ALTERRA
WAGENINGEN UR

Stikstof-, fosfor- en kaliumbeschikbaarheid en kritische depositiewaarden voor stikstof in korte vegetaties

R.H. Kemmers
S.P.J. van Delft



Alterra-rapport 1598, ISSN 1566-7197

Stikstof-, fosfor- en kaliumbeschikbaarheid en kritische depositiewaarden voor stikstof in korte vegetaties

Uitgevoerd in het kader van Beleidsondersteunend Onderzoek van het Ministerie LNV, cluster Ecologische hoofdstructuur, thema abiotische randvoorwaarden. Gefinancierd door het Ministerie van VROM.

Stikstof-, fosfor- en kaliumbeschikbaarheid en kritische depositiewaarden voor stikstof in korte vegetaties.

R.H. Kemmers
S.P.J. van Delft

Alterra-rapport 1598

Alterra, Wageningen, 2007

REFERAAT

Kemmers, R.H. & S.P.J. van Delft, 2007. *Stikstof-, fosfor- en kaliumbeschikbaarheid en kritische depositiewaarden voor stikstof in korte vegetaties*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1598.
47 blz.; 12 fig.; 14 tab.; 47 ref.

In deze studie is een methode ontwikkeld om de voedselrijkdom van natuurlijke graslanden te bepalen. De ontwikkelde methodiek moet een bijdrage leveren aan de reductie in de onzekerheid in de voorspelling van kritische depositieniveaus voor stikstof. Het onderzoek leidde tot verrassende resultaten. Een groot aantal bodemparameters waarmee de kalium, fosfaat en stikstofrijkdom van de bodem kan worden beschreven werd gemeten op een 30-tal locaties langs een landschappelijke hydrologische gradiënt. Eenvoudig meetbare parameters, gemeten in de verschillende te onderscheiden horizonten van het humusprofiel, blijken het best te voldoen. De C/N verhouding van de organische stof, de kalium- en de fosfaatvoorraad blijken ruim 76% van de droge stofproductie van de vegetatie te kunnen voorspellen. De productie is positief gecorreleerd aan de C/N verhouding. N-beperkte en P-beperkte standplaatsen onderscheiden zich in hun relatie tussen droge stofopbrengst en N-oogst van het gewas. Dit heeft als consequentie dat op P-beperkte standplaatsen kritischer N-niveaus zouden moeten worden aangehouden dan op N-(K) beperkte standplaatsen.

Trefwoorden: Voedselrijkdom, humusprofiel, natuurlijke graslanden, N-depositie, N-mineralisatie N-immobilisatie.

ISSN 1566-7197

Dit rapport is digitaal beschikbaar via www.alterra.wur.nl. Een gedrukte versie van dit rapport, evenals van alle andere Alterra-rapporten, kunt u verkrijgen bij Uitgeverij Cereales te Wageningen (0317 46 66 66). Voor informatie over voorwaarden, prijzen en snelste bestelwijze zie www.boomblad.nl/rapportenservice

© 2007 Alterra
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

[Alterra-rapport 1598/december/2007]

Inhoud

Woord vooraf 7

Samenvatting 9

1 Inleiding 15

2 Werkwijze 19
2.1 Aanpak 19
2.2 Dataverzameling 19
2.3 Parameterkeuze en bepalingen 21
2.4 Metingen N-mineralisatie 23
2.5 Concept humusprofiel 24
2.6 Dataverwerking 26
2.7 Overzicht parameters 27

3 Resultaten 29
3.1 Onderzoekslocaties 29
3.2 Metingen stikstofmineralisatie 30
3.2.1 Mineralisatie constanten 30
3.2.2 Stikstofleverantie en -depositie 33
3.3 Gehalten 34
3.4 Nutriëntvoorraden 34
3.5 Vegetatieparameters 35
3.6 Regressieanalyse 35
3.6.1 Dataset 1 35
3.6.2 Dataset 2 37
3.6.3 Dataset 3 39
3.6.4 Gewaseigenschappen 40
3.7 Conclusies 41

4 Discussie 43
4.1 Inleiding 43
4.2 Ontkoppeling koolstof- en stikstofkringloop ? 43
4.3 Rol bodemleven 45
4.4 Droge stofproductie en nutriëntenbeperking 47

5 Mogelijke consequenties voor kritische depositieniveaus 47
5.1 Inleiding 47
5.2 Kritische stikstofdepositie in relatie tot nutriëntenlimitaties 47
5.3 Conclusie 47

Literatuur 47

Bijlage 1 Standplaatseigenschappen 47
Bijlage 2 Mineralisatie 47
Bijlage 3 Gehalten 47
Bijlage 4 Voorraden 47
Bijlage 5 Gewaseigenschappen 47
Bijlage 6 Resultaten enkelvoudige regressieanalyse 47

Woord vooraf

Een van de doelstellingen van het milieubeleid is de uitstoot en emissie van stikstof te reduceren tot een niveau waarbij geen schade voor natuur optreedt. Daarbij wordt gebruik gemaakt van kritische depositieniveaus als maximaal toelaatbare belasting voor een ecosysteem. De berekening daarvan is voornamelijk gebaseerd op een deskundigenoordeel dat geformaliseerd is in het zgn. Indicatiesysteem volgens Ellenberg. De gewasproductie wordt hierbij niet verklaard uit onafhankelijke bodemfactoren maar uit de soortensamenstelling, die gerelateerd is aan de stikstofbeschikbaarheid is. Dit systeem is echter nauwelijks onderbouwd met meetgegevens, zodat regelmatig vragen gesteld worden over de betrouwbaarheid van kritische depositie niveaus.

In dit project is een methode ontwikkeld waarmee de gewasproductie in een natuurgebied voorspeld kan worden uit bodemfactoren die de voedselrijkdom weergeven. Daarbij zijn we ervan uitgegaan dat zowel de beschikbaarheid van stikstof, fosfor als kalium de gewasproductie kunnen beïnvloeden. Het onderzoek heeft een aantal onverwachte resultaten en nieuwe inzichten opgeleverd, die mogelijk gevolgen kunnen hebben voor de thans gehanteerde kritische depositieniveaus voor stikstof.

Henk Strietman (VROM), Hans Kros en Gert Jan Reinds (beiden Alterra) worden bedankt voor hun commentaren en suggesties op de conceptversie van dit rapport.

Samenvatting

Doel
Het doel van deze studie was het ontwikkelen van een methodiek voor het vaststellen van de voedselrijkdom van de bodem, het verzamelen van data volgens deze methodiek en het toetsen van de methodiek in een aantal voor stikstofgevoelige (N-beperkte standplaatsen) en voor stikstof minder gevoelige ecosystemen (P- of K-beperkte standplaatsen).

Beleidsrelevantie
De ontwikkelde methodiek zal een bijdrage leveren aan de reductie in de onzekerheid in de voorspelling van kritische depositieniveaus voor stikstof op een bepaalde locatie.

Kennisvragen
In dit project worden de volgende kennisvragen beantwoord:

- Is het stikstofindicatiegetal volgens Ellenberg (N_E) een goede indicator voor de voedselrijkdom van zowel bodems op N-beperkte als bodems op niet N-beperkte (maar P- of K-beperkte) standplaatsen ?
- Welke bodemparameter is een goede maat om voedselrijkdom van een standplaats vast te stellen ?
- Welke relatie bestaat er tussen voedselrijkdomparameters van de bodem en de droge stofproductie van de vegetatie ?
- Hoe kunnen voedselrijkdomparameters van de bodem het best worden gemeten ?

Hoe voedselrijkdom te bepalen ?
Een van de doelstellingen van het milieubeleid is de uitstoot en emissie van stikstof te reduceren tot een niveau waarbij in principe geen schade optreedt voor natuur : de zgn. kritische depositieniveaus. Op dit moment zijn er diverse methoden in gebruik voor het vaststellen daarvan. Alle huidige benaderingen vertonen nog veel tekortkomingen. Een methode die als kanshebbend wordt gezien is het model SMART-SUMO-MOVE. Dit model berekent o.a. de stikstofbeschikbaarheid in de bodem en vanuit de lucht en de reactie daarop van plantensoorten. Omdat directe waarnemingen van de stikstofbeschikbaarheid schaars zijn wordt meestal gebruik gemaakt van indicatiewaarden van plantensoorten voor stikstof (de zgn. Ellenberg-indicatiewaarden) om een relatie tussen beschikbaar stikstof en vegetatiesamenstelling te bepalen. De belangrijkste kennishiaten zijn 1) dat een directe relatie ontbreekt tussen gemeten stikstofbeschikbaarheid (als maat voor de voedselrijkdom van de bodem) en de reactie van de plantensoorten, 2) hoe deze stikstofbeschikbaarheid het best gemeten kan worden en 3) of de stikstofbeschikbaarheid wel een goede maat is voor de voedselrijkdom van de bodem. De betekenis van de beschikbaarheid van de andere mogelijke groeibeperkende factoren zoals fosfaat en kalium wordt momenteel genegeerd, terwijl er talrijke voorbeelden zijn die wijzen op andere groeibeperkende

factoren dan stikstof. Het is dus de vraag of het stikstofindicatiegetal wel een goede indicator is voor de voedselrijkdom van een bodem onder vegetaties die door fosfaat of kalium worden beperkt in de droge stofproductie.

Aanpak

Bij de aanpak van ons onderzoek hebben wij verondersteld dat de bodemvruchtbaarheid bepaald kan worden door zowel stikstof, fosfor als kalium. Er bestaan verschillende mogelijkheden om de beschikbaarheid van deze nutriënten te bepalen. Wij hebben zowel gehalten, voorraden en beschikbaarheden per nutriënt bepaald voor verschillende diktes van de bovengrond, omdat we a priori niet precies weten vanuit welke diepte de vegetatie zijn voedingsstoffen betrekt. Op dezelfde plekken hebben we van de vegetatie de droge stofproductie en de gehalten stikstof, fosfor en kalium bepaald. Tenslotte werd uit de vegetatiesamenstelling het stikstofindicatiegetal volgens Ellenberg (N_E) afgeleid. Via regressie-analyse hebben wij tenslotte gezocht naar een responsiemodel, waarmee de vegetatieproductie het beste uit de verschillende parameters van de bodemvruchtbaarheid kan worden verklaard. De combinatie van bodemparameters die de droge stofproductie van de vegetatie het best voorspelt hebben wij als beste maat voor de voedselrijkdom beschouwd.

Dataverzameling

In eerste instantie hebben we twee onafhankelijke datasets opgebouwd, elk met gegevens van ca. 15 standplaatsen verspreid over een landschappelijke hydrologische gradiënt van relatief droge en zure naar natte en basenrijke condities. De ene dataset werd gebruikt om een responsiemodel af te leiden en de tweede om het model te verifiëren. De datasets leidden tot verschillende modellen, waaruit we hebben afgeleid dat locale condities blijkbaar sterk bepalend zijn. In tweede instantie is daarom verder gegaan met een gecombineerde dataset van ca. 30 standplaatsen.

Wel of geen humusprofiel

Bij de bemonstering van de bodem hebben we twee verschillende strategieën gebruikt. Voorafgaand aan de bemonstering werd eerst van alle standplaatsen het humusprofiel beschreven. Binnen het humusprofiel (0-40 cm-mv) worden horizonten onderscheiden op basis van de verteringsgraad van de organische stof en de mate van homogenisatie met de minerale ondergrond. Het humusprofiel is een sleutelfactor die informatie verstrekt over nutriëntvoorraden en –kringloopsnelheden. Van alle onderscheiden horizonten op een standplaats werden monsters verzameld voor bepaling van algemene bodemeigenschappen en nutriëntgehalten, zodat er per profiel meerdere lagen konden worden geanalyseerd. Daarnaast hebben wij een selectieve bemonstering van een aantal master-horizonten uitgevoerd, gericht op het verzamelen van materiaal met verschillende verteringsgraad. Van deze monsters werd in het laboratorium de stikstofmineralisatiesnelheid, het organische stof- en stikstofgehalte bepaald. Er bleek een sterke relatie tussen het organische stofgehalte en de mineralisatiesnelheid te bestaan. Deze relatie werd als pedotransferfunctie gebruikt om van alle andere horizonten waarvan alleen het organische stofgehalte was bepaald de N-leverantie te berekenen in $kgN.ha^{-1}$. Naast de stikstofleverantie berekenden we de voorraden en

beschikbaarheden van N, P en K door sommatie van de horizonten over het hele humusprofiel.

Als tweede strategie hebben we ook bemonsterd zonder rekening te houden met de opbouw van het humusprofiel. Daartoe hebben we op klassieke wijze de bodem gebulkt bemonsterd volgens een standaardmonsterdiepte van 10 cm, zonder onderscheid naar humushorizont. Van deze monsters werden eveneens nutriëntparameters bepaald.

N-mineralisatie en –immobilisatie; een hypothese

Uit de meting van de stikstofmineralisatie in de master-horizonten blijkt dat de bruto mineralisatie constante in veel gevallen een veelvoud groter is dan de netto mineralisatie constante. De hoeveelheid stikstof die per tijdseenheid vrijkomt wordt bruto N-mineralisatie genoemd. Een deel van deze minerale stikstof wordt weer onmiddellijk door micro-organismen opgenomen (N-immobilisatie). Wat aan minerale stikstof overblijft wordt netto N-mineralisatie genoemd en is beschikbaar voor plantopname of spoelt uit. Het verschil tussen bruto en netto N-mineralisatie moet dus worden toegeschreven aan N-immobilisatie door micro-organismen. De verschillende master-horizonten blijken zich duidelijk te onderscheiden in netto N-mineralisatie. De netto N-mineralisatie is sterk gecorreleerd aan het organische stofgehalte en neemt sterk toe naarmate het organische stofgehalte hoger is. De stikstofmineralisatie is dus het grootst in de horizonten waar de minste koolstofafbraak (C-decompositie) heeft plaats gevonden. Daarnaast neemt de verhouding tussen netto- en bruto N-mineralisatie toe als het organisch stofgehalte toeneemt. Dit betekent dat er steeds meer netto N-mineralisatie optreedt en steeds minder N-immobilisatie naarmate het organische stofgehalte in een horizont hoger is. De balans verschuift dus van N-immobilisatie naar netto N-mineralisatie als het organisch stofgehalte toeneemt. Hieruit hebben wij de hypothese afgeleid dat op minerale gronden stapeling van strooisel (door verzuring of verdroging) gepaard gaat met een toename van de netto N-mineralisatie en een afname van de N-immobilisatie. In veengronden zou de afname van het organische stofgehalte door veraarding juist tot een toename van de N-immobilisatie maar een afname van de netto N-mineralisatie leiden.

Informatieverlies bij standaardbemonstering

Niet altijd is bekend vanuit welke diepte de plant zijn voedingsstoffen betrekt. Soms wordt daarvoor de effectieve bewortelingszone aangehouden. Soms wordt ook een standaarddiepte aangehouden waarover wordt bemonsterd. In vrijwel alle gevallen wordt daarbij over meerdere bodemhorizonten gebulkt. Wij hebben echter elke te onderscheiden horizont van het humusprofiel afzonderlijk bemonsterd. Bij gebulkte bemonstering per standaarddiepte (bv. 0-10 cm-mv) blijkt veel informatie verloren te gaan. In de bovenste 20 cm van de bodem blijken sterke gradiënten in gehalten te kunnen voorkomen. Naarmate strooisel minder is verteerd is het organisch stofgehalte en de C/N verhouding hoger. Ook lijkt een geringe verteringsgraad van het strooisel vaak samen te gaan met hoge gehalten uitwisselbaar kalium. De hoeveelheid geadsorbeerd fosfaat (P_{ox}) en de fosfaatverzadigingsindex is over het algemeen laag. In een bodemlaag van 10 cm dikte die volgens een standaarddikte is

bemonsterd blijkt de N-leverantie gemiddeld een factor 3 groter dan wanneer voor dezelfde diepte rekening wordt gehouden met de opbouw van het humusprofiel. De gemiddelde stikstofdepositie (Ndep) blijkt net zo groot als de gemiddelde stikstofmineralisatie in de bovenste 30 cm van de bodem. De som van de gemiddelde stikstofmineralisatie in de effectieve wortelzone en de gemiddelde stikstofdepositie bedraagt ongeveer 65 $kg.ha^{-1}$ en varieert in de onderzochte standplaatsen tussen 42 en 88 $kgN.ha^{-1}$. De voorraden per nutriënt variëren sterk per standplaats en horizont.

N- en P-beperkte productie gelijkelijk verdeeld

De spreiding in droge stofproductie loopt uiteen van ca. 2,5 tot ruim 6 ton $ds.ha^{-1}$ met een minimum van 1,7 en een maximum van 10 ton. De Ellenberg indicatie voor stikstof varieert tussen 2,6 en 4 met een minimum van 2,1 en een maximum van 5. In de helft van de standplaatsen wordt de droge stofproductie door fosfaat beperkt (N/P > 14,6). Ook is er in de helft van de standplaatsen sprake van een kalium beperkte productie (N/K>2,1). Uitsluitend N-beperking komt niet vaak voor. Het blijkt dat stikstof- en fosfaatbeperkte standplaatsen niet aan een karakteristieke positie in het landschap zijn gebonden en overal kunnen voorkomen.

Productie gekoppeld aan C/N verhouding

In alle drie geanalyseerde datasets bleek de C/N verhouding van de organische stof de grootste en een significante positieve bijdrage te leveren aan de verklaring van de gewasproductie. De C/N verhouding is sterk gekoppeld aan de verteringsgraad van de organische stof. Daarnaast dragen alleen de voorraadparameters bij aan een verklaring. Uiteindelijk kon een model worden afgeleid waarmee 76,5% van de gewasproductie verklaard kan worden uit de C/N verhouding, de kalium- en de fosfaatvoorraad. Intensiteitsparameters zoals gehalten of beschikbaarheden blijken geen rol te spelen. De droge stofproductie wordt slechts door minder dan 4% verklaard uit het stikstofindicatiegetal (N_E).

P-beperkte standplaatsen hebben minder stikstof nodig

Onderscheid in productie naar N- of P-beperkte standplaatsen op basis van de N/P verhouding van het gewas, leverde geen significante bijdrage aan het productiemodel. N-beperkte en P-beperkte standplaatsen onderscheiden zich wel significant in hun relatie tussen droge stofopbrengst en N-oogst van het gewas. Op P-beperkte standplaatsen is minder stikstof nodig voor een bepaalde droge stofproductie dan op N-beperkte standplaatsen.

Antwoord op kennisvragen

Het onderzoek heeft tot duidelijke antwoorden op de kennisvragen geleid. 1) Het stikstofindicatiegetal volgens Ellenberg (N_E) is geen goede indicator voor de voedselrijkdom van bodems in relatie tot de droge stofproductie van de vegetatie. 2) De beste maat voor de bodemvruchtbaarheid is de C/N verhouding in combinatie met de kalium- en fosfaatvoorraad van de bovenste 10 cm van de grond. 3) De droge stofproductie in de range van 200 tot 700 g $ds.m^{-2}$ kan goed voorspeld worden uit bodemvruchtbaarheidparameters met een capaciteitskarakter. De droge stofproductie (voedselrijkdom) is groter naarmate de C/N verhouding en de kaliumvoorraad hoger is en de fosfaatvoorraad lager is. De relatie met de C/N verhouding verklaren we uit

het gevonden positieve verband tussen C/N verhouding en netto stikstofmineralisatie 4) Bodembemonstering kan het best plaatsvinden volgens te onderscheiden horizonten van het humusprofiel over de bovenste 10 cm van de bodem.

Verrassende resultaten

Ons onderzoek leidde tot een aantal verrassende resultaten, waardoor ook onze wetenschappelijke inzicht is toegenomen. De sterkste N-mineralisatie en hoogste productiviteit vonden wij op plaatsen met strooiselaccumulatie en een hoge C/N verhouding. Wij denken dat dit is te begrijpen door te veronderstellen dat er een sterke competitie om voedingsstoffen is in de bodem tussen hogere planten en micro-organismen, waarbij micro-organismen in het voordeel zijn. Bij een goede strooiselvertering wordt er veel stikstof geïmmobiliseerd door micro-organismen, waardoor de C/N verhouding van humus laag is. De netto stikstofmineralisatie is dan relatief laag, waardoor in principe voor plantgroei weinig stikstof beschikbaar is en de productie relatief laag blijft. Bij een slechte strooiselvertering is de N-immobilisatie laag, maar de netto mineralisatie hoog. Dit leidt tot een hoge C/N verhouding van de humus en een relatief ruime N-beschikbaarheid voor plantengroei. Door milieustress als verzuring en verdroging ontstaat er vermoedelijk een verschuiving in de balans tussen N-immobilisatie en netto N-mineralisatie, omdat het bodemleven minder actief wordt.

Beleidsconsequenties

Verrassend was dat op P-beperkte standplaatsen de droge stofproductie sneller toeneemt bij toenemende N-beschikbaarheid dan op N-beperkte standplaatsen. De relatie tussen N-beschikbaarheid en productie is dus afhankelijk van de aard van de nutriëntlimitatie. Dit kan wel eens belangrijke consequenties hebben voor het beleid. Op P-beperkte standplaatsen dienen volgens onze methode kritischer N-niveaus te worden aangehouden dan op N-(K) beperkte standplaatsen. Dit lijkt vreemd, maar wordt begrijpelijk omdat op P-beperkte standplaatsen de N-efficiency kleiner is en minder stikstof nodig is om een zelfde productieniveau te bereiken dan op N-beperkte standplaatsen. Volgens de door ons ontwikkelde methode zouden op niet door stikstof beperkte standplaatsen lagere depositieniveaus van stikstof nodig zijn om beschermingsniveaus te realiseren dan thans wordt verondersteld. Kanttekening hierbij is dat onze dataset weliswaar een volledige landschapsecologisch range beslaat, maar op een beperkt aantal sites is gebaseerd. De methode hebben we nog niet kunnen verifiëren.

1 Inleiding

Aanleiding

Een van de doelstellingen van het milieubeleid is de uitstoot en emissie van stikstof (en zuur) te reduceren tot een niveau waarbij de schade voor natuur acceptabel is. Daarbij wordt gebruik gemaakt van kritische depositieniveaus als maximaal toelaatbare belasting voor een ecosysteem. Op dit moment zijn er diverse methoden in gebruik voor het vaststellen van de kritische depositieniveaus (CL) voor stikstof (De Vries and Posch 2003). Daarbij is de gevoeligheid van een ecosysteem afhankelijk van o.a. de natuurlijke voedselrijkdom van de bodem. Naast het gebruik van empirische waarden wordt er gerekend met modellen. Alle huidige benaderingen vertonen nog zoveel tekortkomingen dat er in UN-ECE kader overeenstemming is dat de methodiek moet worden verbeterd.

Een methode die als kanshebbend wordt gezien is het model SMART-SUMO-MOVE. Dit model bestaat uit een combinatie van een abiotische module (SMART) die de stikstofbeschikbaarheid en zuurgraad (pH) berekent en een biotische module die de reactie van plantensoorten daarop voorspelt (SUMO-MOVE; Wamelink et al. 2000). Het model houdt tevens rekening met factoren als bodemtype/bodemeigenschappen, grondwaterstand en klimaat. In een recente studie in opdracht van VROM is het model toegepast om de kritische stikstof- en zuurbelasting van de Nederlandse natuurdoeltypen te schatten (De Vries et al. 2007). Daaruit blijkt de orde van grootte van de CL voor stikstof te kloppen. De onzekerheid in de voorspelling van de specifieke CL op een bepaalde locatie is echter groot. Dit hangt waarschijnlijk samen met het feit dat de milieuomstandigheden afgeleid worden uit de indicatieve waarden die door Ellenberg (1991) aan plantensoorten zijn toegekend: de zogenaamde Ellenberg-indicatoren (o.a. Wamelink et al. 2002 en Alkemade et al. 1996). Dit door Ellenberg ontwikkelde indicatiesysteem is gebaseerd op door deskundigen beoordeelde verbanden tussen plantensoorten en milieufactoren. Deze verbanden zijn incidenteel onderbouwd met meetgegeven. Aan elke plantensoort is op basis van dit deskundigenoordeel een indicatieve waarde voor de voedsel(i.e. stikstof)rijkdom van de bodem toegekend. Uit de studie van De Vries et al. (2007) blijkt echter dat het 95% betrouwbaarheidsinterval van de op grond van Ellenbergwaarden voorspelde voedselrijkdom niet is te bepalen omdat directe metingen aan de relatie tussen plantensoorten en stikstofbeschikbaarheid vrijwel niet beschikbaar zijn. Deze relatie is wel cruciaal voor het vaststellen van een CL voor stikstof. Uit de studie van Reinds et al. ( ) blijkt echter dat het 95% betrouwbaarheidsinterval van de op grond van Ellenbergwaarden voorspelde voedselrijkdom niet is te bepalen omdat directe metingen aan de relatie tussen plantensoorten en stikstofbeschikbaarheid vrijwel niet beschikbaar zijn. Deze relatie is cruciaal voor het vaststellen van een kritisch depositieniveau voor stikstof.

Probleemstelling

Historische waarnemingen door een groot aantal onderzoeksinstellingen aan vegetatie, in combinatie met waarnemingen van abiotische factoren, zijn in de jaren 1998 - 2000 bij Alterra in één database (KENNAT) bijeengebracht. Problemen die daarbij aan het licht kwamen zijn:

1) te weinig gegevens,
2) geen inzicht in de betrouwbaarheid van de gegevens,
3) gebrek aan standaardisatie,
4) het ontbreken van een goede maat voor voedselrijkdom en
5) onmogelijkheid om interacties te bepalen.

De eindconclusie van bovengenoemd project was dat, om deze problemen het hoofd te bieden, nieuwe en gestandaardiseerde metingen nodig zijn, die als basis kunnen dienen voor het afleiden van responsies van plantensoorten en vegetatietypen op (veranderende) standplaatsfactoren. Met name het ontbreken van een goede maat voor voedselrijkdom is een probleem.

Bestaande kennis

In de gangbare methoden worden vochtbeschikbaarheid, zuurgraad en voedselrijkdom beschouwd als de meest bepalende factoren voor de samenstelling van de vegetatie. Omdat directe waarnemingen van standplaatsfactoren schaars zijn worden meestal Ellenberg-indicatoren gebruikt om een relatie tussen standplaatsfactor en vegetatiesamenstelling te bepalen. Ellenberg baseerde de indicatiewaarde voor voedselrijkdom van de bodem (N_E) vooral op de stikstofbeschikbaarheid, in de veronderstelling dat stikstof in de meeste gevallen de groeibeperkende factor van een vegetatie is. De betekenis van de beschikbaarheid van de andere mogelijke groeibeperkende factoren zoals fosfaat en kalium wordt daarbij genegeerd.

Het belangrijkste kennishiaat is dat een directe relatie ontbreekt tussen gemeten stikstofbeschikbaarheid (als maat voor de voedselrijkdom van de bodem) en de soortenrijkdom van de flora. Deze relatie is cruciaal voor het vaststellen van een CL voor stikstof. Verder is onvoldoende duidelijk i) hoe deze stikstofbeschikbaarheid het best gemeten kan worden en ii) of de stikstofbeschikbaarheid wel een goede maat is voor de voedselrijkdom van de bodem.

Er zijn talrijke voorbeelden gepubliceerd die wijzen op andere groeibeperkende factoren dan stikstof, die ontstaan onder invloed van milieu-ingrepen zoals ontwatering (Grootjans et al. 1986a,b, Van der Woude et al. 1994, Pegtel et al. 1996, De Mars et al. 1996, Van Duren et al. 1997, Güsewell and Koerselman 2002, Olde Venterink et al. 2003) of atmosferisch depositie van stikstof en/of zwavel (Wassen et al. 2005). Het is dus discutabel of het stikstofindicatiegetal wel een goede indicator is voor de voedselrijkdom van een bodem onder vegetaties die door fosfaat of kalium worden beperkt in de droge stofproductie. In oriënterend onderzoek in vochtig tot natte natuurgebieden (Kemmers en van Delft subm.) kon worden vastgesteld dat natuurlijke graslandvegetaties vaak niet door stikstof worden beperkt in hun productie, maar door fosfaat of kalium of combinaties daarvan. Dit heeft als

consequentie dat voor berekening van kritische N-depositieniveaus waarschijnlijk gedifferentieerder uitspraken noodzakelijk zijn dan momenteel het geval is.

In veel ecologische studies wordt verondersteld dat de relatie tussen soortenrijkdom en productiviteit van ecosystemen verloopt via een optimum curve, de zgn. 'Hump-back' relatie. Bij een laag en een hoog productieniveau is daarbij een lage biodiversiteit te verwachten. De grootste biodiversitieit is te verwachten bij niet te hoge en niet te lage niveaus. Veel ecologische impactstudies baseren de gevoeligheid van ecosystemen voor verrijking met voedingsstoffen daarom op de relatie tussen voedselrijkdom van de bodem en productiviteit van de vegetatie.

Kennisvragen

Uit de probleemstelling en achtergrond komt een aantal kennisvragen naar voren die in dit project beantwoord zullen worden:

- Is het stikstofindicatiegetal volgens Ellenberg (N_E) een goede indicator voor de voedselrijkdom van zowel bodems op N-beperkte als bodems op niet N-beperkte (maar P- of K-beperkte) standplaatsen ?
- Welke bodemparameter is een goede maat om voedselrijkdom van een standplaats vast te stellen ?
- Welke relatie bestaat er tussen voedselrijkdomparameters van de bodem en de productie van de vegetatie ?
- Hoe kunnen voedselrijkdomparameters van de bodem het best worden gemeten ?

Om deze vragen te kunnen beantwoorden werd het onderzoek verbreed met niet alleen een analyse van N- maar tevens een analyse van P- en K-parameters voor de voedselrijkdom van de bodem. Hierdoor wordt het mogelijk regressiemodellen af te leiden waarmee de vegetatieproductie (C, N, P, K) kan worden verklaard uit N-, P- en K-beschikbaarheden in de bodem.

Doelstelling project

Het project "Bepaling van de nutriëntenbeschikbaarheid in gevoelige ecosystemen ten behoeve van het reduceren van de onzekerheid in de kritische stikstofbelasting" is gedefinieerd ten behoeve van het door LNV uit te voeren onderzoeksprogramma "Onderbouwing Beleid Verzuring en Grootschalige Luchtverontreiniging". Doel van deze studie is het uitdenken van een methodiek voor het vaststellen van de voedselrijkdom van de bodem en het verzamelen van data volgens deze methodiek in een aantal voor stikstofgevoelige (N-beperkte standplaatsen) en voor stikstof minder gevoelige ecosystemen (P- of K-beperkte standplaatsen).

Beleidsrelevantie

Op basis van de te ontwikkelen methodiek zal met behulp van de SMART-SUMO-MOVE/NTM keten tot een betrouwbaardere schatting van de kritische belastingen voor stikstof voor natuurdoeltypen kunnen worden gekomen.

De ontwikkelde methodiek zal een bijdrage leveren aan de reductie van de onzekerheid in de voorspelling van de specifieke CL op een bepaalde locatie. Juist nu de milieudruk daalt en gebiedsgericht beleid effectief kan zijn, neemt het belang toe

om locatiespecifieke uitspraken te kunnen doen over de te verwachten effectiviteit van deze maatregelen. Daarnaast wordt mogelijk bij de beoordeling van bedrijfsuitbreidingen nabij Vogel-Habitat-Richtlijn gebieden en in het kader van de Integrated Pollution Prevention Control richtlijn gebruikt gemaakt van de CL die voor het natuurgebied in kwestie geldt.

Leeswijzer

Na deze inleiding wordt in het hoofdstuk *Werkwijze* eerst uiteengezet welke aanpak we hebben gevolgd bij het onderzoek. Daarna volgen meer specifieke methodische aspecten over selectie van standplaatslocaties, wijze van bemonstering, parameterkeuze en verwerking van analyseresultaten. Ook besteden we een aparte paragraaf aan de uiteenzetting van de wijze waarop we de netto- en bruto stikstofmineralisatie hebben gemeten. In dit hoofdstuk besteden we verder enige aandacht aan het door ons gebruikte concept van het humusprofiel, dat voor ons de leidraad vormde bij monstername van grond. In het hoofdstuk *Resultaten* geven we eerst een schema met de ligging van de geselecteerde standplaatsen in een landschappelijk hydrologische gradiënt. Vervolgens bespreken we de resultaten van de N-mineralisatiemetingen. Daarna behandelen we kort de uitslagen van de bodemanalyses respectievelijk in de vorm van gehalten en voorraden van bodemvruchtbaarheidparameters en de gewaseigenschappen. De paragraaf over de regressieanalyse vormt de kern van het onderzoek. In deze paragraaf laten we zien hoe we tot de selectie van een model zijn gekomen waarmee we de droge stofopbrengst kunnen voorspellen uit bodemvruchtbaarheidparameters. In de paragraaf conclusies geven we een antwoord op de in de inleiding geformuleerde kennisvragen. In het hoofdstuk *Discussie* gaan we in op een aantal onverwachte resultaten, zoals aanwijzingen dat de koolstof- en stikstofhuishouding niet gekoppeld lijken te zijn, de competitie tussen bodemleven en hogere planten om voedingsstoffen, waarbij de planten het lijken af te leggen en de betekenis van beperkende factoren voor de droge stofproductie. In het laatste hoofdstuk gaan we in op de mogelijke consequenties van onze resultaten voor het vaststellen van kritische depositieniveaus. Het blijkt dat standplaatsen met fosfaatbeperking kritischer zijn voor extra stikstofaanvoer dan stikstofbeperkte plaatsen. En dat is vreemd.

2 Werkwijze

2.1 Aanpak

Op dit moment is het niet mogelijk om op voldoende onderbouwde wijze een keuze te maken voor de wijze waarop de bodemvruchtbaarheid zou moeten worden vastgesteld, mede in relatie tot de kosten daarvan. Om die reden is in dit project een aantal methoden voor de schatting van de beschikbaarheid van nutriënten parallel toegepast om pas een definitieve keuze te maken wanneer er meer zicht is op (a) de kosten, (b) de praktische toepasbaarheid van de resultaten en (c) de nauwkeurigheid van elke methode.

Bij de aanpak hebben wij verondersteld dat de bodemvruchtbaarheid bepaald kan worden door de beschikbaarheid van zowel stikstof, fosfor als kalium. Er bestaan verschillende mogelijkheden om de beschikbaarheid van deze nutriënten te schatten, zoals:

- Schatting met Ellenberg-getallen van de soorten waaruit de vegetatie is samengesteld;
- Schatting van de beschikbaarheid via nutriëntengehalten in de vegetatie;
- Schatting van biomassaproductie in het veld;
- Directe meting van de nutriëntenbeschikbaarheid door bemonstering van een standaarddiepte van de bovengrond
- Directe meting van de nutriëntenbeschikbaarheid door bemonstering van verschillende horizonten in het humusprofiel (Kemmers et al. 2001);

Van al deze mogelijkheden hebben wij in dit onderzoek gebruik gemaakt. Daarbij hebben wij de bodemvruchtbaarheid vastgesteld aan de hand van verschillende bodemparameters die zowel over algemene bodemeigenschappen als over de stikstof-, de fosfaat- en de kaliumtoestand informatie verstrekken. Van de vegetatie werd de droge stofproductie en de gehalten stikstof, fosfor en kalium bepaald. Tenslotte werd uit de vegetatiesamenstelling het stikstofindicatiegetal volgens Ellenberg (N_E) afgeleid. Via regressie-analyse hebben wij tenslotte gezocht naar een responsiemodel, waarmee de vegetatieproductie het beste uit de verschillende parameters van de bodemvruchtbaarheid kan worden verklaard.

2.2 Dataverzameling

Er werden drie datasets gebruikt voor deze studie, waarvan de eerste twee onafhankelijk van elkaar waren:
1) dataset 1 voor ontwikkeling van een methodiek c.q. productiemodel
2) dataset 2 ter verificatie van het model met een onafhankelijke dataset.
3) een samenvoeging van beide andere datasets.

Dataset 1

Wij hebben een zodanige selectie van standplaatsen gemaakt dat zowel drogere ecosysteemtypen bij het onderzoek werden betrokken, als kwelgevoede natte ecosysteemtypen die geacht worden minder gevoelig te zijn voor stikstof en waar b.v. fosfaatbeschikbaarheid beperkend kan worden voor de productie van de vegetatie. De gegevens van vegetatie en bodem zijn verzameld langs een landschappelijk hydrologische gradiënt van droge basenarme podzolgronden naar vochtig tot natte basenrijke beekeerd- en veengronden. In deze gradiënt zijn standplaatsen van zowel 'echte' natuurgebieden als van voormalige landbouwgronden met natuurontwikkeling vertegenwoordigd. Voorafgaand aan de bodembemonstering werd het humusprofiel beschreven (Van Delft et al. 2006). In alle gevallen werden vier deelmonsters verzameld op de hoekpunten van een permanent kwadraat (2x2 m). De deelmonsters werden samengevoegd tot een mengmonster per horizont en gehomogeniseerd. Op 16 standplaatsen werden op deze wijze in twee rondes mengmonsters verzameld:

i) Bemonstering ter bepaling van de stikstofmineralisatie in een aantal master horizonten van het humusprofiel met een verschillende decompositiegraad. Van deze monsters werden tevens organische stofgehalte, N-totaal (volgens Kjeldahl) en pH-KCl bepaald.
ii) Op dezelfde standplaatsen werden op klassieke wijze, zonder rekening te houden met profieldifferentiatie, bodemmonsters verzameld over een standaarddiepte (0-10 cm-mv). Bodemmonsters werden geanalyseerd op parameters die de N-, P- en K-toestand aangeven.

Analyseresultaten van de eerste ronde i) hebben we gebruikt om een relatie af te leiden tussen organische stofgehalte en stikstofmineralisatie. Deze relatie werd gebruikt als een pedotransferfunctie om de stikstofmineralisatie te voorspellen uit het organisch stofgehalte van elke onderscheiden horizont binnen het humusprofiel, waarna de stikstofmineralisatie over het gehele humusprofiel werd gesommeerd. De pedotransferfunctie hebben we tevens in de onafhankelijke dataset 2 toegepast om de over het profiel gesommeerde stikstofmineralisatie te berekenen.

Analyseresultaten van beide bemonsteringsrondes werden zo mogelijk bewerkt tot zowel intensiteitsparameters (gehalten), capaciteitsparameters (voorraden) en fluxparameters (stikstofmineralisatie per tijdseenheid).

Naast een vegetatieopname werd van de vegetatie de C-, N-, P- en K productie bepaald ten tijde van peak standing crop in de tweede helft van juli. Uit de soortensamenstelling van de vegetatie in een permanent kwadraat werd het Ellenberg indicatie getal voor stikstof (N_E) afgeleid.

Dataset 2

Ter verificatie hebben wij het via regressie afgeleide productiemodel toegepast in een aantal ecosysteemtypen op andere standplaatsen maar langs een vergelijkbare gradiënt van droge regenwaterafhankelijke systemen (droge heiden, heischrale graslanden) naar lagere gelegen vochtig tot natte kwelwaterafhankelijke zand- of veengronden (kleine zeggegemeenschappen, dotterbloemhooilanden, blauwgraslanden). Deze dataset was afkomstig van uitsluitend natuurgebieden (Kemmers et al. 2003). Ook voor deze dataset hebben wij per horizont van het

humusprofiel bodemparameters verzameld en vegetatieopnamen gemaakt ter afleiding van N-indicatie-getallen (N_E).

Dataset 3
De verificatie van het met dataset 1 ontwikkelde productiemodel met gegevens uit dataset 2 bleek onbevredigend. De datasets 1 en 2 leidden tot verschillende productiemodellen, waaruit in eerste instantie werd geconcludeerd dat het productiemodel kennelijk sterk afhankelijk is van lokale gegevens. Om aan dit probleem tegemoet te komen hebben we tenslotte een productiemodel afgeleid dat gebaseerd is op een combinatie van beide datasets (dataset 3). Nadeel daarvan is dat we dit model niet meer hebben kunnen verifiëren.

2.3 Parameterkeuze en bepalingen

Bij de parameterkeuze hebben wij als uitgangspunt genomen dat zowel stikstof, fosfor als kalium de bodemvruchtbaarheid kunnen bepalen. Elk van deze factoren kunnen in verschillende parameters worden uitgedrukt: gehalten, beschikbaarheden, voorraden en fluxen.

Voorafgaand aan de analyse werden de monsters gedroogd (40°) gemalen en gezeefd (2 mm). Kleimonsters werden colloïd gemalen (50 μm).

Gehalten en concentraties
Per bemonsterde horizont van het humusprofiel werden in dataset 1 en 2 de volgende bodemchemische eigenschappen bepaald:

- N_{totaal}, P_{totaal}: Destructie $H_2SO_4/H_2O_2/Se$ (SFA)
- Uitwisselbaar K: Bascomb extractie (pH=8,1)
- Oxalaat extraheerbaar Fe_{ox}, P_{ox}: Extractie ammoniumoxalaat/oxaalzuur (ICP_AES). P_{ox} is de fosfaatfractie die geadsorbeerd is aan amorfe ijzeroxiden (Fe_{ox})
- Organische stof : (Gloeiverlies)
- pH-KCl pH-meter
- C/N verhouding: Algemeen wordt verondersteld dat het elementair C-gehalte ongeveer overeenkomt met de helft van het organisch stofgehalte. Wij zijn er daarom van uitgegaan dat C overeeenmkomt met 50% van het organische stofgehelate.
- PSI De fosfaasfaatverzadigingindex is berekend als het quotiënt van P_{ox} en Fe_{ox}. Deze index geeft aan welke deel van de fosfaatadsorptiecapaciteit is benut. Verondersteld wordt dat maximale adsorptiecapaciteit 0,5xFe_{ox} bedraagt (Van Riemsdijk et al., 1984)
- Ortho-P concentratie in het bodemvocht: Berekend uit de fosfaatverzadigingsindex (P_{ox}/Fe_{ox}) met behulp van een adsorptie-isotherm.

Beschikbaarheden

In dataset 1ii werd ongeacht de opbouw van het humusprofiel per standaarddiepte van 0-10 cm-mv de beschikbaarheid bepaald van de nutriënten:

- NO_3 NH_4, PO_4, K: Extractie met 0,01M $CaCl_2$

Voorraden

Omdat onbekend is vanuit welke bodemdiepte de wortels nutriënten opnemen, werd de voorraad berekend voor verschillende dieptes: 0-10 cm-mv, 0-20 cm-mv 0-30 cm-mv en voor de effectieve wortelzone zoals afgeleid uit de beschrijving van het humusprofiel. De voorraad werd per horizont van het humusprofiel berekend en vervolgens gesommeerd over het gehele humusprofiel. Voor omrekening naar nutriëntvoorraden werden gehalten vermenigvuldigd met de bulkdichtheid. Voorraden werden berekend van:

- N_{totaal}, P_{totaal}, K_{uitw}, Fe_{ox}, P_{ox}, Organische stof

Fluxen

Voor stikstof werden fluxen ($kg.etm^{-1}$) bepaald die werden afgeleid uit N-mineralisatie proeven in het laboratorium. Er zijn op hoofdlijnen twee methoden om de N-mineralisatie te meten: 1) N-mineralisatie gemeten door incubatie in het veld en 2) N-mineralisatie gemeten door incubatie in het lab. Afgezien is van metingen in het veld. In het veld worden met intervallen van enkele weken grondmonsters geïncubeerd in de bodem van de standplaats. Wij hebben hier vanaf gezien, omdat de ervaring leert dat zeer veel replica's nodig zijn om zeker te zijn dat een herhaalde bemonstering in de tijd een tijdseffect te zien geeft en niet de ruimtelijke variatie. In een aparte paragraaf wordt de methode toegelicht die wij in het lab hebben toegepast.

Vegetatie

De productiviteit van de bodem wordt het best weerspiegeld door de biomassa die door de vegetatie wordt geproduceerd. De gehalten in het gewas van N, P en K (nutriëntratio's) geven daarbij een aanwijzing welk van deze stoffen beperkend is voor de productie van biomassa (Koerselman and Meuleman, 1996, Olde Venterink et al., 2003). De vegetatie werd geoogst over een vast oppervlak (50x50 cm) ten tijde van peak standing crop (2e helft juli). Aan het gewasmonster werden de volgende bepalingen verricht:

- Droge stofgehalte: (105°)
- N_{tot},P_{tot} Destructie H_2SO_4/H_2O_2/Se (SFA)
- K_{tot} Destructie H_2SO_4/H_2O_2/Se (F-AES)
- N_E N-indicatiegetal volgens Ellenberg op basis van ongewogen gemiddelden per aanwezige soort (mean if present).

Stikstofdepositie

De stikstofdepositie op de standplaatsen werd afgeleid uit NO_x and NH_y depositiecijfers volgens het landelijk gridsysteem (5 x 5 km) van het RIVM in 2001 (De Ruiter et al. 2006).

2.4 Metingen N-mineralisatie

Mineralisatieconstanten

Van de zeven meest voorkomende master-horizonten binnen het humusprofiel werden van dataset 1 monsters genomen om de netto en bruto N-mineralisatie in het lab te bepalen via incubatie-experimenten. Voor de mineralisatiemetingen is uitgegaan van veldvochtige monsters. Om de stikstofmineralisatie te bepalen hebben wij twee methoden in combinatie met elkaar gebruikt (dataset 1i):

- N-min: N-mineralisatie (mgN/kg grond per week) via *aërobe* mineralisatie gedurende 6 weken 20° C. Dit is de hoeveelheid minerale stikstof (NO_3 + NH_4) die tijdens een incubatieperiode onder lab omstandigheden beschikbaar komt uit een veldvochtig monster (Bloem et al. 1994). De hoeveelheid minerale stikstof die tijdens deze incubatieperiode weer verdwijnt door denitrificatie of immobilisatie blijft onbekend. Bruto wordt dus meer stikstof gemineraliseerd dan er netto beschikbaar komt. Daarom noemen wij dit ook wel de (potentiële) netto stikstofmineralisatie.
- Min-N: Mineraliseerbaar-N (mgN/kg grond per week) via *anaërobe* mineralisatie bij 40°C. Omdat mineraliseerbaar N (Min-N) onder anaërobe omstandigheden wordt gemeten, kan alleen ammonificatie optreden. De vorming van nitraat wordt verhinderd zodat ook geen denitrificatie of stikstofimmobilisatie (microbiële opname van nitraat voor synthese van bacterieel eiwit) kan optreden. Bovendien overleven bacterievore protozoa en nematoden niet onder anaërobe omstandigheden (Keeny and Nelson 1982, Bloem e.a. 1988, Bloem e.a. 1989, Canali and Benedetti 2006). Door de anaërobe omstandigheden bij de Min-N bepaling vindt er dus nauwelijks N-immobilisatie plaats, waardoor de bruto N-mineralisatie dicht wordt benaderd.
- N-min/Min-N: De verhouding tussen netto (N-min) en bruto (Min-N) mineralisatie geeft een indicatie van de stikstofvastlegging door microben (N-immobilisatie). Bij een lage N-min/Min-N verhouding zal er veel stikstofimmobilisatie optreden, bij een hoge verhouding juist weinig. Deze ratio is daarom door ons als een maat beschouwd voor de microbiologische activiteit van de bodem.

Omdat ook N_{totaal} gehalten van de bodem bekend zijn hebben we de mineralisatie uitgedrukt als constante: $mgN.kgN^{-1}.\ t^{-1}$.

Stikstofleverantie

De stikstofmineralisatie wordt per tijdseenheid gemeten en kan daarom als flux worden beschouwd. We hebben de stikstofleverantie op verschillende manieren bepaald door vermenigvuldiging van de mineralisatieconstante ($mgN.gN^{-1}$) en stikstofvoorraad. De stikstofvoorraad werd vastgesteld per humushorizont en vervolgens gesommeerd over het gehele humusprofiel (dataset 1 ronde i en dataset 2) of per standaardmonsterdiepte van 10 cm (dataset 1 ronde ii) zonder rekening te houden met horizontdifferentiatie.

a. Bij de berekening voor het hele humusprofiel werd de potentiële mineralisatiesnelheid (20°C) aangepast aan de veldomstandigheden door correctie van de mineralisatieconstante via de zgn. Q10-relatie volgens Arrhenius (verdubbeling van de microbiologische activiteit bij elke 10° stijging van de temperatuur). Uiteindelijk is gerekend met maandgemiddelde temperaturen voor de periode maart tot eind juli (totaal 153 etm) onder veldomstandigheden in maart (3 °C), april (5 °C), mei (10 °C), juni (15 °C) en juli (20 °C). De stikstofmineralisatieconstante werd afgeleid uit het organische stofgehalte via een pedotransferfunctie (zie 3.2.1). Per maand werd de temperatuur gecorrigeerde mineralisatieconstante vermenigvuldigd met de N-voorraad in een specifieke horizont en vermenigvuldigd met het aantal dagen per maand. De maandelijkse N-leveranties werden gesommeerd tot het moment van oogsten van het gewas (eind juli). De gemiddelde maandtemperaturen zijn gebaseerd op de jaargemiddelde luchttemperatuur op maaiveldshoogte van 10°C en een jaarlijkse schommeling van 20°C. De doordringing en vertraging van de temperatuurgolf in de bodem werd afgeleid uit warmtecapaciteit en –geleiding van de bodem (Feddes, 1971). Deze exercitie werd uitgevoerd over een diepte van 10, 20 en 30 cm (zie hierboven) met een horizontonderscheiding conform het humusprofiel. Tevens werd deze berekening uitgevoerd voor de dikte van de effectieve wortelzone, zoals aangegeven in bijlage 1).
b. De stikstofleverantie gebaseerd op het product van de gemeten potentiële mineralisatieconstante ($mgN.gN^{-1}.wk^{-1}$, T=20°C) in de master-horizonten uit dataset 1i (NC1).
c. Van de bodemlaag 0-10 cm (standaardbemonstering zonder te letten op horizontdifferentiatie, dataset 1 ii) werd tevens de potentiële stikstofleverantie (20 °C) voor het groeiseizoen in $gN.m^{-2}$ (NC2) en de temperatuurafhankelijke (actuele) stikstofleverantie voor het groeiseizoen (NC3) bepaald.

2.5 Concept humusprofiel

Naar verwachting zal de nutriëntenbeschikbaarheid een functie zijn van de humusvorm en door zijn gemakkelijke herkenbaarheid (Van Delft et al, 2006) kan de humusvorm mogelijk als pedotransferfunctie worden gebruikt voor de vertaling van abiotische condities (bodemkaart) naar nutriëntenbeschikbaarheid. Maar wat is een humusvorm ?

Bij de bemonstering is uitgegaan van een bodemkundig concept dat is ontwikkeld binnen het raamwerk voor een ecologische bodemtypologie (Kemmers et al. 2002) en waarbij de humusvorm een sleutelfactor is. De specifieke vorm waarin het humusprofiel voorkomt, wordt humusvorm genoemd. Een humusvorm wordt gedefinieerd als een toestand in de bovenste 40 cm van de bodem die de balans weergeeft tussen strooiselaanvoer en strooiselafbraak en die wordt gekenmerkt door een karakteristieke combinatie van organische en minerale horizonten die van elkaar verschillen in verteringsgraad (Tabel 1).

De humusvorm is een veldkenmerk voor het over de tijd geïntegreerde effect van o.a. temperatuur, vocht en zuurgraad op de strooiselomzetting. De humusvorm is daarmee een sleutelfactor die informatie verstrekt over nutriëntvoorraden en –kringloopsnelheden.

Tabel 1 Hoofd- en overgangshorizonten volgens de Nederlandse Humusvormentypologie voor terrestrische en semi-terrestrische omstandigheden en enkele eigenschappen. Het organische stofgehalte wordt gebruikt als criterium voor onderscheid tussen de aard van de horizonten.

Verschijningsvorm	Org. stof gehalte (%)	Master-horizont	Overgangs-horizont	Aard	Suffix	Omstandig-heden
Ecto-organisch	>15	L		Onverteerd		Terrestrisch
		F		Gefragmenteerd	m(ycogeen)	
		H		Gehumificeerd	z(oogeen)	
Endo-organisch	>15	O		Moerig		Semi-terrestrisch
			OA		f(ibric)	
			OM		m(esic)	
			AM		h(umic)	Terrestrisch
		M		Dode wortels		
	< 15	A			h(umic)	Terrestrisch
Moeder-materiaal	< 1	C		Mineraal		
			AC			

De typering van de humusvorm is gebaseerd op het voorkomen en de dikteverhoudingen tussen horizonten. Mor- en Mull humusvormen zijn als uiterste typen in een landschappelijke gradiënt van arm (zuur) naar rijk (neutraal) te beschouwen (Tabel 2). Humusvormen van het mor-type zijn kenmerkend voor infiltratiegebieden op de arme zandgronden. Mor humusvormen bestaan uit organische stof met hoge C/N verhoudingen en indiceren een geringe biologische activiteit van de bodem door een lage pH en zeer droge of juist natte omstandigheden (Klinka et al. 1981). Strooisel wordt slechts langzaam verteerd en accumuleert op de minerale ondergrond (zie foto 1). De koolstofdecompositie verloopt traag. Onder invloed van een geringe biologische activiteit komen voedingstoffen door mineralisatie van de organische stof (N, P, K) beschikbaar. Humusvormen van het mull-type zijn kenmerkend voor kwelzones in het landschap die gevoed worden met kalk- en ijzerrijk grondwater. Mull humusvormen indiceren een actief bodemleven door een hoge basenbezetting en een goede vocht- en luchtvoorziening van de bodem (zie foto 2). Strooisel wordt snel omgezet en gehomogeniseerd met de minerale ondergrond wat leidt tot organische stof met een lage C/N verhouding. De nutriëntenkringloop verloopt snel en voedingsstoffen zijn ruim beschikbaar door intensieve mineralisatie.



Foto 1



Foto 2

Tabel 2 Orden van de Nederlandse Humusvormentypologie, enkele relevante suborden en groepen met hun codes en de belangrijkste diagnostische horizons voor terrestrische en sem-terrestrische omstandigheden.

Orde	Suborde	Groep	Humusvorm code	Diagnostische, dominante horizont	Omstandigheden
Mull	Hydromull	Zandhydromull	LHz	Ah	Terrestrisch
Mullmoder		pm			
Moder	Hydromoder	Arme hydromoder	DHs	Mm,AMh	Terrestrisch
	Eerdmoder	Broekeerdmoder	DEf	Oh, OMh	Semi-terrestrisch
		Veeneerdmoder	DEo	OA	
Mormoder		Pm			
Mor	Mesimor	Heidemesimor	RMh	cOm,OMm	Semi-terrestrisch
		Veenmesimor	RMn	hOf,OMf	
		Veenmos-mesimor	RVp	sOf	

2.6 Dataverwerking

Voorraden

De analyse gegevens zijn verwerkt tot verschillende parameters (gehalten, voorraden, beschikbaarheden en fluxen) per factor (stikstof, fosfor, kalium). Bij de omzetting van gehalten (g,kg-1) naar voorraden per bodemlaag (kg.ha^{-1}) is vermenigvuldigd met

de bulkdichtheid (Bd) die is afgeleid uit het organische stofgehalte volgens de regressievergelijkingen (Kemmers standard meetprotocol):
Venige horizonten (% org. st > 15%): Bd = -0,326Ln(%Org. St) + 1,519 (r^2= 0,84)
Minerale horizonten (<15%) Bd= -0,312Ln(%Org. st) + 1,507 (r^2 =0,92)

Fosfaatadsorptie-isotherm
De fosfaatbeschikbaarheid is op twee manieren bepaald. Naast een $CaCl_2$ extractie (dataset 1ii; 0-10 cm-mv) is als beschikbaarheidsparameter de fosfaatconcentratie in het bodemvocht bepaald voor iedere individuele horizont van het humusprofiel. Daartoe werd gebruik gemaakt van een adsorptie-isotherm die het evenwicht beschrijft tussen de fosfaatverzadigingsindex (PSI) en de fosfaatconcentratie in de bodemvochtoplossing. Deze isotherm is afgeleid met empirische gegevens uit natuurterreinen (Van Delft et al. 2005, pyriet). Als adsorptieparameters die de isotherm beschrijven werd een bindingssterkte (K) van 1,028 $l.mg^{-1}$ en een adsorptiemaximum (α) van 0,383 $mol.mol^{-1}$ aangehouden.

De fosfaatconcentratie per horizont werd omgerekend naar een bodemlaag van 0-10, 0-20, 0-30 en naar de dikte van de effectieve wortelzone door het gewogen gemiddelde van de daarin voorkomende horizonten te nemen.

Statistiek
Bij alle statische bewerkingen is op de basisgegevens een logtransformatie toegepast, zodat regressies op normale verdelingen van de data zijn gebaseerd Bij de dataverwerking zijn statische methoden gebruikt die deels als standaardfunctie zijn opgenomen in Excel (Gemiddelden, standaardafwijking, enkelvoudige regressie, Student-T-toets) en deels zijn opgenomen in het statisch pakket Genstat (Payne et al., 2002), zoals multiple regressie.

Regressie analyse
Met gegevens uit dataset 1 is gezocht naar een model waarmee de droge stof productie kan worden verklaard uit bodemvruchtbaarheidparameters. Daartoe werd eerst via enkelvoudige regressie gezocht naar parameters die ten minste 15% van de productie verklaarden. Met de geselecteerde parameters werd vervolgens gezocht naar een multiple lineair regressiemodel, steeds gebaseerd op combinaties van één stikstof-, één kalium- en één fosfaatparameter als verklarende variabelen al dan niet in combinatie met algemene bodemeigenschappen zoals de C/N verhouding en pH. Daarbij werd of uitsluitend met capaciteitsparameters of uitsluitend met intensiteitparameters of met combinaties daarvan gezocht naar het model dat de grootste verklaarde variantie had via een voorwaartse stapsgewijze selectie van parameters (Payne et al., 2000). Als criterium voor het beste model werd de verklaarde variantie gebruikt.

2.7 Overzicht parameters

In tabel 3 is een overzicht gegeven van de gebruikte parameters (met dimensies) waarmee regressie onderzoek werd uitgevoerd.

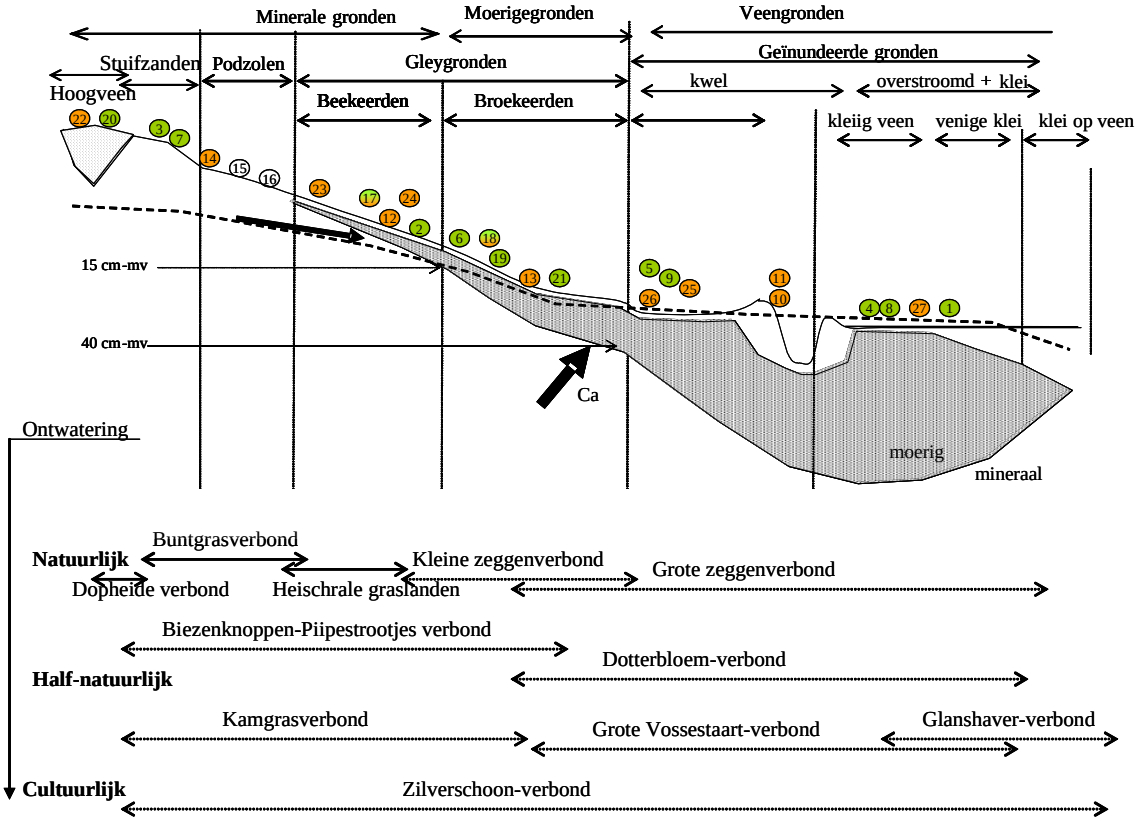
Tabel 3 Overzicht van bodemvruchtbaarheid- en vegetatieparameters met hun dimensies die in de verschillende datsets beschikbaar waren

	Dataset 1-i	Dataset 1-ii	Dataset 2	Dimensie
Gehalten en concentraties	N_{tot}		N_{tot}	$g.kg^{-1}$
	P_{tot}		P_{tot}	$g.kg^{-1}$
	Uitw K		Uitw K	$mmol.kg^{-1}$
	P_{ox}		P_{ox}	$mmol.kg^{-1}$
	Fe_{ox}		Fe_{ox}	$mmol.kg^{-1}$
	Org. Stof		Org. Stof	$g.100g^{-1}$
	pH-KCl		pH-KCl	(-)
	C/N		C/N	$g.g^{-1}$
	PSI		PSI	$mol.mol^{-1}$
	Ortho-P		Ortho-P	$mg.l^{-1}$
Beschikbaar-heden		PO_4-$CaCl_2$		$mg.kg^{-1}$
		NO_3-$CaCl_2$		$mg.kg^{-1}$
		NH_4-$CaCl_2$		$mg.kg^{-1}$
		K-$CaCl_2$		$mg.kg^{-1}$
Voorraden	N_{tot}		N_{tot}	$g.m^{-2}$
	P_{tot}		P_{tot}	$g.m^{-2}$
	P_{ox}		P_{ox}	$g.m^{-2}$
	Uitw-K_{tot}		Uitw-K_{tot}	$g.m^{-2}$
	Org.stof		Org.stof	$g.m^{-2}$
Min. constante	N_C			$mgN.gN^{-1}.t^{-1}$
Fluxen	N-min		N-min	$g.m^{-2}.t^{-1}$
	Nmin/MinN		Nmin/MinN	$g.g^{-1}$
Depositie	N_{dep}		N_{dep}	$g.m^{-2}$
Gewas eigenschappen	ds		ds	$g.m^{-2}$
	N_{tot}		N_{tot}	$g.m^{-2}$
	P_{tot}		P_{tot}	$g.m^{-2}$
	K_{tot}		K_{tot}	$g.m^{-2}$
	N/P/K		N/P/K	$g.g^{-1}$
	$N_{Ellenberg}$		$N_{Ellenberg}$	(-)

3 Resultaten

3.1 Onderzoekslocaties

Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de ligging van de onderzochte locaties in de landschappelijk hydrologische gradiënt. Op deze locaties zijn monsters verzameld om beide datasets met analysegegevens te kunnen vullen.



Figuur 1 Schematische weergave van de ligging van onderzoekslocaties in een landschappelijk hydrologische gradiënt met indicatieve verspreiding van natuurlijke, half natuurlijke en cultuurlijke vegetatietypen. De genummerde cirkels verwijzen naar bijlage 1. Groene cirkels verwijzen naar stikstof beperkte, oranje cirkels naar fosfaatbeperkte standplaatsen.

In bijlage 1 is een tabel opgenomen met per standplaats het voorkomende vegetatietype, de humusvorm, eigenschappen van humusprofiel en de bodemchemische karakteristieken van de bemonsterde horizonten voor dataset 1 en 2. Het blijkt dat stikstof- en fosfaatbeperkte standplaatsen niet aan een karakteristieke positie in het landschap zijn gebonden en overal kunnen voorkomen.

3.2 Metingen stikstofmineralisatie

3.2.1 Mineralisatie constanten

Voor het bepalen van de stikstofmineralisatie werden monsters genomen die verzameld zijn binnen dataset 1 i). Tabel 4 geeft een overzicht van de resultaten van de mineralisatiemetingen in de hoofdhorizonten (zie tabel 1 voor legenda) van het humusprofiel. Tabel 5 geeft de gemiddelden per horizont. De code Ah1 verwijst naar vorming van een Ah horizont onder zure omstandigheden tijdens podzolizatie; de code Ah2 verwijst naar horizonten die door homogenisatie onder invloed van een rijk bodemleven zijn ontstaan onder licht zure omstandigheden. Een tweetal monsters afkomstig uit het Reestdal (Of- resp. Om-horizont) is niet verder in beschouwing genomen omdat de resultaten een sterk afwijkend beeld vertoonden. Aannemelijk is dat in deze monsters door pyrietoxidatie een sterke verzuring ontstond tijdens het experiment (Van Delft et al. 2005)

Tabel 4 Netto (N-min) en bruto (min-N) N-mineralisatie constante per week bij 20 ^{O}C en enkele bodemchemische eigenschappen van de master-horizonten van het humusprofiel en de condities waaronder horizontontwikkeling heeft plaatsgevonden.

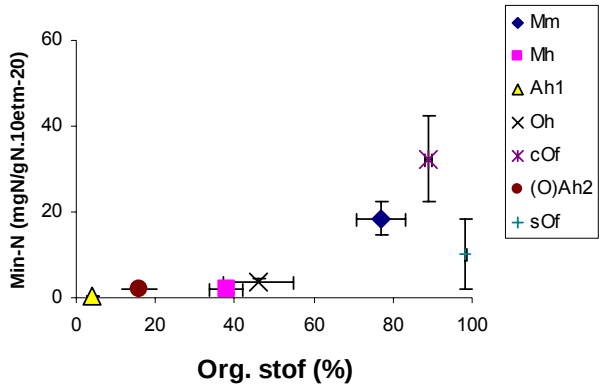
Standplaats code	Horizont	Condities	pH-KCl	Org. stof	N-totaal	N-min	Min-N	N-min/Min-N
				g/100gds		mgN/gN.wk (20°C)		
Zb ref	Ah1	terr.	3.04	4.3	0.483	0.555	4.81	0.12
G 133	Ah2	terr.	4.77	7.2	0.229	0.968	9.84	0.10
Veenk C	Ah2	terr.	4.73	18.5	0.626	1.226	6.00	0.20
Lv nieuw	OAh2	terr.	4.17	22.0	0.582	3.263	9.99	0.33
Mk 02	Oh	terr.	4.14	28.5	0.807	2.268	9.92	0.23
Cra ref	Mh	terr.	3.25	33.5	0.915	5.423	6.96	0.78
Zb ref	Mh	semi-terr.	3.02	42.2	2.061	0.267	1.83	0.15
RDV	Oh	semi-terr.	4.28	51.1	1.649	0.553	3.82	0.14
LV oud	Oh	semi-terr.	3.44	58.3	2.816	1.121	5.57	0.20
G 212	Mm	semi-terr.	3.45	69.0	1.471	0.954	25.49	0.04
RDV	Mm	semi-terr.	4.73	72.8	1.847	1.144	17.59	0.07
Br2	Oh/Of	semi-terr.	5.00	87.3	0.538	1.071	20.01	0.05
Mk 03	Of	semi-terr.	5.00	88.8	0.880	1.540	41.14	0.03
Br2	Mm	semi-terr.	5.12	89.1	2.425	0.329	9.49	0.16
STB	sOf	semi-terr.	3.01	98.1	0.633	0.377	13.18	0.22
Cra 19A	*Ah1*	*terr.*	*3.82*	*3.3*	*0.156*	*2.597*	*5.22*	*0.50*
Cra 40	*Ah1*	*terr.*	*3.76*	*4.7*	*0.122*	*4.415*	*6.05*	*0.73*
StA	*cOf*	*semi-terr.*	*6.34*	*90.8*	*1.427*	*2.874*	*15.59*	*0.02*

Zowel uit tabel 4 als 5 blijkt dat de bruto mineralisatie constante in veel gevallen een veelvoud groter is dan de netto mineralisatie constante. Het verschil tussen bruto en netto N-mineralisatie moet worden toegeschreven aan N-immobilisatie door micro-organismen.

Figuur 2 geeft het verband tussen organische stofgehalte en de bruto N-mineralisatie constante per onderscheiden horizont. Uit figuur 2 kan worden afgeleid dat de N-mineralisatie constante toeneemt als het organische stofgehalte toeneemt. Hierop maken horizonten die bestaan uit onverteerde veenmossen (sOf) een uitzondering. In deze horizonten is de bruto N-mineralisatie aanzienlijk lager dan op grond van het organische stofgehalte van de overige horizonten verwacht mag worden.

Tabel 5Gemiddelden en standaardfout van enkele bodemchemische en bodemfysische eigenschappenen, de gemiddelde potentiële netto (N-min) en bruto (Min-N) N-mineralisatie constanten van de hoofdhorizonten (in 2- of 3-voud) van het humusprofiel,

Horizont code	n		pH	Ntot g/kg os	Org.stof g/100g ds	Bulk kg/dm3	N-min mgN/gN.10 etm. 20 °C	Min-N
Mm	3	gem	4.43	24.64	76.96	0.12	0.85	18.49
		se	*0.50*	*1.74*	*6.18*	*0.03*	*0.23*	*3.76*
Mh	2	gem	3.14	38.06	37.87	0.36	1.38	2.22
		se	*0.12*	*10.75*	*4.37*	*0.04*	*1.22*	*1.11*
Ah1	3	gem	3.54	61.85	4.10	1.08	0.15	0.32
		se	*0.25*	*26.03*	*0.41*	*0.03*	*0.08*	*0.05*
Oh	3	gem	3.95	36.29	45.97	0.31	0.75	3.82
		se	*0.26*	*6.11*	*8.96*	*0.07*	*0.18*	*0.55*
cOf	3	gem	5.45	10.59	88.97	0.07	2.34	32.44
		se	*0.45*	*2.78*	*1.04*	*0.00*	*0.72*	*9.96*
(O)Ah2	3	gem	4.56	30.79	15.87	0.68	0.48	1.91
		se	*0.19*	*2.23*	*4.47*	*0.11*	*0.28*	*0.64*
sOf	2	gem	2.97	10.59	98.44	0.04	0.30	10.21
		se	*0.04*	*4.29*	*0.33*	*0.00*	*0.23*	*8.25*

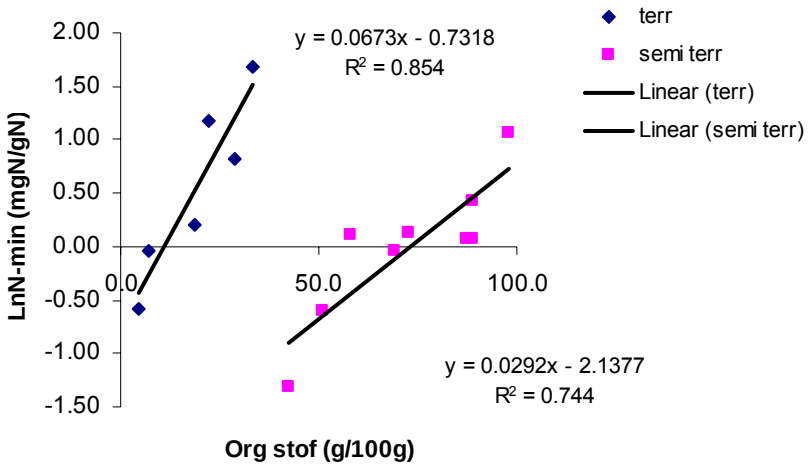


Figuur 2 De bruto N-mineralisatie constante (mgN per g N over een periode van 10 etmalen bij 20°C) in relatie tot het organische stofgehalte van de onderzochte humushorizonten met standaardfouten.

Figuur 3 geeft de relatie tussen netto N-mineralisatie constante en het organisch stofgehalte van de individuele horizonten gegroepeerd naar vormingscondities (zie ook tabel 4). Als criterium voor onderscheid tussen terrestrische en semi-terrstrische condities is een organische stofgehalte van 35% aangehouden (In figuur 3 zijn enkele monsters buiten beschouwing gelaten. Het betreft monsters afkomstig van voormalige akkers in Cranendonck en van een drijftil in de Stobbenribben (zie cursieve gedeelte tabel 4). Deze monsters pasten niet in de trend die voor terrestrische resp. semiterrestrische condities werd gevonden. Uit onderzoek van Kemmers et al. (rapp 1523) werd geconcludeerd dat op deze voormalige akkers de netto stikstofmineralisatie nog relatief hoog is, waarschijnlijk als gevolg van een nog slecht functionerend bodemleven. De overige monsters zijn allen afkomstig van niet door landbouwkundig gebruik beïnvloede standplaatsen. Voor het afwijkend gedrag van het monster afkomstig van de Stobbenribben kan geen verklaring worden gegeven. Uit figuur 3 kan worden geconcludeerd dat de netto N-mineralisatie constante sterk toeneemt naarmate het organische stofgehalte hoger is. Deze relatie is

voor terrestrische condities anders dan voor semi-terrestrische condities en kan worden weergegeven als (n=15, F_{prob}<0,001, R^2= 0,78):

Terrestrial: LnN-min = -0,732* + 0,0673.%LOI** (1)
Semi-terrestrial: = -2,138** + 0,0292.%LOI** (2)

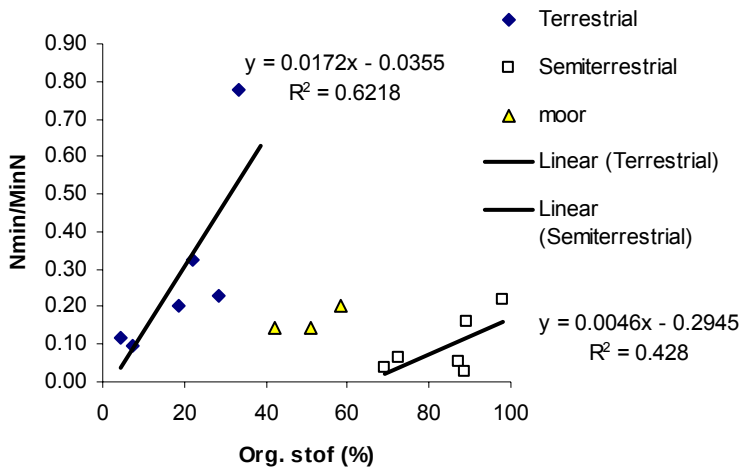


Figuur 3 Verband tussen het organisch stof gehalte en de netto N-mineralisatie constante (logtransformatie) voor horizonten die onder terrestrische of semi-terrestrische omstandigheden gevormd zijn.

In figuur 4 is de verhouding tussen netto- en bruto N-mineralisatie constante weergegeven in relatie tot het organische stofgehalte. De monsters zijn onderverdeeld in een terrestrische, een semi-terrestrisch en een sterk veraarde semi-terrestrische groep. In elke groep is een tendens aanwezig dat de verhouding tussen netto- en bruto mineralisatie constante toeneemt als het organisch stofgehalte toeneemt. Dit verband is het duidelijkst aanwezig in de terrestrische groep.

Als de verhouding tussen netto- en bruto N-mineralisatie constante toeneemt impliceert dit dat er steeds meer netto N-mineralisatie optreedt en steeds minder N-immobilisatie en dat de balans verschuift van immobilisatie naar netto mineralisatie.

De verbanden van figuur 4 zijn niet zeer sterk maar voldoende om er als hypothese uit af te leiden dat in terrestrische gronden stapeling van strooisel (door verzuring of verdroging) gepaard gaat met een toename van de netto N-mineralisatie en een afname van de N-immobilisatie. In semi-terrestrisch systemen leidt afname van het organische stofgehalte door veraarding juist tot een afname van de netto N-mineralisatie en een toename van de N-immobilisatie.



Figuur 4 De verhouding tussen netto- en bruto N-mineralisatie in relatie tot het organisch stofgehalte voor een drietal categorieën organische stof.

3.2.2 Stikstofleverantie en -depositie

De regressievergelijkingen 1) en 2) waarmee de mineralisatieconstanten werden voorspeld uit het organische stofgehalte, zijn als pedotransferfunctie gebruikt om per standplaats de stikstofleverantie te berekenen. Deze transferfunctie, die werd afgeleid met gegevens uit dataset 1, is toegepast op humusprofielgegevens van dataset 2 (zie bijlage 1: horizonten, % organische stof, dikte, N-totaal etc). De N-leverantie werd berekend voor een diepte van 10, 20 en 30 cm (zie hierboven) met een horizontonderscheiding conform het humusprofiel. Tevens werd deze berekening uitgevoerd voor de dikte van de effectieve wortelzone, zoals aangegeven in bijlage 1.
In tweede instantie werd ook voor de standplaatsen van dataset 1 de stikstofleverantie berekend. De berekende stikstofleveranties en de stikstofdepositiecijfers zijn weergegeven in bijlage 2. In bijlage 2 zijn ook de gemeten mineralisatieconstanten en de potentiële en actuele stikstofleverantie voor een standaardmonsterdiepte zonder onderscheid in profieldifferentiatie (dataset 1ii) weergegeven. Tabel 6 geeft gemiddelden met standaardafwijkingen en de mediaanwaarden van de verschillende parameters en geeft een indruk van de berekende stikstofmineralisatie in verhouding tot de stikstofdepositie.

Tabel 6 Gemiddelden en standaardafwijkingen van berekende stikstofleveranties volgens verschillende bemonsteringstrategieën en per diepteklasse in verhouding tot de stikstofdepositie.

	Nmin/seizoen (g/m2)						N-depositie	Nmineff+Ndep
	Bemonstering conform humusprofiel				Standaardmonsterdiepte			
	10 cm	20 cm	30 cm	eff wortel	10 cm		gN/m2	
	actueel				Potentieel	Actueel	Actueel	
	Nmin1	Nmin2	Nmin3	Nminef	NC2	NC3	Ndep	Mindep
Gem.	1.67	2.66	3.71	2.66	9.92	5.69	3.87	6.53
St.dev.	1.5	2.0	3.0	2.1	8.7	4.7	0.8	2.3
Mediaan	1.4	2.1	3.1	2.7	7.5	3.7	4.1	6.6

Tabel 6 laat zien dat volgens een standaardbemonstering van 10 cm dikte de N-leverantie (NC3) gemiddeld een factor 3 groter is dan wanneer rekening wordt gehouden met de opbouw van het humusprofiel (Nmin1). Onder invloed van de

actuele seizoenstemperatuur (NC3) wordt de potentiële stikstofleverantie (NC2) ongeveer met de helft gereduceerd. De gemiddeld stikstofdepositie (Ndep) is net zo groot als de gemiddelde stikstofmineralisatie in de bovenste 30 cm van de bodem. De som van de gemiddelde stikstofmineralisatie in de effectieve wortelzone en de gemiddelde stikstofdepositie bedraagt ongeveer 65 $kg.ha^{-1}$. Als deze som als maat voor de stikstofbeschikbaarheid wordt aangehouden dan varieert de stikstofbeschikbaarheid in de onderzochte standplaatsen tussen 42 en 88 $kgN.ha^{-1}$.

3.3 Gehalten

De gehalten betreffen de directe resultaten van monsteranalyses in het laboratorium en zijn voor zowel dataset 1 als dataset 2 weergegeven in bijlage 3. Tabel 7 geeft enkele voorbeelden van terrestrische of semi-terrestrische standplaatsen met een duidelijke horizontdifferentiatie binnen het humusprofiel door verzuring of veraarding. Het blijkt dat in de bovenste 20 a 30 cm van de bodem sterke gradiënten in gehalten voorkomen De tabel is een goede illustratie dat bij bemonstering per standaarddiepte (bv. 0-10 cm-mv) veel informatie verloren gaat. Binnen het humusprofiel komen de verschillen in decompositiegraad van de verschillende horizonten duidelijk tot uiting in het organische stof gehalte en de C/N verhouding van de organische stof. Naarmate strooisel minder is verteerd is het organisch stofgehalte en de C/N verhouding hoger. Ook lijkt een geringe verteringsgraad van het strooisel vaak samen te gaan met hoge gehalten uitwisselbaar kalium. De hoeveelheid geadsorbeerd fosfaat (P_{ox}) en de fosfaatverzadigingsindex is over het algemeen laag.

Tabel 7 Voorbeelden van enkele standplaatsen met sterke gradiënten in gehalten binnen het humusprofiel

Standplaats	Aard	Horizon		Eff.wrt	Org. stof	pH-KCl	N-tot	C/N	K-uitw	P_{ox}	Fe_{ox}	PSI	Cp
code			(cm)	cm	$g.100g^{-1}$		$g.kg^{-1}$		mmol/kg			$mol.mol^{-1}$	$mg.l^{-1}$
G222	Terrestrisch	Of	3	20	37.0	3.55	5.0	36.9	6.04	3.1	62.1	0.050	0.146
	verzuurd	Mm	3		12.6	3.73	3.2	19.6	1.96	1.6	35.0	0.045	0.130
		AMh	5		4.6	3.78	1.7	13.5	0.67	0.9	24.7	0.035	0.098
		AC	9		1.7	3.87	0.7	12.7	0.43	0.4	14.3	0.026	0.071
LM3	Terrestrisch	AMm	3	10	24.9	6.38	5.0	25.1	6.36	4.3	51.5	0.083	0.269
	niet-	Ah	8		16.4	6.26	3.8	21.3	2.05	1.8	43.3	0.041	0.117
	verzuurd	AC	9		3.1	5.66	0.8	18.3	0.83	0.7	21.8	0.034	0.095
Br5	Semi-terr	Mm	8	15	73.9	4.98	7.0	52.7	12.74	86.2	853.0	0.101	0.348
	vernat	Oh	12		53.3	5.33	15.9	16.8	1.27	215.1	1182.9	0.182	0.881
KvD	Sem-terr	OA	13	10	29.5	4.31	8.3	17.7	1.45	6.5	152.7	0.042	0.120
	verdroogd	Oh	7		81.4	4.52	15.6	26.0	8.44	11.7	249.6	0.047	0.136
StB	Semi-terr	pOf	5	10	95.3	2.85	8.6	55.7	18.43	4.2	24.7	0.169	0.768
	verzuurd	sOf	15		95.6	3.10	5.9	80.4	8.82	3.3	21.6	0.153	0.647

3.4 Nutriëntvoorraden

De nutriëntvoorraden zijn berekend voor dataset 1 en 2 uit gehalten en bulkdichtheden. In bijlage 4 worden voor N-totaal, K-totaal, P_{ox} de berekende voorraden voor een diepte van 0-10 cm-mv, 0-20 cm-mv en 0-30 cm-mv gepresenteerd. De voorraden variëren sterk per standplaats. Door de specifieke opbouw van het humusprofiel hoeft de voorraad van de bodemlaag 0-20 cm niet de dubbele hoeveelheid te zijn van de bodemlaag 0-10 cm. Over het algemeen is de stikstofvoorraad per diepteklasse voor stikstof het grootst en voor kalium het kleinst. Tabel 8 geeft een overzicht van de gemiddelde voorraden met standaardafwijkingen

Tabel 8 Gemiddelde voorraad met standaardafwijking van stikstof, kalium en fosfaat in een bodemlaag van 10, 20 resp. 30 cm dikte.

	Dikte bodemlaag (cm)		
	10	20	30
	N-voorraad (g/m2)		
Gem.	250.6	412.9	554.7
St. dev	109.8	196.5	315.1
	K-voorraad (g/m2)		
Gem.	4.9	7.9	10.1
St. dev	3.0	5.0	5.7
	Pox voorraad (g/m2)		
Gem.	13.5	26.6	38.6
St. dev	16.2	45.9	77.2

3.5 Vegetatieparameters

In bijlage 5 worden de productieparameters van de vegetatie, de nutriëntverhoudingen in het geoogste gewas en de Ellenberg indicatie waarden voor stikstof gegeven. Tabel 9 geeft gemiddelden en standaardafwijkingen van de waarnemingen. De spreiding in droge stofproductie loopt uiteen van ca. 2,5 tot ruim 6 ton ds.ha^{-1} met een minimum van 1,7 en een maximum van 10 ton. De Ellenberg indicatie voor stikstof varieert tussen 2,6 en 4 met een minimum van 2,1 en een maximum van 5. In de helft van de standplaatsen wordt de droge stofproductie door fosfaat beperkt (N/P > 14,6). Ook is er in de helft van de standplaatsen sprake van een kalium beperkte productie (N/K >2,1).

Tabel 9 Gemiddelden, standaardafwijkingen, nutriëntverhoudingen in het gewas en de stikstofindicatie volgens Ellenberg

	oogsten g/m2				nutrientratio's			N-Indicatie Ellenberg
	N-Oogst	P-oogst	K-oogst	ds	N/P	N/K	K/P	N_E
Gem	5.44	0.45	2.47	435.2	15.7	3.3	8.0	3.31
St dev	1.83	0.31	1.39	182.2	8.0	3.3	6.1	0.69
Mediaan	5.26	0.33	2.55	399.4	14.6	2.1	8.6	3.10

3.6 Regressieanalyse

Dataset 1 is gebruikt om een productiemodel af te leiden. Het productiemodel werd geverifieerd met gegevens van dataset 2. In bijlage 6 zijn van dataset 1 en 2 de resultaten van enkelvoudige regressie vermeld, waarbij de droge stofproductie wordt verklaard uit bodemvruchtbaarheidparameters.

3.6.1 Dataset 1

Enkelvoudige regressie

In dataset 1i (bemonstering conform humusprofiel) dragen de parameters die de kaliumvoorraad en met name die welke de fosfaatvoorraad beschrijven bij aan de

voorspelling van de droge stofproductie. De stikstofvoorraad in het bodemprofiel lijkt niet relevant. Bij de parameters die in dataset 1ii zijn verzameld (standaardmonsterdiepte) geven met name de stikstofparameters (N_{tot}, NH_4) een sterke bijdrage. Ook beschikbaar K en de C/N verhouding leveren een sterke bijdrage. Uit bijlage 6 blijkt dat het indicatiegetal volgens Ellenberg minder dan 5% van de gewasproductie verklaard, terwijl de huidige methode voor critical load berekeningen op deze parameter is gebaseerd.

Meervoudige regressie

Bij de meervoudige regressieanalyse zijn niet alle mogelijk combinaties van parameters onderzocht, maar een selectie daarvan. Er werden alleen combinaties van parameters onderzocht die bij enkelvoudige regressie een bijdrage leverden aan de verklaarde variantie van de droge stof. Er werden maximaal drie parameters per model geselecteerd: één voor stikstof, één voor fosfaat en één voor kalium. Voorkomen werd dat voor eenzelfde nutriënt meerdere parameters werden geselecteerd. Daarbij werd of uitsluitend met capaciteitsparameters of uitsluitend met intensiteitparameters of met een combinatie daarvan gewerkt. Parameters uit dataset 1i (verzameld conform humusprofiel) zijn niet gecombineerd met parameters uit dataset 1ii (verzameld volgens standaardmonsterdiepte). De drie beste modellen waarmee de droge stof verklaard kan worden uit bodemvruchtbaarheidparameters die conform de opbouw van het humusprofiel zijn bemonsterd (dataset 1i) is gegeven in tabel 10.

Tabel 10 Verklaarde variantie (adj R^2), vrijheidsgraden (df) en de waarschijnlijkheid dat een parameter siginificant bijdraagt (Fprob) aan de verklaarde variantie: 0,01<Fprob<0,05: significante; Fprob<0,01sterk significant

Adj. R^2	df	Nmin3	Kv3	Pv3
60.95	3	-	.022	.002
Adj. R^2	Df	Mindep	Kv1	Pv1
61.57	3	.052	-	.001
Adj. R^2	Df	Nminef	Kv3	Pv3
74.13	4	.028	.020	.001

De droge stofproductie wordt het best verklaard (r^2=74,13) door de mineralisatie in de effectieve wortelzone (Nmineff) , de voorraad uitwisselbaar kalium in de laag 0-30 cm-mv (Kv3) en de voorraad met oxalaat extraheerbaar fosfaat die in de laag 0-30 cm-mv (Pv3) ligt opgeslagen.

In tabel 11 worden de drie beste modellen gegeven gebaseerd op parameters die verzameld zijn volgens een standaard monstermethode (dataset 1ii).

Tabel 11 Verklaarde variantie (adj R^2), vrijheidsgraden (df) en de waarschijnlijkheid dat een parameter siginificant bijdraagt (Fprob) aan de verklaarde variantie: 0,01<Fprob<0,05: significante; Fprob<0,01sterk significant.

Adjusted	df	CN	NH4	Kca	Pca
83.04	3	.006	.021	-	-
Adjusted	Df	CN	Ntot	Kca	Pca
83.16	3	000	.020	-	-
85.36	3	.002	-	.009	-

Als volgens een standaarddiepte van 10 cm wordt bemonsterd blijkt uit tabel 10 dat de droge stofproductie, het best verklaard kan worden (r^2=85,36) uit de C/N verhouding en de kalium beschikbaarheid (Kca).

Uit de vergelijking van modellen die met dataset 1i en 1ii zijn afgeleid blijkt dat dataset 1ii het beste model heeft opgeleverd. Dit wil zeggen dat analyses van parameters na standaardbemonstering (0-10 cm-mv) tot betere resultaten leidt dan na gedetailleerde bemonstering conform het humusprofiel. Via standaardbemonstering werden beschikbaarheidsparameters via $CaCl_2$ extractie en algemene bodemkenmerken verzameld. Met de C/N verhouding van de organische stof en de K-beschikbaarheid in de bovenste 10 cm van de bodem kan de droge stofproductie het beste worden verklaard met het model (n=12, df=2, Fprob<0,001, r^2=85,4):

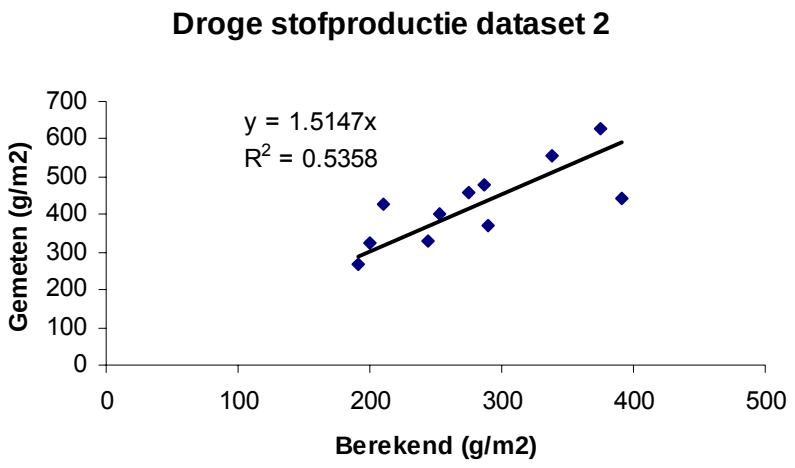
$$LnDs = 3{,}248 + 0{,}198 LnK_{ca} + 0{,}634 LnC/N \quad (3)$$

Waarbij Ds: droge stofproductie ($g.m^{-2}$)
Kc_a: Beschikbaar kalium via $CaCl_2$-extractie ($mg.kg^{-1}$)
C/N: C/N verhouding van de organische stof

3.6.2 Dataset 2

Verificatie

Het model dat werd afgeleid met gegevens uit dataset 1 is geverifieerd met gegevens van dataset 2. Een probleem daarbij is dat in dataset 2 geen $CaCl_2$ extracties zijn uitgevoerd om de kaliumbeschikbaarheid vast te stellen. Om dit probleem te ondervangen is de voorraad uitwisselbaar K (Kv1) in de laag 0-10 cm (conform opbouw humusprofiel) als vervanger genomen. De kaliumvoorraad bleek immers met dataset 1i (zie tabel 9) eveneens als goede voorspeller naar voren te zijn gekomen.



Figuur 5 De berekende droge stofproductie in vergelijking met gemeten droge stofproductie in dataset 2. Het model werd afgeleid met gegevens uit dataset 1.

Uit figuur 5 blijkt dat de berekende droge stofproductie een factor 1,5 lager is dan de gemeten productie. Dit betekent dat uit de verificatieprocedure geconcludeerd moet worden dat het model de droge stofproductie niet juist voorspelt.

Regressieanalyse

Omdat met dataset 1 geen bevredigend model kon worden afgeleid is ook met dataset 2 een model afgeleid en geverifieerd met dataset 1.

In dataset 2 geeft bij enkelvoudige regressie alleen de C/N verhouding en de stikstofvoorraad in de laag 0-20 cm een redelijke bijdrage aan de verklaring van de droge stofproductie. In tabel 12 zijn de drie modellen die de productie het best verklaren uit de nutriëntparameters.

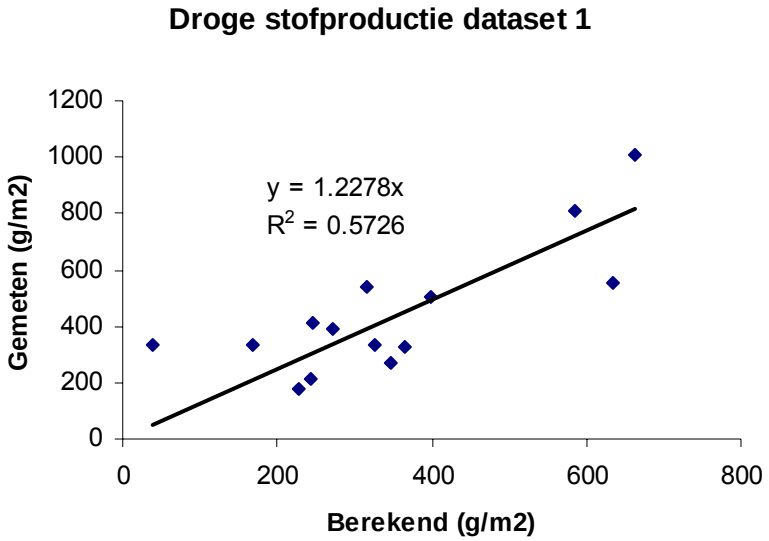
Tabel 12 Verklaarde variantie (adj R^2), vrijheidsgraden (df) en de waarschijnlijkheid dat een parameter siginificant bijdraagt (Fprob) aan de verklaarde variantie in dataset 2: 0,01<Fprob<0,05: significante; Fprob<0,01sterk significant

Adj R^2	Df	Kv1	Nv1	Pv1	pH_KCl	CN
69.01	3	-	-	-	.037	.004
Adj R^2	Df	Kv2	Nv2	Pv2	pH_KCl	CN
83.57	4	-	.036	-	.013	.001
Adj R^2	Df	Kv3	Nv3	Pv3	pH_KCl	CN
84.85	4	-	.028	-	.015	.001

Uit tabel 12 blijkt dat met dataset 2 de droge stofproductie voor bijna 85% kan worden verklaard uit de C/N verhouding, de pH-KCl en de stikstofvoorraad in de bovenste 30 cm van de bodem volgens (n=10, df=3, Fprob=0,021, r^2=61,4)

$$LnDs = 4.285 + 0{,}73LnC/N + 0{,}439LnpH\text{-}KCl^{n.s} - 0{,}205LnNv3^{n.s.} \quad (4)$$

Waarbij
- Ds: droge stofproductie ($g.m^{-2}$)
- C/N: C/N verhouding van de organische stof
- pH-KCl: zuurgraad na KCl extractie
- Nv3: stikstofvoorraad in de bodemlaag 0-30 cm-mv ($g.m^{-2}$)



Figuur 6 De berekende droge stofproductie in vergelijking met gemeten droge stofproductie in dataset 1. Het model werd afgeleid met gegevens uit dataset 2

Uit figuur 6 blijkt dat het model dat is afgeleid uit dataset 2 iets beter voorspelt dan het model dat is afgeleid uit dataset 1.

Opvallend is dat in beide modellen de C/N verhouding van de organische stof een belangrijke rol speelt, terwijl in het eerste model kalium en in het tweede model stikstof ook een belangrijke rol spelen bij de droge stof productie. Opvallend is dat de fosfaat uiteindelijk in geen van de datasets naar voren is gekomen als een belangrijke voorspeller voor de droge stofproductie.

Uit het feit dat de datasets tot verschillende modellen hebben geleid en omdat de databestanden vrij beperkt waren kan worden afgeleid dat de productie kennelijk door locale factoren sterk wordt bepaald. Het is daarom raadzaam de database uit te breiden. Daarom is besloten beide datasets bij elkaar te voegen en de exercitie te herhalen. Een nadeel daarvan is dat dan geen onafhankelijk dataset voor verificatie meer beschikbaar is .

3.6.3 Dataset 3

In dataset 3 werden alle parameters die bij enkelvoudige regressie tenminste een bijdrage van 20% in de droge stofproductie leverden als kandidaat voor het meervoudige model beschouwd. De C/N verhouding werd in elk kandidaat-model opgenomen. Alleen die parameters werden in beschouwing genomen die voor alle standplaatsen beschikbaar waren. De beste drie modellen zijn weergegeven in tabel 13.

Tabel 13 Verklaarde variantie (adj R^2), vrijheidsgraden (df) en de waarschijnlijkheid dat een parameter siginificant bijdraagt (Fprob) aan de verklaarde variantie in dataset 3: 0,01<Fprob<0,05: significante; Fprob<0,01sterk significant.

Adj R^2	Df	Kv2	Nv2	Pv2	CN
72.63	4	.071	-	.077	.000
Adj R^2	Df	Nv1	Pv1	Kv1	CN
73.87	3	-	-	.011	.000
Adj R^2	Df	Nv1	Pv1	Kv1	CN
76.57	4	-	.085	.013	.000

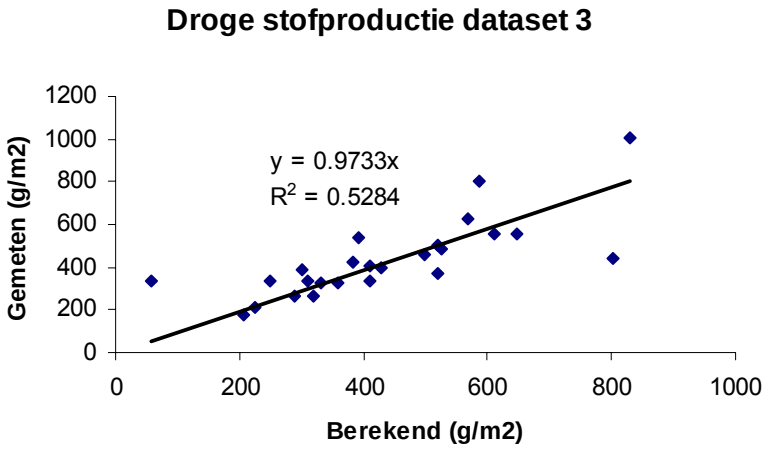
Uit tabel 13 blijkt dat de droge stofproductie het best verklaard wordt (R^2=76,57 %) uit de C/N verhouding, de voorraad uitwisselbaar kalium en oxalaat extraheerbaar fosfaat in de bovenste 10 cm van de grond volgens het model (n=22, df=3 r^2=76.6, F_{prob}<0.001):

LnDs = 3,838 + 0,648LnC/N +0,2285LnKv1 - 0,0668LnPv1 (5)

Waarbij Ds: droge stofproductie ($g.m^{-2}$)
C/N: C/N verhouding van de organische stof
Kv1: Beschikbare kaliumvoorraad in de bodemlaag 0-10 cm-mv ($g.m^{-2}$)
Pv1: Oxalaatextraheerbare fosfaatvoorraad in de bodemlaag 0-10 cm-mv ($g.m^{-2}$)

Interessant is dat naast de C/N verhouding alleen de voorraadparameters een goede voorspelling geven en dat de intensiteitsparameters geen rol lijken te spelen. Opvallend is dat de N-voorraad geen rol speelt als de C/N verhouding maar bekend is. Daarnaast valt op dat de fosfaatvoorraad een negatieve invloed heeft op de productie. Onderscheid naar N- of P beperkte standplaatsen op basis van de N/P verhouding van het gewas, leverde geen significante bijdrage aan het model.

Uit figuur 7 blijkt dat het niet geverifieerde model voor productieniveaus onder de 200 en boven de 700 gram drogestof per vierkante meter minder betrouwbaar lijkt te zijn.



Figuur 7 De berekende droge stofproductie in vergelijking met gemeten droge stofproductie in dataset 3. Het model werd afgeleid met gegevens uit dataset 3.

3.6.4 Gewaseigenschappen

In bijlage 6 zijn de resultaten van enkelvoudige regressie opgenomen, waarbij werd gekeken of er relaties zijn tussen droge stofproductie en andere gewaseigenschappen. Het blijkt dat de droge stofproductie slechts door minder dan 4% verklaard kan worden uit het stikstofindicatiegetal (N_E). De stikstofoogst en de kaliumoogst van het gewas zijn redelijk gecorreleerd aan de droge stofopbrengst.

De droge stofproductie wordt voor 54% verklaard uit de N-oogst. Indien er rekening wordt gehouden met de aard van de groeibeperkende factor van de standplaats (N/P verhouding) dat er een beter model ontstaat dat 62,3% verklaard. Het blijkt dat er een significant verschil is tussen N-beperkte en P-beperkte standplaatsen voor de relatie tussen droge stof en N-oogst (n=24, df=3, r^2= 62,5 F_{prob}<0,001:

N beperking (N/P <14,6): LnDs = 4,96 + 0,55LnN-oogst (6)
P beperking (N/P >14,6): LnDs = 4,73 + 0,84LnN-oogst (7)
Waarbij Ds: droge stofproductie ($g.m^{-2}$)
N-oogst: stikstof in geoogst gewas ($g.m^{-2}$)

Vergelijking 6 en 7 suggereren dat op P-beperkte standplaatsen minder stikstof nodig is om een bepaalde droge stofproductie te realiseren dan op N-beperkte standplaatsen.

3.7 Conclusies

Met de resultaten van het regressieonderzoek zijn de vier kennisvragen uit de inleiding te beantwoorden.

1) Het stikstofindicatiegetal volgens Ellenberg (N_E) verklaard minder dan 5% van de droge stofproductie van de vegetatie en is daarom geen goede indicator voor de voedselrijkdom van bodems.
2) Wat is de beste maat om de voedselrijkdom van een standplaats vast te stellen ? De beste maat is de C/N verhouding in combinatie met de kalium- en fosfaatvoorraad van de bovenste 10 cm van de grond.
3) Welke relatie bestaat er tussen voedselrijkdomparameters van de bodem en de productie van de vegetatie ? De droge stofproductie in de range van 200 tot 700 g ds.m^{-2} kan goed voorspeld worden (r^2=76,6) uit bodemvruchtbaarheidparameters met een capaciteitskarakter. De droge stofproductie (voedselrijkdom) is groter naarmate de C/N verhouding en de kaliumvoorraad hoger is en de fosfaatvoorraad lager is
4) Hoe kunnen voedselrijkdomparameters van de bodem het best worden gemeten? Bodembemonstering kan het best plaatsvinden volgens te onderscheiden horizonten van het humusprofiel over de bovenste 10 cm van de bodem. Ook zijn er aanwijzingen dat een goede voorspelling van de bodemvruchtbaarheid mogelijk is met de C/N verhouding in combinatie met beschikbaar kalium en/of ammonium na $CaCl_2$ extractie van bodemmonsters die volgens een standaardmonsterdiepte van 10 cm zijn verzameld. Kostbare en tijdrovende berekeningen van de stikstofleverantie door het humusprofiel op basis van gemeten N-mineralisatiesnelheden of berekeningen van de evenwichtsfosfaatconcentratie in het bodemvocht als functie van de fosfaatverzadigingsindex zijn geen geschikte parameters om de voedselrijkdom van de bodem te bepalen;

Verder kan worden geconcludeerd dat:

- bodemvruchtbaarheidparameters met een intensiteitskarakter (gehalten of concentraties) of gebaseerd op fluxen (leveranties over een bepaalde tijdsperiode) geen goede voorspelling van de droge stofproductie geven;
- de stikstofdepositie geen bijdrage levert aan een verklaring van de droge stof productie. Dit betekent dat we geen aanwijzingen hebben gevonden dat de gewasproductie wordt beïnvloed door de stikstofdepositie;
- de aard van de groeibeperkende factor geen rol speelt bij de verklaring van de gewasproductie uit bodemvruchtbaarheidsparameters. Dit betekent dat zowel onder stikstofbeperkte als onder fosforbeperkte groeiomstandigheden dezelfde bodemvruchtbaarheidparameters bepalend zijn voor de gewasproductie;

- naarmate er meer stikstof is opgenomen door het gewas (N-oogst) is de droge stofopbrengst van het gewas in zijn algemeenheid groter. Onder fosforbeperkte groeiomstandigheden is echter minder stikstof nodig om een bepaalde droge stofopbrengst te realiseren dan onder stikstofbeperkte groeiomstandigheden;
- onder fosforbeperkte groeiomstandigheden lijkt het N-gehalte (eiwitgehalte) van de droge stof lager te zijn dan onder stikstofbeperkte groeiomstandigheden. Dit suggereert dat door fosfortekort het gewas minder eiwit produceert (minder voedzaam is).

4 Discussie

4.1 Inleiding

Een aantal resultaten uit hoofdstuk 3 zijn verrassend en vragen daarom enige verdere discussie.

Bij de N-mineralisatie experimenten verwachtten we dat horizonten met een slechte strooiselvertering (koolstofaccumulatie) ook een lage stikstofmineralisatie zouden vertonen. Immers koolstofaccumulatie wijst op een stagnatie van de koolstofkringloop en vanwege de koppeling van de C- en N-kringloop naar verwachting ook op accumulatie van stikstof door een lage stikstofmineralisatie. Wij vonden juist een toename van de stikstofmineralisatie bij afname van de decompositiegraad. Ook was het verrassend dat de droge stofopbrengst van het gewas positief gecorreleerd is met de C/N verhouding, terwijl we verwacht hadden dat deze relatie juist negatief zou zijn. Verrassend was ook dat het model voor voorspelling van de droge stofproductie onafhankelijk is van de voedingsstof die beperkend is voor de droge stofproductie. Zowel op N- als op P-beperkte standplaatsen wordt eenzelfde relatie gevonden.

4.2 Ontkoppeling koolstof- en stikstofkringloop ?

Opvallend in paragraaf 3.2.1 was dat de stikstofmineralisatieconstante in graslanden hoger is naarmate het organische stofgehalte van het monster hoger is. Een aantal horizonten zijn zelfs duidelijk van elkaar te onderscheiden op basis van de mineralisatieconstante (figuur 2). Ook in bossen wordt in het humusprofiel onderscheid gemaakt naar verteringsgraad. In de volgorde L-, F-, H-horizont neemt de humificatiegraad toe. Uit onderzoek van Tietema et al. (1992) en Smit et al. (2002) naar de stikstofmineralisatie in bossen blijkt eveneeens een sterke correlatie aanwezig te zijn tussen organische stofgehalte en de stikstofmineralisatie. Naarmate de verteringsgraad van de humus groter is, neemt de stikstofmineralisatie af. Kennelijk is het organische stoftype sterk bepalend voor de grootte van de stikstofmineralisatie.

Strooiselstapeling in terrestrische systemen

Op onze terrestrische standplaatsen in graslanden neemt de mineralisatieconstante toe naarmate de organische stof in de horizonten minder sterk is omgezet (zie figuur 3 paragraaf 3.2.1). In de volgorde Ah, Mh (humic), Mm (mesic), Mf (fibric) worden de horizonten gekarakteriseerd door organisch materiaal dat steeds minder is afgebroken door decompositie. Deze stagnerende decompositie treedt op door ongunstige bodemcondities: te zuur, te nat of te droog. Het humusprofiel indiceert daarom de bodemontwikkeling onder invloed van verander(en)de bodemcondities door verzuring, verdroging of vernatting. Sterk verzuurde beekeerdgronden ontwikkelen matig of nauwelijks afgebroken Mm- of Mf-horizonten op een goed gehumificeerde en gehomogeniseerde Ah-horizont (zie tabel bijlage G212, G222,

Lm6). Een Ah-horizont zonder M-(wortel)horizonten is typerend voor een basenrijke vochtige gronden (bijlage VeenkC, G109). Opvallend is nu dat onze stikstofmineralisatie experimenten laten zien dat de stikstofmineralisatie in onverteerd materiaal hoger is dan in gehumificeerd materiaal. Uit het productiemodel bleek vervolgens dat de C/N verhouding een grote positieve bijdrage levert aan de verklaring van de droge stofopbrengst.

Veraarding in semi-terrestrische systemen

Een soortgelijk verband tussen C-decompositie en N-mineralisatie is te zien bij semi-terrestrische standplaatsen (Figuur 3 paragraaf 3.2.1). Onder semi-terrestrische omstandigheden worden organische hoofdhorizonten met een hoofdletter O aangeduid en de verteringsgraad met een suffix *f* (fibric), *m* (mesic) of *h* (humified). Bij veen wordt de niet verstoorde situatie gekenmerkt door onverteerd of matig verteerd organische materiaal: Of en Om (RDV, St). Bij verdroging ontstaan door zuurstoftoetreding veraardingsprocessen waarbij de C-decompositie toeneemt wat zich uit in de ontwikkeling van Om- en goed gehumificeerde Oh- of OA-horizonten (WLA3, Uk3 KvD). Bij vernatting (of verzuring) kunnen veengronden op sterk gehumificeerde horizonten weer minder omgezette Mm- of Mf-horizonten ontwikkelen (Uk3, KvA, Br5). Onze data laten zien dat toename van de C-decompositie gepaard gaat met afname van de N-mineralisatie.

C/N verhouding, stikstofmineralisatie en -immobilisatie

De data van zowel terrestrische als de semi-terrestrisch standplaatsen geven aan dat de stikstofmineralisatie toeneemt als de C-decompositie afneemt, wat suggereert dat de koolstof en stikstofkringloop ontkoppeld lijken te zijn.

Uit tabel 6 (paragraaf 3.3) werd geconcludeerd dat de decompositiegraad van de verschillende horizonten duidelijk tot uiting komt in het organische stofgehalte en de C/N verhouding van de organische stof. Naarmate strooisel minder is verteerd is het organisch stofgehalte en de C/N verhouding hoger. Ook constateerden we dat de N-mineralisatie hoger is naarmate de decompositiegraad lager is. Dit impliceert dat er een verband moet zijn tussen de stikstofmineralisatie en de C/N verhouding. Dit werd inderdaad bevestigd bij de regressie-analyse (paragraaf 3.6.3), waarbij de C/N verhouding als belangrijkste stikstofparameter voor de droge stofproductie van het gewas te voorschijn kwam: een hoge C/N verhouding leidt tot een grotere N-mineralisatie waardoor meer stikstof beschikbaar is voor de droge stofproductie.

Vers strooisel (hetzij in de vorm blad, hetzij in de vorm van wortels) heeft in zijn algemeenheid een hogere C/N verhouding (Buckman & Brady, 1969) dan gehumificeerd (verteerd) strooisel (i.e. humus). Tijdens het verteringsproces wordt door humificatie de C/N verhouding afhankelijk van bodemcondities als zuurgraad, vochtgehalte en voedselrijkdom) geleidelijk lager tot een evenwicht is bereikt. De drijvende kracht achter de afname van de C/N verhouding zijn micro-organismen die van het gemineraliseerde stikstof (bruto stikstofmineralisatie) weer een gedeelte opnemen om in te bouwen in lichaamseiwitten. Dit wordt N-immobilisatie genoemd. Wat overblijft (bruto N-mineralisatie minus N-immobilisatie) wordt netto stikstofmineralisatie genoemd en is beschikbaar voor plantopname. Naarmate de

C/N verhouding van een bodem lager is, zal dus meer stikstof zijn geïmmobiliseerd door microbiële activiteit. Omgekeerd betekent dit dat bij een lage microbiële activiteit weinig N-immobilisatie zal optreden waardoor de C/N verhouding hoog blijft.

4.3 Rol bodemleven

In ons onderzoek hebben we de stikstofmineralisatie zowel onder aerobe als onder anaerobe omstandigheden gemeten (zie paragraaf 2.3). Bij anaerobe mineralisatie wordt nitraatvorming verhinderd, waardoor geen denitrificatie kan optreden en nitraat niet kan worden opgenomen door micro-organismen. Bacterievore en fungivore nematoden en protozoa sterven bij anaerobie af, waarbij eerder geïmmobiliseerd stikstof (via bijv. bacterievorie) weer vrijkomt. De invloed van stikstofimmobilisatie is dus vrijwel afwezig bij anaerobe N-mineralisatie in tegenstelling tot bij aerobe N-mineralisatie. Wij hebben daarom de verhouding tussen aerobe (Nmin) en anaerobe N-mineralisatie (minN) als een maat genomen voor de stikstofimmobilisatie: naarmate de verhouding lager is, domineert de bruto N-mineralisatie over de netto N-mineralisatie en wordt er dus veel stikstof geïmmobiliseerd. Een hoge verhouding geeft dus aan dat de betekenis van N-immobilisatie beperkt is.

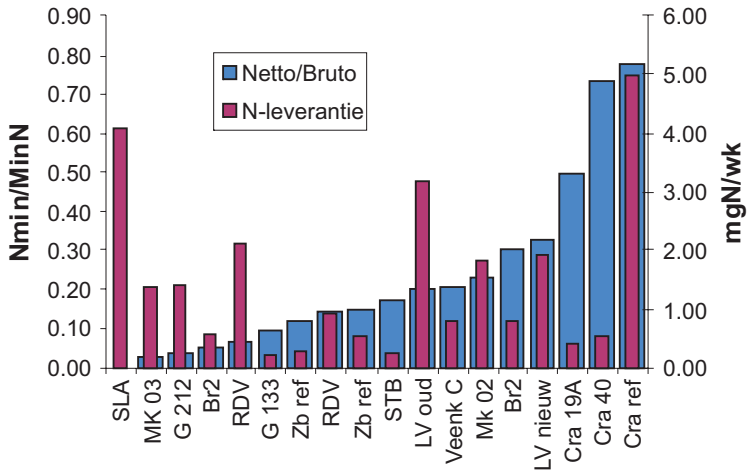
Stikstofcompetitie tussen micro-organismen en hogere planten

Figuur 4 (paragraaf 3.2.1) geeft de Nmin/MinN verhouding weer van de onderzochte standplaatsen. Onderscheid is gemaakt naar terrestrische en semi-terrestrische standplaatsen en een middengroep van moerige gronden (sterk veraard). Voor elk van de groepen wordt een positief verband gevonden tussen organisch stofgehalte en Nmin/MinN. Naarmate het organisch stofgehalte hoger is en minder is omgezet (toename C/N), neemt de Nmin/MinN verhouding toe. Naarmate organisch materiaal minder is omgezet neemt de betekenis van de netto N-mineralisatie dus toe en de N-immobilisatie af. Er is dus minder stikstof vastgelegd in microbiële biomassa naarmate de organische stof minder is verteerd. Onder terrestrische condities is de toename van de organische stof (strooiselaccumulatie) met name het gevolg van verzuring. Deze verzuring leidt kennelijk tot een verminderde microbiële activiteit, waardoor minder stikstof nodig is voor eiwitsynthese (cel opbouw) bij micro-organismen. De netto stikstofmineralisatie is daarom hoger onder verzuurde omstandigheden dan onder niet-verzuurde omstandigheden. Omgekeerd geldt dat onder niet verzuurde omstandigheden de koolstofdecompositie hoog is, er een grote microbiële activiteit is, veel stikstof wordt vastgelegd in microbiële biomassa en de C/N verhouding laag is. Er treedt relatief een geringe netto N-mineralisatie op waardoor er relatief weinig voor plantengroei overblijft. Onder deze niet-verzuurde condities is er kennelijk een grote concurrentie om stikstof tussen micro-organismen en hogere planten in het voordeel van de eersten. Pas als het bodemleven minder actief of vitaal is, krijgen de planten een kans, wat zich uit in een mogelijke productieverhoging of eutrofiering door het verhoogde stikstofaanbod.

In semi-terrestrische systemen zien we een tegenovergestelde ontwikkeling: een daling van de Nmin/MinN verhouding bij een daling van het organisch stofgehalte. In niet verdroogde standplaatsen is accumulatie opgetreden (veenvorming) van slecht verteerd (mesic en fibric) organisch materiaal met een hoge C/N verhouding. Deze accumulatie is het gevolg van een weinig actief bodemleven door de extreem natte omstandigheden. Bij verdroging zal zuurstof het profiel binnendringen waardoor de bodemactiviteit toeneemt en er meer vraag naar stikstof ontstaat bij het bodemleven hetgeen zich uit in een daling van de C/N verhouding. Verdroging leidt dus tot een verschuiving van netto N-mineralisatie naar N-immobilisatie en een verminderde netto N-mineralisatie.

Verschuivingen in stikstofbalans door milieustress

Door verzuring van terrestrische systemen treedt er dus een verschuiving op van N-immobilisatie naar netto N-mineralisatie en door verdroging van semi-terrestrische systemen een verschuiving van netto N-mineralisatie naar N-immobilisatie. Het is belangrijk op te merken dat de door ons afgeleide mineralisatiesnelheden het karakter hebben van een constante ($mgN.gN^{-1}$). Het is daarom mede afhankelijk van de voorraad stikstof in de bodem of een standplaats met een hoge Nmin/MinN verhouding daadwerkelijk een hogere stikstofleverantie heeft dan een andere standplaats met een lage Nmin/MinN verhouding. Figuur 8 laat zien dat daardoor standplaatsen met een lage Nmin/MinN verhouding toch een hogere N-leverantie kunnen hebben dan standplaatsen met een hogere Nmin/MinN verhouding. Omgekeerd is ook duidelijk dat standplaatsen met een hoge Nmin/MinN verhouding toch een lage N-leverantie hebben als de stikstofvoorraad klein is.



Figuur 8. De verhouding tussen netto- en bruto stikstofmineralisatie (Nmin/MinN) in oplopende volgorde en de potentiële stikstofleverantie (mgN per 100 g grond per week, 20°C).

De door ons gesignaleerde verschuivingen in de stikstofbalans werden ook gevonden door Kooijman and Besse (2002) en Smit (2002) bij onderzoek in verzuurde en niet verzuurde bossen. De verschuiving van N-immobilisatie naar netto N-mineralisatie bij verzuring vindt mede plaats door een verschuiving van een bacterieel gedomineerd naar een schimmel gedomineerd microbieel bodemleven. Verhoeven et

al. (1990) vonden tot hun verrassing in zure hoogvenen hogere N-mineralisatie snelheden dan in basenrijke laagvenen. Zij schreven de hoge N-mineralisatie toe aan het ontbreken van N-immobilisatie door een lage microbiële activiteit.

Uit ons onderzoek blijkt dat de verhouding tussen netto- en bruto N-mineralisatie een goede indicator is voor de microbiële activiteit in de bodem en voor de mate waarin stikstof voor de vegetatie beschikbaar is dan wel door het microbiële bodemleven wordt vastgelegd.

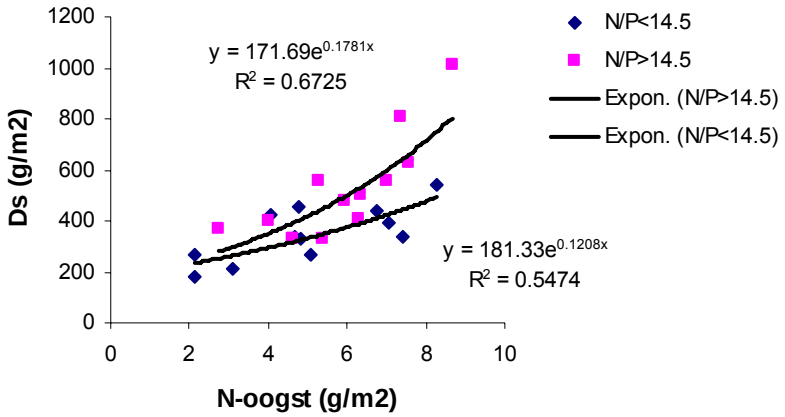
Nutriëntenbeperkingen en rol bodemleven: een hypothese

Op basis van onze bevindingen kunnen wij nu de hypothese formuleren dat milieustress (verzuring en/of verdroging) tot een verandering van de microbiële activiteit in de bodem leidt waardoor er verschuivingen optreden in de verhouding tussen netto stikstofmineralisatie en stikstofimmobilisatie. Deze verhouding komt tot uiting in de C/N verhouding van de organische stof, waarbij hoge C/N verhoudingen wijzen op een hoge netto stikstofmineralisatie, een weinig actief bodemleven en ruime beschikbaarheid van stikstof voor hogere planten. Dergelijke standplaatsen worden getypeerd door moder en mor humusvormen. Mor en (mor)moder humusvormen zouden daarbij typerend zijn voor standplaatsen die in principe niet door stikstof beperkt worden bij de droge stofproductie van de vegetatie (tenzij de stikstofvoorraad klein is). Mull en (mull)moder humusvormen worden getypeerd door een lage C/N verhouding een grote N-immobilisatie, een lage netto N-mineralisatie en een in principe stikstofbeperkte droge stofproductie, tenzij de stikstofvoorraad groot is.

4.4 Droge stofproductie en nutriëntenbeperking

Opvallend bij de resultaten (paragraaf 3.6.3) is dat de droge stofproductie vooral wordt bepaald door de C/N verhouding van de organische stof in combinatie met de kalium- en fosfaatvoorraad, ongeacht of de vegetatie door P of door N wordt beperkt. De resultaten suggereren dat bij labiele organische stof (hoge C/N verhouding) veel minerale N beschikbaar komt (hoge netto N-mineralisatie) en dat bij lage C/N en goede humificatie veel minder N-beschikbaar is. Dit stemt overeen met de bevinding dat bij een lage C/N verhouding een hoge N-immobilisatie plaatsvindt. Anderzijds is de relatie tussen C/N verhouding en N-oogst niet sterk. Dit suggereert dat een hoge netto mineralisatie nog niet automatisch tot een hogere N-opname (oogst) leidt. Het lijkt op basis van het afgeleide productiemodel evident dat de kalium- of fosfaatbeschikbaarheid daarbij een rol speelt.

Met onze dataset is de droge stofproductie ook redelijk voorspelbaar (r^2=62%) uit de jaarlijkse N-opname (i.e N-oogst). De N-oogst kan daarbij worden opgevat als parameter die de N-beschikbaarheid (via mineralisatie en depositie) aangeeft. Daarbij bleek er een interessant verschil tussen N (en K) en P beperkte standplaatsen (vgl. 6 en 7 paragraaf 3.6.4). Vergelijking 6 en 7 zijn in figuur 9 weergegeven.



Figuur 9 Relatie tussen stikstofbeschikbaarheid voor het gewas (N-oogst) en de droge stofproductie op N-beperkte (N/P<14,5) en P-beperkte (N/P>14,5) standplaatsen

Figuur 9 suggereert dat op P-beperkte standplaatsen minder stikstof wordt geproduceerd per eenheid droge stof dan op N-beperkte standplaatsen. Dit suggereert dat op P-beperkte standplaatsen met minder stikstof evenveel droge stof kan worden geproduceerd als op N-beperkte standplaatsen en dat op N-beperkte standplaatsen de N-efficiency (N/ds) groter is dan op P-beperkte standplaatsen.

Hoe kunnen we de betekenis van beperkende factoren voor de fysiologie van de plant nu begrijpen ? Stikstof wordt fysiologisch gebruikt voor eiwitsynthese, fosfaat is vooral nodig voor energiehuishouding (ATP-cyclus), kalium grijpt aan op transportprocessen bij membranen. Bij een grote N-efficiency wordt een hoog en bij een lage N-efficiency een laag eiwitgehalte geproduceerd. Bij een grote N-efficiency is het eiwitgehalte (N-gehalte) van de droge stof hoog en bij een lage N-efficiency laag. Eiwitsynthese is een hoog energetisch proces. Bij weinig P beschikbaarheid is dus de energie voorziening beperkt en kan weinig eiwit worden aangemaakt en is de N-efficiency dus laag. Indien geen P-limitatie aanwezig is (en dus N of K-limitatie) dan is er voldoende energie (P) beschikbaar om veel N per eenheid droge stof vast te leggen (eiwitrijk). Bij K-beperking zou membraantransport (bv. N- of P-opname) worden vertraagd waardoor minder droge stofproductie zou plaatsvinden.

Conclusie tot zover is dat op P-beperkte standplaatsen de droge stof sneller toeneemt bij toenemende N-beschikbaarheid dan op N-beperkte sites. De relatie tussen N-beschikbaarheid en productie is dus afhankelijk van de aard van de nutriëntimitatie.

5 Mogelijke consequenties voor kritische depositieniveaus

5.1 Inleiding

In het verleden zijn verschillende methoden ontwikkeld om kritische depositieniveaus van stikstof te berekenen. Hieronder wordt kort de essentie van enkele methoden aangegeven.

Simple Mass Balance (SMB)
De SMB-methode is ontwikkeld door De Vries (1994) en is gebaseerd op:

- kritische depositiegrenzen afgeleid uit uitspoelingcriteria en grondwaterbescherming: voor NO_3^- thans 100 molc/ha/jr aan onderzijde wortelzone
- steady state: ionenbalansen en evenwichtsvergelijkingen op de lange termijn;
- evaluatie voor diverse bostypen gedefinieerd naar boomsoort en korte vegetaties;
- combinaties van vegetatie-bodemeenheid en geohydrochemisch concepten die niet zijn gevalideerd voor de vegetatie.

Empirische methode
Deze methode is ontwikkeld door Bobbink et al. (1995,1996):

- kritische depositiegrenzen zijn gebaseerd op verschuivingen in vegetatie samenstelling;
- gerelateerd aan effecten op i) de nutriëntenhuishouding zoals verschuivingen in de nutriëntenbalans en spruit/wortel verhouding ii) de vegetatiesamenstelling (dominantie vergrassing, soortenrijkdom etc) of iii) ecosysteem (toename mineralisatie, uitspoeling N-accumulatie);
- specifieker dan SMB-methode.

SMART/MOVE
Dit is een modelketen die bestaat uit een bodemmodule SMART en een vegetatiemodule MOVE op basis van soortresponsies:

- SMART bestaat uit een combinatie van massabalansvergelijkingen die de invoer-/uitvoerrelaties van de bodem beschrijven en snelheids- en evenwichtsvergelijkingen; alle relevante macro-ionen worden in beschouwing genomen; eenvoudige beschrijving van alleen cruciale ecosysteemprocessen: i) input atmosfeer en grondwater, ii) kronendak interacties, iii) geochemie en iv) nutriëntencyclus; geen interactie tussen bodemvocht en plantopname van nutriënten uit bodemvocht
- in MOVE kans op soortvoorkomen voor N- en vochtbeschikbaarheid en pH (input uit SMART) via statistische relaties tussen soorten en Ellenberg-indicaties uit SYNBIOSYS (ca. 30.000 opnamen); de responsie is gebaseerd op een virtuele c.q. abstracte vegetatie namelijk een natuurdoeltype;

Tijdens de calibratiefase van MOVE worden gestelde beschermingsniveaus vertaald naar (2-zijdige) kritische grenzen in termen van Ellenberg-indicatiewaarden (bv. beschermingsniveau van 80% bij $4,8<N_E<6,9$; van 90% bij $5,2<N_E<6,7$; van 95% bij $5,4<N_E<6,5$.) Omdat meetgegevens over de bodemvruchtbaarheid ontbreken werd die afgeleid uit het N-indicatiegetal van de vegetatie in relatie tot de droge stofopbrengst (ds) van de vegetatie, zoals bepaald door Ertsen (1996) en - et al. (1998):

$$Ds = -7,617 + 3,04*N_E \quad (n=256, R^2=0,54) \qquad (8)$$

De N-opbrengst (of N-oogst) wordt beschouwd als functie van de droge stofproductie. Impliciete veronderstelling daarbij is dat de jaarlijkse N-opbrengst van het gewas gelijk is aan de jaarlijkse N-beschikbaarheid; alle N wordt dus opgenomen:
Graslanden inclusief cultuurgrasland:

$$\text{N-opbrengst} = 7,17*Ds^{1,58} \quad (n=225, r^2=0,94) \qquad (9)$$

Graslanden exclusief cultuurgraslanden:

$$\text{N-opbrengst} = 0,89 + 11,15*Ds \qquad (10)$$

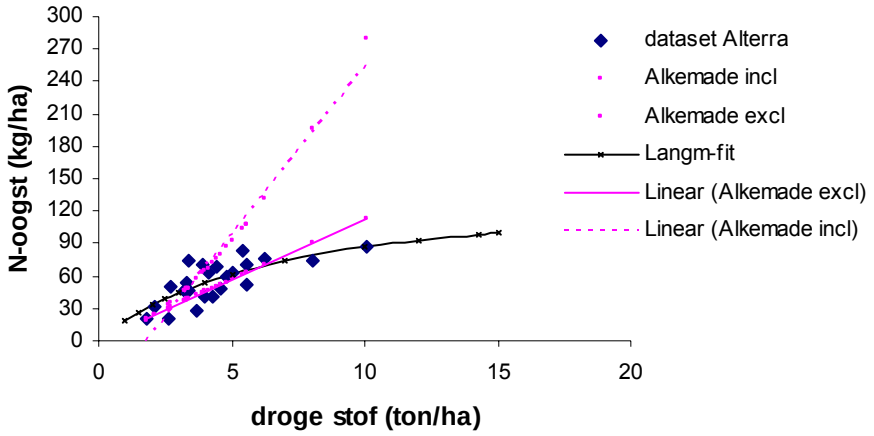
Waarbij N-opbrengst in $kgN.ha^{-1}.jr^{-1}$ en droge stofproductie (Ds) in $ton.ha^{-1}.jr^{-1}$.

Vergelijking (10) wordt in SMART/MOVE aangehouden bij normstellingscenario's voor kritische depositieniveaus. Daarbij wordt teruggerekend vanuit beoogde beschermingsniveaus en soortengarnituur naar kritische depositieniveau's. In SMART wordt daartoe de N-beschikbaarheid berekend als functie van bodemtype, Gt, vegetatietype en N-depositiedata (Van Hinsberg en Kros, 1999, 2001; Reinds in voorb).

5.2 Kritische stikstofdepositie in relatie tot nutriëntenlimitaties

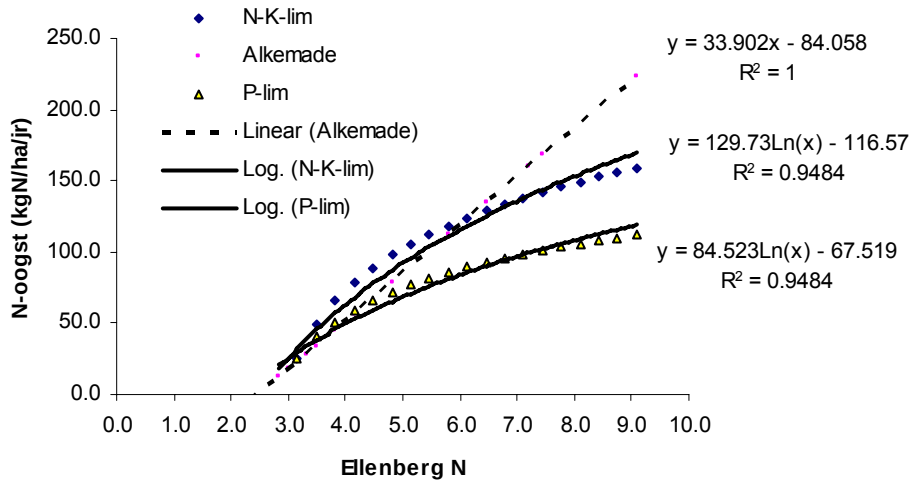
De relaties tussen N-opbrengst en droge stofproductie die momenteel in SMART/MOVE worden aangehouden om de depositieplafonds af te leiden (vgl. 8 t/m 10) zijn weergegeven in figuur 10. Daarnaast is de relatie aangeven die in ons onderzoek werd gevonden ongeacht de aard van de beperkende factor (zie ook vgl. 6 en 7 paragraaf 3.6.4). De Alterra dataset is in figuur 10 gefit aan een Langmuir-isotherm, waardoor een maximum voor de N-oogst kon worden berekend van ca. 93 kgN bij een droge stofopbrengst van 12 ton. Op hoofdlijnen stemmen de relaties goed overeen, maar de verschillen zijn gelegen aan de uitersten van het bereik. Onder een droge stofopbrengst van ca. 6 ton worden met de Alterra data iets hogere N-oogsten berekend en daarboven juist iets lagere dan volgens de methode Alkemade et al. (1996) excl. cultuurgraslanden. De range aan N-oogst volgens Alterra dataset varieert van 30-87 kgN/ha bij een droge stofopbrengst tussen 1,8 en 10 ton.

In MOVE wordt de relatie tussen droge stofopbrengst en het N-indicatiegetal (N_E) gebruikt als indicatie voor de bodemvruchtbaarheid (Ertsen 1996). De N-opbrengst (of N-oogst) wordt beschouwd als functie van de droge stofproductie, waardoor een verband kan worden gelegd tussen N-opbrengst en N_E.



Figuur 10 Relaties tussen droge stofopbrengst en N-oogst zoals gemeten in de verschillende studies.

Onze dataset (n=27) levert een slechte relatie (r^2<4%) tussen droge stofproductie en N_E op. Daarom hebben wij de relatie van Ertsen (1996) aangehouden om de N-oogst, die via regressie berekend wordt uit de droge stofproductie, te koppelen aan het N-indicatiegetal. Vervolgens hebben we de verschillende methoden waarmee de N-oogst wordt berekend uit de droge stofopbrengst vergeleken: i) de methode die thans in MOVE wordt gebruikt en gebaseerd is op gegevens van van Alkemade et al. (1996) excl. cultuurgraslanden en ii) de methode die in dit onderzoek is gebruikt en waarbij verschillende verbanden zijn gevonden tussen droge stof en N-opbrengst op N-beperkte en niet-N-beperkte standplaatsen. Figuur 11 geeft aan welke N-opbrengsten volgens de verschillende methoden bij een bepaald N-indicatiegetal worden berekend. Door deze verbanden zijn curves gefit.

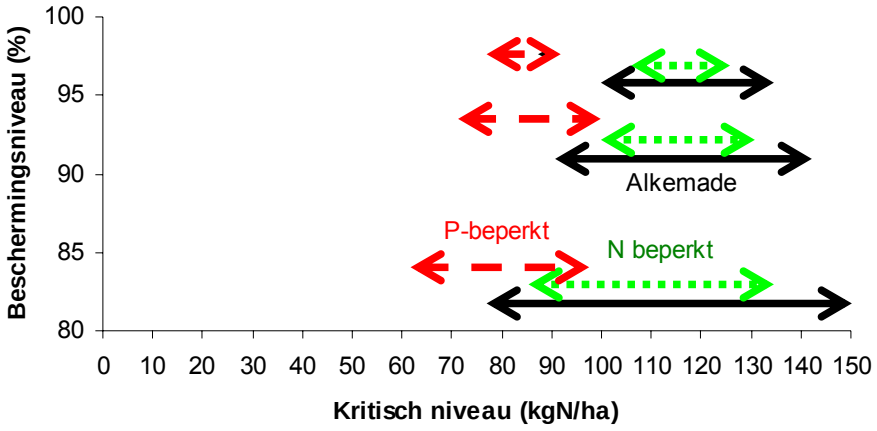


Figuur 11Verbanden tussen Ellenbergindicatiegetal en N-oogst afgeleid volgens de in MOVE gangbare methode en volgens de methode die in dit onderzoek werd ontwikkeld, waarbij onderscheid mogelijk is naar N- of P-beperkte standplaatsen.

Uit figuur 11 blijkt dat volgens de Alterra methode hoge N-indicatiewaarden gekoppeld zijn aan lagere niveaus van N-beschikbaarheid dan volgens de gangbare methode. Bovendien vlakt de relatie volgens de Alterra methode af. Dit laatste is natuurlijk gebaseerd is op de niet-lineaire relatie tussen droge stofproductie en N-opbrengst (zie Fig.9): er kan wel meer N beschikbaar komen maar de productie stijgt toch niet verder omdat er te weinig van iets anders is. Bovendien blijkt dat op P-beperkte standplaatsen eenzelfde N-beschikbaarheid (N-oogst) tot hogere indicatiegetallen leidt dan op N-beperkte standplaatsen. Andersom geredeneerd betekent dit dat op P-beperkte standplaatsen een vegetatie met een bepaalde N-indicatie een lagere N-beschikbaarheid acceptabel is dan op N-beperkte standplaatsen met eenzelfde gemiddelde N-indicatie. In tabel 14 zijn enkele willekeurige N-indicatiegetallen gekoppeld aan beschermingssniveaus. In figuur 12 is dat gevisualiseerd.

Tabel 14 Fictieve drempels van beschermingsniveaus voor plantensoorten binnen een doelgroep en daaraan gekoppelde fictieve kritische grenzen in termen van Ellenbergindicatiewaarden (N_E) en de daaruit afgeleide kritische niveaus voor stikstofbeschuikbaarheid (in kg/ha/jr) volgens de verschillende methoden indien geen onderscheid (Overall) en wel onderscheid wordt gemaakt naar groeibeperkende factor van de standplaats.

	Overall		P-limited		N-K limited	
drempels	N_E					
80%	4.8	6.9	4.8	6.9	4.8	6.9
90%	5.2	6.7	5.2	6.7	5.2	6.7
95%	5.4	6.5	5.4	6.5	5.4	6.5
Kritisch niveau N-beschikbarheid vlg Alkemade (N-besch kg/ha/jr)						
80%	79	150				
90%	92	143				
95%	99	136				
Kritisch niveau N-beschikbaarheid vlg Alterra (N-besch kg/ha/jr)						
80%	68	96	65	96	87	134
90%	74	94	72	93	97	130
95%	77	91	75	91	102	126



Figuur 12 Fictieve beschermingsniveaus van plantensoorten uit een doelgroep en daaraan gekoppelde kritische niveaus voor stikstofbeschikbaarheid zoals berekend volgens de verschillende methoden.

Interessant is dat de methode die thans in MOVE wordt gebruikt tot kritische niveaus leidt die in hetzelfde bereik liggen als volgens onze methode voor N-beperkte standplaatsen wordt berekend. Op P-beperkte standplaatsen dienen volgens onze methode echter kritischer N-niveaus te worden aangehouden dan op N-(K) beperkte standplaatsen. Dit lijkt vreemd, maar wordt begrijpelijk omdat op P-beperkte standplaatsen de N-efficiency kleiner is en minder stikstof nodig is om een zelfde productieniveau te bereiken dan op N-beperkte standplaatsen.

5.3 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat volgens de door ons ontwikkelde methode kritische niveaus voor stikstof te hoog zijn voor standplaatsen die niet door stikstof worden beperkt. Onze methode geeft duidelijke aanwijzingen dat op niet door stikstof beperkte standplaatsen aanzienlijk lagere depositieniveaus van stikstof nodig zijn om beschermingsniveaus te realiseren dan thans wordt verondersteld.

Literatuur

Alkemade, J.R.M., Wiertz, J., Latour J.B. 1996. Kalibratie van Ellenbergs milieu-indicatiegetallen aan werkelijk gemeten bodemfactoren. Bilthoven. Rapport RIVM 711901016.

Bloem, J., M. Starink, M.B. Bär-Gillissen and Th.E. Cappenberg. 1988. Protozoan grazing, bacterial activity, and mineralization in two-stage continuous cultures. Applied and Environmental Microbiology 54, 3113-3121.

Bloem, J., C. Albert, M.B. Bär-Gillissen, Th. Berman and Th.E. Cappenberg. 1989. Nutrient cycling through phytoplankton, bacteria and protozoa, in selectively filtered Lake Vechten water. Journal of Plankton Research 11, 119-131.

Bloem J., G. Lebbink, K.B. Zwart, L.A. Bouwman, S.L.G.E. Burgers, J.A. De Vos and P.C. De Ruiter. 1994 Dynamics of microorganisms, microbivores and nitrogen mineralisation in winter wheat fields under conventional and integrated management. Agriculture, Ecosystems and Environment. 51, 129-143.

Bobbink, R., M. Hornung and J.G.M. Roelofs. 1995. The effects of airborne nitrogen pollutants on vegetation- critical loads. WHO-Europe 1995. Updating and revision of the air quality guidelines for Europe. Copenhagen. Danmark.

Bobbink, R., M. Hornung en J.G.M. Roelofs. 1996. Empirical nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems. Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. UN ECE Convention On Long-range Transboundary Air pollution. Federal Environmental Agency. Berlin.

Buckman, O.H. and N.C.Brady. 1969. The Nature and Properties of Soils. Macmillan, Toronto, Canada.

Canali, S. and A. Benedetti. 2006. Soil nitrogen mineralization. In Microbiological Methods for Assessing Soil Quality. Eds.: J. Bloem, A. Benedetti and D. W. Hopkins. pp. 127-135. CABI, Wallingford, UK.

De Mars H., M.J. Wassen and W.H.M. Peeters. 1996. The effect of drainage and management on peat chemistry and nutrient deficiency in the former Jegrznia-flood plain (NE-poland). Vegetatio 126, 59-72.

De Ruiter J F, W.A.J. van Pul, J.A. van Jaarsveld, E. Buijsman. 2006. Zuur- en stikstofdepositie in Nederland in de periode 1981-2002. Bilthoven. Milieu en Natuur Planbureau Rapportnr. 500037005. 69 pp

De Vries, W. 1994. Soil respons to acid deposition at different regional scales. Proefschrift. Landbouwuniversiteit Wageningen.
De Vries W. and M. Posch. 2003. Critical levels and critical loads as a tool for air quality management. In: Hewitt and Jackson (Eds.) Handbook of atmospheric science; principles and applications. Blackwell. USA.

De Vries, Wim, Han Kros, Gert Jan Reinds, Wieger Wamelink, Janet Mol, Han van Dobben, Roland Bobbink, Bridget Emmett, Simon Smart, Chris Evans, Angela Schlutow, Phillipp Kraft, Salim Belyazid, Harald Sverdrup, Arjen van Hinsberg, Maximilian Posch, Jean-Paul Hettelingh. 2007. Developments in deriving critical limits and modeling critical loads of nitrogen for terrestrial ecosystems in Europe. Wageningen. Alterra. Alterra-rapport 1382.

Ellenberg H., H.E.Weber, R. Dull, V. Wirth, W. Werner and D. Pauliszen. 1991. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobot. 18, 1-248.

Ertsen, A.C.D. 1996. Kaliobratie van Ellenbergs milieu-indicatiegetallen in SMART/MOVE. Aanvullende kalibratie met gegevens uit het ITORS bestand. Vakgroep Milieukunde. Universiteit Utrecht.

Ertsen, A.C.D., J.R.M. Alkemade & M.J. Wassen. 1998. Calbrating Ellenberg indicator values for moisture, acidity, nutrient availability and salinity in the Netherlands. Plant Ecology 135, pp 113-124.

Feddes, R.A. 1971. Water, heat and crop growth. PhD dissertation. Agricultural University Wageningen. Veerman & Zn. NV. Wageningen.

Grootjans, A. P., P.C. Schipper and H.J. Van der Windt. 1986a. Influence of drainage on N-mineralization and vegetation response in wet meadows. I. Calthion palustris stands. Oecologia Plantarum 6 (4).

Grootjans, A. P., P.C. Schipper and H.J. Van der Windt. 1986b. Influence of drainage on N-mineralization and vegetation response in wet meadows. II. Cirsio-Molinietum stands. Oecologia Plantarum 6(4).

Güsewell, S. and W. Koerselman. 2002. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. Perspectives in Plant ecology, Evolution and Systematics 5(1): 37-61.

Keeney, D. R. and D. W. Nelson. 1982. Nitrogen - Inorganic forms. In Methods of soil Analysis, Part 2. Eds.: C. A. Black, D.D. Evans, J.L. White, L.E. Ensminger and F.E. Clark. Madison WI: Am Soc Agron, pp.682-687.

Kemmers, R.H., J.M.J. Gieske, P. Veen en L.M.L. Zonneveld. 1995. Standaard meetprotocol verdroging; voorlopige richtlijnen voor monitoring van anti-verdrogingsprojecten. Lelystad. RIZA. Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging. Rapport 15.1.

Kemmers, R.H., S.P.J. van Delft en P.C. Jansen. 2001. Productiviteit van korte vegetaties en beperkende factoren in relatie tot voedselrijkdom en vochttoestand van natuurterreinen; basisonderzoek voor ecologische nutrientenmodellen. Wageningen. Alterra-rapport 257.

Kemmers, R.H., R.W. de Waal, S.P.J. van Delft en P. Mekkink. 2002. Ecologische typering van bodems; actuele informatie over bodemkundige geschiktheid voor natuurontwikkeling. Landschap 19: 89-103.

Kemmers, R.H, S.P.J. Van Delft & P.C. Jansen. 2003. Iron and sulphate as possible key factors in the restoration ecology of rich fen in discharge areas. Wetlands Ecology and Management 11: 367-381.

Kemmers, R.H., J.Bloem, J.H. Faber en G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, 2007. Bodemkwaliteit en bodembiodiversiteit bij natuurontwikkeling op voormalige landbouwgronden. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 1523

Kemmers , R.H. & S.P.J. van Delft, subm. A pedological approach assessing nutrient availabilities and limitations for primary production in fen meadows. Plant and Soil.

Klinka, K., R.N. Green, R.L. Trowbridge and L.E. Lowe. 1981. Taxonomic Classification of humus forms in ecosystems of British Columbia. First approximation. Ministery of Forests. Vancouver. British Columbia.

Koerselman, W. and A.F.M. Meuleman. 1996. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology 33, 1441-1450.

Kooijman, A.M. and M. Besse. 2002. The higher availability of N and P in lime-poor than in lime-rich coastal dunes in the Netherlands. Journal of Ecology 90, 394-403.

Olde Venterink, H., M.J. Wassen, A.W.M. Verkroost and P.C. De Ruiter. 2003. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands. Ecology 84 (8), 2191-2199

Payne, R.W. and A.E. Ainsley et al. 2000. GenStat release 4.2 reference manual. Part1. VSN International Ltd. Oxford, UK.

Pegtel, D.M, J.P. Bakker, G.L. Verwey and L.F.M. Fresco. 1996. N, K and P deficiency in chronosequential cut summer-dry grasslands on gley podzol after the cessation of fertilizer application. Plant and Soil 178(1), 121-131.

Smit, A., A.M. Kooijman and J. Sevink. 2002. Impact of grazing on litter decomposition and nutrient availability in a grass-encroached Scots pine forest. Forest Ecology and Management 158, 117-126

Tietema, A., W. De Boer, L. Riemer and J.M. Verstraten.1992. Nitrate production in nitrogen saturated acid forest soils: vertical distribution and characteristics. Soil biology and Biochemistry 24, 235-240.

Van Delft, S.P.J., R.H. Kemmers & A.G. Jongmans. 2005. Pyrietvorming in relatie tot interne eutrofiëring en verzuring. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1161

Van Delft, Bas, Rein de Waal, Rolf Kemmers, Peter Mekkink & Jan Sevink. 2006. Field guide Humus Forms, Description and classification of humus forms for ecological applications. Wageningen. Alterra.

Van der Woude, B. J., D.M. Pegtel and J.P. Bakker. 1994 Nutrient limitation after long –term nitrogen fertilizer application in cut grasslands. Journal of Applied Ecology 31, 405-412.

Van Duren, I. C., D. Boeye and A.P. Grootjans. 1997. Nutrient limitations in an extant and drained poor fen: implications for restoration. Plant Ecology 133, 91-100.

Van Hinsberg, A. van en H. Kros. 1999. Een normstellingmethode voor (stikstof)depositie op natuurlijke vegetaties in Nederland; een uitwerking van de natuurplanner voor natuurdoeltypen. Bilthoven. RIVM. RIVM rapport 722108024.

Van Hinsberg and J. Kros. 2001. Dynamic modelling and the calculation of critical loads for biodiversity. Eds. M Posch, P A M De Smet, J P Hettelingh and R J Downing. pp 73-80. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Bilthoven. NL.

Van Riemsdijk, W. H., A.M.A. Van der Linden and L.J.M. Boumans. 1984. Phosphate sorption by soils: III. The P diffusion-precipitation model tested for three acid sandy soils. Soil Science Society of America Journal 48, 545-548.

Verhoeven, J.T.A., E. Maltby and M.B. Schmitz. 1990. Nitrogen and phosphorus mineralization in fens and bogs. Journal of Ecology 78, 713:726.

Wamelink, G.W.W., J.P. Mol-Dijkstra, H.F. van Dobben, J. Kros & F. Berendse. 2000. Eerste fase van de ontwikkeling van het successie model SUMO 1; verbetering van de vegetatiemodellering in de Natuurplanner. Wageningen Aterra-rapport 45.

Wamelink, G.W.W., Joosten, V., Van Dobben, H.F. F. Berendse. 2002. Validity of Ellenberg indicator values judged from physico-chemical field measurements. J. of Veg. Sc. 13: 269-278.

Wassen Martin J, Harry Olde Venterik, Elena D. Lapshina and Franziska Tanneberger. 2005. Endangered plants persist under phosphorus limitation. Nature Vol. 437, 547-530.

Bijlage 1 Standplaatseigenschappen

Nummer	Locatie	Standplaats	Vegetatie	Humusvorm		Horizon		Eff wz	Org. stof	pH-KCl	N-total	C/N	K-uitw	P_{ox}	$(Al+Fe)_{ox}$
figuur 1		code	type	type	code		Dikte (cm)	cm	$g.100g^{-1}$	-	$g.kg^{-1}$	$g.g^{-1}$	mmol/kg		
Dataset 1															
1	Veenkampen	Veenk C	Calthion			Ah	30	15.0	18.50	4.9	6.26	14.8	0.6	18.6	258.4
2	Loefvledder	LV nieuw	Nardo-Galion saxatilis			Oah	5	17.0	19.1	4.17	4	23.9	0.97	27.7	249.6
							25		7.2	4.21	1	36.0	0.97	3.8	101.5
3	Baronie Cranendo	Cra 40	Koelerio-Corynephoretea			Ap	30	13.0	3.41	3.97	1.244	13.7	0.58	10.46	54.3
4	Reestdal	RDB	Calthion			Mm	4	11.0	88.74	3.9	31.9	13.9	0.99	3.09	118.1
						Oh	26		82.91	3.8	25.3	16.4	12.23	60.12	102.7
5	De Barten	Br2	Caricion nigrae	beekeerdmoder	DEf	Mm	8	10	76.7	4.89	20.3	18.9	14.13	32.3	699.8
			frame community			Oh	22		61.6	5.07	10.6	29.1	0.73	6.7	427.8
6	Loefvledder	LV oud	Nardo-Galion saxatilis			Oh	5	25.0	38	3.1	11	17.3	3.02	10.8	217.0
							25		40	3.14	8	25.0	3.02	4.2	216.6
7	Baronie Cranendo	Cra 19A	Koelerio-Corynephoretea			Ap	30	6.0	1.64	4.13	0.844	9.7	0.44	7.52	31.6
8	Reestdal	RDV	Calthion			Mm	3	46.0	71.07	3.7	20.9	17.0	17.27	21.06	86.2
						zOh	7		46.87	4.0	18.1	12.9	3.91	30.96	209.0
						zOfr	20		90.91	4.3	29.7	15.3	0.80	3.75	48.1
9	Meeuwenkampje	MK03	Magnocaricion			Of	30	45.0	83.35	4.7	25.92	16.1	15.8	9.15	302.7
10	Stobberibben	StB	Caricetalia nigrae	rauwveenmosmor	RVp	pOf	5	10	95.3	2.85	8.6	55.7	18.43	4.2	24.7
			frame community			sOf	25		95.6	3.10	5.9	80.4	8.82	3.3	21.6
11		StA	Scorpidio Car. diandrae	veenmesimor	RMn	hOMf	11	11	88.4	5.74	12.8	34.6	18.16	4.0	32.9
						OMg	19		91.9	5.94	15.9	29.0	4.87	1.7	41.6
12	Groot Zandbrink	G212	Molinion	hydromoder	DH	Mm	4	11	79.2	3.21	15.9	24.9	19.3	6.6	92.1
			frame community			OMh	2		59.7	3.21	12.9	23.1	9.17	5.3	145.7
						Ah	4		18.2	3.38	3.9	23.5	2.86	2.6	57.9
						AC	20		1.9	3.71	0.6	15.4	0.4	0.5	19.1
13	Meeuwenkampje	MK02	Caricion nigrae			OA	30	12.0	30.24	3.9	11.74	12.9	3.9	4.27	201.1
14	Groot Zandbrink	G133	Cirsio dissecti	hydromull	fLH	Ah	9	10.0	9.33	4.61	2.39	19.5	0.95	1.07	20.0
			Molinietum typ.			AC	21		0.57	5.15	0.19	15.0	0.41	0.28	3.5
15	Baronie Cranendo	Cra ref	Ericion romp			Mh	5	20.0	33.5	3.25	9.1	18.4	3.7	7.05	80.2
						Ah	25		3.3	3.82	1.6	10.3	1.2	1.36	14.5
16	Groot Zandbrink	Zb ref	Ericetum tetralicis			Mh	4	10.0	42.2	3.02	20.6	10.2	0.1	2.23	130.3
						Ah	26		43	3.04	4.8	44.8	0.05	2.25	132.8

Nummer figuur 1	Locatie	Standplaats code	Vegetatie type	Humusvorm type	Humusvorm code	Horizon	Horizon Dikte (cm)	Eff wz cm	Org. stof $g.100g^{-1}$	pH-KCl -	N-total $g.kg^{-1}$	C/N $g.g^{-1}$	K-uitw	P_{ox}	$(Al+Fe)_{ox}$
Dataset 2													mmol/kg		
17	Lemselermaten	LM6	Cirsio dissecti-	vaageerdmoder	DEv	OMh	8	15	49.3	5.55	9.0	27.5	13.35	6.1	174.0
			Molinietum			Oh	7		33.0	5.81	7.2	22.8	2.74	8.0	136.8
						AC	15		3.1	5.66	0.8	18.3	0.83	0.7	21.8
18	Groot Zandbrink	G133b	Cirsio dissecti-	hydromull	fLH	Ah	11	10	9.3	4.61	2.4	19.5	0.95	1.1	28.5
			Molinietum			AC	19		0.6	5.15	0.2	15.0	0.41	0.3	5.5
19	Lemselermaten	LM3	Lolio-potentillion	hydromoder	DH	AMh	3	10	24.9	6.38	5.0	25.1	6.36	4.3	51.5
			frame community			Ah	8		16.4	6.26	3.8	21.3	2.05	1.8	43.3
						AC	19		3.1	5.66	0.8	18.3	0.83	0.7	21.8
20	Korenburgerveen	KvD	Cirsio dissecti-	moereerdmoder	DEo	OA	13	10	29.5	4.31	8.3	17.7	1.45	6.5	152.7
			Molinietum			Oh	17		81.4	4.52	15.6	26.0	8.44	11.7	249.6
21	Oetert	Oet B24	Angelico-Cirsietum	beekeerdmoder	DEf	Oh	30	40	41.0	5.60	6.3	32.6	10.3	9.1	1829.1
			oleracei												
22	Korenburgerveen	KvA	Molinion	moereerdmoder	DEo	Om	7	25	89.1	3.15	12.5	35.6	8.02	4.0	127.9
			frame community			OA	9		20.2	3.41	4.4	22.7	1.43	5.7	78.0
						Oh	14		62.6	3.55	14.8	21.2	5.96	8.6	129.7
23	Groot Zandbrink	G222	Molinion	hydromoder	DH	Of	3	20	37.0	3.55	5.0	36.9	6.04	3.1	62.1
			frame community			Mm	3		12.6	3.73	3.2	19.6	1.96	1.6	35.0
						AMh	5		4.6	3.78	1.7	13.5	0.67	0.9	24.7
						AC	19		1.7	3.87	0.7	12.7	0.43	0.4	14.3
24	Groot Zandbrink	G109	Cirsio dissecti-	hydromull	LH	Ah	10	14	9.5	4.61	2.9	16.2	1.3	1.5	45.1
			Molinietum			AC	20		0.8	5.03	0.2	17.0	0.59	0.4	10.3
25	Ulekryte	UK3	Cirsio dissecti-	beekeerdmoder	Def	OMm	5	20	71.9	4.77	8.9	40.2	6.97	10.5	324.9
			Molinietum			Oh	15		51.4	4.73	16.4	15.7	3.55	17.0	332.2
						Og	10		71.5	4.97	5.4	66.2	1.63	5.8	315.0
26	De Barten	Br5	Eriophoro-Caricetum	beekeerdmoder	DEf	Mm	8	15	73.9	4.98	7.0	52.7	12.74	86.2	853.0
			lasiocarpae			Oh	22		53.3	5.33	15.9	16.8	1.27	215.1	1182.9
27	Wyldlanden	WLA3	Molinion	moereerdmoder	DEo	Mm	6	15	52.4	4.46	14.5	18.1	8.79	17.9	276.7
			frame community			OA	9		36.2	4.24	10.4	17.4	5.57	11.0	251.4
						Oh	15		86.1	4.67	9.1	47.2	1.5	1.8	218.3

Bijlage 2 Mineralisatie

Volg nummer	Standplaats code	Humusvorm code	berekende N-min/seizoen (g/m2) diepte (cm) 10 Nmin1	20 Nmin2	30 Nmin3	eff wortel Nminef	N-depositie gN/m2 Ndep	Nmineff+Ndep N-mineffdep	mgN/wk 20°C Constante NC1	mgN/m2 seizoen diepte 10 20°C NC2	temp variabel NC3
1	Veenk C	fLHf	1.91	3.82	5.74	2.87	3.74	6.61	1.23	9.96	3.80
2	LV nieuw	DEf	0.73	0.95	1.17	0.89	2.84	3.73	3.26	16.57	10.07
3	Cra 40	LDXh	0.27	0.53	0.8	0.35	4.12	4.47	4.42	13.81	13.65
4	RDB	sRMe	1.07	2.09	3.1	1.18	3.27	4.45	0.01	0.05	0.03
5	Br2	sDEf	0.78	1.23	1.69	0.78	3.12	3.90	1.07	5.66	3.30
6	LV oud	sDEf	0.37	0.69	1.01	0.85	2.84	3.69	1.12	9.55	3.46
7	Cra 19A	LZs	0.19	0.39	0.58	0.12	4.12	4.24	2.6	6.67	8.03
8	RDV	yRMf	0.79	1.82	2.86	4.52	3.27	7.79	1.14	11.34	3.52
9	MK03	sDEf	1.03	2.07	3.1	4.65	4.80	9.45	1.54	8.38	4.76
10	StB	RVp	0.22	0.4	0.58	0.76	2.91	3.67	0.05	0.04	0.15
11	StA	RMp	0.47	1.01	1.55	0.9	2.91	3.81	2.87	6.13	8.86
12	G212	DHs	2.029	2.044	2.058	2.03	4.57	6.60	0.95	5.05	2.93
13	MK02	RMf	0.44	0.89	0.89	0.53	4.80	5.33	2.27	25.04	7.01
14	G133	LDHw	0.49	0.55	0.6	0.49	4.57	5.06	0.97	3.80	3.00
15	Cra ref	LDXh	2.73	3.07	3.41	3.07	4.12	7.19	5.42	32.36	16.74
16	Zb ref	LDXh	0.45	0.64	0.83	0.45	4.57	5.02	0.55	4.26	1.70
17	LM6	DEv	1.92	2.91	3.90	2.67	4.14	6.81			
18	G133b	LH	2.96	3.24	3.52	2.96	4.57	7.53			
19	LM3	DH	7.33	8.31	9.30	7.33	4.14	11.47			
20	KvD	DEo	1.71	5.18	8.65	1.71	4.02	5.73			
21	Oet B24	DEf	1.36	2.72	4.09	5.45	5.36	10.81			
22	KvA	DEo	2.00	5.48	11.05	5.67	4.02	9.69			
23	G222	DH	2.42	3.26	4.10	3.37	4.57	7.94			
24	G109	LH	3.64	3.96	4.28	3.77	4.57	8.34			
25	UK3	DEf	2.91	4.17	5.44	6.64	2.70	9.34			
26	Br5	DEf	2.03	5.66	9.29	3.85	3.12	6.97			
27	WLA3	DEo	2.86	4.77	6.67	3.96	2.78	6.74			

Bijlage 3 Gehalten

Volg nummer	Standplaats code	Humusvorm code	Fosfaatverzadigingsindex α			Evenwichtsconcentratie P in bodemvocht Cp			Gehalten						Verhouding C/N
											$CaCl_2$ extractable elements				
			10	20	30	10	20	30	org.stof	Ntot	N-NO3+N-NO2	N-NH4	P	K	
				mol/mol			mg/l		%	(g/kg)		(mg/kg)			
			a1	a2	a3	P1	P2	P3	Os	Ntot	NO3	NH4	Pca	Kca	
1	Veenk C	fLHf	0.072	0.072	0.072	0.225	0.225	0.225	18.5	6.26	3.50	4.80	0.27	32.50	14.7
2	LV nieuw	DEf	0.056	0.037	0.034	0.165	0.105	0.095	22.0	5.82	2.96	9.41	0.32	37.94	18.9
3	Cra 40	LDXh	0.193	0.193	0.193	0.986	0.986	0.986	4.7	1.22	1.50	4.90	3.73	22.80	19.3
4	RDB	sRMe	0.181	0.237	0.255	0.870	1.575	1.948	85.4	27.22	17.60	32.10	0.39	169.70	15.7
5	Br2	sDEf	0.020	0.014	0.012	0.054	0.037	0.031	87.3	5.38	2.15	27.48	0.44	65.69	
6	LV oud	sDEf	0.025	0.017	0.015	0.067	0.046	0.039	58.3	28.16	1.88	10.18	0.62	118.09	10.4
7	Cra 19A	LZs	0.238	0.238	0.238	1.599	1.599	1.599	3.3	1.56	0.60	2.60	3.94	17.10	10.6
8	RDV	yRMf	0.059	0.043	0.037	0.177	0.121	0.104	72.8	18.47	5.20	34.20	0.42	273.70	19.7
9	MK03	sDEf	0.030	0.030	0.030	0.083	0.083	0.083	88.8	8.80	1.70	67.60	5.25	389.90	50.5
10	StB	RVp	0.081	0.079	0.078	0.259	0.251	0.248	98.8	14.85	1.89	15.15	20.84	355.55	33.3
11	StA	RMp	0.061	0.041	0.034	0.184	0.117	0.096	90.8	14.27	20.44	28.34	24.74	228.47	31.8
12	G212	DHs	0.013	0.012	0.012	0.035	0.032	0.032	69.0	14.71	0.74	10.69	0.62	53.91	23.4
13	MK02	RMf	0.021	0.021	0.021	0.057	0.057	0.057	28.5	8.07	8.64	11.97	0.25	27.68	17.7
14	G133	LDHw	0.020	0.020	0.020	0.052	0.052	0.052	7.2	2.29	0.77	9.52	0.39	30.53	15.6
15	Cra ref	LDXh	0.088	0.088	0.088	0.290	0.290	0.290	33.5	9.15	2.00	3.10	1.59	22.70	18.3
16	Zb ref	LDXh	0.008	0.008	0.008	0.022	0.022	0.022	43.0	4.83	0.53	2.08	0.18	17.66	44.5
17	LM6	DEv	0.043	0.043	0.043	0.135	0.135	0.135	46.0	8.62					26.7
18	G133b	LH	0.044	0.044	0.044	0.107	0.107	0.107	9.3	2.39					19.5
19	LM3	DH	0.053	0.053	0.053	0.162	0.162	0.162	18.9	4.18					22.6
20	KvD	DEo	0.045	0.045	0.045	0.120	0.120	0.120	29.5	8.33					17.7
21	Oet B24	DEf	0.005	0.005	0.005	0.013	0.013	0.013	41.0	6.29					32.6
22	KvA	DEo	0.057	0.057	0.057	0.195	0.195	0.195	68.4	10.09					33.9
23	G222	DH	0.039	0.039	0.039	0.098	0.098	0.098	16.7	3.15					26.6
24	G109	LH	0.034	0.034	0.034	0.091	0.091	0.091	9.5	2.93					16.2
25	UK3	DEf	0.034	0.034	0.034	0.134	0.134	0.134	61.6	12.67					24.3
26	Br5	DEf	0.142	0.142	0.142	0.597	0.597	0.597	69.8	8.78					39.7
27	WLA3	DEo	0.039	0.039	0.039	0.155	0.155	0.155	45.9	12.85					17.9

Bijlage 4 Voorraden

Volg nummer	Standplaats code	Humusvorm code	Capaciteitsparameters								
			N-voorraad (g/m2)			K-voorraad (g/m2)			Pox voorraad (g/m2)		
			10	20	30	10	20	30	10	20	30
			Nv1	Nv2	Nv3	Kv1	Kv2	Kv3	Pv1	Pv2	Pv3
1	Veenk C	fLHf	370.6	741.2	1111.8	1.4	2.8	4.2	34.1	68.2	102.3
2	LV nieuw	DEf	232.6	322.9	359.0	2.2	5.6	7.0	49.9	60.7	65.0
3	Cra 40	LDXh	143.0	285.9	428.9	2.6	5.2	7.8	37.2	74.5	111.7
4	RDB	sRMe	244.4	491.4	738.4	2.9	7.6	12.3	11.2	29.4	47.6
5	Br2	sDEf	242.1	449.1	656.1	5.6	6.1	6.7	10.7	14.8	18.8
6	LV oud	sDEf	390.3	660.6	931.0	4.2	8.2	12.2	11.9	16.2	20.6
7	Cra 19A	LZs	117.3	234.7	293.4	2.4	4.8	6.0	32.4	64.8	81.0
8	RDV	yRMf	455.1	655.2	855.3	6.1	6.3	6.5	22.1	22.9	23.6
9	MK03	sDEf	248.9	497.8	746.6	5.9	11.9	17.8	2.7	5.4	8.2
10	StB	RVp	37.4	67.7	98.0	2.7	4.5	6.3	0.6	1.1	1.6
11	StA	RMp	97.7	198.8	300.0	5.4	6.7	7.9	0.9	1.3	1.6
12	G212	DHs	243.4	260.7	260.7	7.6	8.1	8.1	4.0	4.4	4.4
13	MK02	RMf	504.8	1009.6	1514.3	6.6	13.1	19.7	5.7	11.4	17.1
14	G133	LDHw	179.0	195.0	195.0	3.0	3.0	3.0	2.7	2.6	2.6
15	Cra ref	LDXh	273.1	458.7	514.4	5.6	11.0	12.7	6.8	11.6	13.1
16	Zb ref	LDXh	354.4	429.7	429.7	0.1	0.1	0.1	2.2	3.3	3.3
17	LM6	DEv	251.1	350.6	450.0	12.1	15.9	19.8	6.0	8.7	11.4
18	G133b	LH	195.4	228.4	261.5	3.0	5.8	8.6	2.7	4.2	5.7
19	LM3	DH	243.6	343.0	442.3	7.2	11.1	14.9	4.4	7.0	9.7
20	KvD	DEo	364.5	527.0	689.4	2.5	5.9	9.3	8.8	12.5	16.3
21	Oet B24	DEf	207.4	414.9	414.9	13.3	26.6	26.6			
22	KvA	DEo	140.0	421.5	703.1	2.6	7.0	11.4	3.6	8.7	13.8
23	G222	DH	195.5	287.8	388.8	5.3	7.6	10.0	3.2	4.8	6.5
24	G109	LH	237.6	274.7	311.7	4.1	7.9	11.7	3.7	5.5	7.3
25	UK3	DEf	274.2	353.2	432.1	3.7	4.7	5.6	9.1	9.1	9.1
26	Br5	DEf	153.4	539.3	925.2	5.7	6.9	8.1	61.4	223.6	385.7
27	WLA3	DEo	370.6	448.2	525.8	8.4	8.9	9.4	13.3	13.8	14.3

Bijlage 5 Gewaseigenschappen

Volg nummer	Standplaats code	Humusvorm code	oogsten				nutrientratio's			N-Indicatie Ellenberg	Ny/Naanbod
			N-Oogst	P-oogst	K-oogst	ds	N/P	N/K	K/P	N_E	
					g/m2						
1	Veenk C	fLHf	3.10	0.40	0.17	212.0	7.7	17.7	0.4		0.73
2	LV nieuw	DEf	5.08	1.21	1.05	269.0	4.2	4.9	0.9	4.10	2.78
3	Cra 40	LDXh	7.40	1.08	1.45	336.4	6.9	5.1	1.3	3.86	4.57
4	RDB	sRMe	7.03	1.09	1.52	390.8	6.4	4.6	1.4	3.00	3.23
5	Br2	sDEf	4.80	0.70	1.39	333.2	6.9	3.5	2.0	3.10	2.86
6	LV oud	sDEf	4.69	0.47	1.05	335.0	10.0	4.5	2.2	3.50	2.62
7	Cra 19A	LZs	2.13	0.32	0.87	177.2	6.7	2.4	2.7	3.45	1.53
8	RDV	yRMf	8.26	0.92	3.89	539.7	9.0	2.1	4.2	2.85	1.50
9	MK03	sDEf	8.67	0.49	2.54	1010.0	17.7	3.4	5.2	5.00	1.42
10	StB	RVp	7.34	0.38	3.86	807.0	19.3	1.9	10.2	3.20	4.37
11	StA	RMp	6.98	0.33	4.21	553.7	21.2	1.7	12.8	3.70	3.84
12	G212	DHs	6.36	0.30	3.29	501.0	21.2	1.9	11.0	4.00	1.84
13	MK02	RMf	6.27	0.23	1.37	410.0	27.3	4.6	6.0	2.10	3.14
14	G133	LDHw	4.60	0.15	3.34	326.2	30.7	1.4	22.3	2.80	2.41
15	Cra ref	LDXh					heide				
16	Zb ref	LDXh					heide				
17	LM6	DEv	5.26	0.36	4.68	553.6	14.6	1.1	13.0	3.32	1.38
18	G133b	LH	4.05	0.28	3.34	426.8	14.5	1.2	11.9	2.80	0.92
19	LM3	DH	4.79	0.36	3.80	456.0	13.3	1.3	10.6	4.00	0.57
20	KvD	DEo	2.12	0.28	0.82	265.5	7.6	2.6	2.9	3.10	0.73
21	Oet B24	DEf	6.77	0.51	1.08	441.5	13.3	6.3	2.1		1.01
22	KvA	DEo	2.72	0.13	1.12	372.0	20.9	2.4	8.6	2.67	0.40
23	G222	DH	5.96	0.32	2.79	480.9	18.6	2.1	8.7	2.40	1.24
24	G109	LH	4.60	0.15	2.55	326.2	30.7	1.8	17.0	2.73	0.89
25	UK3	DEf	4.03	0.21	2.65	399.4	19.2	1.5	12.6	3.10	0.54
26	Br5	DEf	7.58	0.28	4.54	626.4	27.1	1.7	16.2	4.43	1.60
27	WLA3	DEo	5.37	0.30	4.41	331.6	17.9	1.2	14.7	2.88	1.12

Bijlage 6 Resultaten enkelvoudige regressieanalyse

Monster name	Parameter	Dikte	Predictor	Dataset 1i	Dataset 2
				R^2	
Conform humusprofiel	Voorraad	0-10 cm	Nv1	exc	exc
		0-20 cm	Nv2	exc	26.5
		0-30 cm	Nv3	exc	exc
		0-10 cm	Kv1	29.8	16.9
		0-20 cm	Kv2	18.5	exc
		0-30 cm	Kv3	12	exc
		0-10 cm	Pv1	49.6	exc
		0-20 cm	Pv2	45.6	5.97
		0-30 cm	Pv3	41	9.11
	PSI	0-10 cm	a1	0.6	exc
		0-20 cm	a2	exc	exc
		0-30 cm	a3	exc	exc
	Ortho-P bodemvocht	0-10 cm	P1	3.2	exc
		0-20 cm	P2	1	exc
		0-30 cm	P3	0.4	exc
	Bruto mineralisatie	0-10 cm	MinN1	1.4	exc
		0-20 cm	MinN2	0.1	exc
		0-30 cm	MinN3	exc	exc
	Netto mineralisatie	0-10 cm	Nmin1	exc	exc
		0-20 cm	Nmin2	exc	exc
		0-30 cm	Nmin3	exc	exc
		Wortelzone	Nminef	22.3	exc
	Depositie		Ndep	exc	exc
	Min + dep	Wortelzone	Mindep	5.2	exc
	C/N	0-10 cm	C/N	-	45.5

Monster name	Parameter	Dikte	Predictor	Dataset 1ii	Dataset 2
				R^2	
Standaardmonsterdiepte	Bodemeigenschap	0-10 cm	pH-KCl	exc	5.72
		0-10 cm	Os	exc	exc
		0-10 cm	Ntot	19	exc
		0-10 cm	CN	73	-
	Beschikbaarheid	0-10 cm	NO3	exc	-
		0-10 cm	NH4	57	-
		0-10 cm	Pca	15.5	-
		0-10 cm	Kca	65	-
	N-min. constante	0-10 cm	NC1	exc	exc
	Potentiele N-min.	0-10 cm	NC2	2.5	exc
	Actuele N-min	0-10 cm	NC3	exc	exc
Gewasparameters					
					dataset 3
	Gewaseigenschap		Noogst	53,3	
			P-oogst	exc	
			K-oogst	42,8	
			NP	20,7	
			NK	8,5	
			K/P	19,3	
			Nindic	3,8	