



Vergelijking van fossiele en actuele bosbodems als basis voor herstel van bosgroeiplaatsen in Gelderland





Foto voorkant: bemonstering fossiele bosbodem onder een wal op landgoed De Velhorst (Natuurmonumenten).

Colofon

Titel: Vergelijking van fossiele en actuele bosbodems als basis voor herstel van bosgroeiplaatsen in Gelderland

Status: Definitief

Datum: 13 januari 2022

Auteur(s): A.A.M. Kieskamp & H. Smeenge

Projectgroep: Bosgroepen: A.A.M. Kieskamp, H. Smeenge, L.J.L. Van den Berg, G.H. Bulten
Onderzoekcentrum B-WARE: M. Van Mullekom, A.T.W. Smolders, R. Loeb

Financierders: SBNL Natuurfonds, Het Nationale Park De Hoge Veluwe, Provincie Gelderland, Natuurmonumenten, Geldersch Landschap & Kasteelen & Staatsbosbeheer, Stichting Het Drentse Landschap

Kaartmateriaal: Copyright © 2021, Dienst voor het kadaster en openbare registers, Apeldoorn

Projectnummer: 19.52.10301.03

© Coöperatie Bosgroep Midden Nederland u.a., 2022.
Bennekomseweg 43
6717 LL Ede
www.bosgroepen.nl



Samenvatting

Aanleiding

Verzuring van de bodem is een proces dat optreedt als de bodem zuurder wordt en de buffercapaciteit afneemt. Dit vindt van nature plaats, maar is zeer sterk versneld door de huidige en historische zuurdepositie veroorzaakt door de mens. De bodemchemie van de bossen is hierdoor uit balans geraakt met negatieve gevolgen voor het bodemleven en de vitaliteit van het bos. Er is daardoor een groot gevoel van urgentie ontstaan om iets te doen aan de verzuring van de bosbodems. Die daadkracht heeft als risico dat te snel over wordt gegaan tot generieke maatregelen. Veelal ontbreekt een goed referentiekader. Sommige bossen zijn van nature zuurder dan andere; het ene bos is het andere niet. De vraag is: hoe zag de bosbodemchemie er vroeger uit? En hoe verschilt die binnen het landschapsecologische gradiënt van rijkere naar armere groeiplaatsen in Gelderland?

Methode

Fossiele bodems, te vinden onder bijvoorbeeld houtwallen, blijken een goede referentie van de historische bodemchemie. Na begraving van de bodem nemen de biologische processen in de bodem af. Door fossiele bodems te vergelijken met de actuele bosbodems ernaast, kan wordt vastgesteld hoe de bosbodems in de loop van de jaren bodemchemisch gezien is veranderd. Voor een aantal bodemtypen van Gelderland is dit onderzocht.

Op 31 locaties is de fossiele bosbodems onder een wal en de ernaast gelegen actuele bosbodems bemonsterd. De locaties zijn verdeeld over vijf bodemtypen: keileem en oude rivierklei (rijk), holtpodzolgronden (matig rijk) en haar- en veldpodzolgronden (arm). Ter plekke zijn de bodemopbouw, vegetatietype en humusvorm beschreven. De bodemmonsters zijn geanalyseerd door Onderzoekcentrum B-WARE op voedingsstoffen, basen en pH. Vervolgens zijn per bodemtype de actuele en fossiele bodems vergeleken voor verschillende parameters.

Stikstofverrijking en verzuring van de bosbodems, vrijkomen van Al

De bodem (A- en B-horizont) is in de loop van tijd rijker geworden aan nitraat en ammonium, die een verzurend effect hebben op de bosbodems. Dit is een logisch gevolg van de verhoogde stikstofdepositie van afgelopen decennia. Deze heeft (samen met zwaveldepositie in de jaren '50-'90) gezorgd dat de bodem is verzuurd. Bij alle onderzochte bodemtypen is in voorliggend onderzoek een verlaging van de pH te zien: de fossiele A-horizont heeft in de historische situatie¹ een pH van 4,3-6,1, in de actuele situatie is dat 4-4,1. Een pH van <4,2 brengt met zich mee dat deze bodems zich niet meer in het kationbuffertraject bevinden, maar in het aluminiumbuffertraject. Dat betekent dat er geen kationen meer kunnen worden gebruikt om de zuren te bufferen, maar dat in plaats daarvan aluminium in oplossing gaat. Dat is al in lage doses giftig voor flora en fauna. Dit onderzoek laat zien dat de concentraties voor planten beschikbaar aluminium is toegenomen bij de haar- en holtpodzolgronden en de oude rivierklei.

¹ De periode voor de sterk verzurende invloed door menselijk handelen



Het moedermateriaal verweert; maar er is nog wel iets te halen

Ook het moedermateriaal (120 cm diepte) van de podzolgronden bleek zeer arm en zuur (weinig kationen, lage pH). Deze zandige bodems kunnen minder kationen binden dan de veel rijkere keileem- en oude rivierkleigronden. Vergelijking van de toplaag (A- en B-horizont) met het moedermateriaal op 120 cm diepte laat zien dat er voor de bomen nog wel 'iets te halen is'. De rijke bodems zijn 'slechts' oppervlakkig verarmd en nog (zeer) rijk op 120 cm diepte.

Perspectieven voor herstel

De vervolgvraag is wat deze bevindingen voor licht schijnen op de mogelijke én noodzakelijke maatregelen om de chemie van de bosbodem te herstellen of de kwaliteit daarvan te behouden. Eén van de belangrijkste maatregelen voor gezonde bosgroeiplaatsen is het *terugdringen van de huidige stikstofdepositie*. Dit is – zeker door een beheerder – niet op korte termijn op te lossen. Toch zijn er *perspectieven om de kwaliteit van de groeiplaatsen te verbeteren*.

- *Rijke bodems* zijn oppervlakkig verzuurd en daardoor relatief goed en eenvoudig te herstellen. Dit kan, afhankelijk van de hydrologische toestand en de rijkdom van de onderliggende bodemlagen, middels hydrologische maatregelen door sloten en greppels te dempen of te verondiepen.² Verder zijn op tal van dit soort plaatsen boomsoorten aangeplant met zuur en arm strooisel, waaronder fijnspar, beuk en eik, ten koste van soorten met rijker strooisel die op deze standplaatsen van nature voorkomen, zoals hazelaar, zoete kers, linde, esdoorn, inheemse vogelkers, iep en gewone es. Het vrijstellen van deze boom- en struiksoorten, in jonge fase bevoordelen of herintroduceren levert in combinatie met hydrologisch herstel een rijke en gezonde bosbodem op. De grootte van de wilddruk kan bij aanplant bepalend zijn voor het goed aanslaan van dergelijke rijkstrooiselsoorten.
- *Matig rijke bodems* (holtpodzolgronden) zijn ontwikkeld in relatief rijk (rivier)zand. Voorliggend onderzoek laat zien dat de holtpodzolgronden zeer sterk zijn verweerd en uitgeloozd, waarschijnlijk ook al vóór de verhoogde zwavel- en stikstofdepositie als gevolg van menselijk handelen. Ze zijn even arm als de (ook zeer arme) haarpodzolgronden. Bij een pH van <4,2 is aanbrengen van bufferende stoffen om de uitgeloozde toplaag aan te vullen het overwegen waard, met name om de nog aanwezige bosflora te behouden. Om de bufferende stoffen in de bodem te krijgen, is van belang dat voldoende soorten met rijk (goed afbreekbaar) strooisel aanwezig zijn.
- *Arme (droge) bodems* (haarpodzolgronden) zijn van nature zuur, maar door de verhoogde zwavel- en stikstofdepositie door menselijk handelen sterker verzuurd dan in de natuurlijke situatie het geval zou zijn geweest.
 - In oude, historische bossen (<1850) kan de zeer lage basenverzadiging het gevolg van een langdurige natuurlijke verzuring door inzijging. Oude bosbodems hebben een zeer specifieke soortensamenstelling, waaronder de bodemfauna. In de loop van de tijd kan een dikke "H-laag" ontstaan in het humusprofiel. Deze bevat een waardevol bodemarchief (pollen, koolstof) en zijn in Nederland nog maar schaars vertegenwoordigd. In bossen met

² Maatregelen voor versterken buffering en vochtvoorzienig in het wortelpakket zijn soms andere maatregelen dan die voor vernatten.



een dergelijke (dikker dan ± 5 cm) H-laag dient men daarom terughoudend te zijn met het verhogen van de zuurbufferende capaciteit.

- In jonge bossen is de situatie anders. Alleen het aanplanten van rijk-strooiselsoorten heeft naar verwachting vrijwel geen effect op herstel van de (van nature al geringe) buffering. De vermoedelijke oplossingsrichting is daarom het aanbrengen van bufferende stoffen als steenmeel. Om het effect van deze maatregel te verduurzamen (namelijk de mineralen in de bosbodem te behouden) kan het worden gecombineerd met het vrijstellen of in jonge fase bevoordelen van 'kwartiermakers' (rijk-strooiselsoorten met een lage nutriënteneis) zoals berk, ratelpopulier, boswilg, lijsterbes en vuilboom. Bij afwezigheid van deze soorten kan herintroductie worden overwogen.
- *Arme (vochtige) bodems* (veldpodzolgronden) zijn meestal van nature zuur tot zeer zwak gebufferd. Net als de vorige categorie zijn ze rijker geworden aan stikstof en verzuurd. Binnen 120 cm heeft de bodem op de onderzoekslocaties nog een relatief gunstige totale voorraad aan basische kationen. Deze bossen liggen vaak op rabatten, omdat ze van nature in de winter nat zijn. Herstel van de waterhuishouding is de eerste stap richting een gezonde bosgroeiplaats.³ Op plekken waar laagtes ontbreken en basenhoudend grondwater niet de wortelzone van de bomen beïnvloedt, is aanbrengen van bufferende stoffen als steenmeel een mogelijke oplossingsrichting, in combinatie met het vrijstellen of inbrengen van rijk-strooiselsoorten zoals eerder genoemd.

Maatregelen voor een 'gezondere bosgroeiplaats'

Uit voorliggend onderzoek blijkt het ene bos het andere niet. Samengevat zijn de volgende stappen (in deze volgorde) van belang voor een gezondere bosgroeiplaats:

- 1 | Herstel van de waterhuishouding door watergangen te verondiepen/dempen en/of naaldbos om te vormen naar loofbos
- 2 | Vrijstellen van rijk-strooiselsoorten (ook 'kwartiermakers'), of bij afwezigheid groeiplaats-inheemse soorten inbrengen
- 3 | Inbrengen van bufferende stoffen overwegen

Om te kunnen vaststellen welke maatregelen passend zijn voor een specifieke bosgroeiplaats, is onderzoek ter plekke van belang. In de praktische handleiding 'Op weg naar een gezondere bosgroeiplaats'⁴ wordt aandacht besteed aan het diagnosticeren van het bos en het vaststellen van de benodigde en passende maatregelen middels een beslisboom.

³ Maatregelen voor versterken buffering en vochtvoorzienig in het wortelpakket zijn soms andere maatregelen dan die voor vernatten.

⁴ Smeenge et al., 2021.



Evaluatie methode fossiele bodems

Het doel van voorliggend onderzoek was om een beeld te krijgen van de bodemchemie voorafgaand aan de stikstofdepositie, met onderscheid tussen verschillende bodemtypen binnen de hogere zandgronden van Gelderland. Daarvoor is gebruik gemaakt van fossiele bodems onder houtwallen uit ca. 1850–1930. Deze methode heeft het volgende gebracht:

- De effecten van stikstofdepositie op de toename van nitraat/ammonium, afname van de pH en toename van de aluminiumconcentratie zijn goed meetbaar.
- De verschillen tussen rijke en armere bosgroeiplaatsen zijn daarmee goed in beeld te brengen met betrekking tot pH, N en Al.

Er komt ook een aantal onzekerheden naar boven naar aanleiding van deze methode met fossiele bodems. Het onderzoek toont lagere concentraties kationen en voedingsstoffen onder de wal ten opzichte van de actuele bosbodem. Dit is mogelijk het gevolg van het ouder worden van het bos, daarmee het toenemen van de organische stof in de bodem, waarmee de concentraties kationen en voedingsstoffen ook toenemen. Echter kan ook zijn dat de fossiele bodems toch zijn beïnvloed door diep wortelende bomen op en nabij de houtwallen, die de kationen en voedingsstoffen hebben opgenomen. Hier is geen rekening mee gehouden bij aanvang van het onderzoek. In eerdere onderzoeken met fossiele bodems speelde dit niet, omdat deze als akker of grasland in gebruik waren.⁵

Het onderzoek toont aan de holtpodzolgronden sterk gedegradieerd zijn en nu even arm zijn als de haar- en veldpodzolgronden. De armoede van holtpodzolgronden is deels te verklaren door de heidegeschiedenis (net als de haarpodzolgronden). Degradatie van de holtpodzolgronden is dus al langer gaande dan sinds de stikstofdepositie. Vergroten van de steekproef met holtpodzolgronden op oude bosgroeiplaatsen is aanbevolen.

⁵ Spek, 2004 & Smeenge, 2020



Inhoudsopgave

1	Inleiding	9
1.1	Het probleem van verzurende bosbodems	
1.2	Eerst diagnose, dan het medicijn	
1.3	Fossiele bodems als referentie voor herstel	
1.4	Scope van het onderzoek	
1.5	Onderzoeksvragen	
1.6	Projectorganisatie	
1.7	Leeswijzer	
2	Aanpak	17
2.1	Fossiele bodems als vertrekpunt	
2.2	Afbakening onderzoeksgebied	
2.3	Selectie van onderzoekslocaties	
2.4	Veldonderzoek	
2.5	Biogeochemisch onderzoek	
2.6	Vergelijking actuele met fossiele bosbodem	
2.7	Doorkijk herstelmaatregelen	
3	Karakterisering van de Gelderse bosgroeiplaatsen	29
3.1	Geologie en bodem als basis	
3.2	Bodemtypen en hun belangrijkste kenmerken	
3.3	Humusvormen	
3.4	Vegetatietypen	
3.5	Synthese standplaatskarakterisering	
4	Rijkdom moedermateriaal in relatie tot bodemtype	36
4.1	pH	
4.2	Magnesium (Mg) en kalium (K)	
4.3	Som basische kationen (SBK)	
4.4	Fossiele moedermateriaal	
4.5	Conclusie moedermateriaal	
5	Fossiele versus actuele bosbodem (A- en B-horizont)	43
5.1	Stikstof (N)	
5.2	Fosfor (P)	
5.3	Kalium (K)	
5.4	pH	
5.5	Aluminium (Al)	
5.6	Som basische kationen (SBK)	
5.7	Basenverzadiging	
5.8	Organisch-stofgehalte	
5.9	PCA	
5.10	Conclusies A- en B-horizont	



6	Conclusies en discussie	59
6.1	Verzuring van de A- en B-horizont, vrijkomen van Al	
6.2	Het moedermateriaal verweert; maar er is nog wel iets te halen	
6.3	Weinig kationen, fosfor en kalium; maar toename t.o.v. fossiele bodems	
6.4	Meer organische stof door ouderdom en veranderingen beheer	
6.5	Evaluatie methode fossiele bodems	
7	Perspectieven voor herstel	64
7.1	Rijke bodems	
7.2	Matig rijke bodems	
7.3	Arme (droge) bodems	
7.4	Arme (vochtige) bodems	
7.5	Maatregelen voor een 'gezondere bosgroeiplaats'	
	Literatuur	67
	Bijlagen	70

1 Inleiding

1.1 Het probleem van verzurende bosbodems

Bossen vervullen diverse functies. Denk aan het behoud van biodiversiteit, hun bijdrage aan de kwaliteit van onze leefomgeving, het filteren van ons water en de lucht die we inademen, maar ook erosiebestrijding en het vastleggen van CO₂. Bovendien leveren bossen met hun hout één van de meest duurzame grondstoffen.

Het gebruik van bossen is door de eeuwen heen sterk veranderd (Tekstkader 1). Gelderland is momenteel de meest bosrijke provincie van Nederland⁶, maar tot 200 jaar geleden was er nauwelijks bos. De zogenaamde 'woeste gronden' werden pas vanaf 1850 bebost met hoofdzakelijk grove den met aanvankelijk vooral een productiefunctie. Sindsdien hebben grote veranderingen plaatsgevonden die doorwerken in de kwaliteit van deze bossen (Tekstkader 1). De grondwaterstanden daalden sterk met verdroging en verzuring als gevolg. Vanaf de jaren '50 ontwikkelde de landbouw zich sterk, evenals verkeer en industrie. De mensen beïnvloedden het milieu sneller en intensiever dan tijdens de perioden daarvoor. Emissies van stikstof en zwavel leidden tot verzuuring van de bossen en verdere verzuring van de bodem.⁷

Verzuring van de bodem is een proces dat optreedt als de bodem zuurder wordt en de buffercapaciteit van de bodem afneemt⁸. Dit proces vindt van nature plaats. Relatief zure bossen zijn kenmerkend voor de Pleistocene zandgronden door de uitloging vanuit het neerslagoverschot die vanaf het laatste glaciaal plaatsvond.⁹ De verzuring werd echter zeer sterk versneld door de huidige (en historische) zuurdepositie veroorzaakt door de mens. De bodemchemie van de bossen is hierdoor uit balans geraakt door zowel de verzuring vanuit de lucht als de verminderde mineralenbuffering vanuit het grondwater.¹⁰ De achteruitgang van het bodemleven wordt hieraan gerelateerd.¹¹ In de verzuurde bodems zijn nauwelijks wormen of ander voedsel voor vogels te vinden.¹² Ook de bomen hebben te lijden onder deze arme, verzuurde omstandigheden, zo is er een relatie met eikensterfte.¹³



Figuur 1: Groep afgestorven zomereiken binnen Het Nationale Park De Hoge Veluwe met natuurlijke verjonging van grove den en douglas.

⁶ www.clo.nl

⁷ Crutzen & Stoerner, 2000; Braje, 2015

⁸ De Graaf et al., 1997

⁹ Iversen, 1958.

¹⁰ Van den Berg et al., 2018, Desie et al., 2019, Desie et al., 2020.

¹¹ O.a. Nijssen et al., 2017.

¹² Pabian, et al., 2012; Van den Burg, 2017.

¹³ Oosterbaan et al., 2014.

Tekstkader 1: Bosontwikkeling in Nederland in de tijd.

Het gebruik van bossen is door de tijd gezien sterk gewijzigd. Voordat de mens landbouw ging bedrijven (ca. 5.000–4.200 v.C.) bestond Nederland op de venen na grotendeels uit een boslandschap. Vervolgens werden deze bossen steeds intensiever gebruikt voor bouwhout, brandstof, loofvoederwinning, beweidingsgebied of het steken van plaggen. Vanaf de middeleeuwen werd het bos zelfs schaars en werden strenge verordeningen opgesteld om het gebruik te beperken. Misbruik werd bestraft door ophanging of uithuisplaatsing. Vanaf de 17^{de} eeuw werden eiken- en beuken aangeplant, telgenkampen (kwekerijen) aangelegd in het landelijk gebied en ontstonden er heel andere bossen dan die van nature voorkomen, blijkt uit onderzoek naar pollensamenstelling.¹⁴ Tot in het begin van de 20^{ste} eeuw werd strooisel gewonnen en tot aan de jaren '70 werden tak- en tophout verwijderd. Na de vondst van aardgas in de jaren '60 van de vorige eeuw werd het beheer van onze bossen gaandeweg anders. We kunnen stellen dat het bos en daarmee ook de ecologie in deze oude bossen diverse veranderingen hebben ondergaan in het samenspel tussen mens en natuur.

Winning van strooisel als meststof was tot in het begin van de 20^{ste} eeuw een veel voorkomend verschijnsel. Op lange termijn betekent strooiselwinning een aanzienlijke verarming van de bosbodem, op kortere termijn een verhoging van de kans op vestiging van bosplanten.



Staatsbosbeheer / Foto Natura

Bosbeeld in heidebebossing aan het begin van de 20ste eeuw. Bron: Hommel et al., 2007.

Naast de ontwikkeling van deze 'oude bossen' zijn er de heidebebossingen, waaruit het grootste deel van de bossen in Gelderland bestaan. Vanaf de verdeling van de gemeenschappelijke ongecultiveerde gronden rond 1850 werden deze delen bebost met dennen, later ook eiken of beuken. Natte plekken werden ontwaterd door de aanleg van rabatten, tochtsloten en veelal werden de bodems bewerkt voorafgaand aan de aanplant. De Landelijke Werkgroep Kritisch Bosbeheer is in 1977 opgericht in reactie op deze intensieve houtteelt. Daarmee is langzaam een verandering ingezet en kwam ook het geïntegreerd bosbeheer. De klassieke productiebossen kwamen daardoor steeds minder voor. De productiedoelstelling van deze bossen is verbreed met natuurdoelstellingen waardoor er meer ruimte kwam voor loofhout, structuur, dood hout en natuurlijke verjonging.

¹⁴ Koop & Smeenge, 2016; Smeenge, 2020.



1.2 Eerst diagnose, dan het medicijn

Er is een groot gevoel van urgentie ontstaan om iets te doen aan de verzuring van de bossen. Gedacht én ook al gewerkt wordt aan introductie van boomsoorten zoals linde, hazelaar en esdoorn, die bodem-organische stof verhogen, bodemleven stimuleren en de kationbeschikbaarheid verbeteren. Zo kunnen bomen als “nutriëntenpomp” kationen uit diepere bodemlagen beschikbaar maken.¹⁵ Ook wordt geëxperimenteerd met toevoegen van mineralen aan de bodem, veelal in de vorm van steenmeel.¹⁶ Die daadkracht heeft als risico dat te snel over wordt gegaan tot maatregelen, zonder dat bekend is wat en hoe groot de problemen op specifieke locaties zijn.

1.3 Fossiele bodems als referentie voor herstel

Het bossysteem is gevormd door een combinatie van geologisch substraat, het reliëf, hydrologische processen, de vegetatie en cultuurhistorische invloeden. Al deze factoren komen grotendeels terug in de bosbodem en bepalen in grote mate de groeiplaatskenmerken van het bos.¹⁷ Veelal ontbreekt een goed *referentiekader* voor de specifieke locatie. Sommige bossen zijn van nature relatief rijk, zoals vogelkers-essenbossen. Andere bossen zijn van nature zuurder, zoals oude eikenbossen. De vraag is: hoe zag de bosbodemchemie er vroeger uit? En hoe verschilt die binnen het landschapsecologische gradiënt van rijkere naar armere groeiplaatsen in Gelderland?

Er is een eerdere poging ondernomen om een referentie te schetsen. Bergsma et al. (2016) onderzochten in Het Nationaal Park De Hoge Veluwe hoeveel en welke mineralen er zijn verdwenen uit de bodem, met welke snelheid en hoeveel ervan door menselijk toedoen. Zij stelden dat de antropogeen versnelde vertering van mineralen in de bodem in de afgelopen 74 jaar overeenkomt met een natuurlijke vertering van 8500 jaar. Versnelde vertering als gevolg van de verhoogde zwavel- en stikstofdepositie is aannemelijk en algemeen geaccepteerd. Echter overschat publicatie de verzuring mogelijk, door de aanname dat uitloging van een bodem lineair verloopt. Het is echter aannemelijk dat uitspoeling van mineralen sneller verloopt bij een jonge bodem, gezien het ontbreken van organische stof in de toplaag. Vergelijken van uitspoeling binnen 74 jaar met die in 11.500 jaar is daarmee onzeker, waardoor de verzuring wordt onderschat. Het onderzoek van Bergsma et al. is daarnaast gebaseerd op één onderzoekslocatie, terwijl vertering waarschijnlijk verschillend verloopt (of is verlopen) bij verschillende bodemtypen.

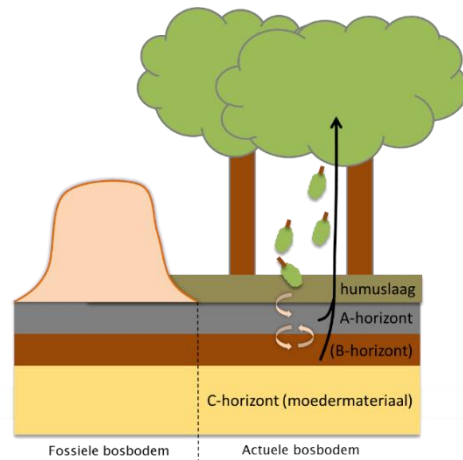
¹⁵ Hommel et al., 2007.

¹⁶ De Vries et al., 2018.

¹⁷ Jenny, 1941 & 1980; Bakker et al., 1981; Kemmers & De Waal, 1999.



In dit onderzoek maken we gebruik van **fossiele bodems** onder houtwallen (Figuur 2 *Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.*). Na begraving van de bodem nemen de biologische processen in de bodem af. Eerder onderzoek naar fossiele bodems onder plaggen toont aan dat zelfs mobiele elementen als stikstof en kalium niet uit lijken te spoelen, waardoor een goed beeld kan worden verkregen van de bodemchemische kenmerken voorafgaand aan begraving (Tekstkader 2 *Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.*).¹⁸ Van horizontale invloed in de bodem is nauwelijks sprake.¹⁹ Door de chemie van fossiele bosbodems te vergelijken met actuele bosbodems naast bijvoorbeeld de houtwal, kan wordt vastgesteld hoe de bosbodem in de loop van de jaren bodemchemisch is veranderd. Hieruit volgen de knelpunten en de potenties en daarmee passend bos- en natuurherstel.



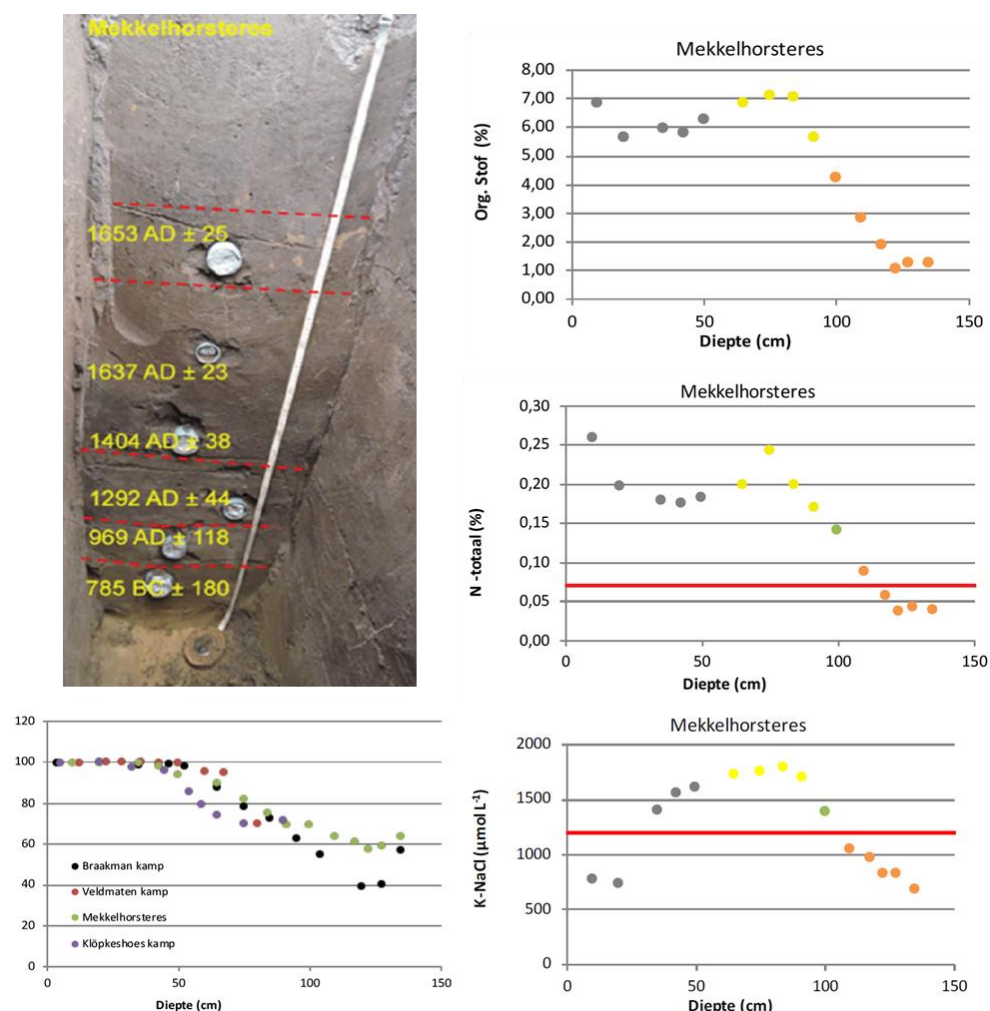
Figuur 2: Schematische weergave fossiele bosbodem (onder wal) en actuele bosbodem (onder invloed van bos, bodemleven etc.).

¹⁸ Spek, 2004; Smeenge, 2020.

¹⁹ Guo & Siepel, 2020.

Tekstkader 2: Onderzoek chemie van fossiele bodems uit Smeenge, 2020.

In Noordoost-Twente zijn plaggenbodems en hun onderliggende natuurlijke bodems (holtpodzolgronden en haarpodzolgronden) met oude akker- en plaggenlagen bestudeerd op basis van veldbodemkundigonderzoek in combinatie met OSL-dateringsonderzoek, pollenonderzoek en bodemchemisch onderzoek. Het bleek dat de diverse bodemlagen goed te dateren waren en hun laagkenmerken hadden behouden. Dit betekent dat er zelfs voor mobiele elementen als stikstof en kalium geen duidelijke aanwijzingen waren voor sterke verplaatsing naar diepere lagen. In de grafieken in onderstaande figuur tonen de oranje bolletjes het moedermateriaal, groene bolletjes organische plaggen, gele bolletjes bruine plaggen en zwarte bolletjes zwarte plaggen. De rode lijn symboliseert de bovengrens van limitatie (bodem bevat te weinig kalium of stikstof om te kunnen groeien). Dit betekent dat de grens tussen de natuurlijke bodems (top van de oranje bolletjes) en de plaggenbemesting (groen, geel en zwart) scherp is gebleven met een geringe mate van inspoeling (hooguit over 10cm). Na 10 cm onder het plagdek zien we een afvlakking en geen tekenen van inspoeling van bovenliggende lagen. De grafieken tonen voor zowel de basenverzadiging, kalium als stikstof dat fossiele bodems 10 cm onder het plagdek de chemische kenmerken behouden.

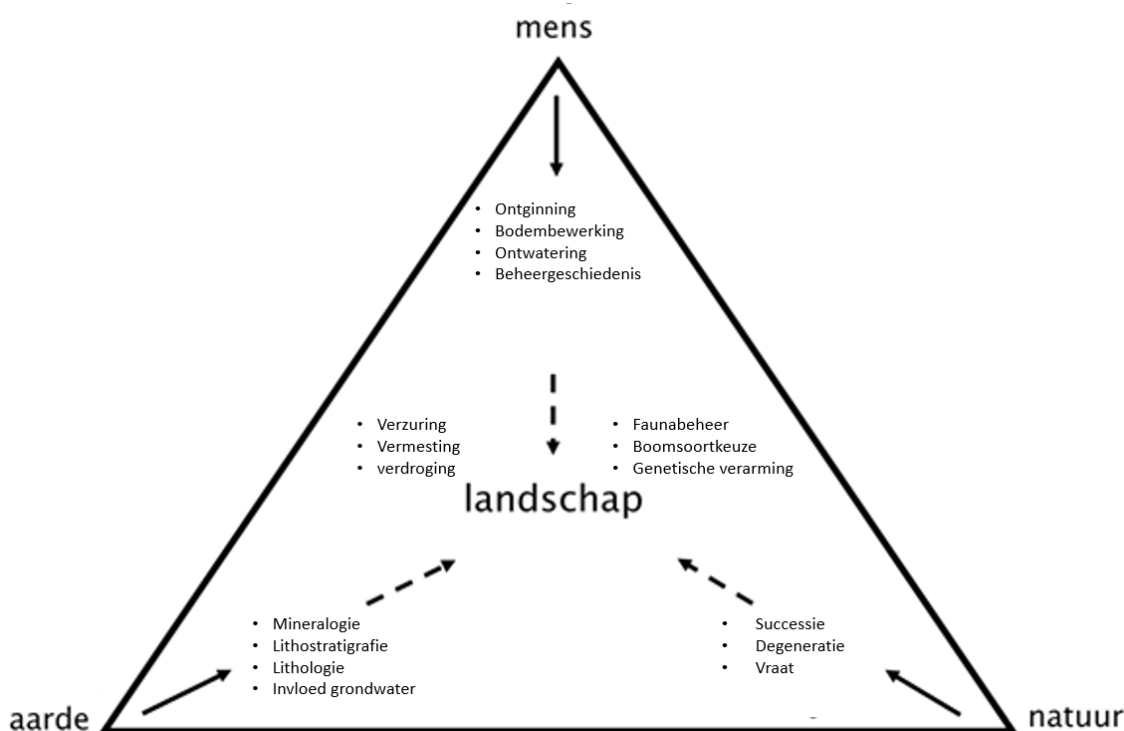


Fossiele bodems met hun bodemchemische kenmerken. Er zijn weinig aanwijzingen dat mobiele elementen als kalium (K) en stikstof (N) naar diepere lagen uitspoelen. De grens tussen de plaggenbodem (groen, geel en zwarte bolletjes) en natuurlijke bodem (oranje bolletjes) is scherp.

1.4 Scope van het onderzoek

Er zijn veel factoren die de vitaliteit van het bos beïnvloeden. Denk aan het voorkomen van slecht doorlatende lagen (bijv. oerbanken) waardoor in perioden van weinig neerslag snel droogtestress kan ontstaan. Ook kan door een verandering van hakhout- naar nietsdoenbeheer een hoog stamtal gekomen in het bos waardoor er teveel concurrentie is tussen de bomen. Het wel of niet reguleren van de wildstand leidt zeker op de Veluwe waar edelhert en wild zwijn naast andere wilde dieren voorkomen tot grote verschillen in natuurlijke verjonging van het bos.

Uit deze voorbeelden wordt duidelijk dat het landschap en daarmee ook het boslandschap wordt beïnvloed vanuit een samenspel tussen aarde, mens en natuur (Figuur 2).²⁰ De uitwerking op het bos verschilt van plek tot plek, maar kan pas volledig worden begrepen wanneer het onderzoek zich toespitst op al deze facetten.



Figuur 3: Benaderingswijze voor het doorgronden van het boslandschap (naar Smeenge, 2020).

Omdat er veel druk ligt op het uitvoeren van herstelmaatregelen is in dit onderzoek de focus gelegd op de variatie in aardkundige variatie van de Gelderse bossen. Dit biedt een basis voor herstelmaatregelen tegen verzuring en voorkomt dat een goede diagnose wordt overgeslagen. Omdat de verschillende driehoekspunten echter nooit los van elkaar kunnen worden gezien, is tijdens het onderzoek wel met een schuin oog naar de invloeden van de mens en ecologische veranderingen gekeken.

²⁰ Smeenge, 2020.



Het onderzoek richtte zich op *verzuringgevoelige bossen* in Gelderland. De problemen van verzuring en verdroging zijn niet overal even groot. Zo is de Veluwe gevoeliger voor verdroging en verzuring dan de Achterhoek, waar zowel rijkere bodems voorkomen als buffering vanuit grondwater kan plaatsvinden. Daardoor is de urgentie voor herstelmaatregelen anders voor rijkere dan armere bosgroeiplaatsen. In het onderzoek is het transect van rijke naar arme bosgroeiplaatsen in kaart gebracht. Daarbij ligt het zwaartepunt op de meest problematische gronden, namelijk de podzolgronden (veld-, haar- en holtpodzolgronden). Deze gronden hebben geen buffering vanuit grondwaterinvloed en zijn daarmee verzuringgevoelig.

In Drenthe is een vergelijkbaar onderzoek uitgevoerd. Om de steekproef te vergroten en daarmee de zeggingskracht voor een aantal voor Gelderland representatieve bosbodentypen te vergroten, zijn de onderzoeksresultaten van de locaties in Gelderland en Drenthe daarom gecombineerd.

1.5 Onderzoeksvragen

De kernvraag die het onderzoek beantwoordt, is:

Hoe kunnen passende maatregelen worden genomen ten gunste van de bossen van Gelderland, gebaseerd op een *standplaatskarakterisering* en een vergelijking tussen de *actuele* en *historische bodemchemie*?

Aan de hand van een onderzoek in de arme tot rijke bosgroeiplaatsen van Gelderland, zijn de volgende vragen beantwoord:

- Hoe zijn de bosgroeiplaatsen van Gelderland te karakteriseren (bodempopbouw, organisch-stofgehalte, humustypen, bodemchemie)?
- Wat zijn de verschillen tussen de actuele en historische bodemkenmerken?
- Wat betekent dit voor de mogelijke en noodzakelijke maatregelen om de bosgroeiplaats gezonder te maken (minder zuur) ten gunste van het bos?

1.6 Projectorganisatie

Financiering

Het onderzoek is gefinancierd door provincie Gelderland, Het Nationale Park De Hoge Veluwe, Staatsbosbeheer, Natuurmonumenten, Geldersch Landschap & Kasteelen en Stichting Het Drentse Landschap. Daarnaast is subsidie verstrekt door de SBNL via het Nora Croin-Fonds. Het onderzoek is uitgevoerd samen met Onderzoekcentrum B-WARE.

Begeleidingsgroep

Het onderzoek is begeleid door een begeleidingsgroep met de volgende deelnemers:

- SBNL: Maaike Brasz, Henk Siepel
- Provincie Gelderland: Leon Claassen
- Het Nationale Park De Hoge Veluwe: Leontien Krul & Jacob Leidekker
- Natuurmonumenten: Ellen Ter Stege, Roel Douwes, Ronald Popken
- Staatsbosbeheer: Arjan Snel, Douwe Joustra
- Geldersch Landschap & Kasteelen: Renske Terhürne, vanaf 1 mei 2020 André de Bonte



- Stichting Het Drentse Landschap: Bertil Zoer
- Rijksuniversiteit Groningen: Theo Spek

Overleggen

Er waren drie overlegmomenten:

1. Bij aanvang van het onderzoek om het plan van aanpak voor te leggen;
2. Na analyse van de resultaten van de bodemchemische analyses;
3. Aan het eind van het onderzoek om van gedachten te wisselen over de beoogde eindproducten.

Bij de overleggen was de begeleidingsgroep aanwezig, daarnaast Onderzoekcentrum B-WARE (Fons Smolders, Mark van Mullekom) en de Bosgroepen (Gerry Bulten, Harm Smeenge, Ariët Kieskamp, Leon van den Berg, Wouter Delforterie).

1.7 Leeswijzer

Hoofdstuk 2, de methode, gaat in op hoe de onderzoekslocaties zijn geselecteerd, het (veld)onderzoek is uitgevoerd en hoe de data zijn verwerkt. Hoofdstuk 3 geeft een karakterisering van de Gelderse bosgroeiplaatsen binnen de geselecteerde vijf bodemtypen (van arm naar rijk). Naast de bodemtypen laat dit hoofdstuk de aangetroffen humusvormen en vegetatietypen zien. Hoofdstuk 4 laat vervolgens zien of de veronderstelde rijkdom van de bodemtypen terug is te zien in de chemie van het moedermateriaal op 120 cm diepte. Bij hoofdstuk 5 is naar de chemie van de top laag (A- en B-horizont) gekeken, waarbij de fossiele met de actuele bosbodem is vergeleken. In hoofdstuk 6 zijn de conclusies samengevat en bediscussieerd. Hoofdstuk 7 gaat tot slot in op perspectieven voor herstel, voor de verschillende bodemtypen.

Parallel aan deze onderzoeksrapportage verschijnt een *handleiding met beslisboom*²¹ die beheerders helpt een eerste stap te zetten bij het 'diagnosticeren' van hun bosgroeiplaats, waaruit passende en noodzakelijke maatregelen volgen.

²¹ Smeenge & Kieskamp, 2021.



2 Aanpak

2.1 Fossiele bodems als vertrekpunt

Door de chemie van fossiele bosbodems te vergelijken met actuele bosbodems naast bijvoorbeeld de houtwal, kan wordt vastgesteld hoe de bosbodem in de loop van de jaren bodemchemisch is veranderd. Fossiele bodems zijn schaars en de het vaststellen van de ouderdom is zonder OSL-dateringsonderzoek²² onzeker. Het probleem van verzuring van vrij recente aard. Te oude fossiele bodems (bijv. middeleeuwen) geven mogelijk een te kritische referentie. Ten behoeve van dit onderzoek is met name gezocht naar fossiele bodems uit de periode 1850–1900. Op historische kaarten is te zien dat in deze periode veel wallen op kaart verschijnen. Tussen ca. 1820 en 1870 zijn namelijk de meeste woeste gronden geprivatiseerd en werd het begrenzen van bezit en voorkomen van vraat door schapen en wild middels wallen van belang. De bodemchemische kenmerken van de fossiele bodems onder deze wallen geven een referentie aan de situatie voor de grote verzuring door industrie, verkeer en landbouw.

2.2 Afbakening onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied is volgens een aantal stappen afgebakend, met als doel een redelijke zeggingskracht voor een aantal van de voor Gelderland representatieve bosbodems.

Stap 1: Oude bosbodems <1850

Om een goede vergelijking tussen de actuele en fossiele bosbodem mogelijk te maken, is het van belang dat een aanzienlijke tijd vóór het begraven van de fossiele bodems (meestal: aanleg van een wal) al bos aanwezig was op die locatie. Daarom in eerste instantie in GIS alleen geselecteerd op oud-boslocaties (<1850). Deze kaart is verstrekt door Wageningen University & Research.

Hierdoor vielen de jongere heidebebouwingen af, terwijl dit grote boscomplexen zijn die juist gevoelig zijn voor de 'ver'-thema's waaronder verzuring. Op verzoek van terreinbeheerders zijn daarom toch jongere boslocaties meegenomen. Het risico is dat deze een kortere of geen bosgeschiedenis hebben, waardoor de actuele en fossiele bodems lastiger te vergelijken zijn. De actuele bodems hebben immers een relatief veel langere bosgeschiedenis dan de fossiele.

In totaal zijn er 17 oud-boslocaties geselecteerd en 15 locaties met jonger bos (na 1850). Van deze 15 locaties zijn er vier locaties waarbij het bos en de wal tegelijkertijd zijn aangelegd (de fossiele bodem heeft dus een geschiedenis als heide). Op de overige 11 van de 15 locaties is de wal 25 tot 89 jaar na bosaanplant aangelegd.

Stap 2: Leden Bosgroepen + TBO's

Vervolgens zijn alle bosgebieden geselecteerd die in eigendom zijn van leden van de Bosgroepen. Daaronder vallen organisaties als Natuurmonumenten, Staatsbosbeheer, Het Nationale Park De Hoge Veluwe, Geldersch Landschap & Kasteelen, Provincie Gelderland en

²² Optically Stimulated Luminescence



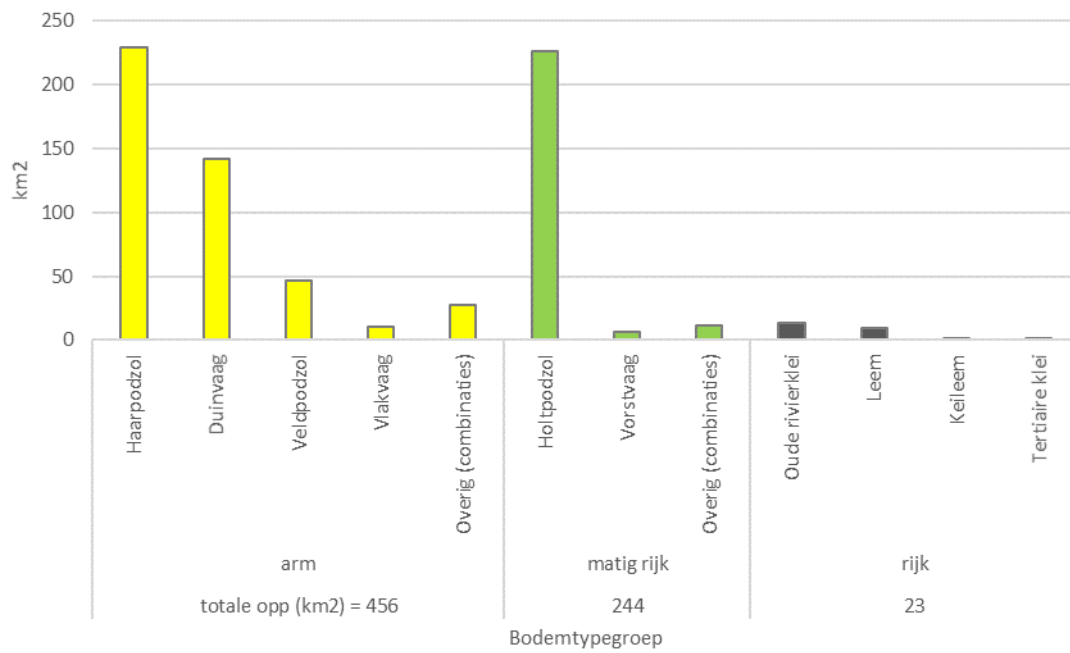
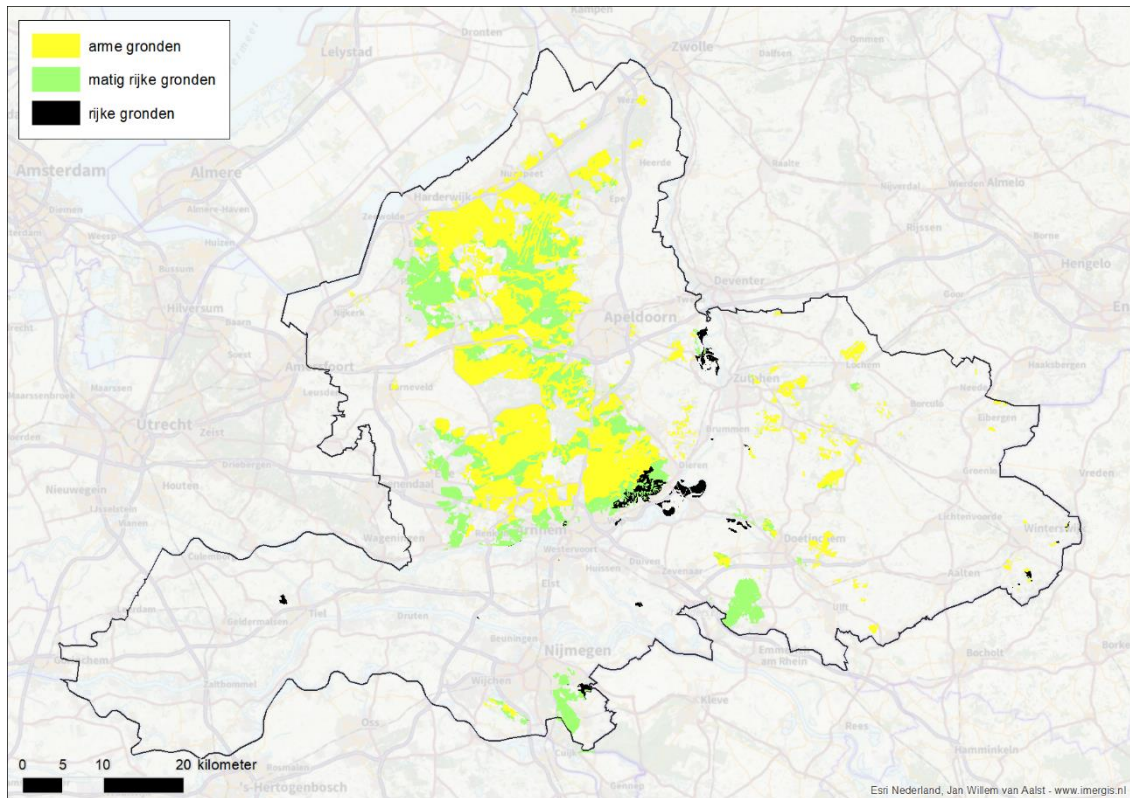
gemeenten, maar ook veel particuliere boseigenaren. In Drenthe is voorafgaand aan het Gelderse onderzoek een pilot uitgevoerd bij Natuurmonumenten het Stichting Het Drentse Landschap. Daarvan zijn vijf locaties meegenomen in voorliggend onderzoek om de steekproef te kunnen vergroten.

Stap 3: Cultuurgronden en grondwatergevoede bodems

Cultuurgronden (enkeerdgronden, laarpodzolgronden) zijn verwijderd uit de dataset, evenals grondwatergevoede bodems (leekeerdgronden en beekeerdgronden). Dit laatste is gedaan om uit te sluiten dat de geconstateerde verschillen in bodemchemie tussen actuele en fossiele bosbodems zijn veroorzaakt door veranderingen in hydrologie.

Resultaat

Voorgaande stappen resulteren in een overzichtskaart met de oude bosbodems, in eigendom van leden van de Bosgroepen, zonder de cultuur- en grondwatergevoede bodems. De bodems zijn geclusterd tot drie hoofdgroepen: arme, matig rijke en rijke bodems. Figuur 4 laat de verdeling over Gelderland zien. Het grootste areaal van het bosgebied ligt op de Veluwe. Haarpodzolgronden (230 km²) en holtpodzolgronden (225 km²) zijn het beste vertegenwoordigd.



Figuur 4: Verdeling van arme, matig rijke en rijke bodemtypegroepen over Gelderland, ingedeeld op basis van diverse criteria (zie tekst). Met categorie 'overig' worden vlakken bedoeld waar meerdere bodemtypen aan zijn gekoppeld (mozaïek).

2.3 Selectie van onderzoekslocaties

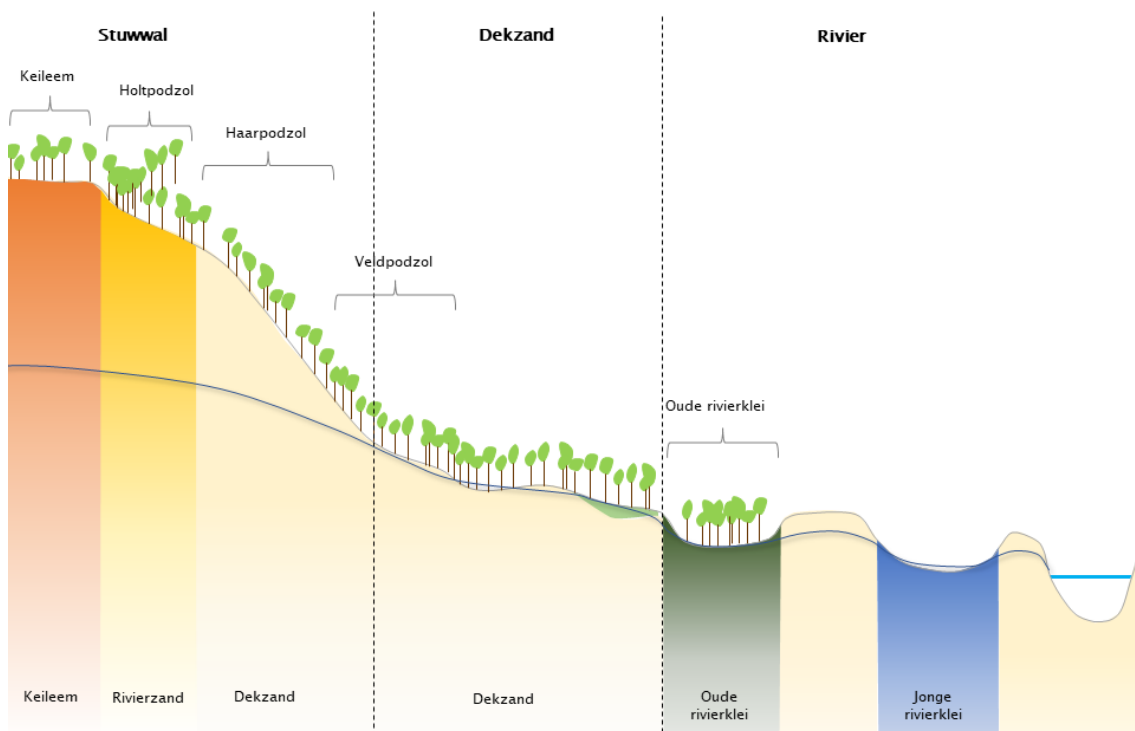
Voorgaande paragraaf eindigde met een kaart met het onderzoeksgebied, ingedeeld in *arme*, *matig rijke* en *rijke bodems*. Deze paragraaf beschrijft de stappen die zijn genomen om tot een serie onderzoekslocaties te komen.

Stap 1: Verspreiding over de verschillende ‘boslandschappen’ van Gelderland

Het streven was om de verschillende ‘boslandschappen’ van Gelderland in beeld te brengen. De onderzoekslocaties zijn verdeeld over het stuwwal-, dekzand- en rivierlandschap, met daarbinnen verschillende substraten (o.a. keileem, rivierzand) (Figuur 5).

Stap 2: Keuze voor bodemtypen

Binnen de gradiënt van rijke naar arme bodems is het zwaartepunt van het onderzoek gelegd op de podzolgronden (veld-, haar- en holtpodzolgronden). Deze zijn verzuringsgevoelig. Qua rijke bodems zijn ook enkele keileemgronden en een oude rivierkleigrond onderzocht ter vergelijking. De globale ligging van de bodemtypen in de verschillende landschappen van Gelderland is opgenomen in Figuur 5.



Figuur 5: Schematische weergave van de drie deellandschappen van Gelderland (stuwwal, dekzand, rivier), met daarbinnen de verschillende substraten (keileem, rivierzand, dekzand, rivierklei) en de bodemtypen.



Stap 3: Aanwezigheid geschikte fossiele bodems

Met het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3) zijn binnen de zones die uit voorgaande selectiestappen kwamen, wallen in het bos handmatig geselecteerd. Vervolgens is aan de hand van historisch topografische kaarten de ouderdom van deze wallen beoordeeld (wanneer verschijnt de wal op kaart?).²³ Deze wallen dienden het liefst zo jong mogelijk te zijn maar nog voor de toename van stikstofdepositie. Het gros van de wallen is echter (veel) langer geleden aangelegd, namelijk rond 1850, tijdens het privatiseren van de markegronden. Na ca. 1960 zijn vrijwel geen wallen meer aangelegd, vanwege alternatieve methoden voor landafscheidingen (hekwerken, prikkeldraad).

In principe vielen de wallen die voor 1850 zijn aangelegd af omdat bodemchemische veranderingen sindsdien aan teveel factoren kunnen worden geweten, niet vooral aan de stikstofdepositie. Soms, bij gebrek aan een jongere wal, is echter toch een dergelijke locatie meegenomen.

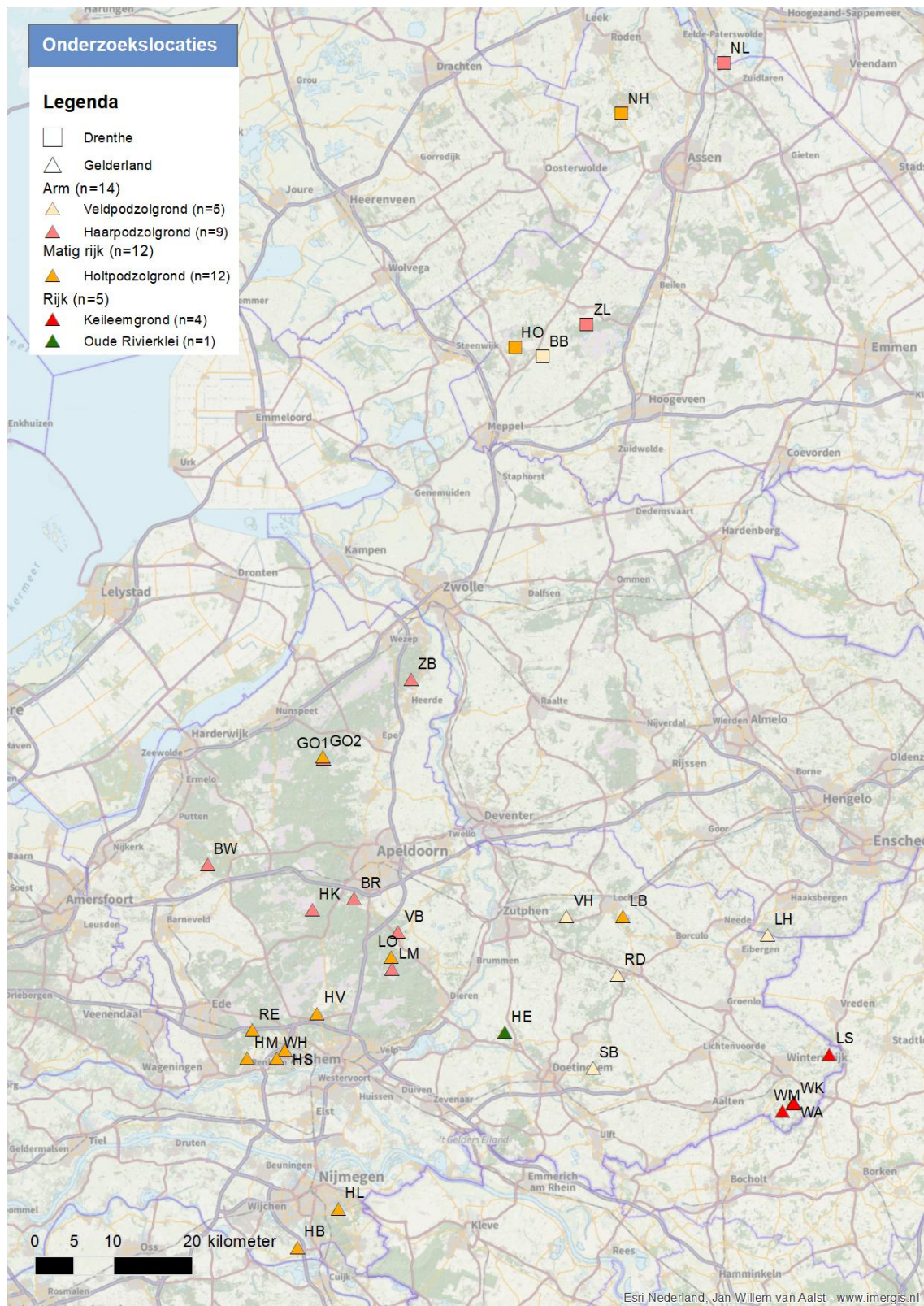
Stap 4: Check bij terreinbeheerders en archeologen

Als laatste stap zijn de locaties voorgelegd aan de desbetreffende terreinbeheerders en betrokken archeologen (mag een profielkuil gegraven worden in de wal?). Er zijn geen locaties afgevallen op basis van archeologische redenen. Door terreinbeheerders is zoals eerder aangegeven verzocht toch een aantal jongere boslocaties mee te nemen, vanwege de grootte van het areaal (heidebebossingen) en de gevoeligheid voor verzuring van deze bossen.

Resultaat

Het resultaat is een kaart met definitieve onderzoekslocaties (Figuur 6). Zoals aan het begin van deze paragraaf is uitgelegd, zijn ook Drentse locaties meegenomen in dit onderzoek. In Bijlage 1 zijn de coördinaten van de onderzoekslocaties opgenomen.

²³ Deze methode is niet waterdicht; sommige wallen staan niet op kaart. Tijdens het veldonderzoek bleek daardoor een aantal locaties te moeten afvallen, vanwege het vermoeden dat de wal ouder was dan de historisch topografische kaarten suggereren.



Figuur 6: Onderzoeklocaties (31) in Gelderland (26) en Drenthe (5) binnen arme, matig rijke en rijke bodemtypen.



2.4 Veldonderzoek

Beschrijving LESA-geofactoren

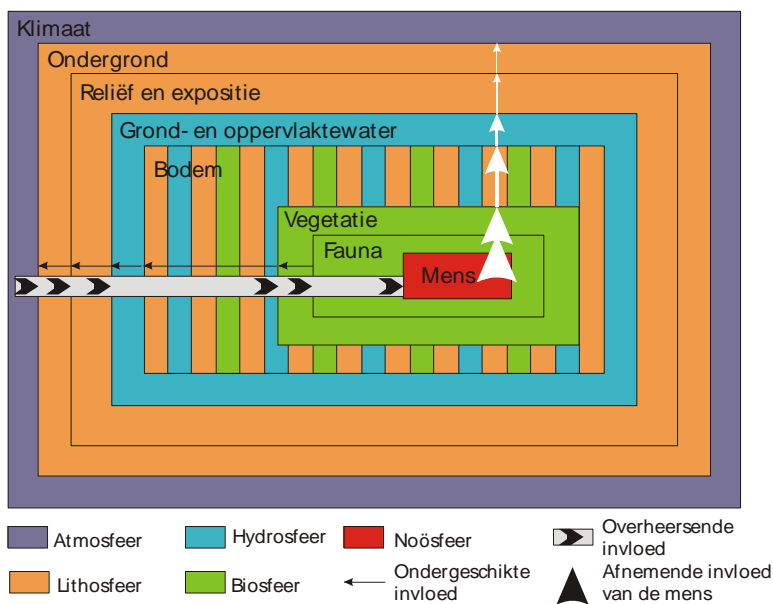
Van elke locatie zijn de geofactoren volgens de landschapsecologische systeemanalyse (LESA) beschreven (Figuur 7):

- Geologisch substraat
- Hydrologische kenmerken (bijv. podzol, pseudogley)
- Bodemtype (volgens Bakker & De Schelling (1989) en horizonten (volgens Ten Cate et al., 1995)*)
- Humusopbouw en -vorm volgens Van Delft et al. (2004) **
- pH-profiel van de bodem en humus (pH-strips Merck)
- Vegetatiesamenstelling: soorten in boom-, struik- en kruidlaag, met bedekking volgens Braun-Blanquet (1964).

*Voor de bodembeschrijving en het pH-profiel werd in het bos naast de wallen een boring gedaan met een Edelmanboor (Foto 1). De beschrijvingen van de fossiele bosbodem vonden echter plaats in een profielkuil (zie Foto 3), zodat het onderscheid tussen wallichaam en de fossiele bodem goed kon worden gemaakt. De kuil werd gegraven tot en met de fossiele B-horizont. In een latere fase is alsnog de C-horizont onder de wal bemonsterd, met een Edelmanboor.

**Voor het beschrijven van de humusopbouw werd een plag gestoken met een spade (Foto 2).

Alle humus- en bodemprofielen zijn gefotografeerd en de locaties zijn vastgelegd (RD-coördinaten).



Figuur 7: Rangorde van geofactoren uit de landschapsecologie (Bakker et al., 1981).



Foto 1: Voorbeeld profiel van de actuele bosbodem (veldpodzolgrond), uitgelegd van linksboven naar rechtsonder, in klassen van 40 cm (totale profiel is hier 200 cm).



Foto 3: Voorbeeld profielkuil bij Renkum (holtpodzolgrond). Met de rode stippellijn is de overgang van het wallichaam en de fossiele bodem aangegeven.



Foto 2: Voorbeeld humus'plag'.



Onderzoek fossiele versus actuele bodem

De geofactoren worden beschreven voor het actuele bos, en wanneer mogelijk ook voor de fossiele bosbodem. Tabel 1 geeft een overzicht.

Tabel 1: Onderzochte parameters bij de fossiele en actuele bosbodem.

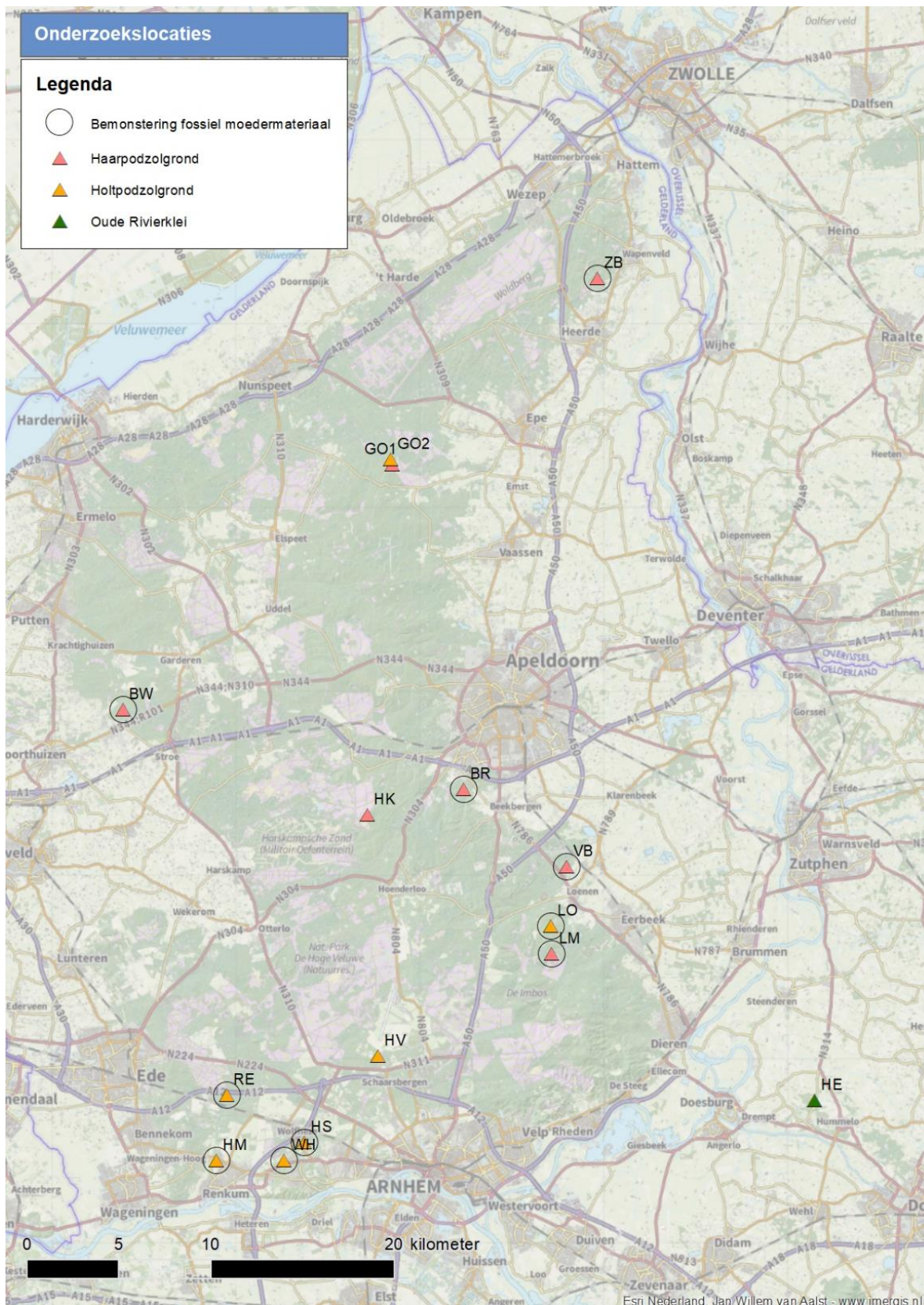
LESA-geofactoren	Fossiele bosbodem	Actuele bosbodem
Geologisch substraat	X	X
Hydrologische kenmerken	X	X
Bodemtype	X	X
Bodemopbouw	X (tot en met de fossiele B-horizont)	X (tot minimaal 120 cm-mv)
Humusopbouw + pH-profiel	n.v.t.	X
pH-profiel van de bodem	X	X
Vegetatiesamenstelling	n.v.t.	X
Bemonstering bodem:		
• A-horizont (0-10 cm)	X	X
• B-horizont (bovenkant)	X	X
• C-horizont (100-120 cm-mv)	**	X*

*alleen Gelderse locaties

**in latere fase alsnog bemonsterd op tien locaties, zie tekst

Onderzoekperiode

Het veldonderzoek is uitgevoerd in de periode april-juli 2020. De C-horizont is in eerste instantie niet bemonsterd in de fossiele bosbodem, vanwege de aanname dat het moedermateriaal van de actuele en fossiele bosbodem hetzelfde zouden zijn. Om te toetsen in hoeverre uitspoeling toch een rol speelt bij de bodemchemie van het diepere moedermateriaal, zijn in december 2020 alsnog de C-horizonten van de fossiele bosbodem bemonsterd op tien locaties in Gelderland (vijf haar- en vijf holtpodzolgronden).



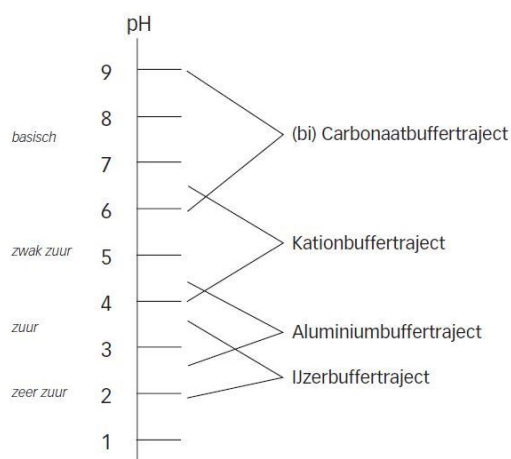
Figuur 8: Locaties waar het fossiele moedermateriaal (alsnog) is bemonsterd: vijf haar- en vijf holtpodzolgronden.

2.5 Biogeochemisch onderzoek

In totaal zijn er van 31 locaties bemonsterd. Van alle locaties zijn de fossiele en actuele A- en B-horizont, van de Gelderse ook de actuele C-horizont. Van tien Gelderse locaties is in een latere fase ook de fossiele C-horizont bemonsterd.

De bodemmonsters zijn door Onderzoekcentrum B-WARE met een destructie en zoutextract onderzocht op Al, Ca, Cl, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Si en Zn (in mol/L verse bodem). Daarnaast zijn de pH-NaCl, het vochtgehalte en organisch-stofgehalte (gloeiverlies) bepaald.

De pH-NaCl is later omgerekend naar pH-water middels een formule die gebaseerd is op de database van B-WARE. De som van de basische kationen ($\mu\text{eq/L}$) is bepaald met door de concentraties Ca, Mg en K (in $\mu\text{mol/L}$) te vermenigvuldigen met de valentie en deze vervolgens bij elkaar op te tellen: $\text{conc. Ca} \cdot 2 + \text{conc. Mg} \cdot 2 + \text{conc. K} \cdot 1$. De pH-water is vervolgens vergeleken met de buffertrajecten van de bodem. Bij een pH onder de 4,2 komen bodems namelijk in het aluminiumbuffertraject, waardoor aluminium vrijkomt, hetgeen giftig voor bomen en planten.



Figuur 9: Buffertrajecten in de bodem (bron: natuurkennis.nl).

2.6 Vergelijking actuele met fossiele bosbodem

Vervolgens is de historische bosbodem vergeleken met de actuele bosbodem om te beoordelen in hoeverre het actuele bos afwijkt van de situatie vóór de aanleg van de wal. Dit is gedaan aan de hand van:

- Grafieken van de belangrijkste parameters per bodemtype
- Een principale componentenanalyse (PCA) om uit grote hoeveelheid gegevens de 'hoofdcomponenten' te kunnen filteren en belangrijke relaties tussen parameters te onderzoeken. Onderzoekcentrum B-WARE heeft de PCA uitgevoerd na het standaardiseren en transformeren van de data, met het programma Canoco 5.04. De methode en resultaten zijn opgenomen in Bijlage 2. De belangrijkste resultaten worden ook besproken in de rapportage.



2.7 Doorkijk herstelmaatregelen

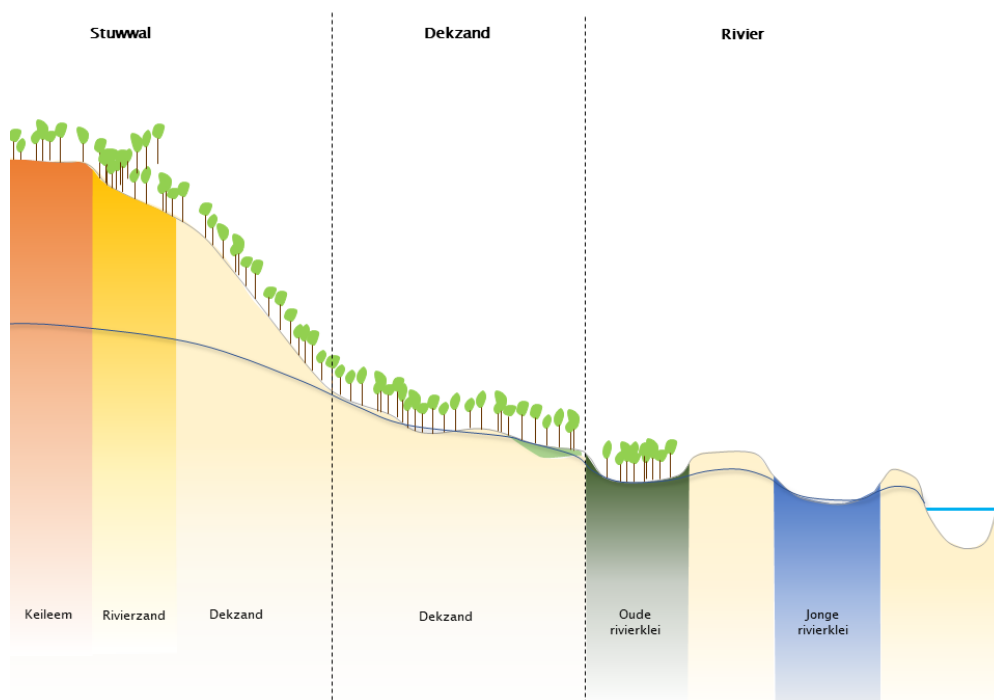
Aan de hand van de resultaten is vervolgens beoordeeld in hoeverre de bossen kunnen worden hersteld naar de situatie voordat de meeste verzuring heeft plaatsgevonden, en welke maatregelen daarvoor mogelijk zijn. Parallel aan deze rapportage is een handleiding uitgebracht waarin daarvoor een 'beslisboom' is uitgewerkt.²⁴ Het doel van deze handleiding is dat beheerders zelf een eerste diagnose kunnen opstellen van hun bosgroeiplaatsen, en kunnen beoordelen welke maatregelen passend en zinvol zijn.

²⁴ Smeenge & Kieskamp, 2022.

3 Karakterisering van de Gelderse bosgroeiplaatsen

3.1 Geologie en bodem als basis

De bodem is een product van een combinatie van het geologisch substraat, het reliëf, het grond- en oppervlaktewater, de vegetatie en mens.²⁵ Grofweg zijn bodems ontstaan door ofwel landijs (voorlaatste ijstijd), rivieren, wind of menselijke verstoringen. In Gelderland komen ze allemaal voor. Daarmee is er in potentie een heel grote ecologische variatie (Figuur 10).



Figuur 10: Schematisch overzicht van de verschillende milieus van bossen, met de natuurlijke grondwaterspiegel als blauwe lijn weergegeven.

Niet alle plekken in het landschap zijn van nature even rijk. Plekken buiten de invloed van grondwater zonder klei of leem verzuren van nature.²⁶ Desondanks is de ene plek beter bestand tegen verzuring dan de andere. Dit komt door het verschil in geologische afzetting. Gestuwde rivierzanden op de Oost-Veluwe (formatie van Urk en Waalre²⁷) of lössafzettingen op de Zuid-Veluwe (formatie van Boxtel²⁸) zijn rijker aan mineralen (holtpodzolgronden) dan kwartsrijke zanden van oostelijke herkomst (formatie van Peize en Appelscha²⁹) of jong dekzand (formatie van Boxtel) (haar- en veldpodzolgronden). Op deze haar- en veldpodzolgronden zijn weinig mogelijkheden om middels systeemherstel (zoals

²⁵ Jenny, 1941, 1980; Kemmers, 2002.

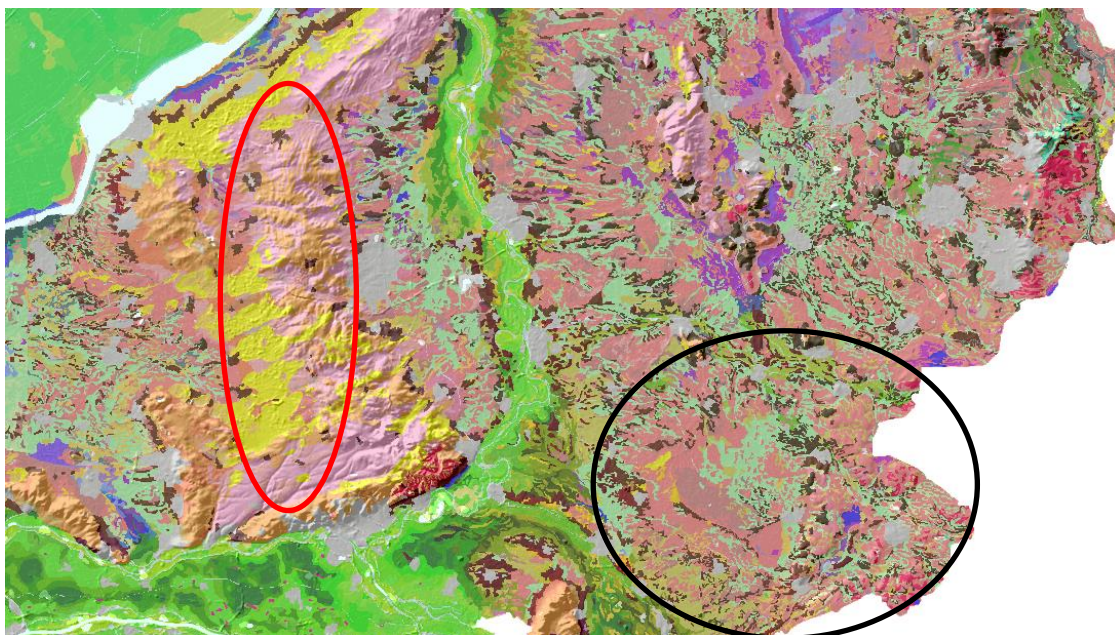
²⁶ Dit werd al vastgesteld in 1958 door Iversen. Ook werd het geconstateerd door Van Mourik et al. (2012) op basis van reconstructies van historische (zandige) bodems zoals op de Maashorst.

²⁷ Nomenclator TNO-DINO-loket. Formatie van Urk: Bosch et al., 2003; formatie van Waalre: Westerhoff & Weerts, 2003.

²⁸ Nomenclator TNO-DINO-loket. Formatie van Boxtel: Schokker et al., 2007.

²⁹ Nomenclator TNO-DINO-loket. Bosch et al., 2003.

herstel van de hydrologie) de verzuring tegen te gaan. In gebieden met een grote aardkundige variatie, zoals de Achterhoek, zijn op korte afstand rijkere milieus aanwezig. Een zuur, arm bos in een mozaïek met rijkere milieus heeft een andere impact op de biodiversiteit dan in een grootschalig, arm gebied zoals de centrale Veluwe (Figuur 11). Daar hebben soorten minder mogelijkheden om uit te wijken naar rijkere en/of vochtigere milieus.



Figuur 11: Dit fragment van de bodemkaart 1:50.000 van Gelderland laat zien dat de variatie in bodems en daarmee rijkdom verschilt van gebied tot gebied. In de Achterhoek (zwarte cirkel) is de variatie groot en zijn van nature rijke groeiplaatsen aanwezig (groen en donkerrood). Op de centrale Veluwe (rood omcirkeld) zijn de bodems veelal arm en zuur (geel, oranje, roze).

Zure standplaatsen zijn kenmerkend voor de Nederlandse zandgronden en bestaan al sinds de prehistorie.³⁰ In Noord- en Oost-Nederland liggen de oudste boskernen vaak bij oude dorpen langs de es of individuele nederzettingen langs kampen. Ze worden holten genoemd en hebben vaak een ongestoorde bosbodem met een huidige boomsoortensamenstelling van hoofdzakelijk eiken en in mindere mate beuken.³¹ Kenmerkend voor deze bossen zijn holtpodzolgronden met dikke strooisel- en humuslagen die honderden jaren oud kunnen zijn.³² Bossen met zo'n dik strooisel en humuspakket vormen daarmee een waar bodemarchief van pollen en koolstof. Ze dateren van ver voor de periode van sterk verhoogde stikstof- en zwaveldepositie.

Plekken die van nature (periodiek) invloed hebben van grondwater, zijn van nature minder gevoelig voor verzuring. Grondwater bevat namelijk dikwijls mineralen die zuren (H⁺) bufferen. Ontwatering door sloten of rabatten laat de invloed van deze bufferstoffen

³⁰ Stockmarr, 1975; Spek, 2004.

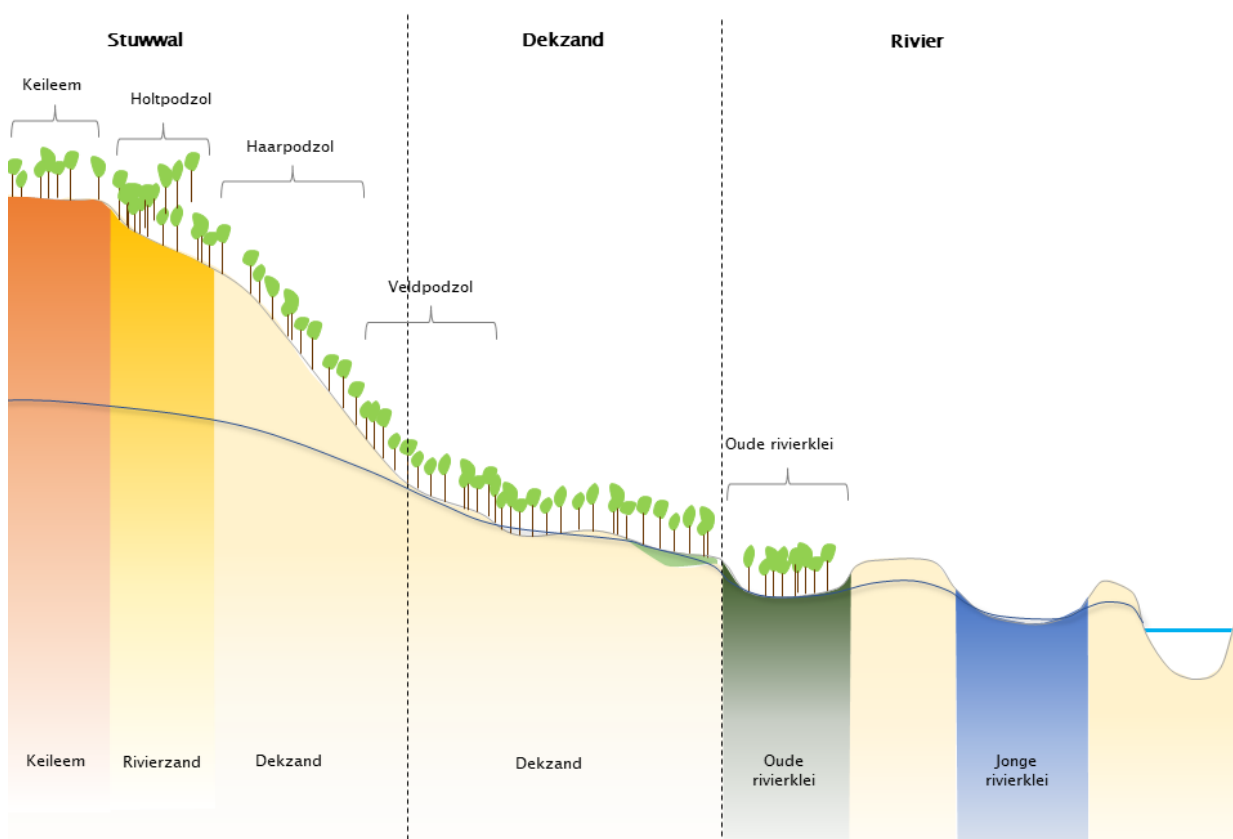
³¹ Smeenge, 2006.

³² Een koolstofdatering van zaden uit een H-laag in Noordoost-Twente leverde een 17de eeuwse datering op. Uit: Smeenge, 2020 (ongepubliceerd hoofdstuk).

afnemen, met een verminderde bodemactiviteit van fauna als gevolg.³³ Het resulteert in dikke, onverteerde strooisellagen en afnemende beschikbaarheid van een minerale bodem waar de voor het bos kenmerkende flora van afhankelijk is. Deze ontwikkeling speelt vanaf de 19^{de} eeuw en heeft samen met de verhoogde stikstofdepositie (vanaf de jaren '80) geleid tot een verdere verzuring van voorheen rijke bosgroeiplaatsen. Voor standplaatsen die van nature door grondwater zijn beïnvloed, liggen grote herstelkansen bij het uitvoeren van hydrologische maatregelen (zie 3.2; 3.3).

3.2 Bodemtypen en hun belangrijkste kenmerken

Binnen het in 3.1 geschetste landschap van stuwwallandschap, dekzandlandschap en rivierenlandschap zijn door processen als vertering, roestvorming en overstrooming verschillende bodemtypen ontstaan. Voorliggend onderzoek heeft zich gericht op *vijf bodemtypen* (Figuur 12). Deze hebben allemaal een eigen water- en mineralenhuishouding.



Figuur 12: Schematisch overzicht van de hoofdlandschappen met de vijf onderzochte bodemtypen. Keileemgronden liggen in Gelderland hoofdzakelijk op het Oost-Nederlands plateau (omgeving Winterswijk). Holt- en haarpodzolgronden liggen in werkelijkheid vaak in mozaïek door afwisseling van rijkere en armere geologische substraten.

³³ Van den Burg et al., 2016.



De belangrijkste kenmerken van de vijf onderzochte bodemtypen zijn als volgt:

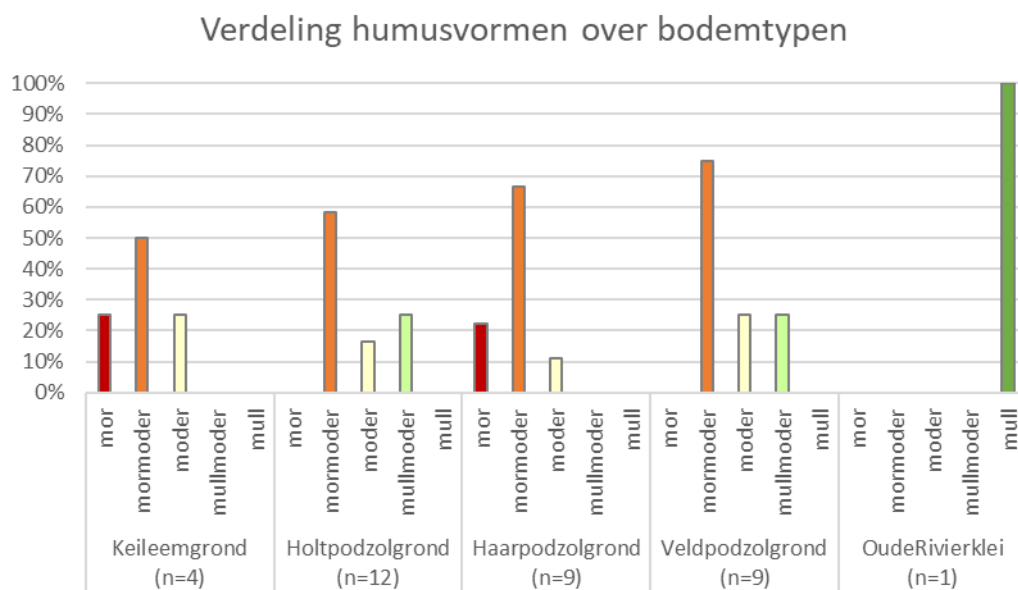
- **Keileemgronden:** tijdens de vergletsjering in de voorlaatste ijstijd zijn stenen verpulverd en vermengd met slib uit ijsstroompjes. Deze gronden zijn door het hoog aandeel leem veelal rijk aan bufferende stoffen (basische kationen). In de winter zijn deze gronden van nature nat door stagnatie, in de zomer kunnen ze hard uitdrogen. Wanneer er een laagje dekzand op deze keileemgronden aanwezig is, komen vaak heel rijke bostypen voor (Vogelkers-essenbos of Eiken-haagbeukenbos). Keileemgronden liggen hoofdzakelijk rondom Winterswijk (Oost-Nederlands plateau).
- **Holtpodzolgronden** werden vroeger bruine bosgronden genoemd. Ze liggen meestal op stuwwallen. Ze zijn gevormd in rivierzand van het Oer-Rijnsysteem dat door het landijs is verstuwd tot hoge heuvels. Door de rijkdom aan mineralen, deels van vulkanische oorsprong (Eifel) zijn holtpodzolgronden minder gevoelig voor uitloging. Ze liggen hoofdzakelijk langs de randen van de stuwwallen. Een actief bodemleven zorgt voor afgebroken humus ('moder'-vorm, zie hoofdstuk 4). Ze bevatten een A- en Bw-horizont en staan buiten de invloed van grond- en oppervlaktewater. Het zijn van nature Beuken-Eikenbossen. Holtpodzolgronden liggen hoofdzakelijk op gestuwde afzettingen zoals de randen van de Veluwe.
- **Haarpodzolgronden** bezitten een klassieke A-, E- en B-horizont. De E-horizont is uitgeloozd, waarbij humus en ijzerdieper zijn ingespoeld in de B-horizont. Het zijn van nature zure gronden buiten de invloed van grondwater, met Berken-Zomereikenbossen of op iets rijkere locaties Wintereiken-Beukenbos. Haarpodzolgronden zijn gevormd in de hoogste zandgronden en dekzandruggen van Oost-Nederland en liggen in mozaïek met de van oorsprong rijkere holtpodzolgronden.
- **Veldpodzolgronden** bezitten ook de klassieke podzolhorizonten, maar veelal is de E-horizont dunner en de B-horizont minder uitgesproken door enige invloed van grondwater. Ze liggen relatief hoog in het landschap waardoor er niet echt sprake is van gebufferd grondwater, maar van periodiek 'opbolling' van vaak redelijk arm grondwater dat 's zomers diep uitzakt. Meestal bevindt het grondwater zich buiten de wortelzone. Het zijn van nature Berken-Zomereikenbossen of op iets rijkere locaties Wintereiken-Beukenbos. Veldpodzolgronden zijn gevormd in lagere dekzandruggen en -vlakten.
- **Oude rivierkleigronden** zijn kenmerkend voor rivierdalen uit de laatste ijstijd (Weichselien). De Rijn stroomde toen in een brede vlechtende zone door het IJsseldal, waaronder het dal van de Oude IJssel. Klei uit deze periode is mineralenrijk, maar sterk wisselvochtig van karakter. Kenmerkend zijn Eiken-Haagbeukenbossen of Vogelkers-Essenbossen.³⁴ Deze zijn hoofdzakelijk te vinden in het stroomgebied van Oude IJssel.

³⁴ Naar De Bakker & Schelling, 1989.

3.3 Humusvormen

Naast de sturende werking vanuit de bodem, geeft de humusvorm inzicht in de interactie tussen boomsoort, hydrologie en de bodem. Deze drie factoren zorgen voor een bepaalde bio-activiteit. In zure systemen (zure bodem, zuur-strooiselsoorten) wordt de bodem met name gedomineerd door schimmels en verloopt de afbraak langzaam. Deze systemen worden gekenmerkt door een mor-humusvorm. In rijke systemen (rijke bodem en rijk-strooiselsoorten) domineren bodemfauna zoals wormen, die strooisel binnen een jaar afbreken en opnemen in de A-horizont. Dit resulteert in een ‘inwendig’ humusprofiel: een mull-humusvorm. De meeste onderzochte bodems hebben een ‘mormoder’-humusvorm (Figuur 13). Dit betekent dat strooisel vooral wordt afgebroken door schimmels en kleinere fauna. Bij van nature zuurdere gronden zoals haarpodzolgronden is een dergelijke humusvorm te verwachten. Wanneer onder zure omstandigheden een humusprofiel heel oud wordt, kunnen dikke H-lagen ontstaan. In Noordoost-Twente bleek een bramenzaad uit zo’n H-laag op basis van koolstofdatering uit 1670 te komen.³⁵

Bij de keileemgronden is een dominantie van de mormoder-humusvorm een aanwijzing voor verzuring van deze in potentie rijke groeiplaats. Naar verwachting spelen hier ontwatering en dominantie van zuur-strooiselsoorten (o.a. eik, beuk, naaldhout) een rol.



Figuur 13: Verdeling van de aangetroffen humusvormen over de bodemtypen, van een uitwendige (mor) naar een inwendige humusvorm (mull).

³⁵ Smeenge, 2020.

Een dergelijk oude bosbodem bevat een bodemarchief op het gebied van pollen, isotopenonderzoek en levert een bijdrage aan de koolstofopslag.



3.4 Vegetatietypen

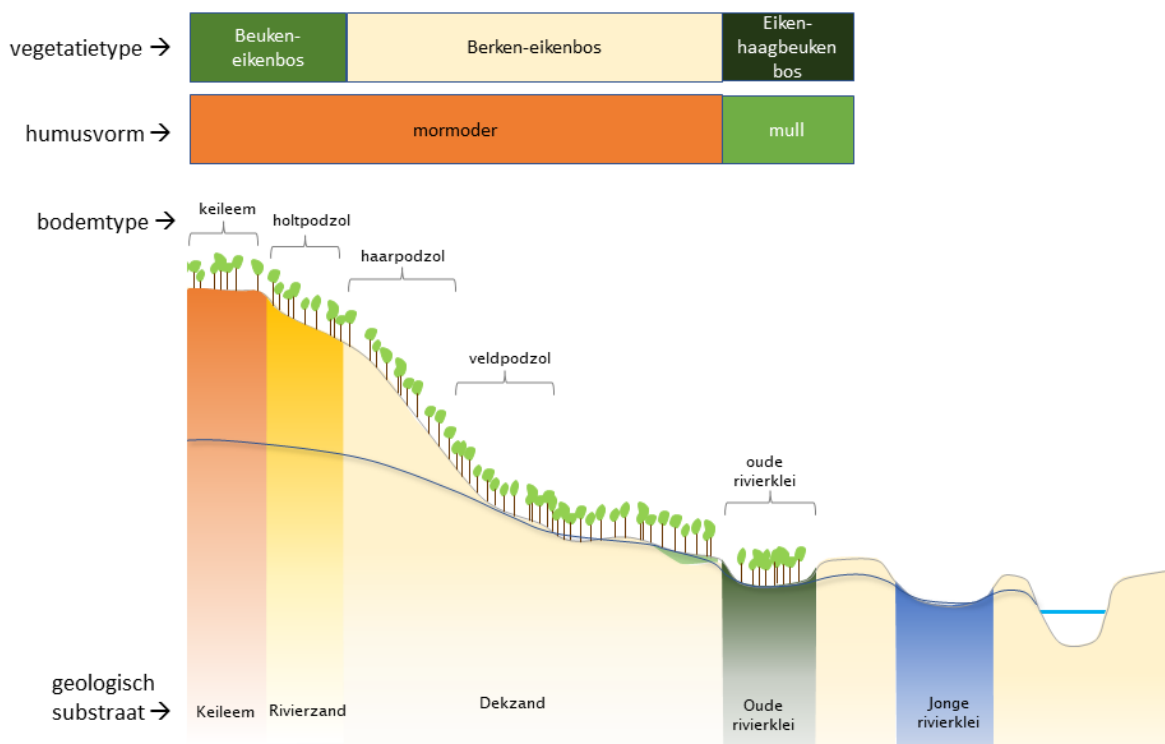
Op de 31 onderzoekslocaties zijn in totaal zes vegetatietypen geassocieerd (Figuur 14). Het rijkste vegetatietype, Eiken–haagbeukenbos, is alleen op de oude rivierklei en op één holtpodzolgrond aangetroffen. Opmerkelijk genoeg ontbreekt dit vegetatietype op de onderzochte keileemgronden, waar Beuken–eikenbossen (en een associatie met bochtige smele) voorkomen. Hier tekent de menselijke invloed van aanplant en ontwatering zich af in het vegetatietype, net als bij het humustype (zie vorige paragraaf). De onderzochte holtpodzolgronden bestaan vooral uit berken–eikenbossen. Dit is een armer vegetatietype dan het beuken–eikenbos, dat vaak op dergelijk mineraalrijkere gronden aanwezig is. Dit type is meer te verwachten bij de haarpodzolgronden. Deze laatste groep bestaat naast Berken–eikenbos ook uit Bosbessen–dennenbossen, een zuur en meestal jong bostype.



Figuur 14: Verdeling van de geassocieerde vegetatietypen van arm (oranje) naar rijk (donkergroen) over de bodemtypen. *deze locaties zijn niet verder dan op verbodsniveau worden geassocieerd.

3.5 Synthese standplaatskarakterisering

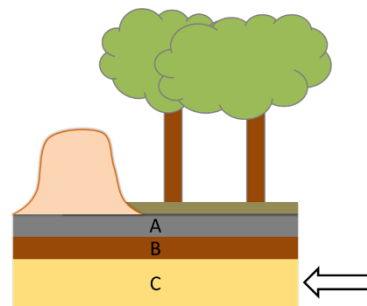
Voorgaande paragrafen gaven een karakterisering van de onderzochte Gelderse bosgroeiplaatsen, met betrekking tot geologisch substraat, bodemtypen, humusvormen en vegetatietypen. In Figuur 15 zijn deze factoren samengevoegd in een schematische doorsnede.



Figuur 15: Locaties van de onderzochte bodemtypen in de gradiënt, met bijbehorend geologisch substraat een aangetroffen (dominante) vegetatietype en humusvorm.

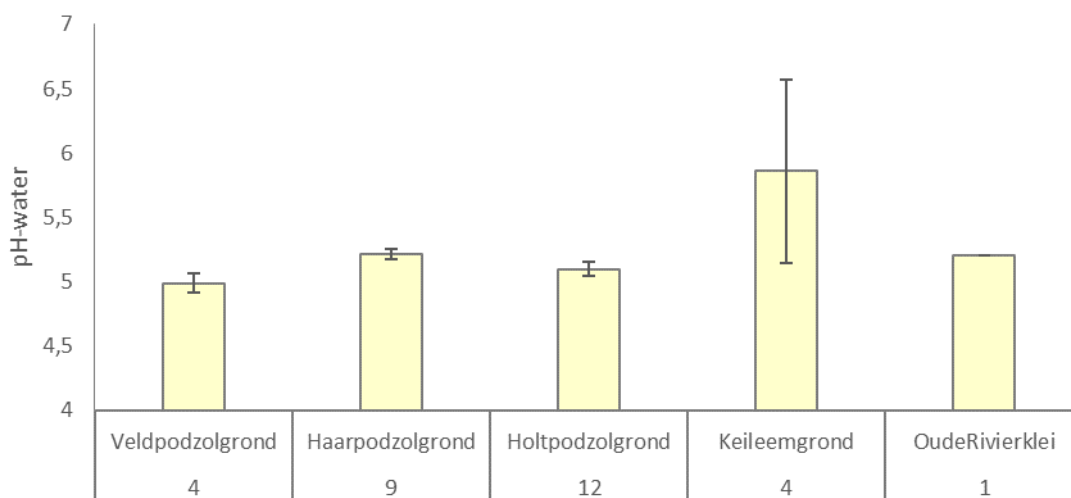
4 Rijkdom moeder materiaal in relatie tot bodemtype

In de onderzoeks aanpak is uitgegaan van een indeling in arme (veld- en haarpodzolgronden), matig rijke (holtpodzolgronden) en rijke (keileem en oude rivierklei) bodems. In dit hoofdstuk kijken we of deze verwachting ook terug te zien is in de chemie van het moeder materiaal op 120 cm diepte (de C horizont). In de volgende paragrafen wordt gekeken naar de pH, som van de basische kationen (SBK), Mg en K (als maat voor de hoeveelheid lutumdeeltjes in de bodem).



4.1 pH

De pH van de podzolgronden en de oude rivierkleigrond is vergelijkbaar (rond de 5). Keileemgronden lijken een wat hogere pH te hebben van rond de 6, maar de variatie binnen de onderzochte locaties is relatief groot. De bodems vallen daarmee binnen het *kationbuffertraject* ($pH > 4,2$). Dat betekent dat kationen worden gebruikt om zuur te bufferen. Bij een pH lager dan 4,2 is sprake van aluminiumbuffering en gaat aluminium in oplossing, waardoor het de wortels van bomen aantast.



Figuur 16: pH-water van het moeder materiaal. Foutbalken geven de standaardfout weer.

4.2 Magnesium (Mg) en kalium (K)

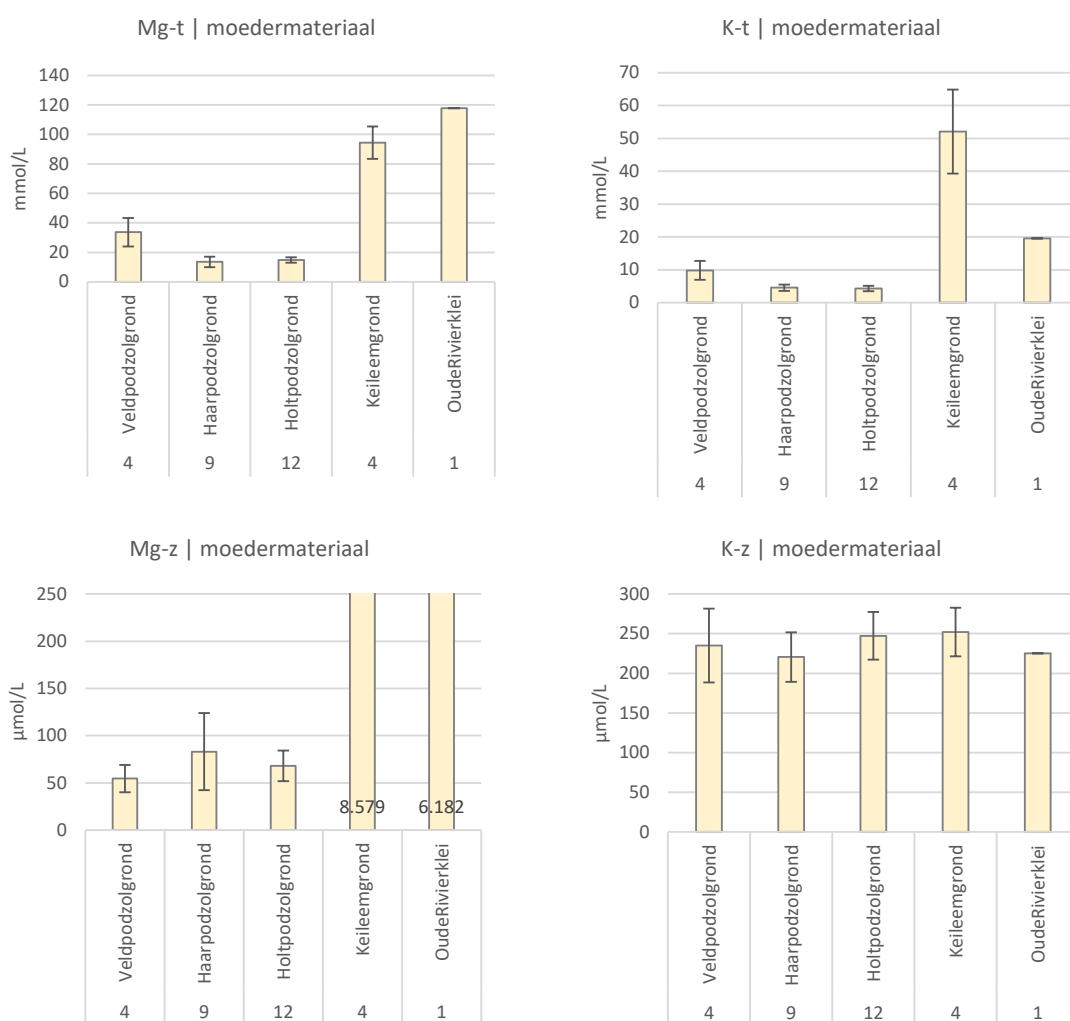
Het bufferend vermogen van de bodem wordt bepaald door het aandeel organische stof en lutum. Mg en K zijn belangrijke voedingsstoffen voor planten én een maat voor de hoeveelheid lutumdeeltjes die nog in de bodem aanwezig zijn. Als gevolg van verzuring verwerken deze in de loop van de tijd. Hierdoor neemt de buffercapaciteit verder af alsmede de capaciteit van de bodem om kationen vast te houden.

De totale voorraad (Mg-t en K-t) is hoger in de veldpodzolgronden in de haar- en holtpodzolgronden (Figuur 17; boven). Daarmee lijken de veldpodzolgronden minder verweerd. Dit kan worden verklaard doordat bij veldpodzolgronden in het winterseizoen via capillaire opstijging het grondwater nabij de wortelzone komt. Afhankelijk van de rijkdom



van het grondwater kan dit de bodem verrijken of juist uitlogen. De keileemgronden zijn duidelijk rijker in Mg en K. De oude rivierkleigronden zijn wel zeer rijk aan Mg, maar matig rijk aan K (Figuur 17; boven).

Het Mg-z en K-z (vrij beschikbare deel) laten een wat ander patroon zien (Figuur 17; onder). Veldpodzolgronden vormen geen aparte groep meer. De relatief grote spreiding in de haarpodzolgronden is een aandachtspunt, hier wordt in de volgende paragraaf verder op ingegaan. K is vrijwel gelijk tussen de bodemtypen; mogelijk zit het bij de keileem- en oude rivierkleigronden veel sterker gebonden aan het bodemcomplex of is de beschikbaarheid door een gebrek aan verwerking van de lutumdeeltjes laag. Mg kan blijkbaar wel vrijkomen, want deze waarden zijn bij de keileem- en oude rivierkleigronden veel hoger.



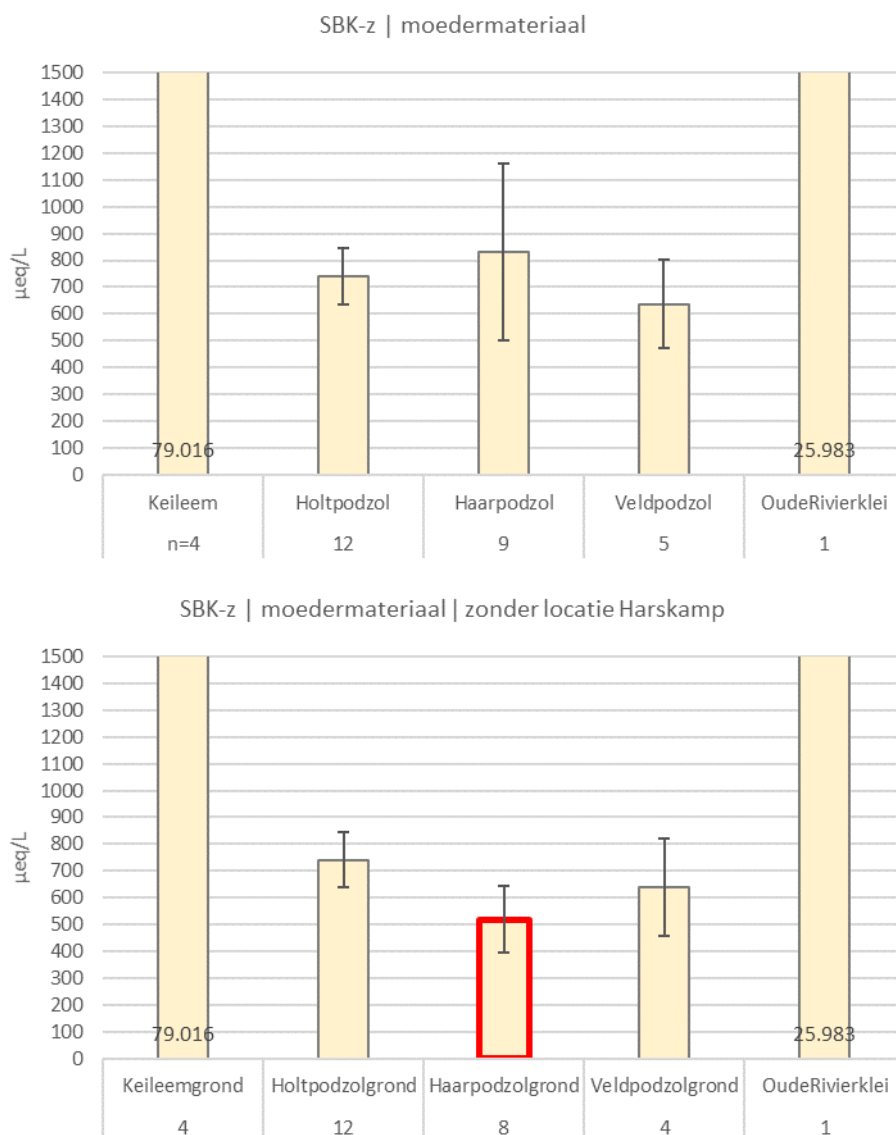
Figuur 17: Concentraties Mg en K (boven: totaal, onder: vrij beschikbaar) in het moedermateriaal op 120 cm diepte, in mol/L verse bodem. De getallen onder de x-as geven de steekproefgrootte weer. Foutenbalkjes geven de standaardfout weer.



4.3 Som basische kationen (SBK)

Basische kationen zijn belangrijke voedingsstoffen en werken daarnaast zuurneutraliserend. De belangrijkste kationen zijn Ca, Mg en K. Figuur 18 geeft de som van deze basische kationen (SBK) weer, die vrij beschikbaar zijn voor planten. De verwachting is dat rijke bodems een hogere SBK hebben dan armere bodems. De keileem- en oude rivierkleigronden laten inderdaad veel hogere waarden zien dan de podzolgronden. Echter valt ook op dat alle podzolgronden uniform arm lijken. De verwachting was het moedermateriaal onder holtpodzolgronden rijker zouden zijn dan onder de veld- en haarpodzolgronden. Holtpodzolgronden zijn in Gelderland voornamelijk gevormd in gestuwde rivierzanden (formatie van Urk), terwijl haar- en veldpodzolgronden overwegend dekzand bevatten (formatie van Boxtel).³⁶ Doordat de haarpodzolgronden een grote spreiding laten zien, is naar de individuele locaties gekeken. Daaruit blijkt er één uitbijter is (Harskamp) met een veel hogere SBK dan de overige locaties (3300 versus 500–1000 $\mu\text{eq/L}$). De oorzaak is onduidelijk. Zonder deze locatie zijn de haarpodzolgronden inderdaad armer aan kationen dan de holtpodzolgronden (Figuur 18 onder).

³⁶ Nomenclator TNO-DINO-loket. Formatie van Urk: Bosch et al., 2003; formatie van Boxtel: Schokker et al., 2007.



Figuur 18: Som van de basische kationen (vrij beschikbaar) van het moedermateriaal, gemiddeld per bodemtype, in eq/L verse bodem. Foutbalken geven de standaardfout weer. In de onderste grafiek is locatie Harskamp (haarpodzol) verwijderd als uitbijter.



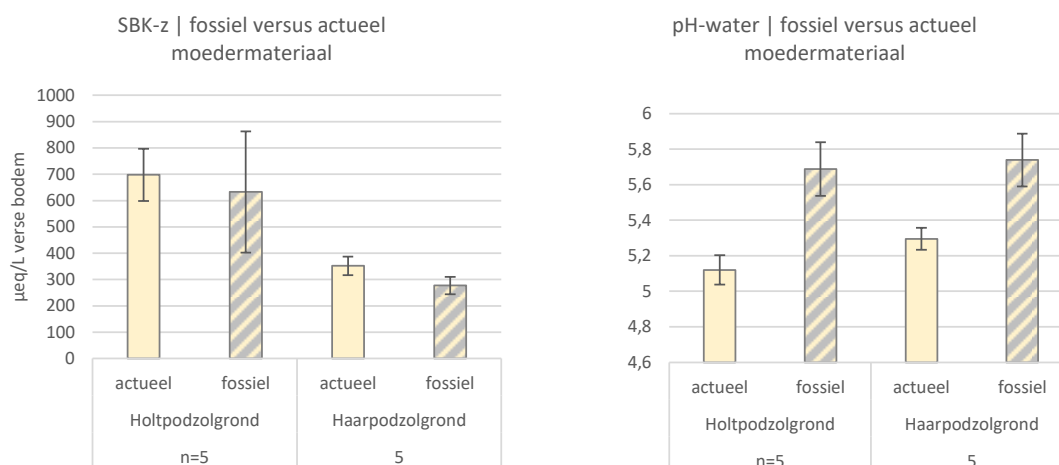
4.4 Fossiele moeder materiaal

De verwachting was dat de veld- en haarpodzolgronden duidelijk van de matig rijke holtpodzolgronden zouden verschillen. Dat bleek echter beperkt het geval. Daardoor rees de vraag of het actuele moeder materiaal dan toch, ook op 120 cm diepte, aan verzuring en uitspoeling onderhevig is geweest. Om hier meer inzicht in te krijgen, is in een later stadium het fossiele moeder materiaal bemonsterd op tien locaties: vijf haarpodzolgronden en vijf holtpodzolgronden (voor locaties zie Figuur 8). In volgende paragrafen is van een aantal parameters het actuele met het fossiele moeder materiaal vergeleken.

4.4.1 pH en som basische kationen

Figuur 19 laat de som van de vrij beschikbare basische kationen zien (SBK). De waarden zijn vrijwel gelijk in de actuele en fossiele bodem. In de haarpodzolgronden lijkt de SBK iets hoger in de actuele bodem.

Een groter verschil laat de pH van de bodem zien (*Figuur 19*, onder). Het fossiele moeder materiaal heeft een hogere pH dan het actuele. Een lage pH laat zien dat er meer protonen (H^+) aan het bodemcomplex zitten.



Figuur 19: links: SBK-z (vrij beschikbaar) en SBK-t (totale voorraad); onder: pH-water, van het actuele en fossiele moeder materiaal (120 cm diepte), voor vijf haar- en vijf holtpodzolgronden, in $\mu\text{eq/L}$ verse bodem. Foutenbalkjes geven de standaardfout weer.

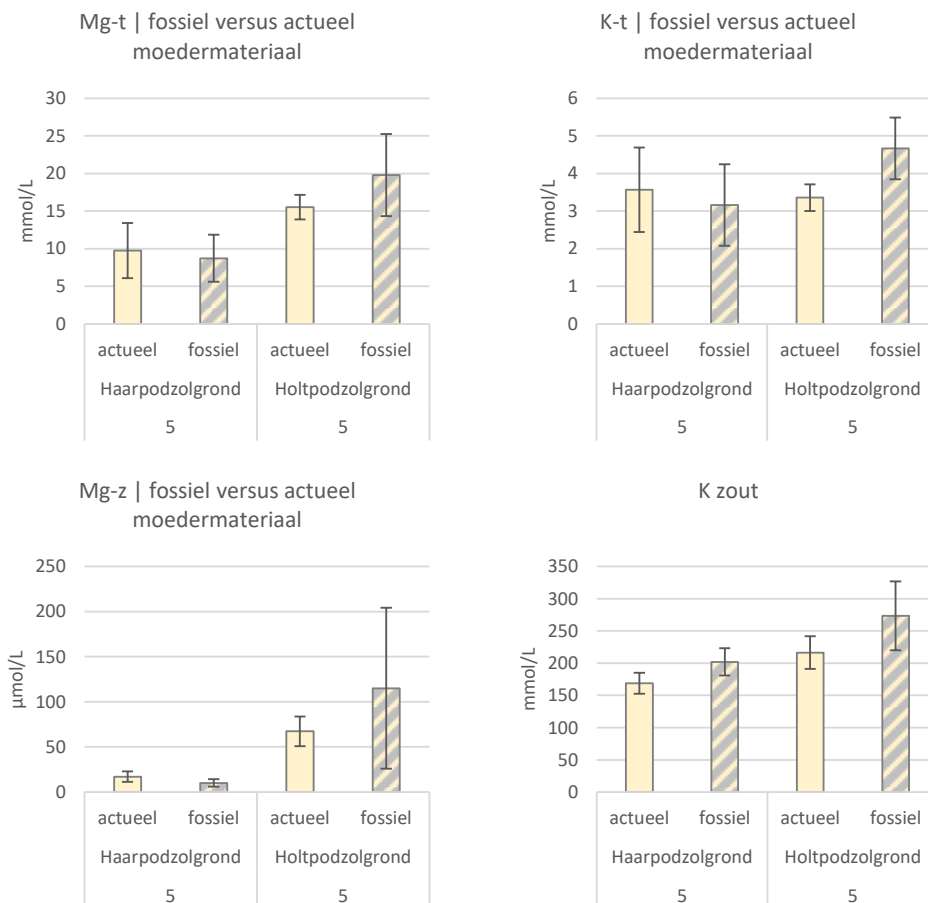
4.4.2 Mg en K

Omdat totaal Mg en K een maat voor het aantal lutumdeeltjes zijn, is gekeken of er verschil is tussen de fossiele en actuele moeder materiaal (*Figuur 17*). Dat geeft inzicht in hoeverre de bodems ten opzichte van de fossiele situatie verweerd zijn, waarbij lutumdeeltjes zijn opgelost en uitspoeld. De grafieken laten zien dat:

- De Mg-concentratie hoger is in de holtpodzolgronden dan in de haarpodzolgronden. Dat geldt zowel voor de actuele als fossiele bodem, en zowel voor het totale als vrij beschikbare Mg. Dit geeft dus een aanwijzing dat de holtpodzolgronden althans op enige diepte, van nature rijker zijn dan de haarpodzolgronden.



- Voor de K-concentratie is dit verschil ook zichtbaar, hetzij minder sterk.
- De holtpodzolgronden zijn in de actuele situatie minder rijk aan Mg en K dan in de fossiele situatie. Voor de haarpodzolgronden is dit verschil niet zichtbaar.



Figuur 20: boven: Mg-t en K-t (totale voorraad); onder: Mg-z en K-z (vrij beschikbaar) van het actuele en fossiele moeder materiaal (120 cm diepte), voor vijf haar- en vijf holtpodzolgronden, in mol/L verse bodem. Foutenbalkjes geven de standaardfout weer.



4.5 Conclusie moedermateriaal

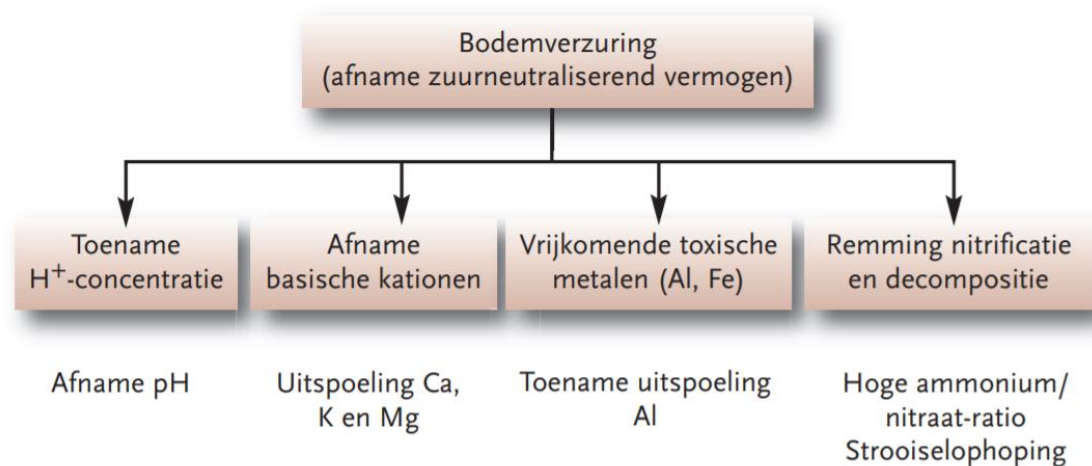
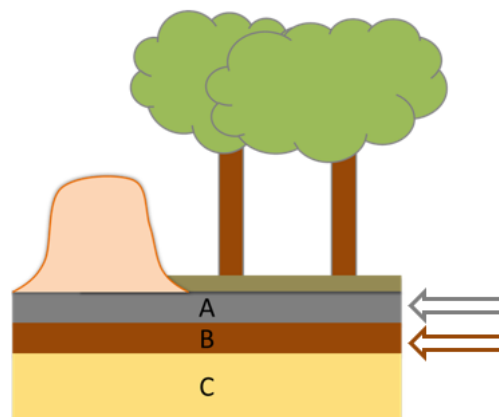
De conclusies over het moedermateriaal zijn:

- De keileem- en oude rivierkleigronden zijn veel rijker dan de podzolgronden.
- De podzolgronden zijn echter uniform arm, waarbij de haarpodzolgronden het armst zijn.
- Er is weinig verschil zichtbaar tussen het fossiele en actuele moedermateriaal onder de onderzochte haar- en holtpodzolgronden. Deze bodems zijn al een lange tijd aan het degraderen, te zien aan de bleking van de A-horizonten. Wellicht zijn bodems dus al sterk gedegradeerd voorafgaand aan de verhoogde zwavel- en stikstofdepositie vanaf de 20^e eeuw, enerzijds natuurlijk door uitlogingsprocessen, anderzijds door intensief landgebruik door begrazing en gebruik als eikenhakhout, wat al eeuwenlang zuur strooisel levert.
- De pH van het actuele moedermateriaal is wel met 0,4 tot 0,6 gedaald ten opzichte van het fossiele moedermateriaal.

5 Fossiele versus actuele bosbodems (A- en B-horizont)

Nu in beeld is gebracht dat het moedermateriaal op 120 cm diepte zuurder is geworden, is de vraag hoe de toplaag van de bosbodems bodemchemisch gezien zijn veranderd. Dit hoofdstuk gaat daarom in op de bodemchemie van A- en B³⁷-horizont van de actuele bosbodems en de fossiele bosbodems onder de wal.

Allereerst wordt ingegaan op de concentraties van belangrijke voedingsstoffen: stikstof (N), fosfor (P) en kalium (K). Vervolgens wordt ingegaan op de pH van de bodem, de concentratie aluminium (Al) en de som van de basische kationen. Deze parameters veranderen als gevolg van verzuring van de bosbodems, zoals ook weergegeven in Figuur 21.³⁸



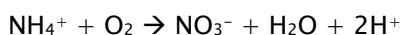
Figuur 21: Overzicht van factoren die in de bodem veranderen bij het proces van verzuring (afname buffercapaciteit) (Bobbink & Lamers, 1999).

³⁷ Keileem- en oude rivierkleigronden hebben geen B-horizont; daar is de C-horizont direct onder de A bemonsterd.

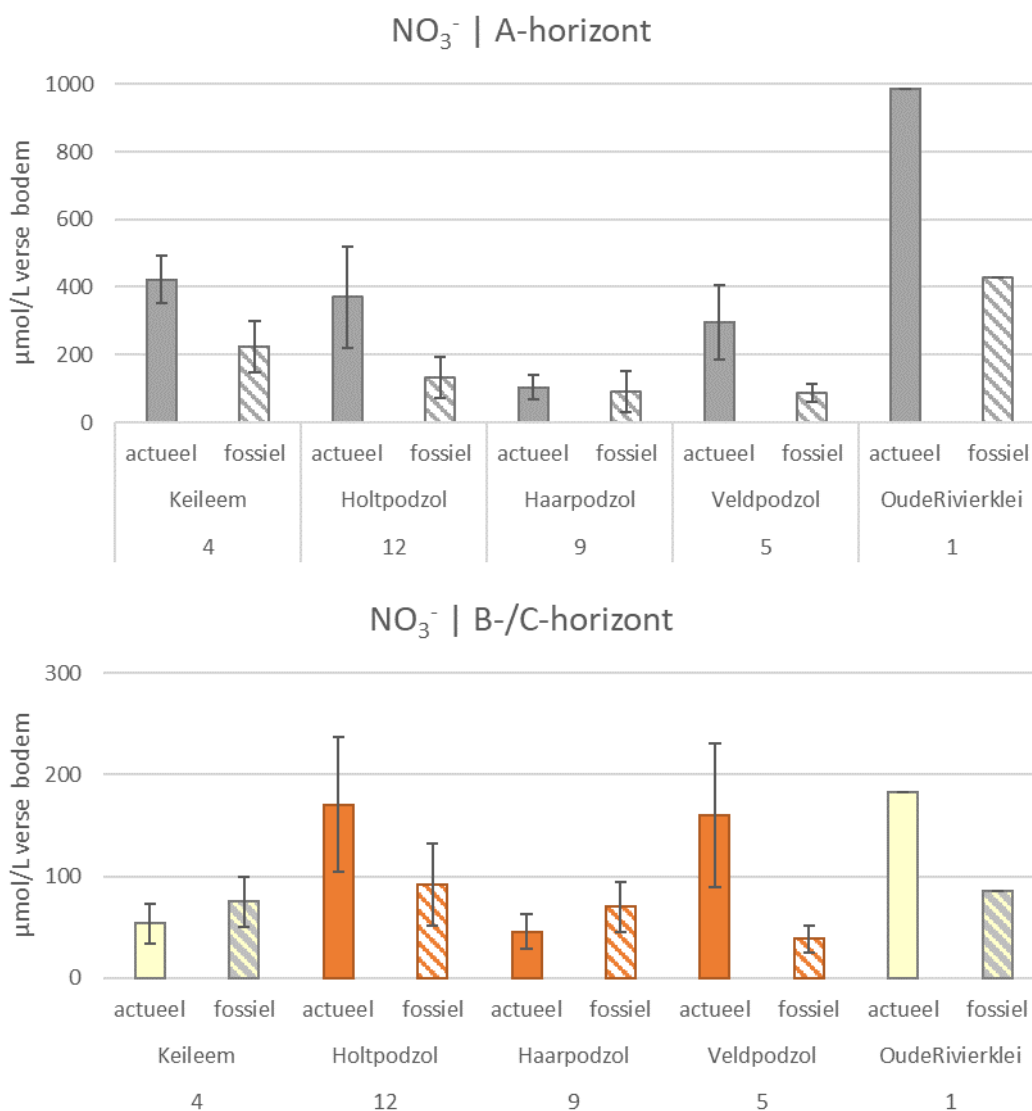
³⁸ Bobbink & Lamers, 1999.

5.1 Stikstof (N)

De belangrijkste vormen van N zijn nitraat (NO_3^-) en ammonium (NH_4^+). Beide vormen zijn belangrijk voor de chemie van de bosbodem. NH_4^+ werkt indirect verzurend via de bacteriële omzetting tot nitraat (nitrificatie):



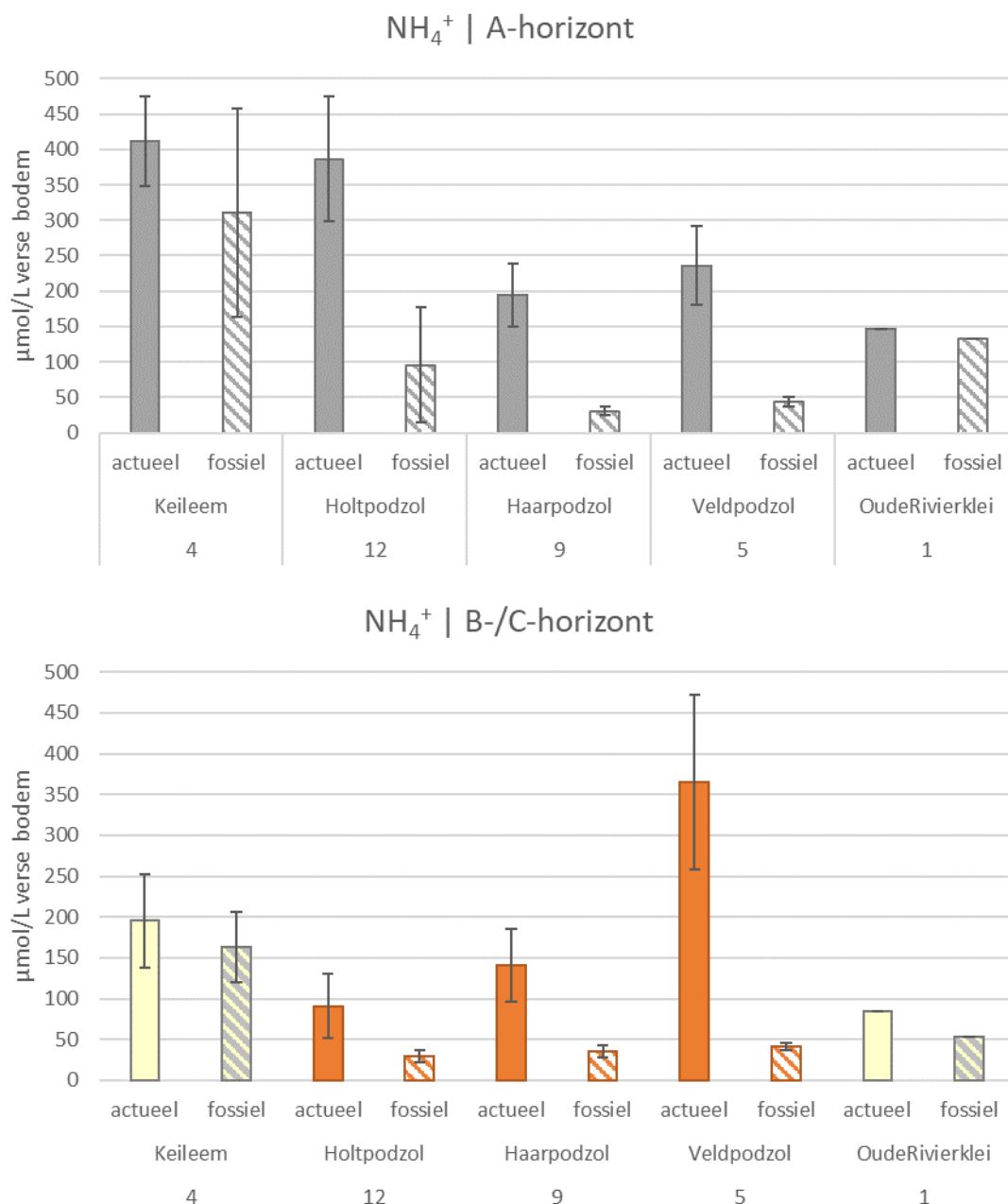
Daarnaast worden protonen uitgescheiden door planten bij de opname van NH_4^+ waardoor de wortelzone bij stikstofopname vaak verder verzuurt. Zoals verwacht, zijn er hogere NO_3^- concentraties gemeten in de actuele bosbodems dan in de fossiele (Figuur 22). Dit geldt voor alle bodemtypen bij de A-horizont, op de haarpodzolgronden na, waar de concentraties ongeveer gelijk zijn. Bij de B-horizont neemt NO_3^- toe bij de holt- en veldpodzolgronden en de oude rivierklei, maar het blijft gelijk bij de keileem- en haarpodzolgrond.



Figuur 22: NO₃⁻ (vrij beschikbaar) in de actuele en fossiele A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer. Keileem- en oude rivierkleigronden hebben geen B-horizont; daar is de C-horizont direct onder de A bemonsterd.



Ook de NH_4^+ concentratie is hoger in de actuele bosbodem (Figuur 23). Dit geldt zowel voor de A- als B-horizont, hoewel bij de keileemgronden en de oude rivierkleigrond de concentraties vrijwel gelijk zijn. De haarpodzolgronden hebben dus geen hogere NO_3^- concentratie ten opzichte van de fossiele situatie, maar wel een hogere NH_4^+ concentratie. Bij de veldpodzolgronden is de toename van NH_4^+ ten opzichte van de fossiele bodem het grootst.



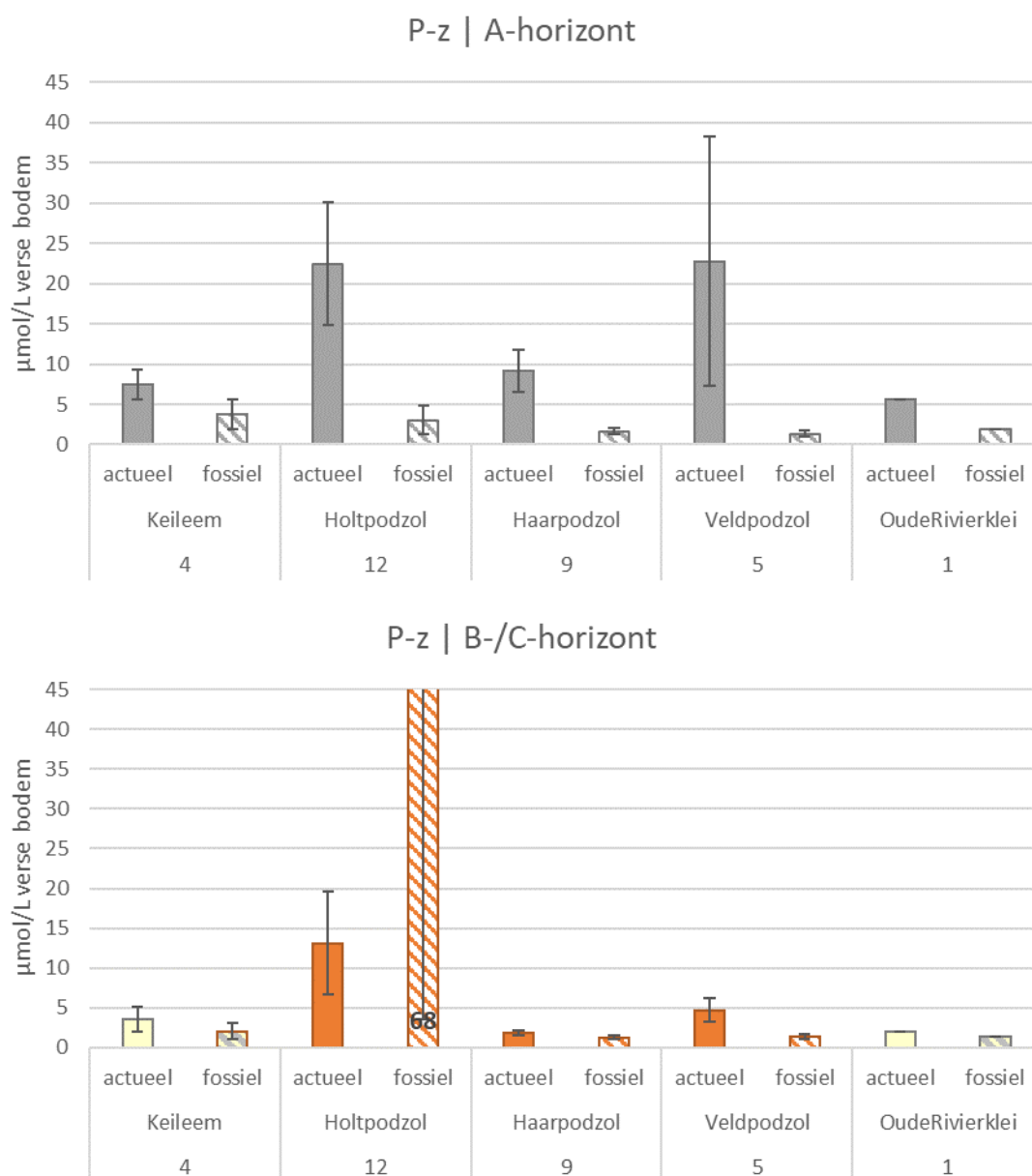
Figuur 23: NH_4^+ (vrij beschikbaar) in de actuele en fossiele A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer. Keileem- en oude rivierkleigronden hebben geen B-horizont; daar is de C-horizont direct onder de A bemonsterd.



5.2 Fosfor (P)

De P-concentratie is in de actuele bosbodems (A-horizont, in mindere mate B-horizont) hoger dan in de fossiele bodems. P bindt zich in het bodemcomplex onder andere aan aluminium (Al) en ijzer (Fe). Onder zure omstandigheden wordt aangenomen dat de binding van P aan Fe en Al beter is en dat de P-beschikbaarheid dus lager is dan onder meer gebufferde omstandigheden. Dit lijkt niet overeen te komen met de resultaten. Het lijkt er op dat verzuring samengaat met een hogere P-beschikbaarheid. Het mechanisme dat hieraan ter grondslag ligt, is onbekend. Mogelijk hebben de actuele bodems nog enige mate van biologisch activiteit waardoor P wordt opgeslagen en geaccumuleerd, in plaats van dat het uitspoelt. Het kan te maken met een verminderde opname van P door schimmels en bacteriën of door het oplossen van Al (en mogelijk ook Fe) bij een lagere pH. Ook kan er sprake zijn van een andere reden waarom P hier hoger is, die niet gerelateerd is de pH van de bodem.

Bij de B-horizont is de extreem hoge P-concentratie en standaardfout in de fossiele holtpodzolgronden opvallend. Het blijkt door locatie Holtinge te komen, waarbij een (zeer hoge) P-concentratie van 778 $\mu\text{mol/L}$ verse bodem is gemeten. De oorzaak hiervan is onbekend.

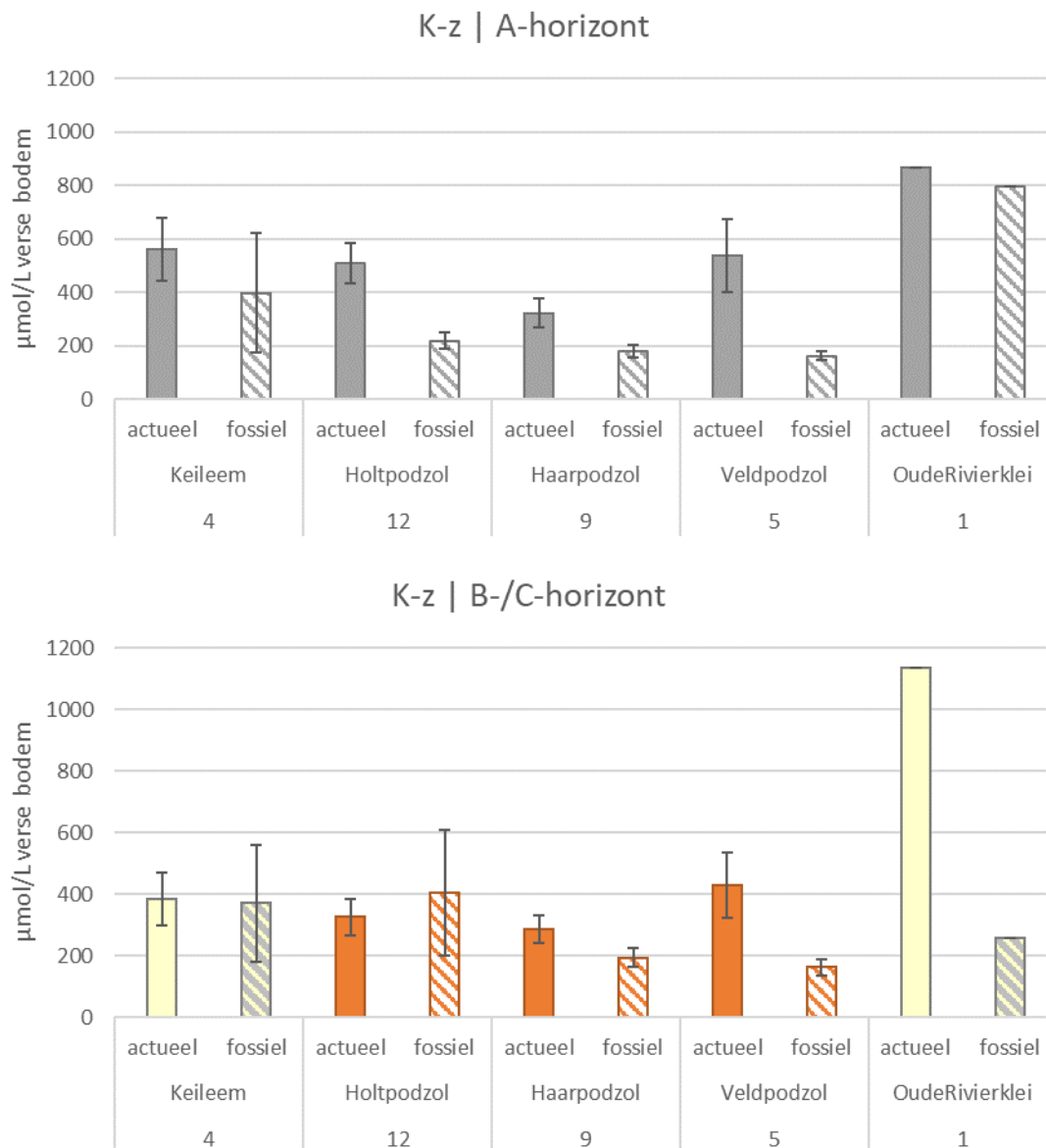


Figuur 24: P (vrij beschikbaar) in de actuele en fossiele A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer. Keileem- en oude rivierkleigronden hebben geen B-horizont; daar is de C-horizont direct onder de A bemonsterd.



5.3 Kalium (K)

De vrij beschikbare K-concentratie is in de actuele bosbodem hoger dan in de fossiele (Figuur 25).



Figuur 25: K (vrij beschikbaar) in de actuele en fossiele A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer. Keileem- en oude rivierkleigronden hebben geen B-horizont; daar is de C-horizont direct onder de A bemonsterd.

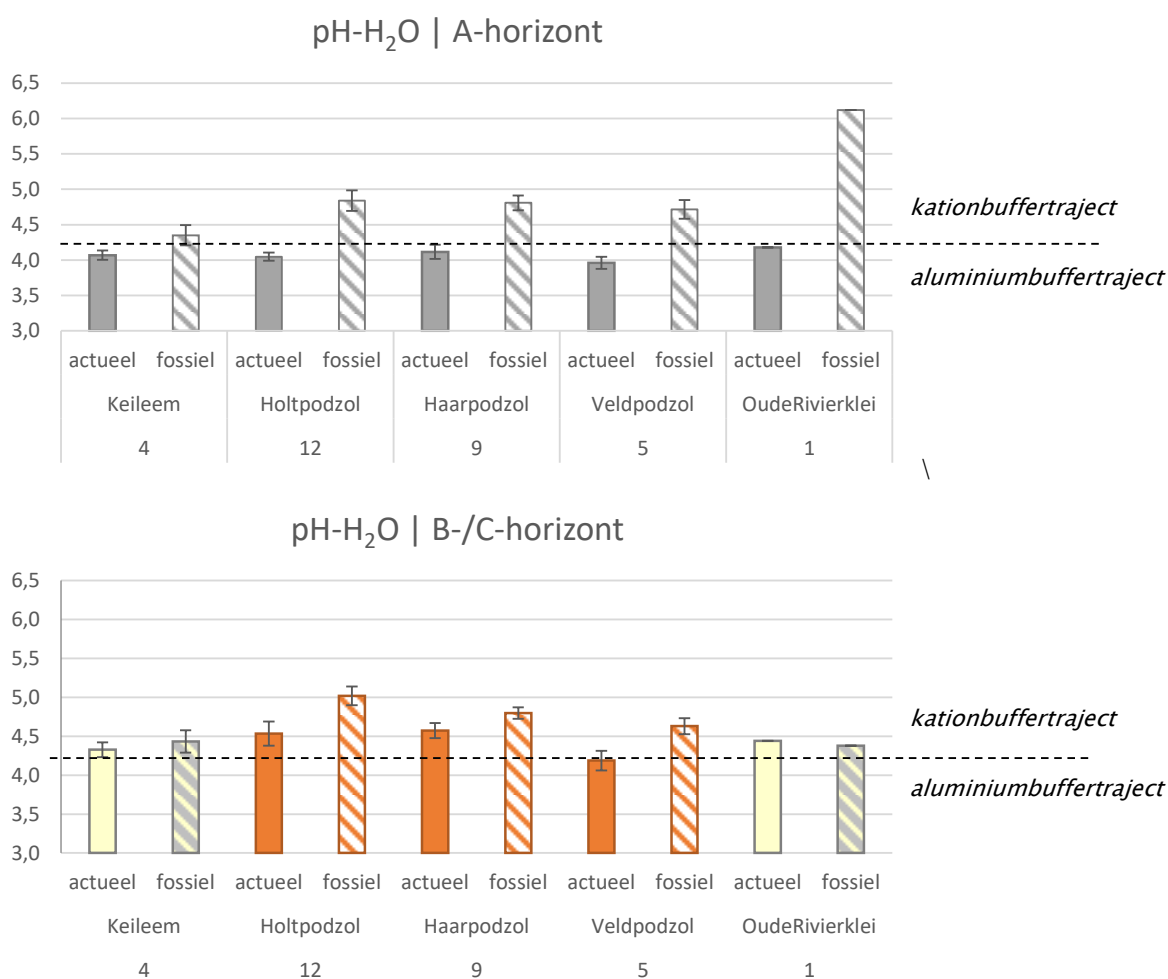
5.4 pH

De verschillen in pH tussen de actuele en fossiele bosbodem zijn opmerkelijk. In de A-horizont is de pH 0,3 tot 1 punt lager geworden (Figuur 26; boven). Bovendien is de pH in de fossiele bodem hoger dan 4,2 terwijl dat in de huidige situatie niet meer zo is. Daarmee bevindt de bodem zich in het aluminiumbuffertraject in plaats van het kationbuffertraject.



Vergelijking van de pH van de fossiele bodems laat zien dat de oude rivierklei een hogere pH heeft, de overige gronden zijn vergelijkbaar.

De pH van de B-horizont is ook lager in de huidige bosbodem ten opzichte van de fossiele (Figuur 26; onder). De B-horizont bevindt zich wel nog net in de kationbuffertraject³⁹, al is het dicht bij de grens, met name voor de veldpodzolgronden. De fossiele bodems hebben een vergelijkbare pH bij de verschillende bodemtypen.



Figuur 26: pH-H₂O van de A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer. Keileem- en oude rivierkleigronden hebben geen B-horizont; daar is de C-horizont direct onder de A bemonsterd.

5.5 Aluminium (Al)

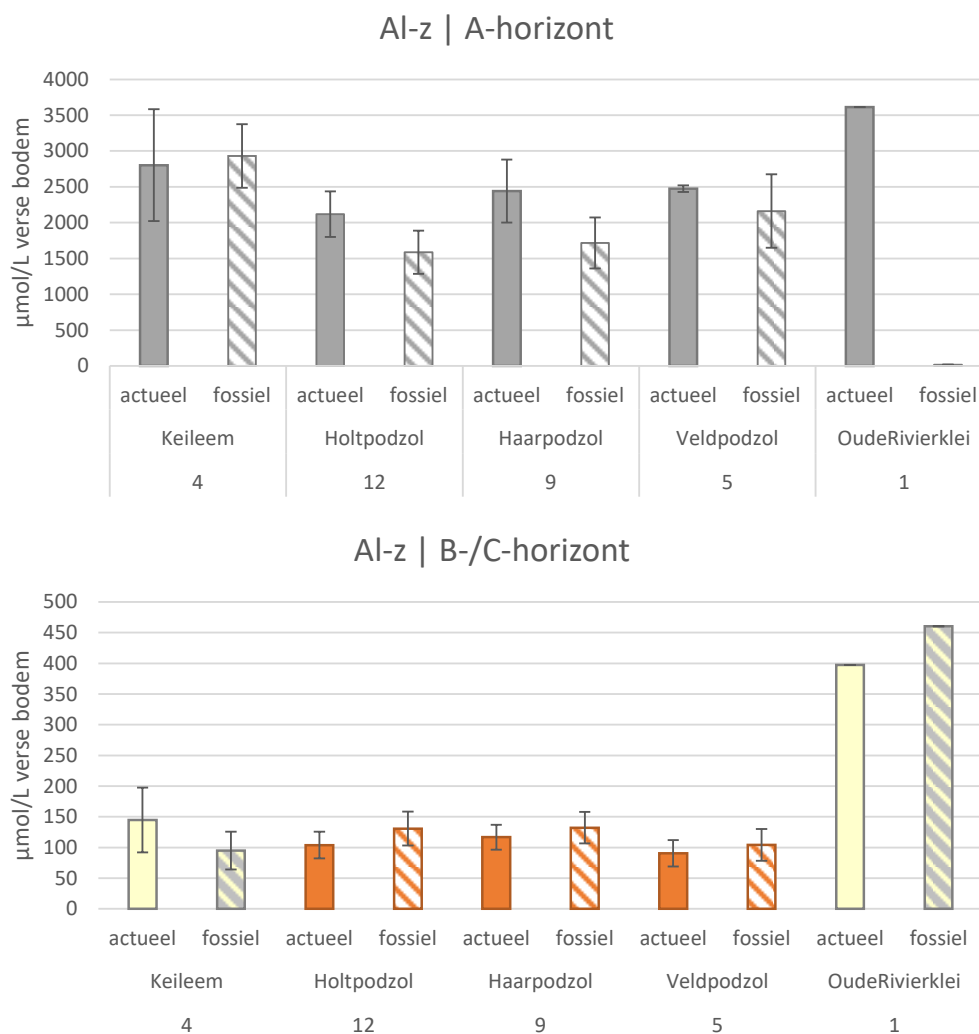
Doordat de pH-waarden van de actuele bosbodems veelal lager zijn dan 4,2, bevinden de bodems zich in het aluminiumbuffertraject. Dat betekent dat aluminium in oplossing gaat, hetgeen in lage concentraties al giftig is voor flora. Op de onderzoekslocaties is inderdaad te zien dat het vrij beschikbaar Al in de A-horizont is toegenomen bij de holt- en

³⁹ Al is 4,2 geen harde grens. Aluminium begint al bij te dragen aan buffering bij een pH van lager dan 5 (expert judgement Onderzoekcentrum B-WARE)



haarpodzolgronden en de oude rivierklei (Figuur 27). Bij de holt- en haarpodzolgronden was de Al-concentratie rond de 1500–1700 $\mu\text{mol/L}$ verse bodem, in de huidige situatie is dat 2150–2450. Bij de oude rivierklei is de Al-concentratie zelfs toegenomen van 0 tot ruim 3500 $\mu\text{mol/L}$ verse bodem.

Bij de keileemgronden en veldpodzolgronden is geen toename te zien, zowel bij de A- als B-horizont.



Figuur 27: Al-z van de A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer. Keileem- en oude rivierkleigronden hebben geen B-horizont; daar is de C-horizont direct onder de A bemonsterd.

5.6 Som basische kationen (SBK)

Basische kationen zijn belangrijke voedingsstoffen en werken bovendien zuurneutraliserend. Door de belangrijkste kationen calcium (Ca), magnesium (Mg) en kalium (K) bij elkaar op te tellen, ontstaat de som van de basische kationen (SBK). Hoofdstuk 3 liet zien dat het moedermateriaal op 120 cm diepte een relatief hoge SBK had

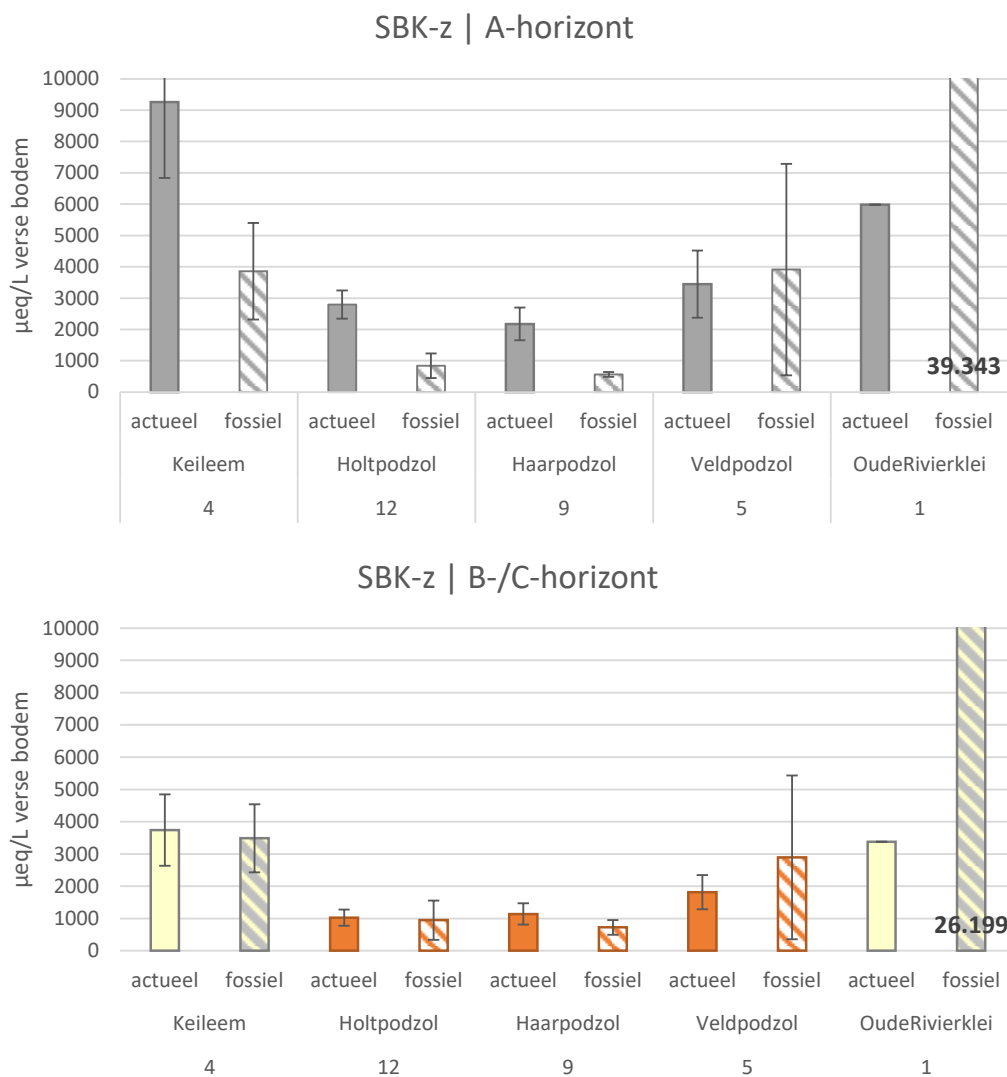


in de oude rivierklei en keileem, maar een uniform lage concentratie in de podzolgronden, waarbij de haarpodzolgronden het armst zijn.

Figuur 28 laat de SBK zien voor de A- en B-horizont. Allereerst zijn de lage waarden opvallend. De A-horizont van de podzolgronden heeft een SBK van 2176–3446 $\mu\text{eq/L}$. Bij de actuele A-horizont van de oude rivierklei is de SBK drastisch afgenomen (van 39.343 naar 5981 $\mu\text{mol/L}$). Deze afname is ook te zien in de B-horizont (26.199 naar 3378 $\mu\text{mol/L}$).

Ten tweede valt op dat de actuele SBK hoger is dan in de fossiele A-horizont. De verwachting was dat als gevolg van verzuring de kationen zouden uitspoelen, wat zou resulteren in een lagere SBK. Een verklaring daarvoor kan gevonden worden in het organisch-stofgehalte van de bodem. Dat correleert namelijk (net als het lutumgehalte) met de SBK. Doordat het bos ouder geworden is het organisch-stofgehalte toegenomen, en daarmee de SBK. Dit wordt verderop nader toegelicht. Kanttekening is dat de waarden zowel in de fossiele als actuele situatie erg laag zijn.

Voor de B-horizont zijn de waarden gelijk, hoewel bij oude rivierklei een afname te zien is, net als bij de A-horizont. Op de locatie lijkt de bodem dus wel verarmd ten opzichte van de fossiele situatie.



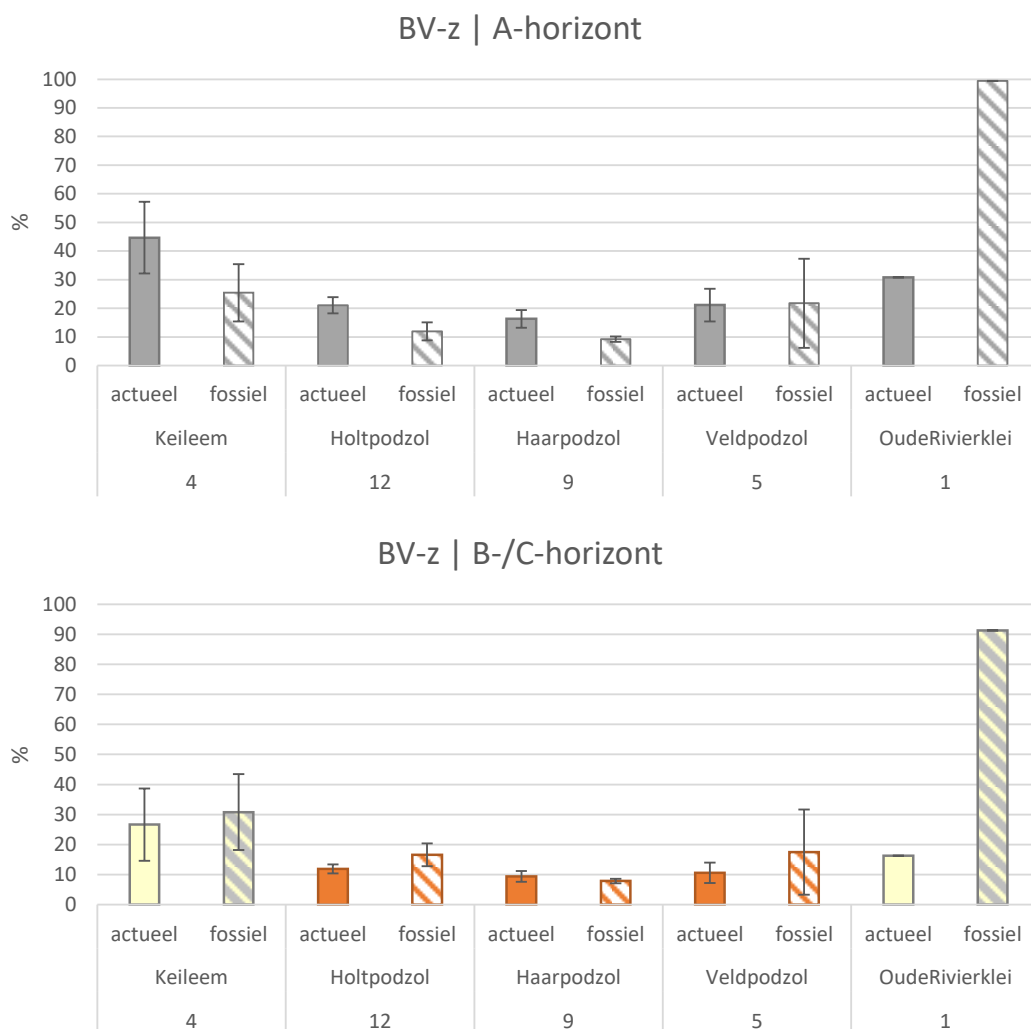
Figuur 28: SBK (vrij beschikbaar) van de A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer.



5.7 Basenverzadiging

Een andere manier om de rijkdom aan basen uit te drukken is de basenverzadiging, waarbij het aandeel basische kationen (Ca, Mg en K) wordt uitgedrukt ten opzichte van het totaal aan alle kationen.

Figuur 29 geeft de basenverzadiging weer voor de A- en B-horizont. Opvallend is de basenverzadiging van (bijna) 100 procent in de fossiele oude rivierklei. In de overige bodems is de fossiele basenverzadiging tussen de ca. 15 en 45 procent. Net als bij de voedingsstoffen en de som van de basische kationen, zien we een toename van de basenverzadiging van de A-horizont, ten opzichte van de fossiele bodems. Waarden van lager dan 10-15 procent worden beschouwd als aanwijzing voor sterke verzuring.⁴⁰ De podzolgronden zitten daar met 16-21 procent dichtbij.



Figuur 29: Basenverzadiging (BV, vrij beschikbaar) van de A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer.

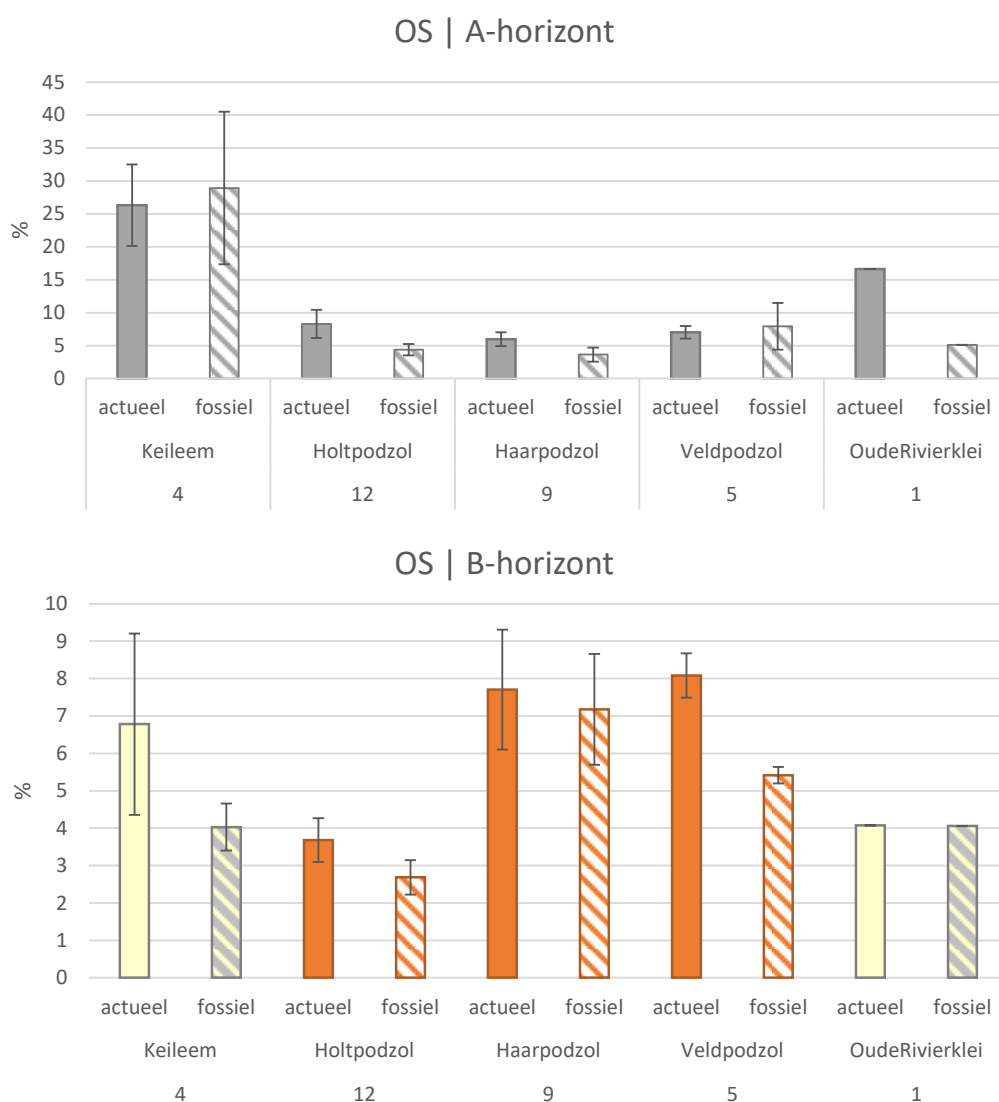
⁴⁰ Bijlsma et al., 2020; waarbij eveneens de kanttekening wordt gemaakt of deze grens ook geldt voor bosbodems die sterk verschillen in ouderdom en daarmee in humusvorm.



5.8 Organisch-stofgehalte

Figuur 30 laat het organisch-stofgehalte (OS) zien van de A- en B-horizont. De keileemgronden hebben een relatief hoog OS. Waarschijnlijk kan het strooisel op deze rijke bodems goed worden omgezet, waardoor de organische stof wordt opgenomen in de A-horizont. Het OS van de A-horizont is in de holt- en haarpodzolgronden en de oude rivierklei toegenomen ten opzichte van de fossiele situatie. Mogelijk is dit het gevolg van het ouder worden van het bos en/of veranderingen in beheer. Hier wordt in hoofdstuk 5 verder op ingegaan.

Het OS van de B-horizont is beduidend lager dan die van de A-horizont. Er zijn geen verschillen zichtbaar tussen de actuele en fossiele bodems.



Figuur 30: Organisch-stofgehalte (OM) van de A-horizont (boven) en B-horizont (onder), bij de verschillende bodemtypen. Foutenbalken geven de standaardfout (SE) weer.



5.9 PCA

Voorgaande paragrafen gingen in op verschillende parameters per bodemtype. Aanvullend is door Onderzoekcentrum B-WARE een *Principale Componentenanalyse* (PCA) uitgevoerd. Een PCA heeft als toegevoegde waarde dat meerdere parameters in één keer worden geanalyseerd, waardoor het mogelijk is om bepaalde patronen te zien in de onderzoekslocaties. Het doel van deze PCA is antwoord te geven op de volgende twee vragen:

1. Zegt het bodemtype tegenwoordig nog iets over de abiotische condities?
2. Was dat onderscheid vroeger anders?

De volgende parameters zijn geselecteerd voor in de analyse:

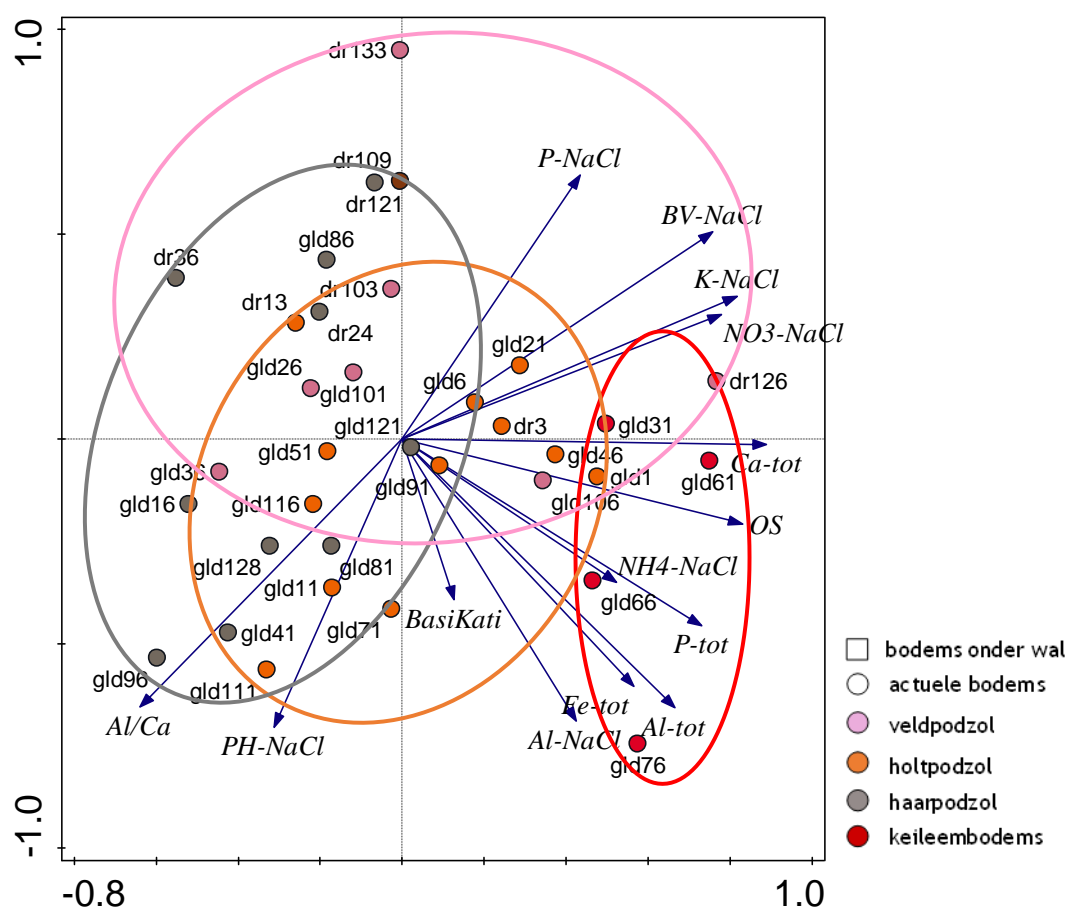
- M.b.t. rijkdom van de bodem: Al-t, Ca-t, Fe-t, P-t, pH-NaCl, som basische kationen, P-NaCl, NH₄-NaCl, NO₃-NaCl, BV-NaCl (basenverzadiging)
- Andere belangrijke parameters: OS% (organisch-stofgehalte), Al/Ca, Al-NaCl, K-NaCl.

Hieronder wordt aan de hand van PCA-diagrammen antwoord gegeven op de twee vragen. Niet alle parameters zijn opgenomen in hetzelfde diagram. De overige diagrammen (bijv. met pH) en de werkwijze zijn opgenomen in Bijlage 2.

1. Zegt het bodemtype tegenwoordig nog iets over de abiotische condities?

In Figuur 31 is het PCA-diagram opgenomen waarin de parameters van de A-horizont zijn weergegeven. Handmatig zijn er cirkels om de ligging van de verschillende bodemtypen getrokken. Wat in het diagram opvalt is:

- De keileemgronden (rode cirkel) hebben een aparte ligging ten opzichte van de podzolgronden.
- Ze onderscheiden zich door hogere concentraties P, Ca, Al, NH₄ en Fe, daarnaast hebben ze een hoger organisch-stofgehalte (OS).
- De podzolgronden zijn juist armer aan P, Ca, Al, NH₄ en Fe en organische stof.
- Ze hebben bovendien elk geen duidelijk 'eigen ligging'; de cirkels overlappen. Dat laat zien dat de bodems redelijk op elkaar lijken qua bodemchemie en organisch-stofgehalte. De van oorsprong matig rijke holtpodzolgronden lijken dus even arm als de van nature armere veld- en haarpodzolgronden.



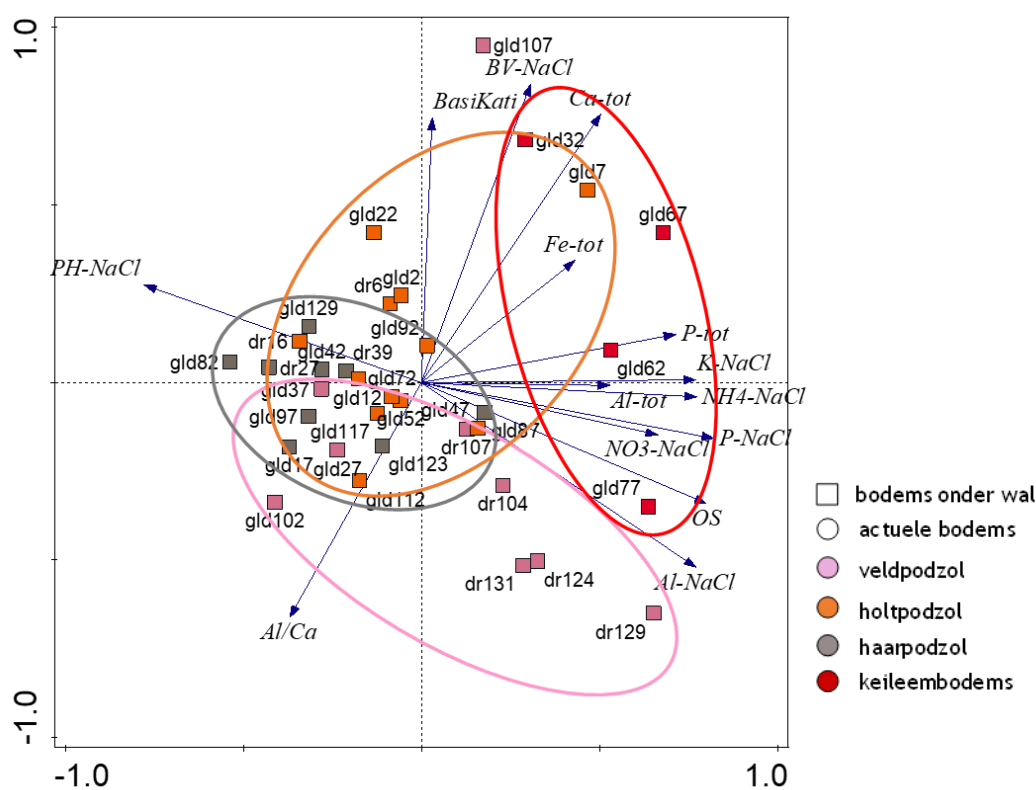
Figuur 31: PCA van de actuele A-horizonten met in kleur de bodemtypen. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld.



2. Was dat onderscheid vroeger anders?

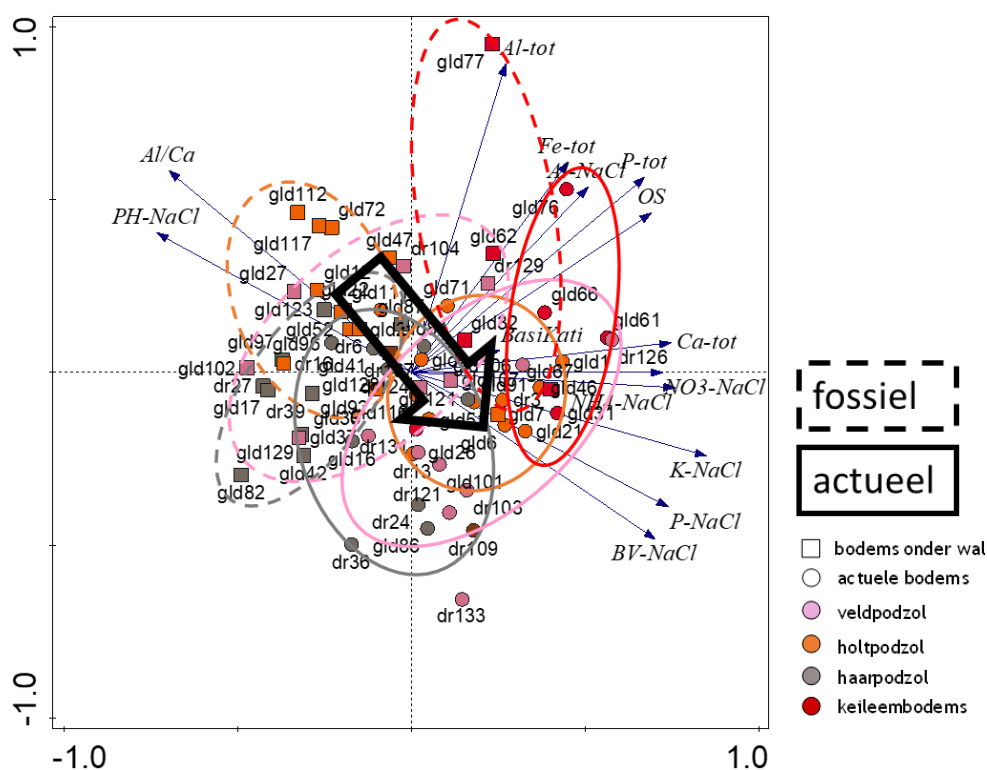
In Figuur 32 is een vergelijkbaar PCA-diagram opgenomen, maar dan voor de fossiele bodems. Het diagram laat zien:

- De keileemgronden correleren wederom met hogere nutriënten- en basenconcentraties (basenverzadiging, Ca, Fe, P, K, NH₄) en een hoger organisch-stofgehalte.
- De podzolgronden hebben meer een eigen plek in het diagram in tegenstelling tot bij de actuele A-horizonten. De holtpodzolgronden overlappen deels met de keileemgronden en correleren dus sterker met basische kationen, basenverzadiging, Ca en Fe. Ook correleren ze met een hogere pH (zie Bijlage 2). De veld- en haarpodzolgronden zijn armer, waarbij de veldpodzolgronden duidelijker correleren met hogere concentraties Al.



Figuur 32: PCA van de fossiele A-horizonten met in kleur de bodemtypen. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld.

In Figuur 33 zijn de diagrammen van de actuele en fossiele A-horizont gecombineerd. Het diagram laat zien dat de bodems in de loop van de tijd zijn verschoven naar hogere nutriëntenconcentraties (P, K, NO₃). Daarnaast correleren de actuele bodems met een lagere pH (zie andere PCA-diagram in Bijlage 2). De holtpodzolgronden zijn het meest veranderd: deze hebben in Figuur 33 een volledig andere ligging.



Figuur 33: Gecombineerde PCA-diagram van de actuele en fossiele A-horizont. De pijl geeft de verschuiving van de bodems weer, richting hogere nutriëntenconcentraties en een lagere pH.

5.10 Conclusies A- en B-horizont

Op basis van de grafieken en PCA-diagrammen in dit hoofdstuk zijn de volgende conclusies te trekken:

- De bodems zijn rijker geworden aan N.
- Waarschijnlijk als gevolg daarvan is de pH gedaald (alle bodemtypen) en de Al-concentraties gestegen (holt- en haarpodzolgrond, oude rivierklei).
- De basische kationen en de voedingsstoffen (K en P) zijn toegenomen, terwijl de hypothese was dat deze concentraties lager zouden zijn geworden als gevolg van uitspoeling (zie Figuur 21 aan het begin van het hoofdstuk).
- De podzolgronden zijn nu uniform arm. Ca. 100 jaar geleden (ouderdom fossiele bodems) was er wel meer verschil (zie PCA). De holtpodzolgronden waren rijker en minder zuur dan veld- en haarpodzolgronden.



6 Conclusies en discussie

In dit onderzoek is de bodemchemie van fossiele met actuele bosbodems (A-, B- en C-horizont) vergeleken, bij de van nature arme haarpodzolgronden (n=9) en veldpodzolgronden (n=5) en de van nature matig rijke holtpodzolgronden (n=12). Ter vergelijking is er ook een aantal keileemgronden (n=4) en locatie op oude rivierklei (n=1) onderzocht. De vergelijking laat zien in hoeverre de bodems zijn veranderd ten opzichte van een historische situatie door fossiele bodems te onderzoeken (± 100 –150 jaar oud).

6.1 Verzuring van de A- en B-horizont, vrijkomen van Al

De vergelijking van de fossiele A- en B-horizont met de actuele, laten zien dat de bodem rijker is geworden aan stikstof (NO_3^- en NH_4^+). Dit is een logisch gevolg van de verhoogde stikstofdepositie van afgelopen decennia. Bij omzetting van NH_4^+ naar NO_3^- middels nitrificatie komt zuur (H^+) vrij, hetgeen de bodem verzuurt. Bij alle onderzochte bodemtypen is dit effect op de pH te zien: de fossiele A-horizont heeft een pH van 4,3–6,1, in de actuele situatie is dat 4–4,1. Een pH van $<4,2$ betekent dat de bodems zich niet meer in het kationbuffertraject bevinden, maar in het aluminiumbuffertraject.⁴¹ Dat betekent dat er geen kationen meer worden gebruikt om de zuren te bufferen, maar dat in plaats daarvan Al in oplossing gaat. Aluminium is al in lage doses giftig voor gevoelige flora en fauna.⁴² Voorliggend onderzoek heeft laten zien dat de concentraties voor planten beschikbaar Al is toegenomen bij de haar- en holtpodzolgronden en de oude rivierklei.

6.2 Het moedermateriaal verweert; maar er is nog wel iets te halen

Zoals verwacht is het actuele moedermateriaal (C-horizont op 120 cm diepte) van de keileemgronden en oude rivierklei veel rijker dan dat van alle onderzochte podzolgronden. Het hoge lutum- of siltgehalte zorgt voor een hoge bindingscapaciteit (net als organische stof), waardoor deze bodems rijker zijn aan kationen en worden gekenmerkt door een hogere pH. De podzolgronden zijn daarentegen uniform arm (minder kationen, lagere pH). Deze zandige bodems kunnen minder kationen binden. De verwachting was dat holtpodzolgronden hogere concentraties kationen zouden hebben, dit is echter niet naar voren gekomen in dit onderzoek.⁴³

Het fossiele moedermateriaal van de haar- en holtpodzolgronden (120 cm diepte onder de wal) heeft een hogere pH-H₂O dan het actuele moedermateriaal. Verzuring heeft mogelijk ook op deze diepte effect (gehad). Er is geen verschil in som van de basische kationen. De holt- en haarpodzolgronden zijn waarschijnlijk al een lange tijd aan het degraderen, ook te zien aan de bleking van de A-horizonten. Wellicht zijn de bodems dus al sterk gedegradeerd voorafgaand aan de grote stikstofdepositie vanaf de 20^e eeuw. Enerzijds komt dit door natuurlijke uitlogingsprocessen⁴⁴, anderzijds mogelijk ook door intensief landgebruik door begrazing en gebruik als eikenhakhout, dat al eeuwenlang voor zuur strooisel zorgt.

⁴¹ De Graaf, 2000.

⁴² o.a. Vos, 1985; Delhaize & Ryan, 1995; Kochian & Pineros, 2005; Imadi et al., 2016.

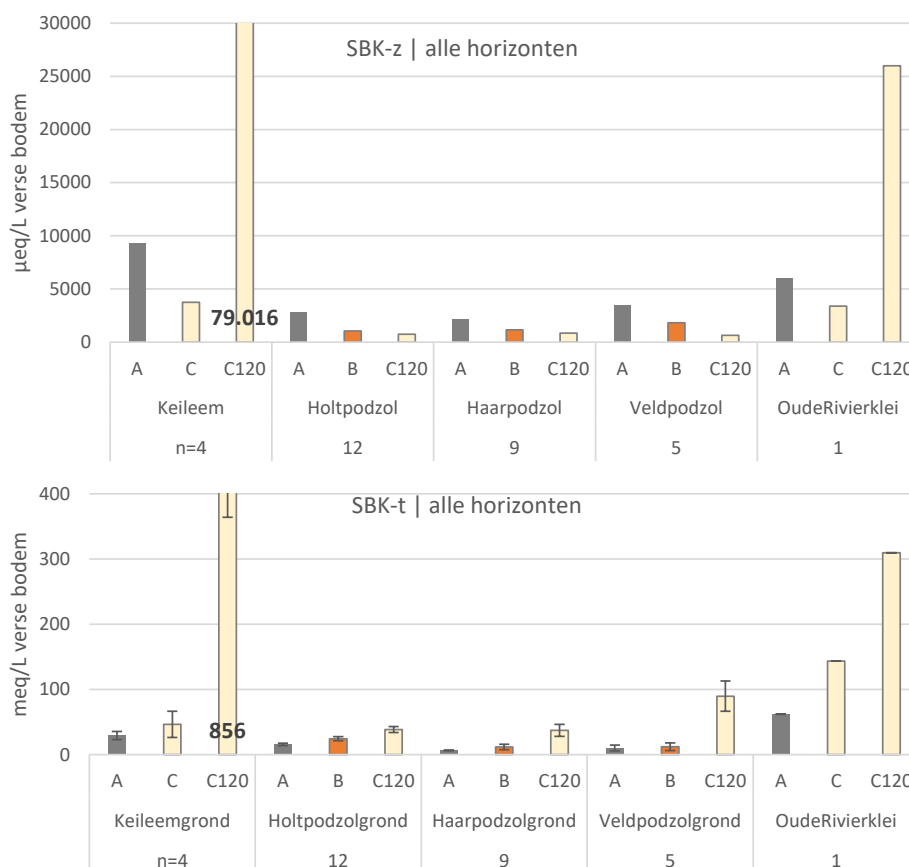
⁴³ Al et al., 2020.

⁴⁴ Iversen, 1958.



Vergelijking van de verschillende horizonten laat zien in hoeverre er in potentie 'nog iets te halen is' door boomwortels op grotere diepte in de bodem (120 cm). In Figuur 34 is de som van de basische kationen (vrij beschikbaar; SBK-z en totale voorraad; SBK-t) weergegeven voor de verschillende horizonten. Er zijn twee groepen te onderscheiden:

- De rijke bodems (keileem en oude rivierklei) zijn oppervlakkig verarmd (A-horizont en C-horizont direct daaronder), maar zijn nog (zeer) rijk op 120 cm diepte. Dat betekent dat middels hydrologisch herstel in combinatie met het versterken van rijkstrooiselsoorten er potentie is om deze basen weer in de toplaag van de bodem te krijgen. Voor deze groeiplaatsen is het niet noodzakelijk om met bufferende stoffen aan de slag te gaan, omdat er een ruime voorraad basen op enige diepte beschikbaar is.
- De podzolgronden zijn uniform arm, dit geldt voor alle horizonten. Bij de wisselvochtige veldpodzolgronden heeft het moedermateriaal een iets hogere totale voorraad basische kationen. Deze kationen kunnen mogelijk voor boomwortels beschikbaar worden wanneer de waterhuishouding wordt verbeterd. Vaak liggen deze bossen in een sterk ontwaterd gebied. Het is onduidelijk in hoeverre dit voldoende effect heeft om de buffering van de A-horizont te herstellen.



Figuur 34: Vergelijking van de actuele basenverzadiging (vrij beschikbaar) en som van de basische kationen (-z = beschikbaar, -t = totaal) tussen horizonten per bodemtype. C120 = moedermateriaal op 120 cm diepte.



6.3 Weinig kationen, fosfor en kalium; maar toename t.o.v. fossiele bodems

Er zijn in de podzolgronden weinig basische kationen beschikbaar voor buffering. De basenverzadiging en de SBK is zowel in de fossiele als actuele situatie erg laag (SBK-z, A-horizont, podzolgronden: 2176–3446 $\mu\text{eq/L}$). Het verschil in rijkdom tussen de van nature matig rijke holtpodzolgronden en de van nature armere veld- en haarpodzolgronden is in de A- en B-horizont niet (meer) zichtbaar. De keileemgronden en oude rivierklei zijn (veel) rijker aan basische kationen.

Opvallend is dat bij de keileemgronden, de haar- en holtpodzolgronden de SBK in de actuele A-horizont hoger is dan in de fossiele. Dit geldt ook voor fosfor (P) (alle bodemtypen) en kalium (K) (podzolgronden). De verwachting was dat als gevolg van verzuring kationen en voedingstoffen zouden uitspoelen, wat zou resulteren in een lagere SBK⁴⁵ en P- en K-concentratie. Van heidegronden is bekend dat P op zandgronden uitspoelt als gevolg van verzuring door N-depositie.⁴⁶ Dit omgekeerde patroon kan het gevolg zijn van twee oorzaken:

- Het organisch-stofgehalte van de bodem is toegenomen doordat het bos ouder is geworden. De mate waarin kationen kunnen binden aan de bodem, wordt in grote mate bepaald door het aandeel lutum en organische stof. Bovendien is de schimmelactiviteit groter bij meer organische stof, waardoor voedingsstoffen in de organische laag kunnen worden vastgehouden en niet uitspoelen.
- Uit voorliggend onderzoek blijkt dat bij de haar- en holtpodzolgronden het organisch-stofgehalte van de actuele A-horizont inderdaad hoger is dan in de fossiele bodem.
- Bomen op of nabij de wal hebben kationen, P en K uit de fossiele bodem opgenomen. Dit is niet eerder onderzocht.⁴⁷ Aangezien de fossiele bodem niet meer wordt aangerijkt van bovenaf, zouden de concentraties kationen, P en K daardoor alsmaar afnemen. Het is aannemelijk dat bomen geen invloed hebben op de Al-concentraties in de fossiele bodem, gezien Al toxisch is en bomen dit niet opnemen.

6.4 Meer organische stof door ouderdom en veranderingen beheer

De toename van de SBK, P- en K-concentraties kan onder andere worden verklaard door de toename van organische stof in de bosbodem. Dit is in voorliggend onderzoek aangetoond bij de haar- en holtpodzolgronden en de oude rivierklei. Het organisch-stofgehalte correleert (net als het lutumgehalte) met de SBK.⁴⁸ Doordat het bos ouder geworden is het organisch-stofgehalte toegenomen en daarmee de SBK, maar ook de voedingstoffen P en K. Mogelijk heeft de stikstofdepositie ook geleid tot meer organische stof in de bodems.

Tijdens het veldonderzoek leken er grote overeenkomsten tussen het organisch-stofgehalte van de actuele en fossiele A-horizont. Wel leek de fossiele A-horizont zwakker ontwikkeld of dunner. Dit is vermoedelijk het gevolg van een veel hogere stikstofdepositie en veranderd bosbeheer. Vooral sinds de jaren '70 is het bosbeheer minder gericht op een

⁴⁵ Bobbink & Lamers, 1999 (zie ook Figuur 21 in hoofdstuk 4)

⁴⁶ Siepel, 2015.

⁴⁷ Eerdere onderzoeken naar fossiele bodems (Spek, 2004 & Smeenge, 2020) betroffen bodems buiten het bos, op landbouwgronden (zie ook Tekstkader 2).

⁴⁸ Zoals ook aangetoond in Bijlsma, 2020.



‘schoon en net’ bos. Tak- en tophout is blijven liggen, er is geen hout meer uitgeslept en zijn bosbodems niet meer geplagd. Er is meer dood hout in het systeem gekomen, hetgeen in algemene zin gunstig is voor de ecologische waarden van het bosecosysteem⁴⁹, maar daarnaast het organisch-stofgehalte in de bodem heeft verhoogd. Dit is gunstig voor de bodemchemie, omdat kationen op lutumarme zandgronden hoofdzakelijk kunnen binden aan organische stof. Dit betekent dat de vitaliteit van het bos over het algemeen zal toenemen naarmate het bos ouder wordt.

⁴⁹ Zie o.a. Wijdeven, 2006.



6.5 Evaluatie methode fossiele bodems

Het doel van voorliggend onderzoek was om een beeld te krijgen van de bodemchemie voorafgaand aan de stikstofdepositie, met onderscheid tussen verschillende bodemtypen binnen de hogere zandgronden van Gelderland. Daarvoor is gebruik gemaakt van fossiele bodems onder houtwallen uit ca. 1850–1930. Deze methode heeft het volgende gebracht:

- De effecten van stikstofdepositie op de toename van nitraat/ammonium, afname van de pH en toename van de aluminiumconcentratie zijn goed meetbaar.
- De verschillen tussen rijke en armere bosgroeiplaatsen zijn daarmee goed in beeld te brengen met betrekking tot pH, N en Al.

Er komt ook een aantal onzekerheden naar boven naar aanleiding van deze methode met fossiele bodems. Het onderzoek toont lagere concentraties kationen en voedingsstoffen onder de wal ten opzichte van de actuele bosbodem. Dit is mogelijk het gevolg van het ouder worden van het bos, daarmee het toenemen van de organische stof in de bodem, waarmee de concentraties kationen en voedingsstoffen ook toenemen. Echter kan ook zijn dat de fossiele bodems toch zijn beïnvloed door diep wortelende bomen op en nabij de houtwallen, die de kationen en voedingsstoffen hebben opgenomen. Hier is geen rekening mee gehouden bij aanvang van het onderzoek. In eerdere onderzoeken met fossiele bodems speelde dit niet, omdat deze als akker of grasland in gebruik waren.⁵⁰

Het onderzoek toont aan de holtpodzolgronden sterk gedegradieerd zijn en nu even arm zijn als de haar- en veldpodzolgronden. De armoede van holtpodzolgronden is deels te verklaren door de heidegeschiedenis (net als de haarpodzolgronden). Degradatie van de holtpodzolgronden is dus al langer gaande dan sinds de stikstofdepositie. Vergroten van de steekproef met holtpodzolgronden op oude bosgroeiplaatsen is aanbevolen.

⁵⁰ Spek, 2004 & Smeenge, 2020



7 Perspectieven voor herstel

De vervolgvraag is wat deze bevindingen voor licht schijnen op de mogelijke én noodzakelijke maatregelen om de chemie van de bosbodem te herstellen of de kwaliteit daarvan te behouden. Eén van de belangrijkste maatregelen voor gezonde bosgroeiplaatsen is het *terugdringen van de huidige stikstofdepositie*. Dit is – zeker door een beheerder – niet op korte termijn op te lossen. Toch zijn er *perspectieven om de kwaliteit van de groeiplaatsen te verbeteren*. Die perspectieven verschillen per bodemtype.

7.1 Rijke bodems

Rijke bodems bestaan uit klei of leem of staan onder invloed van (rijk) grondwater. In voorliggend onderzoek zijn keileemgronden en één locatie op oude rivierklei onderzocht. Rijke bodems hebben bodemchemisch gezien een beperkt risico op verzuring. Door ontwatering en stikstofdepositie is de bodem echter alsnog verzuurd: de pH van de onderzochte keileemgronden en oude rivierklei is gedaald tot onder de 4,2 (overgang naar aluminiumbufferrange). Binnen 120 cm diepte is de bodem echter nog rijk aan basen. Daardoor zijn rijke bodems relatief goed en eenvoudig te herstellen via hydrologische maatregelen door sloten en greppels te dempen of te verondiepen.⁵¹ Verder zijn op tal van dit soort plaatsen boomsoorten aangeplant met zuur en arm strooisel, waaronder fijnspar, beuk en eik, ten koste van soorten met rijker strooisel die op deze standplaatsen van nature voorkomen, zoals hazelaar, zoete kers, linde, esdoorn, inheemse vogelkers, iep en gewone es. Het vrijstellen van deze boom- en struiksoorten, in jonge fase bevoordelen of herintroduceren levert in combinatie met hydrologisch herstel een rijke en gezonde bosbodem op. De grootte van de wilddruk kan bij aanplant bepalend zijn voor het goed aanslaan van dergelijke rijkstrooiselsoorten.

7.2 Matig rijke bodems

Matig rijke bodems, de holtpodzolgronden, zijn ontwikkeld in relatief rijk (rivier)zand. Voorliggend onderzoek laat zien dat de holtpodzolgronden sterk zijn verweerd en uitgeloozd, waarschijnlijk ook al ruimschoots voor de stikstofdepositie. Ze zijn even arm als de (ook zeer arme) haarpodzolgronden. Bij een pH van <4,2, zijn er grote risico's op verdere verarming van de bodem en het uitsterven van restpopulaties (o.a. dalkruid, lelietje-van-dalen, grote muur, witte klaverzuring, bosanemoon). Aanbrengen van bufferende stoffen als steenmeel om de uitgeloozde toplaag aan te vullen is het overwegen waard. Om de bufferende stoffen in de bodem te krijgen, is van belang dat voldoende soorten met rijk (goed afbreekbaar) strooisel aanwezig zijn. De oplossingsrichting voor deze matig rijke bodems is in ieder geval het vrijstellen en in jonge fase bevoordelen van rijk-strooiselsoorten zoals linde, ratelpopulier, hazelaar, boswilg, lijsterbes en vuilboom. Bij het ontbreken van rijk-strooiselsoorten is herintroductie gewenst. Echter is het onzeker of de ecologische eisen die linde aan de groeiplaats stelt, past bij de onderzoekslocaties. De lindes op Het Nationale Park De Hoge Veluwe hebben een zeer beperkte hoogte, terwijl deze op de Velwezoo (lössgronden bij Rheden, buiten onderzoeksgebied) wel een vitale

⁵¹ Maatregelen voor versterken buffering en vochtvoorzienig in het wortelpakket zijn soms andere maatregelen dan die voor vernatten.



groei en hoogte laten zien.⁵² Soorten die minder eisen stellen aan de basenverzadiging, zoals hazelaar, vuilboom, berk en lijsterbes, zogenaamde ‘kwartiermakers’, kunnen ook een bijdrage leveren aan het verbeteren van de bosgroeiplaats. Deze soorten staan vaak al in het bos of in de omgeving.

7.3 Arme (droge) bodems

Arme (droge) bodems zijn van nature relatief zuur, maar als gevolg van de stikstofdepositie verder verzuurd. In voorliggend onderzoek zijn de haarpodzolgronden onderzocht. Zowel het moedermateriaal als de A- en B-horizont zijn zeer arm aan basische kationen. De pH van de A- en B-horizont is afgenomen en de bodems bevinden zich veelal in het aluminiumbuffertraject.

In *oude, historische bossen* (<1850) kan de zeer lage basenverzadiging het gevolg van een langdurige natuurlijke verzuring door inzijging en humusprofielontwikkeling.⁵³ Oude bosbodems hebben een zeer uitgebreide en diverse soortensamenstelling, waaronder de bodemfauna.⁵⁴ In de loop van de tijd kan een dik ectorganisch humuspakket ontstaan (“H-laag”). Deze bevat een waardevol bodemarchief (pollen, koolstof) en zijn schaars vertegenwoordigd. In bossen met een dergelijke (dikker dan ± 5 cm) H-laag dient men daarom terughoudend te zijn met het verhogen van de zuurbufferende capaciteit. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen bodems die tot op grote diepte zuur zijn en bossen waar nog wel ‘iets te halen valt’ met rijk-strooiselsoorten, doordat bepaalde afzettingen zoals leem- of kleilagen met enige buffering in de ondiepe ondergrond aanwezig zijn. Binnen dit onderzoek is in diverse bossen een H-laag aangetroffen, op één locatie was die dikker van 5 cm.

In *jonge bossen* is de situatie anders. Dit betreffen veelal heidebebossingen vanaf 1850. Het zijn met name deze bossen waar het organisch-stofgehalte in de bodem is toegenomen door het ouder worden van het bos en extensiever beheer van de bosbodem (het laten liggen van dood hout). Hierdoor zijn de basische kationen en concentraties fosfor en kalium toegenomen. Echter is door verzuring ook meer aluminium vrijgekomen. Alleen het aanplanten van rijk-strooiselsoorten heeft naar verwachting vrijwel geen effect op herstel van de (van nature al geringe) buffering. De vermoedelijke oplossingsrichting is daarom het aanbrengen van bufferende stoffen zoals steenmeel. De positieve ontwikkeling van meer organische stof in de bodem wordt hiermee aangevuld met een hogere beschikbaarheid van mineralen, zonder dat het ten koste gaat van de afbraak van organische stof (zoals bij het uitstrooien van snelle kalk het geval is). Om het effect van deze maatregel te verduurzamen (namelijk de mineralen in de bosbodem te behouden) kan het worden gecombineerd met het vrijstellen of in jonge fase bevoordelen van ‘kwartiermakers’ (rijk-strooiselsoorten met een lage nutriënteneis) zoals berk, ratelpopulier, boswilg, lijsterbes en vuilboom. Bij afwezigheid van deze soorten kan herintroductie worden overwogen.

⁵² Pers. observatie H. Smeenge.

⁵³ Bijlsma et al., 2020.

⁵⁴ Siepel, 2015.



7.4 Arme (vochtige) bodems

Arme (vochtige) bodems zijn meestal van nature zuur tot zeer zwak gebufferd. In voorliggend rapport zijn de veldpodzolgronden onderzocht. Net als de haarpodzolgronden zijn ze rijker geworden aan stikstof en ze zijn verzuurd. Binnen 120 cm heeft de bodem op de onderzoekslocaties nog een relatief gunstige totale voorraad aan basische kationen. Deze bossen liggen vaak op rabatten, omdat ze van nature in de winter nat zijn. Herstel van de waterhuishouding is de eerste stap richting een gezonde bosgroeiplaats. Dit betekent dat rabatsloten en overige ontwateringen in het bos worden gedempt. Een andere mogelijkheid is het verminderen van de verdamping door het bos in het voorjaar, door donker naaldhout om te vormen naar loofhout. Op plekken waar laagtes ontbreken en (basenhoudend) grondwater niet de wortelzone van de bomen beïnvloedt, speelt eenzelfde situatie als bij de arme droge bodems en is aanbrengen van bufferende stoffen zoals steenmeel een mogelijke oplossingsrichting.

7.5 Maatregelen voor een 'gezondere bosgroeiplaats'

Uit voorliggend onderzoek blijkt het ene bos het andere niet. Samengevat zijn de volgende stappen (in deze volgorde) van belang voor een gezondere bosgroeiplaats:

- 1 | Herstel van de waterhuishouding door watergangen te verondiepen/dempen en/of naaldbos om te vormen naar loofbos
- 2 | Vrijstellen van rijk-strooiselsoorten, of bij afwezigheid groeiplaats-inheemse soorten inbrengen
- 3 | Inbrengen van bufferende stoffen overwegen

Om te kunnen vaststellen welke maatregelen passend zijn voor een specifieke bosgroeiplaats, is onderzoek ter plekke van belang. In de praktische handleiding 'Op weg naar een gezondere bosgroeiplaats'⁵⁵ wordt aandacht besteed aan het diagnosticeren van het bos en het vaststellen van de benodigde en passende maatregelen middels een beslisboom.

⁵⁵ Smeenge et al., 2021.



Literatuur

- Aggenbach, C.J.S. & M.H. Jalink, 2001.** Duinvalleien (kalkarme duinen). Indicatorsoorten voor verdroging en eutrofiëring van plantengemeenschappen in duinvalleien van het Waddendistrict. Serie indicatorsoorten, 6.
- Al, E., I. Borkent & J. Kremers, 2020.** Bosbodemonwikkeling en beheer op droge zandgronden. Vakblad Bos, Natuur & Landschap, 2020.
- Bakker T.W.M., J.A. Klijn & F.J. van Zadelhoff, 1981.** Nederlandse kustduinen, Landschapsecologie. Pudoc, Wageningen.
- Bakker, H. D. & J. Schelling, 1989.** Systeem van bodemclassificatie voor Nederland. Staring Centrum Wageningen.
- Bergsma, H., J.J. Vogels, M. Weijters, R. Bobbink, A.J.M. Jansen & L. Krul, 2016.** Tandrot in de bodem – hoeveel biodiversiteit kan de huidige minerale bodem nog ondersteunen? Bodem. Volume 1: pp 27–29.
- Bobbink, R., & L. P. M. Lamers, 1999.** Effecten van stikstofhoudende luchtverontreiniging op vegetaties: een overzicht. Technische commissie bodembescherming.
- Bosch, J.H.A., H.J.T. Weerts & F.S. Busschers, 2003.** Beschrijving lithostratigrafische eenheid Formatie van Urk. TNO.
- Bijlsma, R.J., S.P.J. Van Delft & J.J. De Jong, 2020.** Natura 2000–habitattypen droge bossen in Drenthe – Onderzoek naar de kwaliteit van bodem, vegetatie en stamhout van eik in oude bossen. Wageningen University & Research.
- Braje T.J., 2015.** Earth Systems, Human Agency, and the Anthropocene: Planet Earth in the Human Age. Journal of Archaeological Research 23.
- Braun–Blanquet, J., 1964.** Pflanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde. 3rd Edition, Springer–Verlag, Berlin, 631.
- Ten Cate, J.A.M., A.F. Van Holst, H. Kleijer & J. Stolp, 1995.** Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel A: bodem.
- Crutzen, P.J. & E.F. Stoermer, 2000.** The “Anthropocene”. Global Change Newsletter, 41.
- Van Delft, B., R.W. De Waal, R. Kemmers & P. Mekking, 2004.** Veldgids humusvormen; beschrijving en classificatie van humusprofielen voor ecologische toepassingen. Alterra.
- Delhaize, E. & P. R. Ryan, 1995.** Aluminum toxicity and tolerance in plants. Plant Physiology 107(2): 315–321.
- De Graaf, M.C.C., 2000.** Exploring the calcicole–calcifuge gradient in heathlands.
- De Vries, W., M. Weijters, A. de Jong, R. de Waal, P. Bolhuis, J. Bloem, A. van den Burg, G. van Duinen, R. Bijlsma en R. Bobbink, 2018.** Herstel van loofbossen op droge zandgronden, tussenrapportage 2018. Wageningen Environmental Research, Wageningen, Mei 2018.
- Guo, Y. & H. Siepel, 2020.** Monitoring Microarthropods Assemblages along a pH Gradient in a Forest Soil over a 60 Years’ Time Period. Applied Sciences, 10(22), 8202.
- Hommel P.W.F.M., Th Spek & R.W. de Waal, 2002.** Boomsoort, strooiselkwaliteit en ondergroei in loofbossen op verzuringsgevoelige bodem. Een verkennend literatuur– en veldonderzoek. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra–rapport 509.
- Hommel P.W.F.M, R.W. de Waal, B. Muys, J. den Ouden en Th. Spek., 2007.** Terug naar het lindewoud strooiselkwaliteit als basis voor ecologisch bosbeheer. KNNV–uitgeverij.
- Imadi, S. R., S. Waseem, A.G. Kazi, M.M. Azooz & P. Ahmad, 2016.** Aluminum toxicity in plants: an overview. Plant Metal Interaction, 1–20.



- Iversen, J., 1958.** The bearing of glacial and interglacial epochs on the formation and extinction of plant taxa. Systematics of today (ed. O. Hedberg). Uppsala Univ., Uppsala.
- Jenny H. 1941.** Role of the plant factor in the pedogenic functions. Ecology 39.
- Jenny, H., 1980.** The Soil Resource. Origin and Behavior. Ecological Studies 37. Springer-Verlag, New-York.
- Kemmers R.H. & R.W. de Waal, 1999.** Ecologische typering van bodems. Deel 1 Raamwerk en humusvormtypologie. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 667-1.
- Kochian, L. V. & M. A. Pineros, 2005.** The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. Plant and Soil 274(1-2): 175-195.
- Nijssen, M. E., M. F. Wallis De Vries & H. Siepel, 2017.** Pathways for the effects of increased nitrogen deposition on fauna. Biological Conservation 212 (2017): 423-431.
- Ouden J. den, B. Muys, F. Mohren & K. Verheyen (red.), 2010.** Boscologie en Bosbeheer. ACCO Leuven.
- Schaminée J.H.J., A.H.F. Stortelder & V. Westhoff, 1995.** De Vegetatie van Nederland. Deel 1. Inleiding tot de plantensociologie –grondslagen, methoden en toepassingen. Opulus press. Uppsala-Leiden.
- Schaminée, J.H.J. & A.M. Janssen, 2009.** Zee en kust: Natura 2000-gebieden. Europese natuur in Nederland.
- Schokker, J., F.D. de Lang, H.J.T. Weerts, C. den Otter & S. Passchier, 2007.** Beschrijving lithostratigrafische eenheid Formatie van Boxtel. TNO.
- Smeenge, H., A.A.M. Kieskamp, G.H. Bulten & M.E.A. Broekmeijer, 2021.** Op weg naar een gezondere bosgroeiplaats – een praktische handleiding voor beheerders. Bosgroepen, Ede.
- Stortelder A.F.H. J.H.J. Schaminée & P.W.F.M. Hommel, 1995.** De Vegetatie van Nederland. Deel 5. Plantengemeenschappen van ruigten, struwelen en bossen. Opulus press. Uppsala-Leiden.
- Smeenge, H., 2005.** Holten en strubben in het stroomgebied van de Drentse Aa. Wageningen Universiteit.
- Smeenge, H., 2020.** Historische landschapsecologie van Noordoost-Twente. Acht interdisciplinaire studies op het snijvlak van aardkunde, ecologie en cultuurhistorie (ca. 13.000 BP – heden). Proefschrift Rijksuniversiteit Groningen.
- Siepel, H., 2015.** De rol van de bodemfauna in oude bosbodems. Vakblad natuur bos landschap 112, blz 23.
- Siepel, H., R. Bobbink, B.P. van de Riet, A.B. van den Burg & E. Jongejans, 2019.** Long-term effects of liming on soil physico-chemical properties and micro-arthropod communities in Scotch pine forest. Biology and Fertility of Soils, 55(7), 675-683.
- Spek Th., 2004.** Het Drentse Esdorpenlandschap; een historisch-geografische studie. Proefschrift Wageningen Universiteit. Matrijs, Utrecht.
- Steffen W, P.J. Crutzen, J.R. McNeill, 2007.** The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? Ambio Vol. 36, No. 8.
- Vos, G., 1985.** Aluminium, een nieuw probleem voor landbouw en volksgezondheid? : een literatuuronderzoek. Wageningen : RIKILT (Rapport / RIKILT 85.50) – 80.
- Westerhoff, W.E. & H.J.T. Weerts, 2003.** Beschrijving lithostratigrafische eenheid Formatie van Waalre. TNO.
- Williams M, J. Zalasiewicz, C.N. Waters, M. Edgeworth, C. Bennett, A.D. Barnosky, E.C. Ellis, M.A. Ellis, A. Cearreta, P.K. Haff, J.A. Ivar do Sul, R. Leinfelder, J.R. McNeill, E. Odada, N.**



- Oreskes, A. Revkin, D. de B Richter, W. Steffen, C. Summerhayes, J.P. Syvitski, D. Vidas, M. Wagreich, S.L. Wing, A.P. Wolfe & A. Zhisheng, 2016.** The Anthropocene: a conspicuous stratigraphical signal of anthropogenic changes in production and consumption across the biosphere. *Earth's Future*, 4.
- Wijdeven, S.M.J., 2006.** Factsheets Dood hout in het bosbeheer. Wageningen, Alterra, Alterra-raport 1430.
- Wolfert H.P., P.W.F.M. Hommel, A.H. Prins & M.H. Stam, 2001.** (Chapter 5) The formation of natural levees as a disturbance process significant tot the conservation of riverine pastures. In: Wolfert H.P, 2001. *Geomorfological Change and River Rehabilitation. Case Studies on Lowland Fluvial Systems in the Netherlands.* Alterra scientific contributions 6. Alterra Green Word Research, Wageningen.
- Zanella, A., B. Jabiol, J.F. Ponge, G. Sartori, R.W. de Waal, B. Van Delft & M. Englisch, 2011.** European humus forms reference base.



Bijlagen

Bijlage 1: Onderzoekslocaties: coördinaten, bodemtype, ouderdom wal volgens historisch-topografische kaarten, humusvorm en vegetatietype

Bijlage 2: Methode en resultaten PCA



Bijlage 1 Onderzoekslocaties

Locatie	Actueel of wal	X	Y	Bodemtype	Humusvorm	Ouderdom wal	Vegetatietype
Boeschoterweg	A	173843	468985	Haarpodzol	mormoder		r44Aa3
Boeschoterweg	W	173816	469031	Haarpodzol		1910	
Borg Barchien	A	216275	533356	Veldpodzol	mullmoder		r45Aa3
Borg Barchien	W	216275	533356	Veldpodzol	mullmoder		
Bruggelen	A	192365	464670	Haarpodzol	mor		r45Aa3
Bruggelen	W	192341	464664	Haarpodzol		1989	
Gortel1	A	188508	482330	Haarpodzol	mormoder		r45Aa3
Gortel1	W	188497	482336	Haarpodzol		1957	
Gortel2	A	188425	482613	Holtpodzol	moder		r45Aa3
Gortel2	W	188420	482601	Holtpodzol		1957	
Harskamp	A	187122	463277	Haarpodzol	mormoder		r44Aa3
Harskamp	W	187101	463286	Haarpodzol		1925	
Heelsum	A	178908	444467	Holtpodzol	mormoder		r45Aa4
Heelsum	W	178919	444460	Holtpodzol		1910	
HeelsumscheBeek	A	183693	445466	Holtpodzol	mullmoder		r45Aa3
HeelsumscheBeek	W	183693	445464	Holtpodzol		1940	
HeiligLandstichting	A	190395	425417	Holtpodzol	mullmoder		r45Aa4
HeiligLandstichting	W	190364	425432	Holtpodzol		1957	
Hekenbroek	A	211453	447732	OudeRivierklei	mull		r46Ab3
Hekenbroek	W	211458	447738	OudeRivierklei		1957	
HeumenseBos	A	185249	420506	Holtpodzol	mullmoder		r45Aa4
HeumenseBos	W	185228	420512	Holtpodzol		1970	
Holtinge	A	212785	534433	Holtpodzol	moder		r45Aa3
Holtinge	W	212788	534440	Holtpodzol		1925	
LandgoedSellink	A	252597	444970	Keileem	moder		r45Aa4
LandgoedSellink	W	252600	444971	Keileem		1900	
Lankheet	A	244746	460116	Veldpodzol	mormoder		r45Aa3
Lankheet	W	244753	460114	Veldpodzol		1900	
LochemseBerg	A	226426	462426	Holtpodzol	mormoder		r45Aa3
LochemseBerg	W	226426	462431	Holtpodzol		1945	
LoenenseBos	A	197118	457220	Holtpodzol	mormoder		r45Aa5
LoenenseBos	W	197112	457217	Holtpodzol		1960	
Loenermark	A	197167	455722	Haarpodzol	mormoder		r45Aa
Loenermark	W	197110	455686	Haarpodzol		1960	
Noordlaarderbos	A	239184	570488	Haarpodzol	moder		r45Aa3c
Noordlaarderbos	W	239180	570496	Haarpodzol		1900	
Norgerholt	A	226233	564014	Holtpodzol	mormoder		r46Ab3
Norgerholt	W	226229	564017	Holtpodzol		1684	
NPHV	A	187707	450162	Holtpodzol	mormoder		r45Aa3
NPHV	W	187712	450178	Holtpodzol		1960	
Renkum	A	179491	448032	Holtpodzol	mormoder		r45Aa3
Renkum	W	179489	448038	Holtpodzol		1910	
Rommelderdijk	A	225734	455007	Veldpodzol	mormoder		r45Aa3
Rommelderdijk	W	225729	455015	Veldpodzol		1940	
Slangenburg	A	222628	443237	Veldpodzol	mormoder		r45Aa4
Slangenburg	W	222627	443248	Veldpodzol		1960	
Velhorst	A	219325	462436	Veldpodzol	moder		r45Aa3
Velhorst	W	219332	462443	Veldpodzol		1948	
Vrijenberg	A	197970	460453	Haarpodzol	mormoder		r45Aa3
Vrijenberg	W	197993	460459	Haarpodzol		1880	
WinterswijkAarnink	A	248041	438918	Keileem	mor		r45Aa5
WinterswijkAarnink	W	248077	438924	Keileem		1900	
WinterswijkKruger	A	248079	438699	Keileem	mormoder		r45Aa4
WinterswijkKruger	W	248092	438706	Keileem		1955	
WinterswijkMeerdink	A	246611	437763	Keileem	mormoder		r45Aa5
WinterswijkMeerdink	W	246599	437778	Keileem		1930	
Wolfhezerheide	A	182613	444465	Holtpodzol	mormoder		r45Aa3
Wolfhezerheide	W	182607	444470	Holtpodzol		1905	
ZuidLhee	A	221866	537396	Haarpodzol	mormoder		r45DG3
ZuidLhee	W	221866	537401	Haarpodzol		1850	
ZwolseBos	A	199627	492468	Haarpodzol	mor		r44Aa3



Bijlage 2 Methode en resultaten PCA

Door Roos Loeb, Onderzoekcentrum B-WARE, maart 2021.

PCA's zijn gemaakt in Canoco 5.04 (Ter Braak & Šmilauer, 1997–2014). Er is alleen gekeken naar de bodemtypen die boven de grondwaterspiegel liggen: uit de dataset zijn beekerd, zwarte enkeerd, oude rivierklei, leekerd verwijderd. Omdat er een verschil is tussen het om% van de wal en de actuele bodems, is er ook een verschil in bodemdichtheid tussen de bodems onder de wal en de actuele bodems. Om minder afhankelijk te zijn van de dichtheid, is gewerkt met de concentraties per kg droge bodem. Het verschil in organische stofgehalte veroorzaakt ook een verschil in CEC tussen de bodems onder de wal en de actuele bodems. Dit zou een verschil kunnen veroorzaken in concentraties kationen in de bodem (bijvoorbeeld Ca en Al en protonen). Om te voorkomen dat parameters voor de PCA onderling gecorreleerd is, zijn tussen alle parameters de correlatiecoëfficiënten berekend. Bij correlaties waarbij $r \geq 0,8$, is slechts 1 van de parameters gekozen. Onderstaande tabel geeft de correlerende parameters aan, en de parameter hieruit die gekozen is voor gebruik in de PCA's.

Correlerende parameters ($r \geq 0,8$), met vetgedrukt de geselecteerde parameter.

parameter	Correlerende parameter
om%	vocht%
Berekende CEC-NaCl	basische kationen
Ktot	basische kationen, Fetot
Mgtot	Fetot, Ktot
Stot	Stot
pH-NaCl	pH-H ₂ O
Ca-NaCl	basische kationen
Mg-NaCl	basische kationen, Fetot, Ktot
S-NaCl	Mg-NaCl

De volgende parameters zijn geselecteerd voor in de analyse:

– parameters om rijkdom bodem: Altot, Catot, Fetot, Ptot, pH-NaCl, basische kationen, P-NaCl, NH₄-NaCl, NO₃-NaCl, bv-NaCl

– andere belangrijke parameters: om%, Al/Ca, Al-NaCl, K-NaCl,

Om beter te voldoen aan een normale verdeling zijn de volgende transformaties uitgevoerd: concentraties: $\ln(x+1)$; Al/Ca-ratio: wortel(x); om%: boogsin(wortel(x)); pH is niet getransformeerd.

De ouderdom van de wal meegenomen als supplemental variable in de PCA van A-horizont wal/act en in de A-horizont van de wal.

– PCA A-horizonten. Legenda: cirkel=actueel, vierkant= wal, veldpodzol = roze,

haarpodzol = grijsbruin, holtpodzol = oranje, loopodzol = bruin, keileem = rood

– PCA C-horizonten 120 cm. Legenda zie boven. Ook gemaakt met vegetatietypen.

vegetatie	code	Kleur
-----------	------	-------



Bosbessen-Dennenbos	r44Aa3	Driehoek paars
Klasse van de eiken- en beukenbossen op voedselarme grond	r45	Rond
Zomereik-verbond	r45A(a)	Rond grijs
Berken-eikenbos	r45Aa3	Rond geel
Beuken-eikenbos	r45Aa4	Rond bruin
Bochtige smele-Beukenbos	r45Aa5	Rond blauw
DG Amerikaanse vogelkers [Zomereik-verbond]	r45DG3	Rond oranje
Eiken-Haagbeukenbos kalkarm	R46Ab3	Vierkant lichtgroen

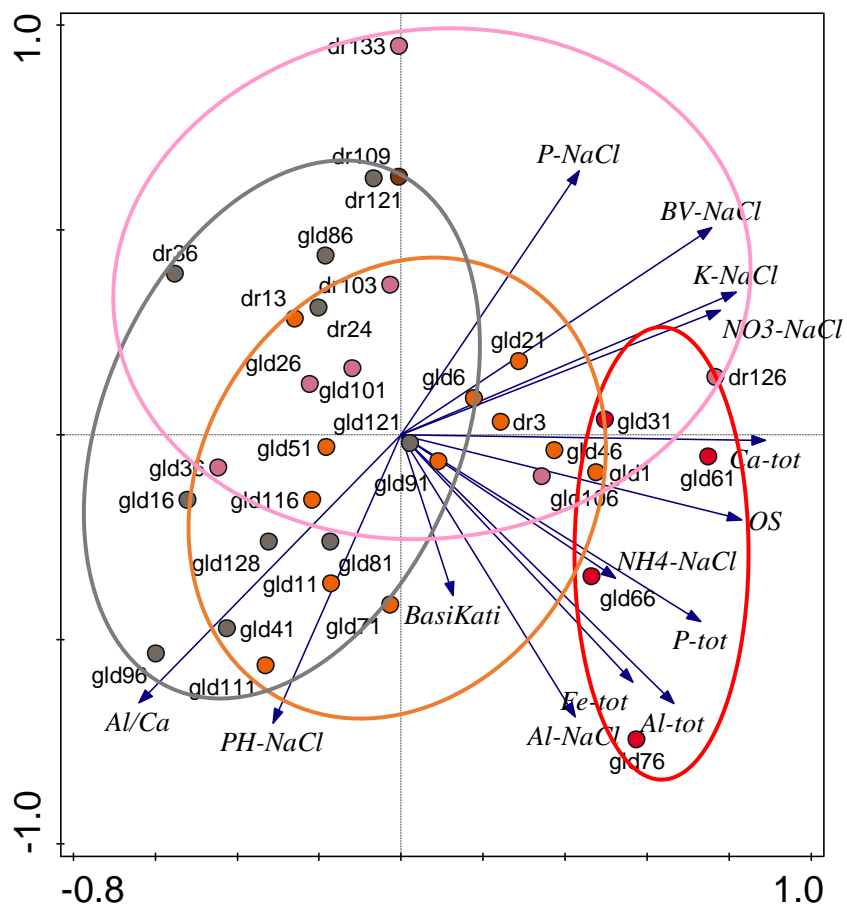
Humusvormen

Humusvorm	kleur
Mul	Geel
Mulmoder	Geeloranje
Moder	Oranje
Mormoder	Bruin
Mor	Zwart



Resultaten en discussie

Vraag 1: zegt bodemtype tegenwoordig nog wel wat over de abiotische condities?

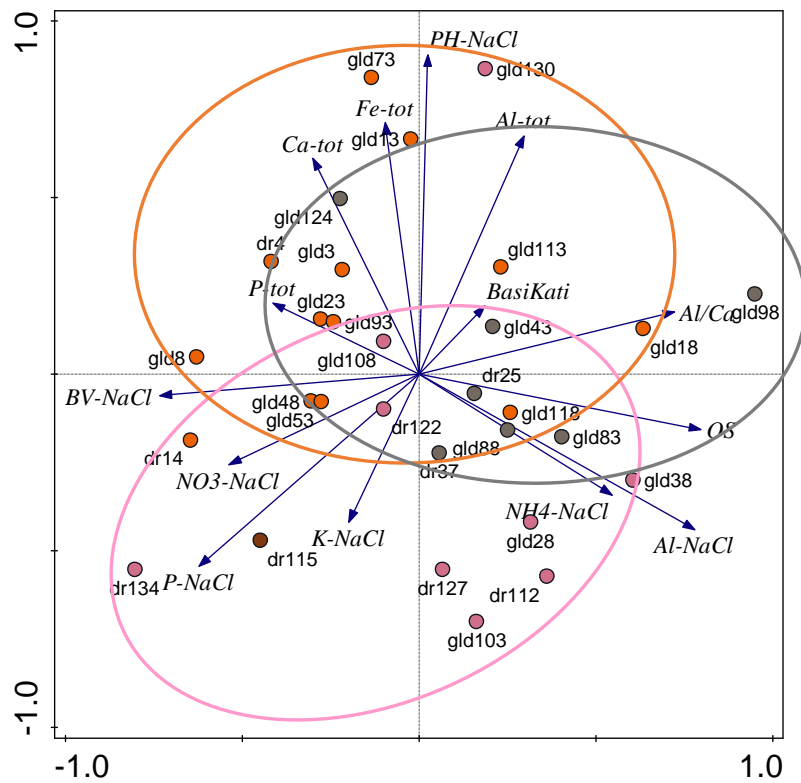


- actuele bodems □ bodems onder wal
- veldpodzol
- holtpodzol
- haarpodzol
- keileembodems
- looppodzol

Figuur 1. PCA A-horizonten Actueel met in kleur de bodemtypen. As1 en As 2. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld.

Tabel 1. PCA A-horizonten actueel

Analysis 'Unconstrained'				
Method: PCA				
Total variation is 476.00000				
Summary Table:				
Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.4134	0.2580	0.0945	0.0587
Explained variation (cumulative)	41.34	67.14	76.59	82.46

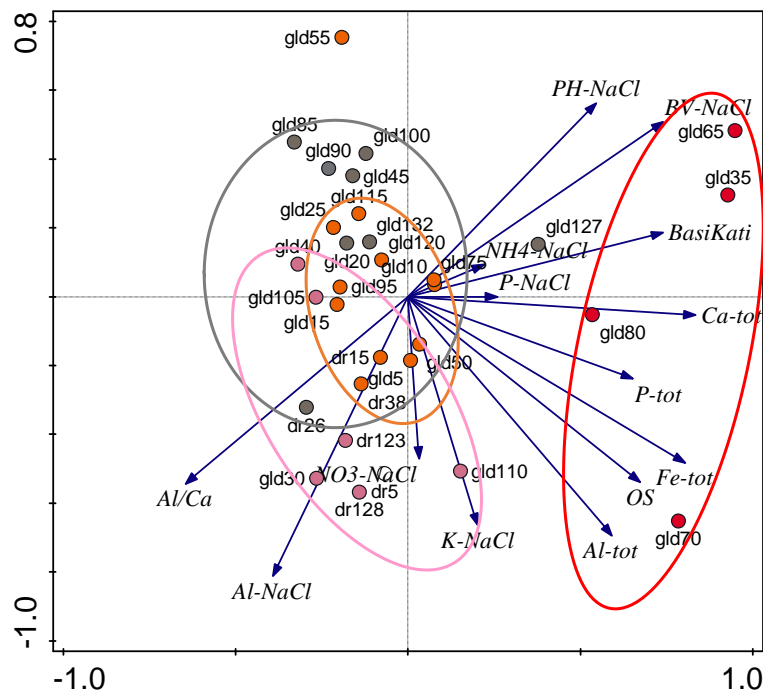


- actuele bodems □ bodems onder wal
- veldpodzol
- holtpodzol
- haarpodzol
- keileembodems
- loopodzol

Figuur 2. PCA B-horizonten Actueel met in kleur de bodemtypen. As1 en As 2. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld.

Tabel 2. PCA B-horizonten actueel

Analysis 'Unconstrained'				
Method: PCA				
Total variation is 420.00000				
Summary Table:				
Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.2655	0.2245	0.1665	0.1127
Explained variation (cumulative)	26.55	49.00	65.65	76.93



- actuele bodems □ bodems onder wal
- veldpodzol
- holtpodzol
- haarpodzol
- keileembodems
- looppodzol

Figuur 3. PCA C-horizonten 120 Actueel met in kleur de bodemtypen. As1 en As 2. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld.

Tabel 3. PCA C-horizonten 120 actueel

Analysis 'Unconstrained'				
Method: PCA				
Total variation is 434.00000				
Summary Table:				
Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.3357	0.2359	0.1210	0.1053
Explained variation (cumulative)	33.57	57.16	69.26	79.79

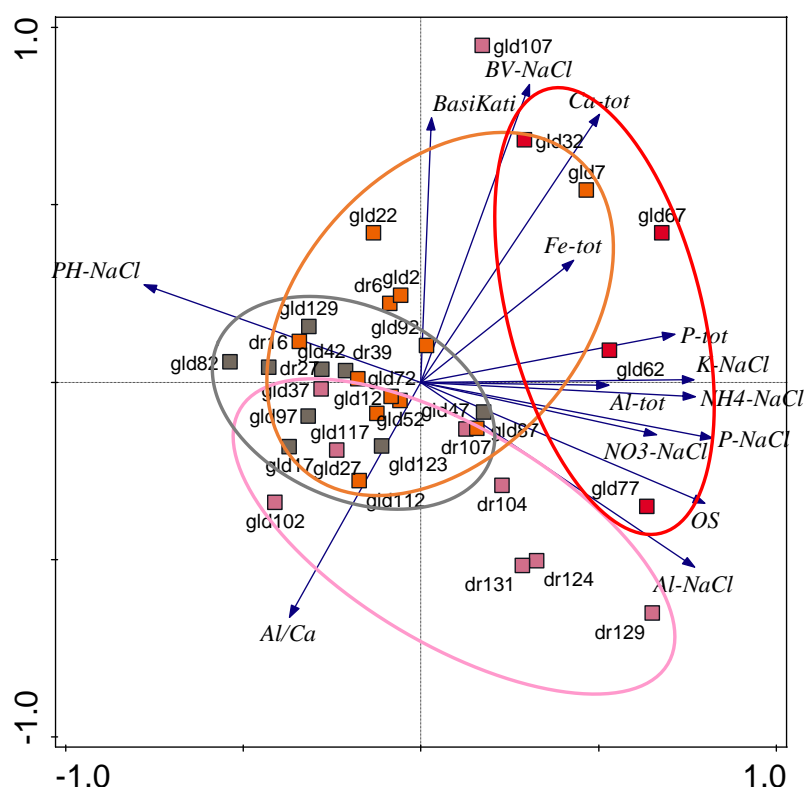
Antwoord: de verschillende bodemtypen liggen niet gelijkmatig verdeeld over de diagram. De A-horizonten van de keileembodems hebben hoge nutriëntenconcentraties en hoge gehalten totaal-calcium, aluminium en P en een hoog organische stofgehalte. De veldpodzolen onderscheiden zich door een lage pH, een lage Al/Ca-ratio en een hoge P-beschikbaarheid. De haarpodzolen hebben een lager organische-stofgehalte en lagere nutriëntengehaltenes en de holtpodzolgronden vallen tussen de haarpodzolen en keileembodems in.



Ook als gekeken wordt naar de B-horizonten, is er een onderscheid te maken: de veldpodzolen hebben hogere concentraties beschikbaar P, K en NO₃ in de B-horizonten en een lagere pH. Haar- en holtpodzolen onderscheiden zich door een hogere basenverzadiging in de holtpodzolen, en meer calcium, ijzer en P. Haarpodzolen zijn rijker aan organische stof in de B-horizont en hogere gehalten aan ammonium, beschikbaar aluminium en een hogere Al/Ca-ratio.

De C-horizont op 120 cm verschilt heel duidelijk in samenstelling tussen de bodemtypen. De keileem is uiteraard het rijkst aan ijzer, calcium en totaal-aluminium en aan basische kationen. De C-horizont onder de veldpodzolen onderscheidt zich het meest door een lage pH en hoge Al-NaCl-concentratie en Al/Ca-ratio.

Vraag 2: was het abiotische onderscheid tussen bodemtypen vroeger anders?



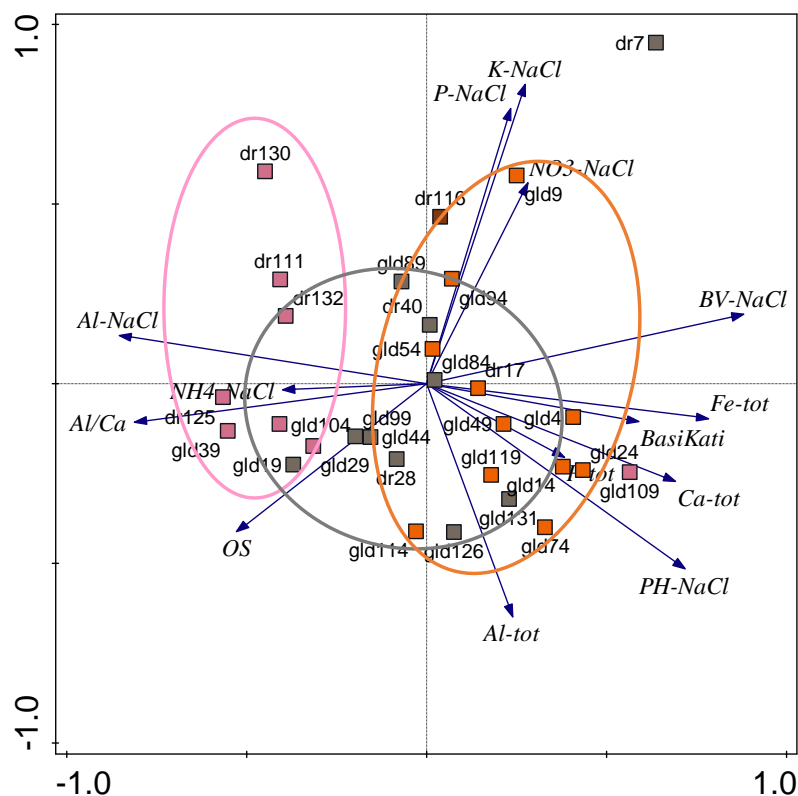
- actuele bodems □ bodems onder wal
- veldpodzol
- holtpodzol
- haarpodzol
- keileembodems
- loopodzol

Figuur 4. PCA A-horizonten Wal met in kleur de bodemtypen. As1 en As 2. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld.

Tabel 4. PCA A-horizonten Wal

Analysis 'Unconstrained'				
Method: PCA				
Total variation is 476.00000				

Summary Table:				
Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.4004	0.2088	0.1757	0.0558
Explained variation (cumulative)	40.04	60.92	78.49	84.07



- actuele bodems □ bodemem onder wal
- veldpodzol
- holtpodzol
- haarpodzol
- keileembodems
- looppodzol

Figuur 5. PCA B-horizonten Wal met in kleur de bodemtypen. As1 en As 2. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld.

Tabel 5. PCA B-horizonten Wal

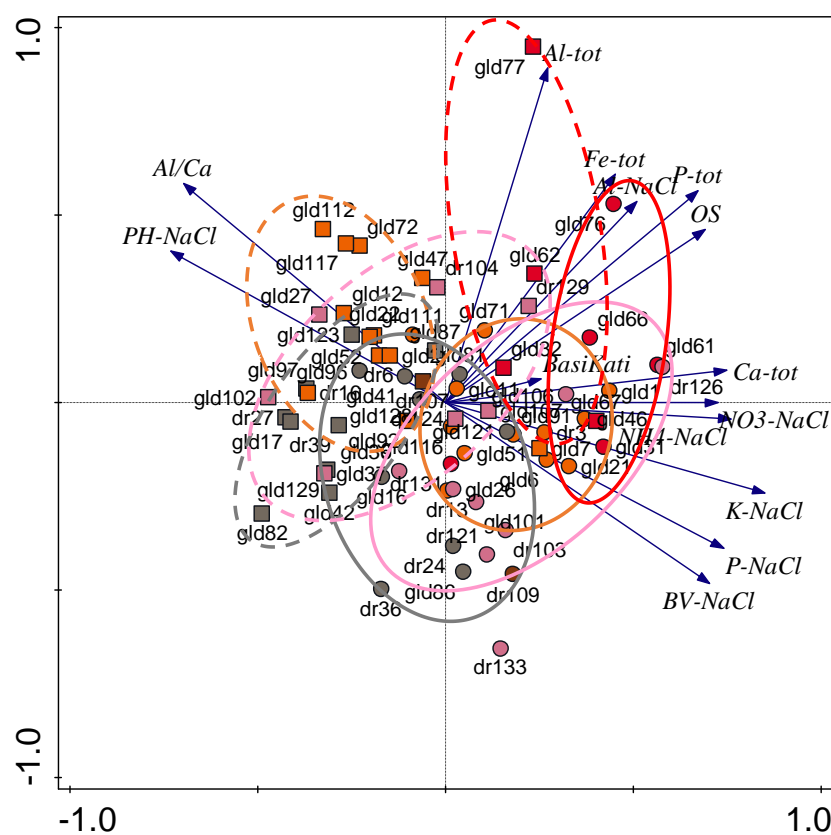
Analysis 'Unconstrained'				
Method: PCA				
Total variation is 476.00000				
Summary Table:				
Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4



Eigenvalues	0.4004	0.2088	0.1757	0.0558
Explained variation (cumulative)	40.04	60.92	78.49	84.07

In de oude bodems onder de wal is het onderscheid in bodemtypen ook goed te zien: ook hier zijn de A-horizonten van de keileembodems uiteraard het rijkst, en bij de podzolbodems zijn de veldpodzolen het zuurst en hebben de hoogste Al/Ca-ratio. De holtpodzolen zijn van de podzolbodems het rijkst aan basische kationen en hebben de hoogste pH. De belangrijkste onderscheidende parameters tussen de bodemtypen zijn daarmee gelijk gebleven.

Vraag 3 wat is het verschil tussen de actuele bodems en de bodems onder de wal?



- actuele bodems □ bodems onder wal
- veldpodzol
- holtpodzol
- haarpodzol
- keileembodems
- loopodzol

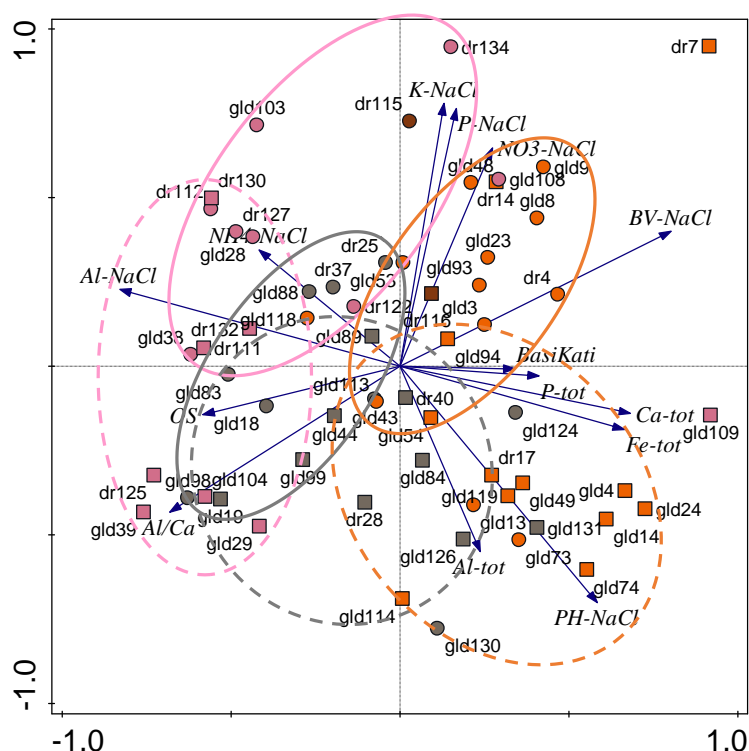
Figuur 6. PCA A-horizonten Wal en actueel met in kleur de bodemtypen. As1 en As 2. Ligging van de verschillend bodemtypen is handmatig omcirkeld. Gestippelde omcirkeling is gebruikt voor de bodems onder de wal.

Tabel 6. PCA A-horizonten Wal en actueel

Analysis 'Unconstrained'				
--------------------------	--	--	--	--



Method: PCA				
Total variation is 952.00000				
Summary Table:				
Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.4285	0.2106	0.1351	0.0643
Explained variation (cumulative)	42.85	63.91	77.42	83.85



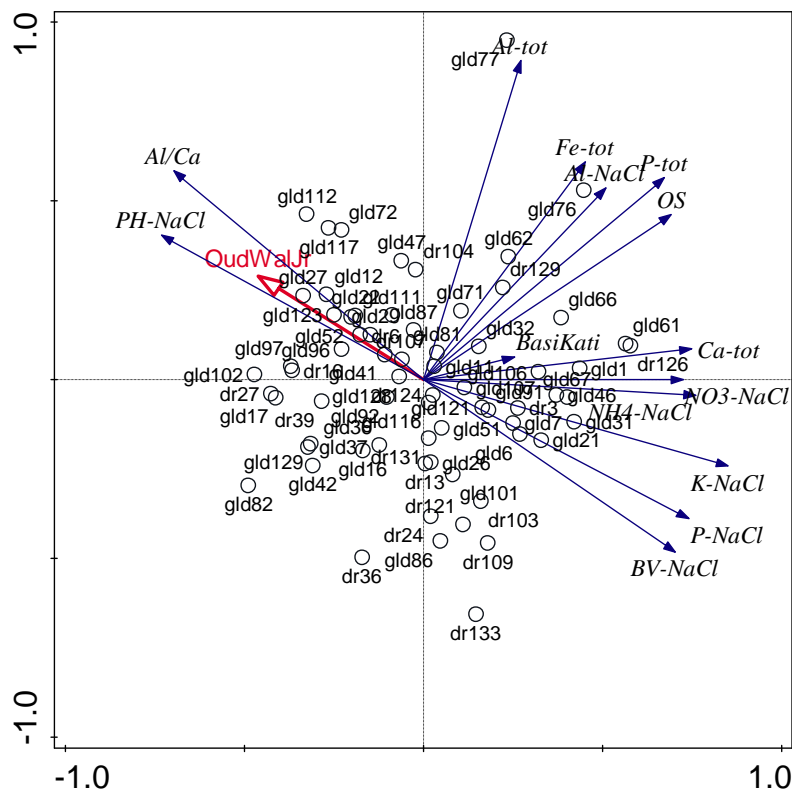
Figuur 7. PCA B-horizonten Wal en actueel met in kleur de bodemtypen. As1 en As 2.
 Tabel 7. PCA B-horizonten Wal en actueel

Analysis 'Unconstrained'				
Method: PCA				
Total variation is 840.00000				
Summary Table:				
Statistic	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
Eigenvalues	0.2876	0.2144	0.1432	0.0933
Explained variation (cumulative)	28.76	50.19	64.51	73.84

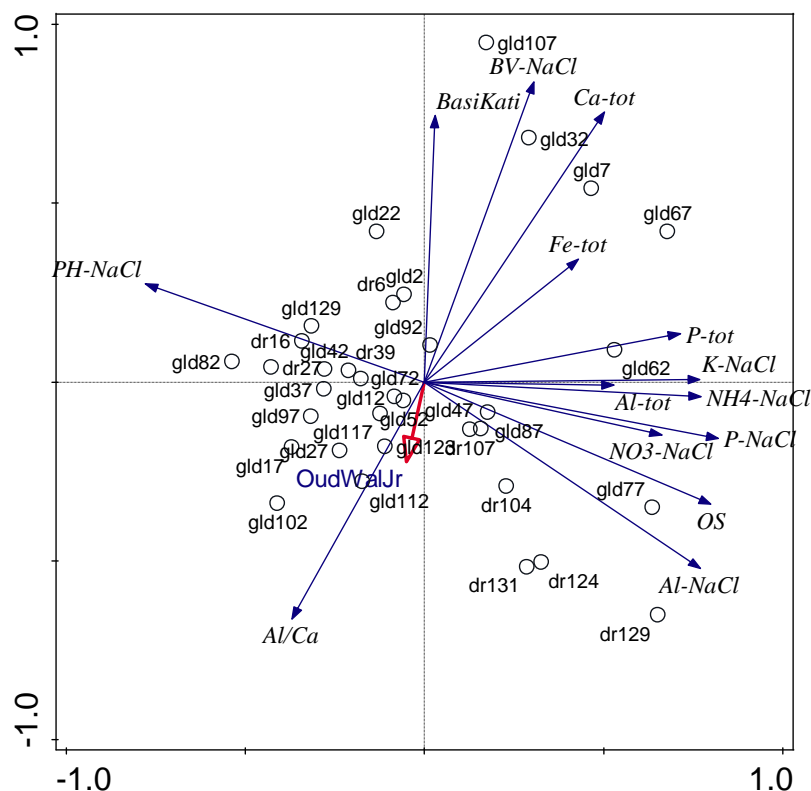


Antwoord: er is een heel duidelijk verschil tussen de bodems onder de wal en de actuele bodems. De actuele bodems hebben zowel hogere nutriëntenconcentraties (P, K, NO₃ in het zoutextract), als een lagere pH. Opvallend is de lagere Al/Ca-ratio, terwijl juist een hogere verwacht kan worden bij een lagere pH.

Vraag 4: speelt de ouderdom van de wal een rol in chemische verschillen?



Figuur 8. PCA A-horizonten Wal en actueel zoals in figuur 6, met ouderdom van de wal als supplementaire variabele.



Figuur 9. PCA A-horizonten Wal zoals in figuur 4, met ouderdom van de wal als supplementaire variabele.

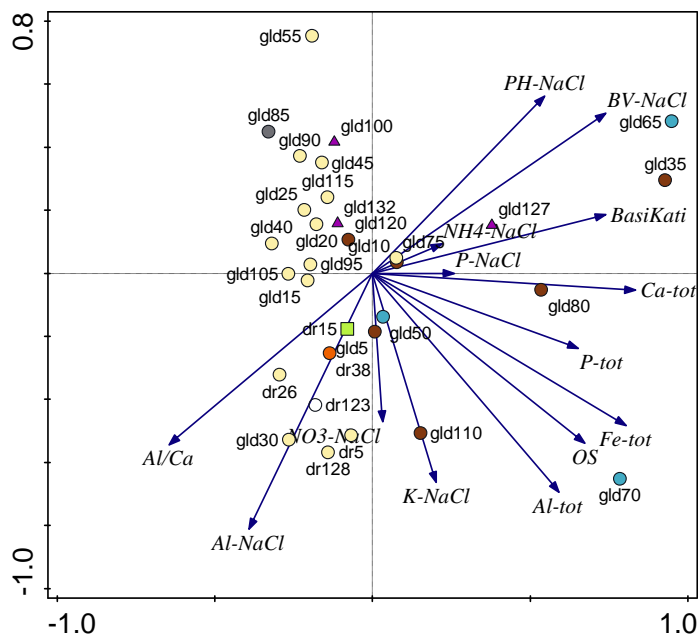
Antwoord: als de ouderdom van de wal wordt meegenomen in de vergelijking van de actuele bodems en walbodems, geeft deze de richting van de verschuiving tussen actueel en wal weer. Zoals eerder aangegeven is deze verschuiving erg groot. Als alleen wordt gekeken naar de bodems onder de wal, speelt de ouderdom van de wal nauwelijks een rol in de chemische verschillen. Zoals we al eerder gezien hebben, worden deze verschillen wel goed verklaard door het bodemtype.

Vraag 5: zijn de bodemchemische verschillen verklarend tussen de vegetatietypen die er groeien?



- Klasse van de eiken- en beukenbossen op voedselarme grond
- Zomereik-verbond
- Berken-eikenbos
- Beuken-eikenbos
- Bochtige smele-Beukenbos
- DG Amerikaanse vogelkers [Zomereik-verbond]
- Eiken-Haagbeukenbos kalkarm
- ▲ Bosbessen-Dennenbos

Figuur 11. PCA B-horizonten. Kleuren zijn vegetatietypen.

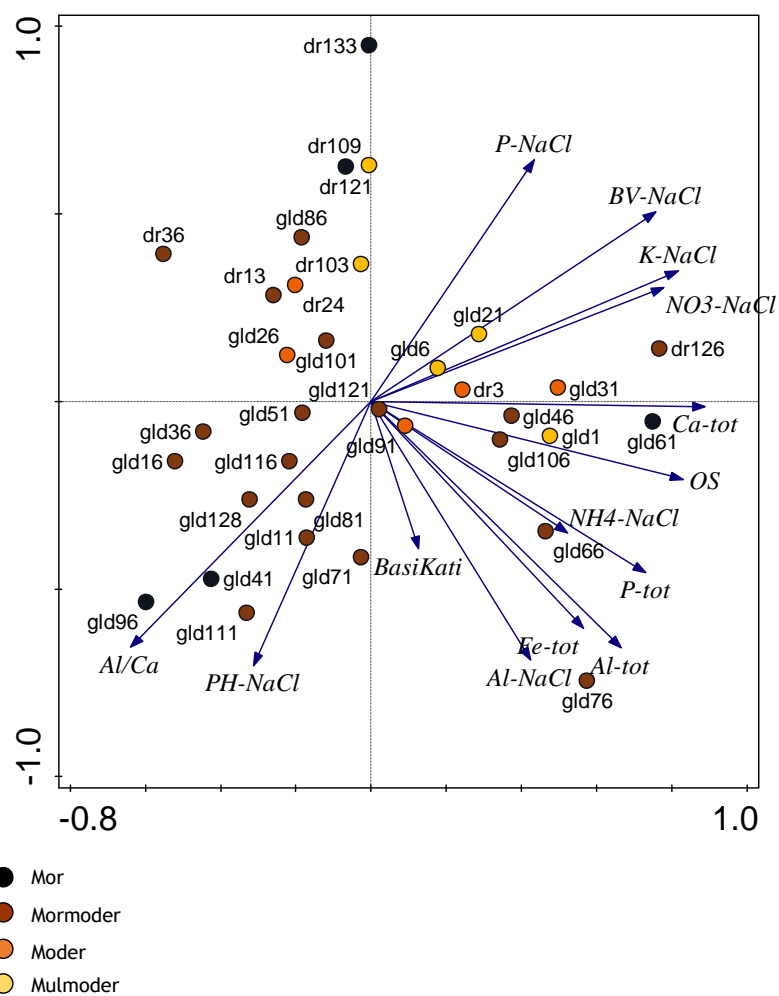


- Klasse van de eiken- en beukenbossen op voedselarme grond
- Zomereik-verbond
- Berken-eikenbos
- Beuken-eikenbos
- Bochtige smele-Beukenbos
- DG Amerikaanse vogelkers [Zomereik-verbond]
- Eiken-Haagbeukenbos kalkarm
- ▲ Bosbessen-Dennenbos

Figuur 12. PCA C-horizonten. Kleuren zijn vegetatietypen.

Antwoord: met name de chemie van de A-horizonten en de C-horizonten vertonen samenhang met de vegetatie. Hier zit natuurlijk ook een samenhang met het bodemtype in. Daarnaast zal de bosvegetatie ook de samenstelling van de A-horizont mede bepalen. Er zijn van de meeste vegetatietypen te kleine aantallen bemonsterd om hier echt iets over te kunnen zeggen.

Vraag 6: hangen de verschillen in bodemchemie samen met het humustype?



Figuur 13. PCA A-horizonten. Kleuren zijn humusvormen. As 1 en as 2.



Figuur 14. PCA C-horizonten. Kleuren zijn humusvormen.

Antwoord: chemische samenstelling van de A-horizonten hangt samen met de humusvorm. As 3 is hierin iets duidelijker dan as 2. Mor heeft hoogste Al/Ca-ratio. Moder hoogste pH en basische kationenconcentratie. Opmerkelijk is dat mulmoder hier dichterbij mormoder ligt en moder het verst van mor afstaat. Humusvorm en input vanuit de vegetatie heeft natuurlijk ook direct een effect op de samenstelling van de A-horizont. De chemie van de C-horizont lijkt wat minder bepalend voor de humusvorm.