

Perspectieven voor hoogveenherstel in Nederland

Alfons Smolders ^{1*}, Hilde Tomassen ^{1*}, Juul Limpens ², Gert-Jan van Duinen ³,
Sake van der Schaaf ⁴ & Jan Roelofs ¹.



Foto G.A. van Duinen

- 1 Leerstoelgroep Aquatische Ecologie en Milieubiologie, Radboud Universiteit Nijmegen, Toernooiveld 1, 6525 ED Nijmegen (Fonss@sci.kun.nl, Hilde.Tomassen@sci.kun.nl en J.Roelofs@sci.kun.nl)
- 2 Leerstoelgroep Natuurbeheer en Plantenecologie, Wageningen Universiteit, Bornsesteeg 69, 6708 PD Wageningen (Juul.Limpens@wur.nl)
- 3 Stichting Bargerveen/Afdeling Milieukunde, Radboud Universiteit Nijmegen, Toernooiveld 1, 6525 ED Nijmegen (Duinen@sci.kun.nl)
- 4 Vakgroep Waterhuishouding, Wageningen Universiteit, Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen (Sake.vanderSchaaf@wur.nl)

* Huidig adres: Onderzoekcentrum B-ware, Toernooiveld 1, 6525 ED Nijmegen

Samenvatting

Het hoogveenareaal in Nederland is door turfwinning, boekweitbrandcultuur en verdroging gedecimeerd en bestaat grotendeels uit ontwaterde en vergraven hoogveenrestanten, die het karakter van een hoogveensysteem nagenoeg geheel hebben verloren. In de hoogveenrestanten treedt een ongewenste dominantie op van Pijpenstrootje, Berk en Slank veenmos. Al decennia lang worden vernattingsmaatregelen uitgevoerd om delen van het sterk gedegradeerde hoogveenlandschap te herstellen. Hoogveenvorming komt echter op slechts enkele locaties op gang. Daarom is in het kader van het OBN onderzoek gestart naar de perspectieven voor hoogveenherstel in Nederland. Centrale vragen daarbij zijn of bij de huidige hoge atmosferische stikstofdepositie hoogveenherstel mogelijk is en wat de randvoorwaarden zijn voor herstel van de karakteristieke flora en fauna.

Uit vele laboratorium- en veldexperimenten is gebleken dat bij de huidige stikstofdepositieniveaus hoogveenontwikkeling mogelijk is. Veenmossen worden echter wel gevoeliger voor infectie met de Veenmosgrauwkopschimmel, die tot ontkleuring van de veenmossen leidt. De verhoogde beschikbaarheid van nutriënten stimuleert de groei van Pijpenstrootje, Berken en andere hogere planten, wat zorgt voor toename van beschaduwing. Veenmossen worden positief beïnvloed door een lichte mate van beschaduwing, maar hebben sterk te lijden van een te sterke beschaduwing. De verminderde groei van veenmossen leidt dan tot een lagere stikstofopname, waardoor meer stikstof beschikbaar komt voor de vaatplanten. Vaatplanten zijn bovendien gemakkelijker afbreekbaar, waardoor de hierin vastgelegde nutriënten weer sneller vrijkomen in het veen. Op deze manier ontstaat een terugkoppeling, die leidt tot een nog grotere dominantie van vaatplanten. Eenmalig maaien of plaggen van de vegetatie kan tot verbetering van de veenmosgroei leiden. Het verdient wel aanbeveling deze maatregelen gefaseerd in ruimte en tijd uit te voeren, zodat de aanwezige veenmossen en faunasoorten in het terrein behouden blijven.

Voor het op gang komen van hoogveenvorming is het van belang dat de bovenste veenlaag het vermogen heeft om water vast te houden. Doordat witveen dit vermogen nog heeft, kan in verdroogde veenrestanten waar nog veel witveen aan het oppervlak ligt, worden volstaan met een vernatting tot aan het maaiveld. Is in een veenrestant echter alleen nog zwartveen aanwezig en geen bolster teruggestort, dan komt in plassen dieper dan 50 cm vaak geen veenvorming op gang. Doordat in het sterk gehumificeerde zwartveen te weinig mineralisatie plaatsvindt, blijven de kooldioxide-concentraties in het water te laag om goede veenmosgroei mogelijk te maken. Ook dringt door de vaak sterke kleuring van het water met humuszuren te weinig licht door in de relatief diepe plassen. De optie om via opdrijvend restveen (drijfzand) tot veenvorming te komen, werkt bij zwartveen niet, omdat de productie van methaan (moerasgas) te gering is om het

zwartveen drijfvermogen te geven. Onder deze omstandigheden lijkt het plasdras vernatten een betere optie. Is in het vergraven veen bolster teruggestort of is weinig verteerd (veen)plagsel beschikbaar, dan zijn er meer mogelijkheden. Als het regionale grondwater tot in de veenbasis reikt, waardoor enige buffering optreedt, gaat de bolster of ingebracht plagsel als gevolg van methaangasvorming opdrijven. Hierdoor ontstaan drijftillen, waarop zich een veenvormende vegetatie kan vestigen. Is er geen kalkhoudend grondwater meer in de veenbasis, dan kan een lichte bekalking voor vernatting of het storten van geschikt veen-substraat de noodzakelijke methaanvorming op gang brengen.

Uit het onderzoek naar de aquatische ongewervelden komt naar voren dat de toename van de beschikbaarheid van nutriënten een stempel heeft gedrukt op de faunasamenstelling in de Nederlandse hoogveenrestanten. De meeste wateren die door vernattingsmaatregelen zijn ontstaan, worden wel gekoloniseerd door een aantal voor hoogvenen karakteristieke faunasoorten. Echter, oude veenputten en greppels die niet aan grootschalige en plotselinge veranderingen onderhevig zijn geweest, blijken meer karakteristieke hoogveensoorten en zeldzame macrofaunasoorten te herbergen. In het herstelbeheer is het dus erg belangrijk dat maatregelen worden genomen die gericht zijn op behoud en zo mogelijk versterking van de aanwezige populaties van karakteristieke en zeldzame soorten binnen de terreinen.

Op basis van de kennis die in het onderzoek is opgedaan, is een stappenplan opgesteld voor de uitvoering van herstel- en beheersmaatregelen in hoogveenrestanten. Het belangrijkste onderdeel van het herstelprogramma behelst het vooronderzoek. Bij de uitvoering van de maatregelen is het verder van belang 'de vinger aan de pols te houden' door middel van een adequate monitoring. Uit het onderzoek blijkt dat, afhankelijk van de bestaande lokale en regionale situatie van de terreinen, herstelstrategieën mogelijk zijn, die relatief goede perspectieven bieden voor herstel van hoogveenvorming.

Inleiding

Aan het begin van de vorige eeuw bedroeg het hoogveenareaal in Nederland nog zo'n 90.000 ha. In minder dan een eeuw is dit landschap, dat zich in de loop van vele duizenden jaren had ontwikkeld, vernietigd door afgraving, boekweitbrandcultuur en verdroging. Ondertussen bedraagt het areaal aan 'hoogveen' in Nederland nog circa 3600 ha, waarvan hooguit enkele tientallen ha nog als 'levend' hoogveen kunnen worden aangemerkt. De rest bestaat uit ontwaterde en grotendeels vergraven hoogveenrestanten, die het karakter van een hoogveensysteem nagenoeg geheel hebben verloren. In vele hoogveenrestanten en nog levende hoogvenen is tevens sprake van een sterke nivellering van de vegetatie, waar-

bij een ongewenste dominantie optreedt van Pijpenstrootje (*Molinia caerulea*), Berk (*Betula*) en Slank veenmos (*Sphagnum fallax*) (Schouten *et al.*, 1998; Schouwenars *et al.*, 2002).

Uit het voorgaande mag duidelijk zijn dat het hoogveen in Nederland onder zeer grote druk staat. Dit is vanwege de zeer bijzondere floristische en faunistische waarden van dit landschapstype een zorgwekkende situatie. Gelukkig is ondertussen van afgraving van hoogveen (in Nederland) geen sprake meer en wordt ook volop gepoogd de verdroogde hoogveenrestanten door middel van vernatting te herstellen (Schouten *et al.*, 1998). Helaas moet echter geconstateerd worden dat hiermee tot op heden nog maar beperkt succes is geboekt. Dit gebrekkige succes was voor het Directoraat Natuurbeheer en het Expertisecentrum van het ministerie van LNV aanleiding om in het kader van de regeling Overlevingsplan Bos & Natuur (OBN) een subsidie beschikbaar te stellen voor onderzoek naar hoogveenherstel in Nederland. In de eerste fase van het OBN-onderzoek (1998-2002) heeft de nadruk gelegen op het herstellen van standplaatscondities van de typische hoogveenvegetaties, omdat deze, zoals hierna zal worden uiteengezet, de basis vormen voor een goed functionerend hoogveensysteem. Daarnaast is echter voor het eerst binnen OBN ook duidelijk aandacht besteed aan de faunacomponent. De resultaten van de eerste fase van het OBN-hoogveenonderzoek zijn verwerkt tot een eindrapport (Tomassen *et al.*, 2002). In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten van dit onderzoek. Op basis van de opgedane kennis is een stappenplan opgesteld voor het uitvoeren van herstelmaatregelen.

Herstel van hoogveensystemen en veenvorming

Belang van het herstel van acrotelmcondities

Een absolute voorwaarde voor het op gang komen van hoogveenvorming is het herstel van de juiste acrotelmcondities (Joosten, 1995). De acrotelm is de bovenste, deels levende veenlaag, die doorgaans maximaal 0,5 m dik is. De acrotelm heeft de zelfregulerende hydrologische eigenschappen die essentieel zijn voor een levend, veenvormend hoogveen (Ivanov, 1965, 1975; Ingram, 1978, 1983; Hayward & Clymo 1982; Proctor, 1995). Het doorlaatvermogen van de acrotelm neemt sterk af met een dalende grondwaterspiegel waardoor in een droge periode de laterale afvoer (afvoer van neerslagwater via de acrotelm) fors afneemt, terwijl in een natte periode een neerslagoverschot snel afgevoerd wordt (Ivanov, 1957, geciteerd door Romanov, 1968; Bay, 1969; Balyasova, 1979; Ivanov, 1981; Verry, 1984). Ook heeft een acrotelm in vergelijking met het sterker gehumificeerde veen dat eron-

¹ De verhouding van de verandering in berging en de bijbehorende verandering in grondwaterstand. Als de toevoer van 1 mm water leidt tot een stijging van de grondwaterstand met 1 cm, is de bergingscoëfficiënt gelijk aan 0,1. In een goed functionerende acrotelm zonder open water ligt de bergingscoëfficiënt op circa 0,3-0,4.

der ligt (de catotelm) een hogere bergingscoëfficiënt ¹, waardoor verdamping en afvoer minder effect hebben op de grondwaterspiegel (Ivanov, 1981; Van der Schaaf, 1999; zie ook kader 'Bergingseigenschappen van veen'). Daarnaast heeft een levend veenmosdek een regulerende invloed op de verdamping, doordat de capillaire nalevering van water naar de verdampende veenmoskopjes aanzienlijk vermindert wanneer het waterniveau in de acrotelm daalt (Ivanov, 1981; Kim & Verna, 1996; Phersson & Pettersson, 1997; Kellner, 2001).

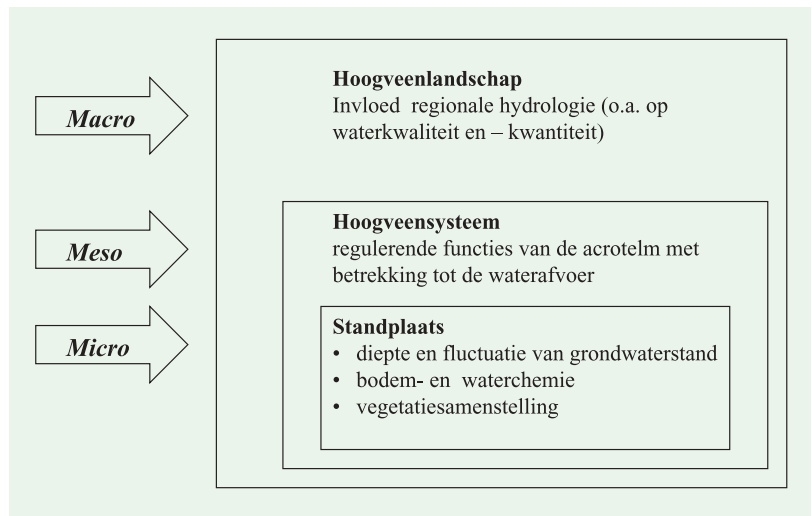
Door deze hydrologische zelfregulatie creëren veenmossen in een intact hoogveen (met een functionerende acrotelm) in belangrijke mate hun eigen standplaatscondities en daarmee de groei van het hoogveen. Een veenmosbegroeiing heeft dus een belangrijke invloed op het functioneren van het systeem. Niet alle veenmossoorten beschikken over de juiste eigenschappen om een acrotelm te vormen. Joosten (1995) noemt met name *Sphagnum papillosum*, *S. magellanicum*, *S. affine*, *S. fuscum* en *S. rubellum* als zogenaamde sleutelsoorten, wier dominantie als een absolute voorwaarde voor hoogveenherstel moet worden beschouwd. Dit zit hem met name in de resistentie van deze soorten tegen afbraak die veroorzaakt wordt door speciale lignine-achtige verbindingen die ingebouwd worden in de celwanden (Verhoeven & Liefveld, 1997). Slenksoorten als *Sphagnum cuspidatum* en *S. fallax* breken veel beter af, waardoor geen goede acrotelmstructuur ontstaat. Het herstel van een hoogveenvormend systeem kan dan ook pas op gang komen indien één of meer van de 'sleutel'-soorten over grote oppervlakte tot dominantie zijn gekomen en acrotelmvormend groeien.

Belang van systeemherstel

De natuurwaarde van een intact hoogveensysteem behelst echter meer dan fraaie veenmostapijten. In een hoogveensysteem komen ook struwelen en bosjes voor en open wateren, vaak met invloed van enig gebufferd grondwater ('soaks') (Schouten *et al.*, 1998). Verder worden randzones gekenmerkt door fraaie gradiënten tussen het zure, voedselarme hoogveen en de aangrenzende meer mineerotrofe systemen (overgangsvenen en lagg zones). Vaak bevatten ook deze elementen van het hoogveensysteem zeer karakteristieke en zeldzame soorten. Voor de hoogveenfauna blijkt het voorkomen van deze verschillende elementen van het hoogveensysteem van groot belang te zijn (Verberk *et al.*, 2001; Schouwenaars *et al.*, 2002; Smits *et al.*, 2002). Bij het herstel van hoogveensystemen moet de diversiteit binnen een hoogveensysteem dan ook nadrukkelijk in het oog worden gehouden.

Het is daarom van groot belang om voorafgaand aan de herstelmaatregelen een goede diagnose te stellen op basis waarvan wordt bepaald in welke terreindelen hoogveenvorming moet worden nagestreefd en waar het zinvoller is om een ander doeltje na te streven (bijvoorbeeld veenheide of berkenbroek). De OBN-

regeling heeft tenslotte als doel om de biodiversiteit in Nederland te behouden en te herstellen. Met name wanneer in delen van het terrein zeldzame faunasoorten aanwezig zijn, zou grootschalige vernatting kunnen leiden tot het verlies van deze soorten waardoor de doelstellingen van OBN juist geweld wordt aangedaan. Een verantwoorde diagnosestelling zal dan ook moeten leiden tot een beter gefundeerde keuze voor bepaalde beheers- of herstelstrategieën, waarbij het herstel van hoogveenvormende vegetaties dus geen vanzelfsprekende keuze hoeft te zijn.



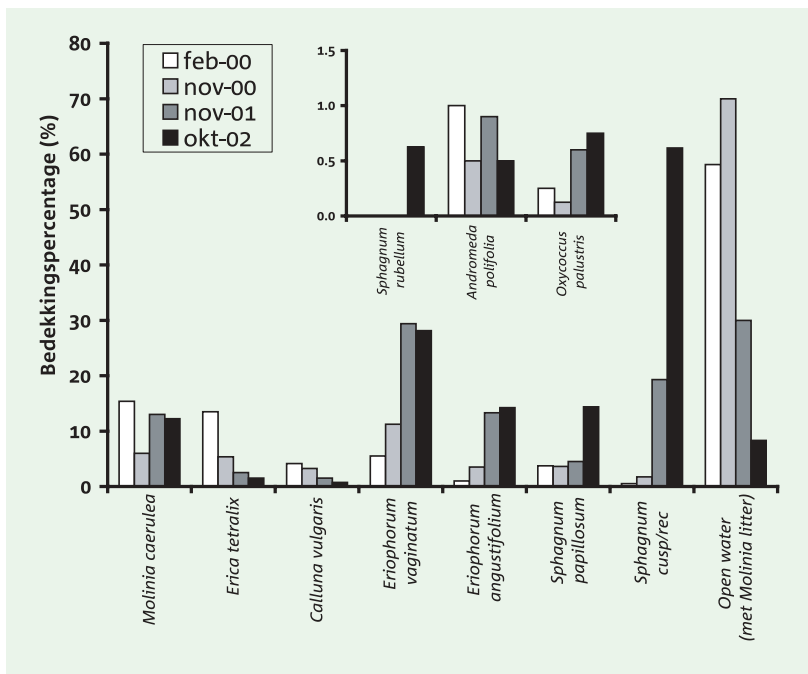
Figuur 1.
Enkele abiotische factoren en processen in hoogvenen en de schaalniveaus waarop ze een rol spelen

Maatregelen en effecten op micro-, meso- en macroschaal

In het preadvies Hoogveen werden bij de beschouwing van het hoogveensysteem steeds het micro-, meso- en macroschaalniveau onderscheiden (Schouwenars *et al.*, 2002). Ingrepen kunnen op een verschillend schaalniveau effect hebben (figuur 1). Zo wordt het herstel van standplaatscondities voor hoogveensoorten of hoogveengemeenschappen gezien als een effect op microschaalniveau. Uiteindelijk moet de ontwikkeling van een acrotelm over een grotere oppervlakte leiden tot het ontstaan van de hydrologische zelfregulering die voor het functioneren van het hoogveensysteem zo van belang is. Hier hebben we het over het mesoschaalniveau. Het onderzoek in de eerste fase was vooral gericht op het zoeken naar sturende factoren voor het creëren van de juiste standplaatscondities van de sleutelsoorten. Deze microschaalbenadering straalt dus automatisch uit naar het mesoschaalniveau op het moment dat de sleutelsoorten een acrotelm gaan vormen. Wanneer het hoogveensysteem eenmaal begint te functioneren, gaat dit ook de omgeving van het hoogveen beïnvloeden. Zo kunnen aan de randen van het veen, waar het zure voedselarme water uit het veen zich vermengt met voedselrijker, gebufferd water uit de omgeving, gradiëntsituaties ontstaan.

Hier hebben we het over het karakteristieke hoogveenlandschap en dus over het macroschaalniveau.

We hebben hierboven de schaalniveaus, waarop de effecten van de maatregelen optreden, beschouwd. We zien dat het bevorderen van effecten op microschaalniveau uiteindelijk kan leiden tot effecten op macroschaalniveau. Daar in de meeste vergraven en verdroogde hoogveenrestanten nauwelijks veenmosgroei optreedt, zullen eerst de juiste voorwaarden voor de groei van veenmossen moeten worden geschapen. Dit betekent in de praktijk dat vernattingsmaatregelen genomen moeten worden. Hierbij kan het wenselijk zijn maatregelen op regionale schaal (macrochaalniveau) te nemen, bijvoorbeeld om het regionale grondwater op te zetten en zo de wegzijging te verminderen. Dit voorbeeld illustreert dat voor het bereiken van effecten op microschaalniveau het nodig kan zijn om maatregelen op macroschaal te nemen.



Figuur 2. Bedekkingspercentage van de vegetatie in het Fochteloërveen direct na vernatting van het witveen en de daarop volgende drie groeiseizoenen. Weergegeven zijn de gemiddelden van 8 proefvlakken. Open water staat voor water op dood *Molinia* (Pijpenstrootje) litter.

Perspectieven van maatregelen in hoogveenrestanten

Vernatting van witveen

In niet of nauwelijks vergraven hoogveenrestanten, waar in feite sprake is van een verdroging van de toplaag van het veen (bijvoorbeeld in het Fochteloërveen en het Meerstablok), vindt nauwelijks nog veenmosgroei plaats door de te droge

omstandigheden. Meestal zijn de sleutelsoorten (met name *Sphagnum papillosum* en *S. magellanicum*) echter nog wel in voldoende mate in het terrein aanwezig. Verder worden deze terreinen, door een combinatie van droogte en een hoge stikstofdepositie, vaak gedomineerd door Pijpenstrootje, Berk en heidesoorten (*Calluna vulgaris* en *Erica tetralix*). Vernatten van dit soort terreinen tot een niveau, waarbij het water in ieder geval gedurende grote delen van het jaar in of net boven het maaiveld staat, blijkt te leiden tot een zeer positieve ontwikkeling van de vegetatie. Dit was bijvoorbeeld te zien in het Fochteloërveen, waar in de eerste jaren na vernatting (in 1999) de bedekking door de heidesoorten sterk is afgenomen, terwijl de veenmossen en *Eriophorum* soorten zich sterk konden uitbreiden (figuur 2). Experimenten in het laboratorium laten hetzelfde beeld zien voor vernatte plaggen uit andere verdroogde terreinen (Tuspeel, Mariapeel, Bargerveen en Clara Bog). De mate waarin *Eriophorum* zich uitbreidt na vernatten, bleek hierbij met name af te hangen van de nutriëntenrijkdom van het systeem. Een zekere uitbreiding van *Eriophorum*-pollen is gunstig (Wheeler & Shaw, 1995; Buttler *et al.*, 1998). Ze bieden een goede beschutting voor de veenmossen in de drogere zomerperiode en bovendien een structuur waar de veenmossen bij wat hogere waterstanden tegenop kunnen groeien (zogenaamde pollenbuffering). Bij een zeer sterke uitbreiding kunnen ze echter door overmatige beschaduwing de veenmosgroei belemmeren.

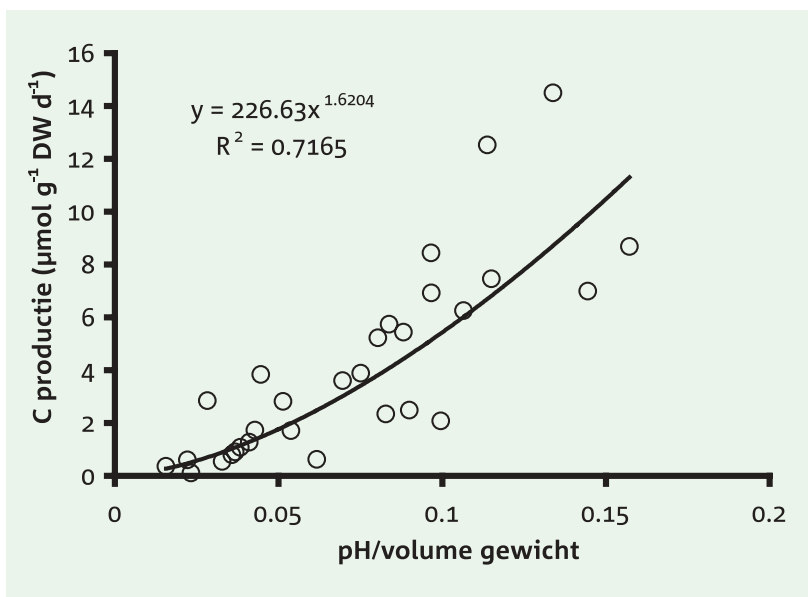
In terreinen waar nog veel witveen aan het oppervlak ligt, kan worden volstaan met een vernatting tot in het maaiveld (zie ook kader 'Bergingseigenschappen van veen'). Aanvullende maatregelen zullen hierbij meestal niet nodig zijn. Witveen heeft nog als eigenschap dat het opzwellt bij vernatting en inkrimpt bij verdroging, waardoor waterstandsfluctuaties, althans gemeten ten opzichte van het maaiveld, worden gedempt.

Drijftilvorming

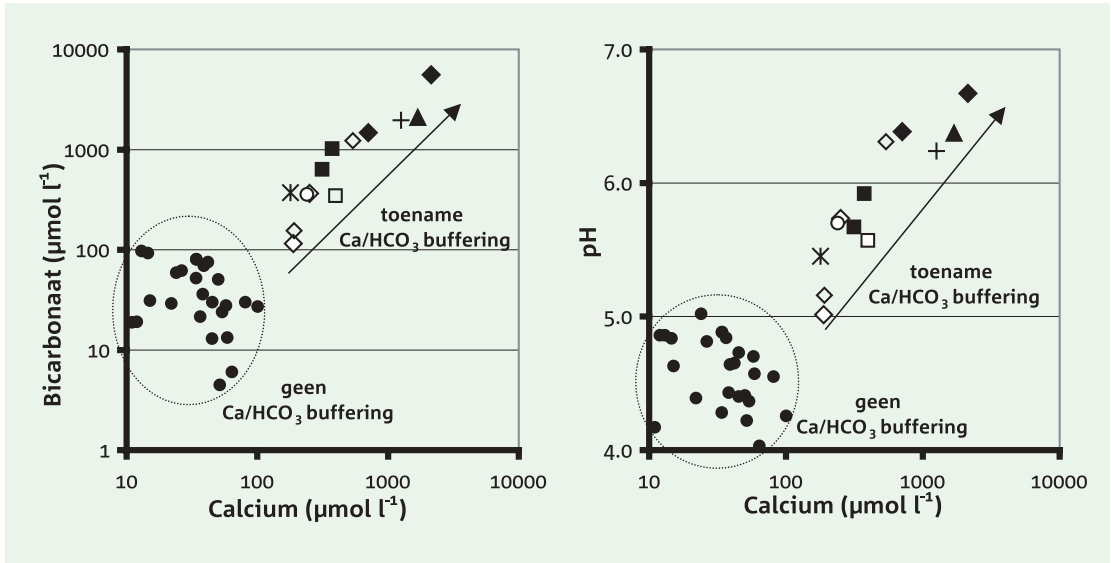
Wanneer voornamelijk zwartveen aanwezig is, ligt de situatie moeilijker dan bij witveen. Vaak wordt ervoor gekozen om grote delen van zwartveenrestanten te inunderen, omdat de bergingscoëfficiënt van zwartveen erg laag is, waardoor al snel grote waterstandsfluctuaties optreden (Beets, 1993; zie ook kader 'Bergingseigenschappen van veen'). Inundatie van zwartveenrestanten blijkt echter alleen tot een hoogveenverlanding te leiden, wanneer drijfkillen ontstaan of wanneer er een sterke onderwatergroei optreedt van veenmossen. Drijfkillen ontstaan met name wanneer er nog een toplaagje van weinig gehumificeerd veen aanwezig is (dit kan bijvoorbeeld de teruggestorte bolster zijn). Dit weinig gehumificeerde veen kan loskomen van het zwartveen en een drijvende laag vormen, waarop zich vervolgens veenmossen kunnen vestigen (Lamers *et al.*, 1999; Smolders *et al.*, 2002). Methaangas blijkt bij het ontstaan van deze drijfkillen een belangrijke rol te spelen. Methaan wordt door bacteriën gevormd uit de afbraak

producten (met name acetaat en kooldioxide) die vrijkomen bij de anaërobe afbraak van organisch materiaal (Segers, 1998). Dit impliceert dat methaan slechts geproduceerd wordt wanneer het veen nog voldoende 'afbreekbaar' is en dat er dus nog voldoende relatief jong, weinig gehumificeerd, organisch materiaal aanwezig moet zijn (Smolders *et al.*, 2002; Tomassen *et al.*, 2003a, 2004a).

Drijvend veen blijkt in tegenstelling tot niet drijvend (geïndeerd) veen een hoge potentiële methaanproductie en een laag volumegewicht te hebben (Tomassen *et al.*, 2004a). Verder is het over het algemeen rijker aan fosfor (P) en stikstof (N) en armer aan lignine en fenolen. Het hogere volumegewicht en de hogere lignineconcentraties van het niet drijvende substraat duiden op een sterkere mate van humificatie en dus geringere afbreekbaarheid. Ook de pH van veenvocht blijkt de potentiële methaanproductie in belangrijke mate te beïnvloeden. Zure omstandigheden, die meestal in het veen overheersen, remmen de microbiële activiteit en dus de methaanproductie (Segers, 1998). Wanneer echter enige buffering optreedt, wordt door de hogere pH de methaanproductie gestimuleerd (Smolders *et al.*, 2002; Tomassen *et al.*, 2003a). Hierbij is een verhoging van pH 4 tot pH 5 voldoende om de methaanproductie sterk te laten toenemen. Gebleken is dat de ratio tussen de pH van het uitknijpvocht en het volumegewicht van het veen goed correleert met de potentiële methaanproductie (figuur 3). Beide eigenschappen zijn relatief eenvoudig te bepalen zonder ingewikkelde chemische analyses. Een hoge ratio gaat meestal samen met een relatief hoge methaanproductie en dus met een grote kans dat het veen komt opdrijven na inundatie (Tomassen *et al.*, 2004a).



Figuur 3. Relatie tussen de koolstofproductie (CO₂ plus CH₄) bij anaërobe incubatie en de verhouding pH/volumegewicht van veenmateriaal afkomstig van verschillende locaties in Nederland.

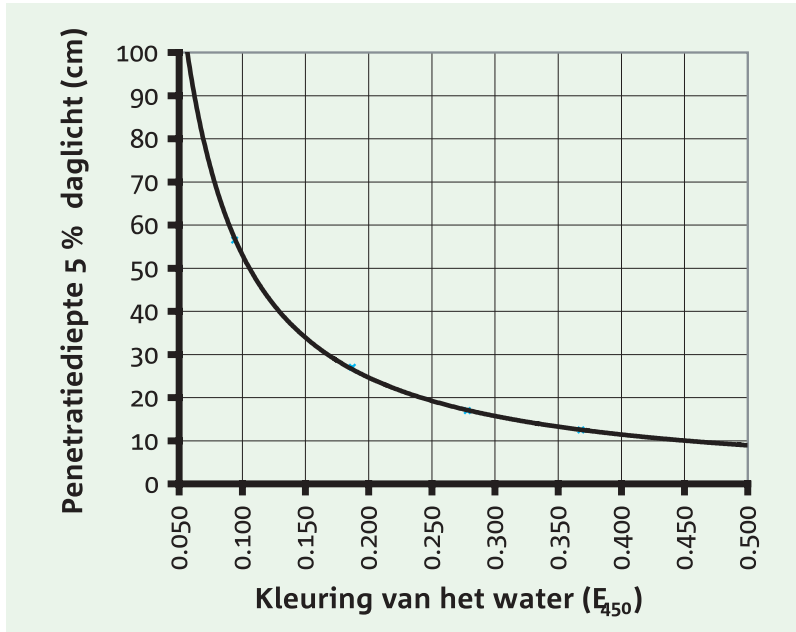


Figuur 4. Verband tussen de bicarbonaatconcentratie en pH ten opzichte van de calciumconcentratie in het veenvocht, verzameld in de veenbasis van verschillende locaties. Verklaring symbolen: locaties zonder Ca/HCO_3 buffering (●); locaties met Ca/HCO_3 buffering: Lough Roe (▲) en Scragh Bog (+) in Ierland, Hautes Fagnes in België (*), Nigula in Estland (O), Korenburgerveen (◆), Haaksbergerveen (◇), Zwart water (□) en Weerribben (■) in Nederland.

De pH van het veen kan sterk worden beïnvloed door de nabijheid van gebufferd grondwater. In veel veenrestanten is de resterende veenlaag nog maar erg dun (minder dan 1 m) en bevindt de veenbasis zich dus dicht aan het oppervlak. Indien gebufferd grondwater tot in de veenbasis reikt, kan er zo een buffering van het veen optreden, waardoor de afbraakprocessen en dus de methaanproductie worden gestimuleerd. Dit is bijvoorbeeld het geval in het Vragenderveen (onderdeel van het Korenburgerveen) en het Haaksbergerveen. In het Haaksbergerveen heeft de bufferende invloed van het grondwater na inundatie op een aantal plaatsen geleid tot een snelle ontwikkeling van drijftillen door het opdrijven van restveen (Lamers *et al.*, 1999). De invloed van gebufferd grondwater kan worden vastgesteld aan de hand van de analyses van het veenvocht in de veenbasis (figuur 4). Een hoge calciumconcentratie ($>100 \mu\text{mol l}^{-1}$) in combinatie met een hoge pH ($\text{pH} > 5,0$) en een hoge bicarbonaatconcentratie ($>100 \mu\text{mol l}^{-1}$) duiden op een buffering van de veenbasis. De mate waarin de buffering van de veenbasis doorwerkt op het veen zal afhangen van de mate van buffering en van de dikte van het veenpakket.

Indien zich drijftillen ontwikkelen, bepaalt de structuur van het veen of de drijftillen permanent blijven drijven of dat ze een seizoensdynamiek vertonen, waarbij ze in de winter zinken. De methaanproductie is als microbieel proces sterk afhankelijk van de temperatuur (Segers, 1998). De methaanproductie zal in de zomer dan ook veel hoger zijn dan in de winter. Omdat methaan slecht in water oplosbaar is, blijft het methaan in de vorm van belletjes hangen in het veen. Wanneer het substraat los van structuur is, zal methaan relatief gemakkelijk ontsnappen. Daardoor daalt in de winter, wanneer de methaanproductie laag is, de methaanconcentratie sterk en verliest het substraat zijn drijfvermogen. Zodra er in de loop

van het voorjaar weer voldoende methaan is geaccumuleerd, komt de drijftil weer omhoog. Deze seizoensdynamiek kan bijvoorbeeld worden waargenomen bij een aantal drijftillen in het Haaksbergerveen (Tomassen *et al.*, 2004a).



Figuur 5. Verband tussen de kleuring van het water (E_{450} = extinctie bij 450 nm) en de diepte waarop nog 5% van het daglicht doordringt.

Groei van submers (ondergedoken) veenmos

Wanneer de kans dat zich drijftillen ontwikkelen niet groot is, bijvoorbeeld omdat er geen geschikt substraat meer aanwezig is dat zou kunnen opdrijven, kan verlanding van geïnundeerde zwartveenrestanten slechts plaatsvinden indien de waterlaag dichtgroeit met in het water groeiende veenmossen. Over het algemeen beperkt de groei van waterveenmossen zich in een dergelijk geval echter tot de (zeer) ondiep geïnundeerde delen van het terrein (Money, 1995; Lamers *et al.*, 1999). Dit komt doordat het water in veenrestanten bijna altijd dystroof is, dat wil zeggen gekleurd door humuszuren. Deze humuszuurkleuring verhindert dat dieper in het water nog voldoende licht doordringt voor de groei (Smolders *et al.*, 2003). Een goede en gemakkelijk te bepalen maat voor de kleuring door humuszuren is de extinctie voor licht met een golflengte van 450 nm (E_{450}). Figuur 5 geeft de relatie tussen de diepte waarop nog 5% van het daglicht doordringt en de E_{450} -waarde van het water. Voor de meeste open wateren in hoogvenen ligt de E_{450} tussen de 0,100 en 0,400. Dit betekent dat in het gunstigste geval de diepte waarop nog 5% van het daglicht doordringt zo'n halve meter bedraagt (figuur 5). Deze 5% is bij benadering de minimale hoeveelheid licht die *Sphagnum* nodig heeft om te kunnen groeien. Dit betekent dat in water dat dieper is dan een halve meter de

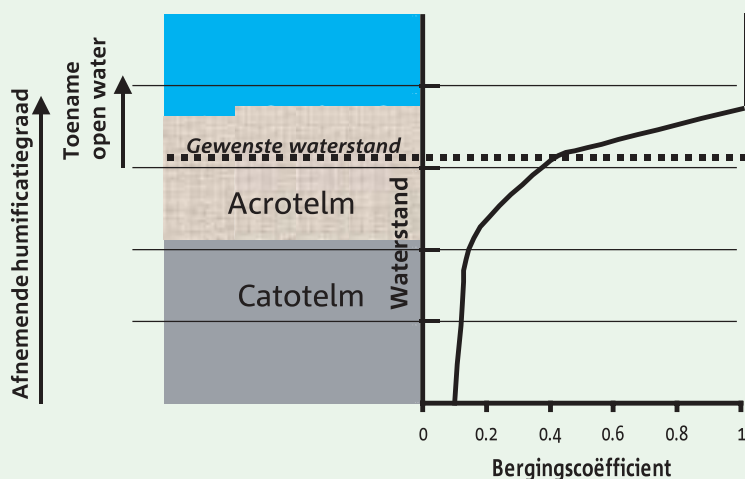
veenmosgroei alleen al door lichtgebrek slecht verloopt. Daarnaast is onderwater groeiend veenmos voor de kooldioxidevoorziening volledig afhankelijk van kooldioxide (CO₂) dat uit het substraat in het water terechtkomt (benthisch CO₂) (Paffen & Roelofs, 1991; Riis & Sand-Jensen, 1997). Dit betekent dat in de bodem voldoende afbraak van organisch materiaal moet plaatsvinden, waarbij dit CO₂ vrijkomt. In geïnundeerd sterk gehumificeerd zwartveen is de afbraak vaak zo gering dat ook de nalevering van CO₂ te laag is om een sterke groei van *Sphagnum* mogelijk te maken (Smolders *et al.*, 2003).

We kunnen concluderen dat op geïnundeerd zwartveen de omstandigheden vaak niet goed genoeg zijn om onderwatergroei van veenmossen mogelijk te maken. In verzurende of van nature zure vennen met een minerale bodem zien we vaak wel een zeer snelle groei van veenmossen, waardoor in korte tijd het ven volledig dicht kan groeien. Dit komt omdat op minerale bodems het water veel minder wordt gekleurd door humuszuren, waardoor licht niet beperkend is voor de veenmosgroei. Daarnaast worden vele vennen vanuit hun naaste omgeving (infiltratiegebied) gevoed met CO₂-rijk water, zodat in dergelijke gevallen ook CO₂ niet beperkend is. Veenmosgroei in dit soort vennen kan zelfs nog worden gestimuleerd door de omgeving van waaruit het water wordt aangevoerd (het vanggebied) licht te bekalken, waardoor er meer CO₂ oplost in het infiltrerende water (Dorland *et al.*, 2000). Ook ondiepe poelen en slenken in intacte hoogvenen hebben de neiging snel dicht te groeien met *Sphagnum cuspidatum*. Dit komt doordat hier veel CO₂ uit het omringende veen wordt aangevoerd. Aanvoer van CO₂ kan ook verantwoordelijk zijn voor de ontwikkeling van veenmossen in terreindelen binnen een groter hoogveenrestant. Door microreliëf in het terrein kunnen door oppervlakkige stroming van water bepaalde delen van het terrein worden aangerijkt met CO₂. Het is belangrijk bij eventueel te nemen maatregelen hier rekening mee te houden, zodat in een dergelijk geval maatregelen niet leiden tot het wegvallen van de oppervlakkige waterstroming.

Overigens blijkt benthisch CO₂ niet alleen voor de groei van ondergedoken *Sphagnum* van belang te zijn. Ook voor bultvormende *Sphagnum*soorten blijkt een deel van het gefixeerde CO₂ van benthische oorsprong te zijn (Rydin & Clymo, 1989; Turetsky & Wieder, 1999). Uit experimenten is gebleken dat de groei van *Sphagnum magellanicum* onder zeer natte, niet geïnundeerde condities, sterk wordt gestimuleerd door hoge CO₂-concentraties in het acrotelmwater (vergelijkbaar met concentraties die gemeten worden in het veld) (Smolders *et al.*, 2001). Bij zeer lage CO₂ concentraties in het acrotelmwater, waarbij de veenmossen dus volledig afhankelijk waren van atmosferisch CO₂, bleek de groei geremd te worden (Smolders *et al.*, 2001) en bultvorming achterwege te blijven. Het belang van benthisch CO₂ voor veenmossen blijkt ook uit het feit dat vaak een sterke veenmosgroei kan worden waargenomen op minerale bodems waar CO₂-rijk water uittreedt, zoals bijvoorbeeld in het Verbrande Bos bij Staverden.

Bergingseigenschappen van veen

In hoogveenen blijkt het verticale verloop van de substraateigenschappen van grote invloed te zijn op de relatie tussen het niveau en de grootte van de fluctuatie van de grondwaterstand. Bij een diepere grondwaterstand staat het water in relatief sterk gehumificeerd veen. Dit veen heeft een lage bergingscoëfficiënt ($\mu = \pm 0,1$), waardoor waterstandsfluctuaties relatief groot zijn (figuur 7). Als bij een hoger waterpeil het water in het minder gehumificeerde veen aan het veenoppervlak staat (dit kan in een intact hoogveen de acrotelm zijn), worden de waterstandsfluctuaties kleiner, doordat weinig gehumificeerd veen een hogere bergingscoëfficiënt heeft (0,2-0,4) (Van der Schaaf, 1999). Wanneer het water in het maaiveld staat en open water begint te ontstaan, neemt de bergingscoëfficiënt sterk toe. Open water heeft een bergingscoëfficiënt van 1. Bij een toename van het aandeel open water zal de bergingscoëfficiënt overeenkomstig toenemen. In relatief vlak terrein (zoals in een hoogveen) is deze toename groot bij een betrekkelijk geringe stijging van de waterstand. Het korte traject van de waterstand –vaak een dm of minder– waarin deze steile toename zich voordoet, geeft het (meestal gewenste) peil, waarbij over grote delen van het terrein een plas-dras situatie ontstaat.



Figuur 7.
Relatie tussen de bergingscoëfficiënt en de waterstand in een intact hoogveen

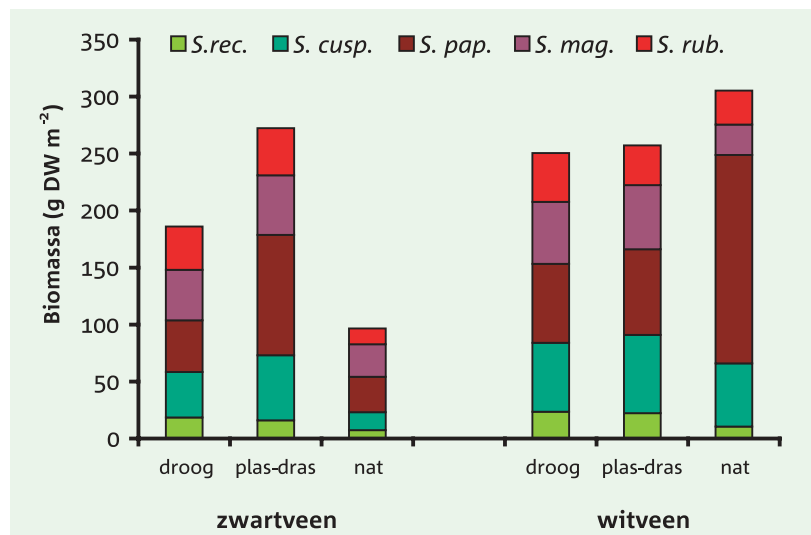
Men moet zich hierbij realiseren dat als gevolg van vernatting de bergingseigenschappen van de toplaag van het veen of zelfs de hoogteligging van het maaiveld geleidelijk kunnen veranderen, waardoor het wenselijk kan zijn het waterpeil na verloop van tijd opnieuw aan te passen. Voor een doelmatige vernatting is het dus belangrijk om de relatie tussen de verandering van de bergingscoëfficiënt en het waterpeil goed te kennen. Uit het hydrologische onderzoek is gebleken dat dit verband goed kan worden afgeleid uit synchrone waarnemingsreeksen van grondwaterstanden en neerslag, mits het waarnemingsin-

terval ten hoogste enkele uren bedraagt. Uit het onderzoek is gebleken dat de gebruikelijke 14-daagse waarnemingen voor dit doel ongeschikt zijn. Dit betekent in de praktijk een gehele of gedeeltelijke overstap op geautomatiseerd waarnemen van zowel waterstand als neerslag om gewenste overloopeilen met voldoende nauwkeurigheid te kunnen vaststellen. Het verdient dan ook aanbeveling, de haalbaarheid hiervan nader te onderzoeken.

Plas-dras vernatting van zwartveen en witveen

In een experiment, waarbij in het laboratorium plas-dras vernatting van zwartveen en witveen werd nagebootst en verschillende *Sphagnum*soorten werden geïntroduceerd, bleken de sleutelsoorten *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum papillosum* en *Sphagnum rubellum* het erg goed te doen (figuur 6). Bij plas-dras vernatting kunnen de veenmossen anders dan onder geïndeerde omstandigheden, CO₂ uit de atmosfeer opnemen, waardoor ze niet strikt afhankelijk zijn van de CO₂-concentratie in het veenvocht. In ons experiment waren de CO₂-concentraties in het veenvocht erg laag, waardoor de veenmossen niet zo sterk konden groeien als het geval zou zijn geweest wanneer ze hadden kunnen profiteren van CO₂ dat wordt nageleverd uit de bodem. De resultaten van het laboratoriumexperiment laten echter zien dat de veenmossen zich goed konden uitbreiden en dat na verloop van tijd zelfs een begin van bultvorming optrad. Het eerste half jaar na inzetten van het experiment werden per veentype drie verschillende waterniveaus aangehouden: plas-dras, droog (10 cm onder maaiveld) en geïndeerd (10 cm boven maaiveld). Dit om te kijken hoe de verschillende veenmossoorten tijdelijke inundatie of verdroging zouden doorstaan. Na een halfjaar werden voor alle behandelingen de waterniveaus plas-dras gezet, waarna gedurende een jaar de vegetatieontwikkeling werd gevolgd.

Figuur 6. Biomassaproductie van vijf verschillende *Sphagnum*-soorten groeiend op zwartveen en bij verschillende initiële waterstanden: droog (-10 cm), plas-dras (0 cm) en nat (+10 cm). Na een half jaar werd de waterstand in alle behandelingen verhoogd tot 0 cm. Weergegeven zijn gemiddelde droge biomassa's per m² anderhalf jaar na het inzetten van het experiment.



Op het zwartveen bleek de groei van de veenmossen het beste te zijn in de permanent plas-dras vernatte behandeling. Op het substraat dat gedurende het eerste halfjaar droog was gehouden, bleef de biomassa-ontwikkeling in dit eerste halfjaar sterk achter bij de plas-dras situatie. Na herstel van de plas-dras situatie bleken de veenmossen zich echter goed te herstellen van de aanvankelijke verdroging, zodat aan het einde van het experiment het verschil met de permanent plas-dras vernatte behandeling niet erg groot was (figuur 6). Van de inundatie op zwartveen hadden de veenmossen veel sterker te lijden. Door CO₂-gebrek vertoonden alle veenmossoorten in het eerste halfjaar een zeer ijle groeivorm, waarbij ze zeer kleine kopjes (*capitula*) en blaadjes vormden, waardoor ze nauwelijks nog te herkennen waren. Wel bleken alle soorten de zes maanden durende inundatie te overleven. Na herstel van de plas-dras situatie herstelde het veenmos zich weer, maar de totale biomassa na een jaar plas-dras vernatting bleef toch zeer sterk achter bij de permanent plas-dras vernatte behandeling (figuur 6).

Voor het witveen bleek tijdelijke droogte of tijdelijke inundatie niet te leiden tot verschillen in biomassa aan het einde van het experiment. In de droge behandeling hadden de veenmossen in het eerste half jaar wel degelijk te lijden van de droogte, maar ze herstelden zich snel, waardoor de groeiachterstand werd ingehaald. Inundatie leidde niet tot een verminderde *Sphagnum*-productie, omdat het witveen opzwol. Daardoor werd de aanvankelijke inundatie weer snel ongedaan gemaakt. Wel leidde dit in het eerste half jaar van het experiment tot een wat natere situatie dan bij de plas-dras vernatting, waarvan met name *Sphagnum papillosum* sterk bleek te profiteren (figuur 6).

Op zowel wit- als zwartveen kunnen de sleutelsoorten onder plas-dras vernatte condities uitstekend gedijen. De inundatie van zwartveenrestanten biedt in het algemeen weinig perspectieven voor het ontstaan van drijftillen en/of voor een uitbundige groei van ondergedoken veenmossen. Als we te maken hebben met zwartveenrestanten, biedt plas-dras vernatting dan ook verreweg de beste kansen voor een goede ontwikkeling van veenmossen (Smolders *et al.*, 2003). Uit het experiment is gebleken dat tijdelijke droogte en/of tijdelijke inundatie door alle veenmossoorten goed wordt doorstaan en de ontwikkeling van de veenmosvegetatie op de langere termijn niet hoeft te schaden. Ook uit de literatuur komt naar voren dat plas-dras vernatting van zwartveen de beste kansen biedt voor een goede ontwikkeling van *Sphagnum*soorten (Money, 1995; Wheeler & Shaw, 1995). Een belangrijke conclusie uit het experiment is dat de sleutelsoorten het onder de natte plas-dras condities net zo goed of beter doen dan de slenksoorten *Sphagnum cuspidatum* en *S. fallax*.

Om in hoogveenrestanten waar alleen nog sterk gehumificeerd zwartveen aanwezig is de gewenste stabiele plas-dras vernatting te kunnen realiseren, zal een compartimentering van het terrein moeten plaatsvinden. In delen van het terrein

zou dan water moeten worden vastgehouden, zodat vanuit deze reservoirs water kan worden ingelaten in de compartimenten waar een permanente plas-dras situatie wordt nagestreefd. Het hele systeem zal zo moeten worden ingericht dat niet alleen optimaal water kan worden vastgehouden, maar ook dat water snel kan worden afgevoerd wanneer het waterpeil te sterk stijgt. In het kader van de tweede fase van het onderzoek wordt een dergelijke proef op veldschaal uitgevoerd. Wellicht is het zinvol om voor plas-dras vernatting het terrein machinaal voor te bewerken (eventueel ondiep plaggen) met als doel te dichte vegetatie te verwijderen en te grote hoogteverschillen in het terrein enigszins te egaliseren. Verder zal het in zwartveenrestanten meestal nodig zijn om de sleutelsoorten te introduceren, omdat deze doorgaans niet (of in een zeer lage abundantie) in het terrein aanwezig zullen zijn. Voor meer informatie over hydrologische aspecten van vernatting wordt verwezen naar de kaders 'Bergingseigenschappen van veen' en 'Bepaling wegzijging of aanvoer van grondwater: de overlooppmethode'.

Introductie van 'sleutelsoorten'

Met name in restanten waar zwartveen dominant is, zullen de sleutelsoorten doorgaans nog maar zeer sporadisch aanwezig zijn. Uit de literatuur is bekend dat een hoge N-depositie de vestiging van *S. magellanicum* negatief kan beïnvloeden (Li & Vitt, 1994). Uit introductie-experimenten is gebleken dat de gebrekkige vestiging en uitbreiding binnen de terreinen waarschijnlijk de belangrijkste redenen zijn voor de afwezigheid of lage abundantie van sleutelsoorten (Smolders *et al.*, 2003). De geringe abundantie van deze soorten binnen de terreinen en de gebrekkige sporulatie (Cronberg, 1991) en verspreiding van diasporen (Salonen, 1987) zijn hiervoor belangrijke oorzaken. Introductie of verspreiding van sleutelsoorten zal dan ook vaak wenselijk zijn om een hoogveenherstelproject te kunnen laten slagen. Het doel is tenslotte om juist deze sleutelsoorten tot dominantie te laten komen, zodat ook een functionerende acrotelm tot ontwikkeling kan komen. Experimenten laten zien dat introductie van de soorten (als plukjes of als grotere plaggen) in nagenoeg alle gevallen leidt tot een goede vestiging en sterke uitbreiding van de soorten (figuur 9). Uit palaeoecologisch onderzoek is gebleken dat spontane vestiging van deze soorten honderden jaren kan duren (Joosten, 1995). Het is gezien de grote kosten en inspanningen die met hoogveenherstelprojecten gemoeid zijn en het belang van een functionerende acrotelm voor de hoogveenontwikkeling uiteraard niet verdedigbaar om zo lang te wachten.

Er zijn vele locaties waar hoogveenherstel heeft geresulteerd in de ontwikkeling van veenmostapigten die gedomineerd worden door *Sphagnum cuspidatum* en/of *S. fallax*. Een van de onderzoeksvragen was of de stagnatie van de ontwikkeling bij deze vegetaties te wijten was aan de hoge atmosferische stikstofdepositie. Met name *Sphagnum fallax* blijkt het bij een combinatie van hoge concentraties

van stikstof (N) en fosfor (P) beter te doen dan de overige *Sphagnum*soorten. Daar de Nederlandse hoogvenen relatief rijk zijn aan N en P, doet *S. fallax* het hier dan ook relatief goed. Doordat *S. fallax* ook nog eens relatief snel afbreekt, houdt de soort bovendien zijn eigen voedselrijke sub-milieu in stand, en zullen de sleutelsoorten het relatief moeilijk hebben, zich in een zich uitbreidende *S. fallax* vegetatie te vestigen. Uit onderzoek is gebleken dat *Sphagnum*-sporen vrijwel nooit kiemen in gesloten veenmosdekken (Sundberg & Rydin, 2002), waardoor vestiging van sleutelsoorten via sporen in een goed ontwikkelde *S. fallax*- of *S. cuspidatum*-vegetatie nagenoeg uitgesloten is, ongeacht de nutriëntenstatus van het systeem.

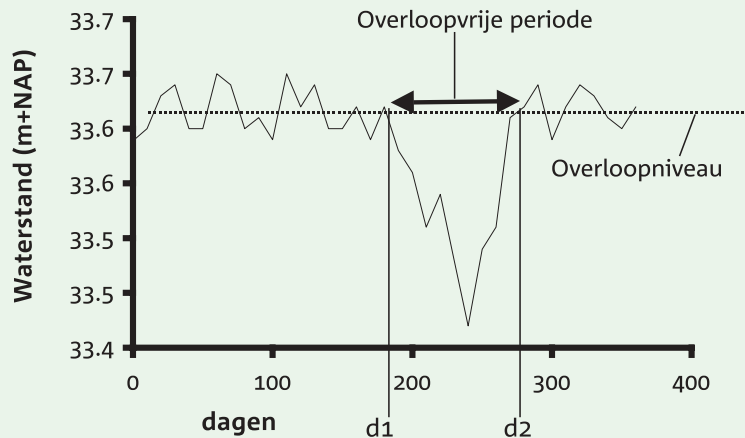
Bepaling wegzijging of aanvoer van grondwater: de overloopmethode

Het is voor een doelmatige vernatting van een systeem belangrijk te weten of en zo ja, in hoeverre kwel, wegzijging en/of (oppervlakkige) aanvoer van water optreedt. Bij een beslissing tot het al dan niet nemen van vernattingsmaatregelen kan dan met deze posten op de waterbalans rekening worden gehouden. Een voldoende nauwkeurige directe meting ervan is echter vrijwel nooit mogelijk. Dan resteert een indirecte meting als restpost in een waterbalans. Vaak is het echter lastig om een balans uit beschikbare hydrologische data af te leiden. Men beschikt bijvoorbeeld zelden over goede gegevens van afvoer en verschil in berging tussen begin en eind van een periode, waarover een waterbalans moet worden bepaald.

De overloopmethode is ontwikkeld om de post 'wegzijging/aanvoer' met een geringere foutenmarge te kunnen bepalen. Door uit te gaan van het begin- en eindtijdstip van een afvoerloze periode van een geïsoleerd compartiment of hoogveentje (in de zomer) is er geen sprake van afvoer of verschil in berging, waardoor deze posten van de waterbalans worden uitgesloten. Op basis van neerslagmetingen ter plaatse en de referentieverdamping van het dichtstbijzijnde KNMI-station kan nu in beginsel worden nagegaan of er netto waterverlies of aanvoer van grondwater optreedt. Wanneer de waterbalans sluitend is, moet in deze afvoerloze periode de totale hoeveelheid neerslag die valt, worden gecompenseerd door de verdamping. Uit de temporele variatie van de stijghoogte van het grondwater kunnen het overlooppniveau en de lengte van de afvoerloze periode worden bepaald (figuur 8). Uiteindelijk kan zo een eenvoudige balans (neerslag - verdamping) voor de afvoerloze periode worden gemaakt waarbij de restpost, afhankelijk van het plus- of minteken, duidt op een netto verlies van water (wegzijging) dan wel een netto aanvoer van water (kwel of oppervlakkige afstroming). Een zwak punt van de methode is het gebruik van de referentieverdamping, die niet per definitie gelijk is aan de ver-

damping van het beschouwde veengebied. Uit vergelijking van een aantal veentjes, c.q. compartimenten is echter gebleken dat de methode daar waar weinig of geen invloed van buitenaf werd verwacht, een nagenoeg sluitende balans oplevert en waar verlies aan of aanvoer uit de omgeving werd verwacht, deze ook daadwerkelijk indiceert.

Voor de Reigerplas (een heideveentje in het Dwingelderveld) werd bijvoorbeeld een netto aanvoer gevonden die te verklaren was uit oppervlakkige afvoer over het hoger liggende maaiveld van het omringende gebied. Voor het Harke- en Bolleveen, dat als een enclave in een diep ontwaterd landbouwgebied ligt, werd een netto wegzijging bepaald. Een nagenoeg sluitende balans werd gevonden voor een compartiment met 4-5 m restveen midden in het Meerstalblok.



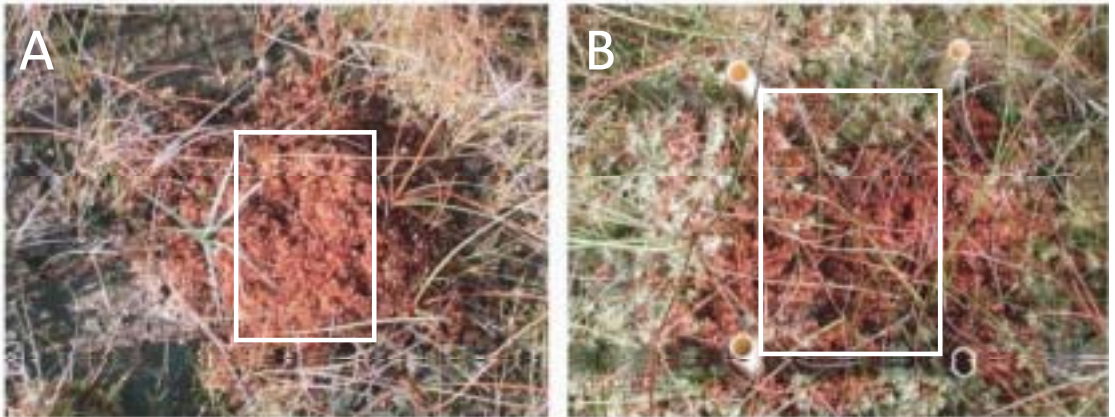
Figuur 8.

De 'overloopmethode' voor de bepaling van de wegzijging/aanvoer van water. Deze methode kan worden toegepast indien er sprake is van een overloophniveau.

Totale neerslag tussen dag d1 en dag d2
minus
 Totale verdamping tussen dag d1 en dag d2
 =
 Indien positief → Wegzijging
 Indien negatief → Aanvoer

Uit de in de eerste fase van het onderzoek uitgevoerde introductie-experimenten kunnen we concluderen dat het gebrek aan vestiging van de sleutelsoorten een zeer belangrijke oorzaak is voor de stagnatie van vele hoogvenen in het *S. cuspidatum*- en/of *S. fallax*-stadium (Smolders *et al.*, 2003). Alleen in zeer snel groeiende *S. fallax* vegetaties bleken geïntroduceerde sleutelsoorten overgroeid te worden door *S. fallax* en zich niet te kunnen vestigen. Op de meeste locaties breidden de geïntroduceerde sleutelsoorten zich echter spectaculair uit (Kooijman, 2001). We kunnen dan ook concluderen dat de introductie van de sleutelsoorten in deze

vegetaties de successie richting hoogveen in de meeste gevallen aanzienlijk zal versnellen. In de tweede fase van het onderzoek worden introductie-experimenten op grotere schaal uitgevoerd.



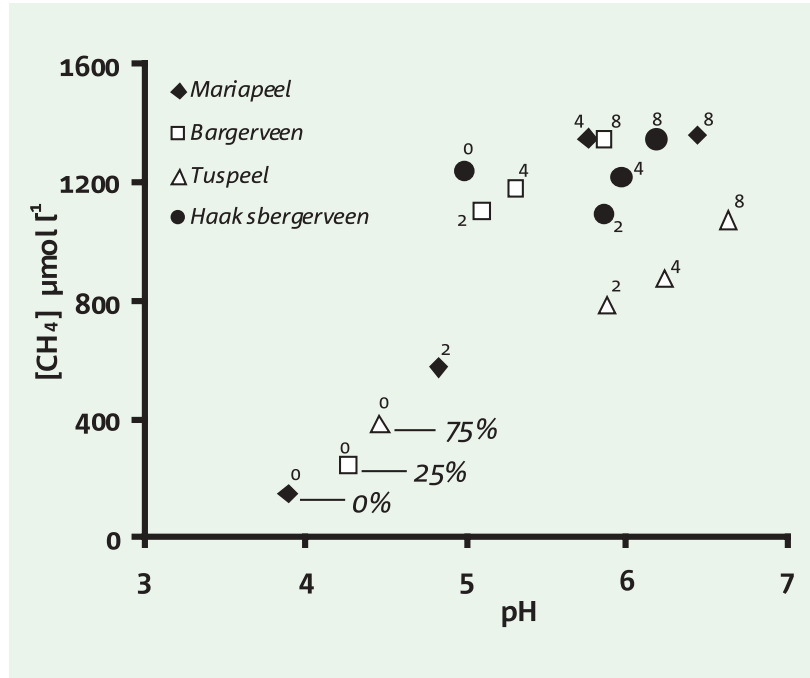
Introductie van substraat

Zoals hiervoor is aangegeven, zijn de perspectieven voor hoogveenontwikkeling op zwartveenlocaties die ten gevolge van de topografie van het terrein permanent geïnundeerd blijven niet erg goed. Daarom kan in deze situaties worden overwogen organisch materiaal uit de toplaag van hoogveen- of veenheidegebieden te introduceren (Tomassen *et al.*, 2003a). Experimenten laten zien dat in combinatie met een lichte bekalking dit materiaal gemakkelijk komt opdrijven (figuur 10). Een éénmalige bekalking is voldoende om de pH te verhogen naar circa 5, waarbij de methaanproductie op gang komt. Omdat methaanproductie een zuurconsumerend proces is, zal de pH niet meer dalen, zodra de productie op gang is gekomen. Op deze manier zouden twee vliegen in één klap kunnen worden geslagen, omdat plagsel dat bij het plaggen van terreinen vrijkomt meteen een goede bestemming vindt. Het zal wel van belang zijn om zo snel mogelijk nadat het substraat komt opdrijven veenmossen op de drijftillen te introduceren. Drijftillen blijven drijven bij de gratie van de aanwezigheid van organisch materiaal dat nog afbreekbaar is en zo methaangas kan opleveren. Op de langere termijn zal dit afbreekbare organische materiaal moeten worden geleverd door afgestorven resten van *Sphagnum* of eventueel andere plantensoorten die op de drijftil gaan groeien. Het verdient wel aanbeveling het materiaal te screenen voor introductie. Wanneer het materiaal te rijk is aan voedingsstoffen bestaat de kans dat de drijftil snel dichtgroeit met soorten als Pijpenstrootje en Pitrus (*Juncus effusus*) (Tomassen *et al.*, 2003a).

Figuur 9. Uitbreiding van *Sphagnum magellanicum* transplanta-ten op kaal veensubstraat (A) en in een snel groeiende *Sphagnum cuspidatum* vegetatie (B) in Clara bog (Ierland). Het witte kader geeft de initiële bedekking aan.

Figuur 10.

Relatie tussen de pH en de methaanconcentratie in veen afkomstig uit de Mariapeel, het Bargerveen, de Tuspeel en het Haaksbergerveen bij verschillende bekalkingsniveaus. Het veen werd vermengd met kalk (dolokal) en vervolgens 20 cm dik ingebracht in vijverbakken die reeds gevuld waren met 20 cm zwartveen en een halve meter regenwater. Op deze wijze werd de introductie van veen nagebootst in een geïnuundeerd zwartveen terrein. Na verloop van tijd kwamen de meeste geïntroduceerde veenplagen opdrijven. De cijfers bij de symbolen geven de hoeveelheid toegevoegd dolokal in mg g^{-1} weer. Indien niet alle plagen dreven, is het percentage dat wel ging drijven weergegeven.



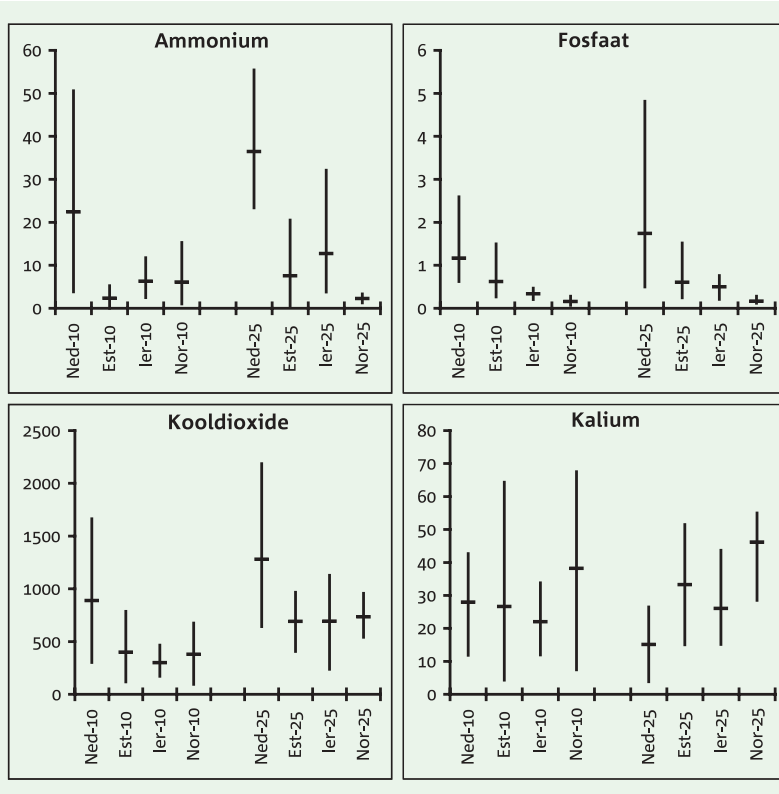
Hoogveenherstel bij hoge stikstofdepositie?

Effecten van hoge stikstofdepositie

De concentraties van de belangrijkste nutriënten (gemeten op twee verschillende diepten) blijken in de Nederlandse hoogvenen aanzienlijk hoger te liggen dan in buitenlandse referentiegebieden (figuur 11). De hogere kooldioxideconcentraties in het veenvocht kunnen veroorzaakt worden door een versterkte decompositie. Op zich hoeft de verhoogde nutriëntenbeschikbaarheid de groei van het *Sphagnum* niet negatief te beïnvloeden. Wanneer alle nutriënten in voldoende mate beschikbaar zijn, zou de groei van *Sphagnum* zelfs kunnen worden gestimuleerd. We zien echter dat de stikstofconcentratie over het algemeen aanzienlijk sterker is toegenomen dan de concentratie van de overige nutriënten (figuur 11). De disproportionele toename van de stikstofbeschikbaarheid, die het gevolg is van de hoge stikstofdepositieniveaus in de laatste decennia, heeft ertoe geleid dat de groei van de veenmossen niet meer door stikstof (N), maar vaak door fosfor (P) wordt gelimiteerd. De veenmossen zijn hierdoor niet meer in staat om alle stikstof die via de atmosfeer wordt aangevoerd op te nemen.

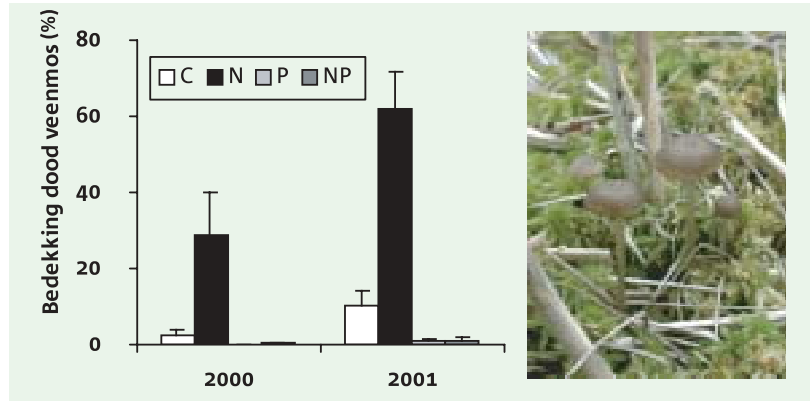
Het zogenaamde veenmosfilter is verzadigd, waardoor stikstof ophoopt in het veenvocht en beschikbaar komt voor hogere planten, die hier dan ook van pro-

fiteren (Lamers *et al.*, 2000). Deze overmaat aan N leidt in de veenmossen tot ophoping van stikstofrijke vrije aminozuren (Tomassen *et al.*, 2003b). Deze aminozuren worden in de veenmossen gevormd wanneer meer N de plant binnenkomt dan deze kan omzetten in bouwstoffen (Risager, 1998; Limpens & Berendse, 2003a). Als gevolg van de hoge stikstofbelasting worden de veenmossen gevoelig voor infectie met de Veenmosgrauwkop (*Tephrocye palustris*; figuur 12) (Limpens *et al.*, 2003b). Deze infectie leidt tot een ontkleuring van het veenmos die als witte vlekken goed in de vegetatie te herkennen zijn. Extra bemesting met P heft de P-limitatie op en maakt de veenmossen ook minder gevoelig voor de schimmelinfectie (figuur 12). Voor de Zwarte den is beschreven dat de gevoeligheid voor schimmelinfecties rechtstreeks werd veroorzaakt door de ophoping van stikstofrijke vrije aminozuren in de naalden (De Kam *et al.*, 1991; Van Dijk *et al.*, 1992). Vermoedelijk speelt hetzelfde mechanisme ook een rol bij de verhoogde gevoeligheid van veenmossen. Ook de afwezigheid van *Cladonia*-soorten in Nederland kan worden toegeschreven aan de hoge stikstofdepositie. Zo is uit experimenten in Ierland gebleken dat *Cladonia* zeer sterk achteruitgaat bij stikstofdepositieniveaus hoger dan 20 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ (figuur 13) (Tomassen *et al.*, 2004b).



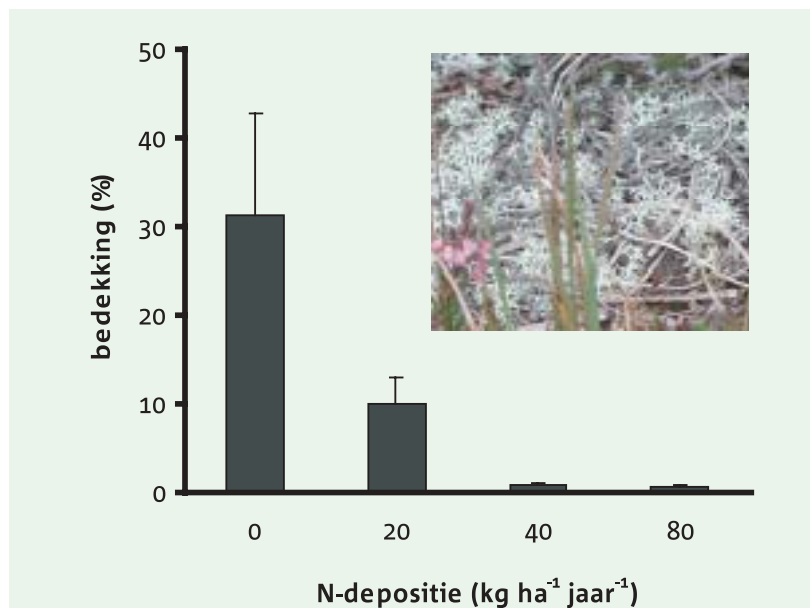
Figuur 11. Concentratie ammonium, fosfaat, koolstofdioxide en kalium ($\mu\text{mol l}^{-1}$) in het bodemvocht van verschillende venen in Nederland, Estland, Ierland en Noorwegen op 10 en 25 cm diepte. Weergegeven zijn gemiddelden en de minimale en maximale gemeten concentratie.

Figuur 12.
Oppervlakte dood veenmos per bemestingsbehandeling per jaar (± 1 SE) als gevolg van infectie door de Veenmosgrauwkap, een paddestoel die dode plekken in veenmos kan veroorzaken. C staat voor de controlebehandeling, N voor stikstofbemesting, P voor fosfaatbemesting en NP voor stikstof + fosfaat bemesting. De foto toont de Veenmosgrauwkap (*Tephrocye palustris*).



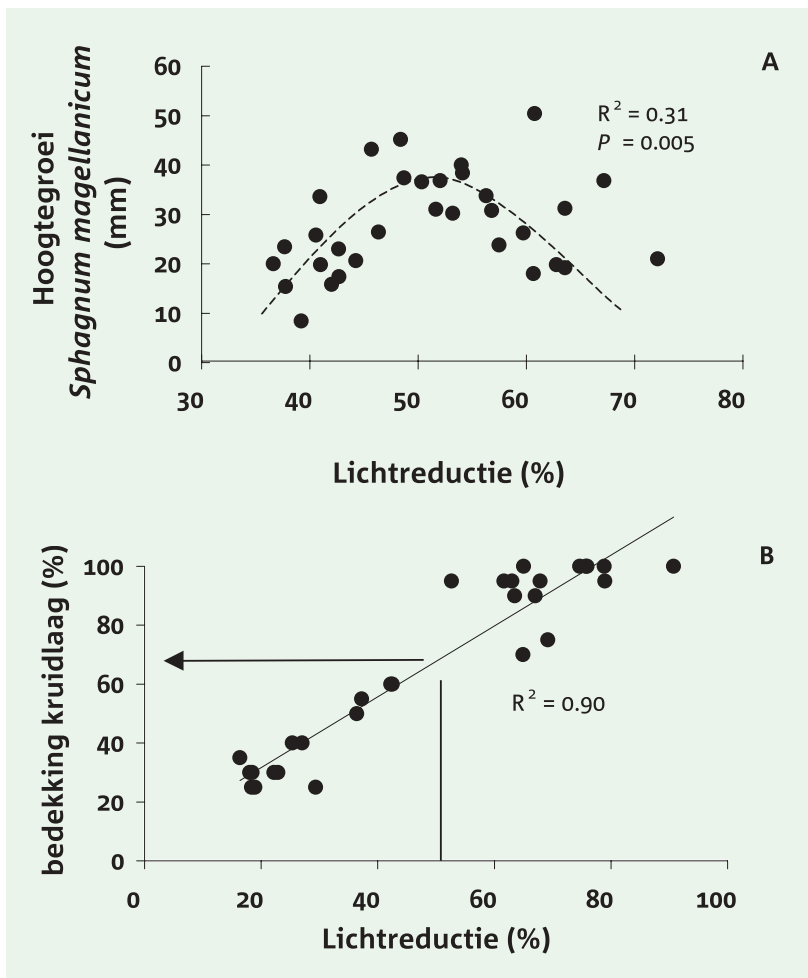
De hoge stikstofdepositie heeft geleid tot een sterke toename van vaatplanten in de Nederlandse hoogveenrestanten. Met name de sterke dominantie van Pijpenstrootje en Berk vormen voor de beheerders een belangrijk probleem. Deze soorten lijken het vooral goed te doen bij minder stabiele waterstanden, waarbij de grondwaterspiegel regelmatig relatief diep wegzakt. In permanent natte systemen (stabiel hoge grondwaterspiegel) nemen soorten als Kleine veenbes (*Oxycoccus palustris*) en Witte snavelbies (*Rhynchospora alba*) zeer sterk toe bij een verhoogde stikstofdepositie. Uit laboratoriumexperimenten is gebleken dat Pijpenstrootje in staat is te profiteren van een verhoogde stikstofbeschikbaarheid zonder dat de fosfaatbeschikbaarheid toeneemt (Tomassen *et al.*, 2003b). Het is bekend dat Pijpenstrootje zeer efficiënt fosfaat op kan nemen (Kirkham, 2001) en uit de experimenten bleek dan ook dat zelfs bij een depositieniveau van 40 kg N ha⁻¹ jaar⁻¹ de groei van Pijpenstrootje nog steeds werd gelimiteerd door N

Figuur 13.
Bedekking van proefvlakken (\pm SE) in een verdroogd deel van Clara bog door *Cladonia* na drie jaar blootstelling aan verschillende stikstofdepositieniveaus. De foto toont *Cladonia* groeiend op een verdroogd deel van Clara bog (Ierland).



(Tomassen *et al.*, 2003b). Voor Berk bleek dat deze alleen kan profiteren van de verhoogde beschikbaarheid van N, wanneer er tevens voldoende fosfaat beschikbaar is (Tomassen *et al.*, 2003b; 2004b). In Nederlandse hoogvenen is de fosfaatbeschikbaarheid over het algemeen hoger dan in buitenlandse hoogvenen (figuur 11). Dit kan verklaren waarom in (verdroogde) Nederlandse hoogvenen veel vaker een sterke toename van de Berk ('verberking') wordt waargenomen dan in relatief 'schone' landen als Ierland en Estland.

Veenmossen worden positief beïnvloed door een lichte mate van beschaduwing, maar hebben sterk te lijden van een te sterke beschaduwing door een excessieve toename van hogere planten. Veenmosgroei wordt geremd, wanneer de beschaduwing hoger wordt dan 50 %, hetgeen overeenkomt met een kruidlaagbedekking van ± 70 % (figuur 14). Een sterke beschaduwing blijkt bij een hoge stikstofbelasting ook te leiden tot een toename van de groei van algen door de verminderde



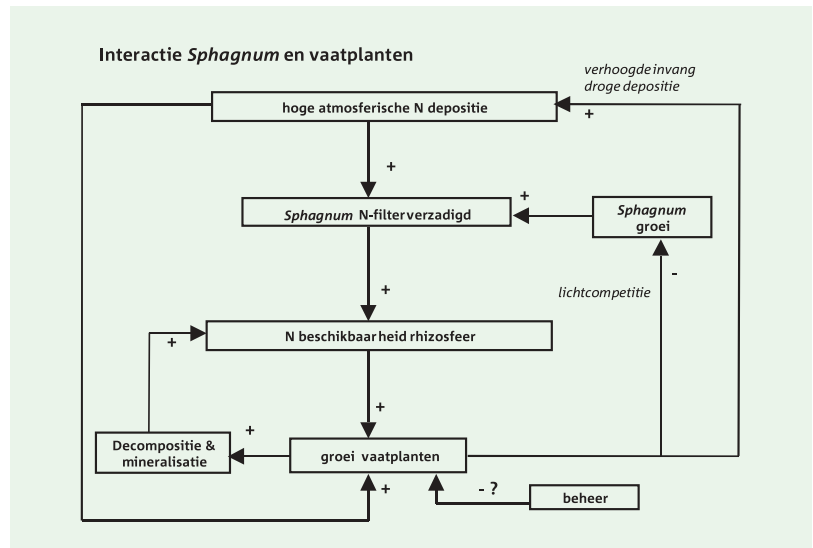
Figuur 14.

A: De relatie tussen de lichtreductie door de kruidlaag en de hoogtegroei van *S. magellanicum*.

B: De relatie tussen de lichtreductie door de kruidlaag en de geschatte bedekking van een *Erica* vegetatie. De punten zijn gemiddelden van 2 metingen net boven de veenmoslaag met behulp van een lichtmeter (lichtgevoelig oppervlak van 1m x 2 cm, DeltaT).

opname van N door *Sphagnum*. De verminderde groei van veenmossen als gevolg van beschaduwing en algengroei leidt tot een lagere stikstofopname, waardoor meer N beschikbaar komt voor de vaatplanten. Bovendien zijn vaatplanten gemakkelijker afbreekbaar, waardoor de hierin vastgelegde nutriënten weer sneller vrijkomen in het veen (Limpens & Berendse, 2003b). Op deze manier ontstaat een positieve terugkoppeling die leidt tot een nog grotere dominantie van vaatplanten. Meer vaatplanten zullen ook meer droge depositie invangen, waardoor de stikstofbelasting nog verder toeneemt. Daarnaast hebben hogere planten door de interceptie van neerslag en een hogere verdamping ook een negatief effect op de waterhuishouding (Heijmans *et al.*, 2002), waardoor de decompositie nog verder gestimuleerd kan worden. De interacties tussen *Sphagnum* en vaatplanten worden weergegeven in figuur 15.

Figuur 15.
 Schema van de interacties
 tussen *Sphagnum* en vaat-
 planten bij een hoge en een
 lage atmosferische stikstof-
 depositie.



Aanvullend beheer

Gelukkig zijn de stikstofdepositieniveaus in Nederland de laatste 15 jaar sterk gedaald en zullen deze naar verwachting in de toekomst nog verder afnemen (Boxman, 2002). Dit betekent dat de kansen voor een succesvol herstel van hoogveenvegetaties in Nederland in de komende decennia zullen verbeteren. Het kritische stikstofdepositieniveau ligt voor hoogveenvegetaties tussen de 5 en 10 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ (Bobbink & Roelofs, 1995). Voorlopig zitten we daar in Nederland met 20-40 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ nog fors boven en hebben we bovendien nog te maken met de erfenis uit het verleden. Daarom zal zeker in de nabije toekomst, aanvullend beheer nodig blijven of op zijn minst wenselijk zijn, om de overmatige groei van vaatplanten te beperken. Dit zal zeker gelden voor de wat drogere terreinen. Het beheer zou er op gericht moeten zijn om de bedekking van de kruid-

laag niet hoger te laten worden dan 70 %. Bij een hogere kruidlaagbedekking zal door een te sterke beschaduwing de groei van de veenmossen worden geremd (figuur 14). Beheersexperimenten in het Pikmeeuwenwater (De Hamert) laten zien dat eenmalig maaien of plaggen van de vegetatie reeds tot een spectaculaire verbetering van de veenmosgroei kan leiden (figuur 16). Het verdient wel aanbeveling deze werkzaamheden (met name plaggen) gefaseerd in ruimte en tijd uit te voeren, zodat de aanwezige veenmossen en faunasoorten in het terrein behouden blijven. Daarnaast heeft, zoals we reeds hebben gezien, ook een permanent hoge waterstand een gunstige invloed op hoogveenvegetaties, waarschijnlijk omdat hierdoor de mineralisatie relatief laag blijft.



Figuur 16. Illustratie van de vegetatie in een controle (linksboven), gemaaid (rechtsboven), geplagd (linksonder) en uitgeveend (rechtsonder) proefvlak van het beheersexperiment in het Pikmeeuwenwater in 2001, zeven jaar na uitvoering van de beheersmaatregelen. Opvallend is de hoge veenmosbedekking in de gemaaide en geplagde proefvlakken.

Herstel en behoud van faunadiversiteit

In hoofdstuk 7 worden de resultaten van het faunaonderzoek in de hoogvenen uitgebreider besproken. Hier wordt kort ingegaan op de belangrijkste uitkomsten van het onderzoek. Uit het onderzoek naar de aquatische ongewervelden komt naar voren dat de toename van de beschikbaarheid van nutriënten een stempel heeft gedrukt op de faunasamenstelling in de Nederlandse hoogveenrestanten (Van Duinen *et al.*, 2004). Desondanks worden de meeste wateren die door vernattingmaatregelen zijn ontstaan, gekoloniseerd door een aantal voor hoogvenen karakteristieke en zeldzame watermacrofaunasoorten. Met name wanneer de uitgangssituatie een grootschalige vervinging betreft, zoals het Amsterdamseveld en Schoonebeekerveld, is de vestiging van deze soorten honderd procent winst. Wateren die al lange tijd bestaan en niet aan grootschalige en plotselinge veran-

deringen onderhevig zijn geweest, blijken echter meer karakteristieke hoogveensoorten en zeldzame macrofaunasoorten te herbergen. Een aanzienlijk aantal van de karakteristieke en zeldzame soorten is zelfs alleen aangetroffen in dit soort 'relict-wateren', zoals veenputten in het Korenburgerveen (figuur 17), greppels van de boekweitbrandcultuur in het Meerstalblok en hoogveentjes in het Dwingelderveld en niet in (grootschalig) vernatte situaties. Ook 'relict-wateren' die wat de vegetatiesamenstelling betreft niet erg waardevol lijken, blijken vaak nog relatief veel karakteristieke en (zeer) zeldzame soorten te kunnen herbergen (Van Duinen *et al.*, 2003a).

Voor de microfauna (Raderdieren, Watervlooien en Eénoogjes) blijken deze verschillen in soortensamenstelling tussen 'relict-wateren' en grootschalig vernatte situaties niet te bestaan (Van Duinen *et al.*, 2003b). Ook de schaalmoebenfauna herstelt snel en volledig, ongeacht de Ausgangssituatie van het verveende terrein (Buttler *et al.*, 1996). Dit verschil in herstel tussen micro- en macrofauna hangt waarschijnlijk samen met de gemakkelijke verspreiding van microfauna en de veelal complexere levenscyclus van macrofaunasoorten, zoals waterkevers en libellen.

De vernattingsmaatregelen hebben tot nu toe op de verschillende locaties in de verschillende terreinen een sterk overeenkomende macrofaunasamenstelling opgeleverd. In de loop van jaren vindt vaak een lichte toename van het aantal zeldzame en karakteristieke soorten plaats, maar dit betreft toch een beperkt aantal soorten. Tot nu toe hebben de maatregelen in ieder geval nog niet geleid tot herstel van een compleet soortenspectrum van de hoogveenfauna (Van Duinen *et al.*, 2002). Wanneer in een hoogveenrestant nog oude veenputten aanwezig zijn, kunnen met name grootschalige ingrepen ervoor zorgen dat populaties van zeldzame en karakteristieke soorten uit een terrein verdwijnen, doordat de habitat van deze soorten plotseling en ongunstig wordt beïnvloed. Voor veel macrofaunasoorten verloopt (her-)kolonisatie moeizaam, zeker in de huidige situatie, waarin eventuele bronpopulaties vaak op relatief grote afstand liggen. In het herstelbeheer is het dus erg belangrijk dat maatregelen worden genomen die gericht zijn op behoud en zo mogelijk versterking van de aanwezige populaties van karakteristieke en zeldzame soorten binnen de terreinen.

De verschillende hoogveensoorten stellen verschillende eisen aan hun habitat. Het onderzoek in meer intacte hoogvenen in Ierland en Estland laat zien dat zowel de overgangszones tussen de hoogveenkern en andere landschapstypen, als de verschillende watertypen binnen de hoogveenkern van belang zijn voor de faunadiversiteit, inclusief het voorkomen van karakteristieke soorten (Smits *et al.*, 2002). In het herstelbeheer is het dus van belang dat habitatvariatie op landschapsschaal behouden en hersteld wordt. Momenteel is in de hoogveenrestanten de variatie in standplaatstypen in een (onnatuurlijk) mozaïekpatroon gerangschikt als gevolg van het vroegere gebruik van hoogvenen. Het huidige voorkomen van faunasoor-



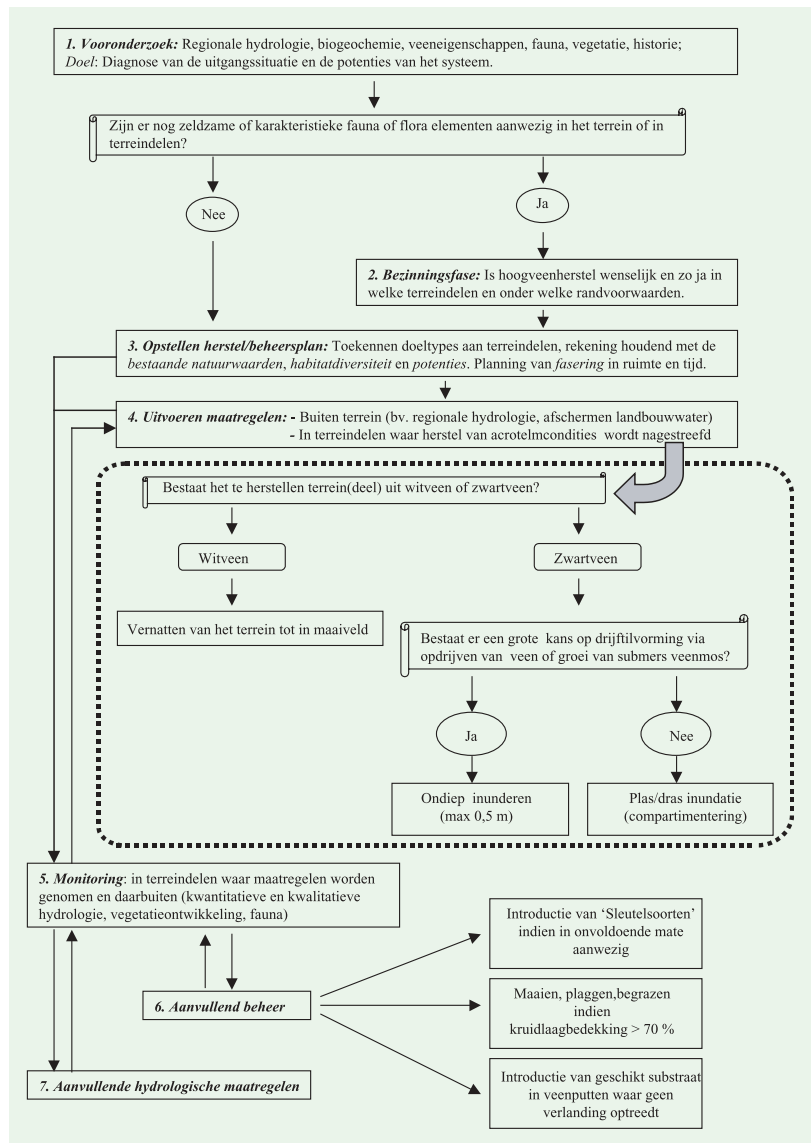
Figuur 17.
Veel karakteristieke en zeldzame macrofaunasoorten blijken hoofdzakelijk voor te komen in oude veenputten, zoals deze veenput in het Vragenderveen (Korenburgerveen) waar de zeer zeldzame en karakteristieke dansmug *Lasiodiamesa gracilis* (rechts; foto: René Krekels) is aangetroffen.

ten is afhankelijk van deze variatie en dit mozaïekpatroon. Grootschalige maatregelen hebben veelal een nivellerende werking en dragen daardoor niet bij aan het behoud en herstel van de variatie in standplaatstypen en faunadiversiteit. Door de veranderingen in de hoogveenrestanten kunnen er nu ook soorten voorkomen, die niet tot de oorspronkelijke hoogveenfauna behoren (Göttlich, 1980; Wheeler & Shaw, 1995; Irmeler *et al.*, 1998). De oorspronkelijke habitat van een aantal van deze soorten is nu aangetast, waardoor zij momenteel van hoogveenrestanten afhankelijk zijn voor hun voortbestaan in Nederland (Akkermann, 1982; Schouwenaars *et al.*, 2002). Ook daarom vraagt het behoud en herstel van karakteristieke en zeld-

zame faunasoorten een goed vooronderzoek en een goed doordachte fasering van herstelmaatregelen.

Zowel voor de aquatische als voor de terrestrische fauna geldt dat het vastleggen van de uitgangssituatie voorafgaand aan de uitvoering van maatregelen erg belangrijk is. Alleen dan kan bij maatregelen werkelijk rekening gehouden worden met het voorkomen van populaties van karakteristieke en zeldzame faunasoorten. Fasering van maatregelen en de schaal waarop ingrepen plaatsvinden, kan dan mede afgestemd worden op het voorkomen van faunasoorten en faunaontwikke-

Figuur 18.
Stappenplan voor het uitvoeren van herstel- of beheersmaatregelen op basis van de resultaten verkregen in de eerste fase van het OBN-hoogveenonderzoek.



lingen binnen het terrein. Nadat is vastgesteld dat belangrijke soorten zich in andere terreindelen gevestigd hebben als gevolg van herstelmaatregelen, kan overwogen worden ook maatregelen te nemen in een deel van het terrein waar nog relictpopulaties voorkomen. Naast het creëren van optimale condities voor bultvormende vegetaties, is het voor het behoud en herstel van faunadiversiteit dus essentieel dat ook andere elementen van een compleet hoogveensysteem aanwezig blijven en gecreëerd worden.

Aanbevelingen voor herstelbeheer in hoogveenrestanten

Op basis van de kennis die in de eerste fase van het OBN-hoogveenonderzoek is opgedaan, kunnen we een aantal aanbevelingen geven, die zijn verwerkt in een stappenplan voor de uitvoering van herstel- en beheersmaatregelen in hoogveenrestanten (figuur 18).

Het belangrijkste onderdeel van het herstelprogramma behelst het vooronderzoek. Dit vooronderzoek moet resulteren in een diagnose van de uitgangssituatie (liefst een volledige systeemanalyse). Hierbij moet een accurate beschrijving van de aanwezige vegetatietypen en fauna worden gegeven. Daarnaast moet een nauwkeurige beschrijving van de hydrologie en met name de eventuele relatie tussen de regionale hydrologie en de hydrologie van het systeem worden gegeven. Vragen zoals: ‘speelt wegzijging een belangrijke rol?’ of ‘is er aanvoer van water via de bodem of oppervlakkige afstroming?’ en ‘wat zijn de bergingseigenschappen van het nog aanwezige restveen?’ zijn belangrijk. Daarnaast zijn met name ook de fysische en chemische eigenschappen van het restveen van belang om bijvoorbeeld te kunnen beoordelen of na eventuele inundatie drijftilvorming te verwachten valt. Bovendien kan de nutriëntenrijkdom van de toplaag een indicatie geven van de te verwachten vegetatieontwikkeling, gegeven de huidige stikstofdepositieniveaus.

Op basis van het vooronderzoek kan een herstel- en beheersplan worden opgesteld, waarbij voor de verschillende terreindelen doeltypes worden toegekend, rekening houdend met de bestaande natuurwaarden en de potenties van deze terreindelen. Voor de terreindelen waar de ontwikkeling van een acrotelm wordt nagestreefd, zullen in het plan de adequate vernattingsstrategieën worden uitgewerkt. Daarbij is de toekomstige terreinhelling in relatie tot de afstand tot de (toekomstige) waterscheiding van essentieel belang (Van der Schaaf & Streefkerk, 2002). Wanneer in het veld nog zeldzame of karakteristieke soorten voorkomen, is het belangrijk om na het vooronderzoek een bezinningsfase in te lassen, waarin wordt heroverwogen of hoogveenontwikkeling in het gebied wel wenselijk is in verband met de generale doelstelling om zeldzame, bedreigde soorten te behouden. In deze bezinningsfase moet worden onderzocht in hoeverre eventuele maat-

regelen in het terrein het voortbestaan van deze soorten in gevaar zouden brengen en is het van belang dat voorwaarden worden geformuleerd, die bij het opstellen van het herstel- en beheersplan in acht genomen moeten worden om dit te voorkomen.

Gedurende verschillende fasen in de uitvoering van de vernattingsmaatregelen is het van belang 'de vinger aan de pols te houden' door middel van een adequate monitoring. Daarmee kunnen de effectiviteit en ook eventuele neveneffecten van de genomen maatregelen worden vastgesteld. De resultaten van de monitoring moeten vervolgens regelmatig worden getoetst aan de doelstellingen, zoals deze zijn geformuleerd in het herstel- en beheersplan. Op basis van deze terugkoppeling kunnen, indien nodig, oorspronkelijke plannen worden bijgesteld of nieuwe dan wel aanvullende maatregelen op waterhuishoudkundig of ander gebied worden genomen. De effecten daarvan worden vervolgens weer vastgelegd met behulp van de monitoring. Gegevens uit vooronderzoek en monitoring vormen dus de basis voor de vernattingsmaatregelen en het vervolgbeheer. In het kader zijn tenslotte een aantal aandachtspunten genoemd voor de uitvoering van maatregelen in hoogveenrestanten, zoals die naar aanleiding van het hier beschreven onderzoek geformuleerd konden worden.

Uit het onderzoek blijkt dat het in de Nederlandse hoogveenrestanten, ondanks de ingrijpende gevolgen van het vroegere gebruik van hoogvenen en de hoge stikstofdepositie, mogelijk is karakteristieke planten- en diersoorten te behouden en hoogveenvorming weer op gang te brengen. Afhankelijk van de bestaande lokale en regionale situatie van de terreinen, zijn herstelstrategieën mogelijk, die relatief goede perspectieven bieden voor herstel van hoogveenvorming.

Dankwoord

Het omvangrijke onderzoeksproject kon niet worden uitgevoerd zonder de hulp van velen. Collega's en een groot aantal studenten van de Radboud Universiteit (voorheen Katholieke Universiteit Nijmegen), Wageningen Universiteit en Stichting Bargerveen hebben een grote bijdrage geleverd aan het veldwerk en aan de experimenten, verwerking van monsters en determinaties in het laboratorium. De beheerders van de verschillende hoogvenen in Nederland (Natuurmonumenten, Staatsbosbeheer en Stichting het Limburgs Landschap), Ierland en Estland bedanken we voor de perfecte medewerking. Tenslotte bedanken we de leden van het OBN-deskundigenteam Hoogvenen voor de prettige samenwerking.

Aandachtspunten bij de uitvoering van maatregelen in hoogveenrestanten

1. In het verleden is vaak gekozen voor zeer grootschalige vernattingsmaatregelen, vaak zonder voldoende voorkennis over de mogelijke gevolgen voor de aanwezige fauna. Mogelijk is hierdoor in een aantal gevallen meer aan natuurwaarde verloren gegaan dan er gewonnen is. Bij het ontwerpen en formuleren van vernattingsmaatregelen moet dan ook rekening gehouden worden met faunacomponenten. Indien de kennis over de aanwezige fauna ontbreekt, zal deze door middel van vooronderzoek eerst moeten worden vergaard door een goede inventarisatie van relevante faunagroepen. Pas dan kan een gefaseerd plan van aanpak worden opgezet, waarbij rekening kan worden gehouden met de aanwezige faunacomponenten.
2. Voor zwartveenrestanten zouden delen van het terrein middels compartimentering zo moeten worden ingericht dat over delen van het terrein permanente plas-dras situaties kunnen worden gecreëerd. Dit betekent dat andere delen van het terrein een waterbergingsfunctie moeten krijgen, zodat in droge perioden water in doelcompartimenten kan worden ingelaten.
3. Voor witveenrestanten kan worden volstaan met hervernatting tot aan het maaiveld.
4. In de delen van het terrein waar acrotelmvorming wordt nagestreefd, maar waar de sleutelsoorten (*S. magellanicum*, *S. papillosum* en *S. rubellum*) niet aanwezig zijn, zou introductie van deze soorten overwogen moeten worden. De afwezigheid van deze soorten in de vegetaties staat een ontwikkeling richting hoogveen in de weg. Het gebrek aan natuurlijke verspreidings en vestigingsmogelijkheden van deze soorten is hiervan de hoofdoorzaak en niet het abiotische milieu.
5. Bij een kruidlaagbedekking van meer dan 70 % is aanvullend beheer noodzakelijk, om overmatige beschaduwning van veenmossen tegen te gaan. Maaien blijkt net als plaggen zeer effectief te zijn en de uitbreiding van veenmossen te bevorderen. Dit aanvullende beheer zal waarschijnlijk nodig blijven zolang de stikstofdepositie nog boven de 10 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ ligt.
6. Voor de hydrologische monitoring verdient het aanbeveling deels over te stappen op geautomatiseerde waarneming. Dit maakt het mogelijk om belangrijke hydrologische eigenschappen van het veen, zoals de bergingscapaciteit in afhankelijkheid van de diepte en waterverliezen naar de omgeving, in kaart te brengen.

Literatuur

- **Akkermann, R.** 1982. Mogelijkheden en Zielsetzingen für eine Regeneration von Hochmooren – zoologisch betrachtet. In: Akkermann, R. (Ed.). Regeneration von Hochmooren. Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege in Nordwestdeutschland. Band 3. pp. 151-163.
- **Balyasova, Y.L.**, 1979. Methods for estimating the reliability of experimentally determined major hydrologic characteristics of bogs. Soviet Hydrology: selected papers 18 (2): 117-123.
- **Bay, R.R.**, 1969. Runoff from small peatland watersheds. Journal of Hydrology 9: 90-102.
- **Beets, C.P.**, 1993. Hochmoorregeneration nach Wiedervernässung industriell abgetorfte Hochmoore in de Niederlanden (Einrichtung, Kosten und Entwicklungen). Telma 23: 271-285
- **Bobbink, R. & J.G.M. Roelofs**, 1995. Nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems: The empirical approach. Water Air and Soil Pollution 85: 2413-2418.
- **Boxman, A.W.**, 2002. Effecten van verminderde stikstofdepositie op een grove dennenopstand in natuurgebied "De Rouwkuilen", Limburg. Tussenrapport 2001. Afdeling Aquatische Oecologie en Milieubiologie, Universiteit van Nijmegen.
- **Buttler, A., B.G. Warner, P. Grosvernier & Y. Matthey**, 1996. Vertical patterns of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) and peat-forming vegetation on cutover bogs in the Jura, Switzerland. New Phytologist 134: 371-382.
- **Buttler, A., P. Grosvernier & Y. Matthey**, 1998. Development of *Sphagnum fallax* diaspores on bare peat with implications for the restoration of cut-over bogs. Journal of Applied Ecology 35: 800-810.
- **Cronberg, N.**, 1991. Reproductive biology of *Sphagnum*. Lindbergia 17: 69-82.
- **Dijk, H.F.G. van, M. van der Gaag, P.J.M. Perik & J.G.M. Roelofs**, 1992. Nutrient availability in Corsican pine stands in the Netherlands and the occurrence of *Sphaeropsis sapinae*: A field study. Canadian Journal of Botany 70: 870-875.
- **Dorland, E., R. Bobbink, E. Brouwer, C.J.H. Peters, P.J.M. van der Ven, Ph. Vergeer, G.M. Verheggen & J.G.M. Roelofs**, 2000. Herintroductie en bekalking van het inziggebied. Aanvulling bij effectgerichte maatregelen tegen eutrofiering en verzuring in heischrale milieus. Leerstoelgroep Landschapsecologie, Universiteit Utrecht en Afdeling Aquatische Oecologie en Milieubiologie, Katholieke Universiteit Nijmegen. 118 pp.

- **Duinen G.A. van, A.M.T. Brock, J.T. Kuper, T.M.J. Peeters, M.J.A. Smits, W.C.E.P. Verberk & H. Esselink**, 2002. Important keys to successful restoration of characteristic aquatic macroinvertebrate fauna of raised bogs. Peat in Horticulture – Quality and Environmental Changes, Proceedings of the International Peat Symposium, Pärnu, Estonia, 3-6 September, 2002, International Peat Society. Pp. 292-302.
- **Duinen G.A. van, A.M.T. Brock, J.T. Kuper, R.S.E.W. Leuven, T.M.J. Peeters, J.G.M. Roelofs, G. Van der Velde, W.C.E.P. Verberk & H. Esselink**, 2003a. Do restoration measures rehabilitate fauna diversity in raised bogs? A comparative study on aquatic macroinvertebrates. *Wetlands Ecology and Management* 11: 447-459.
- **Duinen G.A. van, A.M.T. Brock, J.T. Kuper, T.M.J. Peeters, W.C.E.P. Verberk, Y. Zhuge & H. Esselink**, 2003b. Restoration of degraded raised bogs: do aquatic invertebrates tell a different story? In: Järvet, A. & E. Lode (Eds.). *Ecohydrological processes in northern wetlands, selected papers of the International Conference & Educational Workshop*, Tallinn. Pp. 255-261.
- **Duinen G.A. van, A.M.T. Brock, J.T. Kuper, T.M.J. Peeters & H. Esselink**, 2004. Do raised bog restoration measures rehabilitate aquatic fauna diversity? A comparative study between pristine, degraded, and rewetted raised bogs. In: Paivanen, J. (Ed.) *Wise Use of Peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress*, 6-11 June 2004, Tampere, Finland.
- **Göttlich, K.**, 1980. *Moor- und Torfkunde*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart. 338 pp.
- **Hayward, P.M. & R.S. Clymo**, 1982. Profiles of water content and pore size in *Sphagnum* and peat and their relation to peat bog ecology. *Proceedings of the Royal Society of London, series B* 215: 229-325.
- **Heijmans, M.M.P.D., W.J. Arp & F. Berendse**, 2001. Effects of elevated CO₂ and vascular plants on evapotranspiration in bog vegetation. *Global Change Biology* 7: 817-827.
- **Ingram, H.A.P.**, 1978. Soil layers in mires: function and terminology. *Journal of Soil Science* 29: 224-227.
- **Ingram, H.A.P.**, 1983. Hydrology. In: Gore, A.J.P. (Ed.). *Ecosystems of the world 4A. Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor. General Studies*. Elsevier. Pp. 67-158.
- **Irmiler, U., K. Müller & J. Eigner**, 1998. *Das Dosenmoor – Ökologie eines regenerierenden Hochmoores*. Faunistisch-ökologische Arbeitsgemeinschaft, Kiel. 283 pp.
- **Ivanov, K.E.**, 1965. Fundamentals of the theory of swamp morphology and hydromorphological relationships. *Soviet Hydrology. Selected Papers* 4: 224-258.

- **Ivanov, K.E.**, 1975. Hydrological stability criteria and preservation of bogs and bog/lake systems. In: Hydrology of Marsh-ridden Areas. Proc. Minsk Symp. June 1972. The Unesco Press, Paris. Pp. 343-353.
- **Ivanov, K.E.**, 1981. Water Movement in Mirelands. Academic Press. 276 pp.
- **Joosten, J.H.J.**, 1995. Time to regenerate: long-term perspectives of raised bog regeneration with special emphasis on palaeoecological studies. In: Wheeler, B.D., S.C. Shaw, W.J. Fojt & R.A. Robertson (Eds.) Restoration of Temperate Wetlands. J. Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 379-404.
- **Kam, M. de, C.M. Versteegen, J. van den Burg & D.C. van der Werf**, 1991. Effects of fertilisation with ammonium sulphate and potassium sulphate on the development of *Sphaeropsis sapinea* in Corsican pine. Netherlands Journal of Plant Pathology 97: 265-274.
- **Kellner, E.**, 2001. Surface Energy Exchange and Hydrology of a Poor *Sphagnum* Mire. Doctoral thesis 657, Fac. of Science and Technology, Uppsala University.
- **Kim, J. & S.B. Verma**, 1996. Surface exchange of water vapour between an open *Sphagnum* fen and the atmosphere. Boundary-Layer Meteor. 79: 243-264.
- **Kirkham, F.W.**, 2001. Nitrogen uptake and nutrient limitation in six hill moorland species in relation to atmospheric nitrogen deposition in England and Wales. Journal of Ecology 89: 1041-1053.
- **Kooijman, G.**, 2001. Initiële hoogveenvorming op drijvende vegetaties in De Weerribben en het Haaksbergerveen: Groei en hydrochemie van de stand plaats van vijf veenmossoorten. Afdeling Aquatische Oecologie en Milieubiologie, Katholieke Universiteit Nijmegen. Verslag nr. 540. 143 pp.
- **Lamers, L.P.M., C. Farhoush, J.M. van Groenendaal & J.G.M. Roelofs**, 1999. Calcareous groundwater raises bogs; the concept of ombrotrophy revisited. Journal of Ecology 87: 637-648.
- **Lamers, L.P.M., R. Bobbink & J.G.M. Roelofs**, 2000. Natural nitrogen filter fails in raised bogs. Global Change Biology 6: 583-586.
- **Li, Y. & D.H. Vitt**, 1994. The dynamics of moss establishment: Temporal responses to nutrient gradients. Bryologist 97: 357-364.
- **Limpens J. & F. Berendse**, 2003a. Growth reduction of *Sphagnum magellanicum* subjected to high nitrogen deposition: the role of amino acid nitrogen concentration. Oecologia 135: 339-345
- **Limpens J. & F. Berendse**, 2003b. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing *Sphagnum*. Oikos 103: 537-547.
- **Limpens J., F. Berendse & H. Klees**, 2003a. N deposition affects N availability in interstitial water, growth of *Sphagnum* and invasion of vascular plants in bog vegetation. New Phytologist 157: 339-347.

- **Limpens J., J.T.A.G. Raymakers, J. Baar, F. Berendse & J.D. Zijlstra, 2003b.** The interaction between epiphytic algae, a parasitic fungus and *Sphagnum* as affected by N and P. *Oikos* 103: 59-68.
- **Money, R.P., 1995.** Re-establishment of a *Sphagnum*-dominated flora on cut-over lowland raised bogs. In: B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt & R.A. Robertson (Eds.). *Restoration of Temperate Wetlands*. J. Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 405-422.
- **Paffen, B.G.P. & J.G.M. Roelofs, 1991.** Impact of carbon dioxide and ammonium on the growth of submerged *Sphagnum cuspidatum*. *Aquatic Botany* 40: 61-71.
- **Phersson, M. & O. Pettersson, 1997.** Energy and Water Balances of a Bog in Central Sweden. *Nordic Hydrol.* 28 (4/5):263-272.
- **Proctor, M.C.F., 1995.** The ombrogenous bog environment. In: B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt & R.A. Robertson (Eds.). *Restoration of Temperate Wetlands*. J. Wiley and Sons, Chichester, UK. Pp. 287-303.
- **Riis, T. & K. Sand-Jensen, 1997.** On the ecological and evolutionary significance of branch and leaf morphology in aquatic *Sphagnum* (Sphagnaceae). *American Journal of Botany* 82: 833-846.
- **Risager, M., 1998.** Impacts of nitrogen on *Sphagnum* dominated bogs, with emphasis on critical load assessment. Thesis Department of Plant Ecology, Botanical institute, Faculty of Science, University of Copenhagen.
- **Romanov, V.V., 1968.** *Hydrophysics of bogs*. Israel Program of Scientific Translations, Jerusalem. 299 pp.
- **Rydin, H. & R.S. Clymo, 1989.** Transport of carbon and phosphorous compounds about *Sphagnum*. *Proceedings of the Royal Society of London* 237: 63-84.
- **Salonen, V., 1987.** Relationship between seed rain and the establishment of vegetation in two areas abandoned after peat harvesting. *Holarctic Ecology* 10: 171-174.
- **Schaaf, S. van der, 1999.** Analysis of the hydrology of raised bogs in the Irish Midlands - A case study of Raheenmore Bog and Clara bog. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, the Netherlands. 375 pp.
- **Schaaf, S. van der, & J.G. Streefkerk, 2002.** Relationships between biotic and abiotic conditions. In: M.G.C. Schouten (Ed.) *Conservation and Restoration of Raised Bogs. Part 1. Geological, Hydrological and Ecological Studies*. Department of the Environment and Local Government / Staatsbosbeheer. Pp. 186-209.

- **Schouten, M.G.C., J.M. Schouwenaaers, H. Esselink, L.P.M. Lamers & P.C. van der Molen**, 1998. Hoogveenherstel in Nederland – droom en werkelijkheid. In: Bobbink, R., J.G.M. Roelofs & H.B.M. Tomassen (Eds.). Effectgerichte maatregelen en behoud biodiversiteit in Nederland. Symposiumverslag. Aquatische Oecologie en Milieubiologie, Katholieke Universiteit Nijmegen. Pp. 93-113.
- **Schouwenaaers, J.M., H. Esselink, L.P.M. Lamers & P.C. van der Molen**, 2002. Ontwikkeling en herstel van hoogveensystemen. Bestaande kennis en benodigd onderzoek. Expertisecentrum LNV, Wageningen. 186 pp.
- **Segers, R.**, 1998. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry* 41: 23-51.
- **Smits, M.J.A., G.A. van Duinen, J.G. Bosman, A.M.T. Brock, J. Javořič, J.T. Kuper, T.M.J. Peeters & H. Esselink**, 2002. Species richness in a species poor system: aquatic macroinvertebrates of Nigula raba, an intact raised bog system in Estonia. Peat in Horticulture – Quality and Environmental Changes, Proceedings of the International Peat Symposium, Pärnu, Estonia, 3-6 September, 2002, International Peat Society. Pp. 283-291.
- **Smolders, A.J.P., H.B.M. Tomassen, H.W. Pijnappel, L.P.M. Lamers, & J.G.M. Roelofs**, 2001. Substrate-derived CO₂ is important in the development of *Sphagnum* spp. *New Phytologist* 152: 325-332.
- **Smolders, A.J.P., H.B.M. Tomassen, L.P.M. Lamers, B.P.M. Lomans & J.G.M. Roelofs**, 2002. Peat bog restoration by floating raft formation: the effects of groundwater and peat quality. *Journal of Applied Ecology* 39: 391-401.
- **Smolders, A.J.P., H.B.M. Tomassen, M. van Mullekom, L.P.M., Lamers & J.G.M. Roelofs**, 2003. Mechanisms involved in the re-establishment of *Sphagnum*-dominated vegetation in rewetted bog remnants. *Wetlands Ecology and Management* 11: 403-418.
- **Sundberg, S. & H. Rydin**, 2002. Habitat requirements for establishment of *Sphagnum* from spores. *Journal of Ecology* 90: 268-278.
- **Tomassen, H.B.M., A.J.P. Smolders, J. Limpens, G.J. van Duinen, S. van der Schaaf, J.G.M. Roelofs, F. Berendse, H. Esselink & G. van Wirdum**, 2002. Onderzoek herstel en beheer van Nederlandse hoogvenen. Eindrapportage 1998-2001. Expertisecentrum LNV, Wageningen. 186 pp.
- **Tomassen, H.B.M., A.J.P. Smolders, J.M. van Herk, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs**, 2003a. Restoration of cut-over bogs by floating raft formation: An experimental feasibility study. *Applied Vegetation Science* 6: 141-152.

- **Tomassen, H.B.M., A.J.P. Smolders, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2003b.** Stimulated growth of *Betula pubescens* and *Molinia caerulea* on ombrotrophic bogs: role of high levels of atmospheric nitrogen deposition. *Journal of Ecology* 91: 357-370.
- **H.B.M. Tomassen, A.J.P. Smolders, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2004a** Development of floating rafts after the rewetting of cut-over bogs: the importance of peat quality. *Biogeochemistry* (in press).
- **Tomassen, H.B.M., A.J.P. Smolders., J. Limpens, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2004b.** Expansion of invasive species on ombrotrophic bogs: desiccation or high N deposition? *Journal of Applied Ecology* 41: 139-150.
- **Turetsky, M.R. & R.K. Wieder, 1999.** Boreal bog *Sphagnum* refixes soil-produced and respired $^{14}\text{CO}_2$. *Ecoscience* 6: 587-591.
- **Verberk, W.C.E.P., G.A. van Duinen, T.M.J. Peeters & H. Esselink, 2001.** Importance of variation in watertypes for water beetle fauna (Coleoptera) in Korenburgerveen, a bog remnant in The Netherlands. *Proceedings of Experimental and Applied Entomology, N.E.V., Amsterdam*, 12: 121-128.
- **Verhoeven, J.T.A. & W.M. Liefveld, 1997.** The ecological importance of organochemical compounds in *Sphagnum*. *Acta Botanica Neerlandica* 46: 117-130.
- **Verry, E.S., 1984.** Microtopography and water table fluctuation in a *Sphagnum* mire. *Proc. 7th Int. Peat Congress Dublin, June 18-23 1984.* Vol.2:11-31. The International Peat Society, Helsinki, Finland.
- **Wheeler, B.D. & S.C. Shaw, 1995.** Restoration of damaged peatlands. Dept. of the Environment, H.M.S.O., London, U.K.