	0.211	0.362	0.252	0.083
O5 grof zand	0.32	5	25.00	0.541	0.328	0.089	0.020	0.022
O6 keileem	0.33	22	33.92	0.076	0.139	0.273	0.308	0.203
O7 beekleem	0.51	44	39.10	0.035	0.065	0.161	0.280	0.459
O8 zeer lichte zavel	0.47	24	9.08	0.068	0.140	0.303	0.329	0.160
O9 matig lichte zavel	0.46	33	2.23	0.046	0.124	0.333	0.363	0.135
O10 zware zavel	0.48	39	2.12	0.040	0.088	0.236	0.350	0.288
O11 lichte klei	0.42	28	13.79	0.055	0.083	0.173	0.270	0.419
O12 matig zware klei	0.56	55	1.02	0.029	0.057	0.159	0.293	0.463
O13 zeer zware klei	0.57	47	4.37	0.035	0.051	0.109	0.198	0.607
O14 zandige leem	0.38	100	1.51	0.010	0.039	0.354	0.512	0.084
O15 siltige leem	0.41	49	3.70	0.029	0.076	0.251	0.381	0.263
O16 oligotroof veen	0.89	31	1.07	0.051	0.127	0.320	0.356	0.147
O17 mesotroof en eutroof veen	0.86	29	2.93	0.053	0.109	0.258	0.338	0.242
O18 moerige tussenlaag	0.57	25	34.45	0.065	0.135	0.285	0.326	0.189

Tabel 2.1: Poriënvolume ϕ (Phi) en dikte verzadigde zone (Z95), verzadigde doorlatendheid (Ks of Ksat) en equivalente poriënverdeling voor de ondergrondbouwstenen van de Staringreeks. Macroporiën > 100 μm, mesoporiën 30 – 100 μm en microporiën < 30 μm. Poriën < 5 μm zijn niet toegankelijk voor micro-organismen.

Table 2.1: Pore volume ϕ (Phi) and thickness of the unsaturated zone (Z95), saturated permeability (Ks of Ksat) and equivalent pore distribution for the subsurface units of the "Staringreeks". Macro pores > 100 μm, meso pores 30 – 100 μm and micro pores < 30 μm. Pores < 5 μm are impassible to micro-organism.

Het is verder niet zeker of deze ondergronden net zo reageren wanneer zij onder veen voorkomen, als wanneer zij in een 'open' (freatisch) profiel voorkomen. De toetreding van lucht zal onder veen waarschijnlijk langzamer verlopen dan zonder deze afdichtende laag. Ook wordt in deze ondergronden geen rekening gehouden met verschillen in organische stofgehalte en organische stof- of ijzerinspoeling. Daarom zullen voor sommige typen veenbasis de bodemfysische kenmerken sterk kunnen afwijken, bijvoorbeeld bij oerbanken en placic horizonten of bij typen waar ingespoelde organische stof een rol speelt. Voor dergelijke bodems en voor slecht doorlatende veentypen gelden naar alle waarschijnlijkheid aanzienlijk lagere Ksat waarden, die in ieder geval kunnen teruglopen tot < 0.1 cm/d. Systematische gegevens over de Ksat van placic horizonten en veen zijn echter niet beschikbaar.

In veengronden moet ook rekening gehouden worden met een vaak groot verschil in verticale en horizontale doorlatendheid (verticaal kleiner dan horizontaal), de invloed van belasting door bovenliggend materiaal en een verkleining van de doorlatendheid door de aanwezigheid van gasbelletjes (methaan). Verder zijn de in tabel 2.1 gegeven waarden voor de drie typen veen (O16 t/m O18) mogelijk wel representatief voor veen in de

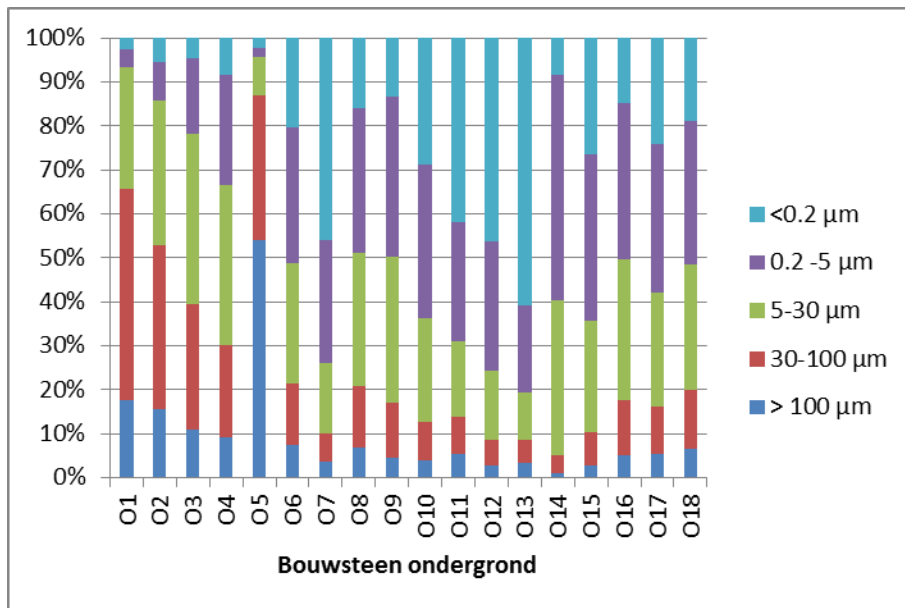
bovenste meter van landbouwgronden, maar is het zeer de vraag of deze ook gelden voor niet of vrijwel onverweerd veen in de ondergrond. Bovendien kan het type veen in de veenbasis sterk afwijken van dat meer bovenin het profiel.

Het poriënvolume ϕ van de verschillende zandbouwstenen (O1 t/m O5) is van dezelfde orde van grootte (0.32 – 0.38) maar de dimensies van de poriën zullen sterk verschillen tussen bijvoorbeeld zeer sterk lemig zand en grof zand. Deze *poriënverdeling* is vooral van belang voor de afbraak van organische stof in de bodemmatrix (zie 4.1.2), omdat het transport van vocht en gassen, en de mogelijkheid voor bacteriën om in poriën door te dringen afhankelijk is van dimensies van de poriën. Bij een relatief groot aandeel poriën $< 5 \mu\text{m}$ wordt de afbraak sterk geremd (zie ook 4.1.3).

In de bodemkunde wordt de grens tussen micro- en mesoporiën bij $30 \mu\text{m}$ gelegd (De Bakker 1990). Uitgaande van de relatie tussen de vocht karakteristiek van een grond en de verdeling van de poriën, komt de microporositeit overeen met het vochtgehalte bij drukhoogte $h = -100 \text{ cm}$ ($pF = 2$). De kleinste microporiën ($< 0.2 \mu\text{m}$) komen overeen met $h = -16,000$ ($pF = 4.2$). Uit figuur 2.8 valt op te maken dat het vochtgehalte bij respectievelijk $pF = 2.0$ en $pF = 4.2$ en de bijbehorende poriënfracties ($< 30 \mu\text{m}$ en $< 0.2 \mu\text{m}$) sterk uiteenlopen voor de verschillende typen bodemmateriaal (de bouwstenen). Hieruit valt echter niet direct op te maken wat het aandeel is van poriën $< 5 \mu\text{m}$. Dat zal ergens tussen deze waarden liggen.

Een benadering kan gegeven worden door het berekenen van de capillaire stijghoogte Z_c in een capillair met diameter $d_c = 5 \mu\text{m}$ (Bouma en Locher 1990). Op basis hiervan kan gesteld worden dat de negatieve drukhoogte $-h$ bij een equivalente poriëndiameter d_e van $5 \mu\text{m}$ gelijk is aan 600 cm . Met andere woorden, het vochtgehalte bij $pF 2.78$ komt overeen met de poriënfractie $< 5 \mu\text{m}$ in cm^3/cm^3 . Dit is uiteraard niet anders dan een benadering van de werkelijkheid, maar het werkelijke aandeel van deze microporiën is moeilijk vast te stellen.

In tabel 2.1 zijn de equivalente *poriënverdelingen* aangegeven. Deze kunnen sterk verschillen tussen de verschillende bouwstenen (zie ook figuur 2.9). Zoals verwacht mag worden heeft grof zand (O5) een zeer groot aandeel macroporiën ($> 100 \mu\text{m}$) en een verwaarloosbaar aandeel van de kleinste microporiën ($< 5 \mu\text{m}$). Hier zal de doorlatendheid voor water en gassen zeer groot zijn en zijn slechts weinig poriën niet bereikbaar voor micro-organismen. Bij de overige zanden neemt het aandeel microporiën toe met het leemgehalte. Zeer hoge aandelen van de kleinste microporiën ($> 70\%$) worden gevonden voor beekleem (O7) en zware kleien (O12 en O13). Met name bij de fijne zanden (O1 t/m O4) kan opvulling van de mesoporiën en de grotere microporiën ($> 30 \mu\text{m}$) met ingespoeld materiaal (amorphe organische stof, lutum of ijzerhydroxiden) de poriëngrootteverdeling sterk doen veranderen en daarmee de verticale doorlatendheid voor water en aeratie bij diepe grondwaterstand.



Figuur 2.9: Equivalente poriëngrootteverdeling voor ondergrondbouwstenen van de Staringreeks.

Figure 2.9: Equivalent pore distribution for the subsurface units of the "Staringreeks".

3 De Nederlandse hoogveengebieden en hun bodemkundig-hydrologische situering

3.1 Geografische verspreiding en algemene karakterisering

In figuur 3.1 staat de huidige verbreiding van hoogveenrestanten in Nederland. Het versnipperde karakter en de beperkte omvang zijn duidelijk zichtbaar.

Aan het beheertype N06.03 (Hoogveen) zijn de daaraan nauw verwante beheertypen N06.04 (Vochtige heide) en N06.06 (Zuur ven of hoogveenven) toegevoegd om daarmee een volledig beeld te hebben van hun huidige voorkomen en verwante ecosystemen.

Op basis van figuur 3.1 is per gebied nagegaan welk type veenbasis kan worden aangetroffen, alsmede welke andere relevante kenmerken het gebied heeft (zie de tabel in bijlage 1). Hierbij is gebruik gemaakt van:

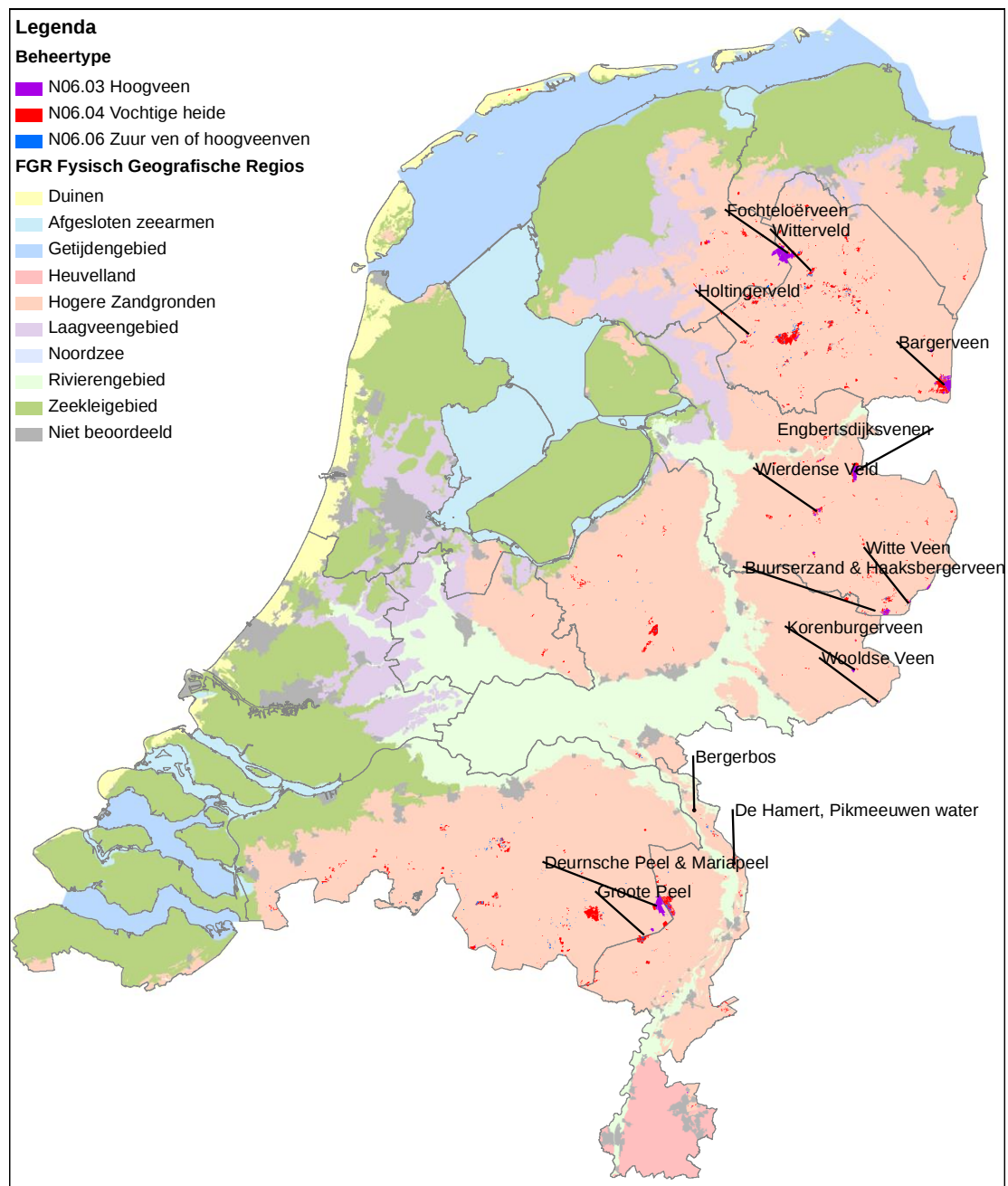
- De Bodemkaart van Nederland;
- BOFEK2012, de bodemfysische schematisatie van Nederland (Wösten *et al.* 2012);
- Ligging van de bovenzijde en de dikte van relevante afzettingen in Dino.

In bijlage 1 zijn ook systemen met hangwaterprofielen opgenomen omdat hierdoor de betekenis van de verschillende typen veenbasis verduidelijkt wordt. Een deel van de in de tabel gepresenteerde gegevens is meer of minder tentatief en gebaseerd op 'expert knowledge'. Dat komt doordat maar weinig systematische geohydrologische en bodemkundige onderzoeksgegevens van de resterende hoogveen-ecosystemen zelf beschikbaar zijn. Vooral van de hydrologische kenmerken zijn weinig bronnen met kwantitatieve gegevens bekend. Voor het overige komen de gegevens uit diverse literatuur, vooral Van Tooren *et al.* (2010).

De tabel brengt in beeld bij welke hoogvenen een onverzadigde zone onder de veenbasis voorkomt. Het gaat om het Bargerveen, het Wierdense veld, de Engbertsdijksvennen en het Holtingerveld.

3.2 Hydrologie van de hoogveengebieden

Alle grote veengebieden in Nederland hebben delen met een dun restveenpakket, dat al dan niet van boven droogvalt, en op slechts enkele locaties een wat meer intact veenpakket. Vaak reikt de stijghoogte van het regionale grondwater niet (langer) tot boven de veenbasis, maar zakt diep weg, met name in de zomer. De wegzijging uit het veen, die de seizoensfluctuaties in veenwaterstand versterkt, is afhankelijk van de verticale weerstand van het veen, de veenwaterstand en van het stijghoogteverschil over de veenbasis.



Figuur 3.1: Ligging van de Nederlandse hoogveengebieden en aan hoogveen verwante beheertypen (vochtige heiden, zuur ven en hoogveenven) binnen de fysisch geografische regio's (Bron: Bas van Delft).

Figure 3.1: Distribution of the Dutch bogs and to bog relative management types (wet heathlands, acid pools and moorland pools) within physico-geographical regions.

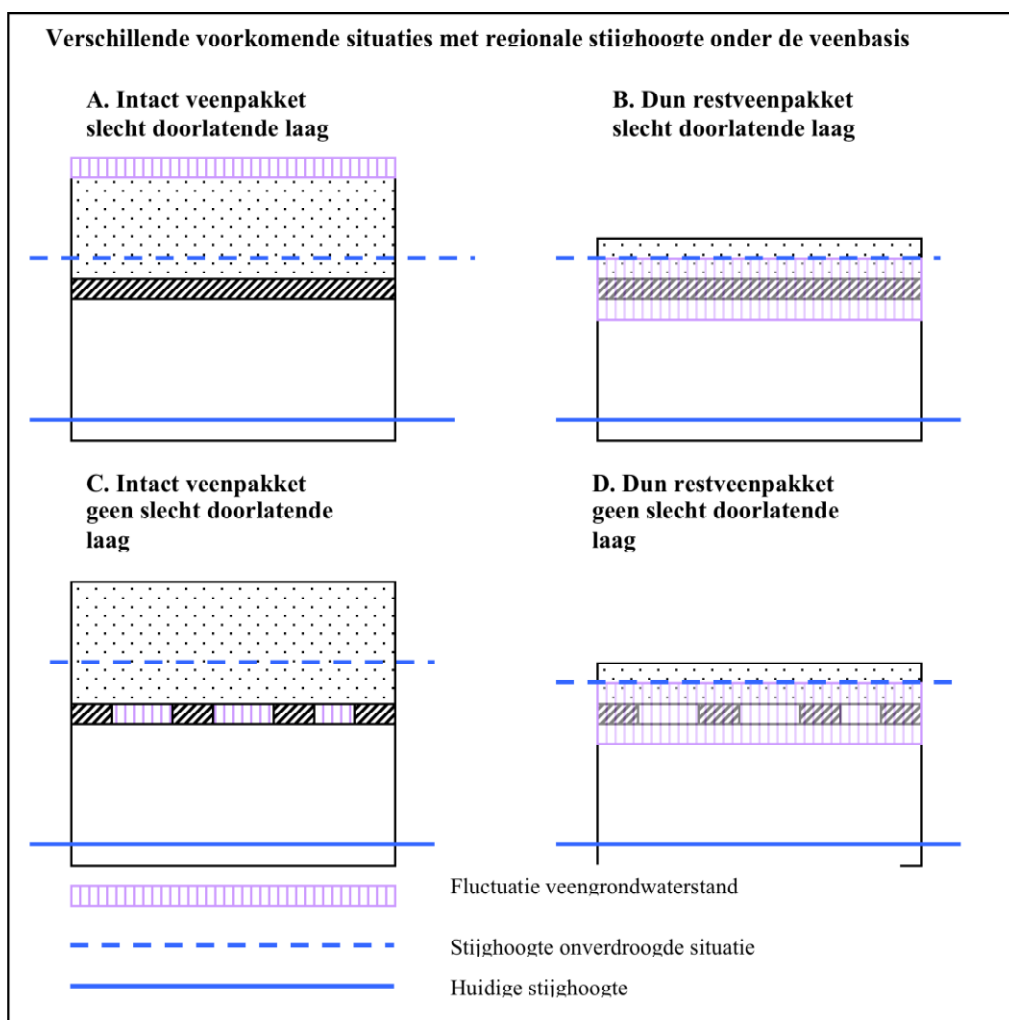
We onderscheiden (zie figuur 3.2) vier verschillende hydrologische situaties met gedaalde regionale stijghoogte, waarmee een meer systematisch beeld gegeven kan worden van de verschillende situaties die in de Nederlandse hoogvenen bestaan.

De vier schema's in figuur 3.2, beschrijven elk een situatie waarin de stijghoogte van de regionale grondwaterstand is gedaald tot onder de veenbasis. A en B beschrijven een veen

met een veenbasis die nog veel weerstand heeft, C en D geven situaties waarin die weerstand er niet meer is, bijvoorbeeld door afbraakprocessen in de veenbasis.

A. Intact veenpakket met slecht doorlatende laag

In deze situatie met een slecht doorlatende veenbasis met veel weerstand is er hydrologisch gezien thans geen probleem, omdat de wegzijging naar de ondergrond klein blijft, ook bij een diepe regionale grondwaterstand. Deze situatie zal zich voordoen als het veenpakket zelf veel weerstand biedt of als onder het veenpakket op geringe diepte minerale weerstandbiedende lagen aanwezig zijn (beekleem of keileem), bijvoorbeeld in Drentse heideveentjes of in hoogvenen op het Oost-Nederlands Plateau. Ook delen van de Engbertsdijksvennen behoren waarschijnlijk tot dit type (Jansen et al. 2013b). Er zou een probleem kunnen ontstaan als de weerstand in de veenbasis door uitdroging van onderaf kleiner zou worden, waardoor de wegzijging kan toenemen.



Figuur 3.2: Verschillende situaties met regionale stijghoogte onder de veenbasis.

Figure 3.2: Different situations with regional hydraulic head below the bog footing.

B. Dun restveenpakket op een slecht doorlatende laag

In deze situatie wordt hoogveenontwikkeling beperkt door het droogvallen van de veenlaag. Droogvallen kan een gevolg zijn van een te grote zijdelingse afwatering, bijvoorbeeld door interne ontwatering in het veen. Als die er niet (meer) is lijkt een te grote wegzijging naar de ondergrond de enig mogelijke oorzaak bij de gegeven aard en dikte van het restveenpakket en open waterberging. In dat geval kan de veenwaterspiegel ook onder de veenbasis zakken. Een voorbeeld is misschien het Huurnerveld (Wierdense Veld). Hier zijn in de afgelopen jaren maatregelen genomen om de laterale afstroming te beperken, echter veenputten vallen in de zomer nog steeds droog. Hier kan daarom sprake van te grote wegzijging naar de ondergrond.

C. Intact veenpakket geen slecht doorlatende laag

Er is een dik veenpakket, maar de grondwaterstand in het veen fluctueert sterk ($> 30 - 40$ cm). Dat duidt op een te groot waterverlies. De oorzaak voor de grote grondwaterstandfluctuatie in het veen kan de kleine bergingscoëfficiënt in het oude veenpakket zijn en/of een hogere verdamping door een vegetatiereactie (toename van bos of Pijpenstrootje). Grote grondwaterstandsschommelingen kunnen echter ook samenhangen met een groot lateraal waterverlies (naar de omgeving) of met een versterkte wegzijging (naar de ondergrond). Dan is het belangrijk zeker te weten dat lateraal waterverlies de belangrijkste oorzaak is van de grote fluctuaties in het veen. Toename van de wegzijging hoeft dus niet de hoofdoorzaak te zijn, maar kan wel voor een verschuiving in de waterhuishouding zorgen, die zelf weer leidt tot vegetatieveranderingen en daardoor meer verdamping. Lateraal waterverlies is vrij eenvoudig te verminderen door interne antiverdrogingsmaatregelen, bufferzones of door damwanden aan de rand van het veen. Verlies naar de ondergrond is veel moeilijker te verminderen. Dat kan alleen door het stijghoogteverschil met de regionale grondwaterstand kleiner te maken, dus door verhoging van de regionale grondwaterstand. Wanneer een slecht doorlatende veenbasis ontbreekt, is er vanzelfsprekend geen probleem met mogelijke aantasting van de veenbasis door verdroging van onderaf.

D. Dun restveenpakket, geen slecht doorlatende laag

In deze situatie is een veen met een dun restveenpakket verdroogd (bijvoorbeeld door ontwatering in de omgeving), waardoor de veenwaterstand wegzakt tot onder de veenbasis. Dat betekent dat ook de regionale stijghoogte sterk is verlaagd. Er treedt afbraak van veen op, maar dan vooral 'van bovenaf' waardoor de al beperkte weerstand sterk afneemt. Deze situatie doet zich voor in randen van hoogvenen, bijvoorbeeld de Engbertsdijksvenen en het Wierdense veld, en in hoogveendelen die diep zijn verveend, zoals het Amsterdamse Veld in het Bargerveen. Stijghoogtedaling is hier ongunstig omdat de verticale weerstand van het veen en van de veenbasis klein is.

Tot slot enige opmerkingen:

- Of er inderdaad in deze situaties een onverzadigde zone in de ondergrond optreedt waarbij sprake is van (ten dele) met lucht gevulde poriën, is onbekend en is een wezenlijke onderzoeksvraag.
- De absolute waarde van de wegzijging is waarschijnlijk minder van belang, het gaat om de fluctuatie van de veenwaterstand en de gevolgen die dit heeft voor de diepte van de doorwortelbare zone. Pijpenstrootje kan hier snel op reageren en vervolgens door water uit het veen te onttrekken de situatie voor hoogveenvorming nog ongunstiger maken. Een kleine verandering kan zo ook tot een verschuiving in de concurrentieverhoudingen tussen planten leiden, die de groei van (meer verdampende) vaatplanten stimuleert. Een toename van de wegzijging kan aldus een omslagpunt veroorzaken. De toename van atmosferische stikstofdepositie heeft de

condities voor vaatplanten begunstigd en vergroot zodoende wellicht de gevoeligheid voor wegzijgingstoename.

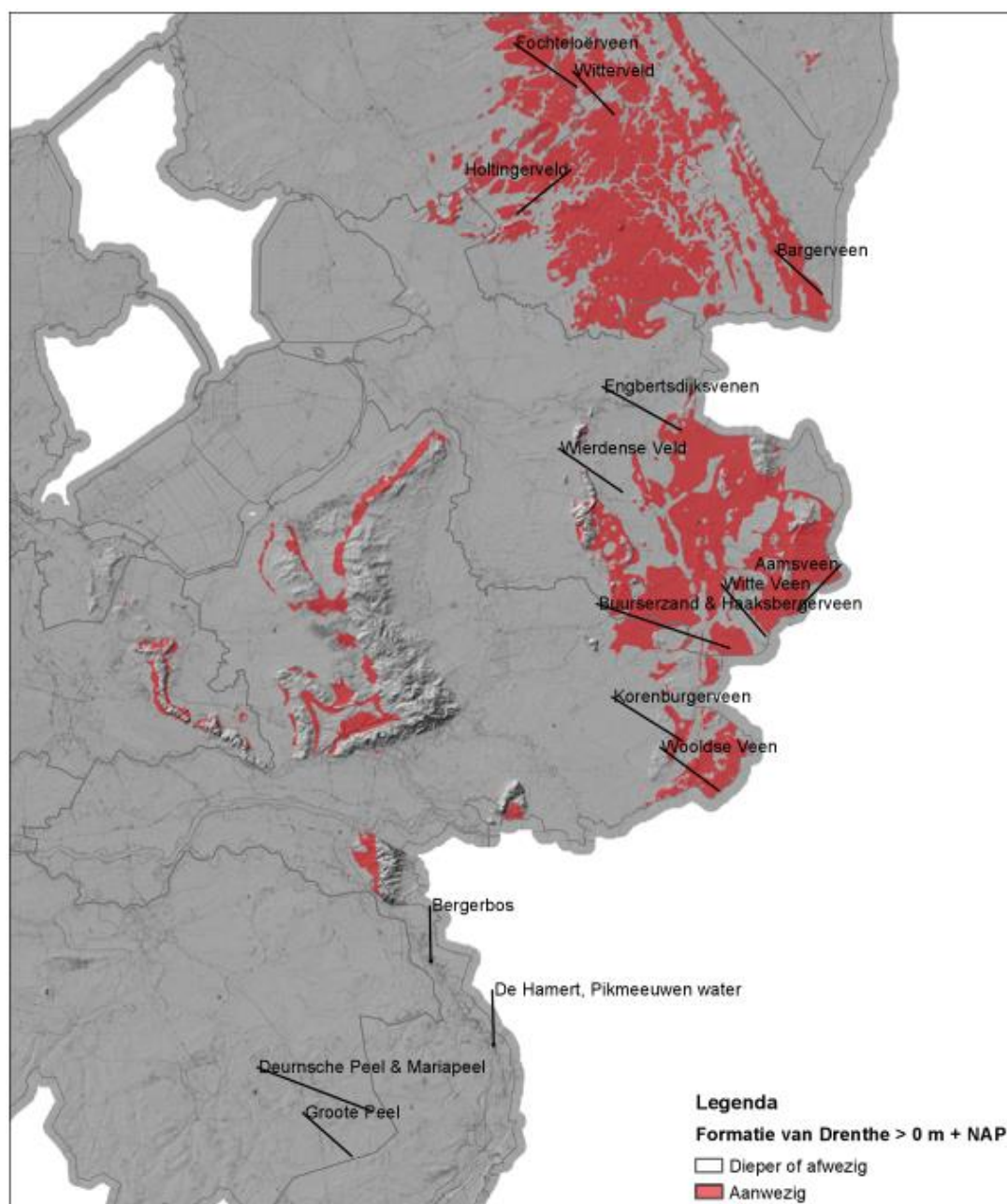
- De positie van de veenwaterstand in het veenprofiel is van invloed op de amplitude (de grootte van de fluctuatie) van de veenwaterstand: ligt die ondiep dan is de amplitude kleiner vanwege de (veel) grotere bergingscoëfficiënt (bijvoorbeeld berging in maaivelddepressies).

3.3 De veenbasis van de Nederlandse hoogvenen

Voor de verschillende stagnerende minerale ondergronden worden hieronder de belangrijke kenmerken en voorkomens besproken op basis van karteringsgegevens van bodem en ondergrond. Van de hoogveenecosystemen zelf zijn weinig gegevens voorhanden. Daarnaast wordt ook enige aandacht besteed aan de niet-stagnerende minerale ondergronden, omdat deze van belang zijn voor de reactie op verlaging van de grondwaterspiegel.

3.3.1 Venen met stagnerende klei- of leemlaag (type 1)

Zandpakketten onder het veen zijn vaak heterogeen; ze kunnen (beek)leemlagen bevatten. Ook komen venen voor op keileem of tertiaire klei (zie bijlage 1). Hierop kan permanent of tijdelijk grondwater stagneren waardoor ondanks een diepere regionale stijghoogte toch (periodiek) verzadigde omstandigheden optreden. Dit kan optreden bij leemlagen met een vrij beperkte weerstand. Dergelijke lemige tot kleiige lagen kunnen ook voorkomen als lössleem (Zuid-Nederland), oude rivierklei en beekleem. Soms komt aan de basis van het hoogveen, op de overgang naar de minerale ondergrond, een kleiige meerbodemaafzetting voor (venige klei).



Figuur 3.3: Het voorkomen van de Formatie van Drenthe boven NAP volgens Digitaal Geologisch Model versie 1.3.

Figure 3.3: The distribution of the Drenthe Formation above sea level according to Digitaal Geologisch Model version 1.3.

Keileem behoort tot de Formatie van Drenthe. Waar keileem in de ondiepe ondergrond voorkomt kan stagnatie van oppervlaktewater en veenvorming optreden, afhankelijk van de textuur en structuur van het pakket. De textuur en structuur van keileem kunnen echter sterk variëren, soms over korte afstand (Vernes *et al.* 2013). Ook potklei is slecht doorlatend en kan voor stagnatie zorgen. Of deze afzetting onder hoogveen voorkomt, is uit de huidige gegevens niet goed af te leiden.

In figuur 3.3 is de verbreiding van de Formatie van Drenthe boven NAP weergegeven zoals die is opgenomen in het Digitaal Geologisch Model versie 1.3 (bron: DINO loket). Behalve uit keileem (Laagpakket van Gieten) bestaan de afzettingen van deze Formatie ook uit zanden (Laagpakketten van Schaarsbergen en Uitdam). Binnen het Laagpakket van Gieten komt ook keizand (Laag van Gasselte) voor. Het onderscheid tussen deze laagpakketten wordt in het DGM niet gemaakt. De werkelijke verbreiding van slecht doorlatende keileemafzettingen is dus geringer dan de kaart suggereert. De afzettingen van deze drie laagpakketten komen naast en boven elkaar voor (Bakker *et al.* 2003). In Noord-Nederland (onder meer op het Drents Plateau) worden voornamelijk de afzettingen van het Laagpakket van Gieten (keileem en keizand) aangetroffen. In Midden-Nederland overheersen de afzettingen van het Laagpakket van Schaarsbergen. In Oost-Nederland komen de afzettingen van de verschillende laagpakketten op en naast elkaar voor.

Keileem is grotendeels beperkt tot de noordelijke en oostelijke provincies en is waarschijnlijk vooral in Drenthe, Overijssel en Gelderland lokaal als veenbasis te beschouwen. Keileem of andere afzettingen van de Formatie van Drenthe komen voor onder het Fochteloërveen, Witterveld, Holtingerveld, Bargerveen, Engbertsdijkerven, Aamsveen, Witte Veen, Haaksbergerveen, Korenburgerveen en Wooldse Veen. In het Fochteloërveen is onder de veenbasis een verzadigde freatische laag aanwezig die rust op keileem en die een hogere stijghoogte heeft dan de regionale stijghoogte.

Het voorkomen van keileem onder een veengebied hoeft nog niet te betekenen dat dit ook de veenbasis is, omdat boven de keileem nog andere afzettingen voor kunnen komen met een geringe doorlatendheid. Om te bepalen of keileem als basis kan optreden, moet de hoogteligging van de bovenkant van het keileempakket vergeleken worden met die van het maaiveld (volgens AHN). In figuur 3.3 is het keileemvoorkomen weergegeven boven 0 m NAP. Dit correleert goed met de verbreiding van de hoogvenen in Oost- en Noord-Nederland.

Tertiaire klei kan in Oost-Nederland lokaal als stagnerende laag optreden zoals in het Haaksbergerveen. Ook *lössleem*, *oude rivierklei* en *beekleem* treden lokaal op als stagnerende laag, maar over hun rol en voorkomen in hoogveengebieden is relatief weinig bekend. Zo wordt onder andere de zogenaamde Brabantse leem (*lössleem*) ook wel beschreven als lokale löss in depressies. Deze kan stagnerend werken op grondwaterbewegingen, maar vormt voor zover bekend nergens een veenbasis.

In de oude rivierterrassen langs de Maas komen *oude rivierkleigronden* (Laag van Wijchen) voor waarop neerslagwater kan stagneren en vennen ontstaan, deels met hoogveenontwikkeling. Zo komt in boswachterij Bergen op de grove zanden van de Formatie van Kreftenheije een 20 tot 100 cm dikke laag oude klei voor, waarop in enkele laagtes in het rivierduingebied veen is ontstaan (Vrieling & Van den Hurk 1977). Deze laag kan humeus tot weinig zijn en is daardoor mogelijk gevoelig voor aantasting. Ook elders op de Maasterrassen komt deze kleilaag voor, zoals bij het Landgoed De Hamert bij Well. Hier is de laag enkele decimeters dik en bestaat deels uit sterk samengedrukte laatglaciale venige leem met een zeer geringe doorlatendheid (Teunissen 1973). Door de diepere insnijding van de Maas is de regionale stijghoogte veel lager (enkele dm tot 2,5 m) en is het systeem erg gevoelig voor vergraven zoals bij zandwinputten zoals het Reindersmeer en Het Grenswater en door het graven van sloten.

Beekleem kan lokaal optreden als veenbasis. Dat lijkt o.a. het geval te zijn bij het Huurnerveld (zie ook 2.2.3). In aanwezigheid van deze beekleem is de freatische grondwaterstand hoger dan in de afwezigheid ervan.

Het voorkomen van beekleem is niet eenvoudig af te leiden van het bestaande kaartmateriaal. Geologisch maakt het onderdeel uit van de Formatie van Boxtel en wordt daar niet apart onderscheiden (Schokker *et al.* 2003). Ook zijn er op de Bodemkaart geen eenheden onderscheiden waaruit het voorkomen van beekleem onder het veen is af te leiden. Alleen aan de oppervlakte wordt het voorkomen van beekleem aangegeven; dat is in beekoverstromingsvlakten, waar geen sprake kan zijn van hoogveenvorming.

De ruimtelijke heterogeniteit van keileem en andere kleiige of lemige afzettingen is vaak groot. Zo kunnen in keileemgebieden naast slecht doorlatende delen ook sterk zandige lenzen voorkomen en bestaat de top van het pakket soms uit grof keizand. In hoeverre de heterogeniteit tot een grotere doorlatendheid aanleiding geeft, hangt ook af van de dikte van het pakket. In tabel 3.1 wordt een overzicht gegeven van de voor keileem en andere kleiige ondergronden bekende gegevens over relevante fysische parameters.

De fysische parameters die in tabel 3.1 en in tabel 3.2 worden weergegeven zijn de volgende:

- Ksat: let op dit betreft de verticale doorlatendheid (k). Deze mag niet worden gelezen als de horizontale doorlatendheid, daarvoor gelden andere waarden.
- Z95 (zie ook paragraaf 2.3.2): hoogte boven het freatisch grondwater waar 95% van het poriënvolume zou zijn gevuld met vocht indien het een freatische kolom van dezelfde grondsoort was.
- C: de weerstand van een slecht doorlatende laag voor verticale stroming uitgedrukt in dagen.
- Zk2: de maximale diepte van de grondwaterstand waarbij een flux van 2 mm/d de onderkant van de wortelzone (bij pF 4.2) nog kan bereiken, ook wel de kritieke z-afstand bij 2 mm/d (Wösten *et al.* 2012).

De onverzadigde doorlatendheid is bij droogval van de veenbasis ook een belangrijke maat. Deze is afhankelijk van de verzadigde doorlatendheid, de poriëverdeling in de grond en het vochtgehalte. Dit wordt beschreven door de doorlaatkarakteristiek van de grond waarbij de doorlatendheid sterk kan afnemen bij een dalend vochtgehalte.

Bouwsteen	Ksat (cm/d)	Z95 (cm)	Bron
O6 Keileem	33.92	22	
O10 zware zavel	2.12	39	
O12 matig zware klei	1.02	55	
O13 zeer zware klei	4.37	47	
BOFEK2012	C (dagen)	Zk2 (cm)	
501 Overig leem en oude klei	18.4	39	
502 Keileemgronden	2.9 – 19.3	23-62	

Tabel 3.1: Bodemfysische en hydrologische parameters voor keileem en andere kleiige ondergronden.

Table 3.1: Soilphysical and hydrological parameters of boulder clay and other clayey subsoils.

3.3.2 Venen met stagnerende placic horizon (type 2)

Door inspoeling van ijzer kunnen anders doorlatende zandlagen slecht doorlatend worden, omdat de poriën tussen de zandkorrels worden afgesloten door neerslaande ijzer(hydr)oxiden. Dit verschijnsel treedt op bij vorming van een placic horizon op het grensvlak van afzettingen met contrasterende textuur. Accumulatie van ijzer kan ook optreden in beekdalen onder invloed van ijzerrijke kwel, waarbij een ijzeroerlaag ontstaat

(toevoeging f... op de bodemkaart), maar dergelijke ijzeroer heeft zelden het karakter van een continue ondoorlatende laag en bestaat veelal uit een losse massa concreties, en zal verder nooit als veenbasis voor een hoogveen optreden, omdat bij kwel geen hoogveen ontstaat.

De ontwikkeling van een placic komt neer op reductie van ijzer (tot Fe^{2+}) in een bovengrond met relatief kleine poriën en organische stof, en precipitatie van dit opgeloste ijzer in de vorm van een dun ijzerpantser (Fe^{3+} hydroxiden) in een grof getextureerde ondergrond met geaëerde grote poriën. De sprong in poriëngrootte verhindert een snelle wegzijging en leidt tot plaatselijk verzadiging van de zone onmiddellijk boven de textuursprong en daardoor optredende reductieve omstandigheden, waarbij de verdichting met ijzerhydroxiden het proces versterkt (McKeague & Wang 1980; Kaczorek *et al.* 2004). Het betreft dus dunne inspoelingslagen (enkele mm tot enkele cm) die een sterk stagnerende werking kunnen hebben op de verticale grondwaterstroming. Of deze ook als veenbasis onder grotere hoogvenen voorkomen is onduidelijk, maar zij spelen zeer waarschijnlijk wel een belangrijke rol bij veentjes in heidevennen bij diepe regionale grondwaterstanden (bijvoorbeeld op de Veluwe, zie bijv. Jansen *et al.* 2013a). De bestaande bodemkundige systemen geven geen informatie over het voorkomen van deze placic horizons, noch over de bodemfysische kenmerken.

3.3.3 Venen met een stagnerende podzol B horizont (type 3)

Veel Nederlandse hoogvenen kennen een veenbasis bestaande uit een hydromorfe podzol in een zandige ondergrond, die initieel mogelijk niet hydromorf was, maar onder invloed van vernatting een hydromorfe ontwikkeling heeft doorgemaakt. Vanwege het veelvuldig voorkomen van deze podzol, wordt hier eerst dieper ingegaan op de vorming van podzolen in Nederland.

Uitvoerige beschrijvingen van *podzolering* in de Nederlandse gronden worden gegeven door Van Breemen & Buurman (1998) en door Buurman & Jongmans (2002). Belangrijk is het onderscheid tussen wat genoemd wordt *droge podzolering* en *natte podzolering*. In het eerste geval is de waargenomen differentiatie in organisch stofgehalte en accumulatie van organische stof in de Spodic B mede het gevolg van de wortelgroei en -afbraak, anders dan in de tot dusverre gangbare theorieën, waarin inspoeling van organische stof centraal wordt gesteld. Deze Spodic horizon kenmerkt zich door zogenaamde *polymorfe* organische stof, bestaande uit faecal pellets en hun meer of minder uit elkaar gevallen resten (weldes). Daarnaast komt disperse humus voor in de vorm van *monomorfe coatings*, maar deze zijn van minder belang. Van lage porositeit, leidend tot permanente waterstagnatie, is geen sprake.

Hydromorfe podzolen kenmerken zich door accumulatie in de vorm van *monomorfe coatings* van organische stof in de interstitiële ruimten tussen zandkorrels (Buurman & Jongmans 2002). Dergelijke coatings worden micromorfologisch geclassificeerd als 'organans' (Buurman & Jongmans 2005). Deze organische stof vertoont een dichte pakking, slechte afbreekbaarheid en grote verblijftijd (relatief hoge ouderdom blijkend uit radiokoolstof bepalingen). Het is in de gegeven omstandigheden (slecht geaëerd, hydromorf) slecht oplosbaar en afbreekbaar, en heeft chemisch gezien veel kenmerken van DOC (dissolved organic carbon; opgeloste organische stof). Onder de hydromorfe condities is de afbraak sterk geremd en de accumulatie van organische stof in de vorm van monomorfe coatings is relatief sterk ten opzichte van de accumulatie in droge podzolen.

Een deel van deze disperse humus spoelt vaak dieper uit dan de spodic B en kan in de vorm van waterhard accumuleren op textuursprongen in het onderliggende sediment

pakket (Koopman 1986, 1988; Dekker *et al.* 1991). Het proces van mobilisatie en transport van disperse organische stof en haar accumulatie in de vorm van waterhard in de minerale ondergrond kan ook optreden tijdens en na de overgroeiing met veen, zoals o.a. aangetoond door Koopman en Dekker *et al.*, blijkend uit ouderdomsbepalingen van de organische stof die in de vorm van waterhard is geaccumuleerd. Deze verschijnselen zijn eerder al uitgebreid beschreven door Farmer *et al.* (1983).

Kenmerkend voor deze dichte inspoelingslagen, of dit nu Bh horizonten zijn dan wel waterhard, is de opvulling met organische stof van interstitiële holten tussen de minerale korrels, en de daarmee samenhangende geringe porositeit. De bioporositeit is daarbij laag tot zeer laag. De coatings kunnen scheuren vertonen, die het gevolg zijn van incidentele uitdroging, maar het is de vraag of deze onder permanent natte condities optreden. In profielbeschrijvingen worden deze dichte horizonten vaak vermeld als 'kazige' B horizonten, die gemakkelijk versmeren.

Tot slot, de bovengronden van deze hydromorfe podzolen (O en/of Ah horizonten) hebben vaak een sterk gliedeachtig karakter en zijn veelal ook slecht doorlatend. In dergelijke gevallen is vaak sprake van 'dubbele' stagnerende lagen, bestaande uit een dunne gliedeachtige zeer humeuze bovengrond en onderliggende dichte Bh horizont.

Het *voorkomen* van verschillende typen B horizonten (meer of minder uitgesproken hydromorf, c.q. kazig) kan niet van bodemkaarten worden afgeleid. Kazige B horizonten kunnen in principe voorkomen in veldpodzolgronden in fijn zand, waar vroeger een veenpakket op gelegen heeft. Bij moerige podzolgronden (.Wp) of veengronden met een podzolprofiel in de ondergrond (.Vp) is een dergelijke laag wel te verwachten. Waarschijnlijk is dat ook het geval bij dikkere pakketten hoogveen op een zandondergrond met podzol. Bij grofzandige ondergronden komt dit type B horizont naar verwachting niet voor.

Systematische gegevens over de *bodemfysische kenmerken* van de stagnerende podzol B horizonten (en gliedeachtige bovengronden) ontbreken. Of en in welke mate stagnatie op de podzol B horizont dan ook bijdraagt aan de geremde wegzijging in hoogveengebieden is veelal dan ook niet bekend en veel van de veronderstelde bijdragen, vermeld in de tabel van bijlage 1 en tabel 3.2, zijn dan ook gebaseerd op vermoedens. Incidenteel is echter onderzoek uitgevoerd waarvan de resultaten hieronder worden vermeld.

Zowel bij Sellingen (Oost-Groningen) als in het Beerzerveld (Overijssel) zijn een kazige B-horizont met een slecht doorlatende gliedelaag daarboven beschreven (Dekker *et al.* 1986; Dekkers *et al.* 1991). Deze lagen zijn ontstaan door inspoeling van amorfe, disperse humus uit een vroeger aanwezig veenpakket. Het oorspronkelijke hoogveen is hier door turfwinning verdwenen, maar de veenbasis lijkt nog wel aanwezig en ook plantensoorten van hoogveen komen nog voor. Het is niet helemaal duidelijk of alle ingespoelde humus al aanwezig was toen het veenpakket nog aanwezig was, omdat dit deels ontstaan is door humificatie van het ontwaterde hoogveen (doppleriet). In de vennen werd overal een sterk kazige B horizont aangetroffen en vaak een gliedelaag. De gemeten *verzadigde doorlatendheid* (Ksat) van deze lagen is zeer klein en varieert van 0,005 tot 0,8 cm per dag. Ter vergelijking, in de monsters van de Staringreeks varieert de doorlatendheid voor fijn zand van 10 tot 15 cm/dag in bouwsteen O1 t/m O3 (tabel 2.1).

Bepalingen van de *verzadigde doorlatendheid* van stagnerende podzol B horizonten in de Laarder Wasmeren (het Gooi) duiden op Ksat waarden die duidelijk veel kleiner dan 1 cm/dag zijn (Cammeraat *et al.* 2008). Uit metingen van Dekker *et al.* (1986) in gliedelagen en kazige B horizonten blijkt verder dat het luchtgehalte bij h = -100 cm 3 à

4% is en bij $h = -150$ cm 5 à 7%. Dat is veel lager dan op basis van tabel 2.1 verwacht zou worden en duidt op een zeer lage porositeit en doorlatendheid.

3.3.4 Venen met stagnerende waterhardlaag (type 4)

De betekenis van waterhard voor het ontstaan en de instandhouding van hoogveen is relatief slecht onderzocht. Daarbij komt dat niet altijd duidelijk is in hoeverre sprake is van een waterhard laag of een stagnerende podzol B: beide worden gekenmerkt door verdichting met amorfe organische stof coatings. Specifieke studies van waterhard beperken zich grotendeels tot het onderzoek van Koopman (1986), maar waterhard wordt zeer regelmatig gerapporteerd als stagnerende laag onder veen.

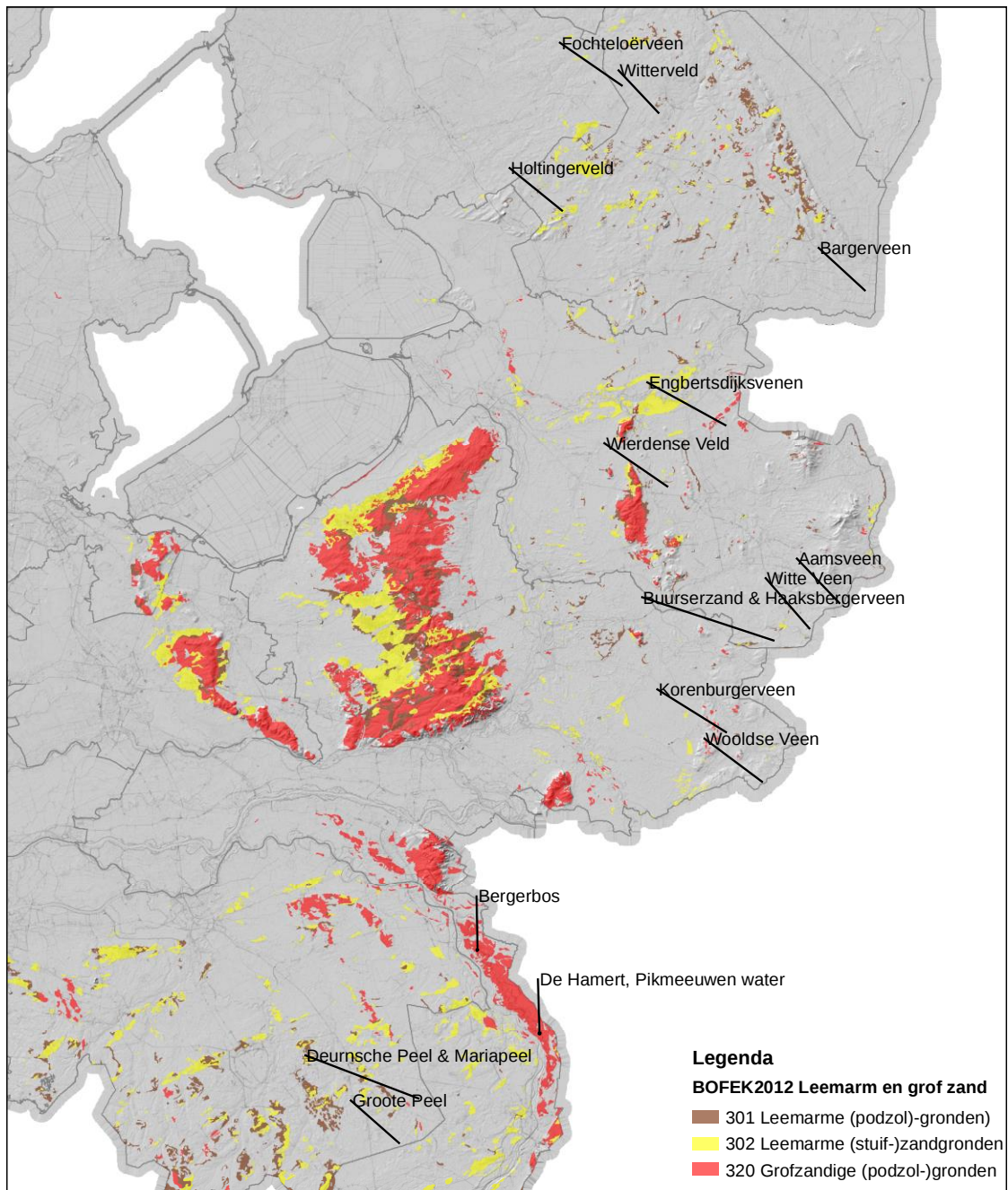
Gepubliceerde Ksat waarden zijn schaars, maar de gemeten waarden zijn ten dele < 0.1 cm/dag (Koopman 1988), geheel in lijn met hun stagnerende karakter.

3.3.5 Venen met minerale ondergrond met lage hydrologische weerstand (type 5)

Wanneer onder het veen leemarm of grof zand voorkomt met een geringe weerstand (dus niet verkit met organische stof of ijzer) is de grondwaterstand in het veen volledig gestuurd door de regionale stijghoogte en weerstandbiedende lagen in het veen zelf. In eerste instantie zal een rijker veentype ontstaan zijn, dat eventueel sterk kleilig veen zou kunnen zijn of een meerbodem uit de initiële fase van de veenvorming, maar dergelijke lagen vormen vermoedelijk een uitzondering. Pas bij hydrologische isolatie heeft een ontwikkeling naar hoogveen plaatsgevonden. De feitelijke veenbasis bestaat dan uit veen en deze is in principe kwetsbaar voor grondwaterstanddaling (zie ook 3.2).

In situaties waar een zandrug voorkomt onder of naast het veenpakket kan lokale toestroming van water uit deze zandrug in theorie van belang zijn voor instandhouding van de voor de bewuste venen karakteristieke vegetatie en veenontwikkeling (Bargerveen, Engbertsdijksvenen; zie 2.2 en 3.2. Deze lokale toestroming kan alleen van invloed zijn en blijven wanneer de veenbasis weinig weerstand heeft en houdt.

Over de textuur van de minerale ondergrond onder het veen valt op basis van de bodemkaart niet veel te zeggen. Een indicatie geeft het voorkomen van leemarm zand (textuurcode 21, BOFEK 301, 302) of grof zand (textuurcode 30, BOFEK 320) in de directe omgeving of in zandopduikingen in het veengebied (figuur 3.4). Leemarm zand is overwegend gebonden aan stuifzanden, jongere dekzanden en aan delen van glaciële afzettingen (o.a. Holtingerveld).



Figuur 3.4: De verbreiding van leemarme en grofzandige zandgronden volgens BOFEK2012.

Figure 3.4: The distribution of loam-poor and coarse-grained sandy soils according to BOFEK2012.

Stuifzanden (Zd21) zijn weinig relevant voor hoogveenvorming omdat zij overwegend te droog zijn of veel te jong. In stuifzandgebieden komen wel veentjes voor op zogenaamde forten, maar dat betreft voormalige laagtes in het verstoven dekzandlandschap (Vrieling & Dirkx 1986). De veenbasis zal daar overwegend bestaan uit organisch materiaal, waarmee de poriën in het dekzand zijn afgesloten (zie 2.3 en 3.3.3). Ook in uitgestoven laagtes (Zn21 of Zn30) kan veenvorming optreden wanneer in de ondergrond een stagnerende laag voorkomt.

Grof zand wordt gevonden in delen van stuwwallen en smeltwaterafzettingen en in rivierterrassen zoals langs de Maas (Bergerbos en De Hamert). Het grove zand in de Maasterrassen behoort overwegend tot de Formatie van Kreftenheye (Laagpakket van Well), welke insnijdingen in de grove afzettingen van de Formatie van Beegden opvullen (Busschers & Weerts 2003). De overgang is niet altijd duidelijk. Het is vanwege de drainerende werking van de lager gelegen Maas niet waarschijnlijk dat hier hoogveen is voorgekomen direct op het grove zand. Aan de top van de Formatie van Kreftenheye komt veelal een stugge, grijze tot zwarte kleilaag voor (de Laag van Wijchen). Waar deze voorkomt kan het de lokale hydrologie sterk beïnvloeden, hetgeen het geval lijkt bij het Bergerbos en De Hamert. Hoogveenvorming zal zich daarom beperkt hebben tot locaties waar de laag van Wijchen aanwezig is maar zal ook aanwezig (geweest) zijn op locaties waar grondwater uittreedt.

Hoewel sommige van de betrokken afzettingen deels heterogeen kunnen zijn, waarbij brokken of schollen leem voor kunnen komen, zal dat hooguit lokaal tot een verminderde doorlatendheid aanleiding geven. Als geheel, op gebiedsniveau, moeten de pakketten dan als goed doorlatend beschouwd worden. Waarden voor belangrijke bodemfysische parameters worden gegeven in tabel 3.2, waarbij een bereik wordt aangeduid met eventuele uitschieters tussen haakjes.

Tabel 3.2: Bodemfysische en hydrologische kenmerken voor lagen en profielen met geringe weerstand op basis van Bouwstenen en BOFEK2012 .

Table 3.2: Soilphysical and hydrological parameters of layers and profiles with limited resistance on the base of the subsurface units of the "Staringreeks" and BOFEK2012.

Bouwsteen	Ksat (cm/d)	Z95 (cm)	Bron
O1 Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	15.22	15	
O5 Grof zand	25.00	5	
BOFEK2012	C (dagen)	Zk2 (cm)	
301 Leemarme (podzol)-gronden	1.1 – 1.4	83 – 85	
302 Leemarme (stuif-)zandgronden	1.2 – 1.6	84 – 85	
320 Grofzandige (podzol)-gronden	0.6 – 0.8 (2.0)	47 (56)	

3.3.6 Vegetatie bij veenvorming en relatie met organische veenbasis (gliede)

- Hoogvenen zijn ontstaan in de laagste delen van een gebied waarbij in eerste instantie laagveen ontstond en daarna hoogveen. Daarbij hoeft geen ondoorlatende laag aanwezig geweest te zijn. Ook bij de uitbreiding van een veengebied hing de hoogveenvorming vaak samen met de regionale hydrologie en niet met het optreden van stagnatie. Dit is bijvoorbeeld te zien in het Fochteloërveen – in de laagtes in het dekzand is een dikke gliedelaag aanwezig – op de flanken is het veen direct op het zand te vinden.
- In zijn algemeenheid is te zeggen dat in de laagste delen van een veengebied een meerafzetting (zeldzaam) of een gliedelaag aanwezig is aan de basis van het veen. Dit waren vaak laagtes waar onder wisselende waterstanden en onder aerobe afbraak amorfe humus is ontstaan uit vegetaties met veel Pitrus (*Juncus effusus*) en Snavelzegge (*Carex rostrata*). Daarna kwam een fase met Veenbloembies (*Scheuchzeria palustris*) en daarna kwamen pas *Sphagnum rubellum* (Rood veenmos) en veel later *Sphagnum austinii* (Kamveenmos) in beeld. Bij uitbreiding van het veengebied is deze gelaagde opbouw meestal niet te vinden want op de hogere delen is het (later gevormde) veenmosveen dan vaak direct op het zand gesitueerd.

- Bij beginnende veenvorming is de aerobe afbraak meestal heel groot en in glijde zijn daardoor plantenresten niet meer goed herkenbaar in het veld. Veel hoogvenen hebben een basis van Pitrus (*Juncus effusus*) en Snavelzegge (*Carex rostrata*) waarvan de zaden nog wel herkenbaar zijn. Maar ook een andere vegetatiesamenstelling is mogelijk. In de Engbertsdijksvennen zijn bijvoorbeeld profielen gevonden waar de zandbodem onder het veen een begroeiing had met Struikhei (*Calluna vulgaris*). Daar heeft vernatting geleid tot een vegetatie met Pitrus (*Juncus effusus*) en Snavelzegge (*Carex rostrata*), gevolgd door Veenbloembies (*Scheuchzeria palustris*) en hoogveenvorming met veenmossen. In het Haaksbergerveen zijn delen te vinden waarin Waterdrieblad (*Menyanthes trifoliata*) in de ondergrond te vinden is en in andere delen niet.
- De botanische samenstelling van de glijde is veelal lastig te achterhalen via waarnemingen in het veld (niet microscopisch maar 'met het blote oog') en daarom ook niet altijd goed bekend. Tevens is niet bekend in hoeverre deze botanische samenstelling gerelateerd is aan de fysische eigenschappen van de glijde. Bij het onderzoek van glijde (disperse organische stof) beschreven in hoofdstuk 5, is het van belang om te pogen de fysische eigenschappen te relateren aan de botanische samenstelling en daarmee een typologie te ontwikkelen stoelend op die botanische samenstelling en fysische kenmerken. Dit vereist meer systematisch nader onderzoek naar die botanische samenstelling, hetgeen specialistische kennis vraagt. Dit zal overigens tevens meer inzicht opleveren over de variatie in vegetatie tijdens de initiële veenontwikkeling.

4 Afbraakprocessen in de veenbasis

Zoals al eerder gesteld, is de kans verwaarloosbaar dat een minerale veenbasis, die stagneert als gevolg van verdichting met mineraal materiaal (klei, leem, ijzer), op relevante tijdschalen wordt aangetast als gevolg van grondwaterstands dalingen. Dat beperkt de discussie tot die stagnerende lagen of horizonten die uit organische stof bestaan of met organische stof zijn verkit (typen 3 en 4).

Venig materiaal verschilt in zijn gedrag bij ontwatering sterk van minerale bodemhorizonten: scheur en krimp, en daarmee gepaard gaande verhoogde doorlatendheid en toetreding van lucht en nutriënten, spelen een belangrijke rol. Het is bovendien niet beschermd tegen deformatiekrachten, ook als het materiaal zelf nog niet verdroogd is. Reeds bij beperkte ontwatering is daarom een serieuze verhoging van zowel de aerobe als de anaerobe afbraak te verwachten aan de bovenzijde van het veenprofiel; de aerobe in directe samenhang met de verhoogde aeratie die het gevolg is van scheur- en structuurvorming door krimp en bioturbatie; de anaerobe meer indirect en wel door de aanvoer met inzijgend water van nutriënten die als electronenacceptoren kunnen functioneren en vrijkomen bij de mineralisatie van organische stof in het bovenliggende geaereerde deel van het veenprofiel (zie hiervoor ook 4.1).

De versnelde afbraak van veen door uitdroging vanaf het oppervlak, samenhangend met een verlaagde grondwaterstand en daarmee gepaard gaande verhoogde wegzijging, dan wel versterkte laterale afwatering, is uitvoerig bestudeerd (zie bijv. Kemmers & Koopmans 2009). Strekt deze versnelde afbraak zich uit tot de veenbasis, dan kan deze beschreven worden als 'aantasting van bovenaf'. Geheel anders is de situatie waarbij de grondwaterstand verlaagd wordt tot beneden de veenbasis en mogelijk aantasting van deze veenbasis 'van onderaf' zou kunnen optreden met effecten op de hydrologische situatie in het bovenliggende veenpakket, bijvoorbeeld een verhoogde wegzijging door afbraak van die veenbasis. In deze situatie is de vraag of als gevolg van de verlaagde grondwaterstand de veenbasis van onderaf kan uitdrogen en scheuren, dan wel de microbiële afbraak versterkt kan worden door bijv. aeratie of verhoogde aanvoer van electronenacceptoren die anaerobe afbraak stimuleren.

Het is de mogelijke afbraak 'van onderaf', zowel in randzones als centrale delen van hoogvenen, die centraal staan in deze paragraaf. Voor het type 'organische stagnerende veenbasis' geldt daarbij dat de processen sterk zullen lijken op die welke bij afbraak van bovenaf zullen optreden met een mogelijk belangrijke rol voor krimp en scheurvorming.

Hieronder zullen eerst de mogelijke afbraakprocessen behandeld worden van organische stof in de minerale veenbasis (typen 3 en 4). Vervolgens komen aan de orde de mogelijke afbraakprocessen in de organische veenbasis. Daarna komen de processen aan de orde, die optreden bij aeratie van veen 'van bovenaf', en bij de afbraak van veen of vergelijkbare organische bodemmaterialen (bijv. gliede).

4.1 Afbraak van organische stof en milieucondities in hoogvenen met type 3 en 4 minerale veenbasis

In een bodemmilieu waar vanwege de slechte of geheel ontbrekende aeratie en lage porositeit de bodemfauna een zeer ondergeschikte rol speelt bij de afbraak van organische stof, wordt deze afbraak in hoge mate bepaald door microbiële activiteit, waarbij micro-organismen opgelost substraat opnemen en verteren, en dit substraat aan de vaste organische stof onttrekken door uitscheiding van enzymen (zie o.a. Baldock & Kjemstad 2000). De mobilisatie door enzymen speelt een belangrijke rol, waarbij de slechte oplosbaarheid en moeilijke afbreekbaarheid van organische stof, die dominant in de vorm van monomorfe coatings aanwezig is (Buurman & Jongmans 2002), deze in principe sterk beperken. Overigens, alhoewel alle reden bestaat om van een slechte oplosbaarheid uit te gaan, is de feitelijke oplosbaarheid van dergelijke organische stof als functie van pH en watersamenstelling niet goed bekend (zie o.a. Farmer *et al.* 1983; Buurman & Jongmans 2005).

Vanwege de slechte doorlatendheid en het lage poriënvolume is de waterflux gering en blijft daarmee tevens de flux van daarin opgeloste organische verbindingen (het substraat) van relatief geringe betekenis als basis voor de microbiële activiteit. Bepalend voor de afbraak lijkt daarmee de microbiële onttrekking van substraat aan het bodemvocht, welke leidt tot een concentratiegradiënt en diffusie van dit substraat via het bodemvocht naar het organisme, d.w.z. vooral diffusief transport over korte afstanden. Dit kan uiteraard veranderen bij toenemende 'afbraak' van de veenbasis, als dit leidt tot een verhoogde waterflux (en daarmee gepaard gaande verhoogde flux van substraat en electronacceptoren), alsook van een betere toegankelijkheid van de poriën voor vrijbewegende microben.

Uit het bovenstaande komen een aantal aspecten naar voren die een uitgebreidere bespreking behoeven.

4.1.1 Accumulatie en oplossing

Accumulatie en transport (in oplossing) van organische stof worden bepaald door het fysisch-chemisch gedrag en de eigenschappen van uitspoelende organische stof en van de geaccumuleerde organische stof zelf.

Kenmerkend voor monomorfe organische stof is dat deze in de vorm van cutans aanwezig is, ook wel organans genaamd. Niet duidelijk is daarbij of sprake is van een fysisch proces van filtering/settling, waarbij fijne organische stof in de vorm van huiden mechanisch wordt afgezet, dan wel van een chemisch proces, waarbij oplosbaarheidproducten overschreden worden (door oplopende Al concentratie, pH of anderszins) en organische stof in feite precipiteert, dan wel adsorptie optreedt aan minerale oppervlakken. Ook een combinatie van deze processen is mogelijk.

Aanwijzing voor op zijn minst een gedeeltelijk chemische achtergrond is bijvoorbeeld de veelal relatief hoge Al waarde voor waterhard horizonten, die duidt op een rol van Al als oorzaak van het neerslaan en vastleggen van organische stof (Scheel *et al.* 2007, 2008), alhoewel ook andere verklaringen gevonden kunnen worden (bijv. adsorptie van Al aan reeds aanwezige organans). Ook kan op zich een oplopende pH (naar de ondergrond) tot precipitatie van organisch materiaal leiden door verlaging van het oplosbaarheidproduct. Immobilisatie door Fe (hydr)oxiden zal gegeven het milieu (anaeroob) geen rol spelen. In de bodemchemische literatuur wordt uitgebreid ingegaan op deze vraagstelling en naar

deze literatuur wordt verwezen voor details (zie bijv. Van Hees *et al.* 2000; Farmer & Lumsdon 2002).

Bij toenemende verzuring neemt de oplosbaarheid van de organische verbindingen in de organans af, maar de stabiliteit van organo-metaal complexen neemt eveneens af (e.g. McBride 1994, Van Breemen & Buurman 1998) en daarmee neemt mogelijk de microbiële beschikbaarheid van organische stof toe. Een dergelijke verzuring kan optreden bij een toenemende wegzijging (van zuur veenwater) en verdwijnen van kwel, dan wel via laterale introductie van 'bemest' water in een van oorsprong door traag inzijgend water of door kwelwater bepaald milieu. Gaat dit laatste gepaard met aanvoer van vermest oppervlakkig grondwater (met hogere N en S waarden), dan zal ook dit tot verzuring kunnen leiden. Versterkte oplossing van de organans bij lagere pH kan overigens een zichzelf versterkend effect hebben door de verhoogde zuurproductie bij afbraak, die tot verdere versterking van de afbraak van de organans leidt. Of inderdaad de oplosbaarheid toeneemt bij verlaging van de pH en dan van een zichzelf versterkend proces sprake is, is niet zeker en behoeft nader onderzoek.

Meer fundamenteel, kwantitatief inzicht in het chemische gedrag van de 'disperse' humus biedt in principe ook zicht op het creëren van condities waarin eventueel zelfs herstel van 'waterhard' kan optreden. Voor de hand lijkt te liggen het creëren van gradiënten in het minerale bodemprofiel middels beïnvloeding van de hydrologie op zodanige wijze, dat precipitatie van de uit het veen spoelende disperse organische stof in de minerale grond optreedt en deze verdicht.

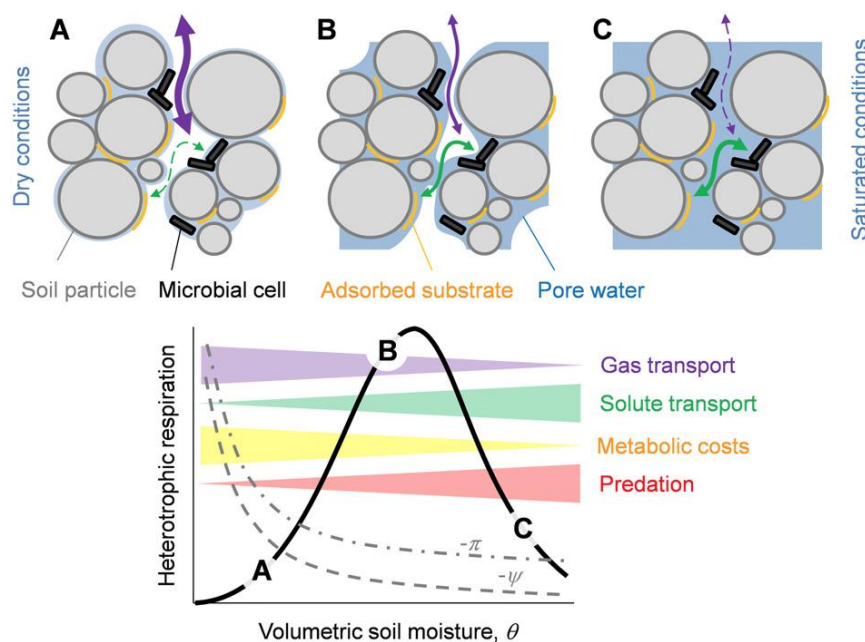
4.1.2 Microbiële afbraak: omgevingscondities en processen.

De microbiële activiteit van aerobe organismen hangt af van de beschikbaarheid van zuurstof en mate van verzadiging met water (Skopp *et al.* 1990; Rodrigo *et al.* 1997; Moyano *et al.* 2013). Die verzadiging met water wordt in verschillende studies naar het effect van waterverzadiging op de microbiële activiteit nogal verschillend gedefinieerd (water gevulde poriën fractie, gravimetrisch vochtgehalte, partiële druk), hetgeen een vergelijk van de resultaten enigszins bemoeilijkt, maar zonder uitzondering is men het eens over de meer algemene relatie tussen vocht en microbiële activiteit: laag bij droge en zeer natte gronden en hoog bij intermediaire watergehalten: de optimale vochttoestand. Dit wordt o.a. weergegeven in figuur 4.1 van Moyano *et al.* (2013).

Belangrijk is, dat vochtgehalte en zuurstofgehalte geen direct gerelateerde kenmerken zijn. De bodemluchtfractie kan namelijk voor een meer of minder belangrijk deel bestaan uit CO₂ en het is deze verhouding tussen O₂ en CO₂ die eveneens van groot belang is voor de aerobe microbiële afbraak (zie o.a. Sierra & Renault 1995; Rodrigo *et al.* 1997; Sleutel *et al.* 2008; Rubol *et al.* 2013). Met andere woorden, relatief hoge partiële CO₂ spanningen in de bodemlucht leiden tot remming van die microbiële afbraak. Juist bij een hoog water gevuld poriënvolume kan het zuurstofgehalte zo sterk terug lopen dat de aerobe microbiële activiteit sterk terugloopt. Daarbij kan worden aangetekend dat de diffusie van gassen door water aanzienlijk trager loopt dan via de gasfase, maar dat ook de continuïteit van het open (luchtgepulde) poriënsysteem van groot belang is. In de praktijk betekent dit, dat vanaf de rand van een veen, bij een relatief diepe ontwatering, een gradiënt ontstaat van afnemende microbiële activiteit samenhangend met gradiënten in CO₂ spanning in de bodemlucht en in de verhouding tussen CO₂ en O₂ spanning.

Overigens moet hierbij aangetekend worden, dat bij matig geaereerde bodems in principe al op geringe diepte onder de bouwvoor sprake is van anaerobie en de aerobe microbiële

afbraak tot een zeer laag niveau terugvalt. In dergelijke milieus, waaronder die van een minerale veenbasis onder een relatief intact veenpakket, speelt naar alle waarschijnlijkheid alleen de anaerobe afbraak. Als electronenacceptoren fungeren hierbij achtereenvolgens nitraat/mangaan/ijzer/sulfaat/ CO_2 ; als acceptoren het organische 'substraat'. Overigens zal in de meeste typen veenbasis de rol van Mn en Fe uiterst beperkt zijn vanwege de lage concentraties aan deze metalen in de bewuste gronden, en zal de anaerobe microbiële afbraak vooral bepaald worden door de concentraties van nitraat en sulfaat, die sterk samenhangen met de mate van vermisting van het oppervlakkige grondwater.



Figuur 4.1: Schematische weergave van de bodemvochtcondities op microbiële activiteit. De relatie tussen heterotrofe ademhaling en waterbeschikbaarheid in bodems is in hoofdlijnen het gevolg van enkele elkaar beïnvloedende effecten, variërend van beperkingen in diffusie tot fysiologische, biochemische en ecologische processen. Omdat deze processen vaak in verschillende richtingen werken (bijvoorbeeld: substraattransport neemt af bij verminderde bodemvochtigheid, terwijl zuurstoftransport toeneemt), treedt een piek in de ademhaling op bij intermediaire bodemvochtwaarden. In de onderste deelfiguur indiceert ψ de bodemvochtpotentiaal en π de celosmotische druk die de instandhouding van een stabiele turgordruk mogelijk maakt wanneer ψ daalt.

Figure 4.1: Schematic illustration of soil moisture effects on microbial activity. The relationship between heterotrophic respiration and water availability in soils is the macroscopic result of a number of interacting effects, ranging from diffusion limitations to physiological, biochemical, and ecological processes. Because these effects often act in different directions (e.g.: substrate transport decreases with decreasing soil moisture, whereas oxygen transport increases), a peak in respiration occurs at intermediate values of soil moisture. In the lower panel, ψ indicates the soil water potential and π is the cell osmotic potential that would allow maintaining a stable turgor pressure as ψ declines.

Ook voor de anaerobe afbraak geldt natuurlijk, dat de totale flux (hoeveelheid afbraak per tijdseenheid) bepaald wordt door zowel de concentratie van deze stoffen in het grondwater/drainagewater als de hoeveelheid doorstromend water. Verder betekent deze anaerobe afbraak dat vanuit de rand van de veenbasis afbraak van organische stof kan optreden in afhankelijkheid van aanvoer en kwaliteit van het water. Meer landbouwwater

betekent in principe meer afbraak en ook hiervoor geldt een mogelijke versnelling van het proces via terugkoppeling.

4.1.3 Toegankelijkheid van de organische stof.

Uit onderzoek komt naar voren dat de 'toegankelijkheid' van organische stof van groot belang is (zie o.a. Arah & Vinten 1995; Baldock & Kjemstad 2000; Or *et al.* 2007; Dungait *et al.* 2012). Bescherming tegen het toegankelijk (oplosbaar) maken van de organische stof door enzymatische werking kan door chemische complexering (bijvoorbeeld door Al en Fe) optreden, maar ook door 'mechanische' afscherming zoals door sterke aggregatie waarbij de feitelijke toegang belemmerd wordt. Als voorbeeld van mechanische bescherming wordt het effect van opsluiting van organische stof in kleiige aggregaten en de relatie tussen structuurvorming en microbiële activiteit genoemd (zie o.a. Baldock & Kjemstad 2000). In het geval van de monomorfe coatings wordt de toegang naar alle waarschijnlijkheid sterk belemmerd door de compacte structuur, het daarmee lage reactieve oppervlak en de beperkte diffusie. De betekenis van dat laatste – het reactieve oppervlak – blijkt onder meer uit de zeer sterke relatie tussen deeltjesgrootte van de organische stof en haar afbreekbaarheid: fijne organische stof is aanzienlijk minder stabiel dan grotere delen.

Bacteriën en andere micro-organismen kunnen zich in principe bij afnemende beschikbaarheid van substraat verplaatsen in de richting van substraatbronnen en daarmee de bodemmatrix en daarin aanwezige organische stof efficiënt exploiteren. Echter, uit onderzoek blijkt, dat deze mobiliteit sterk afhankelijk is van de microporositeit, waarbij een ondergrens van ca 5 µm wordt vermeld als grenswaarde voor de toegankelijkheid van poriën voor bacteriën (Baldock & Skjemstad 2000; Tonneijck *et al.* 2010). Voor predatie worden zelfs hogere grenswaarden aangehouden. Dit houdt in dat bij ontbreken van poriën die groter dan ca. 5 µm zijn, microbiële afbraak zich beperkt tot die delen van de bodemmatrix, die via diffusie bereikbaar zijn voor enzymatische mobilisatie, gevolgd door diffusie van de oplosbare producten richting microben. In dichte gronden met lage macro- en mesoporositeit betekent dit een zware rem op de microbiële afbraak (zie o.a. Or *et al.* 2007). Tonneijck beschrijft bijvoorbeeld dat de geringe meso- en macroporositeit van de door haar onderzochte Andosolen tot een sterk geremde microbiële afbraak leidt. Bioremediatie studies van vervuilde bodemmaterialen (zie o.a. Freijer 1994) toonden eveneens aan, dat de toegankelijkheid van de organische stof door een dichte pakking en lage macro- en mesoporositeit ernstig beperkt kan zijn met als gevolg een sterk geremde microbiële afbraak. Een vergelijkbare situatie kan verwacht worden in de dichte en compacte spodic horizons van de hydromorfe podzolen en vergelijkbare horizonen. Ook hier is sprake van een lage macro- en mesoporositeit, o.m. blijkend uit de lage K_{sat} waarden (zie hiervoor). Overigens kan hier ook uit afgeleid worden dat een serieuze verandering in de microbiële afbraak pas dan verwacht kan worden, wanneer ook de activiteit van de bodemfauna zodanig toeneemt dat de meso- en macroporositeit oploopt. Daarvoor is echter tevens een verbeterde aeratie vereist, met toereikende O₂ voorziening (zie o.a. Sleutel *et al.* 2008).

In concreto, in een met organische stof verkitte en dichte minerale bodemhorizont zal mobilisatie van organische stof via enzymatische werking zich grotendeels afspelen op het grensvlak tussen de monomorfe coatings en het water in de relatief weinig voorkomende poriën. Dat wil zeggen, niet door de gehele bodemmatrix en daarmee blijft de substraatflux en -afbraak beperkt. Toename van deze flux kan pas verwacht worden, wanneer de toegankelijkheid van de organische stof wordt vergroot, waarbij bioturbatie door macro- en mesofauna waarschijnlijk een belangrijke rol speelt (Or *et al.* 2007). Er is verder geen reden om te veronderstellen dat bij afnemende anaerobie (c.q. verdroging) de

in de vorm van monomorfe coatings aanwezige organische stof gemobiliseerd zou worden, c.q. versneld in oplossing zou gaan en daarmee grotere hoeveelheden substraat zou leveren, waardoor de microbiële afbraak verhoogd zou worden (Van Breemen & Buurman 1998). Uitdroging en daardoor scheurvorming kan mogelijk een bijdrage leveren, maar veronderstelt een uitdroging van bovenaf tot in de 'veenbasis'. Anders ligt dit, wanneer de uitdroging gepaard gaat met veranderingen in de chemische condities (bijv. pH) en daarmee de oplosbaarheid vergroot wordt.

4.2 Afbraakprocessen in een organische veenbasis

Veel van de informatie gepresenteerd onder 4.1. geldt ook voor de organische veenbasis, voor zover deze betrekking heeft op de afbreekbaarheid van de organische stof en daarbij van belang zijnde milieucondities. Daarnaast speelt echter ook in het bijzonder het fysisch gedrag van het organische materiaal in relatie tot het vochtgehalte c.q. de diepte van ontwatering van de ondergrond. Het gaat daarbij om de volumeveranderingen en het mogelijk ontstaan van krimpscheuren bij afnemende vochtspanningen c.q. vochtgehaltes, alsook de K-h relaties in het stagnerende veen. Of en onder welke condities door verdroging 'van onderaf' scheurvorming en daarmee aeratie, versnelde wegzijging en verdroging kunnen optreden, hangt van dit fysische gedrag af.

Voor wat betreft aerobe afbraak, lijkt optreden van een dergelijke afbraak onwaarschijnlijk, wanneer niet via scheuren direct contact met de atmosfeer bestaat. Immers, in een venige bovengrond waarin geen continu stelsel van macroporiën aanwezig is, zal aanwezige zuurstof snel verbruikt worden en reeds op geringe diepte anaërobie optreden (zie ook 4.1.2). De rol van anaërobie afbraak en factoren die daarbij van belang zijn, zijn hiervoor al beschreven.

4.3 Conclusies

Een minerale veenbasis, bestaande uit een verdichte spodic B horizont of daaraan verwante waterhard laag met eveneens monomorfe organische stof coatings in een minerale matrix, kenmerkt zich door een zeer lage microbiële afbraak als gevolg van een combinatie van factoren en kenmerken:

- een in oorsprong lage fauna-activiteit in combinatie met een illuviale inspoeling van organische stof waarbij interstitiële ruimten tussen de minerale korrels zijn opgevuld;
- een daaruit resulterende zeer lage bioporositeit en in principe slechte toegankelijkheid van de ingespoelde organische stof voor microbiële afbraak, als gevolg van de combinatie van een laag reactief oppervlak, slechte afbreekbaarheid en fysische ontoegankelijkheid van de bodemmatrix;
- een door de anaërobie veroorzaakte zeer beperkte of zelfs afwezige microbiële afbraak.

Bij aeratie vanuit de randen van een veen zullen vermoedelijk gradiënten ontstaan: van de rand richting kern: een zone met verhoogde O₂ concentratie, mogelijk gepaard gaand met enigszins verhoogde bodemfauna activiteit, toegenomen meso- en macroporositeit en aerobe microbiële afbraak. Het is echter zeer de vraag of deze verhoogde aeratie van wezenlijke betekenis is onder de Ah/O horizont van bodems in deze randen, laat staan in de ondergrond richting veenkern. Ook de anaërobie afbraak kan toenemen als gevolg van verhoogde gehalten aan nitraat en sulfaat (eutrofiëring). Meer naar de kern zal dus geen versterkte aeratie optreden, maar zou enige eutrofiëring kunnen leiden tot enigszins verhoogde anaërobie afbraak. In de kern zal vrijwel altijd nog steeds

sprake zijn van een dusdanige verzadiging dat poriën in de veenbasis geheel en permanent met water gevuld zijn en geen aerobe afbraak optreedt. Bij ongewijzigde samenstelling van en wegzijgingsflux vanuit het bovenste grondwater zal ook de anaerobe afbraak nauwelijks of niet gewijzigd zijn.

Dimensies van deze zonering zullen o.m. afhangen van:

- De dichtheid van het minerale substraat en mate van verdichting / verkitting met organische stof. Bij relatief grove minerale substraten met een type veenbasis die richting type 5 gaat, is mogelijk de toegankelijkheid van de organische stof hoger;
- De duur van de periode waarover ontwatering zich heeft afgespeeld;
- De diepte van ontwatering en het ontwateringregime: al dan niet afwisselend nat/droog (bevordert mineralisatie);
- De kwaliteit van het lateraal infiltrerende water (vanuit de omgeving) en neerwaartse flux (laterale wegzijging) in/vanuit het veenpakket zelf.

Treedt scheurvorming op vanuit de bovenzijde van het hoogveenpakket als gevolg van verdroging, gepaard gaande met aeratie via scheuren en aanvoer van bij veenafbraak vrijgekomen nutriënten, dan kan een aanzienlijk grotere impact optreden, in het bijzonder wanneer deze scheuren tot aan de veenbasis reiken. Het betreft hierbij echter een 'afbraak van bovenaf'.

Of in hoogveen met een organische stagnerende veenbasis grondwaterstandverlaging tot aantasting van deze veenbasis 'van onderaf' leidt, lijkt vooral af te hangen van de fysische eigenschappen van deze veenbasis, d.w.z. de relatie tussen uitdroging/vochtspanning en optreden van scheuring en krimp. Niet duidelijk is of vochtspanningen onder de veenbasis door grondwaterstandsverlaging zo laag worden dat scheuring optreedt, waarbij eventuele sterke verdroging van bovenaf buiten beschouwing wordt gelaten. Vooralsnog lijkt, zonder scheurvorming van bovenaf gepaard gaande met aeratie tot in de veenbasis, aerobe afbraak geen rol te spelen.

5 De kennisvragen

5.1 Inleiding

Tijdens een workshop op 19 december 2013 te Ede zijn kennisvragen betreffende de aantasting van de veenbasis besproken en nader gedefinieerd. Achtergrondinformatie daarbij bestond uit een drietal reviews van de huidige kennis van de veenbasis en daarin optredende processen, samengevat in de hoofdstukken 2 t/m 4. De discussie verliep aan de hand van vijf van te voren geformuleerde vragen, die hieronder in tabel 5.1 worden weergegeven.

Tabel 5.1: De vijf vragen voor de workshop van 19 december 2013.

Table 5.1: The five questions discussed during the workshop of December the 19th 2013.

- | |
|---|
| <p>1) Hoe definiëren we het begrip 'veenbasis' en wat voor typen kunnen we daarin onderscheiden?</p> <p>2) Is het mogelijk een rangorde te maken in typen veenbasis op grond van hun gevoeligheid voor aantasting/afbraak, leidend tot verhoging van de wegzijging wanneer het grondwater zakt tot onder de veenbasis?</p> <p>3) Wat voor conditionele en operationele factoren en processen spelen een rol bij mogelijke aantasting/afbraak van de veenbasis?
<i>Te denken valt aan:</i></p> <ul style="list-style-type: none">- al dan niet ontstaan van onverzadigde zone- aerobe/anaerobe afbraak- gasfluxen- waterfluxen/waterkwaliteit- scheurvorming- selfsealing <p>4) Welke kennis ontbreekt over zulke factoren/processen en wat voor onderzoek is nodig om de kennisleemten in te vullen?
<i>Te denken valt aan:</i></p> <ul style="list-style-type: none">- proefopstellingen in het laboratorium- vergelijking van verschillende situaties/condities/sequenties in het veld <p>5) Hoe bakenen we het te verrichten onderzoek af? Welke vragen dienen in de context van dit onderzoek beantwoord te worden en welke informatie dienen de beheerders van veenterreinen zelf te verzamelen?
<i>(bijvoorbeeld: aanwezige typen veenbasis, ruimtelijke variatie in veenbasis, mate van wegzijging, ontwikkeling en geschiedenis van de terreinen.</i></p> |
|---|

De workshop heeft geresulteerd in een overzicht van onderzoeksvragen. Er is onderscheid gemaakt tussen generieke (zie paragraaf 5.4) en gebiedsspecifieke vragen (zie paragraaf 5.5).

Het *generieke onderzoek* betreft het onderzoek wat moet worden opgepakt in OBN-verband in het vervolg op deze kennisverhelderingsactie. Voor zover het *veldonderzoek* betreft voor de karakterisering van materialen (voor wat betreft hun relevante fysische en chemische parameters) moet het plaatsvinden in enkele representatieve onderzoeksgebieden, die in samenspraak met beheerders en OBN-leden worden geselecteerd en waar tevens inventariserend gebiedsgericht onderzoek, zie hieronder, wordt uitgevoerd.⁵ Hierbij gaat het om het toetsen van aannames via metingen in transecten vanaf de rand van het veen richting het centrum.

Het generieke onderzoek is nodig om nadien het gebiedsgerichte onderzoek in alle overige grote hoogveenrestanten goed uit te kunnen voeren. Pas na uitvoering van dit onderzoek is er een goed beeld en een goede typologie van de veenbasis met daarbij de gevoeligheid voor o.a. scheurvorming.

Het is belangrijk dat de belangrijkste typen veenbasis (en minerale ondergrond) in de steekproef worden meegenomen, zowel qua bodemfysische kenmerken als de fysisch-chemische karakterisering van het gedrag van disperse organische stof.

Niet uitgesloten is, dat de grootte van de steekproef die nodig is om de variatie in situaties te dekken, het beschikbare budget voor onderzoek te boven gaat. In dat geval moet in overleg met het OBN deskundigenteam de steekproefomvang en het gewenste detail op het beschikbare budget worden afgestemd.

Het *gebiedsgerichte onderzoek* (met uitzondering van het benodigde veldonderzoek voor het generieke onderzoek) valt niet binnen de context van dit onderzoek. Het betreft lokale kennis die nodig is voor het toepassen van generieke inzichten over de mogelijke aantasting van de veenbasis in een specifiek terrein, zoals bijvoorbeeld het bepalen van het type veenbasis wat er in een gebied voorkomt.

Er zal moeten worden bekeken welk onderzoek er nu binnen het beschikbare budget opgepakt kan worden. Voor wat betreft de verwachte resultaten van het onderzoek, c.q. de antwoorden op de onderzoeksvragen, kunnen daarbij in meer algemene zin enkele opmerkingen worden gemaakt, die van belang zijn voor de keuze van onderzoekslocaties en de focus van het onderzoek als geheel.

- De resultaten moeten een handreiking zijn voor het bepalen van de mogelijke aantastingen van de veenbasis op basis van enkele breed toepasbare parameters.
- Zij moeten resulteren in een goede typologie van de organische veenbasis: welke typen komen voor en welke typen zijn hoe gevoelig voor afbraakprocessen in de veenbasis?

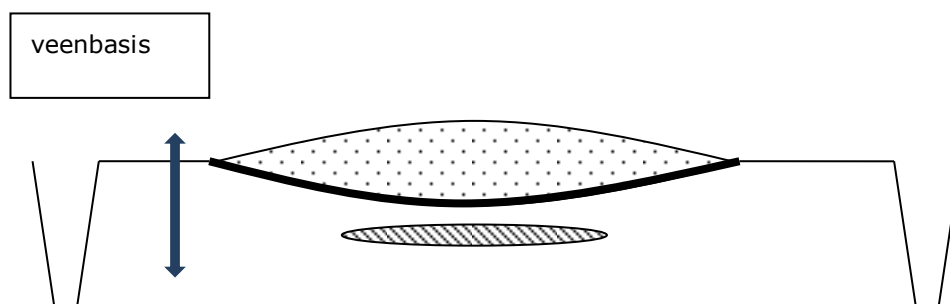
⁵ De oostkant van de Engbertsdijksvennen zou een goede locatie zijn – daarvan is bekend dat er veel sulfaat (electronenacceptor) zit onder het veen – (Jansen et al., 2013b). Het gaat om regionaal grondwater wat er onderdoor trekt en wat vervuild is en tegen de veenbasis komt. Voor onderzoek naar 'de gasflux' is het Dwingelderveld genoemd maar ook Beerze, Holtingerveld en de veentjes in de boswachterij Ommen.

- Ook de vertaling van de parameterwaarden naar geschiktheid - op gebiedsschaal- voor acrotelmontwikkeling aan het oppervlak van een veen moet aan de orde komen.
- Tenslotte moet ook antwoord gegeven worden op de vraag in hoeverre aantasting van de veenbasis in randen en dunne venen voorkomt en wat in het kader van elk deelonderwerp de noodzaak is voor het verhogen van de grondwaterstand tot in of boven de veenbasis.

5.2 Definitie en typologie van begrip 'veenbasis'

De veenbasis wordt gedefinieerd op functionele gronden: Het is de laag, die de belangrijkste hydrologische weerstand vormt, wegzijging belemmert en bij aantasting het er boven gelegen veenpakket mogelijk gevoelig maakt voor uitdroging door versterkte wegzijging. Deze veenbasis kan zijn het veenpakket zelf (de catotelm), een gliedelaag of een andere sterk organische laag direct aan de basis van het veen of een weerstandsbiedende laag onder het veen (bijv. slecht doorlatende kleilaag, leemlaag of laag met veel organische stof).

In onderstaande figuur betekent dit dat deze veenbasis zich kan bevinden in het gebied vanaf de onderkant van de acrotelm oftewel de bovenkant van de catotelm naar beneden tot en met de eventueel aanwezige weerstandsbiedende laag onder het veenpakket. Deze range is aangegeven met een pijl.



In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de diverse typen veenbasis. Voor de volledigheid is ook de situatie aangegeven, waarbij hoogveen is ontwikkeld, maar geen *stagnerende* minerale veenbasis aanwezig is (type 5), hetgeen kan voorkomen bij venen, die zijn ontstaan in topografische laagten met initieel hoge grondwaterstand.

- | | |
|---|--|
| - | Organisch |
| o | Veen |
| o | Verdichte veenlagen (doppleriet of gliede) |
| - | Mineraal |
| o | type 1: stagnerende klei- of leemlaag (Brabant leem, keileem, etc.); |
| o | type 2: stagnerende placic horizon; |
| o | type 3: stagnerende podzol B horizont; |
| o | type 4: stagnerende waterhardlaag; |
| o | (type 5: <i>niet of zwak stagnerende bodem/lagen</i>) |

Uit de beschikbare informatie blijkt dat voor de huidige hoogveengebieden maar zelden informatie beschikbaar is over de veenbasis, d.w.z. welke typen veenbasis voorkomen en in welk patroon. Tevens dat relatief weinig informatie bestaat over de fysische en chemische eigenschappen van de verschillende typen veenbasis (zie bijlage 1).

5.3 Typen veenbasis en hun gevoeligheid voor aantasting/afbraak

We onderscheiden twee belangrijke groepen processen die tot afbraak kunnen leiden:

- Chemisch-microbiële processen (aeroob of anaeroob) waarbij organische stof afbreekt en als gevolg waarvan de fysische eigenschappen (in het bijzonder de doorlatendheid) veranderen;
- Fysische processen, in het bijzonder krimp en scheurvorming, waardoor de doorlatendheid kan veranderen.

Verder is er een wezenlijk verschil in typen met een organische of minerale veenbasis, deze laatste zijn aanzienlijk minder gevoelig voor aantasting bij grondwaterstandverlaging. De typen minerale veenbasis 1 en 2 zijn daarbij het minst gevoelig en feitelijk dusdanig dat zij verder buiten beschouwing kunnen worden gelaten. Het belangrijkste verschil tussen minerale veenbasis en organische veenbasis ligt in de potentiële gevoeligheid voor scheurvorming bij uitdroging, die bij de minerale veenbasis afwezig is. Verder speelt de ligging van de veenbasis een rol - in de randzone van een veen of meer in de kern (zie ook hoofdstukken 1 t/m 4) - waarbij een sterkere uitdroging en sterkere microbiële afbraak mogelijk is in de randzone. Tot slot, er is weinig bekend over het fysische gedrag van veen bij uitdroging van onderaf. Ook over het fysische gedrag van veen in situaties met beperkte uitdroging en oplopende belasting door het bovenliggende pakket, in het bijzonder het mogelijke optreden van scheurvorming, is weinig bekend.

Hoewel niet voor elk type veenbasis in detail duidelijk is of deze gevoelig is voor afbraak, is toch een indeling op hoofdlijnen gemaakt.

Bij de typen *minerale veenbasis 1-4*, d.w.z. met een dichte minerale laag of mineraal-organische laag, is op tijdschalen die relevant zijn (decennia tot eeuwen) geen significant effect te verwachten. Dat geldt in het bijzonder de typen 1 en 2, en naar alle waarschijnlijkheid ook voor de typen 3 en 4 (zie voor de situaties waarbij mogelijk toch enige afbraak zou kunnen optreden en daaraan gerelateerde onderzoeksvragen 5.5). Type 5 is wel degelijk gevoelig voor afbraak, maar is niet stagnerend.

Bij een *organische veenbasis* is het in eerste instantie de vraag of er van onderaf een zodanige zwel en krimp mogelijk is dat scheurvorming optreedt (scheurvorming leidt namelijk tot verhoogde doorlatendheid en mogelijke aeratie van bovenaf). Dit vereist een combinatie van uitdroging en specifiek fysisch gedrag van die veenbasis, en wel zodanig dat scheuren kunnen ontstaan. Bij veel veensoorten leidt wateronttrekking namelijk tot verdichting van de laag en afname van de doorlatendheid, en niet zonder meer tot scheuren.

Serieuze uitdroging van een organische veenbasis 'van onderaf', aanleiding gevend tot een zodanige krimp dat scheurvorming kan optreden, lijkt bij dikke veenpakketten niet direct voor de hand te liggen. Dit vereist een heel diepe ontwatering vanwege het hoge waterhoudend vermogen van vrijwel alle venen en de naar verwachting vaak aanzienlijke capillaire stijghoogte in het onderliggende pakket. Alleen dan zal in de veenbasis een

zodanige verlaging van het vochtgehalte, c.q. de pF waarde kunnen optreden, dat krimp voldoende kan zijn voor scheurvorming (zie ook 2.3.2).

Niet duidelijk is welke variatie in fysische eigenschappen bij de 'organische veenbasis' voorkomt en welke daarmee samenhangende variatie in reactie op een grondwaterstandverlaging te verwachten is. De huidige typologie van veen als grondsoort is vooral gebaseerd op de specifieke plantenassociaties en milieucondities ten tijde van het ontstaan, maar het is de vraag of deze indeling relevant is, en of niet de reactie in sterke mate bepaald wordt door bijv. de mate van compactie en 'verwering'.

Bij grotere venen is het verder de vraag of, afgezien van de randzones, wel voldoende ontwatering optreedt voor het ontstaan van met lucht gevulde poriën. Dat lijkt voor de centrale delen van deze hoogvenen zeer onwaarschijnlijk (zie bovenstaande tekst en hydrologie van hoogveengebieden in hoofdstuk 3: type A van figuur 3.2 in paragraaf 3.2). De kans daarop lijkt alleen te bestaan bij kleine hoogveenresten en randzones, wanneer ook de wegzijging vanuit het bovenliggende veen beperkt is en een sterkere uitdroging van onder af niet uit te sluiten is (zie typen B en D in figuur 3.2 in paragraaf 3.2). Om die reden kan *aerobe microbiële afbraak* uitgesloten worden met mogelijke uitzondering van een randzone, en zal mogelijk alleen enige *anaerobe afbraak* optreden (zie 4.1 en 4.2). Overigens is maar de vraag of zo'n beperkte anaerobe afbraak groot effect heeft, gegeven de grote voorraad organische stof (zie ook 4.3).

5.4 Factoren en processen bij mogelijke aantasting/afbraak van de veenbasis: kennis en kennisleemten.

In hoofdstukken 2 t/m 4 is uitvoerig ingegaan op de diverse processen, die een rol (kunnen) spelen bij de mogelijke aantasting/afbraak van de veenbasis. In de paragrafen 2 en 3 van hoofdstuk 5 ligt het accent op de verschillen tussen de diverse typen veenbasis. Hier zal worden ingegaan op de diverse onderscheiden processen, de relevantie voor de vraagstelling en het bestaande inzicht omtrent het optreden van de bewuste processen.

Het betreft:

- Al dan niet ontstaan van een onverzadigde zone
- Scheurvorming
- Aerobe/anaerobe afbraak (chemische afbraakprocessen)
- Gasfluxen
- Waterfluxen/waterkwaliteit
- Self-sealing

In tabel 5.2 zijn de onderzoeksvragen opgesomd.

5.4.1 Ontstaan van onverzadigde zone

Het ontstaan van een onverzadigde zone heeft betekenis voor het hydrologisch functioneren van de veenbasis, en voor de mogelijkheden tot microbiële afbraak van die veenbasis en toename van wegzijging door de geringere stijghoogte van het grondwater. Geconstateerd is dat een onverzadigde zone, waarbij werkelijk lage vochtspanningen worden bereikt en maar een deel van de poriën met vocht gevuld is, zich vermoedelijk slechts bij diepe ontwatering in randzones zal voordoen, met ondergronden waarbij de capillaire stijghoogte gering is (in vergelijking met de diepte van ontwatering). Echter, het inzicht in de bodemfysische kenmerken van de diverse typen veenbasis is beperkt en

onvoldoende om meer gedetailleerde uitspraken te kunnen doen over de mogelijke aeratie als gevolg van grondwaterstands daling. Die zouden, zo mogelijk, gebaseerd moeten zijn op hydrologische modellering met gebruikmaking van meetgegevens van relevante bodemfysische parameters en met veldcontrole. Het betreft in het bijzonder situaties met organische veenbasis en met mineraal-organische veenbasis (Podzol B en waterhard).

Vraag 1: Wat is de mogelijke aeratie als gevolg van grondwaterstands daling en gegeven waarden van relevante bodemfysische parameters van de veenbasis en minerale ondergrond? (deels veld, deels experimenteel, deels modellering en rekenwerk).

Generiek steekproefsgewijs onderzoek naar de genoemde bodemfysische kenmerken van de diverse typen veenbasis en daarbij voorkomende ondergrond is van belang; 1) als basis voor een meer algemene, modelmatige inschatting van de potentiële effecten van de verlaging van stijghoogten op de inzijging bij verschillende veenbasistypen en – ondergronden, en 2) voor inschatting van de mogelijke aeratie van de veenbasis ‘vanaf de onderzijde’. Op basis hiervan kunnen verwachtingen ten aanzien van de huidige wegzijging en potentiële veranderingen in die wegzijging bij aantasting van de veenbasis, alsook van de mogelijke aeratie kwantitatief onderbouwd worden en beleidsmatige prioriteiten gesteld worden, ook bij beperkte beschikbaarheid van de gebiedsinformatie.

Het generieke onderzoek dient daarmee het volgende te omvatten:

- Karakterisering van de K-h relatie en van de pF- θ (theta) relatie van de verschillende typen veenbasis (gemiddelde en range) (experimenteel).
- Metingen van drukhoogten van grondwater op verschillende diepten t.o.v. de veenbasis (veld).
- Modelmatige inschatting van effecten van ontwatering op inzijging en aeratie bij specifieke typen veenbasis en van de effecten van veronderstelde aantasting van de veenbasis (en daarmee veranderende bodemfysische eigenschappen).

5.4.2 Scheurvorming

Uitdroging van een organische veenbasis zou in principe kunnen leiden tot scheurvorming en dus tot grote veranderingen in doorlatendheid. Ook oxidatie (en microbiële afbraak) volgt op en breidt zich vaak uit via scheurvorming.

Scheurvorming van boven af is een welbekend verschijnsel, waarbij ook andere verschijnselen kunnen optreden zoals ‘verturving’, dat wil zeggen een irreversibele uitdroging, die veroorzaakt wordt door de combinatie van scheurvorming en verregaande uitdroging (zowel door verdamping uit de scheuren, als door de plantenwortels tot het verwelkingpunt – pF 4.2) en die bij specifieke veensoorten optreedt.

Of scheurvorming van onderaf kan optreden is echter de vraag, want niet duidelijk is of verlaging van de grondwaterstand tot dusdanige verlaging van het vochtgehalte kan leiden dat serieuze krimp optreedt en compactie door belasting het volumeverlies niet kan compenseren. Een en ander kan experimenteel worden vastgesteld middels proeven waarbij de relatie tussen *krimp*, watergehalte en pF waarde wordt vastgelegd. Op deze wijze kan ook de relatie tussen optreden van *scheuring* en watergehalte/pF waarde worden vastgesteld. . Rekening dient daarbij gehouden te worden met de complexe relatie tussen de *interne weerstand* (vervormbaarheid/plasticiteit), de *belasting* (druk van de bovenliggende kolom), de *dichtheid* (compactie) en het *vochtgehalte*. Immers, onder invloed van het gewicht van de bovenliggende kolom kan het veen, indien voldoende plastisch, gecompacteerd worden en de dichtheid toenemen, waarbij geen scheuring optreedt maar wel degelijk krimp, maar dan alleen in verticale zin.

Vraag 2a: Wat is de relatie tussen krimp, watergehalte en pF-waarde en idem voor de relatie tussen scheuring en watergehalte/pF-waarde? (experimenteel).

Beoordeling van de potentiële rol van uitdroging in termen van 'scheurvorming van onderaf' is alleen mogelijk bij een beter inzicht in het bodemfysische gedrag van veen bij uitdroging, de variatie daarin en de range van waarden, die kunnen voorkomen in de veenbasis bij uitdroging. De verwachting is, dat aanzienlijke verschillen voorkomen tussen verschillende veentypen (een goede typologie van de organische veenbasis moet het resultaat zijn van het beantwoorden van de onderzoeksvraag), maar ook dat het vooralsnog twijfelachtig is of bij uitdroging van onderaf grenswaarden voor het optreden van scheuring worden overschreden. Dit laatste stoelt op het feit, dat geen gevallen bekend/gerapporteerd zijn van scheurvorming ontstaan door uitdroging van onderaf.

Vraag 2b: Wat is de variatie in het bodemfysische gedrag van de veenbasis bij uitdroging? (experimenteel).

5.4.3 Chemische afbraakprocessen (aerobe/anaerobe afbraak)

Aerobe afbraak veronderstelt de aanwezigheid van zuurstof en mogelijkheid tot diffusief gastransport, d.w.z. een poriënsysteem dat maar beperkt gevuld is met water, waardoor gasdiffusie mogelijk is. De zuurstofflux moet daarbij zodanig groot zijn, dat van serieuze afbraak sprake kan zijn in termen van de verhouding tussen de flux en de voorraad organische stof. Daar waar het bovenliggende veenpakket nog (op zijn minst ten dele) met water verzadigd is, is het zeer onwaarschijnlijk dat aerobe afbraak kan optreden in en onder de veenbasis.

Overwegingen hierbij zijn dat het zeer de vraag is of gasdiffusie van enige betekenis kan optreden, maar bovendien blijkt dat in humeuze, vochtige bovengronden de zuurstofconsumptie dermate hoog is, dat beneden de bouwvoor al anaërobie optreedt. Als enige mogelijke uitzondering worden randzones met zeer diepe ontwatering gezien, grenzend aan relatief droge en humusarme bodems. Deze verwachtingen kunnen getoetst worden door onderzoek naar de hoeveelheid en samenstelling van de bodemlucht in een transect over de randzone van een sterk en diep ontwaterd veen.

Vraag 3a: Is gasdiffusie in een zodanige flux mogelijk dat daardoor aerobe afbraak onder de veenbasis plaats kan vinden? (veld).

Anaerobe afbraak veronderstelt de aanwezigheid van elektronenacceptoren en een flux daarvan van voldoende omvang om significante afbraak mogelijk te maken. Deze afbraak is daarmee sterk flux-afhankelijk en de hydrologische flux door de veenbasis is in principe gering tot vrijwel nihil. Daarbij komt dat de microbiële afbraak sterk belemmerd wordt door de lage porositeit, zowel in organische als in minerale stagnerende veenbasissen, waarmee de afbraak sterk afhankelijk wordt van diffusie (zie paragraaf 4.1).

Bij verdroging van bovenaf zal mogelijk de verticale flux en concentratie van elektronenacceptoren kunnen toenemen en bij voldoende doorlatendheid van de veenbasis tot een verhoogde anaerobe afbraak van deze veenbasis kunnen leiden. Echter, ook hier is de vraag of niet al boven de veenbasis sprake is van een dusdanige consumptie van elektronenacceptoren, die met het inzijgende water worden aangevoerd, dat in de veenbasis zelf nauwelijks meer anaerobe afbraak kan optreden. Niet uitgesloten is echter dat verhoogde fluxen wel degelijk een rol spelen bij dunne veenpakketten en in de randzones. Ook hier is toetsing middels metingen in een dergelijke randzone mogelijk.

Vraag 3b: Speelt een verhoogde verticale flux een rol bij toename van elektronenacceptoren en verhoogde anaerobe afbraak van de veenbasis? (veld).

Effecten zijn mogelijk ook te verwachten van veranderingen in de hydrologie, die tot gevolg hebben dat de laterale afvoer van 'veenwater' met lage concentraties van electronenacceptoren afneemt en in de randzones relatief meer water vanuit aangrenzende landbouwgebieden wordt aangevoerd met veel hogere concentraties nutriënten (electronenacceptoren). Deze situatie wordt verbeeld in figuur 4.1 en zou tot mogelijk versterkte anaerobe afbraak van de veenbasis kunnen leiden, mits deze inderdaad in contact staat met dergelijk lateraal aangevoerd water. Ook deze mogelijkheid kan worden getoetst middels een transectonderzoek in een randzone van een veen met aangrenzend landbouwgebied, van waaruit aanvoer van grondwater richting veen optreedt. Het moet dan gaan om een veen met voldoende electronenacceptoren in het aangevoerde grondwater waardoor hydrochemische metingen van het bodemwater (o.a. CH₄-concentraties) noodzakelijk zijn (zie ook paragraaf 5.4.5).

Vraag 3c: In hoeverre hebben veranderingen in de hydrologie, met name aanvoer van water uit aangrenzende landbouwgebieden met hogere concentraties nutriënten (electronenacceptoren) een rol in versterkte afbraak van de veenbasis? (veld en laboratoriumanalyses).

5.4.4 Gasfluxen en afbraak

Gasfluxen kunnen in principe het gevolg zijn van gasdiffusie samenhangend met concentratiegradiënten (denk aan uitwisseling van CO₂ in de bodemlucht met de atmosfeer), maar ook van fluctuaties in de grondwaterstand, waarbij bodemlucht wordt uitgedreven of juist wordt 'ingezogen' door drukverschillen die ontstaan in relatie tot stijging of daling van het grondwater. Het gaat hierbij om potentieel wezenlijke gasfluxen, zeker wanneer de fluctuaties groot zijn.

Deze 'ademhaling' zou in principe tot aanvoer van zuurstof in de veenbasis kunnen leiden vanuit de randzone naar binnen, gegeven het feit dat gasfluxen vanuit het bovenliggende veenpakket door de veenbasis niet mogelijk zijn (bij afwezigheid van scheuren). Echter, rekening houdend met de snelle consumptie van zuurstof door aerobe afbraak in een zeer humeuze, vochtige bodem (zie ook hoofdstuk 4) is het onwaarschijnlijk dat de zijdelingse zuurstofflux voldoende groot is om ook dieper het veengebied in aerobe condities te laten ontstaan, dat wil zeggen verder dan de randzone.

Potentiële zuurstoffluxen zijn vrij gemakkelijk in te schatten op basis van het poriënvolume en de vochtgehalten van de bodem in de zone van de grondwaterfluctuaties, in combinatie met de optredende fluctuaties. Op basis hiervan kan eveneens makkelijk berekend worden welke hoeveelheid organische stof per tijdseenheid afgebroken kan worden en zo kan een inschatting gemaakt worden van de potentiële effecten van de 'ademhaling'.

Vraag 4a: Wat zijn de potentiële zuurstoffluxen, welke hoeveelheid organische stof kan per tijdseenheid afgebroken worden en wat is het potentiële effect van 'ademhaling'? (rekenwerk).

Toetsing van de uitkomsten is ook hier mogelijk door metingen over een transect in de randzone van een veen met diepe ontwatering en aanzienlijke seizoensgebonden grondwaterfluctuaties. Overigens hangt de flux dus sterk af van de fluctuaties in grondwaterstand en zal deze zeer beperkt blijven wanneer slootpeilbeheer en drainagesystemen in het aangrenzende gebied juist zorgen voor geringe fluctuaties.

Vraag 4b: Wat is de invloed van de gasfluxen die het gevolg zijn van gasdiffusie samenhangend met concentratiegradiënten ('ademhaling')? (veld).

5.4.5 Waterfluxen en –kwaliteit in relatie tot afbraak

Speelt bij aerobe afbraak de gasflux een grote rol, bij anaerobe afbraak is dat de waterflux en –kwaliteit. Immers, de aanvoer van elektronenacceptoren, die bepalend zijn voor de anaerobe afbraak wordt in hoge mate bepaald door de waterflux en concentratie van deze stoffen in het water. Het betreft o.a. nitraat en sulfaat, die in verhoogde concentraties in uit landbouwgebieden aanwezig grondwater kunnen voorkomen, maar ook door versnelde afbraak van veen/organische stof in het inzijgende water aanwezig kunnen zijn. Anaerobe afbraak, indien van enige betekenis, kan tot afbraak van de veenbasis leiden en daarmee tot toename van de waterflux en zodoende de verdere afbraak aanjagen.

In een intacte veenbasis zal in het algemeen de waterflux dusdanig gering zijn en de porositeit zo laag, dat mobilisatie en afbraak van organisch materiaal door diffusie wordt bepaald en daarmee verwaarloosbaar is (zie o.a. paragrafen 4.1 en 4.2). Echter, in veensystemen, die ook van uitdroging van bovenaf te lijden hebben gehad en als gevolg daarvan een minder stagnerende veenbasis hebben, dan wel een veenbasis die van zichzelf al minder stagnerend is (type 5), zal de flux groter zijn en kan mogelijk wel degelijk anaerobe afbraak optreden. Ook voor randzones waar grondwater rijk aan elektronenacceptoren (o.a. NO_3 en SO_4) wordt aangevoerd onder de veenbasis, zal eerder anaerobe afbraak te verwachten zijn (zie ook 4.3).

Anaerobe afbraak in en onder de veenbasis moet leiden tot o.a. verhoogde concentraties aan CO_2 en CH_4 , en tot verlaging van de concentraties elektronenacceptoren, hetgeen in principe via metingen van bodemwater en CH_4 concentraties in peilbuizen en/of lysimeters mogelijk is. Ook hier ligt de keuze van een transect over een randzone voor de hand, waarbij vanuit aangrenzende landbouwgebieden 'rijk' water wordt aangevoerd **(zie vraag 3)**.

5.4.6 Self-sealing

Self-sealing kan worden beschreven als het proces waarbij mobiele disperse organische stof via inzijgend water naar diepere lagen wordt getransporteerd, waar het accumuleert en poriën opvult met als resultaat een afnemende doorlatendheid. Een dergelijk proces leidde o.m. tot vorming van dopplerieslagen (in een organische veenbasis), maar ook tot de vorming van waterhard (minerale veenbasis, type 4). Niet uitgesloten kan worden dat bij afbraak van veen boven de veenbasis dergelijke mobiele organische stof ontstaat of reeds aanwezige dopplerieslagen wordt gemobiliseerd en vervolgens via inzijgend water de veenbasis in wordt getransporteerd, waar het kan accumuleren. Met andere woorden, of verhoogde afbraak en wegzijging altijd tot aantasting van de veenbasis 'van bovenaf' leidt dan wel gecompenseerd kan worden door inspoeling van disperse organische stof en daardoor veroorzaakte verdichting, en onder welke omstandigheden dit zou kunnen optreden, is niet zeker.

De hier beschreven potentiële self-sealing heeft betrekking op afbraak 'van bovenaf' en niet op afbraak 'van onderaf', omdat het gaat om aanvoer van disperse humus via inzijgend water. Het gedrag van deze disperse organische stof speelt echter ook bij de eerder beschreven microbiële afbraak in de veenbasis een grote rol (zie hoofdstuk 4): die wordt vooral geremd door de dominantie van transport van substraat via diffusie, die bij lage oplosbaarheid gering is. Echter, of onder het traject van mogelijke condities in de veenbasis (pH, elektrolytgehalte, etc.) deze van oorsprong disperse organische stof mobiel kan worden, is niet bekend.

Speelt bij afbraak 'van bovenaf' de mogelijke productie van mobiele disperse organische stof en de mobiliteit van reeds aanwezige disperse organische stof, bij afbraak 'van onder af' is eveneens dat laatste – mobiliteit – van belang, alsook de condities die deze bepalen.

Overigens geldt dit ook voor situaties, waarbij grondwaterstanden door hydrologische ingrepen worden verhoogd en mogelijk vorming van disperse organische stof wordt geïnitieerd. De vraag is daarbij of in dergelijke situaties migratie van deze disperse organische stof tot verdichting kan leiden⁶

Vraag 5a: Kan bij afbraak van bovenaf (door verhoging grondwaterstanden) en onderaf de vorming van disperse organische stof worden geïnitieerd hetgeen tot verdichting zou kunnen leiden? (experimenteel en veld).

Samenvattend, inzicht in de mobiliteit van disperse organische stof en condities die deze bepalen is van groot belang voor een beter begrip van de potentiële afbraak van deze organische stof in typen veenbasis waarin dergelijke organische stof een dominante rol speelt bij de reductie van de doorlatendheid, maar ook voor de potentiële betekenis van deze disperse humus bij zowel vernatting als verdroging van hoogvenen en potenties voor het optreden van self-sealing.

Experimenteel onderzoek naar het gedrag van disperse organische stof – bij voorkeur van meerdere typen veenbasis – is goed mogelijk, waarbij grenswaarden voor mobiliteit en neerslag kunnen worden vastgesteld en in te verwachten gedrag in diverse typen veenbasis en bij verschillende hydrologische situaties kan worden vertaald. Daarnaast zou op specifieke locaties kunnen worden onderzocht welke fluxen van disperse organische stof optreden, bijv. bij zowel verdroogde venen als bij veenherstelprojecten. Verder is mogelijk elders (Duitsland)⁷ al onderzoek verricht naar de mogelijke self-sealing en daaraan gekoppeld de productie en het gedrag van de disperse organische stof.⁸

Vraag 5b: Wat is het gedrag van disperse organische stof (in meerdere typen veenbasis; en is de botanische samenstelling van de gliede te relateren aan de fysische eigenschappen hiervan) en kunnen grenswaarden voor mobiliteit en neerslag worden vastgesteld? Welke fluxen van disperse organische stof treden op? (experimenteel en veld).

Het bovenstaande betekent ook laboratorium onderzoek van een reeks van materialen (doppliet, gliede, waterhard en podzol B met monomorfe coatings) op 'mobiliteit' van deze organische stof in relatie tot relevante chemische parameters. Daarnaast voor diverse typen organische veenbasis⁹ onderzoek naar fysische parameters zoals plasticiteit etc. die de reactie bij belasting onder verschillende watergehaltes bepalen (i.v.m. krimp en scheurvorming). Dit laatste over relevante delen van trajecten in bijv. druk, vochtgehalte en compactie.

Experimenteel onderzoek naar de microbiële afbreekbaarheid van de disperse organische stof heeft alleen zin wanneer de feitelijke condities in de veenbasis kunnen worden geïmiteerd, een voorwaarde die qua uitvoering als problematisch kan worden gezien.

Tot slot, de vraag naar de voorwaarden voor productie van disperse organische stof via afbraak van meer of minder geconserveerde plantendelen, in het bijzonder naar de effecten van verdroging en vernatting op deze productie, kan niet beantwoord worden

⁶ Casparie heeft aangegeven dat doppliet werd afgezet in scheuren, wat een specifieke vorm van self-sealing is. Dat ging wel om oude scheuren (duizenden jaren), maar desondanks kan dit een belangrijk aspect zijn.

⁷ In Duitsland is veel onderzoek uitgevoerd naar behoud en herstel van hoogveen door leden van de DGMT (Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde). De DGMT heeft een eigen tijdschrift (TELMA) waarin resultaten worden gepubliceerd, ook op het gebied van nieuwe veenvorming.

⁸ Veldsituaties, waarbij mogelijk herstel via afbraakprocessen met gliedevorming en self-sealing bestudeerd kunnen worden, kunnen gevonden worden bij waterbekkens in het Bargerveen en wellicht in gescheurde venen in het Wierdense Veld.

⁹ In paragraaf 3.3.6 wordt ingegaan op de mogelijke relatie tussen botanische samenstelling en fysische en fysisch-chemische kenmerken van de gliede.

zonder een uitgebreid onderzoek, d.w.z. van verschillende typen veen en verschillende veranderingen in hydrologische regimes. Bovendien is de vraag of dit – vorming van disperse organische stof via afbraak – met een kortlopend monitoringsprogramma vastgesteld kan worden. Vandaar dat van een dergelijk onderzoek – productie van disperse organische stof – wordt afgezien en uitgegaan wordt van de reeds aanwezige disperse organische stof.

5.5 Gebiedsspecifieke kennisleemten

In 5.4 zijn de generieke onderzoeksvragen weergegeven (vetgedrukt) die voortkomen uit de kennisverhelderingsactie. Daarnaast zijn antwoorden op gebiedsspecifieke vragen nodig. Deze gaan allen over de kenmerken, ruimtelijke variabiliteit, fysische parameters en wegzijging van de veenbasis.

Gebiedsspecifiek onderzoek is vereist naar:

1. Ruimtelijke patronen in typen veenbasis (waar komt welk type veenbasis voor?);
2. Bodemfysische kenmerken van de diverse typen veenbasis en hun minerale ondergronden (in het bijzonder Ksat, capillaire stijghoogte en relatie tussen vochtspanning en watergevuuld poriënvolume);
3. Ruimtelijke patronen in grondwaterstanden en –fluctuaties en vochtspanningen in de onverzadigde zone. Hierbij ligt de nadruk op randzones en dunne, min of meer verdroogde hoogvenen.

Ad 1: Niet of zeer onvoldoende bekend is welke veenbasis voorkomt in de Nederlandse hoogvenen en welke ruimtelijke variatie daarin optreedt.

Ad 2: Evenmin is bekend hoe deze verschillende typen veenbasis bodemfysisch gekarakteriseerd kunnen worden en de mate van wegzijging beïnvloeden. Om die reden geldt vooralsnog het voorzorgsprincipe en moet vanwege de NB-wet 1998 aan de eis van 'stijghoogte tot boven de veenbasis' voldaan worden voor zover het hoogveendoelstellingen in N2000-gebieden betreft.

Ad 3: Een meer modelmatige inschatting van de variaties in vochttoestand in de veenbasis (verzadiging, spanning) op lokaal en meer regionaal niveau is niet goed mogelijk vanwege een (zeer) gebrekkige kennis van de huidige en voormalige grondwaterstanden, de mate van wegzijging door de veenbasis en de bodemfysische kenmerken van de onder de veenbasis aanwezige minerale ondergrond.

5.6 Slotopmerkingen

De kennisverhelderingsactie, die in dit rapport centraal staat, betreft de mogelijke aantasting van de veenbasis 'van onderaf' bij verlaging van de grondwaterstand en daaruit resulterende problemen voor behoud en herstel van hoogvenen.

Van groot belang is het besef dat ook bij een niet aangetaste veenbasis het veenpakket boven de veenbasis kan worden aangetast, bijvoorbeeld door:

- versnelde laterale afvoer via oppervlakkige drainage leidend tot verdroging van het bovenste veenpakket;
- verzuring en eutrofiëring door atmosferische depositie gepaard gaande met versterkte anaerobe afbraak in de veenondergrond;

Alleen al vanwege deze niet aan aantasting van de veenbasis gerelateerde problemen kan een verhoging van de grondwaterspiegel tot in het veenpakket noodzakelijk zijn voor herstel en behoud van een hoogveenecosysteem.

Tot nu toe wordt aangenomen dat de aantasting van de veenbasis - door toename van de doorlatendheid - mogelijk leidt tot versterkte wegzijging en daardoor tot al dan niet seizoensgebonden verdroging van het bovenliggende veen. Een tweede aanname is dat verhoging van het grondwaterpeil een dergelijke aantasting afremt, stopzet of zelfs resulteert in self-sealing en daarmee gepaard gaande sterkere vernatting, kortom behoud en herstel van het hoogveensysteem bevordert. Systematisch onderzoek dat deze aanname ondersteunt ontbreekt.

Het doel van deze kennisverhelderingsactie is na te gaan of deze twee aannames wetenschappelijk kunnen worden onderbouwd.

Wanneer uit het vervolgonderzoek mocht blijken dat de aantasting van de veenbasis zich beperkt tot de randzones en specifieke typen veenbasis, dan mag hieruit *niet* de conclusie worden getrokken dat verhoging van de grondwaterstand niet noodzakelijk is. Immers:

1. Afbraak van organische stof is een voortschrijdend proces, zelfs wanneer de afbraak zich in de actuele situatie beperkt tot de randzone of in dunne veenpakketten; het zet zich op termijn door naar de kern van het hoogveengebied;
2. Randzones zijn cruciaal voor het hydrologisch functioneren van hoogvenen (Schouten 2002). Beperking van de afbraak van de veenbasis in randzones en in dunne hoogvenen (typen B, C en D in figuur 3.2, paragraaf 3.2) vraagt naar alle waarschijnlijkheid om een grondwaterstandsverhoging tot in of boven de veenbasis.

Zoals gezegd is de aard van de veenbasis bepalend voor het al dan niet optreden van gedaalde freatische veenwaterstanden tot onder die veenbasis. Voor hoogvenen met een stagnerende minerale laag als veenbasis – een type dat niet gevoelig is voor afbraak – zal verhoging van stijghoogte/grondwaterstand in de minerale ondergrond onder het veen tot in die veenbasis nauwelijks of geen effect hebben. Voor zover dat wel het geval is zal dat effect echter veel kleiner zijn dan dat van aantasting van het hoogveen 'van bovenaf' door bijvoorbeeld vermesting of drainage. Dit onderstreept nogmaals het belang van een grondige gebiedsgewijze inventarisatie van de veenbasis ter voorbereiding van plannen voor beheer en herstel.

Tabel 5.2: Onderzoeksvragen 'aantasting van de veenbasis', uitgebreide tekst in paragraaf 5.4.			
Nr.	Vraag	Type onderzoek	Overige opmerkingen
1a	<u>Onverzadigde zone.</u> Wat is de mogelijke aeratie als gevolg van grondwaterstandsval en gegeven de waarden van relevante bodemfysische parameters van de veenbasis en minerale ondergrond? Metingen van drukhoogten van grondwater op verschillende diepten t.o.v. de veenbasis. Berekeningen toe- of afname	Deels veld, deels experimenteel (K-h/pF- θ - relaties), deels modellering. Veldmetingen	Beperking tot randen, situaties met organische veenbasis en met mineraal-organische veenbasis en bij ondergronden met geringe capillaire stijghoogte. Uit te voeren voor relevante situaties en typen veenbasis

	wegzijing met verkregen metingen.		
2a	<u>Krimp, zetting en scheurvorming.</u> Wat is de relatie tussen krimp, watergehalte en pF-waarde en idem voor de relatie tussen scheuring en watergehalte/pF-waarde?	Experimenteel.	Rekening houden met interne weerstand, dichtheid (compactie) en vochtgehalte.
2b	<u>Krimp, zetting en scheurvorming.</u> Wat is de variatie in het bodemfysische gedrag van de veenbasis bij uitdroging?	Experimenteel.	Een goede typologie van de veenbasis moet hier het resultaat van zijn - welke soorten veenbasis komen voor en wat is de gevoeligheid voor scheurvorming.
3a	<u>Aerobe/anaerobe afbraak.</u> Is gasdiffusie in een zodanige flux mogelijk dat daardoor aerobe afbraak onder de veenbasis plaats kan vinden?	Veld.	Randzones met zeer diepe ontwatering, grenzend aan droge en humusarme bodems. Transect over de randzone - onderzoek naar hoeveelheid en samenstelling van de bodemlucht.
3b	<u>Aerobe/anaerobe afbraak.</u> Speelt een verhoogde verticale flux een rol bij toename van electronenacceptoren en verhoogde anaerobe afbraak van de veenbasis?	Veld.	Dusdanige consumptie boven de veenbasis van electronenacceptoren dat er geen anaerobe afbraak meer is? Dunne veenpakketten en randzones. Onderzoek in transect middels metingen.
3c	<u>Aerobe/anaerobe afbraak door gas- en waterfluxen.</u> In hoeverre hebben veranderingen in de hydrologie, met name aanvoer van water uit aangrenzende landbouwgebieden met hogere concentraties nutriënten (electronenacceptoren) een rol in versterkte afbraak van de veenbasis?	Veld en laboratoriumanalyses.	Toetsing door transectonderzoek in randzone van veen met aangrenzend landbouwgebied. Hydrochemische metingen in bodemwater (o.a. CH ₄ -concentraties).
4a	<u>Aerobe/anaerobe afbraak, gasfluxen.</u> Wat zijn de potentiële zuurstoffluxen, welke hoeveelheid organische stof kan per tijdseenheid afgebroken worden en wat is het potentiële effect van de 'ademhaling'?	Rekenwerk.	Op basis van het poriënvolume, vochtgehalten van de bodem in de zone van de grondwaterfluctuaties en in combinatie met de optredende fluctuaties.

4b	<u>Aerobe/anaerobe afbraak, gasfluxen.</u> Wat is de invloed van de gasfluxen die het gevolg zijn van gasdiffusie samenhangend met concentratiegradiënten ('ademhaling')?	Veld.	Toetsing van het rekenwerk van 4a d.m.v. metingen randzone veen met diepe ontwatering en aanzienlijke seizoensgebonden grondwaterfluctuaties.
5a	<u>Self-sealing.</u> Kan bij afbraak van bovenaf (door verhoging grondwaterstanden) en onderaf de vorming van disperse organische stof worden geïnitieerd hetgeen tot verdichting zou kunnen leiden?	Experimenteel en veld.	Wat zijn de condities en mobiliteit?
5b	<u>Self-sealing.</u> Wat is het gedrag van disperse organische stof (in meerdere typen veenbasis; en is de botanische samenstelling van de gliede te relateren aan de fysische eigenschappen hiervan) en kunnen grenswaarden voor mobiliteit en neerslag worden vastgesteld? Welke fluxen van disperse organische stof treden op?	Experimenteel en veld.	Te verwachten gedrag in diverse typen veenbasis en bij verschillende hydrologische situaties kunnen worden vertaald. Zowel bij verdroogde venen als bij veenherstelprojecten. Eerst literatuuronderzoek Duitsland.

6 Geraadpleegde en geciteerde literatuur

- Asmuth J. von, Grootjans A.P., Schaaf S. van der & K. Maas 2010. Weerstand en wegzijging in natte natuurgebieden, schatting via analyse van gemeten (grond)waterpeilen.
- Asmuth J. von, Grootjans A.P. & S. van der Schaaf 2011. Over de dynamiek van peilen en fluxen in vennen en veentjes - Eindrapport deel 2, OBN-onderzoek 'Herstel van biodiversiteit en landschapsecologische relaties in het natte zandlandschap'. O+BN rapport 147-2-NZ.
- Asmuth J. Von, Schaaf S. van der, Grootjans A.P., Maas K. 2012. Vennen en veentjes: (niet-)ideale systemen voor niet-lineaire tijdreeksmodellen. *Stromingen* 18 (2), 97-112.
- Arah, J.R.M., Vinten A.J.A. 1995. Simplified models of anoxia and denitrification in aggregated and simple-structured soils. *European Journal of Soil Science* 46, 507-517.
- Baaijens G.J., Molen P. van der, Grootjans A., Kiestra E., Lanting A. 2011. Herstel van biodiversiteit en landschapsecologische relaties in het natte zandlandschap. Eindrapport deel 1a.
- Bakker H. De, Schelling J. 1989. Systeem voor bodemclassificatie. 2e gewijzigde druk. Wageningen.
- Bakker H. de. 1990. Hoofdstuk 3: Het bodemprofiel. *Bodemkunde van Nederland; deel 1, Algemene bodemkunde*. W. P. Locher and H. de Bakker. Den Bosch, Malmberg.
- Bakker M.A.J., Otter C. de, Weerts H.J.T. 2003. Formatie van Drente In: *Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond*. Utrecht, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO.
- Baldock J.A., Skjemstad J.O. 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry* 31, 697-710.
- Bannink M., Dekker L., Hendrickx J., Ommen H. van. 1989. Wegzijging van water uit hooggelegen vennen: een gevoeligheidsanalyse. *H2O* nr. 15, pag. 436 t/m 459.
- Bazelmans J., Hoogendoorn B., Meulen M. van der, Vos P., Weerts H.J.T., 2011. *Atlas van Nederland in het Holoceen*. Amsterdam, Bert Bakker.
- Bouma J., Locher W.P. 1990. Hoofdstuk 9: Binding van water. *Bodemkunde van Nederland; deel 1, Algemene bodemkunde*. W. P. Locher and H. de Bakker. Den Bosch, Malmberg.
- Breemen N. van, Buurman P. 1998. *Soil Formation*. Kluwer Academic Publishers

- Busschers F.S., Weerts H.J.T. 2003. Formatie van Kreftenheye In: Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond. Utrecht, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO.
- Buurman P., Jongmans A.G. 2002. Podzolization – an additional paradigm. *Edafologia* 9 , 107-114.
- Buurman P., Jongmans A.G. 2005. Podzolization and soil organic matter dynamics. *Geoderma* 125, 71-83
- Cammeraat L.H., Sevink J., Vlaming M. 2008. Doorlaatbaarheidbepalingen podzol B Laarder Wasmeren, 6 april 2008. IBED Rapport in opdracht van Waternet. 4 blz.
- Dekker L.W., Wösten J.H.M. 1983. Hydrologische gevolgen van het losmaken van humuspodzol-B-Horizonten op de Elspeetsche heide en het Rozendaalsche zand. Wageningen, Stichting voor bodemkartering. Stiboka-rapport 1674.
- Dekker L.W., Bannink J.F., Booij A.H. 1986. Bodemkundig en bodemfysisch onderzoek naar de invloed van grondwaterstandsverlaging op wegzijging van water uit vennen nabij Sellingen. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering. Stiboka Rapport 1859.
- Dekker L.W., Booij A.H., Vroon H.R.J., Koopman G.J. 1991. Waterhardlagen: indicatoren van een voormalig veendek. *Grondboor en Hamer*, 25-30
- Dekker L.W. 1998. Moisture variability resulting from water repellency in Dutch soils. PhD Thesis, Wageningen University, the Netherlands.
- Dekkers, J.M.J., J. Stolte & J.H.M. Wösten. 1991. De doorlatendheid van de bodem in het natuurgebied "Beerzerveld". De onverzadigde doorlatendheid van de kazige B-horizont. Rapport 15. Staring Centrum, Wageningen.
- Duinen, G.A. van, 2013. Rehabilitation of aquatic invertebrate communities in raised bog landscapes. PhD thesis, Radboud University Nijmegen, the Netherlands.
- Dungait J.A.J., Hopkins D.W., Gregory A.S., Whitmore A.P. 2012. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology* 18, 1781-1796.
- Farmer V.C., Skjemstad J.O., Thompson C.H. 1983. Genesis of humus B horizons in hydromorphic humus podzols. *Nature* 304, 342-344.
- Farmer V.C., Lumsdon D.G. 2002. A re-interpretation of 'Aluminium solubility mechanisms in moderately acid Bs horizons of podzolized soils' by Gustafsson et al. *European Journal of Soil Science* 53, 671-674.
- Franzén L.G., Malmgren B.A. 2011. Microscopic charcoal and tar (CHAT) particles in peat: a 6500-year record of palaeo-fires in southern Sweden.
- Freijer J.I. 1994. Mineralization of hydrocarbons and gas dynamics in oil contaminated soils: experiments and modeling. PhD-thesis.

Hees P.A.W. van, Lundström U.S., Giesler R. 2000. Low molecular weight organic acids and their Al-complexes in soil solution-composition, distribution and seasonal variation in three podzolized soils. *Geoderma* 94, 173-200.

Heuveln B. van. 1962. Organic B in high moor peat and high moor peat reclamation soils. *Boor en Spade* XII, 169-177.

Jansen A.J.M., J.H. Bouwman & J. Sevink. 2013a. Waterlandschap Hoge Veluwe: visie op de natte gebieden in het Nationale Park de Hoge Veluwe. Unie van Bosgroepen, Ede, The Netherlands. 52 blz.

Jansen A.J.M., J. von Asmuth, P.T.J. van Bakel, E. Brouwer, R.J. Ketelaar & R.L. Terhürne, 2013b. De Engbertsdijkerven: advies van de Commissie van Deskundigen. Rapport, Unie van Bosgroepen.

Jansen A.J.M., R. Ketelaar, J. Limpens, M.G. Schouten & L. van Tweel-Groot. 2013c. Kartering van de habitattypen Actief en Herstellend hoogveen in Nederland. Rapport nr. 2013/OBN182-NZ. Bosschap, Driebergen en Programmadirectie Natura 2000, Ministerie van Economische Zaken, Den Haag.

Joosten, J. H.J. 1993. Denken wie ein Hochmoor: hydrologische Selbstregulation von Hochmooren und deren Bedeutung für Wiedernassung und Restauration. *Telma* 23: 95-115.

Joosten, J. H.J. & T.W.M. Bakker 1987. De Groote Peel in verleden, heden en toekomst. Rapport 88-4. Staatsbosbeheer, Utrecht.

Kaczorek D., Sommer M., Andruschkewitsch I., Oktaba L., Czerwinski Z., Stahr K. 2004. A comparative micromorphological and chemical study of 'Raseneisenstein' (bog iron ore) and 'Ortstein'. *Geoderma* 121, 83-94

Kemmers R.H. en G.F. Koopmans, 2009. Het effect van toepassing van onderwaterdrains op interne eutrofiering en veenaafbraak; literatuuronderzoek. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 1980. 76 blz.

Kemmers R.H., Delft S.P.J. van, Riel M.C. van, Hommel P.W.F.M., Jansen A.J.M., Klaver B., Loeb R., Runhaar J., Smeenge H. 2011. Landschapsleutel; Leidraad voor natuurontwikkeling. Wageningen, Alterra, onderdeel van Wageningen UR. Alterra-rapport 2140.

Koopman G.J. 1986. Waterhard: wat het is en wat er hard aan is: een studie van het genomen "waterhard" in het Amsterdamsche Veld bij Erica (Drente). MSc thesis, Groningen,

Koopman G.J. 1988. "Waterhard": a hard brown layer in sand below peat, The Netherlands. *Geoderma*, 42, 147-157.

Larmola, T., Tuittila, E.S., Tirola, M., Nykanen, H., Martikainen, P.J., Yrjala, K., Tuomivirta, T., Fritze, H., 2010. The role of Sphagnum mosses in the methane cycling of a boreal mire. *Ecology* 91, 2356-2365.

- Larmolaa T., Leppänen S.M., Tuittila E.S., Aarva M., Merilä P., Fritze H., Tirola M. 2014. Methanotrophy induces nitrogen fixation during peatland development. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2014 Jan 14;111(2):734-9
- McBride M.B. 1994 Environmental chemistry of soils. Oxford University Press, New York.
- McKeague J. A., Wang C. 1980. Micromorphology and energydispersive analysis of ortstein horizons of podzolic soils from New Brunswick and Nova Scotia, Canada. *Can. J. Soil Sci.* 60, 9-21.
- Monard C., Mchergui C., Nunan N., Martin-Laurent F., Vieublé-Gonod L. 2012. Impact of soil matric potential on the fine-scale spatial distribution and activity of specific microbial degrader communities. *FEMS Microbiol Ecol* 81, 673–683.
- Moyano F.E., Manzoni S., Chenu C. 2013. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology & Biochemistry* 59, 72-85.
- Or D., Smets B.F., Wraith J.M., Dechesne A., Friedman S.P. 2007. Physical constraints affecting bacterial habitats and activity in unsaturated porous media – a review. *Advances in Water Resources* 30, 1505–1527.
- Robroek, B.J.M. 2007. Competition between *Sphagnum* mosses in European raised bogs. The effects of a changing climate. Proefschrift Wageningen Universiteit. Wageningen.
- Rodrigo A., Recous S., Neel C., Mary B. 1997. Modelling temperature and moisture effects on C–N transformations in soils: comparison of nine models *Ecological Modelling* 102, 325–339.
- Rubol S., Manzoni S., Bellin A., Porporato A. 2013. Modelling soil moisture and oxygen effects on soil biogeochemical cycles including dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA), *Advances in Water Resources*.
- Schaaf S. van der. 2002 Bog Hydrology. In: Schouten, M.G.C. (Ed.). *Conservation and Restoration of Raised Bogs: geological, hydrological and ecological studies*, pp. 54-109. Dúchas, Dublin, Staatsbosbeheer Driebergen, Geol. Survey of Ireland, Dublin.
- Schaaf, S. van der, Streefkerk J.G. 2002. Relationships between biotic and abiotic conditions. In: Schouten, M.G.C. (ed.): *Conservation and Restoration of Raised Bogs: geological, hydrological and ecological studies*, pp. 54-109. Dúchas, Dublin, Staatsbosbeheer Driebergen, Geol. Survey of Ireland, Dublin.
- Schaaf, S. van der. 2005. Intern hydrologisch onderzoek; in: Tomassen, H., G.J. van Duinen, F. Smolders, E. Brouwer, S. van der Schaaf, G. van Wirdum, H. Esselink en J. Roelofs (red), *Vooronderzoek Wierdense Veld: Eindrapportage mei 2005*; Onderzoek-centrum B-ware, Stichting Bargerveen, Wageningen Universiteit, NITG-TNO & Radboud Universiteit Nijmegen, pag 15-25.
- Scheel T., Dörfler C., Kalbitz K. 2007. Precipitation of dissolved organic matter by Al stabilizes carbon in acidic forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 64-74.

- Scheel T., Jansen B., van Wijk, A. J., Verstraten, J. M., Kalbitz K. 2008. Stabilization of dissolved organic matter by aluminium – A toxic effect or stabilization through precipitation? *Eur. J. Soil Sci.* 59, 1122-1132.
- Schipper P., Siebel H. 2009. Index Natuur en Landschap, Onderdeel natuurbeheertypen; Versie 0.4 15 juni 2009. Driebergen, Terreinbeheerders, IPO en LNV.
- Schokker J., Lang F. D. de, Weerts H. J. T., Otter C. de. 2003. "Lithostratigrafische Nomenclator Ondiepe Ondergrond; Formatie van Boxtel." 2003, www.nitg.tno.nl.
- Schouten, M.G.C. (ed.) 2002: Conservation and restoration of raised bogs - Geological, hydrological and ecological studies, pp. 210-217. Dúchas - The Heritage Service of the Department of the Environment and Local Government, Ireland; Staatsbosbeheer, the Netherlands; Geological Survey of Ireland; Dublin.
- Schouwenaars, J.M., 1990. Problem-orientated studies on plant-soil-water relations. proefschrift, Landbouwwuniversiteit Wageningen.
- Schouwenaars J.M., Esselink H., Lamers L.P.M., Molen P.C. van der. 1997. Hoogveenherstel in Nederland. Pre-advies Hoogvenen. I.K.C., Wageningen.
- Schouwenaars J.M., Esselink H., Lamers L.P.M., Molen P.C. van der. 2002. Ontwikkelingen en herstel van hoogveensystemen – bestaande kennis en benodigd onderzoek. Expertisecentrum LNV, Wageningen.
- Sierra J., Renault P. 1995. Oxygen consumption by soil microorganisms as affected by oxygen and carbon dioxide levels. *Applied Soil Ecology* 2, 175-184.
- Skopp J., Jawson M. D., Doran J. W. 1990. Steady-State Aerobic Microbial Activity as a Function of Soil Water Content *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 1619–1625.
- Sleutel S., Moeskops B., Huybrechts W., Vandenbossche A., Salomez J., De Bolle S., Buchan D., De Neve S, 2008. Modeling soil moisture effects on net nitrogen mineralization in loamy wetland soils. *WETLANDS*, 28 (3), 724–734.
- Smolders A.J.P., Tomassen H.B.M., Pijnappel H.W., Lamers L.P.M., Roelofs J.G.M. 2001. Substrate-Derived CO₂ Is Important in the Development of Sphagnum Spp. *New Phytologist* Vol. 152 (2), pp. 325-332
- Smolders A.J.P., Tomassen H.B.M., Limpens J., Duinen G.A. van, Schaaf S. van der, Roelofs J.G.M. 2004. Perspectieven voor hoogveenherstel in Nederland. In: G.A. van Duinen et al. (eds.) Duurzaam natuurherstel voor behoud van biodiversiteit – 15 jaar herstelmaatregelen in het kader van het overlevingsplan bos en natuur. Rapport EC-LNV nr. 2004/305, Ede, pp. 71-107.
- Streefkerk, J.G. & W.A. Casparie (1989). The hydrology of bog ecosystems, guidelines for management. The State Forestry Service of the Netherlands. 120 pp.
- Teunissen D. 1973. Een laatglaciale veen- en leemlaag op het Landgoed De Hamert (Midden Limburg) en de betekenis van deze laag voor de hydrologie van het gebied. Nijmegen, Afdeling Biogeologie van de sectie Biologie van de Katholieke Universiteit van Nijmegen. Mededeling 5.

Tomassen H.B.M., Smolders A.J.P., Limpens J., Duinen G.J. van, Schaaf S. van der, Roelofs J.G.M., Berendse F., Esselink H., Wirdum G. van. 2003. Onderzoek ten behoeve van herstel en beheer van Nederlandse hoogvenen. Eindrapportage 1998-2001. (Rapport EC-LNV nr. 2003/139). Expertisecentrum LNV, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. Ede/Wageningen.

Tomassen, H.B.M., Duinen G.J. van, Limpens J., Schaaf S. van der, Smolders A.J.P., Esselink H., Roelofs J.G.M. 2007. Onderzoek ten behoeve van herstel en beheer van Nederlandse hoogvenen. Eindrapportage overbrugging OBN hoogvenen. Expertisecentrum LNV, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. Ede/Wageningen.

Tomassen, H., Smolders F., Limpens J., Schaaf S. van der, Duinen G. van, Wirdum G. van, Esselink H., Roelofs J. 2011a. Onderzoek ten behoeve van herstel en beheer van Nederlandse hoogvenen. Eindrapport 2e fase 2004 -2006. O+BN rapport 151-NZ.

Tomassen, H.B.M., Grootjans A.B., Smolders A.J.P. 2011b. Herstel van biodiversiteit en landschapsecologische relaties in het natte zandlandschap - Herkomst van CO2 voor hoogveengroei en basenverzadiging in hoogveentjes. Eindrapport deel 3. O+BN rapport 147-3-NZ.

Tonneijck F.H., Jansen B., Nierop K.G.J., Verstraten, J.M. Sevink J., Lange L. de 2010. Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador European Journal of Soil Science 61, 392-405.

Tooren B. van, Hoop E. de, Boom B. van den, Holtland J., Nooren M., Tweel L. van, Berg A. van den, Ronde I. de. 2010. Evaluatie van het beheer van de hoogvenen van Natuurmonumenten, Staatsbosbeheer, Landschap Overijssel en Ministerie van Defensie. 's-Graveland.

Vernes R.W., J.H.A. Bosch, R. Harting, D. Maljers & J. Schokker. 2013. Data-inventarisatie, kartering en parametrisatie van keileem in het MIPWA-gebied. TNO, Utrecht.

Vrielink J.G., Hurk J.A. van den. 1977. Boswachterij Bergen; Bodemgesteldheid en bodemgeschiktheid. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering. Stiboka-Rapport 1347.

Vrielink J.G., Dirkx G.H.P. 1986. De bodemgeschiktheid voor bosbouw en de te verwachten bosgemeenschappen in de boswachterij Ommen : een bodem - en vegetatiekartering. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering. Stiboka-rapport 1799.

Wösten J.H.M., Veerman G.J., Groot W.J.M. de, Stolte J. 2001. Waterrententie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Wageningen, Alterra. Alterra-rapport 153.

Wösten H., Vries F. de, Hoogland T., Massop H., Veldhuizen A., Vroon H., Wesseling J., Heijckers J., Bolman A. 2012. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Wageningen, Alterra. Alterra-rapport 2387.

Bijlage 1: Karakteristieken van de hoogvenen in Nederland

	Veenpakket dikker dan 80 cm	Ondoorlatende laag aan veenbasis of keileem/breuk	Type veenbasis				Stijghoogte onder veenbasis	Fluctuatie freatische grondwaterstand / droogval van boven	Wegzijing	Nabijheid en mogelijk effect drinkwaterwinning
			Min – weerst.	Min + weerst.	Organo-min	Organisch				
Engbertsdijks- venen	Deels, max 7 m			X			Ja, periodiek er onder			nee
Wierdense veld 450 ha	Nee, lage weerstand van het veen Max 2 m	Zandige keileem, Wel gliedelaag, geen grote weerstand. zandkoppen	X	X	X		Ja, delen periodiek Droge zomer 1 m onder veenbasis	Grote fluctuatie	Groot Door te lage weerstand veen en lage stijghoogte	Ja
Witterveld		Keileem (type 1)		X			Nee			
Fochteloërveen	Deels, max 2 m	Kleileem en gliedelaag (type 1)		X	X		Nee, alleen aan randen	Klein	Groot ca 120 mm	Ja, is verminderd Nee, wel op de diepste stijghoogte
Haaksbergerveen		Keileem, tertiaire klei (dun laagje dekzand er bovenop) (type 1)		X			Nee, is verhoogd, op aantal plekken nog wel?	Klein, aan randen te groot		nee
Bargerveen			X				Ja			nee
Meerstalblok	Ja, max 5,5 m	Nee, op dekzand, daaronder							Klein	
Schoonebekerveld	Ja, 0,5 – 1 m	keileem met plaatselijk lage							Groot	
Amsterdamse Veld	Ja 0,5 – 1 m	weerstand (typen 1 en 3?)							Groot	
De Witten	Ja, ca 1 meter						Nee	Klein	laag	Nee
Groote Peel	nee	Ondoorlatende laag beschadigd (typen 2 en 3?)					Ja, maar op sommige locaties in veenbasis	Groot	groot	Ja
Mariapeel	nee	Ondoorlatende laag beschadigd (typen 2 en 3?)					Ja, Op sommige locaties in veenbasis	Nog te groot	groot	Nee
Deurnsche peel										
Wooldse Veen	Max 2 m	Deels gliedelaag (type3?)		?	X		Nee	Groot deel te groot, ca 0,5 m		Nee
Korenburgerveen	Max 2 m, rand 40-80 cm	Gliede, gyttja, deels intact (type 5?)		?	X		Nee	Deels goed		Nee
Aamsveen		Gliedelaag alleen bij grenssloot	X		X		Nee			Nee

	Veenpakket dikker dan 80 cm	Ondoorlatende laag aan veenbasis of keileem/breuk	Type veenbasis				Stijghoogte onder veenbasis	Fluctuatie freatische grondwaterstand / droogval van boven	Wegzijing	Nabijheid en mogelijk effect drinkwaterwinning
			Min – weerst.	Min + weerst.	Organo-min	Organisch				
Witte Veen	Nee, max 70 cm	doorsneden; slechts een dunne zandlaag onder het veen Keileem en gliede; kenmerkend is de zeer dunne zandlaag onder het veen (type 1?)		X		X	Nee		gering	Nee
Holtingerveld			X	?	?	?	Ja, al heel lang schijnspiegel en er is veengroei			
Wierdense Veld - Huumerveld		Beekleem? (type 1)		X						
Bergerbos en De Hamert	Nee, vooral veengroei in vennen	Laag van Wijchen		X			Ja, ligt op Maasterras			
Sellingen	Nee, wel wat veenrest en gliede	Nee, zwak en sterk lemig zeer fijn zand met kazige B en gliede (type 3)			X	X	Ja		Zeer beperkt	Mogelijk

Type veenbasis:

Min - weerst = Minerale horizont met weinig weerstand

Min + weerst = Minerale horizont met veel weerstand, d.w.z. stagnerend

Organo-min = Grenshorizont op overgang van veen naar minerale ondergrond is stagnerend (veelal gliedelaag)

Organisch = Laag in het veen is stagnerend (veelal gliedelaag)

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

Het Kennisnetwerk Ontwikkeling Beheer Natuurkwaliteit:

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



**Kennisnetwerk OBN wordt gecoördineerd door de VBNE en
gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken en B12**

Princenhof Park 9
3972 NG Driebergen
0343-745250

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

M. (Mark) Brunsveld MSc
Programma-medewerker OBN
0343-745256 / 06-31078500
m.brunsveld@vbne.nl