

Ecologische typering van bodems

Actuele informatie over bodemkundige geschiktheid voor natuurontwikkeling

Bodemkaarten vormen een belangrijke bron van kennis om abiotische kansrijkdom voor natuurontwikkeling te beoordelen. Een probleem daarbij is dat het Nederlandse Bodemclassificatiesysteem niet is toegesneden op ecologisch relevante informatie over de vocht-, nutriënten- en zuurhuishouding. Juist deze dynamische processen sturen vaak de voor natuurontwikkeling belangrijke abiotische randvoorwaarden. Kennis daarvan is essentieel, mede omdat vergoedingen voor natuurbeheer steeds vaker gekoppeld worden aan gerealiseerde doelen. Daarom is een raamwerk ontwikkeld voor een ecologische bodemtypologie.

De laatste jaren is een behoefte gegroeid aan bodemkundige informatie die toepasbaar is bij onderzoek naar de ontwikkelingsmogelijkheden van de natuur (Gleichman *et al.*, 1991; Kemmers, 1996). Het overgrote deel van de bodeminformatie is in het verleden echter verzameld voor landbouwkundige doeleinden. De wetenschappelijke belangstelling van de bodemkundige was daarbij vooral gericht op zeer langzame bodemvormingsprocessen. Dit leidde tot de ontwikkeling van een classificatiesysteem dat op vrijwel onveranderlijke factoren is gebaseerd (De Bakker & Schelling, 1989). Men ging er vanuit dat eigenschappen zoals de voedings-, vocht- en zuurtoestand, in de landbouwkundige praktijk te manipuleren zijn en dus minder interessant waren. Juist deze factoren blijken echter van doorslaggevend belang voor natuurlijke en halfnatuurlijke ecosystemen.

In het recente verleden zijn pogingen gedaan om de bestaande bodeminformatie door enkele aanvullingen en een ecologische interpretatie geschikter te maken voor ecologische en milieukundige toepassingen (De Waal, 1992; Klijn & De Waal, 1992). Het belangrijkste probleem met de traditionele bodemkaart is echter dat de legenda is gebaseerd op morfometrische criteria in relatie tot grondsoort en lange termijn-bodemprocessen. Het gevolg hiervan is dat bij de beoordeling van de bodem voor

ecologische kansrijkdom niet alleen een interpretatie van de traditionele bodemfactoren noodzakelijk is, maar ook dat actuele informatie over bodemkundige veranderingen door korte termijnprocessen (verzuring, vermisting, verdroging) ontbreekt. Bij een ecologische interpretatie van bodemkaarten is daardoor het risico aanwezig dat er een bodemtoestand wordt vastgesteld die ecologisch gezien fossiel is. Klijn en De Waal (1992) concluderen echter dat het streven naar een geheel nieuwe ecologische bodemclassificatie niet realistisch is. In zekere zin is deze conclusie nog steeds juist. Ervaringen met projecten als 'Boscosystemen' (Stortelder *et al.*, 1998; Wolf *et al.*, 2001), Overlevingsplan Bos en Natuur (Van Delft, 1995a, De Waal *et al.*, 1999), Bosreservaten (o.a. Mekking, 1997) en 'De Wildenborg' (Jansen *et al.*, 1994) tonen echter aan dat nieuw verzamelde informatie over het meest dynamische deel van de bodem, het humusprofiel, tot andere inzichten kan leiden dan wanneer die wordt herleid uit bestaande traditionele bodeminformatie.

In de praktijk betekent dit niet dat het oude bodemclassificatiesysteem onbruikbaar wordt. De klassieke indeling en de daaraan gekoppelde informatie beschrijft immers de onafhankelijke, standplaatsbepalende bodemfactoren. Wij hebben er daarom voor gekozen om de bestaande bodeminformatie aan te vullen met nieuw verza-

**ROLF KEMMERS, REIN
DE WAAL, BAS VAN
DELFT EN PETER
MEKKINK**

Drs. R.H. Kemmers, drs. R.W. de Waal, ir. S.P.J. van Delft en P. Mekking. Alterra, afdeling Bodem & Landgebruik, Postbus 47, 6700 AA Wageningen. r.h.kemmers@alterra.wag-ur.nl

Tabel 1 Overzicht van codes voor de belangrijkste horizonten in humusprofielen met toevoegingen

Table 1 Letter codes are distinguishing the main horizons of the humusform.

Code	Toevoeging	Omschrijving
L	-	versgevalen bladstrooisel
F	-	gedeeltelijk verteerd strooisel
	m	idem door schimmelactiviteit
	z	idem door dierlijke activiteit
	a	idem door schimmel en dierlijke activiteit
H	-	volledig gehumificeerd organisch materiaal
	r	idem met enigszins herkenbare plantaardige residuen
	h	idem zonder macroscopische residuen
	w	idem met veel herkenbare houtresten
Ah	-	gehumificeerd organisch materiaal dat door dierlijke activiteit (bioturbatie) vermengd is met de minerale ondergrond
	e	idem met uitlogingskenmerken (micropodzol)
	g	idem met gleyverschijnselen
E	-	Ontijzerde en uitgeloopte horizont
B	-	Horizont met ijzer- en humusinspoeling
O(A)	-	veen (moerige laag)
	f	onverweerd veen
	m	verweerd veen
	h	eutroof veraard veen
	g	anaeroob veraard, mesotroof (gyttja)
	d	aeroob oligotroof veraard (gliede)
M	-	wortelmateriaal
	f	matten van onverteerde dode wortelresten
	m	gedeeltelijk verteerde wortelresten
	h	sterk verteerde wortelresten

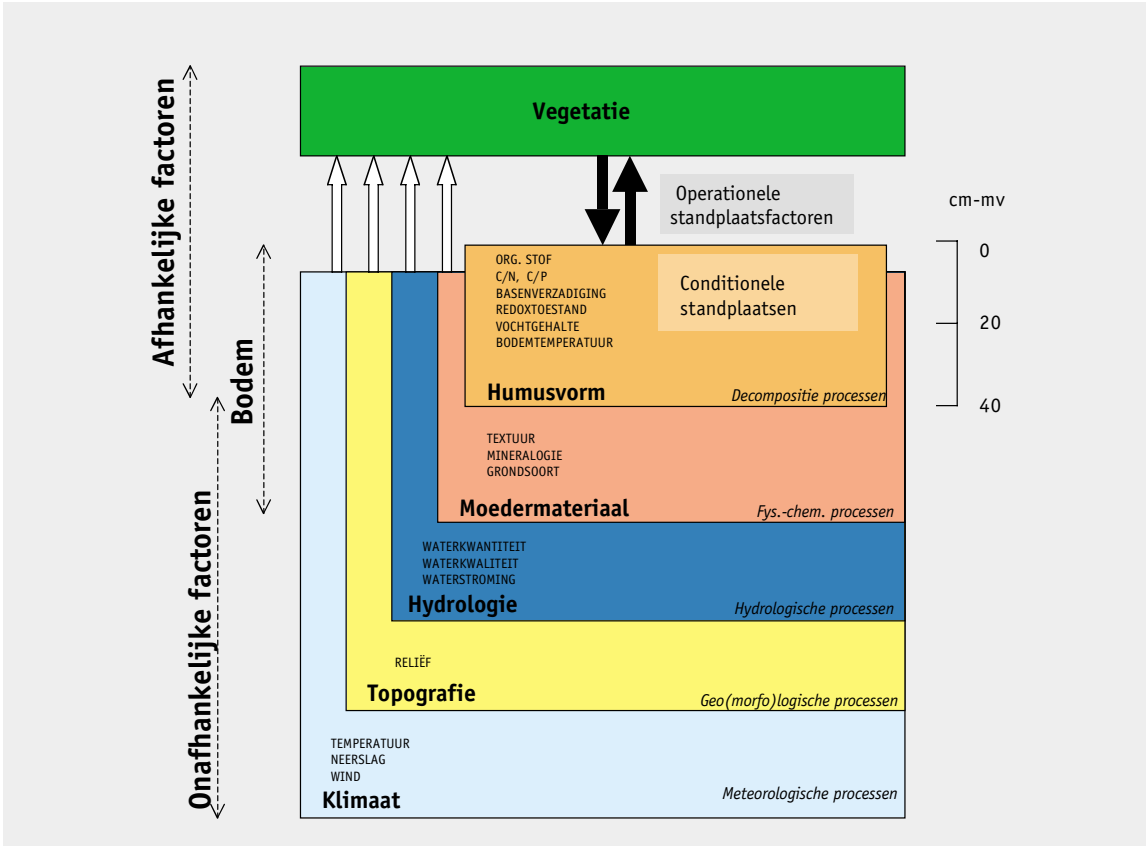
melde gegevens over afhankelijke, korte termijn-bodemprocessen in de bovengrond in samenhang met de vegetatie. Voor het overgrote deel heeft deze nieuwe informatie betrekking op het humusprofiel.

In dit artikel wordt een raamwerk gepresenteerd voor een ecologische bodemtypologie. Het doel van het raamwerk is ecologen en terreinbeheerders een kader te bieden voor de ontsluiting van actuele bodemkundige informatie en daarmee een stimulans te geven aan het gebruik en het bewerken van bodemkundige gegevens voor ecologische toepassingen.

Theoretische uitgangspunten

Omdat een veelheid aan factoren het functioneren van ecosystemen bepaalt, hebben wij als uitgangspunt genomen dat bodems in het perspectief van ook andere ecosysteemfactoren moeten worden geïnterpreteerd. De ecosysteemtheorie van Jenny (1941; 1980) biedt hiervoor een goed handvat. Zijn theorie maakt onderscheid tussen de afhankelijke factoren vegetatie en bodem en de onafhankelijke factoren klimaat, moedermateriaal, reliëf en hydrologie, en leeftijd. Omdat de theorie de bodem als afhankelijke factor beschouwt en het Nederlandse bodemclassificatiesysteem grotendeels gebaseerd is op onveranderlijke factoren, hebben wij onderscheid gemaakt tussen het onveranderlijke en het veranderlijke deel van de bodem. Het humusprofiel vertegenwoordigt het veranderlijke en het moedermateriaal (gelegen buiten de invloedssfeer van het humusprofiel) het onveranderlijke deel (zie figuur 1).

Processen zoals podzolatie, verwerking, kleïnspoeling en erosie zijn zeer langzaam verlopende processen (eeuwen). Hoewel de bijbehorende bodemkenmerken strikt genomen afhankelijk zijn, kunnen zij in praktische zin als onveranderlijk worden beschouwd. De gangbare bodemclassificatie is op dergelijke zgn. primaire bodemkenmerken gebaseerd. Secundaire bodemkenmerken (organische stofgehalte, pH, nutriëntengehalte) zijn afhankelijk van de primaire bodemkenmerken en de vegetatie en hangen samen met processen die op betrekkelijk korte termijn verlopen. Hydrologische (uitspoeling, verdroging) en meteorologische processen (depositie, eutrofiering) spelen hierbij een belangrijke rol. Het humusprofiel bevat belangrijke informatie over de secundaire bodemfactoren. Bij het begrip 'korte termijn' moet men, afhankelijk van het ecosysteem denken aan perio-



Figuur 1 Stelsel van afhankelijke en onafhankelijke factoren en processen als fundament voor een ecologische bodemtypologie

Figure 1 System of dependent and independent factors and processes founding the ecological soil classification

den van 10 tot 100 jaar (Miles, 1985; Sevink *et al.*, 1993; Jansen *et al.*, 1994; Emmer, 1995; Stortelder *et al.*, 1998). Met behulp van de Jenny-theorie is duidelijk te maken dat in elk ecosysteem steeds weer andere factoren een bepalende rol kunnen spelen voor de operationele standplaatsfactoren. Zowel primaire als secundaire factoren kunnen bepalend zijn voor de groeiplaatsontwikkeling van de vegetatie en moeten in beschouwing worden genomen bij een ecologische bodemtypering. De hiërarchische relaties tussen deze factoren zijn per ecosysteem vaak verschillend. In het ene systeem worden de groeiplaatsfactoren bijvoorbeeld voornamelijk bepaald door klimaat, in andere systemen is het moedermateriaal weer dominant of in weer andere situaties speelt het water of het humusprofiel de belangrijkste rol. Ecologische bodemtypering is daarom maatwerk, waarbij de verschillende factoren per ecosysteem van wisselend belang kunnen zijn. Daarom hebben wij een synthese gemaakt van humuskenmerken in samenhang met de vegetatie

enerzijds en de belangrijke sturende factoren klimaat, topografie, hydrologie en moedermateriaal anderzijds.

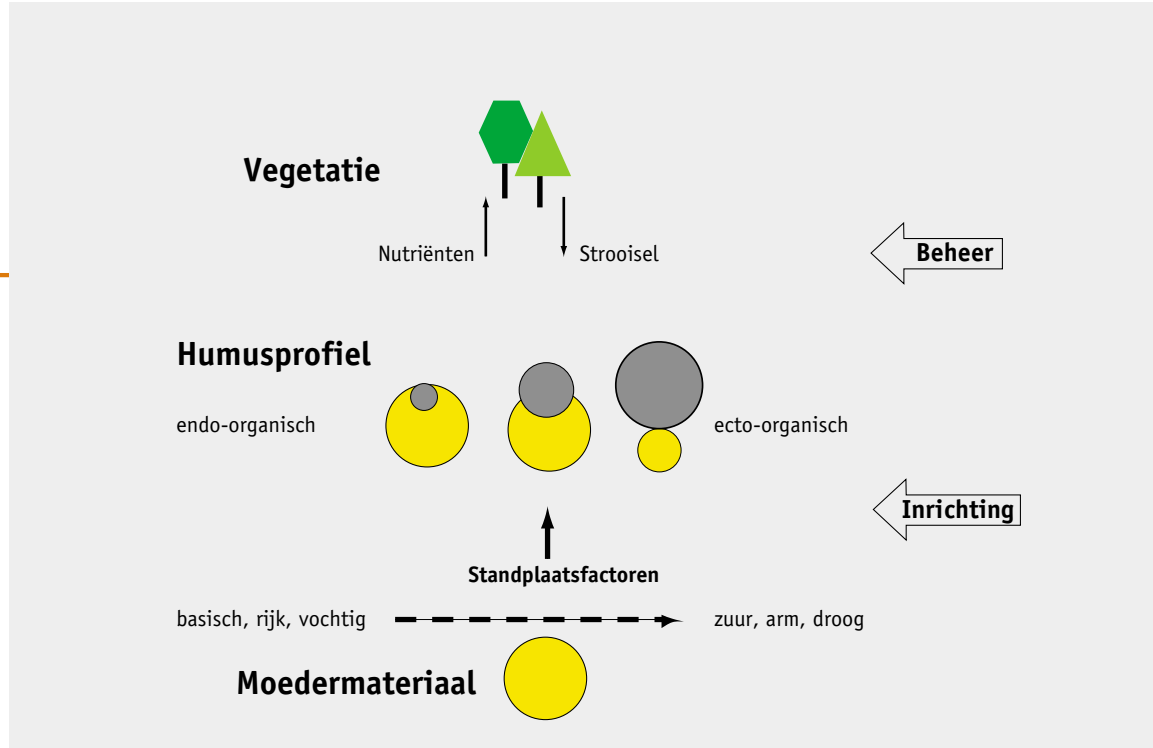
Het humusprofiel

Het meest afhankelijke en dynamische deel van de bodem is het humusprofiel. Het humusprofiel is dat deel van de bodem waarin de biologische activiteit zich grotendeels afspeelt. Per definitie wordt voor het humusprofiel een referentiediepte van 40 cm minus maaiveld aangehouden (Klinka *et al.*, 1981). Tot het humusprofiel kan dus naast organisch ook mineraal materiaal behoren. Een uitgebreid voedselweb van insecten, wormen, aaltjes, schimmels en micro-organismen zorgt ervoor dat strooisel wordt gefragmenteerd, afgebroken, gehumificeerd en al dan niet met de minerale ondergrond vermengd (bioturbatie). Hierdoor ontstaan verschillende humustypen. De mate waarin de verschillende bodemorganismen aanwezig en/of actief zijn wordt sterk



Figuur 2 Het humusprofiel neemt een positie in tussen moedermateriaal en vegetatie en ontwikkelt zich in afhankelijkheid van standplaatsfactoren, inrichtings- en beheersmaatregelen.

Figure 2 The humusform profile is the interface between the parent material and the vegetation and is indicative for management and site conditions



beïnvloed door o.a. de bodemzuurgraad, de aëratie, het vochtgehalte en de aanwezigheid van toxische stoffen. Hierdoor zijn in het humusprofiel specifieke horizonten te onderscheiden die gedomineerd worden door een bepaald humustype. Het humusprofiel is daardoor in verband te brengen met factoren als bodemzuurgraad en aëratie. De onderscheidende kenmerken zijn macroscopisch in het veld waarneembaar. In tabel 1 is een overzicht gegeven van de belangrijkste organische en minerale horizonten die in het humusprofiel van terrestrische en semi-terrestrische systemen kunnen worden onderscheiden. Het deel van het humusprofiel waar strooisel op de bodem is geaccumuleerd (L-, F- en H-horizonten) wordt ecto-organisch genoemd. In het endo-organische gedeelte van het humusprofiel is organische stof in het minerale deel van het profiel opgenomen (o.a. A-horizonten) of in situ gevormd (M- en O-horizonten). Omdat strooiselomzetting een relatief snel proces is, verstrekt het humusprofiel dus informatie over dynamische bodemprocessen en veranderlijke bodemfactoren. Het humusprofiel weerspiegelt daarom de actuele bodemtoestand.

De humusvorm

Het humusprofiel komt steeds voor in een specifieke vorm: de humusvorm. Een humusvorm is een karakteristieke combinatie van organische en minerale horizonten die van elkaar verschillen in verteringsgraad (Vos & Stortelder, 1992; Kemmers, 1996).

De humusvorm wordt getypeerd naar het voorkomen van en de dikteverhoudingen tussen horizonten. De humusvorm wordt op het hoogste niveau vernoemd naar de dominerende horizont: mull, moder, mor. Op lagere niveaus spelen o.a. subdominante horizonten een rol. Mull-humusvormen uiten zich doorgaans als endo-organische profielen. Zij zijn indicatief voor een actief bodemleven door een hoge basenbezetting en een goede vocht- en luchtvoorziening van de bodem. Strooisel wordt snel getransformeerd en gehomogeniseerd met de minerale ondergrond. De nutriëntenkringloop gaat snel en voedingsstoffen zijn ruim beschikbaar als gevolg van intensieve mineralisatie. Mor-humusvormen verschijnen meestal als ecto-organische profielen. Zij indiceren een



geringe biologische activiteit van de bodem door een lage pH en zeer droge of juist zeer natte omstandigheden. Het strooisel wordt slechts langzaam verteerd en accumuleert op de minerale ondergrond. In het ecto-organische profiel is een duidelijke differentiatie aanwezig van horizonten, die verschillen in verteringsgraad. De nutriëntenkringloop is traag: voedingsstoffen accumuleren in het humusprofiel en komen slechts in beperkte mate via mineralisatie beschikbaar voor de vegetatie. Moder- humusvormen nemen een tussenpositie in.

Humusvorm als sleutelfactor

De humusvorm is de 'interface' tussen de vegetatie en de onafhankelijke factoren moedermateriaal en hydrologie (zie figuur 2). Niet alleen geeft de humusvorm informatie over nutriëntenvoorraden en kringloopsnelheden, maar ook over de condities voor strooiselafbraak in terrestrische en semi-terrestrische ecosystemen. De humusvorm is de verschijningsvorm van het over de tijd geïntegreerde effect van de vocht- en zuurhouding op de strooiselomzetting. De vegetatie als bron van het strooisel is sterk bepalend voor de aard ervan. Daarnaast is ook de beheersvorm van invloed op de humusvorm. Er bestaat een markant verschil tussen humusprofielen van grasland- en boscystemen. In bos vormen bladeren, takken, 'dood hout' en schors de belangrijkste bronnen van strooisel (De Waal, 1996). In grasland vormt het afgestorven wortelmateriaal de belangrijkste strooiselbron (Van Delft, 1995b). Het humusprofiel reageert daarom zowel op beheersingrepen (maaien, kappen, beweiden; Smit, 2000) als op milieuveranderingen (menselijk ingrijpen, verdroging, verzuring), waardoor het humusprofiel in hoge mate indicierend is voor veranderingen in het ecosysteem. Het is daarbij opvallend dat het humusprofiel, tegen sommige theorieën in, nieuwe ont-

wikkelingen in het ecosysteem soms sneller aangeeft dan plantensoorten (Van Delft *et al.*, 1999).

Het raamwerk

Twee niveaus

In het raamwerk voor een ecologische bodemtypologie van Kemmers en de Waal (1999) wordt de humusvorm geïntegreerd met bestaande informatie over de primaire factoren moedermateriaal en hydrologie. Hierdoor heeft het raamwerk twee niveaus: het primaire en het secundaire niveau met elk hun eigen informatiebronnen. Methodisch is de informatie voor elk niveau ondergebracht in een typologie. Op het primaire niveau is de informatie samengebracht in een achttal fysiografische eenheden. Voor fysiografische eenheden waar het humusprofiel een belangrijke rol speelt of kan spelen, wordt een tweede niveau onderscheiden. Hiertoe is een functionele humusvormtypologie opgezet voor zowel terrestrische als semi-terrestrische bos- en graslandecosystemen. Wij noemen de typologie functioneel omdat hij gebaseerd is op onderliggende processen.

Voor de ontsluiting van het raamwerk is een sleutel ontworpen, waarvan de essentie in tabel 2 is weergegeven. De benodigde informatie is afhankelijk van de landgebruikvorm en de fysiografische omstandigheden. De verkregen informatie kan zowel gebruikt worden om de huidige (diagnostisch) als een toekomstige toestand (prognostisch) te beoordelen.

Verschillende informatiebronnen

Soms is het moedermateriaal zo bepalend voor de groeiplaats dat informatie over het humusprofiel niet relevant is. In andere gevallen domineert juist de humusvorm de primaire factoren. Zo zijn tijdens de bodemontwikkeling



Tabel 2 Het raamwerk van de ecologische bodemtypologie kent twee niveaus die elk een verschillende methode en informatiebron hebben om een standplaats te typeren.

Table 2 The framework of the ecological soil classification distinguishes two levels with distinct methods and sources of soil information to characterise a site

Raamwerk niveau	Informatiebron	Randvoorwaarde	Landgebruik	Vraagstelling	Methode
1	Bodem- en grond watertrappenkaart		Landbouw	Prognostisch	Fysiotopen typologie
	Geo-morfologische kaart Waterkwaliteit	Fysiografische eenheid	Natuur	Prognostisch / Diagnostisch	Fysiotopen typologie
2	Humusprofiel		Natuur	Prognostisch / Diagnostisch	Humusvorm typologie

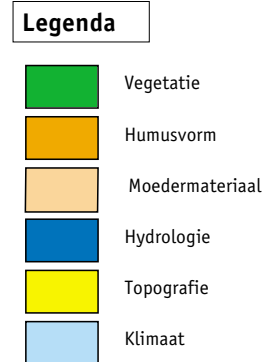
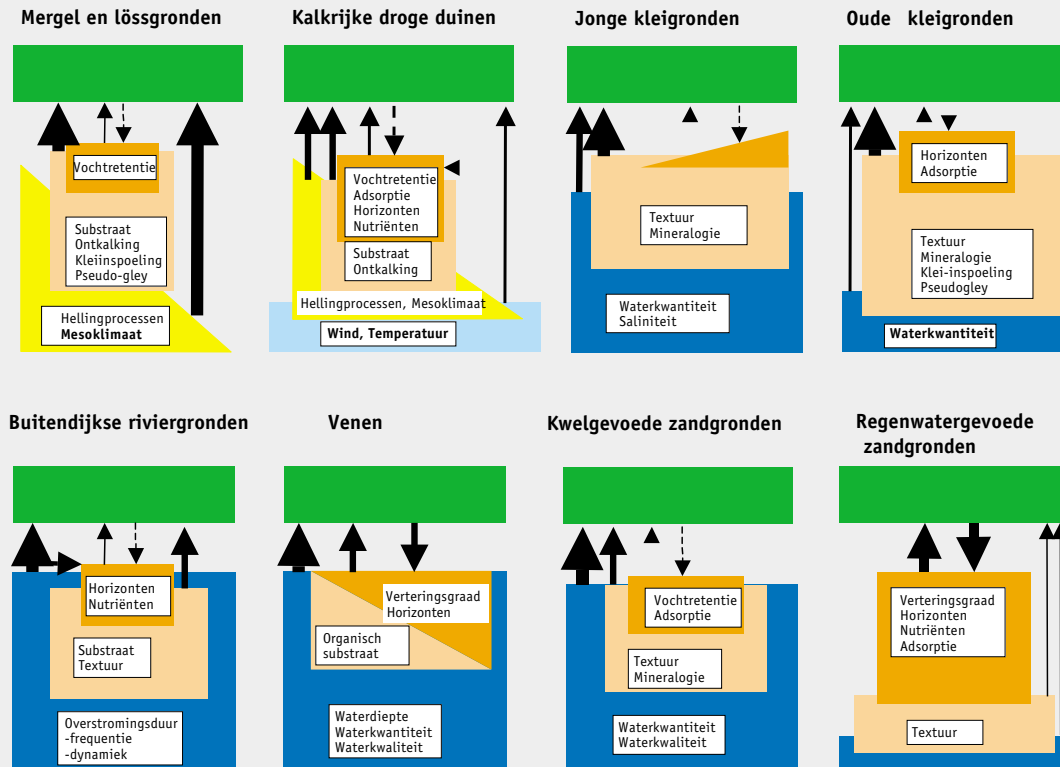
van zandgronden met calcium- en ijzerrijke kwel, sterk gehomogeniseerde mull-humusvormen ontstaan (bekeergronden) met een goede strooiselomzetting en een snelle nutriëntenkringloop. In natuurterreinen zijn op deze verzurings- en verdrogingsgevoelige bekeergronden echter vaak ecto-organische humusprofielen tot ontwikkeling gekomen. Dit wijst op een omslag van kwel naar infiltratie en een verschuiving naar podzoliatieprocessen, verzuring en oligotrofiëring van de groeiplaats. De analyse van het humusprofiel is hier dus relevant om inzicht te verkrijgen in de actuele verdrogings- c.q. verzuringstoestand.

Bij jonge kleigronden echter, zorgt de aard van het moeder materiaal ervoor dat er sprake is van een goede basenbezetting van de bodem, zonder dat er noodzakelijkerwijze kwel toestroomt tot in het maaiveld. Ongeacht de hydrologische situatie komen daardoor op jonge kleigronden vrijwel altijd mull-humusvormen voor. De grote zuurbuffercapaciteit van klei maakt dat verzuring over het algemeen niet aan de orde is. In een dergelijke situatie kan dus a priori al worden geconcludeerd dat het moeder materiaal sterk bepalend is voor de vegetatie en dat humusprofielonderzoek minder relevant is. Op oude rivier- of terraskleien daarentegen kan door (eeuwenlange) verwerking humusprofielonderzoek weer wel interessant zijn in relatie tot verzuring. Moder-humusvormen

geven voor deze gronden aan dat het systeem aan het verzuuren en verarmen is.

Landgebruik en ecologische bodeminformatie

Ecologische bodeminformatie wordt gebruikt om de geschiktheid van een standplaats te beoordelen voor vegetaties, waarvan de standplaatseisen bekend zijn. Bij natuurgebieden geldt dat voor de beoordeling van de actuele zuur-, nutriënten- en vochttoestand naast traditionele bodemkundige gegevens, gebruik gemaakt kan worden van kenmerken van het humusprofiel. Bij landbouwkundig gebruik hebben ploegen, bemesten, bekalen, ontwateren e.d. hetzelfde effect als 'een rijk bodemleven', zodat er vrijwel altijd sprake is van mull-humusvormen (*agromulls*) waarbij de relatie tussen secundaire en primaire factoren is verbroken. In dat geval kan nauwelijks gebruik worden gemaakt van het humusprofiel als informatiebron. Bij omvorming van landbouw naar natuur zullen de primaire factoren (inclusief bemestingsinvloed) gaan bepalen welk nieuw evenwicht zich instelt met de humusvorm en de vegetatie. Landevaluatie ter beoordeling van de ecologische kansrijkdom op voormalige landbouwgronden is daarom alleen mogelijk op basis van primaire factoren.



Figuur 3 Overzicht van fysiografische eenheden binnen Nederland en het belang van de verschillende ecosysteemfactoren. Per ecosysteemcompartiment zijn enkele sleutelvariabelen of -processen genoemd.

Figure 3 Main physiographic units of the Netherlands and the importance of the different ecosystem compartments

Fysiografische eenheden als randvoorwaarde

De fysiografische eenheid bepaalt welke bron de belangrijkste bodeminformatie verstrekt voor ecologische bodemevaluatie: het humusprofiel of de traditionele bodemkaart. Steeds moet a priori worden vastgesteld tot welke fysiografische eenheid een gebied of standplaats behoort. Op een grofschalig niveau komen fysiografische eenheden ongeveer overeen met de door Klijn (1997) onderscheiden ecodistricten. Ecodistricten zijn ruimtelijke eenheden die homogeen zijn in de aard van het moedermateriaal als functie van zeer langzaam verlopende geomorfologische processen. Fysiografische eenheden zijn tot stand gekomen door een aggregatie op

een hoog niveau van bodemtypen die in moedermateriaal en hydrologische positie in het landschap overeenkomen. Als referentiediepte is de bovengrond (0-40 cm) genomen, zoals onderscheiden volgens de legenda van de Bodemkaart van Nederland (1 : 50 000). Op deze wijze worden veengronden met een kleidek (b.v. waardveengrond: kV) aan dezelfde fysiografische eenheid (jonge kleigronden) toegewezen als de jonge kleigronden (R, M). In Kemmers en de Waal (1999) is een overzicht gegeven van de toedeling van bodemtypen aan de fysiografische eenheden. Figuur 3 geeft pictogrammen van de acht door ons onderscheiden fysiografische eenheden. In elk van de pictogrammen is elk van de (on)afhankelijke factoren als een box (processtelsels met enkele relevante variabelen, zie ook figuur 1) weergegeven.



Het relatieve belang van een ecosysteemfactor is aangegeven door de box groter of kleiner te maken in verhouding tot de overige boxen, dan wel een dikkere of dunne peil aan te geven naar de vegetatie.

Binnen de fysiografische eenheden kunnen op een gedetailleerder schaalniveau, maar gebaseerd op dezelfde primaire kenmerken, fysiotopen worden onderscheiden, die overeenkomen met de ecoseries sensu Klijn (1997). Fysiotopen zijn ruimtelijke eenheden die homogeen zijn ten aanzien van moedermateriaal, grondwatertrap, waterdynamiek en waterkwaliteit (atmoclien, lithoclien, rivier). Fysiotopen kunnen worden afgegrensd met behulp van de traditionele bodem- en grondwatertrappenkaart door aggregatie van bodemtypen. Een hiaat hierbij is de afwezigheid van vlakdekkende informatie over de waterkwaliteit van het freatisch grondwater, zodat de waterkwaliteit alleen via interpretatie kan worden afgeleid. De fysiotopentypologie is afhankelijk van en specifiek voor een fysiografische eenheid (o.a. Kemmers & Van der Bolt, 1997).

Fysiografische eenheden

De onderscheiden fysiografische eenheden worden hieronder kort beschreven. Daarbij wordt aangegeven welke factoren sterk bepalend zijn voor de ecosysteemontwikkeling en waarop, voor een beoordeling van kansrijkdom voor natuurontwikkeling, eventueel nader onderzoek gericht zou moeten worden.

Mergel- en lössgronden worden tot de basenrijke terrestrische ecosystemen gerekend. Moedermateriaal (en topografie) zijn de meest invloedrijke onafhankelijke ecosystemefactoren. De humusvorm is overwegend endo-organisch van karakter en is ondergeschikt aan moedermate-

riaal en topografie, tenzij sprake is van een verregaande ontkalking (> 50 cm). In deze laatste situatie ontwikkelt zich een ecto-organisch humusprofiel en bepaalt de vegetatie de humusvorm.

Kalkrijke (duin-)zandgronden worden tot de basenrijke terrestrische ecosystemen gerekend. Topografie en klimaat zijn belangrijke onafhankelijke factoren. Het moedermateriaal is van grote invloed op de vegetatie en de humusvorm. Een belangrijk verschil met mergel- en lössgronden is de veel grotere ontkalkingssnelheid van het moedermateriaal (Sival, 1997; Blom et al., 1998). Reeds bij ondiepe ontkalking (> 15 cm) kan de humusvorm sterk door de vegetatie bepaald worden en een ecto-organisch karakter krijgen (Hommel et al., 1999).

Jonge kleigronden zijn niet-verweerde zee- en rivierkleigronden, die tot de basenrijke terrestrische ecosystemen worden gerekend. Ook de veengronden met een klei(ig)dek (lutum >10%) waar geen actieve veenontwikkeling optreedt, behoren tot de jonge kleigronden. De ecosysteemrelaties worden gedomineerd door het rijke moedermateriaal. Het humuscompartiment speelt geen rol van betekenis. Alleen bij extreme vernatting of zilte omstandigheden komen ecto-organische humusprofielen tot ontwikkeling.

Oude kleigronden zijn verweerde, matig basenrijke kleigronden zoals potklei, keileem en kleien die gevormd zijn in oude rivierterrassen. De invloed van het moedermateriaal is kleiner dan bij de jonge kleigronden. Dit uit zich in een meer prominente rol van het humuscompartiment. Dunne ecto-organische humusprofielen indiceren hier een sterke verzuring en beïnvloeden de nutriëntenhuishouding voor de ondergroei. De boomsoort is er bepalend voor de voortgang van de verzuring en verarming (De Waal, 1996; Hommel et al., 2001).

Buitendijkse riviergronden staan onder invloed van de dy-



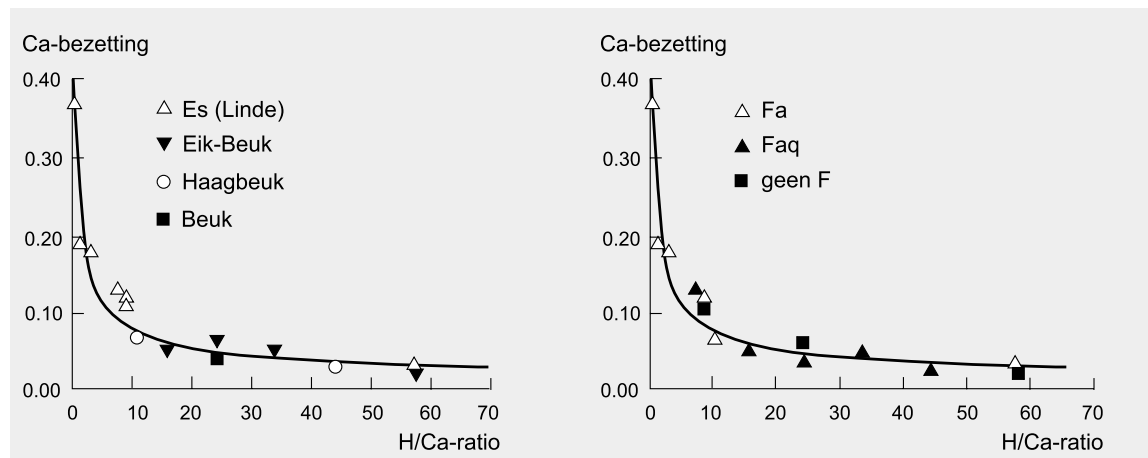
namiek van rivieren en zijn divers in moedermateriaal. Het moedermateriaal kan kleiig (oeverwallen), zandig (rivierduinen, stroomruggen) of venig (verlände meanders) zijn. De kwantitatieve hydrologie (hydrodynamiek) is een zeer belangrijke factor. Bij afwezigheid van overstromingen zal een ecto-organisch humusprofiel tot ontwikkeling komen. Incidentele extreme hoogwaterafvoeren kunnen door erosie het ecto-organische profiel terugzetten. Bij regelmatige overstroming zal door aanvoer van basen en/of slib een endo-organische humusvorm tot ontwikkeling komen (Hommel *et al.*, 1994; Wolf *et al.*, 2001).

Venen zijn semi-terrestrische ecosystemen, die sterk bepaald worden door hydrologie en moedermateriaal. De waterkwaliteit is een randvoorwaarde voor veenontwikkeling. De waterkwaliteit is bepalend voor het type veen en de aard van de vegetatie en vice versa (Stortelder *et al.*, 1998). Het 'moedermateriaal' wordt in feite bepaald door de waterkwaliteit in relatie tot de daarvan afhankelijke veenvormers: veen- en slaapmossen, zeggesoorten en riet. Het ambivalente karakter van de bodem (sensu

Jenny) is manifest aanwezig; het moedermateriaal is tevens de humusvorm.

Kwelgevoede zandgronden worden tot de basenrijke terrestrische ecosystemen gerekend. Zij worden in hoge mate bepaald door grondwater dat via kwel toestroomt naar het maaiveld en voor een hoge basenverzadiging van het adsorptiecomplex zorgt (Kemmers *et al.*, 2000). De waterkwaliteit is indirect van belang voor de aëratie en de redoxtoestand van de humusvorm en de beschikbaarheid van voedingsstoffen. De humusvorm is endo-organisch ontwikkeld en ondergeschikt aan het moedermateriaal. Bij verzuring of verdroging kan zich een ecto-organisch humusprofiel ontwikkelen (zie figuur 4).

Regenwatergevoede zandgronden worden tot de basenarme terrestrische ecosystemen gerekend. Ook de drogere veengronden met een zanddek behoren tot deze fysiografische eenheid. Het moedermateriaal is verveerd door verzuring en sterk verarmd door continue uitspoeling, waardoor een ecto-organische humusvorm tot ontwikkeling komt. Voor de vegetatie zijn moedermateriaal, topografie en hydrologie ondergeschikt aan de humus-



Figuur 4 Het verband tussen de H/Ca-verhouding, de Ca-bezetting van het adsorptiecomplex van de minerale bovengrond en voorkomende bodemtypen (a) en het voorkomen van ecto-organische humushorizonten (b) in een verzurend bosecosysteem door het wegvallen van kwel

Figure 4 The relationship between the H/Ca ratio, the Ca-saturation of the cationic exchange complex and soil types (a) and the presence of ecto-organic humus form horizons (b) in an acidifying forest ecosystem

Tabel 3 Orden en groepen van humusvormen in semi-terrestrische en terrestrische milieus en hun ecologische indicatie

Tabel 3 Terrestrial and semi-terrestrial humus form types and their ecological indication.

Semi-terrestrische humusvormen: 0- of OA-horizont en/of GHG < 20 cm-mv						
Dominante horizont	Orde	Differentierend kenmerk			Groep	Standplaatsindicatie
		horizont-verhouding	horizont-dikte (cm)	bijzonderheid		
Of of Om	Mor	Of > Ahg Om > Ahg	Ahg > 2		Veenmosmors Mesimors	Regenwatergevoed veen Grondwatergevoed veen
Oh of OA	Moder	Oh > Ahg	Ahg > 2	Og	Eerdmoders	Verdrogend basenarm veen of Niet verdroogd bronmilieu
		OA > Ahg			Hydromoders	Verdroogd veen of matig rijk overstromings-milieu
Ahg	Mullmoder	O+OA < Ahg	Ahg > 2		Hydro mullmoders	Moerassig milieu op basenrijk substraat
Ahg of ACg	Mull		F+H < 2 O, OA < 2		Hydromulls	Basenrijk overstromingsmilieu
Terrestrische humusvormen: géén 0- of OA-horizont en/of GHG > 20 cm-mv						
Dominante horizont	Orde	Differentierend kenmerk			Groep	Standplaatsindicatie
		horizont-verhouding	horizont-dikte (cm)	bijzonderheid		
Fm	Mor				Gewone Mor	Zuur en droog milieu onder naaldbos
Fa	Mormoder	F+H > Ah	F+H > 2 Ah < 2		Gewone Mormoder	Zuur en droog milieu onder loofbos
Fz	Moder	F+H > Ah	F+H > 2 Ah < 2	Ahe,AE	Wormmoder	Verzurend basenarm milieu
			F+H > 2 Ah < 2			
Ah	Mullmoder	F+H < Ah	F+H > 2 Ah > 2		Gewone mullmoder	Ontkalkende en verarmende leemgronden
Ah of AC	Mull		F+H < 2	AC	Vaagmull	Jonge afzetting in dynamisch milieu
				Kalk-en humusrijke Ah	Krijtmull	Kalksteen, mergel
				Ah, leem > 20%	Wormmull	Basenhoudend substraat, niet uitgelooft milieu
				Ah, leem < 20%	Zandmull	Basenarm substraat, niet uitgelooft
			Aa	Akkermull	Anthropogeen verrijkt	



vorm. De vegetatie controleert de eigenschappen van de humusvorm. Onder bos speelt in deze ontwikkeling de boomsoort een belangrijke rol (Hommel *et al.*, 2001).

Humusvormtypologie

De humusvorm speelt in een aantal fysiografische eenheden een sleutelrol bij informatie over processen die de ecosysteemtoestand sturen. Door het onderscheiden van humusvormen is het mogelijk gebleken om subtiele processen als verdroging en verzuring in beeld te krijgen. Om enige structuur aan te brengen in de veelheid van humusvormen, is door ons een humusvormtypologie ontwikkeld die flexibel en functioneel van aard is, wat wil zeggen dat hij gebaseerd is op informatie over onderliggende processen. De typologie is gebaseerd op voorkomen, diktes van en verhoudingen tussen horizonen en sluit aan bij de gangbare internationale indeling volgens Klinka *et al.* (1981) en Green *et al.* (1993).

In Nederland wordt het systeem van Klinka al vele jaren toegepast (Broekmeyer, 1995; Stortelder *et al.*, 1998; Emmer, 1995; de Waal *et al.*, 1999). De oorspronkelijke indeling volgens Klinka is door ons op sommige plaatsen ingrijpend aangepast aan de Nederlandse situatie. Deze aanpassingen zijn nodig omdat in West-Europa een sterk afwijkend klimaat en landgebruik aanwezig is. Het grootste probleem is het moeilijk in het veld herkennen van de door Klinka onderscheiden schimmellijke F-horizonten (Bisdom *et al.*, 1996; Dijkstra, 1996).

De door ons ontwikkelde typologie is gebaseerd op een indeling naar terrestrische en semi-terrestrische ontstaanswijze. Met de typologie worden ook zandgronden met dunne veenlagen (<15 cm), die volgens de Bakker en Schelling (1989) tot hydrozandgronden worden gerekend, ingedeeld bij de semi-terrestrische gronden. Dit is

ons inziens een aanzienlijk bevredigender situatie omdat dergelijke gronden ecologisch gezien als veengrond functioneren. Tabel 3 geeft een overzicht van de belangrijkste semi-terrestrische en terrestrische humusvormtypen op het niveau van orden en groepen. Per type zijn indicaties gegeven van de omstandigheden waaronder de humusvorm zich ontwikkelt. Oriënterend onderzoek in schraalgraslanden (Van Delft, 1995a,b; 1998) leerde dat ook onder korte vegetaties een verticale differentiatie in humushorizonten kan voorkomen, afhankelijk van de activiteit van het bodemleven. De bron van strooisel bestaat dan voornamelijk uit afgestorven wortelmateriaal. Een indeling van humusvormen voor grasland in relatie tot bodemcondities is nog in ontwikkeling (Van Delft, 2001).

Semi-terrestrische humusvormen

Alle humusprofielen die binnen de eerste 40 cm voornamelijk bestaan uit een moerige (venige) laag of een minerale laag met hydromorfe kenmerken in combinatie met een GHG < 20 cm, worden ingedeeld bij de semi-terrestrische humusvormen. Met behulp van de aard en dikte van de dominante horizont worden op het hoogste niveau vier orden onderscheiden, die vooral differentiëren naar waterkwaliteit en de voedingstoestand. Horizontverhoudingen en -diktes zijn bepalend voor een nadere opsplitsing in groepen die differentiëren naar vocht- en basentoestand. Voor de naamgeving wordt meestal een voorvoegsel gebruikt dat is ontleend aan de triviale bodemkundige benamingen (e.g. *eerdmesimor*). *Mor*-humusvormen, die bestaan uit onverweerd veen (Of), komen alleen voor bij regenwatergevoede venen. Onder invloed van grondwater komen *mors* voor met verweerd veen (Om). *Moder*-humusvormen wijzen op een verdroogde situatie en worden getypeerd door veraard en ongestructureerd veen (Oh, OA). *Mullmoders* en *mulls* wij-

zen op natte standplaatsen met een baserijk substraat of op overstromingsmilieus. De veenlaag is onherkenbaar (O of OA) en is hier dunner dan de onderliggende Ah-horizont. In overstromingsmilieus is de veenlaag vaak zeer dun (< 2cm).

Terrestrische humusvormen

Terrestrische humusvormen zijn te verdelen in *mors*, *mormoders*, *moders*, *mullmoders* en *mulls*. *Mulls* zijn humusvormen die voor het overgrote deel bestaan uit minerale delen. Het onderscheid tussen *mulls* en de overige terrestrische humusvormtypen is gebaseerd op het voorkomen van een horizont van slecht verteerd of gedeeltelijk gehumificeerd strooisel (resp. F- en H-horizont). De grens is daarbij gelegd bij een dikte van 2 cm. De voornaamste horizont is de met organische stof verrijkte bovengrond, de 'Ah'. Deze profielen komen voor in baserijke substraten of in recent gesedimenteerde afzettingen die niet per se baserijk hoeven te zijn. *Mullmoders* ontwikkelen zich door verzuring op van oorsprong baserijke gronden, waardoor strooisel gaat accumuleren. Als criterium is een gecombineerde dikte van F- en H-laag van meer dan 2 cm gekozen. In deze humusvorm is de goed ontwikkelde Ah-horizont dikker dan de combinatie F- en H-laag. Op sterk leemrijke gronden, bijvoorbeeld lössgronden, vormt de *mullmoder* meestal het eindstadium van de humusontwikkeling. Op lemige zanden gaat de ontwikkeling bij verdere uitspoeling van basen door tot een moder- of *mormoder*profiel. *Moders* kenmerken zich door de ontwikkeling van ecto-organische horizonten. De gecombineerde dikte is groter dan de dikte van de Ah. De omzetting vindt hoofdzakelijk plaats door de rijke bodemfauna met als resultaat de vorming van gedeeltelijk omgezette F-horizont (Fz) met een hoog gehalte aan excrementen (*moderbolletjes*). Deze Fz-horizont is type-

rend voor de moderprofielen. *Mormoders* zijn in Nederland de meest voorkomende humusvorm op arm zandig moedermateriaal. Zij onderscheiden zich van de *moders* door de aanwezigheid van een dominante Fa-horizont, waar de afbraak van de organische stof onder veel armere omstandigheden plaatsvindt dan bij de Fz-laag. Onder deze zuurdere omstandigheden ontbreekt een uitbundige bodemfauna en wordt een groot deel van de afbraak bewerkstelligd door schimmels. *Mors* kenmerken zich door een Fm-horizont waarin dierlijke activiteiten verwaarloosbaar zijn in vergelijking met de activiteit van schimmels. De afwezigheid van een actieve bodemfauna (gelaagde structuur) wordt daarmee het kenmerk dat ze onderscheidt van de *moders* en *mormoders*. Overigens vallen maar weinig humusprofielen in de Nederlandse situatie onder de *mors*.

Praktijkvoorbeeld

Ter illustratie geeft figuur 4 een voorbeeld van de meerwaarde van humusprofielonderzoek boven het gebruik van de traditionele bodeminformatie. Op beekerdgronden in de Wildenborch (Gelderland) is de bodem door het wegvallen van kwel plaatselijk verzuurd (Jansen *et al.*, 1994). Het oorspronkelijke proces van snelle strooiselvertering en ontwikkeling van endo-organische humusvormen voltrekt zich bij een calciumverzadiging van het adsorptiecomplex van boven de 15%. In een periode van circa 25 jaar na ontwateringsmaatregelen in de omgeving is de calciumverzadiging tot onder een kritische waarde van 15% gedaald en heeft zich een ecto-organische humusvorm ontwikkeld door accumulatie van onverteerd strooisel op het minerale bodemprofiel. Onder beuken zet dit proces van strooiselaccumulatie al in vanaf een calciumverzadiging van 25%. Duidelijk is dat de

met kwel geassocieerde beekerdgronden aan het verarmen en verzuren zijn en eigenschappen van podzolachtige bodems aannemen. De vegetatie draagt er nog de sporen van een door kwel beïnvloed *Pruno-Fraxinetum* waarin de minerale bodem de belangrijkste afhankelijke factor is, maar elementen van het *Quercion* komen al in de vegetatie te voorschijn. Het eindresultaat kan hier een Eiken-Beukenbos zijn waarin ecto-organische humusvormen van decimeters dik het evenwicht bepalen en onafhankelijke factoren en kwel nauwelijks meer invloed hebben. Toewijzing van het *Pruno-Fraxinetum* als natuurdoeltype, met behulp van de bodemkaart, zou berusten op fossiele bodeminformatie en een mislukking kunnen worden, omdat het humusprofiel aangeeft dat de ecosystemontwikkeling inmiddels de richting van een zuur en arm Eiken-Beukenbos is ingeslagen.

Tenslotte

Het raamwerk voor de ecologische bodemtypologie is tot stand gekomen door een compilatie van gegevens uit case-studies. Het raamwerk heeft niet de pretentie een allesomvattend en laatste antwoord te geven op vragen over ecologische bodeminformatie. Het ligt in de lijn van de verwachting dat het raamwerk in de loop van de tijd

verder zal worden ingevuld of uitgebreid. Inmiddels wordt het humusprofielonderzoek bij monitoring van OBN-herstelmaatregelen en in het bosreservatenonderzoek op ruime schaal toegepast. Daarbij wordt steeds duidelijker dat we door de analyse van het humusprofiel processen op het spoor komen die tot nu toe onderbelicht zijn gebleven, maar wel tot belangrijke nieuwe inzichten en kennis leiden. Zo zijn aanwijzingen verkregen dat sommige bodemprocessen, zoals verzuring en ontijzing, niet reversibel zijn en dat een 'oude' toestand ondanks herstelmaatregelen niet meer te realiseren is (Kemmers *et al.*, 2000; Grootjans *et al.*, in druk). Antwoord op de vraag naar omkeerbaarheid van processen is van wezenlijk belang voor het welslagen van natuurherstel of -ontwikkelingsprojecten. Tenslotte liggen er ook nog belangrijke problemen bij het vertalen van de puntinformatie die het humusprofiel of de waterkwaliteit geeft naar ruimtelijke patronen. Dit doet zich met name voor bij landinrichtingsprojecten, waar de raamwerkbenadering is toegepast om ruimtelijke informatie over de ecologische kansrijkdom te verkrijgen. Ook voor het welslagen van het Programma Beheer lijkt het beoordelen van de abiotische kansrijkdom een belangrijke randvoorwaarde. Het raamwerk geeft hiervoor belangrijke handvatten.

Summary

A framework for ecological soil classification

Rolf Kemmers, Rein de Waal, Bas van Delft en Peter Mekking

Landschap 19 (2002)

Ecological soil classification, humus form, land suitability, ecosystem development

Soil maps are frequently used in restoration ecology to evaluate the suitability of sites to develop their potential flora. The Soil Classification System of the Netherlands however is predominantly founded on independent factors with a permanent character. Requirements of natural vegetations are more related to dynamic processes like soil moisture and nutrient supply and base control, about which soil maps do not inform. Process information is stored in the humus form which can be consid-

ered as the most dynamic part of the soil, but the analysis of it has always been disregarded in soil survey. The humus form integrates the effect of litter input and decomposition and humification processes over time. It is an indication of biological soil activity as a function of edaphic factors and informs about nutrient stocks and the velocity of nutrient cycling. We present a framework of an ecological soil classification system which integrates the humus form in the traditional soil information. As a concept for this framework we used the ecosystem theory of Jenny distinguishing between dependent and independent factors.

At the first level of the framework a distinction between independent geomorphological processes provided eight physiographic units. In the different units distinct ecosystem factors are predominantly controlling ecosys-

tem development. In some of them the humus form is a negligible factor and in others a dominant factor. To prognose nature restoration from former agricultural land only soil information at this level of independent factors can be used.

At the second level the humus form can inform about ecological relevant processes only if the physiographic setting is appropriate. For those settings we developed a functional humus form classification which has been founded on soil conditions controlling the decomposition of organic matter. A main distinction has been made between terrestrial and semi-terrestrial humus forms. The humus form can be used to evaluate both the actual and the potential site conditions for nature development.

Literatuur

Bakker, H. de & J. Schelling, 1989. Systeem van bodemclassificatie voor Nederland; de hogere niveaus. Wageningen. Pudoc.

Bisdom, E.B.A., O.H. Boersma, D. Schoonderbeek, J.D. Schreiber & J.F.Th. Schoute, 1996. Micromorfologische technieken en humusprofielkenmerken. In: R.H. Kemmers, R.H. (red.) De dynamiek van strooisellagen. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 438.

Blom, J. van, R. Coppus, L.C. Dekker & J. Sevink, 1998. De bodems van de loofbossen op de oudere duinen en strandwallen van de Nederlandse kust; Profielontwikkeling en bodemverzuring. Amsterdam. Netherlands Centre for Geo-ecological Research. ICG Rapporten 98/9.

Broekmeyer, M.E.A., 1995. Bosreservaten in Nederland. Wageningen. Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek. Rapport 133.

Delft, S.P.J. van, 1995a. Humus- en bodemprofielen in natte schraalgraslanden. Resultaten van een bodemkundig onderzoek in 13 referentiegebieden voor het onderzoek naar Effectgerichte Maatregelen tegen verzuring (EGM). Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 309.

Delft, S.P.J. van, 1995b. Gebruik van humusprofielen bij kartering van standplaatsen in natte schraalgraslanden. In: J.F.Th. Schoute *et al.* (red.) Waarheen met het landelijk gebied? Alphen aan den Rijn. Samson H.D. Tjeenk Willink: 317-322.

Delft, S.P.J. van, 2001. Ecologische typering van bodems. Deel 2 Humusvormtypologie voor korte vegetaties. Wageningen. Alterra. Rapport 268.

Delft, S.P.J. van, J.C.Y. Marinissen & W.A.M. Didden, 1999. Humus profile degradation as influenced by decreasing earthworm activity. *Pedobiologia* 43, 561-567.

Dijkstra, E.F., 1996. Development of humus profiles under Scots pine on driftsands. Proefschrift. Universiteit van Amsterdam.

Emmer, I., 1995. Humusform and soil development during a primary succession of monoculture *Pinus sylvestris* forests on poor sandy substrates. Proefschrift. Universiteit van Amsterdam

Gleichman-Verheijen, E.C., H.E. van Capellenveen, J.A. Klijn & J.F.Th. Schoute, 1991. Naar een ecologische classificatie en beoordeling van bodems. Rijswijk. Raad voor het Milieu en Natuuronderzoek. Publikatie nr. 54.

Green R.N., R.L.Trowbridge & K. Klinka, 1993. Towards a taxonomic classification of humusforms. Washington D.C. The Society of American Foresters. Forest Science Monograph 29.

Grootjans, A.P., J.P. Bakker, A.J.M. Jansen & R.H.Kemmers, in druk. Restoration of brook valleys. *Hydrobiologia*.

- Hommel, P.W.F.M., G.H.P. Dirks, A.H. Prins, H.P. Wolfert & J.G. Vrieling, 1994.** Natuurbehoud en natuurontwikkeling langs de Bloemenbeek en Boven-Dinkel; gevolgen van ingrepen in de waterhuishouding van het Dinkelsysteem voor enkele karakteristieke vegetatietypen. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 304.
- Hommel, P.W.F.M., J.A. Ingberg & R.W. de Waal. 1999.** Vegetatiekartering, Stinzenplanten en bosontwikkeling in het landgoed Elswout. Assen, Wageningen. Buro Bakker & SC-DLO.
- Hommel, P.W.F.M., P.C. de Hullu, J. Den Ouden, Th. Spek & R.W. de Waal, 2001.** Terug naar het Lindenwoud? Alternatieve boomsoortkeuze verhoogt ecologische en recreatieve waarde van bossen op verzuringsgevoelige gronden. Nederlands Bosbouw Tijdschrift 73(6): 12-24.
- Jansen, P.C., R.H. Kemmers & P. Mekkink, 1994.** Ecohydrologische systeembeschrijving van het landgoed 'De Wildenborch'. Wageningen. DLO-Staring Centrum, Rapport 304.
- Jenny, H., 1941,** Factors of soil formation. New York. McGraw-Hill.
- Jenny, H. 1980.** The Soil Resource. Origin and Behavior. Ecological Studies 37. New-York. Springer-Verlag,
- Kemmers, R.H., 1996.** Bodemkartering voor ecologische toepassingen. In: R.H. Kemmers (red.). De dynamiek van strooisellagen. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 438: 9-27.
- Kemmers, R.H. & F.J.E. van der Bolt, 1997.** Fysiotopentypologie voor beekdallandschappen; een ruimtelijke schematisering van het beekdallandschap voor het Geïntegreerd Ruimtelijk Evaluatie-Instrumentarium voor Natuurontwikkelings-scenario's (GREINS). Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 502.
- Kemmers, R.H. & R.W. de Waal. 1999.** Ecologische typering van bodems. Deel 1 Raamwerk en humusvormtypologie. Wageningen. Alterra. Rapport 667-1.
- Kemmers, R.H., P.C. Jansen & S.P.J. van Delft, 2000.** De regulatie van de basentoestand van kwelafhankelijke schraalgraslanden en laagvenen. Wageningen.. Expertisecentrum LNV, Alterra. OBN-Rapport 8 .
- Klijn, F., 1997.** A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. Proefschrift. Rijksuniversiteit Leiden.
- Klijn, F. & R.W. de Waal, 1992.** Ecologische bodemclassificatie. Een pragmatische aanpak vanuit de standplaatsbenadering. Landschap 9(3):175-187
- Klinka, K., R.N. Green, R.L. Trowbridge & L.E. Lowe, 1981.** Taxonomic classification of humusforms in ecosystems of British Columbia. Prov. of British Columbia. First Approx.. Min of Forest.
- Mekkink, P., 1997.** De bodemgesteldheid van bosreservaten in Nederland; deel 26 Bosreservaat Hollandse Hout. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 98.26.
- Miles, J., 1985.** Soil in the ecosystem. In: Fitter *et al.*(eds.) Ecological interactions in soil. Plants, Microbes and Animals. Oxford. Special publication no. 4 of the British Ecological Society. Blackwell Scientific Publications: 407-427.
- Sevink, J., R.H. Kemmers & I.M. Emmer, 1993.** Soil research in Dutch forest reserves: the implications of spatial and temporal soil variability. In: M.E.A. Broekmeyer *et al.* (eds). Wageningen. European Forest Reserves. Pudoc: 109-117.
- Sival, F.P., 1997.** Dune soil acidification threatening rare plant species. Proefschrift. Rijksuniversiteit Groningen.
- Smit, A. 2000.** Impact of grazing on carbon and nutrient cycling in a grass-encroached Scots pine forest. Proefschrift. Universiteit van Amsterdam. Universal Press, Veenendaal
- Stortelder, A.H.F., P.W.F.M. Hommel, R.W. de Waal, K.W. van Dort, J.G. Vrieling & R.J.A.M. Wolf , 1998.** Broekbossen in Nederland. Utrecht. KNNV.
- Vos, W. & A.H.F. Stortelder, 1992.** Vanishing Tuscan landscapes. Wageningen.Pudoc.
- Waal, R.W. de, 1992.** Landschapsecologische kartering van Nederland: Bodem en grondwatertrappen. LKN-rapport nr 2. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 132.
- Waal, R.W. de, 1996.** De dynamiek van strooisellagen in boscossystemen op de overgang van kalkrijk naar kalkarm. In: R.H. Kemmers (red). De dynamiek van strooisellagen. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 438: 67-84.
- Waal, R.W. de, A.H.F. Stortelder & A.C. Zuidhoff, 1999.** OBN-referentieproject Springendal/Korenburgerveen; meetsysteem en nulsituatie Springendal. Nieuwegein, Wageningen. KIWA, DLO-Staring Centrum. OBN-Rapport.
- Waal, R.W. de, R.J. Bijlsma, E. Dijkman & M. van der Werff, 2001.** Stekelvarendominantie in bossen op arme bodems. De Levende Natuur. (102).
- Wolf, R.J.A.M., A.H.F. Stortelder & R.W. de Waal, 2001.** Ooibossen. Utrecht. KNNV.