

Omvormingsbeheer naaldbos en herstel duinroosjesvegetatie Amsterdamse Waterleidingduinen

De bodemkundige uitgangstoestand

**R.H. Kemmers
P. Mekking**

Alterra-rapport 483

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2002

REFERAAT

Kemmers, R.H., P. Mekking, 2002. *Omvormingsbeheer naaldbos en herstel duinroosjesvegetatie Amsterdamse Waterleidingduinen; De bodemkundige uitgangstoestand*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 483. 38 blz. 5 fig.; 10 tab.; 10 ref.

In de Amsterdamse Waterleidingduinen wordt een experiment uitgevoerd om te onderzoeken welke beheersvorm het meest geschikt is voor de omvorming van naaldbos naar vegetaties met Duinroosjes. Inrichtingsmaatregelen betreffen kappen, kappen en strooiselverwijdering, kappen en plaggen. Na de inrichtingsmaatregelen is de bodemkundige uitgangssituatie van de verschillende proefvlakken vastgelegd. Het humusprofiel is beschreven, waarna bemonstering van horizonten plaatsvond. De monsters zijn chemisch geanalyseerd om de basen- en nutriëntentoestand te bepalen. Na bepaling van elementgehalten zijn elementvoorraden in het profiel berekend. De resultaten zijn met een variantie-analyse getoetst op verschillen tussen de behandelingen en binnen de replica's van de behandelingen.

Trefwoorden: Kalkrijke duinen, naaldbos, omvorming, duingrasland, Duinroosje, humusprofiel.

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door €13,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 483. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2002 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd 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.

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	11
1.1 Probleemstelling en doel	11
1.2 Achtergrond	11
2 Materiaal en methoden	13
2.1 Algemeen	13
2.2 Bodemkundig bemonsteringsplan	13
2.3 Bodemchemische analyse	14
2.3.1 Gemeten waarden	14
2.3.2 Afgeleide waarden	16
2.4 Statistische verwerking	17
3 Resultaten en conclusies	19
3.1 Resultaten	19
3.1.1 Profielbeschrijvingen	19
3.1.2 Bodemchemische analyses	19
3.1.3 Statistische analyses	22
3.2 Conclusies	28
Literatuur	30
<i>Aanhangsels</i>	
1 Horizontdiktes en ontkalkingsdiepte	32
2 Resultaten bodemchemische analyses	34

Woord vooraf

De afdeling Natuur- en Terreinbeheer van Gemeentewaterleidingen Amsterdam is verantwoordelijk voor het beheer van de Amsterdamse Waterleidingduinen (AWD). Bij het beheer van de aangeplante naaldbossen wordt ernaar gestreefd de natuurlijke verjonging van duineigen soorten te bevorderen. In de omgeving van het Rozenwaterveld is Duinroosje de belangrijkste soort in de ondergroei van het naaldbos. Door vergrassing is in de meeste bossen Duinroosje nog slechts als relict aanwezig.

Bij de omvorming van deze naaldbossen naar duingrasland met Duinroosje is het de vraag welke methodiek het best kan worden toegepast. Om dit te onderzoeken is nabij de Tonneblink door de sector Ecologie van de afdeling Procesontwikkeling (POEC) een beheersexperiment opgezet. De inrichtings-maatregelen voor het experiment zijn in het najaar van 2001 uitgevoerd.

Het experiment heeft een looptijd van vijf jaar. In die periode wordt een monitoring programma uitgevoerd, waarbij de ontwikkelingen in de vegetatie, de mycoflora en op advies van de Adviescommissie Natuurbeheer ook de bodem zullen worden gevolgd.

Aan de afdeling Bodem & Landgebruik van Alterra werd door Gemeentewaterleidingen Amsterdam de opdracht verstrekt de bodemkundige Ausgangssituatie direct na de inrichtingsmaatregelen vast te leggen. Het bodemkundig veldonderzoek werd uitgevoerd door Peter Mekink. Het bodemchemisch onderzoek werd uitbesteed aan Bureau Giesen & Geurt, Biologische projecten te Uft. De interpretatie en statistische verwerking van de gegevens werd uitgevoerd door Rolf Kemmers, die tevens de projectleiding verzorgde.

Mark van Til (POEC) was de contactpersoon namens de opdrachtgever. Samen met Michiel Hootsmans van de sector Ecologie gaf hij waardevolle commentaren op de concepten van het rapport.

Samenvatting

Het beheer van de aangeplante naaldbossen in de Amsterdamse Waterleidingduinen (AWD) is gericht op bevordering van natuurlijke verjonging met duineigen soorten, zoals Duinroosje. Het is onduidelijk welk beheer moet worden toegepast om de naaldbossen om te vormen naar meer open, lage duinvegetaties met o.a. Duinroosje.

Om te onderzoeken welke beheersmaatregelen daartoe noodzakelijk zijn, is een experiment opgezet waarin de effecten van vier verschillende beheersvormen op de vestiging/uitbreiding van Duinroosje wordt gevolgd over een periode van 5 jaar.

- R: niets doen (controle);
- K: alleen houtkap;
- S: houtkap met verwijderen van strooisel;
- P: houtkap, verwijderen van strooisel en plaggen humeuze bovengrond.

Naast monitoring van de vegetatie zal ook de ontwikkeling van een aantal bodemeigenschappen worden gevolgd tijdens het experiment. Het doel van het bodemkundig onderzoek is de uitgangstoestand van een aantal bodemchemische factoren te beschrijven direct na uitvoering van de inrichtingsmaatregelen. Het bodemkundig onderzoek zal zich concentreren op eigenschappen van de strooisellaag en de ontkalkingsdiepte. De strooisellaag fungeert als een bron van voedingsstoffen en als een zuurbuffer via ionenwisseling aan het adsorptiecomplex van de organische stof.

De opzet van het bodemkundig onderzoek sloot aan bij het ontwerp van het omvormingsexperiment, waarbij 5 onderling vergelijkbare proefvelden (A t/m E) zijn geselecteerd en in blokken zijn gegroepeerd (geblokte proefopzet). Elk proefveld is in 4 kwadranten verdeeld van 20 x 20 m, die elk een specifieke behandeling (R,K,S,P) kregen. Binnen elk kwadrant is een pq aanwezig van 5 x 5 m. Bij de vier hoekpunten van het pq werd het humusprofiel beschreven en de ontkalkingsdiepte bepaald. Vervolgens werden van het humusprofiel, indien aanwezig, de L+F1, F2+H en de Ah-horizont (0-5 cm-mv) en de C-horizont verzameld en tot afzonderlijke mengmonsters samengevoegd. Buiten het bos werden eveneens bodemgegevens (0-5 cm-mv) verzameld van 5 referentievlakken.

De bodemmonsters werden geanalyseerd op kalkgehalte, pH-KCl, organisch stofgehalte, totaal stikstof- en fosforgehalte, anorganisch fosforgehalte, uitwisselbare basen en uitwisselbaar waterstof. Daarnaast werden een aantal variabelen uit de meetgegevens afgeleid: CEC, calciumverzadiging, C/N, C/P en de anorganische fosfaatfractie. Van de onderzochte profielen werden de voorraden koolstof, stikstof, fosfor, anorganisch fosfaat en uitwisselbaar kalium tot 5 cm-mv berekend.

Uit de profielbeschrijvingen blijkt dat de gemiddelde ontkalkingsdiepte van alle behandelingsvlakken bij elkaar niet significant verschilt van de referentievlakken buiten het bos. Wel komen er tussen de behandelingsvlakken significante verschillen

in ontkalkingsdiepte voor. Er zijn geen significante verschillen aanwezig tussen de dikte van de Ah-horizont van de behandelingsvlakken en de referentievlakken buiten het bos. De bodemeigenschappen zijn in algemene termen gekarakteriseerd naar de basentoestand en de voedingstoestand.

De basentoestand van de strooiselhorizonten onderscheidt zich duidelijk van die van het niet-ontkalkte C-materiaal met waarden van de pH-KCl < 4 en waarden van Ca-verzadiging < 35%. De Ca-verzadiging en de pH van de L+F1 horizont zijn significant hoger dan die van de F2+H horizont. De basentoestand van de Ah-horizont van de referenties buiten het bos (Ref 0-5) is aanzienlijk hoger dan die van de behandelingsvlakken.

De C/N verhouding van de L+F1 horizont is zwak significant lager dan die van de F2+H horizont. Vergeleken met de referenties buiten het bos is de C/N verhouding in de Ah-horizont van de behandelingsvlakken significant hoger. In de L+F1 en F2+H horizonten komt fosfor vooral in organische vorm voor. In de Ah-horizont van de behandelingsvlakken is een belangrijke anorganisch fosforfractie aanwezig.

De resultaten van het bodemchemisch onderzoek zijn tevens statistisch onderzocht op verschillen tussen de behandelingen en binnen de replica's van behandelingen met een variantie-analyse, waarbij rekening werd gehouden met blokvorming.

In de variabelen van de L+F1 horizont komen er geen significante verschillen voor tussen de vlakken na de inrichtingsmaatregelen. In de F2+H horizont is het N-totaal gehalte van de S-vlakken significant lager dan in beide andere vlakken na de inrichtingsmaatregelen. In de Ah-horizont komen geen verschillen voor tussen de behandelingen.

In de referentievlakken buiten het bos zijn de pH, de Ca-verzadiging, het anorganisch fosforgehalte en de anorganisch fosfaatfractie significant hoger, terwijl het totaalstikstofgehalte en het organisch stofgehalte en de C/N verhouding lager zijn dan in de behandelingsvlakken. Hieruit komt het beeld naar voren dat bosontwikkeling in de duinen kennelijk leidt tot accumulatie van organische stof op en in de bodem, waardoor verzuring, afname van de basenverzadiging en een toename van het stikstofgehalte is opgetreden. Bosvorming leidt tevens tot een afname van de anorganische fosfaatfractie in de bodem. Tussen de behandelingsvlakken zijn eveneens significante verschillen aanwezig voor een aantal variabelen.

Na plaggen heeft de dagzomende horizont significant lagere waarden van het organische stofgehalte, het totaalstikstofgehalte, het totaal fosforgehalte en het gehalte uitwisselbaar kalium dan de dagzomende horizont van de referenties buiten het bos. Alleen de fractie anorganisch fosfor is significant hoger op de plagvlakken.

Het effect van de inrichtingsmaatregelen op de voorraad voedingsstoffen en de zuurvrucht is onderzocht door de voorraden per horizont te berekenen en te sommeren over het onderzochte profiel. Opvallend is dat lang niet in alle gevallen

sprake is van een afnemende voorraad in de volgorde (R=K)>S>Ref>P, hetgeen gegeven de aard van de inrichtingsmaatregelen verwacht zou mogen worden. Alleen de koolstofvoorraden verlopen volgens verwachting. Opvallend is dat in de S-vlakken de grootste N- K- en H-voorraad aanwezig lijkt, terwijl daar juist strooisel verwijderd is. Bij een nadere analyse van de voorraden blijkt dat de belangrijkste verschillen tussen de behandelingen zijn terug te voeren tot de F2+H horizont. Met name de S-behandeling geeft significant grotere voorraden dan de overige behandelingen te zien. Ook in de Ah-horizont treden significante verschillen op in de elementvoorraden tussen de behandelingen. Deze verschillen zijn niet eenduidig en daarom moeilijk te interpreteren.

Mogelijk dat de grondslag voor de berekening van de voorraden een foutenbron is. Zowel de dikte van de F2+H horizont als een grotere compactie kunnen eveneens een verklaring voor de gevonden verschillen zijn.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling en doel

In een deel van de Amsterdamse Waterleidingduinen (AWD) zijn in de jaren 30 en 50 van de 20^e eeuw op grote schaal naaldbossen aangeplant. Geleidelijk heeft zich in deze bossen een dikke strooisellaag ontwikkeld en is de bovengrond min of meer verzuurd (zie o.a. Besse, 1995). Lokaal is sprake van sterke vergassing met Duinriet (*Calamagrostis epigejos*), waardoor de ondergroei weinig divers is. Duinroosje (*Rosa pimpinellifolia*), een kensoort van het hier oorspronkelijk aanwezige Verbond der droge, kalkrijke duingraslanden (*Polygalo-Koelerion*), is nog slechts als relict aanwezig in de ondergroei van deze naaldbossen. Het beheer van de bossen in de AWD is gericht op bevordering van natuurlijke verjonging met duineigen soorten. Binnen de kaders die de boswet voor het duingebied stelt, is het tevens mogelijk een beheer te volgen dat gericht is op natuurlijke uitbreiding van duineigen vegetaties met soorten als Duinroosje.

Het is onvoldoende duidelijk welke methodiek moet worden toegepast bij het terreinbeheer om de naaldbossen om te vormen naar duingrasland met o.a. Duinroosje.

Om te onderzoeken welke beheersmaatregelen daartoe noodzakelijk zijn, is een experiment opgezet waarin de effecten van vier verschillende beheersvormen op de vestiging/uitbreiding van Duinroosje wordt gevolgd over een periode van 5 jaar. Naast monitoring van de vegetatie zal ook de ontwikkeling van een aantal bodemeigenschappen worden gevolgd tijdens het experiment.

Het doel van het uitgevoerde bodemkundig onderzoek is de uitgangstoestand van een aantal bodemchemische factoren te beschrijven in relatie tot de verschillende 'behandelingen' van proefvlakken. Op termijn zal een meetreeks beschikbaar komen waarmee een verband gelegd kan worden tussen de ingrepen en de bodemfactoren en tevens tussen bodemfactoren en het gedrag van het Duinroosje binnen de vlakken. Het resultaat verstrekt kennis over de rol van bodemfactoren bij de omvorming van naaldbos naar duingrasland.

1.2 Achtergrond

Strooisel en nutriënten

De strooisellaag vormt in bossen een belangrijk kiembed voor zaailingen en is tevens een belangrijke conditionerende factor voor de vocht-, zuur- en voedingsstoffenhuishouding van de bodem. Naast het strooisel vormt de aanwezigheid van kalk een belangrijke ecologische factor. De in de strooisellaag geaccumuleerde nutriënten kunnen door een veranderd temperatuur- of lichtregime als gevolg van kap of andere beheersingrepen, via mineralisatie beschikbaar komen,

waardoor eutrafente soorten (o.a. Duinriet) gestimuleerd worden. Het bodemkundig onderzoek zal zich daarom concentreren op eigenschappen van de strooisellaag en de ontkalkingsdiepte.

De verwachting is dat vooral de labiele, makkelijk mineraliseerbare organische stofcomponenten van de strooisellaag het eerst zullen reageren op beheersingrepen. Bij het bodemkundig onderzoek zal daarom met name het humusprofiel worden onderzocht, waarbij onderscheid gemaakt zal worden tussen de L+F1 horizont (labiele fractie) en de F2+H horizont (stabiele fractie) en de Ah-horizont.

Strooisel en zuurbuffering

Ten aanzien van de factor kalk is bekend dat kalkrijke duinen betrekkelijk snel ontkalken (o.a. Sival, 1997) en kunnen verzuren. Er ontstaat daarbij een ectorganische laag (L+F- horizont) van slecht verteerd strooisel. Oppervlakkige ontkalking (decimeters) kan ertoe leiden dat kalkminnende soorten uit de vegetatie verdwijnen. Sommige (boom)soorten (Hommel et al., 2002) zijn in staat kalk uit diepere bodemhorizonten te mobiliseren en via bladstrooisel de basenstatus van de bodem (via een 'pompmechanisme') op peil te houden. Het humusprofiel vormt dan een belangrijke zuurbuffer via kationenwisseling waarbij basische kationen (o.a. calcium) op het adsorptiecomplex kunnen worden vastgehouden. Er ontwikkelt zich dan geen ectorganisch maar een endorganisch (Ah-horizont) humusprofiel met goed gehumificeerde organische stof vermengd met de minerale ondergrond. Mogelijk dat Duinroosje in staat is basen uit de wat diepere ondergrond te mobiliseren en naar de bladeren te transporteren. Door bladval zouden de basen het adsorptiecomplex van de bodem weer aan vullen, zodat de verzuring wordt gecompenseerd. Soorten die over een dergelijk mechanisme beschikken worden wel scharniersoorten genoemd (pers. meded. P. Hommel, Alterra). Dit zijn soorten die zich op de scharnier van twee ecosystemen bevinden. In dit geval de scharnier tussen kalkrijke en kalkarme systemen. Deze soorten zijn in staat hun specifieke niche te handhaven (kalkrijk) in een veranderende omgeving.

Bij sterke verzuring zullen de basische kationen door zuurionen van het adsorptiecomplex worden verdrongen. Het adsorptiecomplex is hoofdzakelijk gelokaliseerd in de L+F1, F2+H en de Ah-horizont.

Bodemontwikkeling

Uit onderzoek van o.a. Fanta (1986), Emmer (1995) en Kemmers en de Waal (1999), blijkt tijdens de ecosysteemontwikkeling een belangrijke verandering in het humusprofiel binnen betrekkelijk korte tijd (decennia) te kunnen plaatsvinden. Dit kan optreden tijdens de primaire successie van zowel kalkloze als kalkrijke zandgronden. Deze verandering uit zich macroscopisch in de ontwikkeling van nieuwe humushorizonten. Bodemchemisch kunnen dermate sterke verschillen tussen de horizonten tot ontwikkeling komen dat sprake is van een niche differentiatie waarbij wortels van sommige soorten een duidelijke voorkeur voor bepaalde horizonten aan de dag leggen. Sommige soorten vestigen zich bij de ecosysteemontwikkeling pas in fasen waarbij een bepaalde humushorizont tot ontwikkeling is gekomen; andere soorten verdwijnen daarbij.

2 Materiaal en methoden

2.1 Algemeen

Om te onderzoeken welke beheersmaatregelen noodzakelijk zijn voor de omvorming van naaldbos naar duingrasland met Duinroosje, is een experiment opgezet, waarin de effecten van vier verschillende beheersvormen op de vestiging/uitbreiding van Duinroosje wordt gevolgd over een periode van 5 jaar:

- R: niets doen (controle);
- K: alleen houtkap;
- S: houtkap met strooisel harken (verwijdering L+F1);
- P: houtkap, verwijderen van strooisel en plaggen humeuze bovengrond.

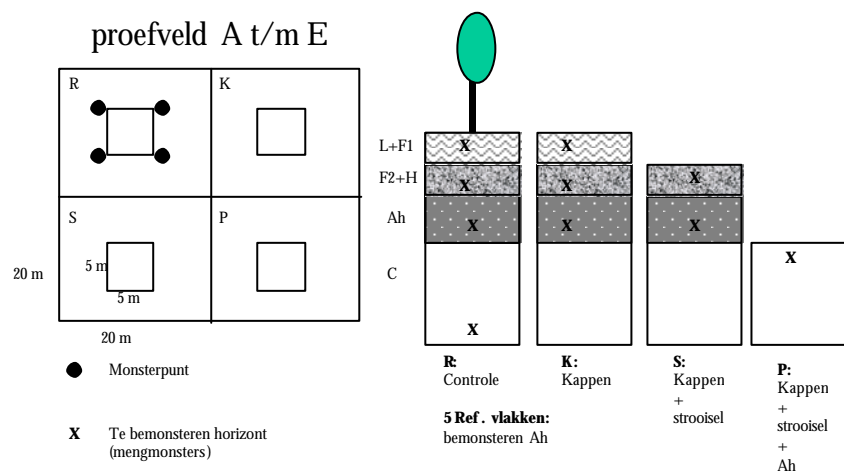
Het experiment wordt uitgevoerd op de Tonneblink in de Amsterdamse Waterleidingduinen.

2.2 Bodemkundig bemonsteringsplan

Bodembemonstering heeft in overleg met de opdrachtgever plaatsgevonden nadat de inrichtingsmaatregelen (kappen, plaggen etc.) waren genomen.

Het bodemkundig onderzoek sluit aan op het ontwerp van het omvormingsexperiment, waarbij 5 onderling vergelijkbare proefvelden (A t/m E) van ca 40 x 40 m (of 80 x 20 m) zijn geselecteerd. Elk proefveld wordt in 4 kwadranten verdeeld van 20 x 20 m. Elk kwadrant krijgt een specifieke behandeling, R,K,S of P. Binnen elk kwadrant is een pq aangelegd van 5 x 5 m. Elke behandeling wordt dus in 5-voud uitgevoerd.

- 5 proefvelden A t/m E (40 x 40 m)
- 5 refentievlakken R1 t/m 5 (3 x 3 m)



Figuur 1 Bodemkundig bemonsteringschema van het beheerexperiment Tonneblink

Aan de buitenzijde van de hoekpunten van elk pq is het humusprofiel met een humushapper bemonsterd en beschreven volgens de richtlijnen van Kemmers & de Waal (1999, dikte en voorkomen van horizonten, ontkalking etc). Van het humusprofiel bij de vier hoekpunten werden vervolgens, indien aanwezig, de L+F1, F2+H, de Ah-horizont (0-5 cm-mv) en de C-horizont tot afzonderlijke mengmonsters samengevoegd. Per behandeling werden van de uitgangstoestand de verschillende horizonten verzameld zoals aangegeven in figuur 1. Zodoende werden van elke behandeling 5 replica's per horizont verzameld, waardoor statistische toetsing van de behandelingen mogelijk is (Sevink et al., 1993). In een referentiesituatie buiten het bos (Tonneblink=Ref) werd op 5 punten een bemonstering van de Ah-horizont (0-5 cm-mv) uitgevoerd. De coördinaten van de hoekpunten zijn met GPS vastgelegd.

De mengmonsters werden gekoeld bewaard totdat zij werden geanalyseerd.

2.3 Bodemchemische analyse

De bodemmonsters werden voor chemisch onderzoek uitbesteed aan Bureau Giessen & Geurts, Biologische Projecten te Ulft. De analyses werden volgens standaardmethoden uitgevoerd. De humus- en bodemmonsters werden onderzocht op bodemchemische variabelen zoals aangegeven in het schema van tabel 1. Naast meetwaarden werden een aantal variabelen afgeleid uit gemeten waarden.

Tabel 1 Overzicht van chemische analyses per bemonsterde horizont

Laag/horizont	Kwadrant	Aantal monsters	kalk	pH	Uitw. Basen	uitw. H	Org. stof	N-tot	P-tot	P-anorg
L+F1 horizont	R, K	10	-	+	+	+	+	+	+	+
F2+H horizont	R, K, S	15	-	+	+	+	+	+	+	+
Ah (0-5 cm)	R, K, S, Ref	20	+	+	+	+	+	+	+	+
Dagzomende C-horizont (0-5cm)	P	5	+	+	+	+	+	+	+	+
C (50-60 cm)	R, Ref	10	+	+	+	+	+	-	-	-

2.3.1 Gemeten waarden

De veldvochtige monsters werden na aflevering op het laboratorium aan de lucht gedroogd via geforceerde ventilatie bij 35 °C. Na droging werd de grond gemalen en gehomogeniseerd. Voor een uitgebreide beschrijving van methoden wordt verwezen naar het analyserapport (Giesen & Geurts, 2002).

Kalkgehalte

Het kalkgehalte geeft informatie over de capaciteit waarover de bodem beschikt om zuurinput te bufferen. Bij aanwezigheid van kalk zal de zuurgraad van de bodem (pH) niet onder een waarde van ca. 7 dalen. Het CaCO₃-gehalte (%) werd bepaald volgens Wesemael (1955).

pH-KCl

De pH geeft informatie over de zuurgraad van de bodem. Veel bodembiologische processen, zoals decompositie, zijn afhankelijk van de zuurgraad. Door de pH te bepalen na extractie met een KCl-oplossing, worden ook de wat sterker aan het adsorptiecomplex gebonden H-ionen meebepaald. De pH is potentiometrisch gemeten in de bovenstaande vloeistof van 1: 2,5 mengsel van grond en een KCl-oplossing.

Uitwisselbare basen

Het adsorptiecomplex van de bodem speelt een belangrijke rol bij de zuurbuffering als de kalkbuffer is uitgeput. Aan het adsorptiecomplex kunnen zowel basische kationen als zuurionen zijn geadsorbeerd. Door de uitwisselbare basen te bepalen krijgt men een indruk van de zuurbuffercapaciteit via ionenwisseling. De kationen op het adsorptiecomplex worden daarbij uitgewisseld tegen zuurionen. Omdat zuurionen worden geadsorbeerd is de pH in de bodemoplossing minder laag dan zonder het adsorptiecomplex het geval zou zijn. Er is dus sprake van een zuurbuffering.

Uitwisselbaar calcium, magnesium, kalium en natrium zijn bepaald met AAS in een Bascombextract (BaCl₂, triethanolamine buffer bij pH=8,1) bij resp. 422,7 nm bij 285,2 nm bij 589 nm en 766 nm. Het gehalte uitwisselbare basen wordt oorspronkelijk uitgedrukt in meq/100g grond. Volgens het gangbare SI-stelsel moet deze dimensie worden omgeschreven naar 'molgewicht per kg' volgens:

$$1 \text{ meq}/100\text{g} = 10 \text{ meq}/\text{kg} = 10\text{mmol}^+/\text{kg} = \text{cmol}^+/\text{kg} \text{ (centimoles of charge)}$$

Uitwisselbaar H⁺

Complementair aan de basen worden H-ionen geadsorbeerd aan het adsorptiecomplex. De som van uitwisselbare basen en waterstof komt overeen met de potentiële kationenomwisselingscapaciteit (CEC_{pot}). De verhouding tussen uitwisselbare basen en waterstof op het adsorptiecomplex geeft informatie over de uitputting van de adsorptiecapaciteit.

De H-bezetting (cmol⁺/kg) is gemeten door het monster te extraheren in een Bascomb-extract (pH=8,1). Het extract is met zoutzuur getitreerd tot pH=5,3. Het verschil tussen blanco en monster is het vrijgekomen H⁺.

Organisch stofgehalte

Het organische stof vormt de bron van organisch gebonden voedingsstoffen zoals stikstof en fosfor. Het gehalte daarvan is een maat voor de omvang van deze bron. Het organisch stofgehalte (%) is berekend uit het gloeiverlies van oven-droge grond na 4 uur gloeien bij 350 °C. Bij hogere temperaturen kunnen ook andere stoffen ontwijken c.q. zich ontleden (CaCO₃, NaCl) en kunnen anorganische bestanddelen structureel gebonden water verliezen.

Stikstof- en Fosfortotaalgehalte

Het stikstof- en fosfortotaalgehalte geeft informatie over de voorraad stikstof en fosfor die in potentie in de bodem beschikbaar is voor de planten. De mate waarin

organische stof wordt gemineraliseerd is o.a. bepalend voor wat daadwerkelijk aan stikstof en fosfor beschikbaar komt.

De bepaling van N- en P-totaal (mg/100g) vindt plaats na Kjeldahldestructie. In het destruaat is P-totaal bepaald volgens de molybdeenblauw methode en N-totaal volgens Berthelot.

Anorganisch fosforgehalte

Naast organisch gebonden fosfor kan in de bodem een belangrijke voorraad anorganisch fosfor voorkomen. Dit is fosfaat dat na mineralisatie wordt gebonden aan ijzer, aluminium of calcium. Ook deze fosfaatbronnen kunnen gemobiliseerd worden. In tegenstelling tot fosfor komt stikstof vrijwel niet in anorganisch gebonden vorm voor in de bodem

Het anorganisch gebonden fosfaatgehalte (mg/100g) is bepaald na extractie met 5% zoutzuur (1:20) via de molybdeenblauw methode.

2.3.2 Afgeleide waarden

Potentiële kationenadsorptiecapaciteit (CEC)

De potentiële CEC is berekend uit de som van uitwisselbare basen en uitwisselbaar H na extractie volgens Bascomb:

$$CEC_{pot} = \text{Uitw. basen} + \text{Uitw. H} \quad (\text{cmol}^+/\text{kg})$$

Calciumverzadiging

Omdat calcium doorgaans het meest voorkomende kation in de bodem is, wordt de calciumverzadiging wel gebruikt als indicatie voor de resterende zuurbuftercapaciteit van de bodem. 'Voor het gemak' wordt verondersteld dat calcium- en waterstof-ionen complementair aan elkaar voorkomen op het adsorptiecomplex.

De calciumverzadiging is berekend als het quotiënt van uitwisselbaar Ca en de potentiële CEC:

$$\text{Ca-verz.} = \text{Ca-uitw.} / CEC_{pot}$$

C/N

De C/N verhouding van de organische stof is een indicatie van de rijkdom van de organische stof aan stikstof. Hoe lager de C/N verhouding hoe rijker de organische stof aan stikstof is. Tijdens de omzetting van vers strooisel neemt de C/N verhouding gewoonlijk af. Tijdens de decompositie van strooisel verdwijnt zowel koolstof als stikstof. Een deel van de stikstof wordt echter door micro-organismen als voedingsstof weer opgenomen en ingebouwd in lichaamseiwitten. Deze hersynthese van organische stof wordt humificatie genoemd. Daarbij ontstaan aanzienlijk stabielere organische stof componenten dan bij het oorspronkelijke uitgangsmateriaal aanwezig waren. De C/N verhouding is dus tevens een indicatie van het voorkomen van labiele dan wel stabiele organische stofcomponenten. De afbraaksnelheid van stabiele organische stof is lager dan die van labiele organische stof.

Als maat voor het elementair koolstofgehalte is 50% van het organisch stofgehalte aangehouden, zodat de C/N berekend is volgens:

$$C/N = 0,5 \times \text{Org. st.}/N\text{-tot}$$

C/P

De informatie die de C/P verhouding geeft is vergelijkbaar met die van de C/N verhouding. Bij de C/P verhouding moet echter worden uitgegaan van het organisch fosforgehalte. Het anorganisch fosforgehalte zegt immers niets over de eigenschappen van de organische stof.

Als maat voor de C/P verhouding is uitgegaan van het organisch fosforgehalte, dat wordt berekend uit het verschil tussen P-tot en P-anorganisch.

$$C/P = 0,5 \times \text{Org. st.}/(P_{\text{tot}} - P_{\text{an}})$$

P-fractie

De anorganisch fosfaatfractie geeft aan welke fractie van het totaalfosforgehalte in anorganische vorm voorkomt. De P-fractie geeft aan hoeveel fosfor niet betrokken is bij de bodembioologische processen en (tijdelijk?) in depot ligt opgeslagen. Dit depot zal groter zijn naarmate meer fosfor accumuleert dat niet nodig is. De P-fractie is daarmee een indicatie voor de eutrofiëringstoestand van de bodem.

De P-fractie is berekend volgens:

$$P\text{-fractie} = P\text{-anorganisch}/P\text{-totaal}$$

Bulkgewicht

Het bulkgewicht is berekend uit een relatie ($r^2=0.91$) tussen het organisch stofgehalte en het drooggewicht (Kemmers, ongepubliceerd):

$$Bd = 0,328 \text{Ln}(\text{Org. st.}) + 1.5398 \text{ (kg/dm}^3 \text{ droge grond)}$$

Voorraden

Van een aantal elementen werden de voorraden berekend per horizont en per profiel. Hiertoe werden de gehalten met het bulkgewicht omgerekend naar kilogrammen per m² per bemonsterde horizont. Van de strooiselhorizonten is bij de veldbeschrijving de dikte geregistreerd. Op basis van de veldgegevens kon tevens worden vastgesteld dat de dikteverhouding tussen L+F1 en F2+H horizont vrijwel 1:1 bedraagt. Van de Ah-horizont is steeds een vaste laagdikte van 5 cm verzameld. Met deze gegevens konden voor de verschillende horizonten kwantitatieve gegevens van elementvoorraden worden berekend. Door deze voorraden per horizont te sommeren kon een voorraad per profiel worden berekend. Berekend werden de voorraad koolstof, stikstof, totaalfosfor, anorganisch fosfor en uitwisselbaar kalium en waterstof.

2.4 Statistische verwerking

Omdat in het experiment effecten van de beheersingrepen worden vergeleken, is het van belang om te onderzoeken hoe de variantie tussen de verschillende behandelingen zich verhoudt tot die binnen de replica's van een behandeling. Daartoe is een variantie-analyse uitgevoerd met het statistische pakket Genstat

(Payne, 2000), waarbij rekening werd gehouden met de blokkenproef-opzet (One-way Anova in randomized blocks).

Bij de gekozen bemonsteringsstrategie leidt dit in zoverre tot problemen, dat a priori bekend is dat er verschillen aanwezig zullen zijn als gevolg van de inrichtingsmaatregelen. Voorzover het de elementgehalten en pH betreft kan deze variantie-analyse daarom alleen worden uitgevoerd voor series waarin zelfde horizonten voorkomen. Zo kunnen de gehalten in de L+F1 horizont alleen vergeleken worden tussen de R- en K-behandeling. Bij de S- en P-behandeling is de L+F1 horizont verwijderd en dus afwezig.

Om toch alle behandelingen onderling te kunnen vergelijken zijn de elementvoorraden gesommeerd over de verschillende horizonten, waarna een variantie-analyse werd uitgevoerd voor het hele profiel. Bovendien zijn de voorraden in de behandelingen vergeleken met die in de referentievlakken buiten het bos.

Aldus zijn variantie-analyses uitgevoerd volgens het schema van tabel 2. Om verschillen tussen twee behandelingen verder te kunnen duiden, zijn in een aantal gevallen tevens paarsgewijze verschillen getoetst met een Student t-toets, waarbij een Tukey test is uitgevoerd.

Als toetsingsgrootte bij de variantie-analyse werd de variantie ratio ($V_r = F$) gebruikt. Het toetsingscriterium is daarbij afhankelijk van het aantal vrijheidsgraden. De mate van significantie van de verschillen is gebaseerd op de overschrijdingskans ($P < 5\%$), waarbij het verschil nog niet significant is. Bij de Tukey-test wordt de overschrijdingskans aangepast al naar gelang het aantal mogelijke vergelijkingen tussen de behandelingen, zodat vaste grenswaarden niet hanteerbaar zijn.

Tabel 2 Overzicht van horizonten en variabelen waarbij de variantie-analyses zijn uitgevoerd

Horizont	Gehalten, pH, Calciumverzadiging, C/N, C/P	Elementvoorraden
L+F1	R, K	R,K
F2+H	R,K,S	R,K,S
Ah	R,K,S, Ref	R,K,S,Ref
C (0-5)	Ref, P	Ref, P
C (50-55)	Ref, R	
Gehele profiel		R,K,S,P,Ref

3 Resultaten en conclusies

3.1 Resultaten

3.1.1 Profielbeschrijvingen

De profielbeschrijvingen zijn slechts summier uitgevoerd, omdat de bodemkundige variatie beperkt is. Wel is van elk hoekpunt de dikte van de L+F+H-horizont, de Ah-horizont en de ontkalkingsdiepte opgenomen. Het overzicht van deze waarnemingen is opgenomen in aanhangsel 1.

De gemiddelde ontkalkingsdiepte in de niet geplagde vlakken bedraagt 11,6 cm-mv (zie tabel 3). De ontkalkingsdiepte in de blanco-proefvlakken is significant groter (13,7 cm-mv) dan die in de K-behandeling (9,7 cm-mv). De ontkalkingsdiepte in de S-behandeling is gemiddeld 11,4 cm en in de P-behandeling 1,8 cm-mv. De ontkalkingsdiepte in de referentievlakken buiten het bos bedraagt 8,8 cm. Er is geen significant verschil tussen de gemiddelde ontkalkingsdiepte van alle behandelingsvlakken bij elkaar (overall) en van de referentievlakken buiten het bos.

De gemiddelde dikte van de Ah-horizont in de niet geplagde vlakken bedraagt 6,9 cm en wijkt niet significant af van de gemiddelde dikte van de Ah (7,7 cm-mv) in de referentievlakken buiten het bos. Er zijn geen significante verschillen tussen de behandelingsvlakken onderling.

Tabel 3 Gemiddelde ontkalkingsdiepte en dikte van de Ah-horizont met standaardafwijkingen van de verschillende behandelingsvlakken. Significante verschillen tussen behandelingen worden aangegeven met verschillende letters (a,b,c) na toetsing met de Tukeytest: ontkalking ($p < 0.0083$); dikte ($p < 0.017$).

	R	K	S	P	Overall	Ref
	cm-mv					
Ontkalking	13,7 ^a	9,7 ^b	11,4 ^a	1,8 ^c	11,6	8,8
St. dev	6,0	3,7	5,2	3,3	5,2	8,6
Dikte Ah	7,4	6,2	7,1	-	6,9	7,7
St. dev.	4,8	3,7	5,1	-	4,5	6,3

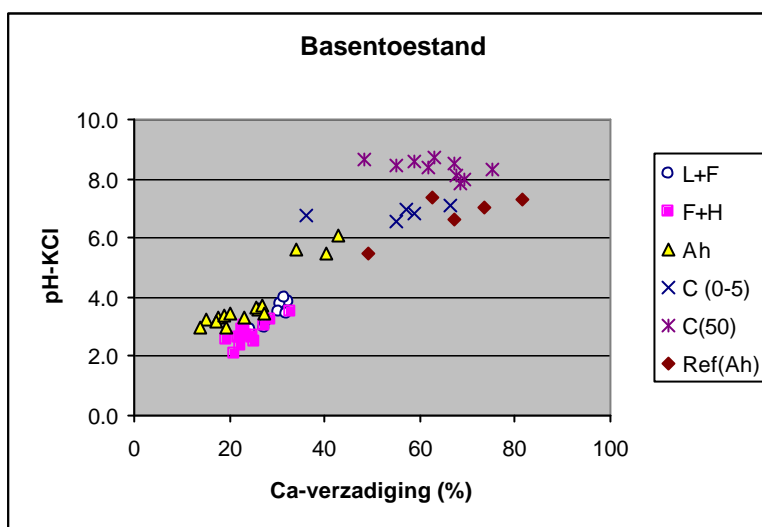
3.1.2 Bodemchemische analyses

Een overzicht van de analyseresultaten en de waarden van de afgeleide variabelen is opgenomen in aanhangsel 2.

Van de gemeten waarden zijn in paragraaf 3.1.3 gemiddelden per behandelingsvlak berekend en getoetst op significantie in verschillen. Met behulp van de afgeleide waarden zijn enkele overzichtsfiguren gepresenteerd die een algemene indruk geven van de basentoestand, de voedingstoestand en de eutrofiëringstoestand van de bodem.

Basentoestand

De basentoestand van de verschillende horizonten is in figuur 2 weergegeven door de pH-KCl te relateren aan de Ca-verzadiging van het adsorptiecomplex (zie ook aanhangsel 2). Deze figuur illustreert de buffercapaciteit via ionenwisseling van de betreffende horizonten. De strooiselhorizonten onderscheiden zich duidelijk van het niet ontkalkte C-materiaal door waarden van de pH-KCl < 4 en waarden van Ca-



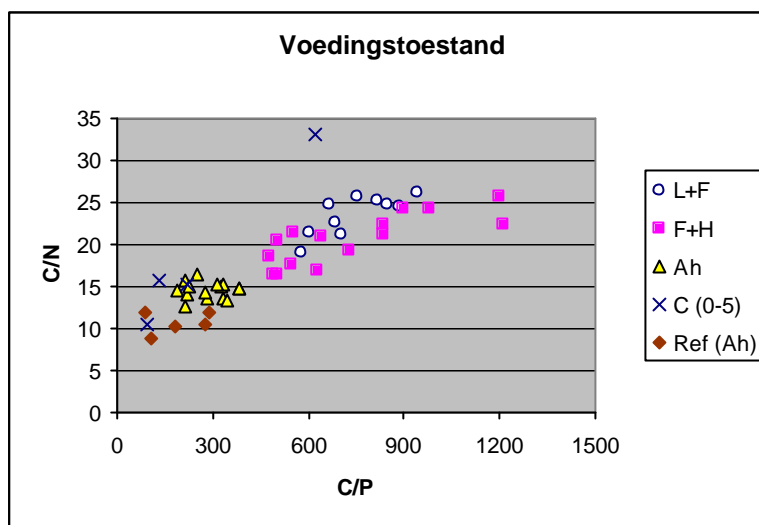
Figuur 2 Relatie tussen pH en calciumverzadiging van het adsorptiecomplex van de verschillende horizonten

verzadiging < 35%. Van een drietal plekken is de Ah-horizont niet ontkalkt, waardoor de pH en Ca-verzadiging hoger zijn dan die van de overige plekken. De Ca-verzadiging en de pH van de L+F1 horizont zijn significant hoger dan die van de F2+H horizont. Dit kan erop wijzen dat kalk uit de diepere horizonten door de vegetatie wordt gemobiliseerd en de Ca-verzadiging van de L+F1 horizont via bladstrooisel op peil wordt gehouden via een 'pompmechanisme'. De basentoestand van de Ah-horizont van de referenties buiten het bos (Ref) is aanzienlijk hoger dan die van de behandelingsvlakken.

Voedingstoestand

De voedingstoestand is in figuur 3 weergegeven door de C/N verhouding en de C/P verhouding van de organische stof in de verschillende horizonten met elkaar in verband te brengen. Beide variabelen geven een indicatie van de rijkdom van de organische stof aan organisch gebonden stikstof en fosfor. Labiele organische stof (vers strooisel: L+F1) is over het algemeen armer aan stikstof en fosfor dan stabiele organische stof (F2+H, Ah), wat zich uit in hogere waarden van de C/N en C/P. Labiele organische stof heeft over het algemeen een hogere potentiële decompositiesnelheid dan stabiele organische stof. Tijdens humificatie ontstaat stabiele organische stof waarin stikstof en fosfor worden ingebouwd (immobilisatie), wat zich uit in een dalende tendens van de C/N en C/P verhouding. De C/N verhouding van de L+F1 horizont is zwak significant hoger dan die van de F2+H horizont.

Bij de C/P verhouding zijn geen verschillen aanwezig. De Ah-horizont bestaat uit zeer stabiele organische stof met lage waarden voor de C/N en C/P-verhouding.

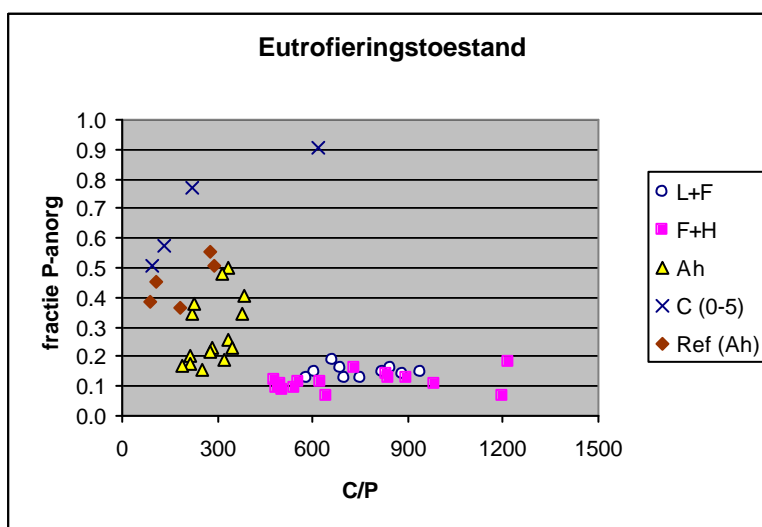


Figuur 3 Relatie tussen C/N en C/P verhouding van de verschillende horizonten

Vergeleken met de referenties buiten het bos is de C/N verhouding in de Ah-horizont van de behandlingsvlakken significant hoger. Dit hangt ongetwijfeld samen met de hoge basentoestand in de referenties buiten het bos. Een hogere basentoestand leidt tot een grotere biologische activiteit en intensieve humificatie. Ook in het C-materiaal (0-5 cm) komt stabiele organische stof voor dat waarschijnlijk door inspoeling van disperse humus daar terecht is gekomen.

Eutrofiëringstoestand

De eutrofiëringstoestand is in figuur 4 weergegeven door de C/P verhouding in verband te brengen met de fractie van de fosfor die in anorganische vorm voorkomt. De ervaring leert dat 30 tot 70% van het totaalfosforgehalte in de bodem in



Figuur 4 Relatie tussen C/P verhouding en de anorganische fosfaatfractie van de verschillende horizonten

anorganische vorm kan voorkomen. Naast fosformineralisatie kan daardoor mobilisatie van anorganisch fosfor een belangrijke voedingsbron van fosfaten zijn. Deze anorganische fosfaten kunnen gebonden zijn aan Al- en Fe-oxiden, dan wel als Ca-P zouten in de bodem voorkomen. Bij lage pH komt vooral binding aan aluminium en bij hogere pH aan ijzer voor. Onder kalkrijke omstandigheden kan ook vorming van Ca-P zouten optreden. Uit figuur 4 blijkt dat in de L+F1 en F2+H horizonten fosfor vooral in organische vorm voorkomt. In de Ah-horizont van de behandlingsvlakken komt een belangrijke anorganisch fosforfractie tot ontwikkeling. Kennelijk wordt hier, bij lage pH-KCl, een belangrijk deel van de fosfaat, die wordt gemineraliseerd uit de organische stof, gebonden aan Fe- of Al-oxiden. De fractie in de Ah-horizonten is significant lager dan in de referentievlakken buiten het bos.

3.1.3 Statistische analyses

L+F1 horizont

De L+F1 horizont is alleen aanwezig in het controle vlak (R) en de kapvlakte (K). In tabel 4 zijn de gemiddelde meetwaarden van de variabelen in de L+F1 horizont weergegeven. De variantie-analyse geeft aan dat er voor geen van de variabelen een significant verschil aanwezig is. De behandelingen zijn goed te vergelijken; er zijn geen verschillen in de Ausgangssituatie.

Tabel 4 Gemiddelden en resultaten variantie-analyse van meetwaarden in de L+F1 horizont

Behandeling	L+F1 (gemiddelden)									
	pH	Os	Ntot	Ptot	P-an	K-uitw	Ca-verz	C/N	C/P	P-fract
R	3.40	63.20	1522	54.40	7.78	1.81	29.34	24.7	812	0.15
K	3.50	75.00	1432	55.80	8.47	1.68	28.66	22.4	683	0.14
Overall	3.45	69.10	1477	55.10	8.13	1.74	29.00	23.6	747	0.15
VR	0.12	2.21	0.36	0.06	0.61	0.11	0.08	3.48	5.03	0.63
P	0.749	0.211	0.581	0.815	0.479	0.752	0.79	0.136	0.088	0.473

df1=1 ;df2=5; VR>6.61

F2+H horizont

De F2+H horizont is aanwezig in de controle vlakken (R), de kapvlakken (K) en de vlakken waar strooisel is verwijderd (S). In tabel 5 zijn de gemiddelde meetwaarden van de variabelen in de F2+H horizont weergegeven. De variantie-analyse geeft aan dat er een significant verschil bestaat tussen de vlakken voor het N-totaalgehalte. Het N-totaal gehalte in de S-vlakken is significant lager dan in beide andere vlakken. In de Ausgangssituatie zijn de vlakken daarom onderling niet vergelijkbaar. De maatregel heeft kennelijk tot een verschil in de Ausgangssituatie geleid.

Tabel 5 Gemiddelden en resultaten variantie-analyse van meetwaarden in de F2+H horizont. Significante verschillen tussen behandelingen worden aangegeven met verschillende letters a,b na toetsing met de Tukey-test: ($p < 0.017$).

Behandeling	F2+H (gemiddelden)									
	pH	Os	Ntot	Ptot	P-an	K-uitw	Ca-verz	C/N	C/P	P-fract
R	2.65	55.90	1399 ^a	43.50	5.28	0.78	23.60	19.9	735	0.12
K	2.62	60.60	1454 ^a	43.90	4.43	0.84	23.78	20.7	817	0.10
S	2.98	47.10	1097 ^b	41.30	5.09	0.73	25.14	21.2	653	0.12
Overall	2.75	54.50	1317	42.90	4.93	0.78	24.17	20.6	735	0.12
VR	1.79	1.95	8.18	0.41	0.63	0.5	0.21	0.23	0.65	0.5
P	0.228	0.204	0.012	0.679	0.558	0.627	0.812	0.801	0.55	0.626

df1=2 ; df2=8; VR>4.46

Ah-horizont

Ah-horizonten zijn met uitzondering van de plagvlakken in alle vlakken aanwezig. Ook is een Ah-horizont aanwezig in de referentievlakken buiten het bos. In tabel 6 zijn de gemiddelde meetwaarden van de variabelen in de Ah-horizont weergegeven.

Tabel 6 Gemiddelden en resultaten variantie-analyse van meetwaarden in de Ah-horizont zonder (bovenste deel) en met het in beschouwing nemen van de referentievlakken (Ref) buiten het bos. Significante verschillen tussen behandelingen worden aangegeven met verschillende letters (a,b,c) na toetsing met de Tukey-test: ($p < 0.017$ resp. 0.0083).

Behandeling	Ah (gemiddelden)									
	pH	Os	Ntot	Ptot	P-an	K-uitw	Ca-verz	C/N	C/P	P-fract
R	3.29	5.70	198	12.83	2.67	0.11	19.30	14.4	290	0.22
K	4.42	4.10	141	11.30	3.77	0.10	29.20	14.6	287	0.36
S	3.78	5.44	187	13.87	3.60	0.13	25.10	14.6	281	0.28
Overall	3.83	5.08	175	12.67	3.35	0.11	24.50	14.5	286	0.29
VR	2.04	2.12	2.14	1.37	3.36	2.05	2.08	0.03	0.04	1.75
P	0.192	0.182	0.18	0.308	0.087	0.191	0.187	0.975	0.963	0.234

df1=2; df2=8; VR>4.46

Behandeling	Ah (gemiddelden)									
	pH	Os	Ntot	Ptot	P-an	K-uitw	Ca-verz	C/N	C/P	P-fract
R	3.29 ^a	5.7 ^a	198 ^a	12.83	2.67 ^c	0.11	19.3 ^a	14.44 ^a	290	0.22 ^b
K	4.42 ^a	4.1 ^a	141 ^b	11.30	3.77 ^b	0.10	29.2 ^a	14.6 ^a	287	0.358 ^{a,d}
S	3.78 ^a	5.44 ^a	187 ^a	13.87	3.6 ^b	0.13	25.1 ^a	14.56 ^a	281	0.278 ^b
Ref	6.76 ^b	2.46 ^b	115 ^c	12.68	5.66 ^a	0.10	66.7 ^b	10.68 ^b	189	0.45 ^a
Overall	4.56	4.42	160.2	12.67	3.93	0.11	35.10	13.6	262	0.33
VR	16.95	7.52	4.21	0.88	18.31	1.97	22.67	15.42	2.4	4.05
P	<.001	0.004	0.03	0.478	<.001	0.173	<.001	<.001	0.119	0.033

df1=3; df2=12; VR>3.49

Indien de referentievlakken buiten het bos buiten beschouwing worden gelaten (bovenste gedeelte tabel 6) zijn er geen significante verschillen aanwezig tussen de behandelingsvlakken.

Indien tevens de referentievlakken buiten het bos worden betrokken bij de variantie-analyse blijken er wel significante verschillen aanwezig. De referentie (Ref) wijkt hierbij steeds significant af van de behandelingen. De pH, de Ca-verzadiging, het anorganisch fosforgehalte en de anorganisch fosfaatfractie zijn significant hoger, terwijl het totaalstikstofgehalte, het organisch stofgehalte en de C/N verhouding in de referentievlakken lager zijn dan in de behandelingsvlakken. Bovendien is het totaalstikstofgehalte in de K-vlakken significant lager dan in de R- en S-vlakken, het anorganisch fosforgehalte in de R-vlakken lager dan in de K- en S-vlakken. De P-fractie in de K-vlakken wijkt niet af van die in de Ref-vlakken buiten het bos.

De variantie-analyse maakt zichtbaar hoever de verschillende behandelingsvlakken nog verwijderd zijn van de referentievlakken voor de onderzochte variabelen. Deze verschillen kunnen als volgt worden geïnterpreteerd: de bosontwikkeling in het verleden heeft kennelijk geleid tot accumulatie van organische stof op en in de bodem. Dit heeft geleid tot verzuring, afname van de basenverzadiging, toename van het stikstofgehalte van de Ah-horizont onder bos. De anorganische fosfaatfractie in de Ah is onder bos daardoor kennelijk afgenomen.

Dit impliceert dat, indien de referenties buiten het bos als abiotische streefwaarden worden beschouwd, een behandeling die leidt tot een toename van de pH en de Ca-

verzadiging en de anorganische fosfaatfractie en een afname van het stikstofgehalte, de grootste kans heeft op de ontwikkeling van een bodem, waarop zich een duingrasland met Duinroosjesvegetatie kan ontwikkelen.

Plaggen

De plagbehandeling vormt een uitzonderlijke situatie, omdat daarbij alle horizonten zijn verdwenen die bij de overige behandelingen wel aanwezig zijn. Omdat in de dagzomende horizont zich naar verwachting een nieuwe Ah-horizont zal ontwikkelen, is deze horizont (C 0-5 cm) vergeleken met de Ah- horizont van de referenties buiten het bos.

Tabel 7 Gemiddelden en resultaten variantie-analyse van meetwaarden in de C-horizont (0-5cm) van de plagvlakken en de Ah-horizont van de referenties buiten the bos

Behandeling	C(0-5) en Ah (gemiddelden)									
	pH	Os	Ntot	Ptot	P-an	K-uitw	Ca-verz	C/N	C/P	P-fract
Ref	6.76	2.46	115	12.68	5.66	0.10	66.70	10.7	189	0.45
P	6.84	0.86	31	7.48	5.24	0.05	54.70	17.2	681	0.74
<i>Overall</i>	<i>6.80</i>	<i>1.66</i>	<i>73</i>	<i>10.08</i>	<i>5.45</i>	<i>0.07</i>	<i>60.70</i>	<i>14.0</i>	<i>435</i>	<i>0.60</i>
VR	0.04	16.95	16.19	19.81	0.405	112.67	2.07	2.51	1.22	8.5
P	0.86	0.015	0.016	0.011	0.86	<.001	0.223	0.188	0.332	0.043

df1=1 ;df2=5; VR>6.61

Het blijkt dat de dagzomende horizont in de plagvlakken significant lagere waarden heeft van het organische stofgehalte, het totaalstikstofgehalte, het totaal fosforgehalte en het gehalte uitwisselbaar kalium (zie tabel 7). Alleen de fractie anorganisch fosfor is significant hoger op de plagvlakken.

C-horizont (50-55 cm-mv)

In de diepere ondergrond zijn er voor het kalkgehalte geen significante verschillen tussen de referenties binnen en buiten het bos. Wel zijn binnen het bos de pH en het uitwisselbaar kalium significant lager en het organische stofgehalte significant hoger dan daarbuiten. De calciumverzadiging is binnen het bos significant hoger dan daarbuiten (zie tabel 8).

Tabel 8 Gemiddelden en resultaten variantie-analyse van meetwaarden in de C-horizont (50-55cm-mv) van de referentievlakken binnen (R) en buiten het bos (Ref).

Behandeling	C op 50 cm-mv (gemiddelden)				
	pH	Os	kalk	K-uitw	Ca-verz
Ref	8.57	0.16	3.3	0.10	58.50
R (bos)	8.12	0.40	3.2	0.05	68.50
<i>Overall</i>	<i>8.34</i>	<i>0.28</i>	<i>3.2</i>	<i>0.07</i>	<i>63.50</i>
VR	30.73	22.2	0.07	112.67	8.7
P	0.005	0.009	0.807	<.001	0.042

df1=1; df2=5; VR>6.61

Elementvoorraden

Een van de doelen van het experiment is het effect van het verminderen van de voedingsstoffenvoorraad en de zuurvrucht via verwijderen van strooisel (S) of plaggen (P) te bestuderen. In de voorgaande paragraaf is steeds gekeken naar gehalten van voedingsstoffen in de verschillende horizonten. Deze gehalten zijn kwantitatief omgerekend naar voorraden per horizont en vervolgens gesommeerd over het

onderzochte profiel. Daarmee kan het effect van de behandeling op de voorraad voedingsstoffen zichtbaar worden gemaakt.

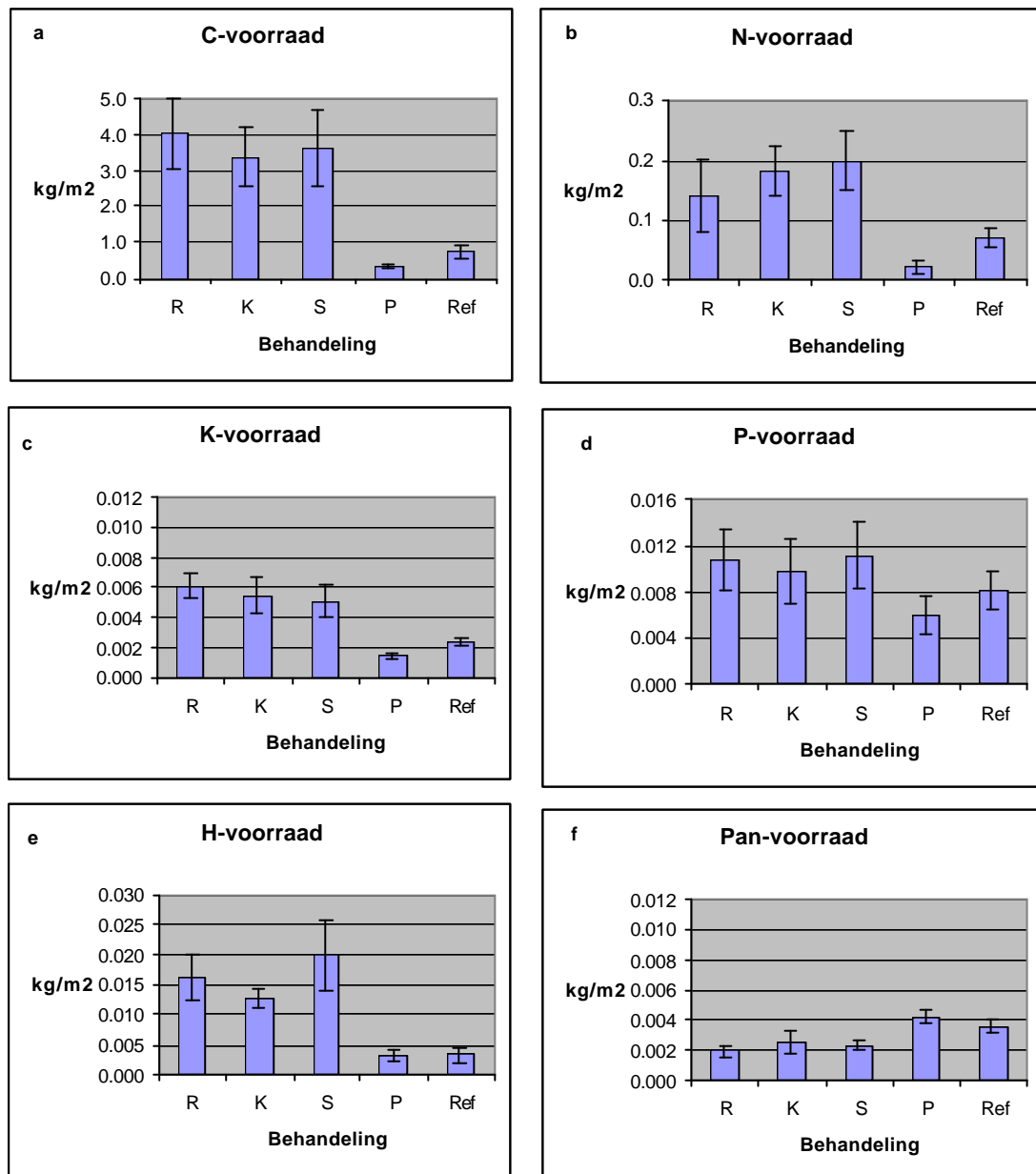
De voorraden van de voedingsstoffen na de verschillende behandelingen zijn weergegeven in figuur 5a t/m 5f. In tabel 9 zijn de gemiddelde waarden en de resultaten van de variantie-analyse weergegeven.

Tabel 9 Gemiddelden en resultaten van de variantie-analyses van de elementvoorraden in het gehele profiel na de verschillende inrichtingsmaatregelen. Significante verschillen tussen behandelingen worden aangegeven met verschillende letters (a,b,c,d,e) na toetsing met de Tukey-test: ($p < 0.005$).

Behandeling	Voorraad (kg/m ²) in profiel tot 5 cm-mv					
	C-vrd	N-vrd	P-vrd	Pan-vrd	K-vrd	H-vrd
R	4.02 ^a	0.1417 ^c	0.01082 ^a	0.00192 ^d	0.00612 ^a	0.01622 ^b
K	3.37 ^b	0.1822 ^b	0.00976 ^b	0.0025 ^c	0.00548 ^b	0.01274 ^c
S	3.62 ^b	0.1983 ^a	0.01112 ^a	0.00232 ^c	0.0051 ^c	0.0199 ^a
P	0.34 ^d	0.024 ^e	0.00596 ^d	0.00416 ^a	0.00146 ^e	0.00326 ^d
Ref	0.75 ^c	0.071 ^d	0.00806 ^c	0.00358 ^b	0.00244 ^d	0.00342 ^d
Overall	2.42	0.1234	0.00914	0.00290	0.00412	0.01111
Vr	37.48	22.63	6.87	15.11	26.44	32.49
P	<.001	<.001	0.002	<.001	<.001	<.001

df1=4; df2=17 VR>2.98

Opvallend is dat lang niet in alle gevallen sprake is van een afnemende voorraad in de volgorde (R=K)>S>Ref>P, hetgeen gegeven de aard van de inrichtingsmaatregelen verwacht zou mogen worden. Alleen de koolstofvoorraden lijken min of meer volgens de verwachting te verlopen. Opvallend is dat in de S-vlakken de grootste N-P- en H-voorraad aanwezig lijkt, terwijl daar juist strooisel verwijderd is. In de plagvlakken komen van de meeste elementen, met uitzondering van de anorganische fosforvoorraad, de laagste voorraden voor. In de referenties buiten het bos is de koolstof-, stikstof-, fosfor en kaliumvoorraad groter dan in de plagvlakken, maar lager dan in de overige vlakken.



Figuur 5 Voorraden van verschillende elementen in de onderzochte profielen na de verschillende inrichtingsmaatregelen

Mogelijk dat de moeilijk te interpreteren verschillen tussen de behandelingen zijn terug te voeren op de berekeningsgrondslag van de voorraden. Bij de berekening is verondersteld dat het bulkgewicht een functie is van het organische stofgehalte. Maar het is goed denkbaar dat bij de uitvoering van de maatregelen door betreding een grotere compactie van de achterblijvende strooisellagen is opgetreden. Hierdoor zou de bulkdichtheid groter kunnen zijn geworden dan verondersteld. De dikte van de F2+H horizont van de S-behandeling is zeer zwak significant ($0.05 < P < 0.10$) groter

dan in de R- en K-behandelingen. In combinatie met de grotere compactie van deze horizont zou dit eveneens een verklaring voor de gevonden verschillen kunnen zijn.

Om iets meer zicht te krijgen op een verklaring voor de moeilijk interpreteerbare verschillen in elementvoorraden zijn eveneens variantie-analyses uitgevoerd met voorraden per horizont. In tabel 10 zijn de resultaten gepresenteerd.

Tabel 10 Gemiddelden en resultaten van de variantie-analyses van de elementvoorraden per horizont na de verschillende inrichtingsmaatregelen. Significante verschillen tussen behandelingen worden aangegeven met verschillende letters (a,b,c,d,e) na toetsing met de Tukey-test: L+F1 ($p < 0.05$), F2+H ($p < 0.017$), Ah ($p < 0.0083$), C ($p < 0.05$).

Behandeling	Voorraad (kg/m ²) in L+F1					
	C-vrd	N-vrd	P-vrd	Pan-vrd	K-vrd	H-vrd
R	1.26	0.056	0.00222	0.00034	0.00254	0.00334
K	1.01	0.04	0.00150	0.00020	0.00194	0.00230
S						
P						
Ref						
Overall	1.14	0.048	0.00186	0.00027	0.00224	0.00282
Vr	1.63	2.98	3.12	2.28	0.66	2.81
P	0.27	0.16	0.152	0.206	0.461	0.169

df1=1; df2=5; VR>6.61

Behandeling	Voorraad (kg/m ²) in F2+H					
	C-vrd	N-vrd	P-vrd	Pan-vrd	K-vrd	H-vrd
R	1.39 ^b	0.074 ^b	0.00238 ^b	0.00028 ^b	0.00154 ^b	0.00496
K	1.28 ^b	0.068 ^b	0.0022 ^b	0.00022 ^b	0.00146 ^b	0.00434
S	2.29 ^a	0.108 ^a	0.00432 ^a	0.00052 ^a	0.00266 ^a	0.00776
P						
Ref						
Overall	1.65	0.0833	0.00297	0.00034	0.00189	0.00569
Vr	9.6	5.15	8.62	18.44	17.22	4.89
P	0.007	0.037	0.01	0.001	0.001	0.041

df1=2; df2=9; VR>4.26

Behandeling	Voorraad (kg/m ²) Ah					
	C-vrd	N-vrd	P-vrd	Pan-vrd	K-vrd	H-vrd
R	1.374 ^a	0.096	0.0062 ^b	0.0013 ^c	0.00204	0.0079 ^a
K	1.086 ^a	0.076	0.0061 ^b	0.0021 ^b	0.00206 ^c	0.00608 ^b
S	1.326 ^a	0.092	0.0068 ^{a,b}	0.0018 ^b	0.00244 ^a	0.00722 ^{a,b}
P						
Ref	0.754 ^b	0.072 ^a	0.00806 ^a	0.00358 ^a	0.00244 ^a	0.00342 ^c
Overall	1.14	0.084	0.00679	0.00219	0.00225	0.00616
Vr	8.5	2.8	2.82	18.08	1.57	10.51
P	0.003	0.085	0.084	<.001	0.247	0.001

df1=3; df2=12; VR>3.49

Behandeling	Voorraad (kg/m ²) C(0-5)					
	C-vrd	N-vrd	P-vrd	Pan-vrd	K-vrd	H-vrd
Ref	0.754 ^a	0.072 ^a	0.00806	0.00358	0.00244 ^a	0.00342
P	0.338 ^b	0.024 ^b	0.00596	0.00416	0.00146 ^b	0.00326
Overall	0.55	0.048	0.00701	0.00387	0.00195	0.00334
Vr	18.46	17.19	4.85	2.94	400.17	0.05
P	0.013	0.014	0.093	0.162	<.001	0.834

df1=1; df2=5; VR>6.61

In de L+F1 horizont zijn geen verschillen aanwezig. De meest verschillen komen voor in de F2+H horizont. Met uitzondering van de H-voorraad is van alle

elementen in de F2 + H in de S-vlakken een significant grotere voorraad aanwezig dan bij de andere behandelingen. Opvallend is dat in de S-vlakken daarentegen juist significant lagere N-tot gehalten werden gemeten.

In de voorraden van de Ah-horizont komen lastig te interpreteren verschillen voor. Er komen geen verschillen in koolstof-, stikstof- en fosforvoorraden voor tussen de behandelingen. De koolstof- en stikstofvoorraad van de behandelingsvlakken is significant groter dan in de referentie buiten het bos. De stikstofvoorraad in de kapvlakte wijkt echter niet significant af van die in de referentie. De fosforvoorraad is in de referentie juist significant groter dan bij de behandelingen. In de S-vlakte is echter geen significant verschil aanwezig met de referentie. Ook de anorganische fosforvoorraad is in de referentie significant groter dan bij de behandelingen. In de K- en S-vlakken is de voorraad groter dan in de R-vlakken. De kaliumvoorraad in de referentie is even groot als in de S-vlakken. De voorraad in de K-vlakken is significant lager dan in de S-vlakken.

De voorraden in de laag 0-5 cm-mv van de referentievlakken buiten het bos zijn ook vergeleken met de voorraad in de C-horizont (0-5 cm) van de plagplekken. De koolstof-, stikstof- en kaliumvoorraad zijn in de referenties significant hoger dan op de plagplekken. Voor de fosfor- en waterstofvoorraden zijn geen significante verschillen gevonden.

3.2 Conclusies

Uit de profielbeschrijvingen kan de algemene conclusie worden getrokken dat:

- er significante verschillen aanwezig zijn tussen de gemiddelde ontkalkingsdiepte van de verschillende behandelingen.
- er geen verschillen zijn in de dikte van de Ah-horizont van de behandelingsvlakken en van de referentievlakken buiten het bos.

De bodemchemische samenstelling is in algemene termen te beschrijven naar de basentoestand, de voedingstoestand en de eutrofiëringstoestand.

- De basentoestand van de strooiselhorizonten onderscheid zich duidelijk van die van het niet ontkalkte C-materiaal door waarden van de pH-KCl < 4 en waarden van Ca-verzadiging < 35%. De Ca-verzadiging en de pH van de L+F1 horizont zijn sterk significant hoger dan die van de F2+H horizont. De basentoestand van de Ah-horizont van de referenties buiten het bos (Ref 0-5) is aanzienlijk hoger dan die van de behandelingsvlakken.
- De C/N-verhouding van de L+F1 horizont is significant lager dan die van de F2+H horizont. Vergeleken met de referenties buiten het bos is de C/N verhouding in de Ah-horizont van de behandelingsvlakken significant hoger.
- In de L+F1 en F2+H horizonten komt fosfor vooral in organische vorm voor. In de Ah-horizont van de behandelingsvlakken is een belangrijke anorganisch fosforfractie aanwezig.

Met variantie-analyses is onderzocht of er na de inrichtingsmaatregelen bodemchemische verschillen aanwezig zijn tussen de verschillende vlakken.

- In de variabelen van de L+F1 horizont komen er geen significante verschillen voor tussen de vlakken na de inrichtingsmaatregelen.
- In de F2+H horizont is het N-totaal gehalte van de S-vlakken significant lager dan in beide andere vlakken na de inrichtingsmaatregelen
- Indien de referentievlakken buiten het bos buiten beschouwing worden gelaten zijn er geen significante verschillen aanwezig tussen de Ah-horizonten van de verschillende behandelingsvlakken.
- In de referentievlakken buiten het bos zijn de pH, de Ca-verzadiging, het anorganisch fosforgehalte en de anorganisch fosfaatfractie van de Ah-horizont significant hoger, terwijl het totaalstikstofgehalte en het organisch stofgehalte en de C/N verhouding lager zijn dan in de behandelingsvlakken.
- Na plaggen heeft de dagzomende horizont significant lagere waarden van het organische stofgehalte, het totaalstikstofgehalte, het totaal fosforgehalte en het gehalte uitwisselbaar kalium dan de dagzomende horizont van de referenties buiten het bos. Alleen de fractie anorganisch fosfor is significant hoger op de plagvlakken.
- In de diepere ondergrond (50 cm-mv) van de referenties binnen het bos zijn de pH en het uitwisselbaar kaliumgehalte significant lager en het organische stofgehalte en de calciumverzadiging significant hoger dan buiten het bos.

Het effect van de inrichtingsmaatregelen op de voorraad voedingsstoffen is onderzocht door de voorraden per horizont te berekenen en te sommeren over het onderzochte profiel.

- Opvallend is dat lang niet in alle gevallen sprake is van een afnemende voorraad in de volgorde (R=K)>S>P>Ref, hetgeen gegeven de aard van de inrichtingsmaatregelen verwacht zou mogen worden.
- Alleen de koolstofvoorraden lijken min of meer volgens de verwachting te verlopen. Opvallend is dat in de S-vlakken de grootste N- K- en H-voorraad aanwezig lijkt, terwijl daar juist strooisel verwijderd is.
- Mogelijk dat de grondslag voor de berekening van de voorraden een foutenbron is. Zowel de dikte van de F2+H horizont als een grotere compactie kunnen eveneens een verklaring voor de gevonden verschillen zijn.
- De meest verschillen komen voor in de F2+H horizont. Van vrijwel alle elementen is in de S-vlakken een significant grotere voorraad aanwezig dan bij de andere behandelingen.
- Ook in de Ah-horizont komen significante verschillen voor tussen de elementvoorraden van de verschillende behandelingen. Deze verschillen zijn niet eenduidig en daarom moeilijk te interpreteren.

Literatuur

Besse, M., 1995. Bodemonderzoek in dennenbossen en eikenbossen in de Amsterdamse waterleidingduinen.; inventariserend onderzoek naar de relatie tussen humusprofiel, bodem en vegetatie. Onderzoeksrapport UvA/GWA.

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

Fanta, J., 1986. Primary forest succession on blown-out areas in the Dutch drift sands. In: Forest dynamics research in Western and central Europe. J.Fanta (ed). Pudoc. Wageningen.

Giesen & Geurts, 2002. Analyserapport Amsterdamse waterleidingduinen.

Hommel, P.W.F.M., Th. Spek, R.W. de Waal, P.C. de Hullu & J. den Ouden, 2001. Terug naar het lindenwoud? Alternatieve boomsoortkeuze verhoogt ecologische en recreatieve waarde van bossen op verzuringsgevoelige gronden. Ned. Bosbouw Tijdschrift 73/6.

Kemmers, R.H. en R.W. de Waal, 1999. Ecologische typering van bodems. Deel 1 Raamwerk en humusvormtypologie. Rapport 667-1. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Payne, R.W. (Ed.), 2000. The guide to GenStat. Oxford. VSN International Ltd.

Sevink, J., R.H. Kemmers & I.M. Emmer, 1993. Soil research in Dutch forest reserves: the implications of spatial and temporal variability. In: European Forest reserves; proceedings of the European Forest Reserves workshop, may 1992. M.E.A. Broekmeyer, W. Vos and H. Koop (eds). Pudoc. Wageningen.

Sival, F.P., 1997. Dune soil acidification threatening rare plant species. Rijksuniversiteit Groningen. Proefschrift

Wesemael, J.Ch. van, 1955. De bepaling van het calciumcarbonaatgehalte van gronden. Chem. Weekblad 51.

Aanhangsel 1 Horizontdiktes en ontkalkingsdiepte

Proefvlak	Proefvelden Tonnenblink							
	hoekpunt1		hoekpunt2		hoekpunt3		hoekpunt4	
	L+F+H/Ah Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv	L+F+H/Ah Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv	L+F+H/Ah Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv	L+F+H/Ah Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv
Ap	0/0	0	0/0	5	0/0	3	0/2	0
As	4/5	8	5.5/?	10	4/5	8	4/5	?
Ak	7/5	9	7/8	8	?/5	?	4/?	12
Ar	7/5	11	7/?	15	5/5	8	8/5	15
Bp	0/10	0	0	2	0	0	0	0
Bs	4/6	11	2/4	6	2/3	6	3.5/7	7
Bk	4/5	11	4/5	9	7/3	5	4.5/9	8
Br	5/22	0	3/15	12	6/3	25		
Cp	0	0	0	0	0	0	0	0
Cs	7/7	17	4/10	18	5/5	10	7/10	17
Ck	5/18	8	5/4	3	2/5	8	5/0	3
Cr	7/10	10	3/6	14	2/8	20	4/10	16
Dp	0	3	0	0	0	0	0	0
Ds	2/2	10	3/7	9	2/6	4	0/25	>23
Dk	5/4	12	3.5/7	12	0/6	9	2/7	13
Dr	3/4	23	3/3	20	4/7	9	3/5	14
Ep	0/0	13	0/0	0	0/0	5	0/0	5
Es	4/7	14	0/6	14	6/13	14	5/2	9
Ek	7/2	13	5/8	18	3/8	14	2/9	9
Er	3/8	14	4/8	10	8/2	7	2/8	18

	Referentieplots							
	L+F+H/Ah		L+F+H/Ah		L+F+H/Ah		L+F+H/Ah	
	Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv	Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv	Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv	Dikte in cm	kalkrijk op: Diepte in cm-mv
R1	0/12	11	0/25	11	0/0	3	0/20	0
R2	0/5	0	0/0	0	0/0	0	0/6	12
R3	0/15	20	0/8	17	0/7	16	0/6	16
R4	0/9	17	0/6	6	0/6	8	0/8	10
R5	0/4.5	12	0/5	4	0/5	5	0/6	7

Opmerkingen

Ontkalkingsdiepte in cm. Dit gaat meestal samen met een zwakke podzol-B horizont. Ah-horizont kan ook een AB- of AC-horizont zijn.

Zandgrofheid tussen 180 en 240 µm. Ah bevat 1 - 2.5% organische stof.

C-horizont bevat fijn schelpgruis

Referentieplots hebben geen L+F+H. Wel een moslaag.

De gekapte veldjes zijn verstoord door wegslepen kaphout en takken.

De .s veldjes (geharkt en strooisel verwijderd) hebben nog een F en H-horizont. Deze is eveneens bemonsterd.

