



Natuurmonumenten



voor systeemgericht natuurherstel



Bosbodemonderzoek Slotplaats Bakkeveen en Lycklamabos

Herstelplan voor bosbodems op basis van een landschapsecologisch perspectief

Eindrapport, december 2025

Sander M.P. Meulepas & Remco Versluijs

m.m.v. Esther M.W.E. van Hoof & Joël Groen

COLOFON

Titel: Bosbodemonderzoek Slotplaats Bakkeveen en Lycklamabos: Herstelplan voor bosbodems op basis van een landschapsecologisch perspectief.

Status: Eindrapport

Opdrachtgever: Jornt De Vries, Natuurmonumenten

Auteurs: S.M.P. Meulepas & R. Versluijs

Kwaliteitsborger: J.J. Vogels

Projectleider: S.M.P. Meulepas

Met medewerking van: E.M.W.E van Hoof & J. Groen

Datum: 4 december 2025

Foto voorkant: S.M.P. Meulepas

Stichting Bargerveen | Nijmegen | [december, 2025]

www.stichtingbargerveen.nl | www.linkedin.com/company/stichting-bargerveen



Inhoudsopgave

1	Introductie.....	3
1.1	Aanleiding	3
1.2	Probleemstelling	5
1.3	Doel van het project.....	5
1.4	Leeswijzer	6
2	Methode	7
2.1	Werkwijze LESA	7
2.1.1	Hoogte en geologie	7
2.1.2	Bodem en verzamelen bodemonsters.....	7
2.1.3	Veldmetingen pH en bodemopbouw.....	9
2.1.4	Analyse bodemchemie en pH-profielen.....	10
2.2	Hydrologie.....	10
3	Slotplaats Bakkeveen	12
3.1	Hoogte en reliëf	12
3.2	De diepere ondergrond	13
3.2.1	Geogenese en geohydrologische doorsnede.....	13
3.2.2	Keileem.....	14
3.3	Bodem.....	16
3.3.1	Bodemtypen	16
3.3.2	Zuurstatus van de bodem	18
3.4	Hydrologie.....	24
3.4.1	Regionaal grondwatersysteem.....	25
3.4.2	Lokaal grondwatersysteem (WVPI)	27
3.4.3	Waterkwaliteit, EGV en pH	28
3.5	Synthese.....	29
3.5.1	Historische gesteldheid, hydrologie, bodem en vegetatie	29
3.5.2	Huidige gesteldheid hydrologie, bodem en vegetatie	30
3.6	Knelpunten, advies en maatregelen Slotplaats Bakkeveen	33
3.6.1	Knelpunten.....	33
3.6.2	Advies.....	33
4	Lycklamabos	38

4.1	Hoogte en reliëf	38
4.2	De diepere ondergrond	39
4.2.1	Geogenese en geohydrologische doorsnede.....	39
4.2.2	Keileem	40
4.3	Bodem.....	42
4.3.1	Bodemtypen	42
4.3.2	Zuurstatus van de bodem	44
4.4	Hydrologie.....	49
4.4.1	Regionaal grondwatersysteem (WVP II).....	50
4.4.2	Lokaal grondwatersysteem (WVPI)	50
4.4.3	Waterkwaliteit, EGV en pH	51
4.5	Ondergroei bos en vitaliteit eiken.....	54
4.6	Synthese.....	55
4.6.1	Historische gesteldheid, hydrologie, bodem en vegetatie	55
4.6.2	Huidige gesteldheid hydrologie, bodem en vegetatie	56
4.7	Advies en maatregelen Lycklamabos.....	59
4.7.1	Knelpunten.....	59
4.7.2	Advies.....	59
5	Referenties	64
6	Bijlagen.....	67
	Bijlage 1. Ontstaan vochtige heiden/ heideveentjes op verkitte podzol-B horizonten	68
	Bijlage 2. Uitkomsten statistische toetsen pH-Veld, pH-zout en pH-water Slotplaats Bakkeveen en Lycklamabos.....	70
	Bijlage 3. Uitkomsten statistische toetsen binnen van de belangrijkste bodem chemische variabelen met uitzondering van pH.....	72
	Bijlage 4. Voorbeeld vergraven bodemprofiel met organische stof diep in het profiel	73
	Bijlage 5. Rangordemodel LESA	74

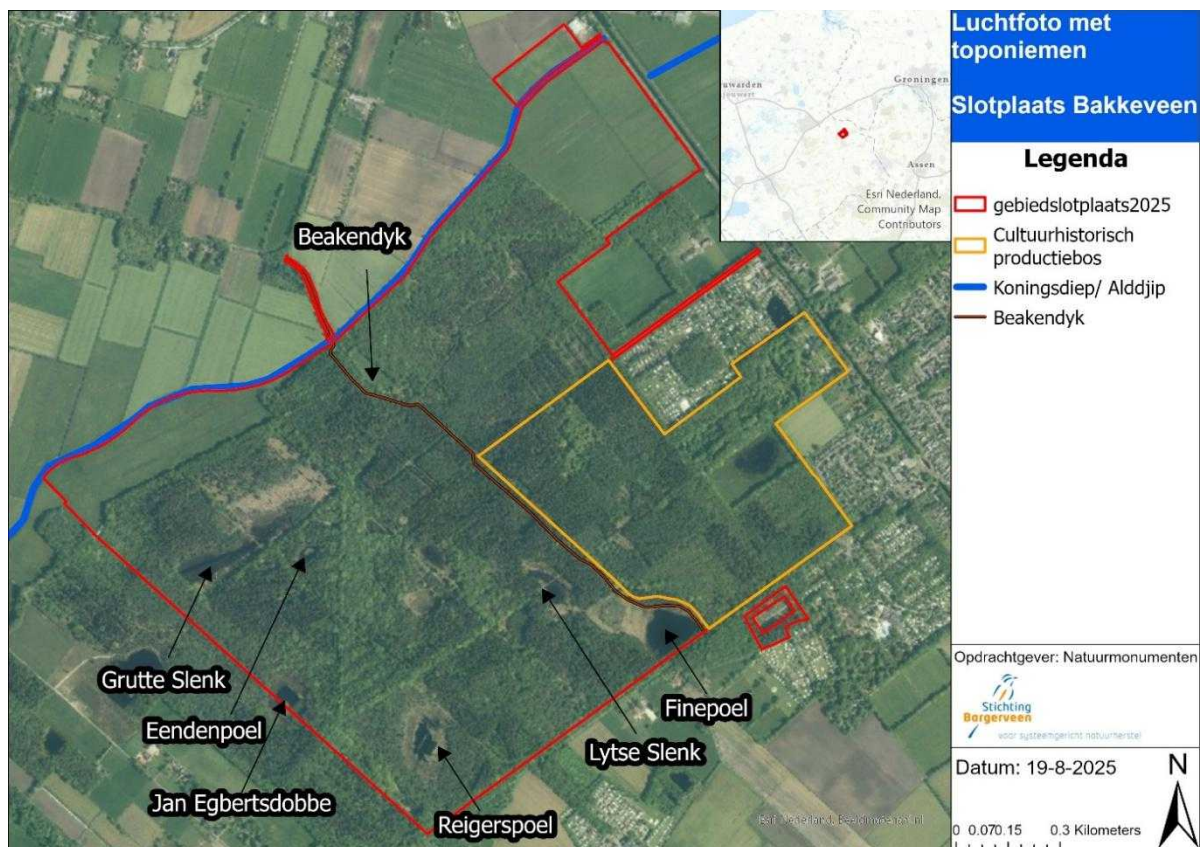
1 Introductie

1.1 Aanleiding

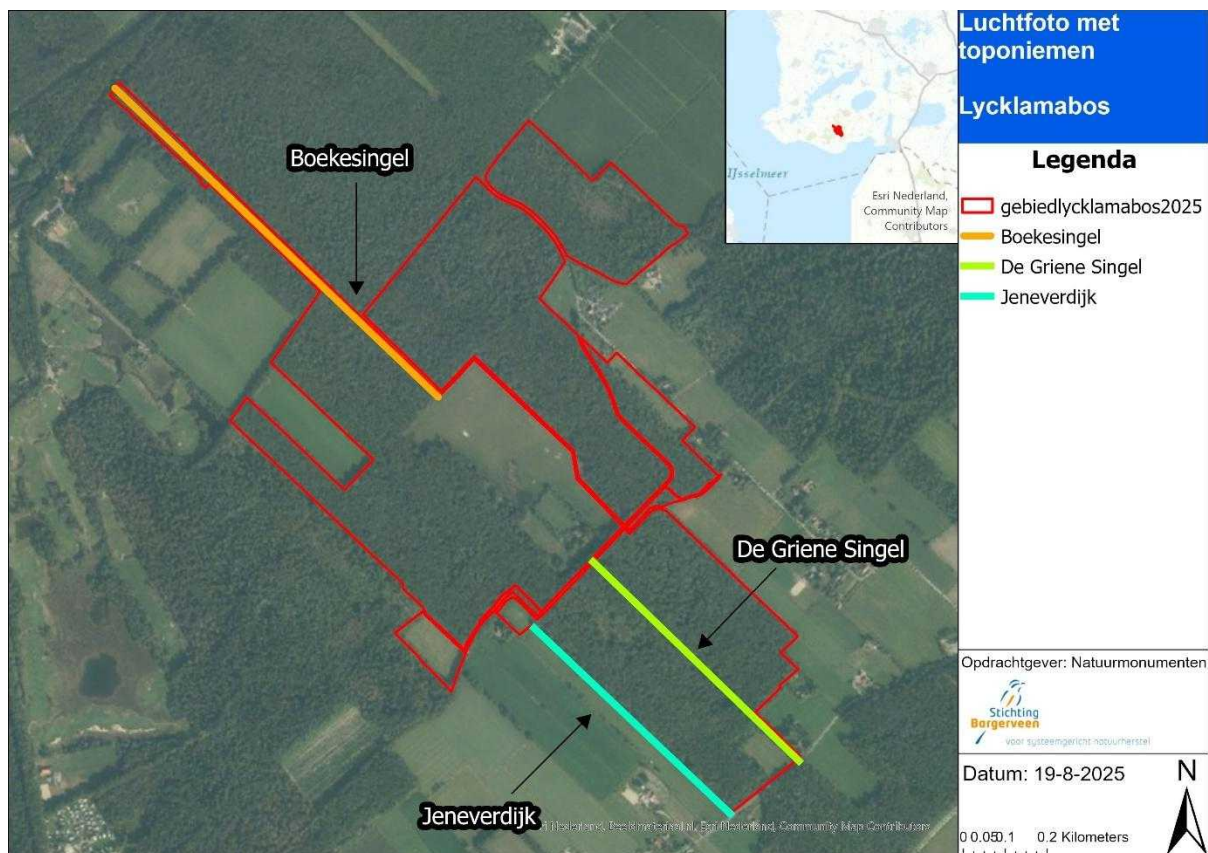
Vereniging Natuurmonumenten zet zich in voor herstel van biodiversiteit in Nederland om op deze manier robuuste ecosystemen te creëren die weerbaarder zijn tegen de effecten van klimaatverandering (Natuurmonumenten, z.d.). Twee gebieden waar Natuurmonumenten deze doelen wil verwezenlijken zijn Slotplaats Bakkeveen (240 ha) en het Lycklamabos (98 ha) (**Figuur 1-1** en **Figuur 1-2**).

In beide gebieden is al lange tijd bos aanwezig. In Slotplaats Bakkeveen begon de aanleg van bos rond 1750 als onderdeel van een siertuin van het voormalige landgoed. Vanaf het einde van de 19^e eeuw werd naalddhout aangeplant en was het gebied in gebruik als productiebos tot de aankoop van Natuurmonumenten in 1997. In een deel van wat nu het Lycklamabos is, is al sinds 1664 bos ingetekend. Sinds het begin van de 19^e eeuw tot de ontwikkeling van chemische looizuren rond 1920 was het gebied in gebruik als eikenhakhout. Daarna was het bos een productiebos tot aankoop van Natuurmonumenten in 1999. In deze periode zijn Grove dennen tussen de eiken geplant, net als kleinere percelen met Douglasspar. Op dit moment ligt er geen productiedoelstelling meer op de gebieden en kunnen de bossen geleidelijk worden omgevormd naar natuurbos (Natuurmonumenten, 2022; Douwes, 2009).

Eén van de belangrijkste speerpunten in beide gebieden is dan ook om de voormalige productiebossen (type N15.02) met uitheems naalddhout om te vormen naar klimaatbesteding en robuuste natuurbossen met inheemse loofbossen die passen bij de natuurlijke standplaatscondities.



Figuur 1-1. Weergave van het projectgebied van Slotplaats Bakkeveen met toponiemen. In het onderzoek wordt gefocust op de bossen binnen dit gebied en dus niet de graslanden in het noordoosten of noordwesten.



Figuur 1-2. Weergave van het projectgebied van Lycklamabos met toponiemen. In het onderzoek wordt gefocust op de bossen binnen dit gebied en dus niet de graslanden in het centrum en westen van het gebied.

1.2 Probleemstelling

De huidige bossen bestaan voor een groot deel uit monotone productiebossen. De delen die uit inlandse Zomereik bestaan, hebben het in de afgelopen jaren zwaar te verduren gehad. In de zomers van 2018-2020 en 2022 was extreme droogte aanwezig, terwijl de zeer natte winter van 2023/24 juist zorgde voor langdurig (te) natte condities.

In beide gebieden komt ondiep in de ondergrond keileem voor (De Goede et al., 1999; TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-b), wat zorgde voor sterk wisselvochtige omstandigheden. Door ontwatering zijn de gebieden echter veel droger geworden dan dat ze van nature waren. Voor Slotplaats Bakkeveen zijn antiverdrogingsmaatregelen opgesteld en grotendeels uitgevoerd (De Goede et al., 1999). Toch heeft het gebied zich hydrologisch nog niet volledig hersteld en is water vasthouden nog één van de belangrijkste speerpunten (Natuurmonumenten, 2022). Voor 2025 staan verschillende maatregelen gepland om het gebied verder te vernatten. In het Lycklamabos zijn nog geen concrete antiverdrogingsmaatregelen uitgewerkt. Hier hebben peilverlagingen ten behoeve van de landbouw en de waterwinning (Oudega) nog steeds een groot effect op de lokale hydrologie, evenals twee diepe waterschapsleidingen (Douwes, 2009). Bij bosvorming in beide gebieden zal bij de boomsoortkeuze dus rekening gehouden moeten worden met de sterk wisselnatte standplaatscondities en antiverdrogingsmaatregelen in de toekomst.

Daarnaast vermoed Natuurmonumenten dat de bosbodems in beide gebieden sterk verzuurd zijn als gevolg van ontwatering en verhoogde zure depositie van zwavel en stikstof. De verzuring hangt bovendien samen met de aanplant van uitheemse naaldbomen, voornamelijk in Slotplaats Bakkeveen. Naaldbomen leveren zuur en moeilijk afbreekbaar strooisel. Bovendien vangen naaldbomen meer droge depositie van stikstof in (De Schrijver et al., 2012), wat eveneens bijdraagt aan een verdere verzuring van de bosbodems (Dijk et al., 1989). Vernattingsmaatregelen alleen zijn waarschijnlijk niet voldoende om de bodembuffering te herstellen, aangezien het ondiepe grondwater en de keileem is kalkarm overwegend basenarm is (Vogels et al., 2023).

De vraag die in dit onderzoek opgelost dient te worden is, hoe Natuurmonumenten de bossen in beide gebieden klimaatbestendig kan omvormen. Hiervoor is het van belang om te weten in hoeverre bosbodems verzuurd zijn, met welke maatregelen de bodemverzuring opgelost kan worden en welke boomsoorten na maatregelen in het gebied het beste passen.

1.3 Doel van het project

Het doel van dit project is om inzichtelijk te maken welke boom- en struiksoorten het beste aansluiten op de huidige en toekomstige standplaatscondities van beide bosgebieden zodat een klimaatbestendig en -robuust natuurbos kan worden ontwikkeld. Daarnaast is het doel inzichtelijk te maken welke maatregelen eventueel noodzakelijk zijn om bodemverzuring tegen te gaan. Om hiertoe te komen is het noodzakelijk enerzijds een beter beeld te krijgen van het hydro-ecologisch functioneren van de gebieden op landschapsschaal, anderzijds is het van belang onderzocht te doen naar de bodemchemie van de bosbodems. De focus ligt op beheertype 15.02 (Dennen-, eiken-, en beukenbos) met uitzondering van het cultuurhistorische productiebos ten oosten van de Beakendyk in Slotplaats Bakkeveen (**Figuur 1-1**).

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is opgebouwd uit zes hoofdstukken. In hoofdstuk 2 wordt de toegepaste werkwijze beschreven. De resultaten van Slotplaats Bakkeveen worden toegelicht in hoofdstuk 3 met in de laatste paragrafen een synthese van de resultaten en een advies voor het gebied. Dezelfde opzet is in hoofdstuk 4 terug te lezen voor het Lycklamabos. In hoofdstuk 5 volgt een overzicht van alle gebruikte bronnen tijdens het onderzoek en in hoofdstuk 6 worden de bijlagen weergegeven.

2 Methode

2.1 Werkwijze LESA

Om de standplaatscondities met betrekking tot de hydrologie en bodem goed te interpreteren is kennis van het ecohydrologisch functioneren van beide bosgebieden nodig. Hiervoor is een beknopte landschapsecologische systeemanalyse (LESA) uitgevoerd. Er wordt daarbij een beeld gevormd van het hydrologisch functioneren van het gebied en zijn omgeving, door in dit geval de samenhang tussen reliëf, geologie, grond- en oppervlaktewater, bodem en vegetatie te onderzoeken (Van der Molen et al., 2010; Besselink et al., 2017). Op basis hiervan kunnen de noodzakelijke herstelmaatregelen voor hydrologie en bodem worden vastgesteld en kan vervolgens worden nagegaan hoe en welke volgorde deze het best uitgevoerd kunnen worden (zie **Bijlage 5** voor het rangordemodel).

2.1.1 Hoogte en geologie

De digitale hoogtekkaart (AHN4) is bestudeerd om een beeld te krijgen van de lokale hoogteverschillen (PDOK, 2023). Vervolgens is kort beschreven hoe de diepere ondergrond is opgebouwd en welke slecht doorlatende lagen aanwezig zijn aan de hand van Dinoloket. Beschikbare literatuur over de geologische opbouw van het gebied is gebruikt om de gegevens van het AHN4 en Dinoloket beter in context te plaatsen. Omdat keileem een groot effect heeft op de hydrologie, is hier meer aandacht aan besteed. Het model Geotop v1.6.1. is in zijn geheel gedownload via Dinoloket waarna de formatie van Drente, laagpakket van Gieten uit het model is geselecteerd (TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-b). Hiervan zijn in ArcGIS pro kaarten gemaakt en deze zijn beschreven.

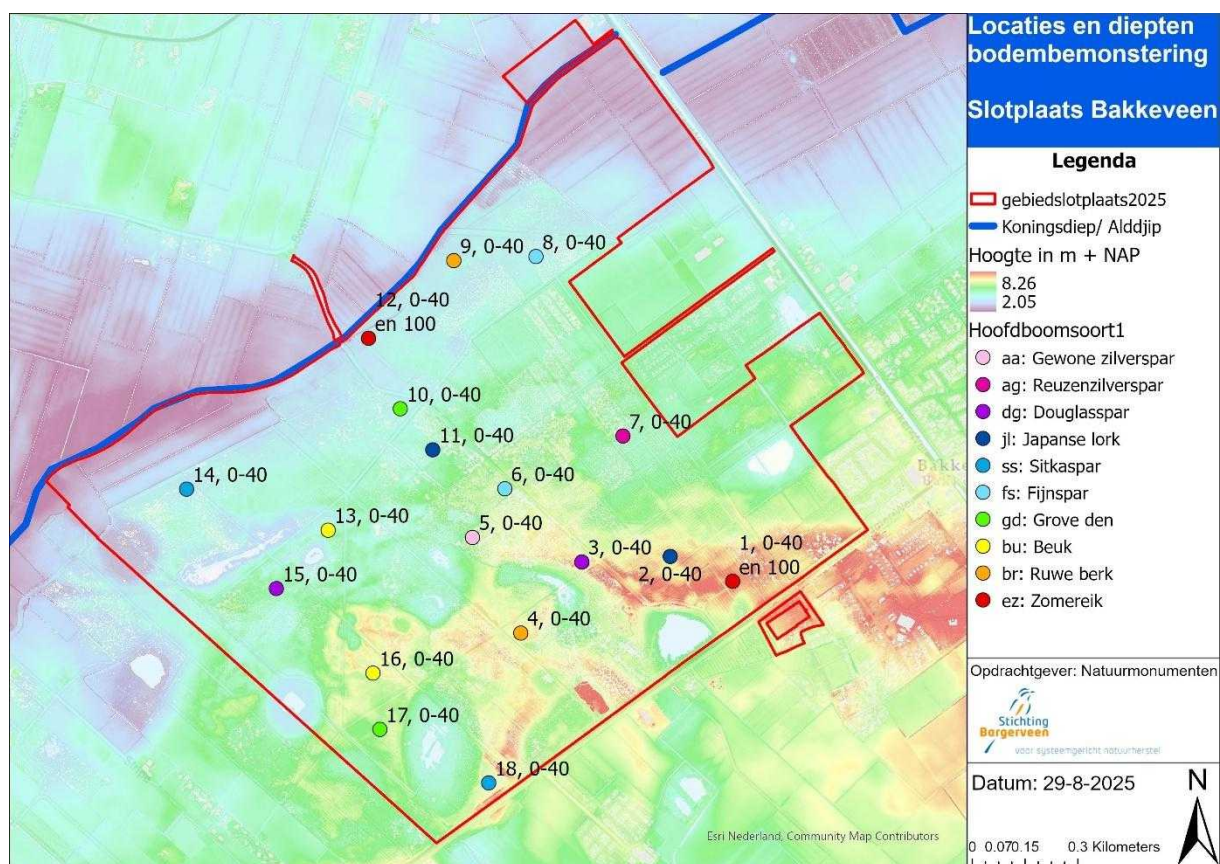
2.1.2 Bodem en verzamelen bodemonsters

Om een globaal beeld te vormen van de bodemtypen en belangrijkste bodemvormende processen, is de 1: 50 000 bodemkaart bekeken en kort toegelicht (Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit, 2023). Wanneer beschikbaar zijn ook gedetailleerdere bodemkaarten bekeken (Wageningen Environmental Research, z.d.; De Goede et al., 1999). Om inzicht te krijgen in de standplaatscondities en mate van bodemverzuring is aanvullend booronderzoek uitgevoerd op 19 en 20 mei 2025 in Slotplaats Bakkeveen en 21 en 22 mei 2025 in het Lycklamabos.

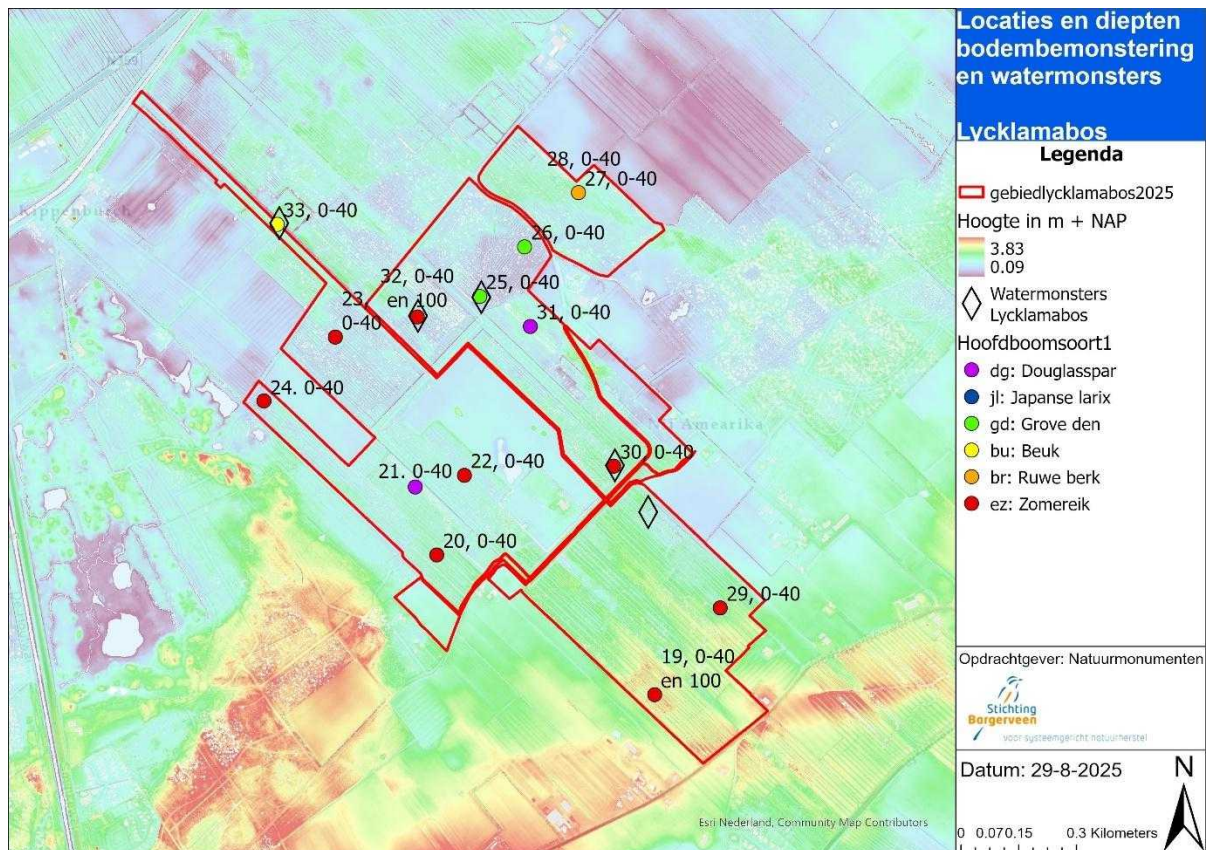
Op achttien locaties in Slotplaats Bakkeveen (**Figuur 2-1**) en vijftien locaties in het Lycklamabos (**Figuur 2-2**) zijn bodemonsters verzameld. De locaties zijn bepaald op basis van hoogteligging en hoofdboomsoort. Binnen Slotplaats Bakkeveen is een aanzienlijke gradiënt in hoogte zichtbaar en daarmee samenhangende verschillen in grondwaterstand. Daarna is gekeken naar de hoofdboomsoort. In Slotplaats Bakkeveen is van elke hoofdboomsoort één locatie geselecteerd als deze in meer dan in één opstand voorkomt. In het Lycklamabos is van elke hoofdboomsoort tenminste één opstand geselecteerd, ook is gekeken naar unieke combinaties tussen eerste en tweede hoofdboomsoort. Tot slot zijn monsterpunten zoveel mogelijk in het gebied verspreid.

De bodems bleken op basis van een aantal verkennende boringen van 0-40 cm verstoord te zijn, daarom is van 0-40 cm een mengmonster genomen. Daarnaast zijn op twee locaties in het gebied bodemonsters genomen van het moedermateriaal (C-horizont). Verder hebben we ook een bodemonster uit het moedermateriaal verzameld op 100 cm diepte.

Op het bodemlaboratorium van de Radboud Universiteit is van de 0-40 cm bodemonsters de bodemchemie bepaald met behulp van een waterextract (direct beschikbare voedingsstoffen), zoutextract (voor planten beschikbare voedingsstoffen via uitscheiding van H^+ -ionen) en P-olsen (plantbeschikbare fosfaat). Van C-horizonten is naast de bovenstaande analyses ook destructie uitgevoerd om de totale hoeveelheid elementen in de bodem te onderzoeken. Van alle horizonten is bulk-density bepaald om te corrigeren voor de bodemdichtheid. Alle monsters zijn verzameld door een mengmonsters van drie locaties op tien cm afstand van elkaar te nemen met een guts.



Figuur 2-1. Locaties bodembemonstering en diepten in Slotplaats Bakkeveen.



Figuur 2-2. Locaties bodembemonstering en diepten in het Lycklamabos.

2.1.3 Veldmetingen pH en bodemopbouw

In elke grondboring is een pH-profiel van de bodem gemaakt. Hiervoor is op 0, 10, 20, 30, 40, 50 en 100 cm diepte pH-veld bepaald met behulp van pH-papierjes. De pH eenheid is geschat op 0,5 nauwkeurigheid en geeft een indicatie van de aanwezige pH in de diepte van het bodemprofiel en daarmee verzuring in diepten van de bodem die niet gevangen wordt in de 0-40 cm mengmonsters van de bodem.

Daarnaast zijn de bodemhorizonten beschreven. Zo zijn bij een verkennend veldbezoek Ce- (ontijzerde) en Cy- (ijzerhoudende) horizonten aangetroffen. De hoogte van deze lagen geeft aan tot hoe hoog het grondwater in het verleden kwam. De boorbeschrijving is als volgt aangepakt:

- De bodemhorizonten worden beschreven volgens Ten Cate et al. (1995).
- Bij zand- en leemhorizonten zijn de textuur, korrelgrootte, vochtigheid, gleyverschijnselen en kleur genoteerd. De textuur en korrelgrootte is beschreven aan de hand van Ten Cate et al. (1995) en is van belang voor de interpretatie van de bodemchemie. De vochtigheid en gleyverschijnselen zijn van belang voor het begrijpen van de waterhuishouding.
- Bijzondere lagen zoals humus- of ijzerbandjes zijn ook genoteerd. Dit kan van belang zijn bij de interpretatie van bodemchemie en het hydrologische systeem.
- Opvallende boom- en plantensoorten in een straal van vijf meter rondom de boringen zijn genoteerd.

2.1.4 Analyse bodemchemie en pH-profielen

De data van pH-veld is verwerkt tot pH-profielen met behulp van R. Verder is de Al/Ca ratio berekend in R. Aluminium is direct toxisch voor bomen en planten en is uiteindelijk de reden waarom planten direct last hebben van bodemverzuring. Daarnaast is de basenverzadiging op basis van het zoutextract berekend. Deze geeft bij benadering de basenverzadiging aan, al zal deze een overschatting geven van de basenverzadiging in vergelijking het een strontiumextract. De basenverzadiging is bepaald door het aantal basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) te delen door het aantal basische kationen plus zuren kationen (Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} en H^+). Dit getal is vermenigvuldigd met 100. Ook de Cation Exchange Capacity (CEC), oftewel de grote van het bodemadsorptiecomplex, is berekend. Dit is gedaan door het aantal basische kationen op te tellen bij het aantal zuren kationen en te delen door 1000 (van $\mu\text{eq/l}$ naar meq/l). Omdat ook de CEC is bepaald op basis van het zoutextract geeft deze een onderschatting van de werkelijke CEC. De grootte van het bodemadsorptiecomplex is van belang om de mate van verzuring in het gebied beter te begrijpen, maar ook voor maatregelen als het toevoegen van bufferstoffen.

Van de bodemchemie en in het bijzonder de Al/Ca ratio, basenverzadiging en pH-profielen zijn een aantal verkennende statistische testen uitgevoerd. De gepaarde opzet (hoog/laag) binnen hoofdboomsoorten in Slotplaats Bakkeveen maakte het mogelijk om na testen voor normaliteit een gepaarde t-toets of Wilcoxon Signed-Rank toets uit te voeren ($n=9$ vs $n=9$, Reuzenzilverspar en Gewone zilverspar ook als paar meegenomen). Daarnaast is getoetst tussen naald- en loofopstanden in Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos. Na toetsing voor normaliteit is een Welch t-toets of Mann-Whitney U-toets uitgevoerd ($n=12$ voor naaldbos vs $n=6$ voor loofbos in Slotplaats Bakkeveen; $n=5$ voor naaldbos vs $n=5$ voor loofbos). Dezelfde toets is ook uitgevoerd om de verschillen tussen Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos te bekijken ($n=18$ voor Slotplaats, $n=15$ voor Lycklamabos).

2.2 Hydrologie

De actuele waterstand is op twee manieren bepaald. In Slotplaats Bakkeveen zijn verschillende actieve peilbuizen aanwezig waarvan de meeste peilbuizen een meetreeks van 2002 tot het heden hebben, terwijl de meetreeksen in het Lycklamabos lopen van 2000 tot 2019. Waterstanden van peilbuizen zijn geanalyseerd met behulp van Menyanthes. Hierin is ook de Gemiddeld Laagste Waterstand (GLG) en Gemiddeld Hoogste Waterstand (GHG) bepaald. Daarnaast zijn ook waterstanden in de boorgaten bepaald met behulp van een dompelklokje. Echter lagen de waterstanden bij het uitvoeren van het veldwerk zeer laag, waardoor veel boorgaten volledig droog lagen.

In Slotplaats Bakkeveen is op 4 maart 1999 een EGV en pH-kartering uitgevoerd van het oppervlaktewater (De Goede et al., 1999). Deze kartering is in 2025 herhaald. Waar op het moment van het uitvoeren van de grondboringen oppervlaktewater aanwezig was in de bossen van type N15.02 zijn EGV en pH-metingen uitgevoerd met een multimeter met pH en EGV-elektrode. Deze data zijn vergeleken met de data uit 1999. In het Lycklamabos zijn ook EGV en pH-metingen uitgevoerd. Omdat in dit gebied verder geen waterkwaliteitsdata beschikbaar was zijn hier ook vijf watermonsters genomen van het ondiepe grondwater. De watermonsters zijn genomen door in slootbodems met een spiraalboor te boren en hier

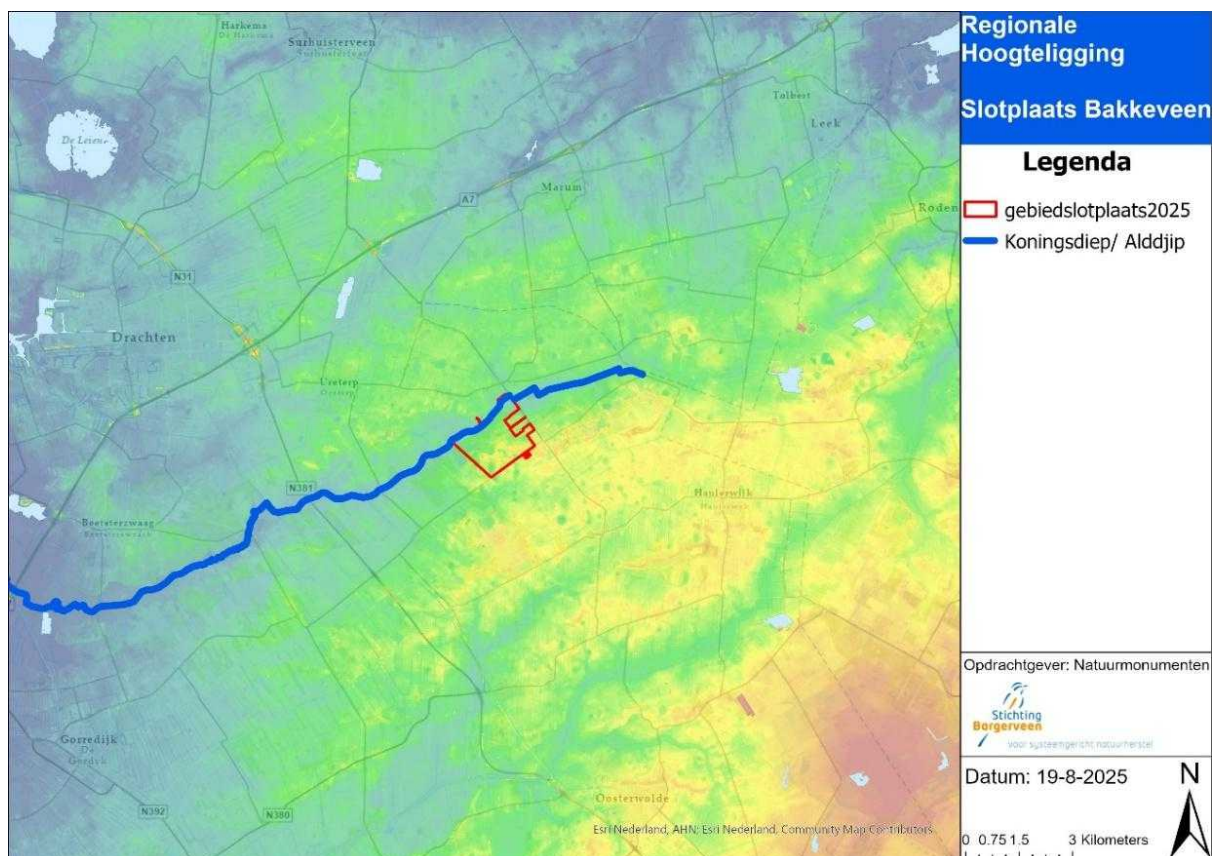
poreuze cups in te plaatsen. De watermonsters zijn direct in een koelbox geplaatst na bemonstering en Total Inorganic Carbon (TIC) is binnen 24 uur geanalyseerd op het laboratorium van de Radboud Universiteit. Verder is een AA en ICP-analyse uitgevoerd. De gegevens van de bodemonsters zijn met behulp van een R-script omgezet tot Stiff-diagrammen. Daarnaast zijn absolute waarden vergeleken en besproken.

3 Slotplaats Bakkeveen

3.1 Hoogte en reliëf

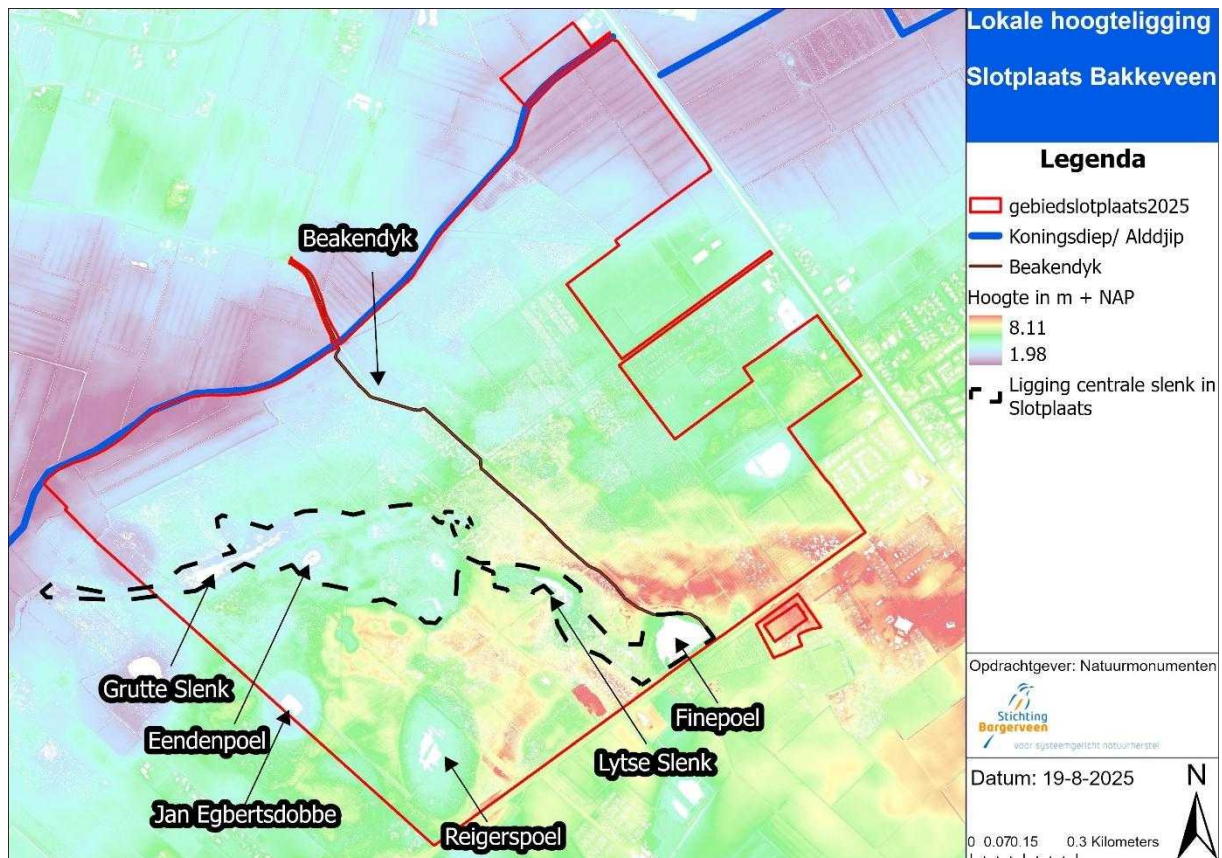
Slotplaats Bakkeveen ligt regionaal beschouwd op de noordwestgrens van het Drents-Plateau. Het keileemplateau is in het Weichselien (115.000 tot 11.650 jaar geleden) versneden geraakt door diepe erosiegeulen die later in deze ijstijd opgevuld zijn met smeltwaterafzettingen en dekzand (Bregman et al., 2015; Stouthamer et al., 2015). Op de regionale hoogtekartaart (**Figuur 3-1**) zijn deze diepe geulen goed te zien, ze lopen overwegend noordoost-zuidwest. Onderzoeksgebied Slotplaats Bakkeveen ligt aan de rand van een brede smeltwatergeul. In de smeltwatergeul loopt de gekanaliseerde beekloop van het Koningsdiep/ Alddjip.

Het hoge deel van het Drents plateau in **Figuur 3-1**, ten zuidoosten van Slotplaats Bakkeveen, ligt gemiddeld op 11 meter +NAP (roodbruine kleur). Ten noordwesten hiervan loopt het maaiveld snel af. De hogere rug ten zuidoosten van het projectgebied ligt op 6-8 m +NAP (gele kleur). Het projectgebied ligt op de noordelijke uitloper van deze hoge rug. Ten noorden van het gebied loopt een smeltwatergeul, waarin het maaiveld op een hoogte ligt van 5 m +NAP, er is sprake van een hoogteverschil van 1-3 meter.



Figuur 3-1. Regionale hoogtekartaart van de omgeving van Slotplaats Bakkeveen met het Koningsdiep/ Alddjip. De donkerbruine kleur laat hoogten tot 11 m + NAP zien. De lichtgroene kleur laat hoogten van 4 tot 5 m + NAP zien en de donkerblauwe kleur hoogten van 2 m onder NAP.

Op de lokale hoogtekartaart zijn de grote hoogteverschillen binnen Slotplaats Bakkeveen goed zichtbaar (**Figuur 3-2**). Het zuiden van het gebied wordt gekenmerkt door hoge ruggen tot 8,3 m +NAP en komen tot 4 m +NAP. Naar het noordwesten toe loopt het maaiveld af tot op een hoogte van 2 meter + NAP. Verschillende kommen in het gebied zijn geïsoleerd gelegen zoals de pingo's Jan Egbertsdobbe en Reigerspoel. In het centrum van het gebied volgen verschillende kommen elkaar echter op in een oost-west georiënteerde structuur. Hierin zijn ook twee slenkssystemen Lytse Slenk en Grutte Slenk gelegen. Op nog kleinere schaal zorgen rabatstructuren voor hoogteverschillen. Deze zijn vrijwel in het hele gebied nog zichtbaar, maar voornamelijk in het centrum en noordelijke deel van het gebied.



Figuur 3-2. Lokale hoogtekartaart van Slotplaats Bakkeveen met het Koningsdiep en toponiemen (PDOK, 2023).

3.2 De diepere ondergrond

3.2.1 Geogenese en geohydrologische doorsnede

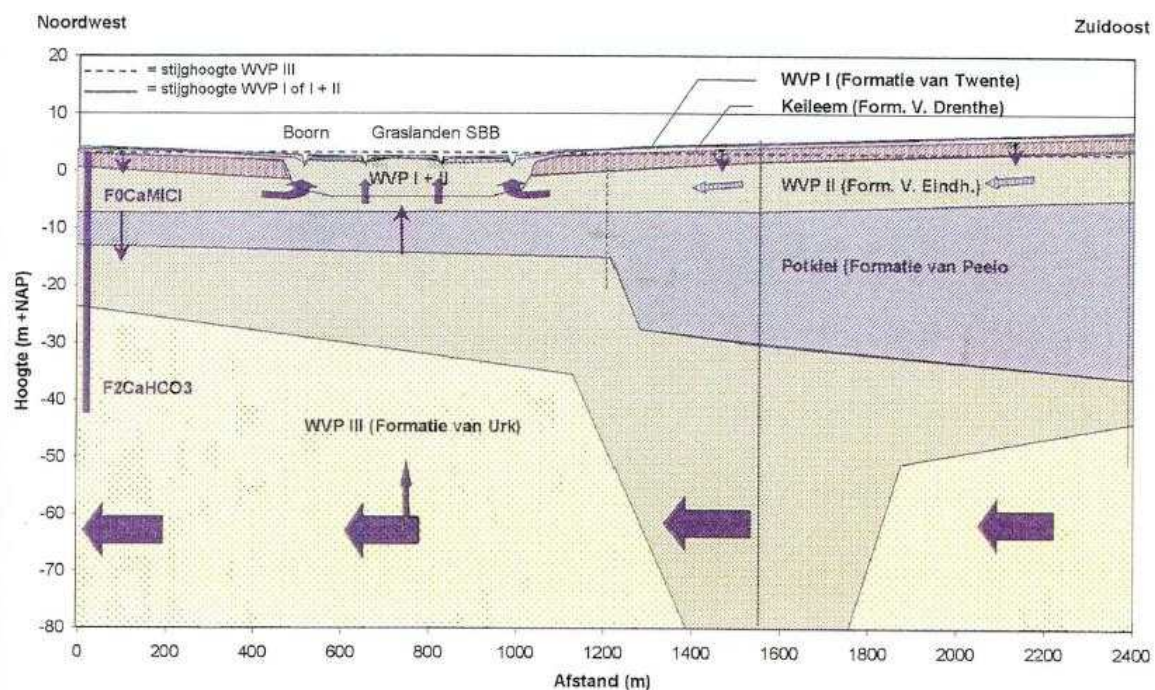
De formatie van Breda vormt de geohydrologische basis en ligt op 240 meter onder NAP. Over een tijdsperiode van miljoenen jaren is hierop in verschillende fasen voornamelijk zand afgezet. Hierdoor is een zandpakket van zo'n 200 meter dik ontstaan. Dit gehele zandpakket vormt watervoerend pakket III (WVP III). De bovenste afzetting zijn overwegend grove rivierzanden van de Formaties van Urk. Deze formatie is zichtbaar van -80 tot -30 meter onder maaiveld in **Figuur 3-3** (De Goede et al. (1999).

Drie ijstijden hebben daarna het landschap gevormd. In het Elsterien (475 000 tot 410 000 jaar geleden) lag er een dik pakket landijs op het gebied. Onder dit landijs is het zeer slecht

doorlatende potklei afgezet (formatie van Peelo) die WVP III afsluit van de watervoerende pakketten hierboven. Dit maakt dat WVP III minimaal van belang is voor de bossen.

In de periode die volgde is een kalkloos zandpakket van de formatie van Drachten (voorheen Eindhoven) door de wind afgezet op de potklei. Dit pakket bestaat uit matig fijn tot matig grof zand en vormt WVP II. In het Saalien (240 000 tot 130 000 jaar geleden) is het gebied opnieuw bedekt geraakt met een dik pakket landijs. Dit keer werd geen potklei afgezet, maar het slecht doorlatende keileem (Formatie van Drente, Laagpakket van Gieten). In dit gebied is grijze keileem afgezet die nu tot een diepte van 2-3 meter ontkalkt is (Koster, 2015).

Na een korte warme periode volgde weer een koude periode in het Weichselien (115.000 tot 11.650 jaar geleden). Het keileemlandschap is toen versneden geraakt door smeltwater (zie **Figuur 3-1**) en er is een laag dekzand afgezet boven op de keileem en in de smeltwatergeulen (Boorn in Figuur 3-3, nu Koningsdiep/ Alddijp). Het dekzand is onderdeel van de Formatie van Bostel (voorheen Twente) en vormt WVP I (Bregman et al., 2015). In het Holocene (11.650 tot heden) werd het klimaat natter en warmer en werd onder invloed van een stijgende zeespiegelstanden veen gevormd in het gebied. Veenvorming begon in de beekdalen en afgesloten laagten als pinogruines. Het veen is vanaf de 17^e eeuw grootschalig ontgonnen (Makaske et al., 2015).



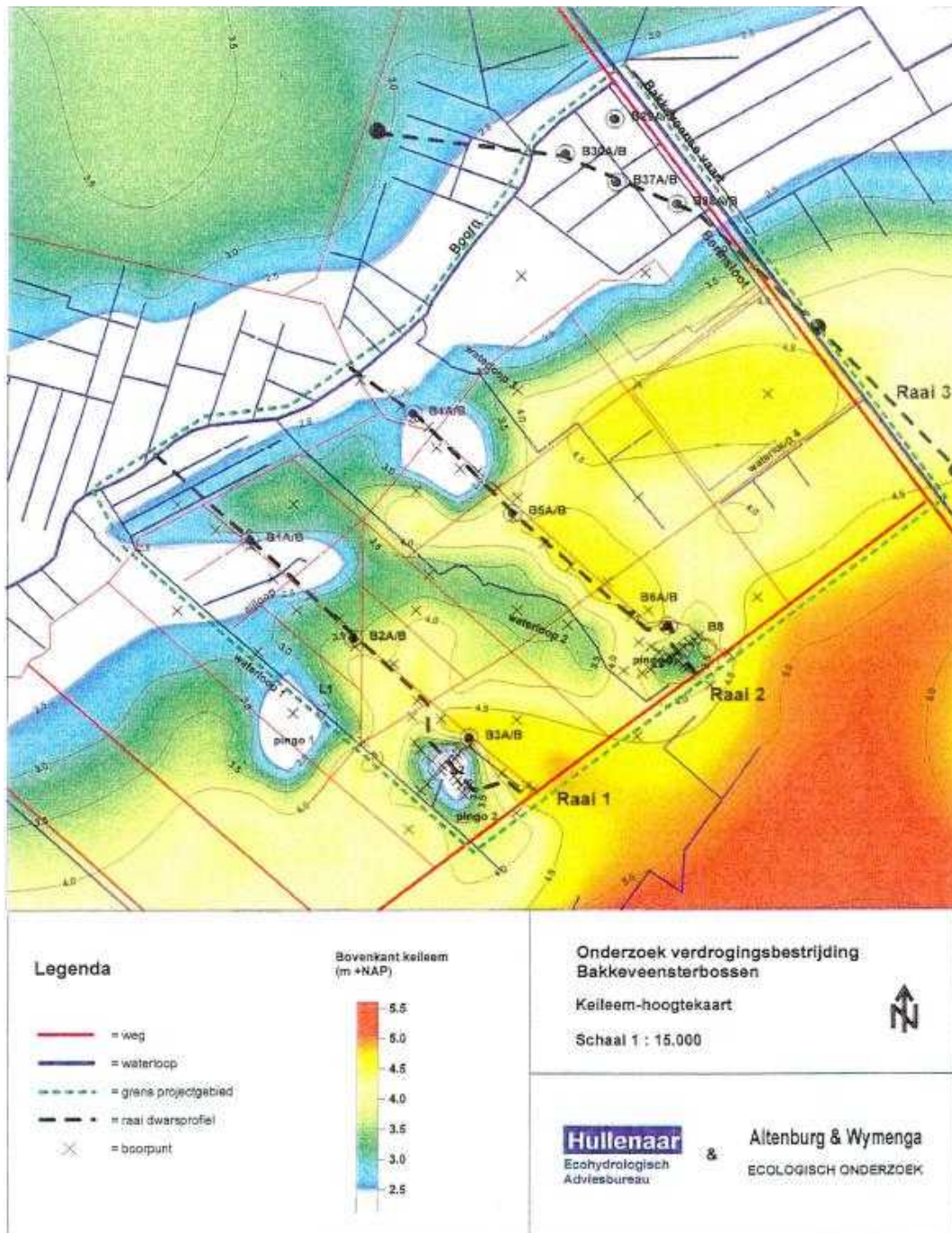
Figuur 3-3. Geohydrologische dwarsdoorsnede van het onderzoeksgebied en omgeving tot 80 meter diepte gemaakt door De Goede et al. (1999).

3.2.2 Keileem

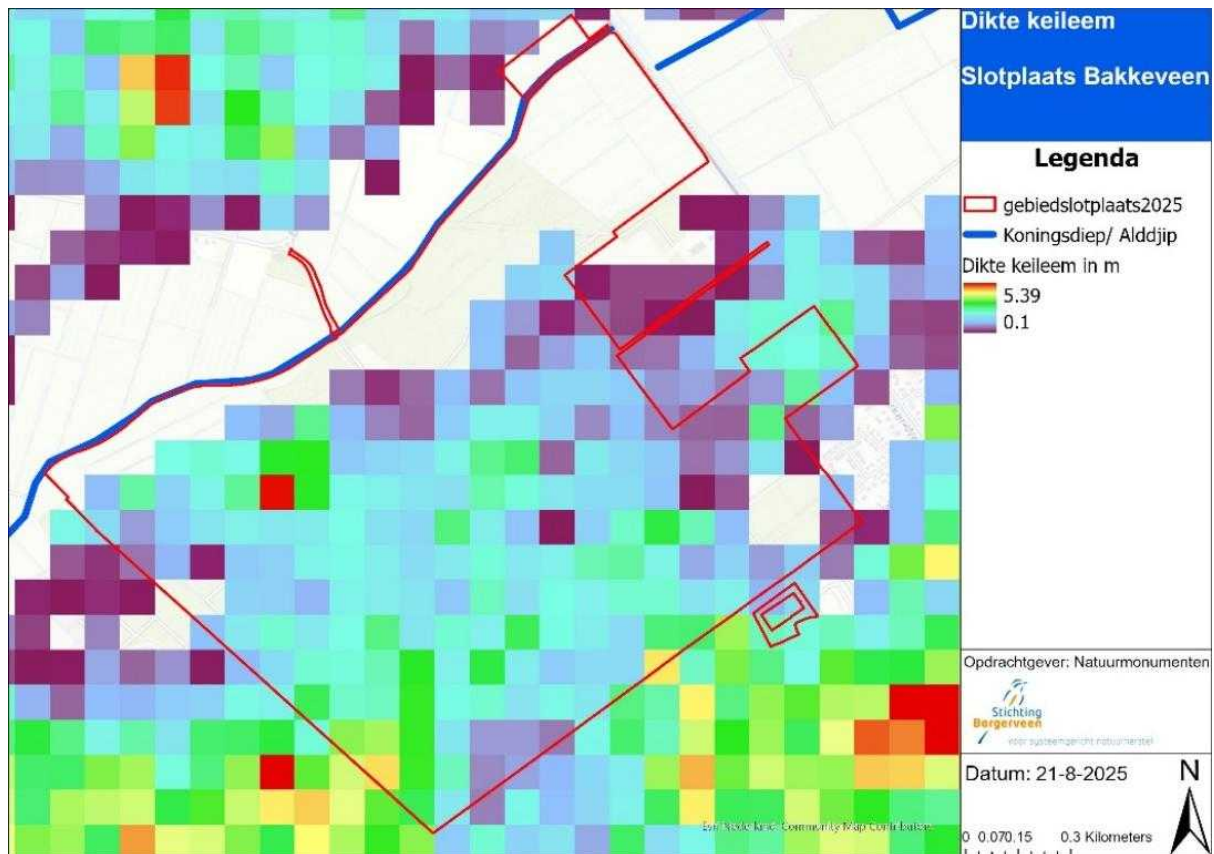
Keileem vormt de scheiding tussen WVP I en WVP II en is daarom zeer belangrijk voor de lokale hydrologie in het gebied. De hoogteligging en verspreiding van de keileem is gedetailleerd in beeld gebracht door De Goede et al. (1999) en weergegeven in **Figuur 3-4**.

Het model Geotop v1.6.1 geeft een grovere verspreiding, maar laat wel de dikte van de keilemlagen zien (TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-b) (**Figuur 3-5**).

Onder een groot deel van het gebied ligt keileem. De bovenkant van de keileem ligt in het zuidoosten relatief hoog (4,5 m + NAP) en daalt in noordwestelijke richting (tot 2,5 m + NAP bij het beekdal). Toch is de keileem plaatselijk zeer dun of ontbreekt deze. In de smeltwatergeul van het beekdal van het Koningsdiep ontbreekt de keileem geheel, en ook aan de basis van beide pingoruïnes (1: Jan Egbertsdobbe & 2: Reigerspoel) is een gat in de keileem aanwezig. Dit onderscheid de pingoruïnes ook van uitblazingslaagten of doodijsgaten die in het centrum en noord van Slotplaats Bakkeveen aanwezig zijn.



Figuur 3-4. Keileemverspreiding en hoogte in m + NAP in het gebied, Kaart overgenomen van De Goede et al. (1999).



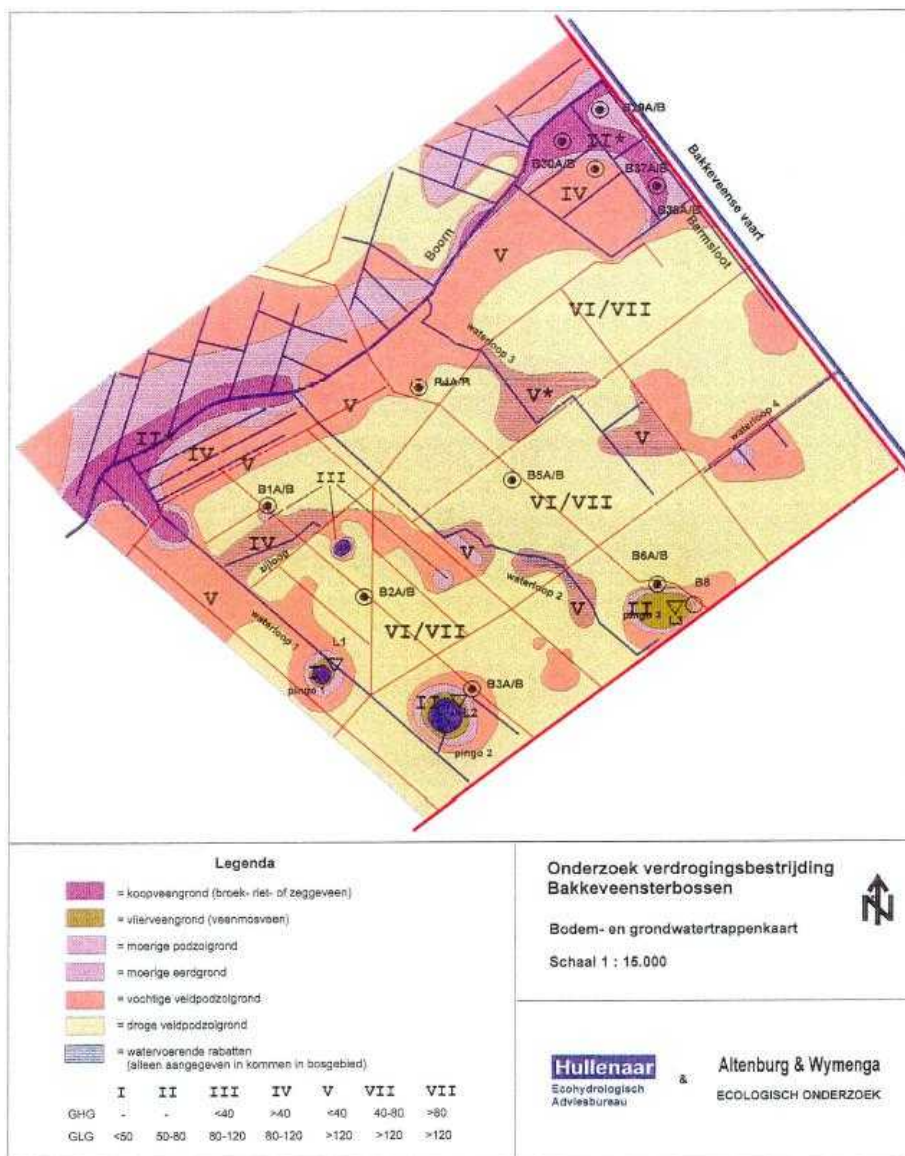
Figuur 3-5. Keileemdikte in m op basis van Geotop v1.6.1 (TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-b).

3.3 Bodem

3.3.1 Bodemtypen

De 1:50 000 bodemkaart geeft aan dat vrijwel het gehele projectgebied bestaat uit veldpodzolgronden (Hn21). Veldpodzolgronden ontstaan onder invloed van infiltratie van regenwater en wisselnatte condities, waardoor een loodgrijze uitspoelingshorizont (E) en vaak dikke donkerbruine inspoelingshorizont (B) ontstaat. Verder zijn hydromorfe kenmerken (gley- / roestverschijnselen) in deze bodems tot hoog in het profiel aanwezig. Dit geeft aan dat deze bodems onder invloed van (schijn)grondwater hebben gestaan. De Goede et al. (1999) hebben een verfijnde bodemkaart gemaakt (**Figuur 3-6**). Hierin is te zien dat een deel van de veldpodzolen tegenwoordig aanzienlijk droger is dan voorheen (gele kleur) (Ten Cate et al., 1995; Jongmans et al., 2015; De Goede et al., 1999).

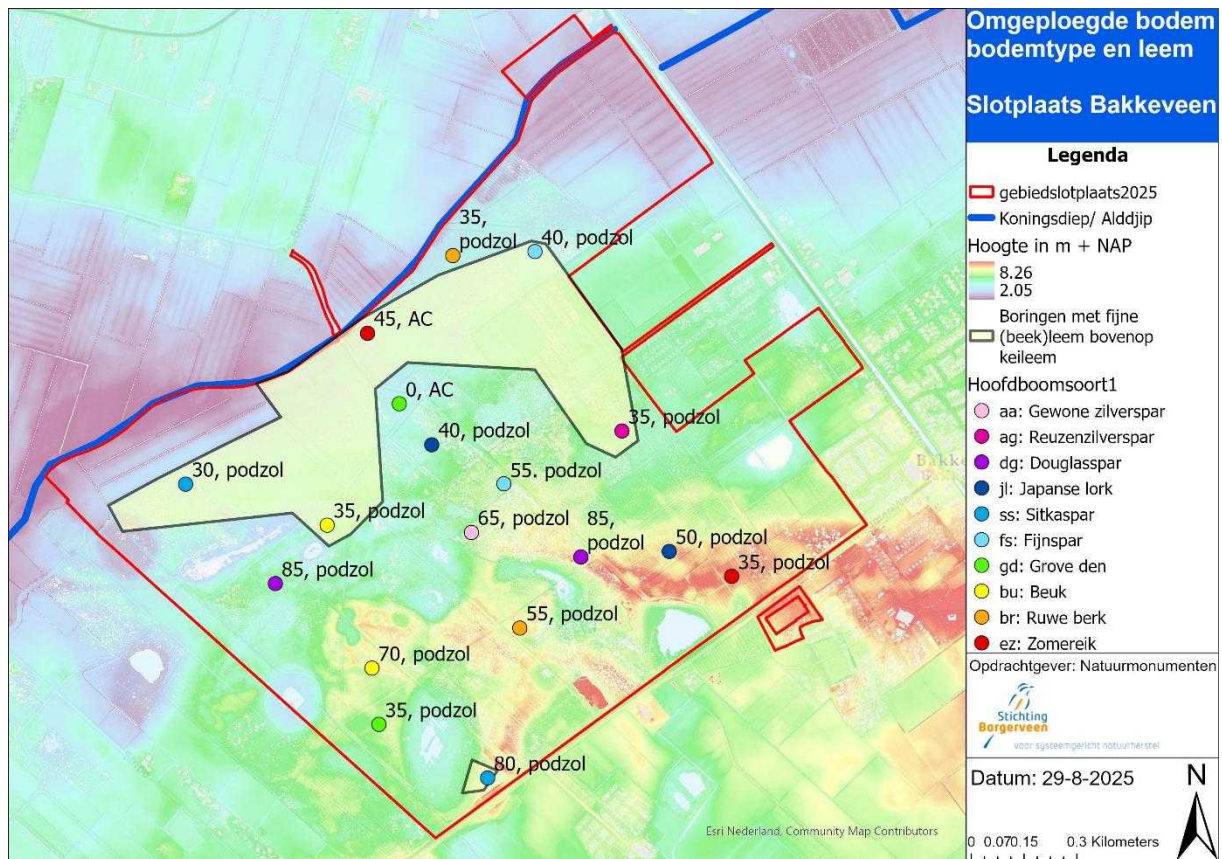
In het beekdal zijn op verschillende locaties moerige podzolgronden (zWp) en moerige eerdgronden (vWz) aanwezig. Deze gronden zijn op een vergelijkbare wijze ontstaan als veldpodzolen, maar zijn daarna vernat (vermorst). Veengronden zijn in het uiterste noordwesten en -oosten te vinden in het beekdal, evenals in de pingo's. De koopveengronden in het beekdal bestaan uit broek-riet- of zeggeveen en de vlierveengronden in de pingo's uit veenmosveen (Ten Cate et al., 1995; Jongmans et al., 2015; De Goede et al., 1999).



Figuur 3-6. Bodemkaart 1: 15 000 gemaakt door De Goede et al. (1999).

De eigen grondboringen geven nieuwe inzichten op de verfijnde bodemkaart. De toplaag van de bodem van de veldpodzolen is vrijwel overal doorploegd. Hierdoor is het bodemprofiel soms in zijn geheel op zijn kop gezet (zie **Bijlage 4**). In **Figuur 3-7** staat aangegeven hoe diep de toplaag is doorgeploegd en of er nog restanten van de podzol terug te vinden zijn. Hoewel een veldpodzol in systemen als deze vaak een verkitten en slecht doorlatende podzol B-horizont kan hebben (zie **Bijlage 1** voor toelichting op ontstaan verkitten B-horizonten), zal deze laag nu niet meer als slecht doorlatend functioneren.

Daarnaast zijn in de meest noordelijke boringen lemige bodemlagen aangetroffen in het dekzand boven de keileem. Het gaat daarbij om zandige leem in de noordwesthoek onder Beuk, (zeer) sterk lemig zand onder Zomereik en Reuzenzilverspar en zwak lemig zand onder Fijnspar en Sitkaspar (noord en zuid). De leem bestaat uit fijner zand dan de keileem die dieper in het profiel is gevonden en is daarom geen keileem. Over het algemeen bestaan de leemarme zanden in het gebied uit matig fijn zand (150-210 µm).



Figuur 3-7. Opvallende bodemeigenschappen op basis van eigen uitgevoerde boringen die een aanvulling zijn op de verfijnde bodemkaart van **Figuur 3-6**. De cijfers staan voor de diepte van de omgeploegde bodem, gevolgd door het bodemtype (AC: grondwatergevoed, podzol: veldpodzol, laterale waterstroming). De (beek)leemverspreiding is nu doorgetrokken tussen boringen, of dit overal aanwezig is, is niet met zekerheid vastgesteld.

Op veel plekken zijn enorm dikke strooisellagen aanwezig boven op de bodem. De strooisellaag is met uitzondering van boring 1 en 3 overal dikker dan 10 cm. Bij boring 8, 11, 13 en 17 zijn onder naaldbos zelfs strooisellagen van 17 cm gevonden.

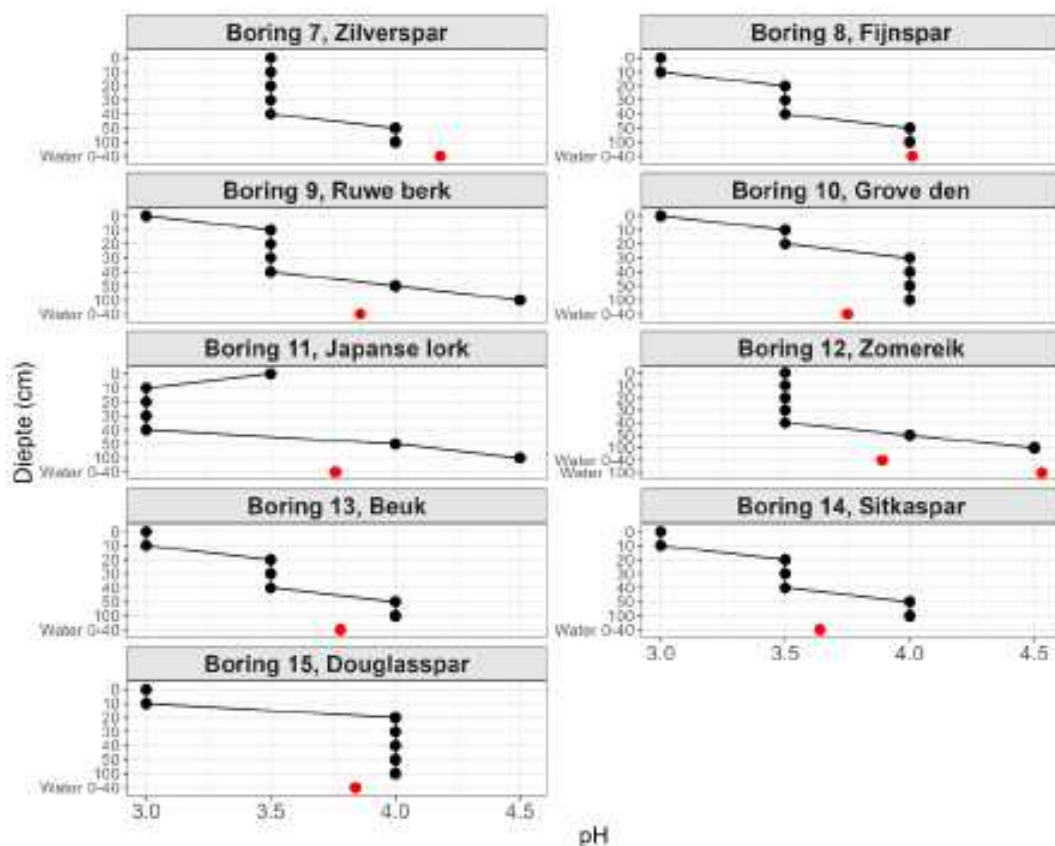
3.3.2 Zuurstatus van de bodem

3.3.2.1 pH en pH-profielen en vegetatie

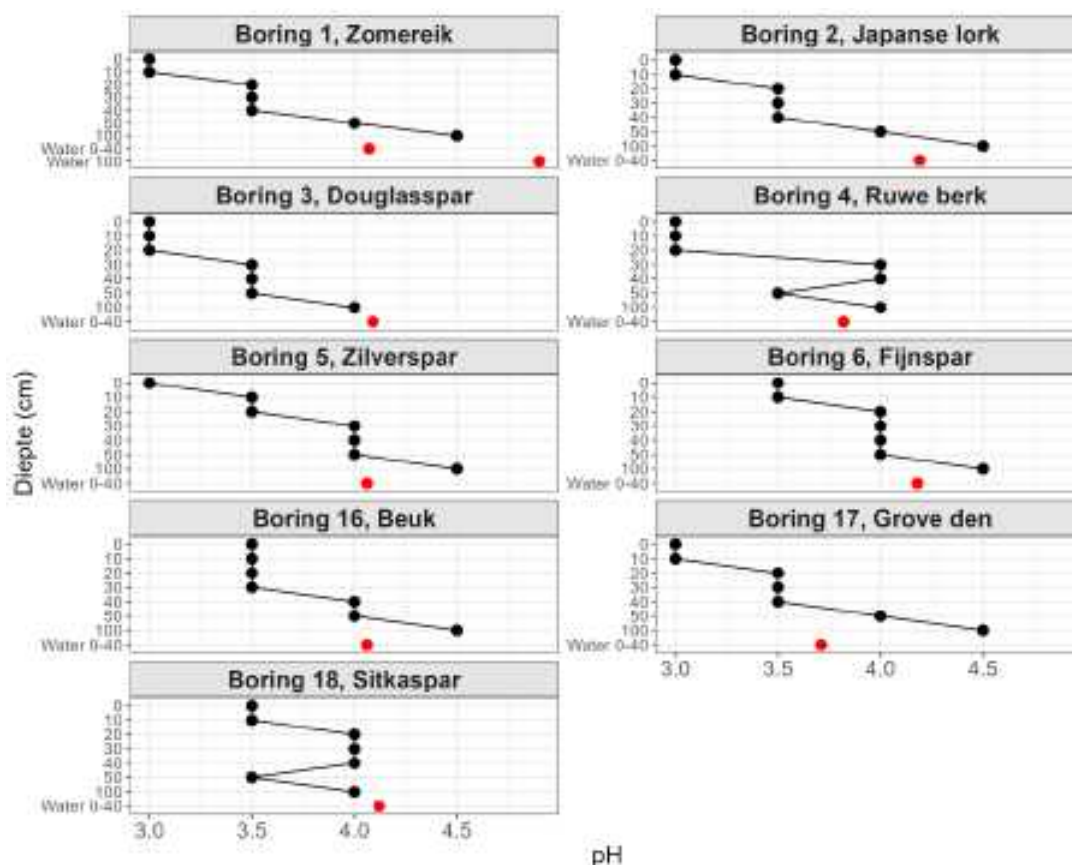
In elke grondboring is een pH-profielen gemaakt van de bodem met pH-papierjes (**Figuur 3-8** en **Figuur 3-9**). Alhoewel deze papierjes indicatief zijn laten ze wel de grote patronen zien. De bodem op basis van pH-veld is te bestempelen als "Zuur infiltratieprofiel" of zelfs "Zeer zuur infiltratieprofiel". De profielen hebben in de bovenste 40 cm vaak een pH-Veld van 3,0 of 3,5 (pH-water <4,5), wat te typeren is als zuur. Echter wordt ook op verschillende locaties binnen 40 cm een pH-Veld van 4,0 gevonden, wat vergelijkbaar is met pH-water 4,5-5. Dit is slechts matig zuur (Van Delft et al., 2024). Daarnaast valt op dat er redelijk veel variatie zit in bodem-pH in de diepte, dit is logisch gezien de verstoorde bodem in het gebied (**Figuur 3-7**).

Opvallend is dat pH-Veld op 50 en 100 cm diepte bijna overal een pH-waarde heeft van 4,0 of 4,5. Dit is matig zuur en te vergelijken met een pH-water van 4,5-5,5 (Van Delft et al., 2024). Ook de pH-water metingen van de bodemonsters op 100 cm diepte laten een pH-Veld zien tussen de 4,5 en 5,0.

Er zijn geen significante verschillen gevonden in pH-Veld tussen hoge en lage terreindelen, maar ook niet tussen naald- en loofbos (**Bijlage 2**). Wel is een significant verschil gevonden in pH-zout ($p = 0.0208$) en pH-Water ($p = 0.0359$) in de 0-40 cm bodem, waarbij de pH significant hoger ligt op de hogere terreindelen. Het gaat hierbij echter om uiterst geringe verschillen: de pH ligt respectievelijk 0.2 en 0.18 pH-eenheid hoger. Bovendien ligt de pH zout in de 0-40 cm bodem onder naaldhout significant hoger ($p = 0.0392$) dan onder loofbos. Ook hier is het verschil uiterst klein met 0.19 pH eenheid.



Figuur 3-8. pH-profielen op basis van pH-veld (pH-papertjes), geschat op 0,5 nauwkeurig op diepten 0, 10, 20, 30, 40, 50 en 100 in de delen die laag in het landschap van Slotplaats Bakkeveen liggen. Daarnaast is de pH op basis van het waterextract in het mengmonster 0-40 en 100 diepte weergegeven.

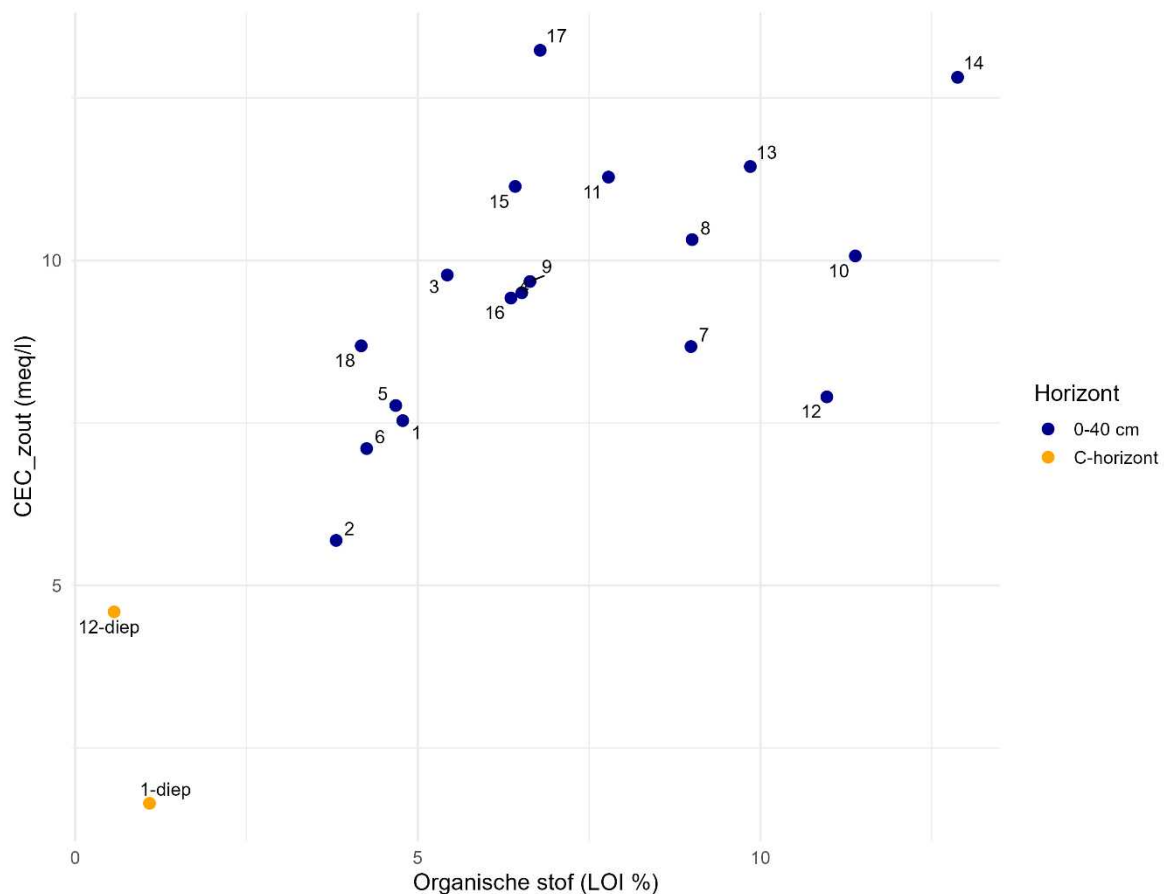


Figuur 3-9. pH-profielen op basis van pH-veld (pH-papertjes), geschat op 0,5 nauwkeurig op diepten 0, 10, 20, 30, 40, 50 en 100 in de delen die hoog in het landschap van Slotplaats Bakkeveen liggen. Daarnaast is de pH op basis van het waterextract in het mengmonster 0-40 en 100 diepte weergegeven.

3.3.2.2 Buffering en basenverzadiging

pH is slechts een maat voor de hoeveelheid H^+ en daarmee een indicator van verzuring. De hoeveelheid basische kationen Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Natrium (Na^+) en kalium (K^+), mede in relatie tot de zure anionen Aluminium (Al^{3+}), IJzer (Fe^{2+}), Mangaan (Mn^{2+}) en protonen (H^+) geeft een veel beter beeld van de verzuringstatus van de bodem. Om dit te goed te interpreteren, moeten we eerst kijken naar de hoeveelheid bindingsplaatsen die aanwezig zijn in de bodem. Dit wordt bepaald door middel van de som van alle basische kationen en anionen: de Cation Exchange Capacity (CEC) (Ulrich, 1981; Bobbink et al., 2017). Omdat kationen in deze systemen vaak gebonden zijn aan organische stof, is de verhouding tussen organische stof en CEC_zout in **Figuur 3-10** weergegeven.

Er is best veel variatie in de hoeveelheid organische stof van de 0-40 cm bodem aanwezig: 3,8 tot 12,9 procent. Dit is in vergelijking tot andere bosbodems in Nederland niet laag, maar ook niet extreem hoog. De CEC is alleen bepaald op basis van het zoutextract, wat leidt tot een onderschatting van de werkelijke CEC. Dit maakt de CEC lastig te interpreteren, maar deze lijkt ook niet extreem hoog of laag in vergelijking met andere bosbodems in Nederland. De lagere CEC in C-horizonten lijkt goed samen te hangen met de lagere hoeveelheid organische stof en daarmee samenhangende lagere bindingsmogelijkheid voor kationen en anionen.

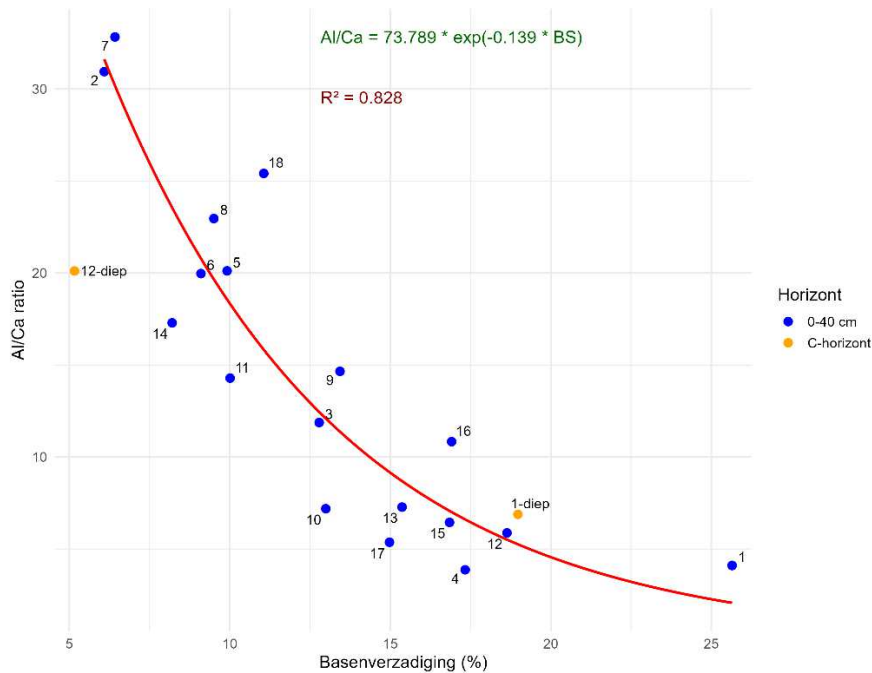


Figuur 3-10. De CEC in meq/l van het zoutextract in relatie tot de hoeveelheid organische stof (LOI) in %. Zowel de 0-40 cm bodem als C-horizonten zijn weergegeven.

De term basenverzadiging wordt gebruikt om aan te geven hoeveel van het kationenuitwisselingscomplex bezet is met basische kationen. De basenverzadiging (BS) is bij benadering bepaald met het zoutextract, wat leidt tot een overschatting van de basenverzadiging. De basenverzadiging in de 0-40 cm bodemonsters is laag tot zeer laag (**Figuur 3-11**). Vrijwel alle monsters hebben een basenverzadiging lager dan 20% en enkele zelfs lager dan 7%.

Dit laat zien dat in de bosbodems van Slotplaats Bakkeveen nauwelijks basische kationen beschikbaar zijn om de bodem te bufferen. De basische kationen zijn zo goed als op, waardoor de bodem zich in het aluminium buffertraject bevindt. Hierbij komt het voor planten giftige aluminium vrijgemaakt om de bodem te bufferen (Ulrich, 1981; Bobbink et al., 2017). Dat is terug te zien in zeer hoge aluminiumconcentraties van 1600 tot 3500 $\mu\text{mol/l}$ en hoge Al/Ca-ratio's van vrijwel overal boven de 5. Dit is zeer hoog in vergelijking met andere bosbodems in Nederland.

Opvallend is dat ook de C-horizonten een lage basenverzadiging en hoge Al/Ca ratio hebben. Een basenverzadiging van 5% en Al/Ca van 20 bij boring 12 geven dit aan. Dit toont aan dat ook dat de C-horizont niet alleen minder bindingsplekken hebben, maar deze ook al veel zijn opgevuld met aluminium.

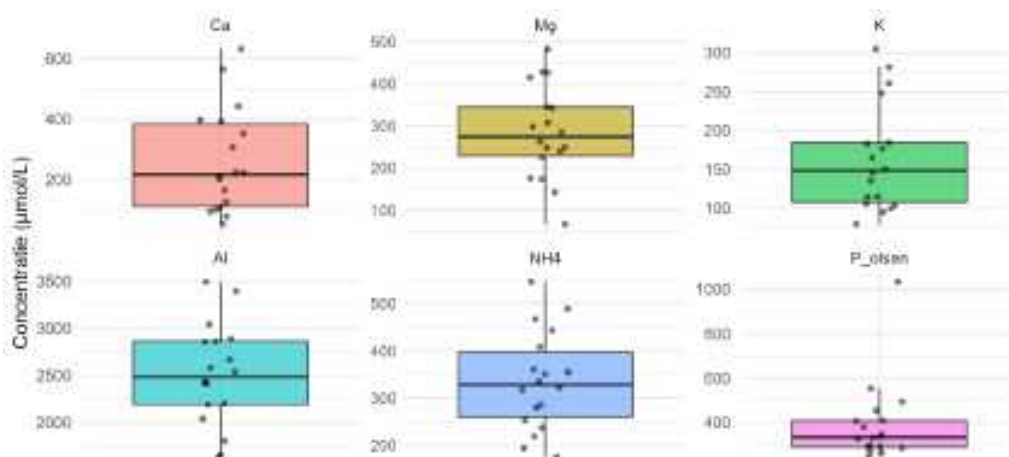


Figuur 3-11. Exponentieel verband tussen de Al/Ca ratio en de basenverzadiging in % op basis van het zoutextract. Het model is gemaakt op basis van de 0-40 cm bodem, de C-horizonten zijn hier overheen geplott.

3.3.2.3 Onderlinge verhoudingen bufferstoffen, aluminium en voedingsstoffen

De Ca^{2+} , Mg^{2+} en K^+ concentraties liggen bijna overal onder $400 \mu\text{mol/l}$ (Na^+ niet gemeten in zout (NaCl) oplossing) (**Figuur 3-12**). Dit is zeer laag in vergelijking met andere bosbodems in Nederland. Aluminiumconcentraties zijn daarentegen juist zeer hoog in vergelijking met andere bosbodems in Nederland.

De dominante vorm van stikstof is ammonium. Nitraatconcentraties zijn laag met maximaal $71 \mu\text{mol/l}$, terwijl bijna alle ammoniumconcentraties boven $200 \mu\text{mol/l}$ liggen. Dit is relatief hoog, maar extreem hoge waarden ontbreken. P-olsen concentraties van $250\text{--}300 \mu\text{mol/l}$ zijn iets lager dan normaal in vergelijking met andere bosbodems. Alleen in boring 1 is een waarde van boven $1000 \mu\text{mol/l}$ gevonden. Dit is ook de boring met de hoogste basenverzadiging en laagste Al/Ca ratio.



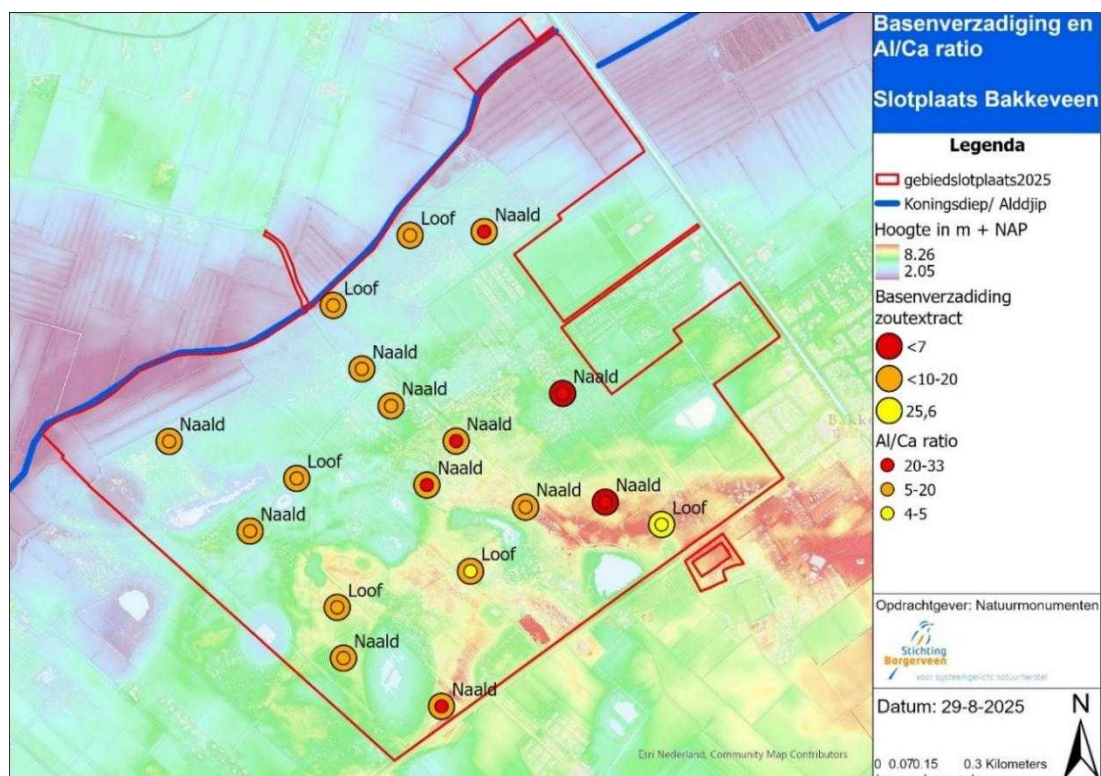
Figuur 3-12. Weergave van Calcium, Magnesium, Kalium, Aluminium en Ammonium op basis van het zoutextract en P op basis van Olsenextract in de verse bodem in $\mu\text{mol/l}$ van de 0-40 cm bodem.

Op twee bodemonmonsters die uit de C-horizonten zijn genomen is ook destructie uitgevoerd. Hieruit blijkt wat de totale hoeveelheid mineralen zijn die in de bodem aanwezig zijn. Calcium, Magnesium en Kalium waarden variëren van 4,3 tot 9,7 mmol/l. Deze waarden zijn niet laag, maar ook niet hoog in vergelijking met andere bosbodems. Aluminiumwaarden van 116 en 146 mmol/l en ijzerwaarden van 21 en 39 mmol/l zijn niet hoog en geven voornamelijk aan dat de C-horizonten op deze locaties leemarm zijn. Fosfaatwaarden van 1,5 en 1,9 mmol/l zijn daarentegen lager dan gemiddeld.

3.3.2.4 Ruimtelijke patronen: verschillen tussen hoog en laag, naald- en loofhout

Bosbodems in de lageregelegen terreindelen van het gebied hebben een significant hogere CEC ($p = 0,02$, verschil = 1,6 meq/l), organische stofgehalte ($p = 0,0001$, verschil = 4,1%) en aluminiumconcentratie ($p = 0,035$, verschil = 432 $\mu\text{mol/l}$) (**Bijlage 3**). Dit laat zien dat bosbodems in de lagere terreindelen meer bindingsplaatsen hebben dan hogere delen. Dit kan in belangrijke mate worden verklaard door het hogere organische stofgehalte van deze bodems ($\text{cor} = 0,64$, $p = 0,005$, methode = spearman). Echter worden die extra bindingsplaatsen in zeer grote mate bezet door aluminium ($\text{cor} = 0,92$, $p = 2,2 \text{ e-}16$, methode = spearman) en niet door andere (basische) kationen.

De Al/Ca ratio en basenverzadiging (BS_zout) in de bosbodems zijn dus niet afhankelijk van een hoge of lage ligging in het landschap (**Figuur 3-13**). Echter is er wel een aanzienlijk effect zichtbaar in bodemchemie tussen bodems onder verschillende boomsoorten. Bodems onder naaldbossen worden gekenmerkt door significant hogere Al/Ca ratio ($p = 0,006$, verschil = 10,1) en lagere BS_zout ($p = 0,006$, verschil = 7,2%). Opvallend is dat er significant hogere ammoniumconcentraties in delen met loofbos ($p = 0,01$, verschil = 134 $\mu\text{mol/l}$).



Figuur 3-13. De basenverzadiging in % en Al/ Ca op basis van het zoutextract is weergegeven in de cirkels. BS en Al/Ca zijn aan elkaar gerelateerd: de laagste BS hebben de hoogste Al/Ca ratio's. De labels "Naald" en "Loof" staan respectievelijk voor "Naaldboomsoort" en "Loofboomsoort".

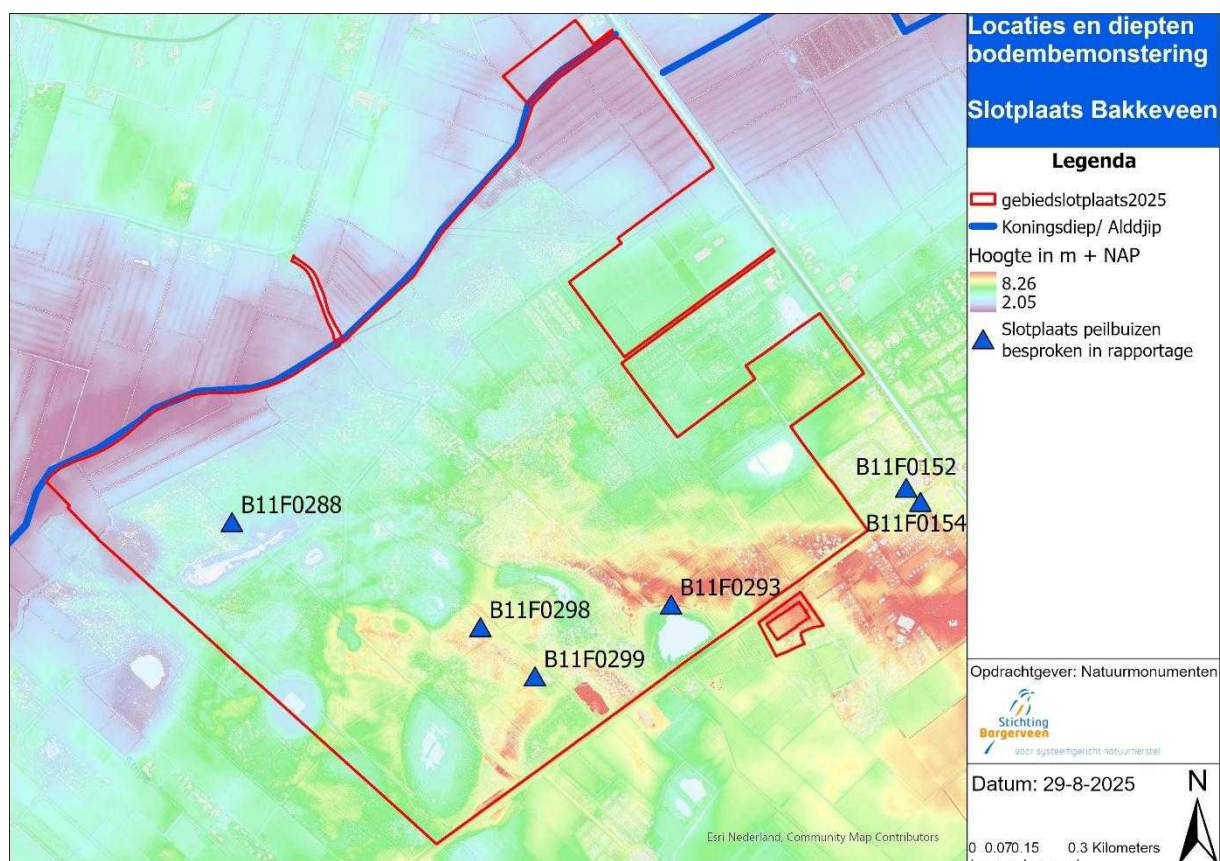
3.4 Hydrologie

Er zijn twee watervoerende pakketten van belang voor het onderzoeksgebied:

- Het regionale grondwatersysteem bestaat uit zandpakketten boven de potklei, maar onder de keileem: watervoerendpakket II (WVPII);
- Het lokale grondwatersysteem bestaat uit het gehele zandpakket boven de keileem: WVPI.

Uit een paar verkennende grondboringen blijkt dat onder schijnspiegelsystemen, zoals pingoruïnes, verkitte podzolen aanwezig zijn. Hoewel deze podzolen ook in omliggende zandruggen verder lopen, zijn ze daar niet verkit. Het gaat specifiek om kleine afgesloten laagten waar nauwelijks bomen staan. Deze schijnspiegelsystemen zijn in dit onderzoek niet meegenomen.

Er zijn veel verschillende peilbuizen in het gebied met lange meetreeksen, maar zeker in de periode 1997 tot 2007 ontbreekt er vaak data, waardoor analyse van deze jaren moeilijk zijn. Daarnaast zijn sommige peilbuizen in 2009 verhoogd en de data is hiervoor niet gecorrigeerd. Bij de analyse is hiermee rekening gehouden. De peilbuizen die zijn geselecteerd om in dit hoofdstuk te bespreken zijn weergegeven in **Figuur 3-14**.



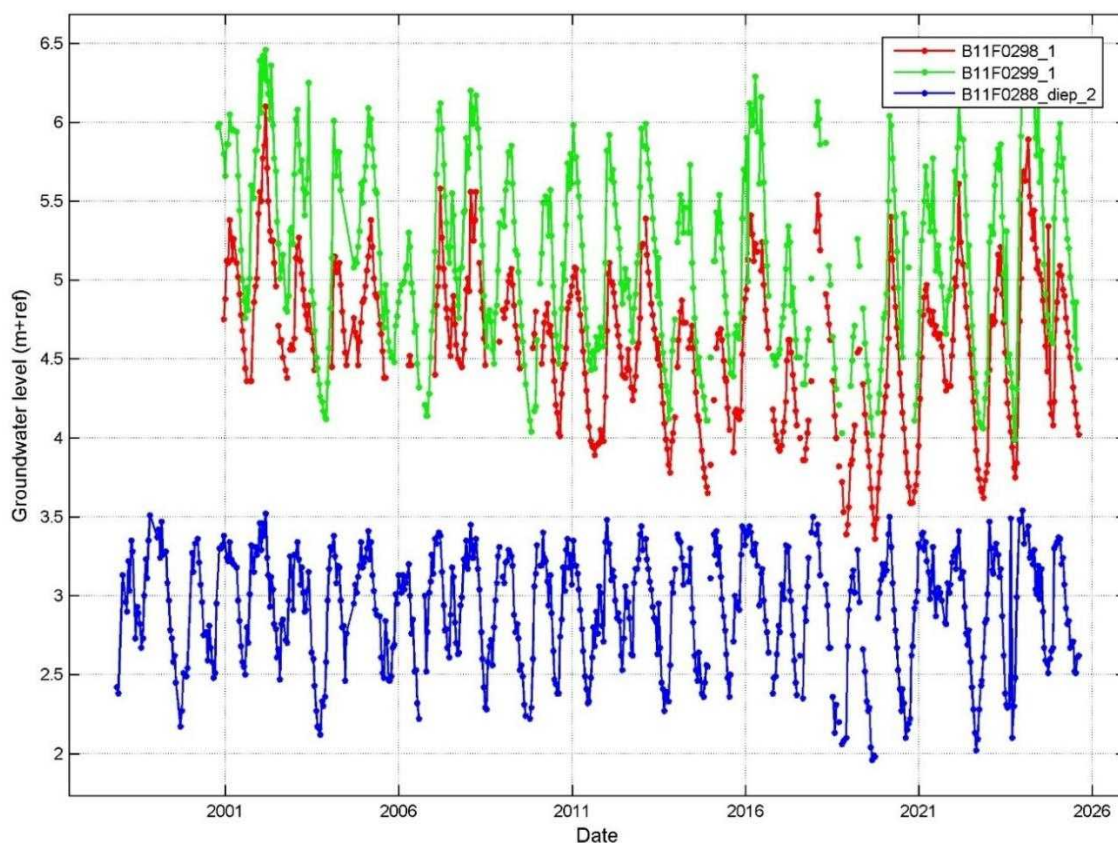
Figuur 3-14. Locaties peilbuizen gebruikt in rapportage na peilbuisanalyse.

3.4.1 Regionaal grondwatersysteem

Het systeem onder de keileem (WVP II) heeft in het zuiden van het gebied zelfde stijghoogte als het systeem boven de keileem (WVP I) en zijn daardoor in het zuiden een samenhangend geheel (zie B11F0293, peilbuisdata niet weergegeven). Dit komt omdat de keileem in het zuiden van het gebied relatief diep onder maaiveld ligt waardoor altijd water boven de keileem aanwezig is (zie ook **Figuur 3-20** en **Figuur 3-21** in *Paragraaf 3.5*). De waterstanden in het zuiden van het gebied liggen relatief hoog met een fluctuatie van 3,5/ 4 tot 6/ 6,5 meter + NAP (**Figuur 3-15**, peilbuis B11F0298 en B11F0299). Bij peilbuis B11F0299 komt de waterstand nog tot 0,7 meter onder maaiveld, maar bij peilbuis B11F0298 ligt de waterstand maximaal 1,5 meter onder maaiveld (**Figuur 3-16**)

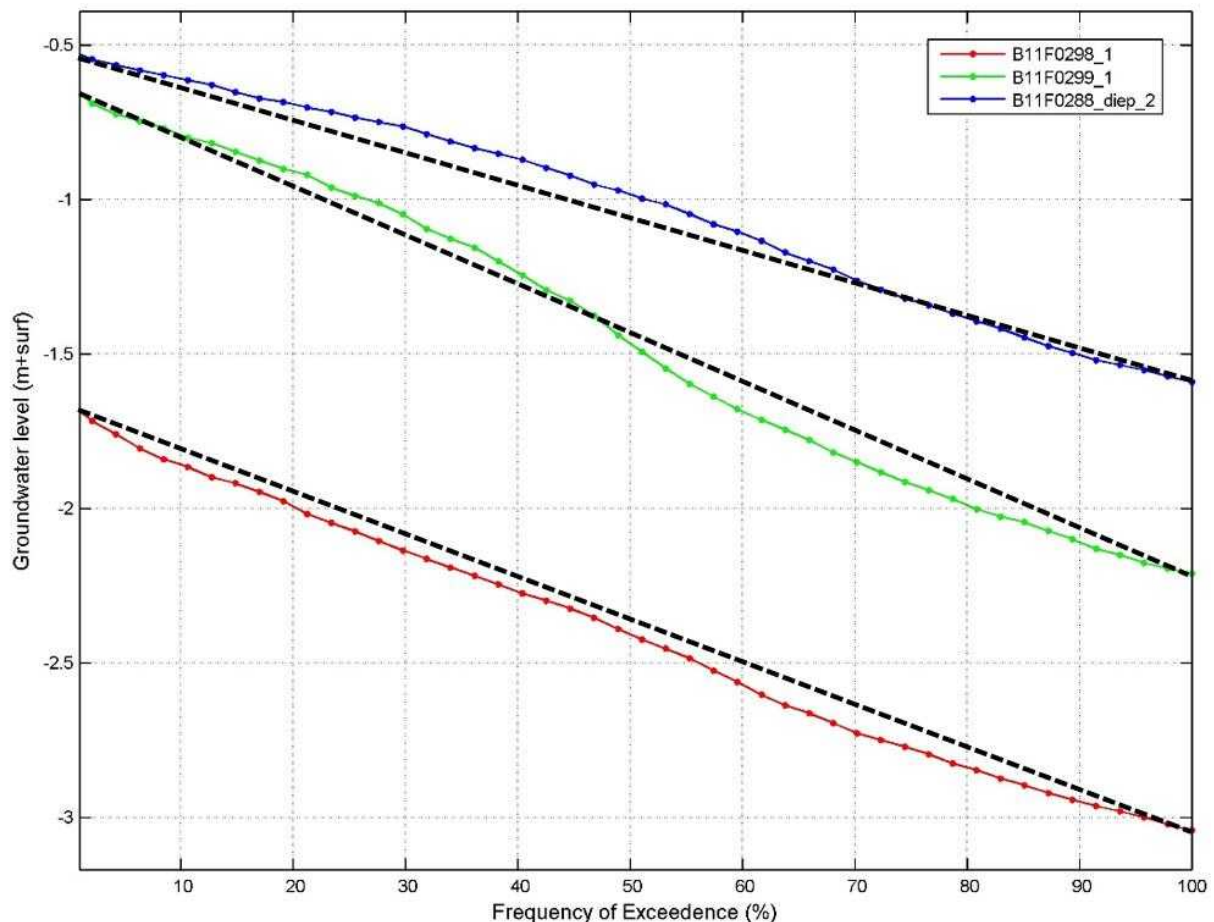
In het noorden van het gebied ligt de waterstand onder de keileem (WVP II) gemiddeld twee meter lager, maar de waterstand komt wel tot 0,5 meter onder maaiveld (**Figuur 3-15** en **Figuur 3-16**, peilbuis B11F0288_diep). Ook is een verschil in dynamiek zichtbaar. In de lagere terreindelen dicht tegen het beekdal van het Koningsdiep, is sprake van waterstandsfluctuatie van 1 meter en komt de waterstand nooit hoger dan 3,5 meter, terwijl de grondwaterstandsfluctuatie op de hogere terreindelen in het zuidoosten 1,5 meter bedraagt. In droge jaren daalt de grondwaterstand 0,5-1 m verder dan in natte jaren.

Daarnaast valt op dat hoewel er sinds 2000 hydrologische herstelmaatregelen zijn uitgevoerd, deze geen effect hebben gehad op de regionale grondwaterstand. Er is geen stijging zichtbaar en in de droge jaren van 2018-2020 daalt de regionale grondwaterstand zelfs dieper dan voorgaande jaren.



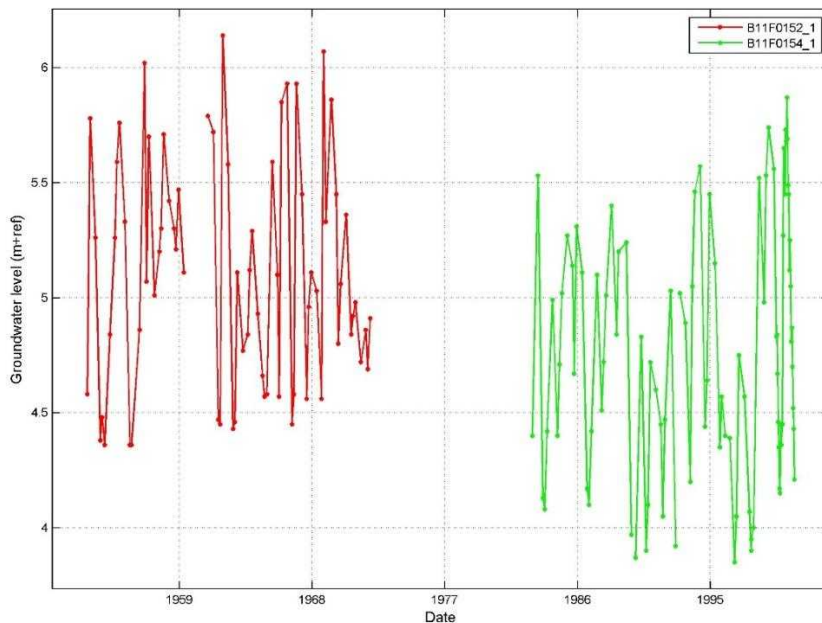
Figuur 3-15. Weergave van de grondwaterstanddynamiek van twee hoger gelegen peilbuizen in het zuidoosten (B11F0298 en B11F0299) en een lagergelegen peilbuis in het noordwesten (B11F0288_diep) in m + NAP.

Aan de hand van duurlijnen kan wordt gekeken hoe lang een bepaalde grondwaterstand per jaar gemiddeld wordt bereikt. De vorm van een duurlijn geeft inzicht in de belangrijkste hydrologische processen, waarbij een bolle duurlijn duidt op een netto grotere toestroom van grondwater dan afvoer (kwel), terwijl een holle duurlijn duidt op een nette grotere afvoer dan aanvoer (wegzijing). Opvallend is dat in het zuiden van het gebied over het algemeen inzijing is (B11F0298) of de hoeveelheid aanvoer en afvoer gelijk is (B11F0299), terwijl in het noorden meer aanvoer van water is (B11F0288) (**Figuur 3-16**).



Figuur 3-16. Duurlijnen van de drie peilbuizen uit **Figuur 3-15**. De grafiek geeft weer hoe vaak in het jaar (%) een bepaalde waterstand onder maaiveld wordt bereikt.

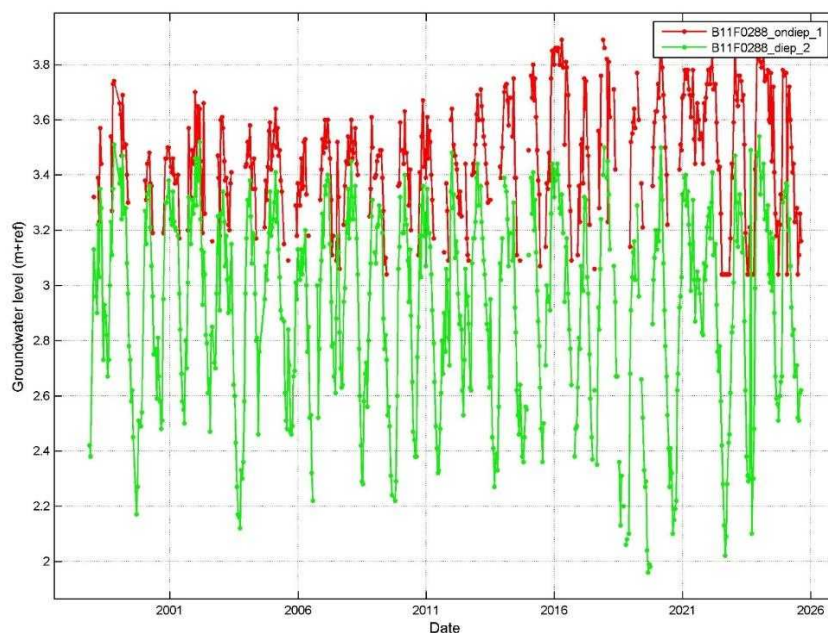
Op basis van peilbuizen met lange meetreeksen, is te zien dat de regionale grondwaterstand tussen 1950 en 2000 met ongeveer 50 cm is gedaald. Peilbuis B11F0152 (1952-1971) laat een fluctuatie zien van 4,5 tot 6,0 meter +NAP terwijl de grondwaterstanden in peilbuis B11F0154 (1982-2000) fluctueren tussen 4,0 en 5,5 m +NAP (**Figuur 3-17**). Beide peilbuizen staan 50 meter uit elkaar op een vergelijkbare hoogte in het landschap.



Figuur 3-17. Weergave van de grondwaterstanddynamiek van peilbuizen B11F0152 en B11F0154 in m + NAP.

3.4.2 Lokaal grondwatersysteem (WVPI)

In het lagere noorden valt op dat er in de nattere periode een tijdelijk hogere waterstand aanwezig is boven de keileem (WVPI) dan onder de keileem (WVPII). De rode grafiek in **Figuur 3-18** geeft de meetreeks weer van een filter boven de keileem en laat dit mooi zien. Ook is er, in tegenstelling tot het regionale systeem (WVPII), een stijgende trend zichtbaar in de hoogste grondwaterstanden in WVPI. Vanaf 2011 is er een stijging zichtbaar van 3,6 tot 3,8 m + NAP, terwijl er sindsdien veel verschillende droge jaren zijn geweest. Dit laat zien dat de maatregelen ervoor hebben gezorgd dat er in de natte periode, in de lage delen van het systeem boven de keileem, langer water staat. Wanneer het water van de keileem is afgelopen volgen ook deze delen weer de regionale waterstand.



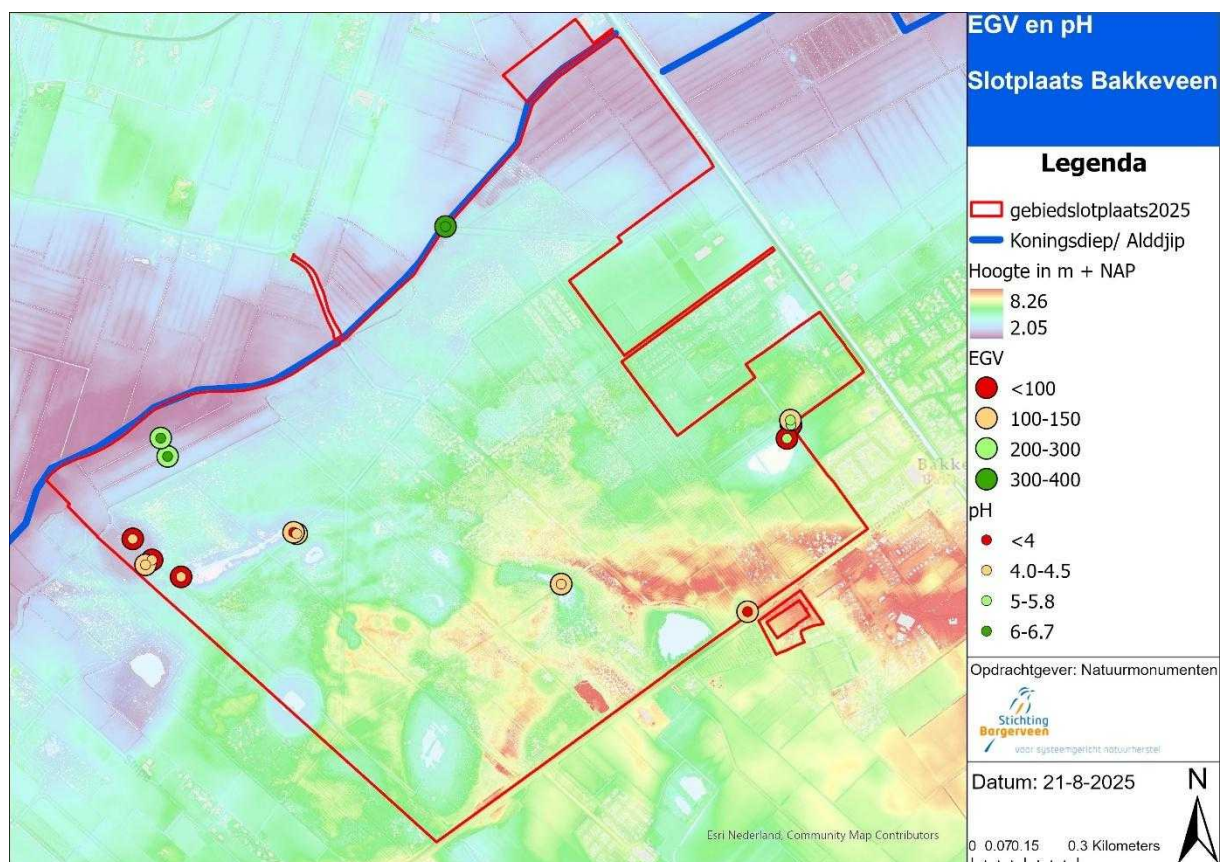
Figuur 3-18. Weergave van de meetreeks van het diepe filter en ondiepe filter (boven de keileem) van peilbuis B11F0288 in m + NAP. Het filter boven de keileem valt een groot deel van het jaar droog, maar wanneer water aanwezig is zijn er hogere waterstanden dan het systeem onder de keileem.

3.4.3 Waterkwaliteit, EGV en pH

In het gebied zijn verschillende schijnspiegelsystemen aanwezig in de vorm van pingo's. Zoals toegelicht staat dit watersysteem los van de watersystemen die van belang zijn voor het bos. Echter waren de waterstanden tijdens het uitvoeren van het veldwerk op 19 en 20 mei 2025 buiten de schijnspiegels zo laag dat maar enkele afzonderlijke watergangen overbleven voor EGV- en pH-metingen binnen type bostype N15.02.

Het centrale oost-west georiënteerde kommensysteem, zoals beschreven in *Paragraaf 3.1* en ook zichtbaar in de keileemverspreiding in **Figuur 3-6**, bestaat uit zuur en basenarm water. De EGV onder de 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en pH van 4,5 of lager geven dit aan (**Figuur 3-19**). Daarnaast is opvallend dat dit systeem nog watervoerend is, ook al staan alle rabatten in de bossen droog. Onze metingen komen overeen met de pH- en EGV- metingen uitgevoerd door De Goede et al. (1999). Zij vonden in deze slenk overal een EGV onder de 207 en een pH onder de 4.4.

De metingen in het noordelijke komstelsysteem (metingen in het uiterste oosten) hebben vergelijkbare EGV-waarden als het water in het centrale komstelsysteem, maar hogere pH-waarden tussen de 5,0 en 5,8. Ook dit komt op hoofdlijnen overeen met de metingen uitgevoerd door De Goede et al. (1999), al zijn de pH-waarden iets hoger. Ten slotte zijn in de graslanden in het noordenwesten en in de beek hogere EGV en pH-waarden aangetroffen. Dit duidt op de aanwezigheid van meer voedingsstoffen of meer gebufferd grondwater.



Figuur 3-19. EGV in $\mu\text{S}/\text{cm}$ en pH-metingen uitgevoerd in de nog watervoerende watergangen buiten de pingo's op 19 en 20 mei 2025.

3.5 Synthese

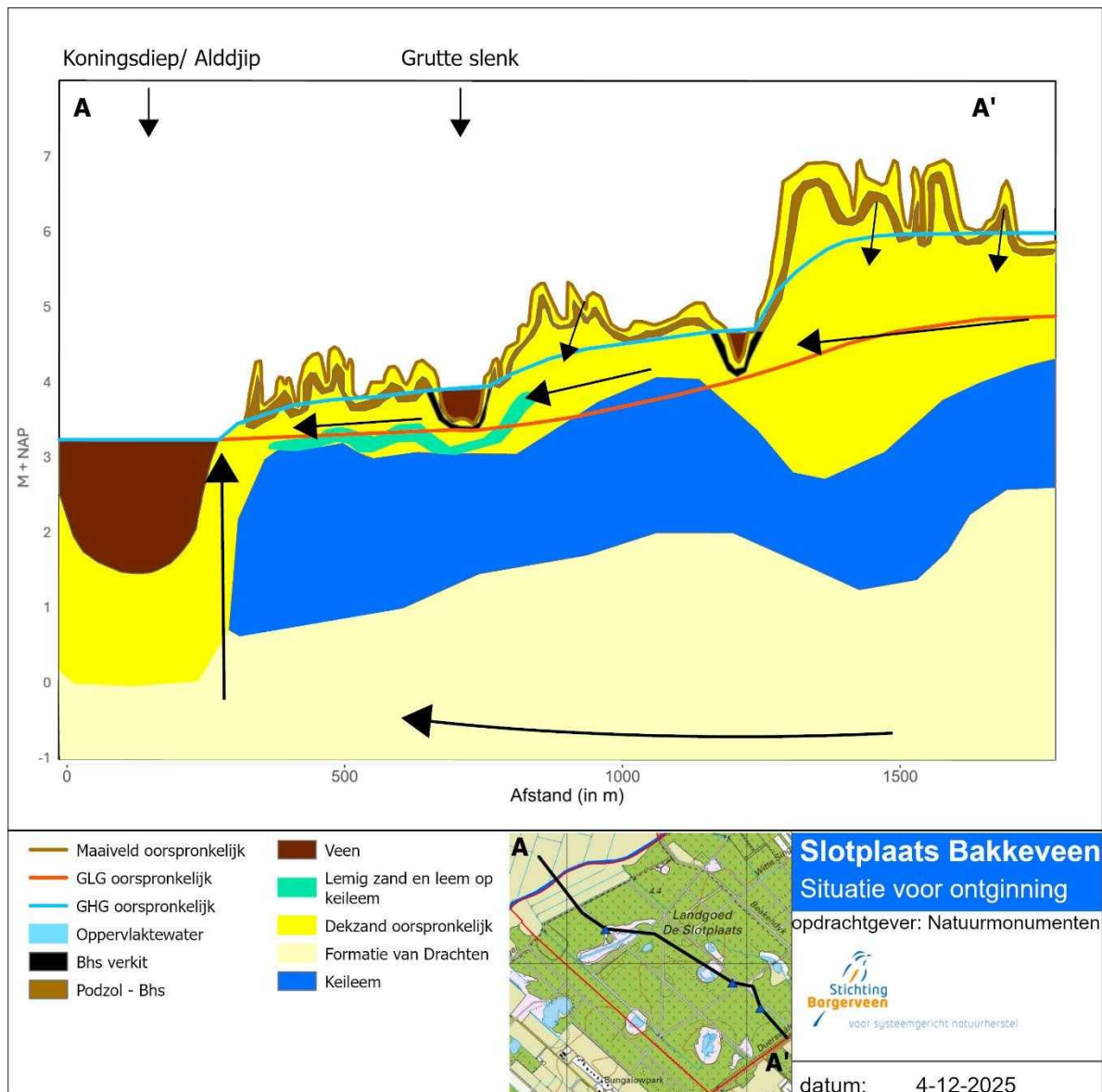
3.5.1 Historische gesteldheid, hydrologie, bodem en vegetatie

De laatste drie ijstijden hebben het landschap van Slotplaats Bakkeveen gevormd. In het Elsterien (475 000 tot 410 000 jaar geleden) is slecht doorlatende potklei afgezet die de zandpakketten eronder volledig afsluit. Hierop zijn goed doorlatende zandpakketten afgezet (Watervoerend pakket (WVP) II) waarop in het Saalien (370 000 tot 130 000 jaar geleden) een laag keileem is afgezet. In het Weichselien (115.000 tot 11.650 jaar geleden) ontstonden smeltwatergeulen door erosie van smeltwater, waardoor de keileem versneden raakte. In smeltwatergeulen ontbreekt de keileem vrijwel volledig. Het beekdal van het Koningsdiep/ Alddijp is hier een voorbeeld van. Later in het Weichselien zijn relatief goed doorlatende dekzanden afgezet op de keileem (WVPI) en ontstond het huidige dekzandlandschap (**Figuur 3-20**).

In het begin van het Holoceen (11 650 tot heden) werd het klimaat warmer en natter en steeg de zeespiegel geleidelijk. De beekdalen ontvingen grondwater vanuit het regionale grondwatersysteem (WVP II, verticale pijl omhoog in **Figuur 3-20**). Hierdoor lag de grondwaterstand er jaarrond hoog en vormden zich hier Elzenbroekbossen, Rietmoerassen en Grotezeggenmoerassen. De grondwaterstand lag dermate hoog en was er zo stabiel, dat er veen werd gevormd.

De dunne zandpakketten boven de keileem vulden zich in de winter snel met water. In het dekzandlandschap lag de grondwaterstand daardoor ook relatief hoog en reikte in de dekzandruggen nagenoeg tot in maaiveld. Versmallingen in het watervoerende pakket boven de keileem zorgden ervoor dat dit grondwater in het voorjaar maar langzaam naar het beekdal kon afstromen. Daardoor lag ook de zomergrondwaterstand in de lagere terreindelen waarschijnlijk nooit ver onder maaiveld. Ondanks de hoge winterwaterstanden was in het dekzandlandschap overwegend sprake van wegzijging. Onder invloed van infiltratie van regenwater en de sterk wisselnatte condities ontstonden veldpodzolen. In diverse kommen en laagten raakten de veldpodzolen als gevolg van steeds hogere, maar wel wisselende grondwaterstanden, in het Holoceen verkit met disperse humus, ijzer en aluminium. Hierdoor werden ze slecht doorlatend voor water (zie **Bijlage 1** voor de processen hierachter). Er ontstonden daardoor natte laagten, veentjes en vennen, die als schijnspiegelsystemen gingen functioneren. In diepere laagten, zoals pingoruïnes waren de grondwaterstanden dermate stabiele dat hier kleine hoogveentjes ontstonden. Op den duur maakte het bos door menselijk ingrijpen plaats voor uitgestrekte vochtige heiden.

Dit resulteerde in een gradiënt in standplaatscondities waarin het beekdal grondwatergevoed was en constant basenhoudend grondwater ontving, de lage delen langs het beekdal waren langdurig nat met lateraal toestromend basenarm en relatief zuur grondwater en boven de keileem waren voedselarme, vochtige bossen/ vochtige heide met heideveentjes aanwezig.



Figuur 3-20. Dwarsdoorsnede van noord naar zuid in Slotplaats Bakkeveen. De doorsnede geeft de verwachte situatie weer direct voordat de veenontginning startte (13^e eeuw).

3.5.2 Huidige gesteldheid hydrologie, bodem en vegetatie

Vanaf de 17^e eeuw is op grote schaal veen gewonnen in en rondom het gebied. Ook is het Koningdiep/ Alddijp gekanaliseerd, waardoor de regionale grondwaterstand aanzienlijk is gedaald. In het noorden komt de grondwaterstand van het regionale grondwatersysteem onder de keileem (WVP11) tegenwoordig nog tot 0,5 meter onder maaiveld. De grondwaterstand kan in dit systeem nooit hoger komen door aftopping van de beek.

Bovendien zijn in het dekzandlandschap veel sloten (en rabatten) aangelegd om de vochtige heidenen te ontginnen en om te vormen tot productiebos. Deze sloten snijden daarbij door dekzandruggen heen en lopen haaks op het beekdal om water vanuit de dekzandruggen en natte laagten snel af te kunnen voeren naar het beekdal. Ten slotte is de bodem op grote schaal doorgeploegd waarbij verkitte podzol B-horizonten zijn doorbroken en deze nu niet meer slecht doorlatend zijn. Het gevolg is dat na de inrichting van het productiebos de grondwaterstanden boven de keileem aanzienlijk zijn gedaald, met in de afgelopen 75 jaar een daling van 0,5 meter.

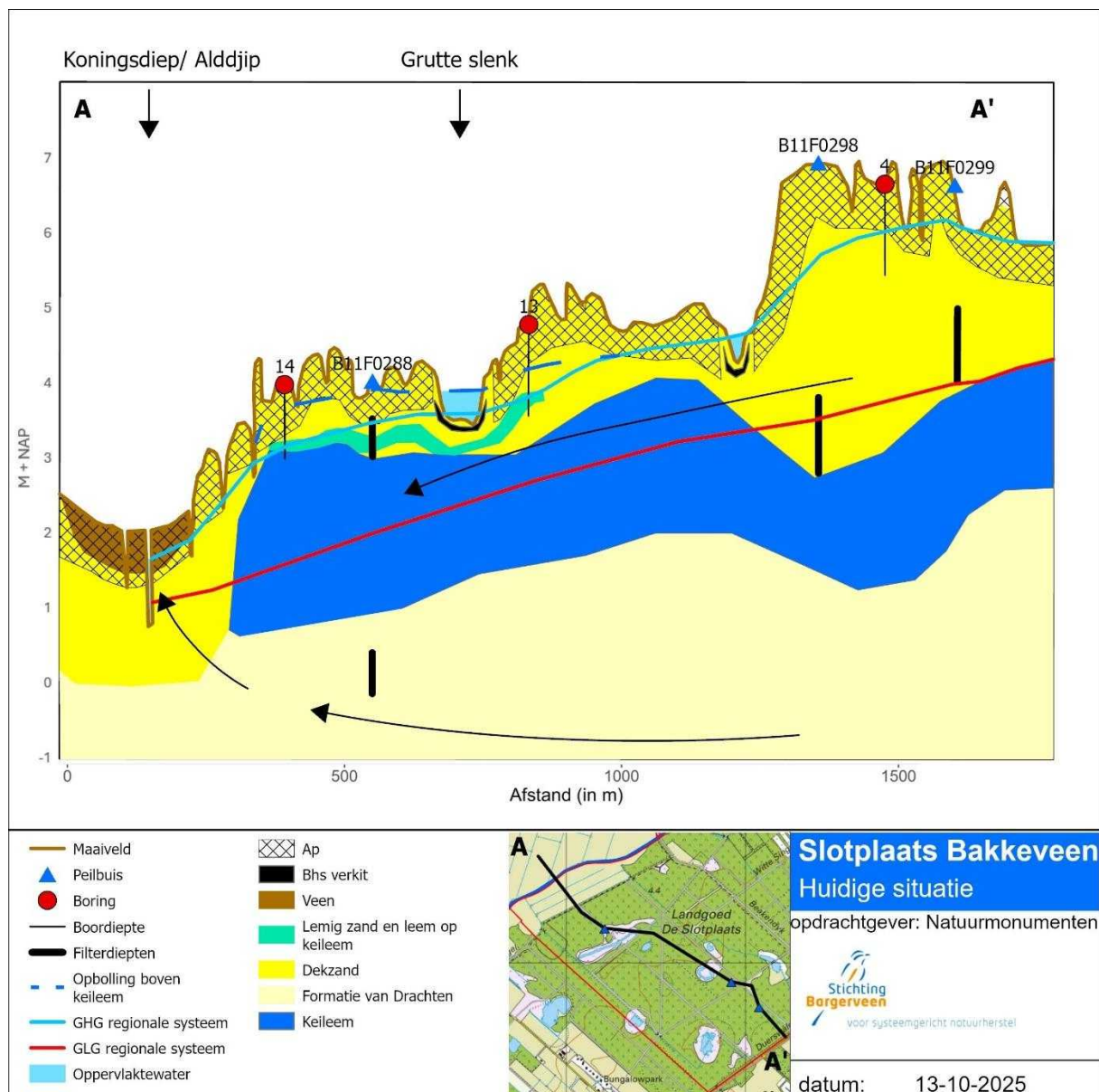
In de huidige situatie bolt de grondwaterstand in de winter nog altijd enigszins op in de dekzandruggen in het zuidoosten, maar komt veelal niet meer binnen 1,5 meter onder maaiveld (zie **Figuur 3-21**). In de zomer valt het lokale grondwatersysteem veelal tot op de keileem droog. Lokaal is nog hooguit enkele decimeters water aanwezig boven de keileem, waardoor geen grondwater meer beschikbaar is voor planten en bomen.

Hydrologische herstelmaatregelen, zoals het dempen of opstuwen van sloten, hebben ervoor gezorgd dat tegenwoordig weer langer en meer grondwater wordt vastgehouden in het grondwatersysteem boven de keileem. Hierdoor is de hoogste grondwaterstand gestegen (GHG) en zijn laagten langer nat. In extreem natte jaren, zoals die van 2024, leidde dit tot langdurig hoge grondwaterstanden. Veel bomen zijn daar echter niet op aangepast, ze zijn immers opgegroeid onder aanzienlijk drogere condities. Het gevolg is dat langdurige zuurstofloosheid kan optreden in de wortelzone, waardoor bomen kunnen afsterven. De hydrologische ingrepen hebben geen effect gehad op de waterstanden in het regionale grondwatersysteem (WVP11), waardoor de grondwaterstanden in de zomer nog altijd diep uitzakken. De herstelmaatregelen hebben aldus geleid tot een grotere waterstandsfluctuatie, waardoor het huidige systeem gevoelig is voor klimaatextremen.

De totale calcium-, magnesium- en kaliumconcentraties van het moedermateriaal van de bosbodems zijn niet extreem laag of hoog. Door infiltratie van regenwater en sterk wisselende grondwaterstanden zijn veel van de basische kationen inmiddels uitgespoeld uit de bodem, waardoor de beschikbare concentraties voor planten in dit gebied van nature laag zijn. Doordat de grijze keileem in het gebied tot 2-3 meter ontkalkt is, bevat het lokale grondwater ook geen basische kationen. Vervolgens zijn de bosbodems doorploegd, soms zijn de bodems zelfs tot 80 cm diepte volledig op zijn kop gezet. Plaatselijk zijn hierdoor B-horizonten hoger in het profiel komen te liggen of liggen ze zelfs in maaiveld. Deze inspoelingshorizonten bevatten zeer hoge aluminium- en ijzerconcentraties en zijn zeer zuur, waardoor het toxische aluminium en ijzer vrij kan komen. Op andere plaatsen is juist het moedermateriaal (C-horizont) aan het oppervlak gekomen (zie **Bijlage 4**). Het moedermateriaal heeft weinig bindingsplaatsen (lage CEC) en verzuurt daarom makkelijker. De bosbodems zijn daardoor gevoelig voor verzuring door zwavel- en stikstofdepositie vanaf de jaren 1980 en zuur strooisel afkomstig van aangeplant naaldbos (Buijsman, 2008; Centraal Bureau voor de Statistiek et al., 2024; Scharnweber et al., 2014).

Plaatselijk zullen in het verleden basenrijkere locaties aanwezig zijn geweest, maar deze zijn nu verdwenen. Alle bodems zijn op basis van pH-profielen te typeren als een zuur of zeer zuur infiltratieprofiel en op veel locaties zijn dikke strooiselpakketten aanwezig. De hoeveelheid basische kationen in relatie tot de zure anionen (basenverzadiging) is overal zeer laag. Vrijwel alle bodemonsters hebben een basenverzadiging van onder de 20% en enkele zelfs onder de 7%. Een basenverzadiging lager dan 7% is zelfs voor zure Berken-Eikenbossen ongunstig (Wellbrock & Bolte, 2019). Onder naaldbos is daarnaast een significant lagere basenverzadiging gevonden dan onder loofbos. De Al/Ca-ratio heeft slechts in twee locaties een waarde onder de 5,0. Een waarde boven de 5,0 betekent 100% kans op negatieve effecten op boomgroei (Cronan & Grigal, 1995). Lage terreindelen bezitten gemiddeld iets meer organische stof in de 0-40 cm bodem en bevatten daardoor meer bindingsplaatsen (CEC). Toch zijn deze bindingsplaatsen, nog meer dan in de hoge delen, opgevuld met het toxische aluminium.

Naast verzuring en daaraan gekoppelde aluminiumtoxiciteit, vormt ammoniumtoxiciteit in de bosbodems waarschijnlijk een knelpunt. De dominante vorm van stikstof is ammonium. Dit is logisch aangezien onder de aangetroffen zure omstandigheden geen nitrificatie meer plaatsvindt (Bobbink et al., 2017). De ammoniumconcentraties zijn absoluut gezien niet extreem hoog omdat strooisel onder de huidige zure omstandigheden niet (snel) worden afgebroken. Ammoniumconcentraties zijn wel significant hoger in loofbos dan naaldbos. Dit valt te verklaren door een hogere mineralisatie van strooisel/ organische stof onder loofbomen, waarbij meer ammonium wordt geproduceerd. Organische stof kan hier makkelijker worden afgebroken doordat bosbodems onder loofbos een hogere basenverzadiging en lagere Al/Ca-ratio hebben. De totale hoeveelheden fosfaat in het moedermateriaal en fosfaatconcentraties in de toplaag zijn in vergelijking met andere bosbodems laag, waardoor wordt verwacht dat ook fosfaat deels limiterend is voor de groei van bomen en ondergroei in Slotplaats Bakkeveen.



Figuur 3-21. Dwarsdoorsnede van noord naar zuid in Slotplaats Bakkeveen. De doorsnede geeft de huidige situatie weer. In de doorsnede is data van eigen bodemboringen, peilbuizen en de diepere geologische opbouw op basis van Geotop v1.6.1 gebruikt. Slootdiepten, diepte van het veen en verspreiding van verkitte podzol B-horizonten zijn geïnterpreteerd.

3.6 Knelpunten, advies en maatregelen Slotplaats Bakkeveen

Uit de synthese komen een aantal hydrologische knelpunten en knelpunten met betrekking tot de bodembuffering naar voren. Deze worden hieronder kort toegelicht.

3.6.1 Knelpunten

3.6.1.1 Hydrologie in het noorden

Het huidige hydrologische systeem in Slotplaats Bakkeveen bezit een aantal eigenschappen die het bomen moeilijk maakt. Voornamelijk in het lagere noorden (boring 7 t/m 15) is een uitzonderlijke weerbaarheid van het boomwortelstelsel gevraagd. In droge jaren valt het lokale grondwatersysteem boven de keileem snel droog en is er geen grondwater meer aanwezig. Bomen investeren dan in hun wortelstelsel en proberen zo diep mogelijk op zoek te gaan naar water. In de doorploegde bodems zullen veel boomwortels zich in diepere organische lagen vestigen (zie **Bijlage 4**). In natte jaren komen deze diepe wortels langdurig onder water te staan waardoor ze een groot risico lopen op zuurstofgebrek (Olsthoorn et al., 2001).

De uitgevoerde hydrologische herstelmaatregelen hebben ervoor gezorgd dat het grondwater boven de keileem langer wordt vasthouden in het noorden (WVPI) en er meer grondwater opgeslagen kan worden in lokale dekzandruggen. Toch daalt de grondwaterstand in de zomer in het noorden elk jaar tot het onveranderde regionale grondwatersysteem onder de keileem (WVPII) en valt het lokale systeem boven de keileem volledig droog. De maatregelen hebben in eerste instantie dus vooral gezorgd voor een toename in waterstandsfluctuaties. De nog altijd lage GLG vormt een belangrijk knelpunt.

3.6.1.2 Bodemverzuring + boomsoorten

In de bosbodems zijn onder invloed van verzuring door depositie van zwavel en stikstof en aanplant van naaldbomen veel basische kationen uitgespoeld met het infiltrerende regenwater. Tegenwoordig bevinden deze bodem zich niet meer in het kationenuitwisselingcomplex, maar is aluminium de bodem gaan bufferen. Hierbij komt vrije aluminium vrij, wat zorgt voor aluminiumtoxiciteit in de bosbodems. Bovendien vindt er onder dergelijk zure condities weinig afbraak plaats van strooisel waardoor dit zich ophoopt tot dikke strooiselpakketten. Er komen vanuit de strooisellaag weinig voedingstoffen direct beschikbaar voor kruiden, struiken en bomen. Ook vindt weinig nitrificatie plaats, waardoor het toxische ammonium de dominante vorm van stikstof is. Dit zorgt ervoor dat voornamelijk in naaldhoutopstanden weinig ondergroei aanwezig is.

3.6.2 Advies

Het advies is als volgt opbouwt:

- 1) Hydrologisch herstel
- 2) Herstellen bodembuffering/ bestrijden bodemverzuring
- 3) Bosomvorming naar bomen die aansluiten op standplaatscondities in het systeem

3.6.2.1 Hydrologisch herstel

Hoewel al diverse herstelmaatregelen zijn uitgevoerd, liggen er binnen het gebied nog voldoende kansen om het systeem verder te optimaliseren. Zo worden in 2025 verschillende sloten en greppels gedempt om interne ontwatering tegen te gaan. Toch zal het lokale grondwatersysteem boven de keileem (WVPI) blijven droogvallen. De GLG wordt namelijk in belangrijke mate bepaald door de zomergrondwaterstanden in het regionale grondwatersysteem onder de keileem. Om stabielere condities te creëren en de uitgevoerde herstelmaatregelen volledig tot hun recht te laten komen, is een verhoging van de laagste grondwaterstand (GLG) in het regionale grondwatersysteem (WVP II) noodzakelijk.

Hoe de GLG in WVP II precies verhoogd kan worden valt buiten de scope van dit onderzoek. Echter, aangezien WVPI en WVP II in de met dekzand opgevulde smeltwatergeul van het Koningsdiep/ Alldijp samenkomen, zal de beek waarschijnlijk een belangrijke rol vervullen. Er moet worden onderzocht of maatregelen als het verondiepen van de beekbodem voor een verhoging van de GLG kan zorgen. Het liefst gebeurt het verhogen van de (laagste) grondwaterstand stapsgewijs om grootschalige boomsterfte te voorkomen.

3.6.2.2 Herstellen bodembuffering/ bestrijden bodemverzuring

Om de basenverzadiging in het gebied te verbeteren en aluminium- en ammoniumtoxiciteit te verminderen adviseren we bufferstoffen toe te dienen. Kalk (dolokal) wordt afgeraden omdat hiermee de kans op verzuiging te groot is, net als de kans op het ontwikkelen van onnatuurlijk rijke omstandigheden op de van nature relatief uitgeloogde veldpodzolgronden.

Een betere manier om de veldpodzolen terug te brengen naar een natuurlijkere basenverzadiging is door het toedienen van steenmeel. Het toepassen van steenmeel is maatwerk. In Slotplaats Bakkeveen zijn veel delen aanwezig met een relatief hoog organisch stofgehalte met daardoor veel bindingsplaatsen (hogere CEC), maar die zijn voor een zeer groot deel met aluminium opgevuld. De basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), hebben lage waarden en ook zijn de fosfaatconcentraties lager dan gemiddeld. Om op deze locaties weer tot een betere basenverzadiging en Al/Ca ratio te komen en fosfaat-limitaties op te heffen adviseren we Biolit met een doses van 10 ton/ha. Dit steenmeel-type is relatief reactief en bezit zowel silicaatmineralen als 5-10% magnesium-calciumcarbonaten en een beetje fosfaat (P), waardoor de basenverzadiging sneller dan met Soilfeed of Eifelgold omhoog kan worden gebracht (Weijters et al., 2023).

Echter brengt het toepassen van dit steenmeeltype ook een risico met zich mee. Een snelle verhoging van de basenverzadiging en het opheffen van een fosfaat-limitatie zorgt voor een snelle verhoging van het aantal basische kationen en stikstof wat voor verzuiging kan zorgen. Het helpt niet mee dat in de doorploegde bodem veel variatie aanwezig is. Op sommige locaties is het moedermateriaal omhoog geploegd en ontbreken humushorizonten (**Bijlage 4**). Op deze plekken bevast de top van de bosbodem nauwelijks organische stof, waardoor de bosbodem hier relatief weinig bindingsplekken beschikbaar heeft (lagere CEC). Op deze locaties zijn de beschikbare bindingsplekken snel met basische kationen gevuld, waarna de vrijkomende bufferstoffen uit de steenmeel zorgen voor een sterke verhoging van de bodem-pH en een snellere omzetting. Daardoor zal eerder verzuiging optreden dan locaties met meer organische stof en daardoor dus meer bindingsplaatsen.

Daarom adviseren we om voor nu alleen Biolit met een doses van 10 ton/ha toe te voegen in de naalddhoutopstanden die naar loofbos moeten worden omgevormd. Prioriteit zou moeten liggen bij Fijnsparopstanden, omdat Fijnspar waarschijnlijk als één van de eerste soorten grotendeels uit Nederland verdwijnt door klimaatverandering (Nyssen et al., 2023). Daarna hebben naalddhoutopstanden in de centrale slenk in het projectgebied voorrang zodat het natuurlijke systeem weer kan worden accentueren. Het is hierbij wel van belang dat afgesloten schijnspiegellaagten, die op een verkitte podzol B-horizont liggen, worden uitgesloten van steenmeel om onnatuurlijk gebufferde omstandigheden in deze laagten te voorkomen. Vervolgens kan steenmeel worden toegepast in naalddhoutopstanden met de laagste basenverzadiging en hoogste Al/Ca ratio's (**Figuur 3-22**).

Alhoewel het cultuurhistorisch productiebos zoveel mogelijk wordt uitgesloten van maatregelen zijn hierin wel de laagste basenverzadigingen gevonden. Als de boomvitaliteit in deze percelen te ver achteruitgaat en verjonging slecht op gang komt, kan steenmeel worden toegediend voor behoud van het bos. Het is niet verstandig om steenmeel vlakdekkend in het gebied te gebruiken omdat niet alle (negatieve) effecten bekend zijn. Het advies is om steenmeel kleinschalig toe te passen en te werken op opstandniveau.

3.6.2.3 Bosomvorming

Soorten

Door de relatief hoge organische stofgehalten en matig fijne korrelgrootte van het zand, behoren de aangetroffen bossen niet tot de meest arme bossen. Echter verwachten we niet dat op de van nature relatief uitgeoogde veldpodzolgronden boomsoorten van rijke omstandigheden kunnen groeien (zoals Winterlinde, Zoete kers, Haagbeuk). De verwachting is dat voornamelijk de zogeheten "kwartiermakers" goed zullen groeien. Dit zijn Ruwe Berk, Ratelpopulier, Lijsterbes en Sporkehout. Dit zijn pioniersoorten met relatief goed afbreekbaar strooisel, waardoor basische kationen snel opnieuw beschikbaar in de bodem kunnen komen en daardoor bijdragen aan een betere bodembuffering (De Bosgroepen, 2023) (**Tabel 3-1**).

In het nattere noorden van het gebied (zie **Figuur 3-22** voor locaties) kunnen enkele andere soorten groeien. Vanwege de nattere omstandigheden, in combinatie met lemige zandlagen boven de keileem, verwachten we dat Zachte berk, Boswilg, Grauwe wilg en/ of Geoorde wilg, Hazelaar en Gelderse roos hier kunnen groeien. Geoorde wilg en Gelderse roos zijn net buiten het projectgebied ook als autochtone struik gevonden (Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, z.d.). Dit zijn ook soorten die relatief goed bestand zijn tegen vernattingsmaatregelen. Aanvullende soorten voor het hogere zuiden zijn Zomereik en Tamme kastanje.

Werkwijze bosomvorming

Het advies is om in te zetten op een geleidelijk omvormbeheer van naaldbos naar loofbos door open gaten te maken in naaldbosopstanden. De prioriteit ligt in de opstanden waar we ook Biolit adviseren. Hier kunnen gaten van één of twee keer de boomhoogte worden gemaakt, waardoor meer licht op de bodem kan vallen in de nu vaak donkere naalddhoutopstanden.

De hiervoor beschreven (pionier)soorten zullen het best kiemen op een kale bodem. Het is een terugkerend dilemma of de strooiselpakketten uit naalddhoutopstanden moeten worden

weggehaald of niet. Wanneer het volledige strooiselpakket weggehaald wordt, zullen veel (nog niet voor planten beschikbare) voedingstoffen uit het systeem verdwijnen en verarmt het bos verder. Bij het laten liggen van dikke strooiselpakketten, zal minder kieming optreden, zeker wanneer op die locatie geen steenmeel wordt toegevoegd. Ook kan er in de toekomst nog veel zuur vrijkomen bij de afbraak van zure naalden. Om de aanwezige voedingstoffen in het bos te houden, maar wel een betere uitgangssituatie te creëren voor nieuwe boom- en struiksoorten, adviseren we om de onderste centimeters van de strooisellaag te laten liggen. Het bovenste deel, wat vooral bestaat uit grover strooisel, wordt dan afgevoerd. De onderkant van de strooisellaag (FH-horizont) blijft liggen omdat in deze horizont vaak nog veel voor planten beschikbare basische kationen aanwezig zijn, vaak meer dan in de top laag van de bodem. Op deze bodem kan steenmeel worden toegediend.

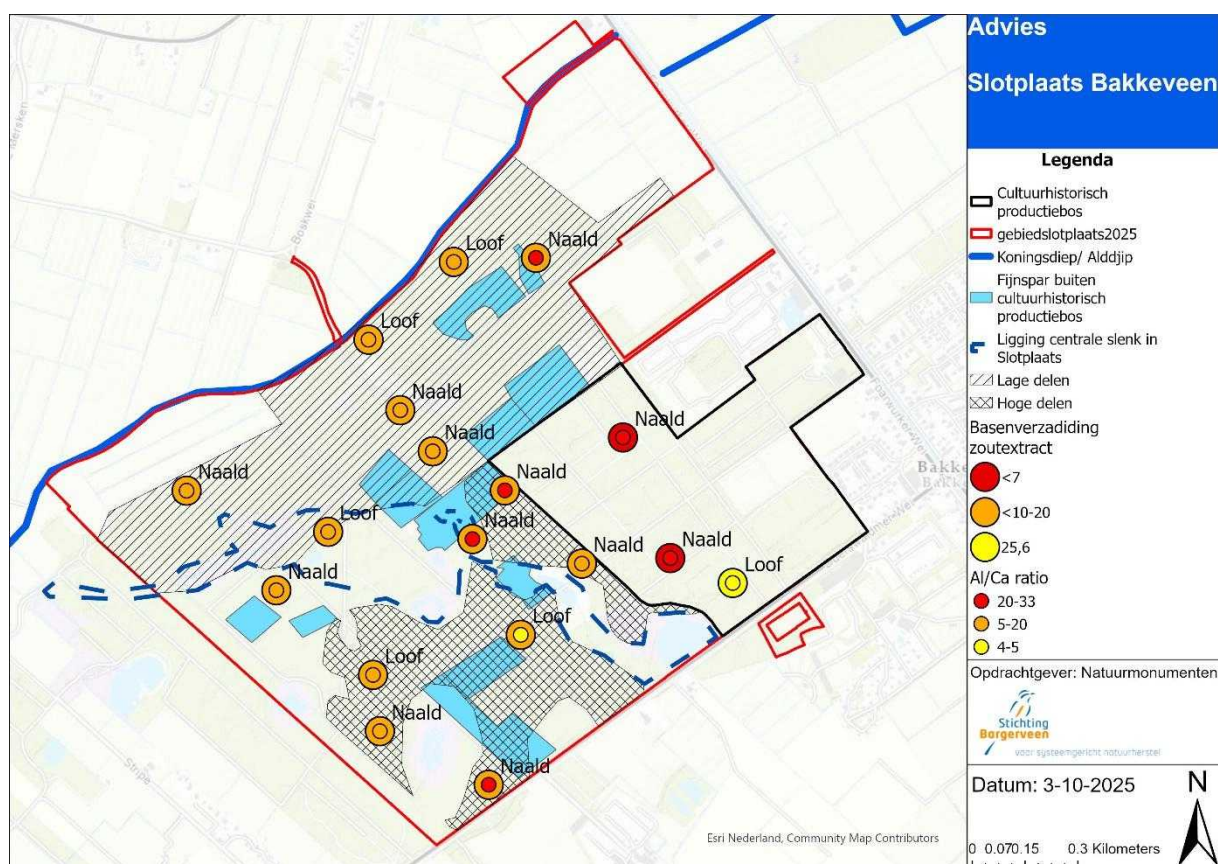
Het is op basis van de huidige kennis lastig te voorspellen of hiermee overal de juiste loofboomsoorten zullen kiemen. Mogelijk kiemen loofbomen makkelijker op een kale bodem. Daarom adviseren we op enkele locaties de bodem te bewerken met een bosfrees voordat steenmeel wordt toegediend. Een diepte van vijf centimeter plus de strooisellaag is voldoende. Monitoring van deze opstanden zal binnen enkele jaren laten zien waar de beste verjonging plaatsvindt. Monitoring van de open gaten is ook nodig om verjonging van naaldbomen op tijd te signaleren. Beheer hierop kan nodig zijn om loofbomen ruimte te geven. Afhankelijk van de wilddruk kan het aanbrengen van een raster rondom de verjongingsgaten noodzakelijk zijn.

Door deze werkwijze zal weinig aanplant nodig zijn. Aanplant van Ratelpopulier is echter gewenst vanwege trage verjonging in open gaten in bossen, waarschijnlijk omdat de soort zeer veel licht nodig heeft voor de kieming. Verder zouden Hazelaar en Gelderse roos in de lagere delen kunnen worden aangeplant, net als Tamme kastanje in de hogere delen, vanwege het vrijwel ontbreken van de soorten nu. Bij de aanplant is het van belang in ieder geval vijf individuen naast elkaar aan te planten om de kans te vergroten dat er één van de vijf bomen later als zaadboom/-struik gaat functioneren. Bij aanplant is het ook van belang voor autochtone exemplaren te kiezen en wildbescherming aan te brengen.

Tabel 3-1. Inheemse boomsoorten en struiken (die tenminste 2000 jaar in Nederland zijn) die in de toekomst geschikt worden geacht te groeien in Slotplaats Bakkeveen en waarvan het strooisel (relatief) makkelijk wordt afgebroken. Hierbij is rekening gehouden met toekomstige vernattingsmaatregelen en klimaatverandering (zie voor toelichting over soorten zie De Bosgroepen (2023) en Nyssen et al. (2023).

Standplaats	Boomsoorten	Struiken
Hoogste delen in het drogere zuiden	Zomereik (<i>Quercus robur</i>)	
	Tamme kastanje (<i>Castanea sativa</i>)	
Hogere tot lagere delen: kunnen door het hele gebied staan	Ruwe berk (<i>Betula pendula</i>)	Sporkehout (<i>Frangula alnus</i>)
	Ratelpopulier (<i>Populus tremula</i>)	Wilde lijsterbes (<i>Sorbus aucuparia</i>)

Lagere en nattere noorden	Zachte berk (<i>Betula pubescens</i>)	Hazelaar (<i>Corylus avellana</i>)
	Boswilg (<i>Salix caprea</i>)	Gelderse roos (<i>Viburnum opulus</i>)
	Geoorde wilg (<i>Salix aurita</i>) en of Grauwe wilg (<i>Salix cinerea</i>)	

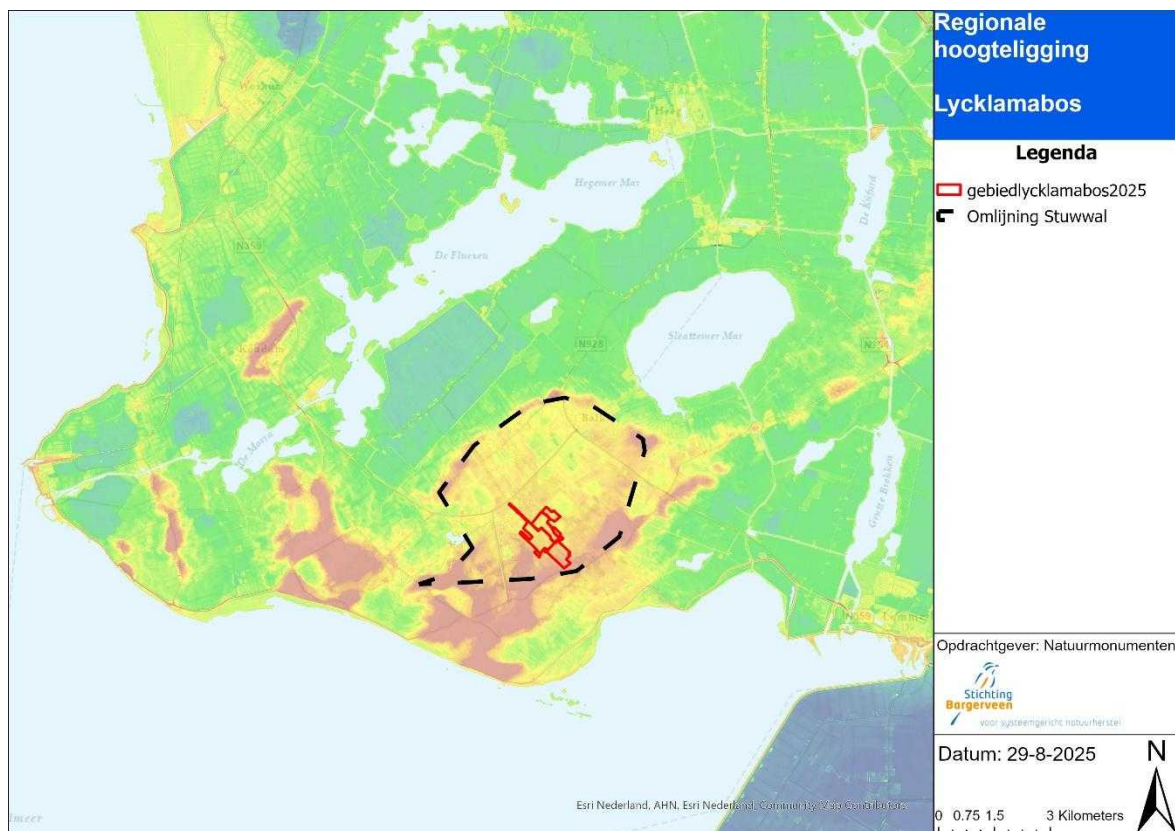


Figuur 3-22. De prioriteit bij bosomvorming ligt ten eerste bij de Fijnspar opstanden (lichtblauw). Vervolgens is het goed om naaldhoutopstanden binnen de centrale slenk in het gebied (donkerblauwe stippellijnen) om te vormen. Daarna kan worden gekeken naar de naaldhoutopstanden met de laagste basenverzadiging en hoogste Al/Ca ratio. Verschillende boom- en struiksoorten worden geadviseerd voor hoge en lage delen in het gebied (**Tabel 3-1**). De opstanden binnen het cultuurhistorisch productiebos worden niet omgevormd, maar kunnen interessant zijn voor steenmeel toediening gezien hier de laagste basenverzadigingen zijn gevonden.

4 Lycklamabos

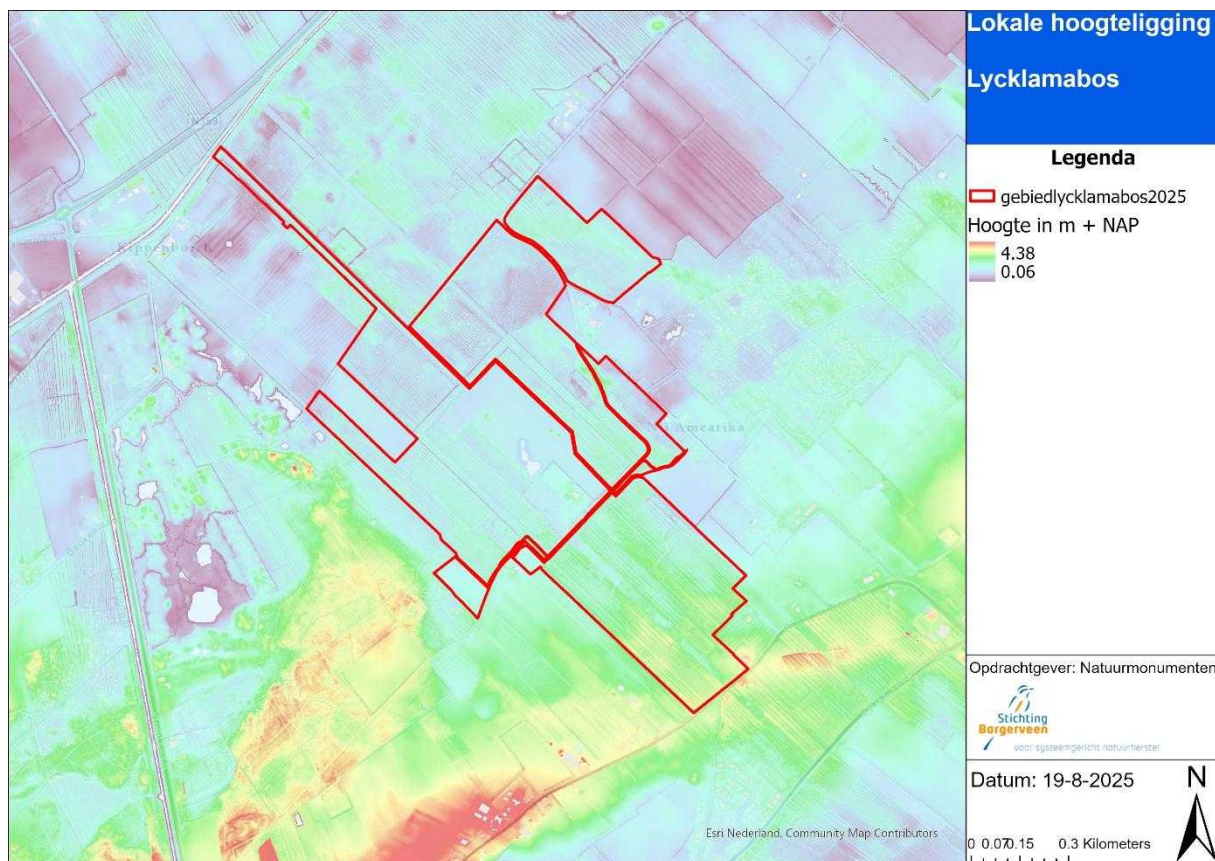
4.1 Hoogte en reliëf

Gaasterland ligt regionaal beschouwd op een reeks lage stuwwallen die zich van Texel tot Coevorden uitstrekken. Het Lycklamabos ligt midden op de stuwwal van Gaasterland die een kom vormt rondom het Lycklamabos. In tegenstelling tot de vlakke en laaggelegen omgeving is het reliëf op de stuwwal glooiend met hoge zandkoppen (ook wel “gaasten” genoemd) tot 12,70 m + NAP nabij Oudemirdum (roodbruine kleur), terwijl andere delen van de stuwwal onder zeeniveau liggen (blauwe kleur) (Koster, 2015) (**Figuur 4-1**).



Figuur 4-1. Regionale hoogtekaart van de omgeving van het Lycklamabos. De donkerbruine kleur laat hoogten tot 12,70 m + NAP zien. De lichtgroene kleur laat hoogten van 2-1 m onder NAP zien en de donkerblauwe kleur hoogten tot 4 m onder NAP.

Op de lokale hoogtekaart zijn relatief grote hoogteverschillen aanwezig in het Lycklamabos. Binnen een straal van twee kilometer liggen gaasten die tot 7 m +NAP rijken, voornamelijk ten zuidoosten- en zuidwesten van het projectgebied. Binnen enkele honderden meters van het projectgebied zijn de gaasten niet hoger dan 5 m + NAP. In het zuiden van het projectgebied is nog één uitloper van een gaast zichtbaar met 4 m + NAP (Figuur 4-2), terwijl de kommen ten noordoosten van het projectgebied op 0,5 m + NAP liggen. Op nog kleinere schaal zorgen rabatstructuren voor hoogteverschillen. Deze zijn vrijwel in het hele gebied nog zichtbaar, maar voornamelijk in het centrum en noordelijke deel van het gebied. De rabatten zijn diep (in de natste delen geregeld rond 130 cm) en liggen vaak binnen enkele meters van elkaar.



Figuur 4-2. Lokale hoogtekaart van het Lycklamabos (PDOK, 2023).

4.2 De diepere ondergrond

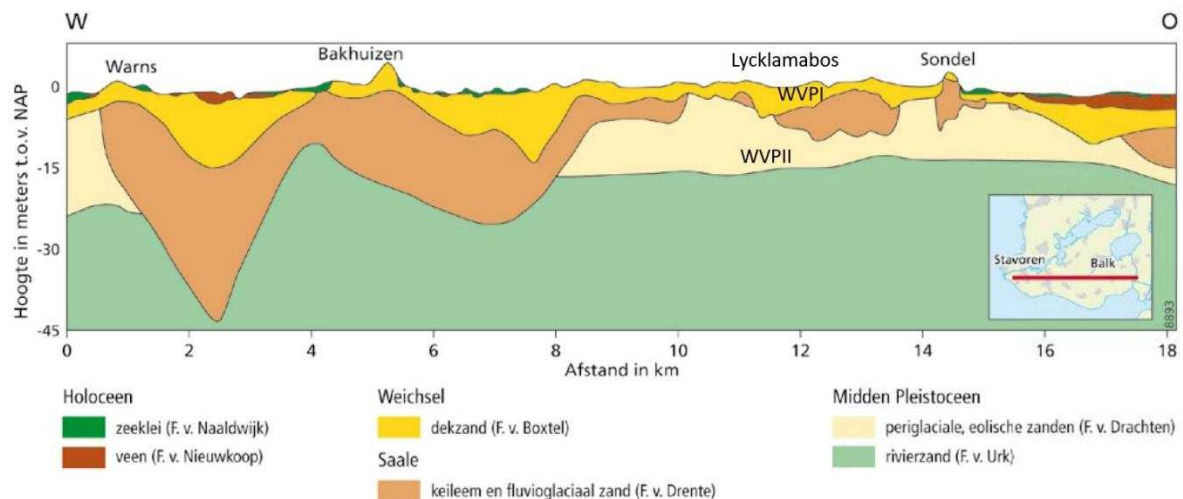
4.2.1 Geogenese en geohydrologische doorsnede

De formatie van Breda vormt de geohydrologische basis en ligt op 240 meter onder NAP. Over een tijdsperiode van miljoenen jaren is hierop in verschillende fasen voornamelijk zand afgezet. Hierdoor is een zandpakket van zo'n 200 meter dik ontstaan. Dit gehele zandpakket vormt watervoerend pakket II (WVPII). De bovenste afzetting zijn overwegend grove rivierzanden van de Formaties van Urk. Deze formatie is zichtbaar van -45 tot -15 meter onder maaiveld in **Figuur 4-3**. Hierop ligt een 5 tot 20 meter dik pakket kalkloze zanden van de Formatie van Drachten. Dit pakket bestaat uit matig fijn tot matig grof zand.

Twee ijstijden hebben daarna het landschap gevormd. In het Saalien (240 000 tot 130 000 jaar geleden) is het gebied bedekt geraakt met een dik pakket landijs en is het zeer slecht doorlatende keileem afgezet (Formatie van Drente, Laagpakket van Gieter). In dit gebied is grijze keileem afgezet die nu tot een diepte van 2-3 meter ontkalkt is (Koster, 2015).

Na een korte warme periode volgde weer een koude periode in het Weichselien (115.000 tot 11.650 jaar geleden). Het keileemlandschap is toen versneden geraakt door smeltwater. In deze periode is een laag dekzand afgezet boven op de keileem en in smeltwatergeulen. Het dekzand is onderdeel van de Formatie van Boxtel en vormt WVPI. Ouder dekzand met de afwisseling tussen zand en lemige laagjes wordt zelden gevonden in en rondom het projectgebied, bijna altijd gaat het om Jonger Dekzand-I, dat plaatselijk weer is verstoven (Koster, 2015).

In het Holoceen (11.650 tot heden) werd het klimaat natter en warmer en werd onder invloed van een stijgende zeespiegelstanden veen gevormd rondom het gebied. Echter zorgde overstromingen van de zee periodiek voor sterke afslag van veen en keileem. Vanaf het begin van de jaartelling tot de veertiende eeuw nam de invloed van de zee toe waardoor ten noorden van het gebied een binnenzee werd gevormd. Meren zoals de Fluessen, zijn hier vermoedelijk door ontstaan, al dan niet in combinatie met veenwinning. Sinds de aanleg van dijken in de dertiende en veertiende eeuw nam de invloed van de zee af (Koster, 2015). Vanaf die tijd is veen in de omgeving kleinschalig gewonnen, maar vanaf de 17^e eeuw grootschalig (Makaske et al., 2015).

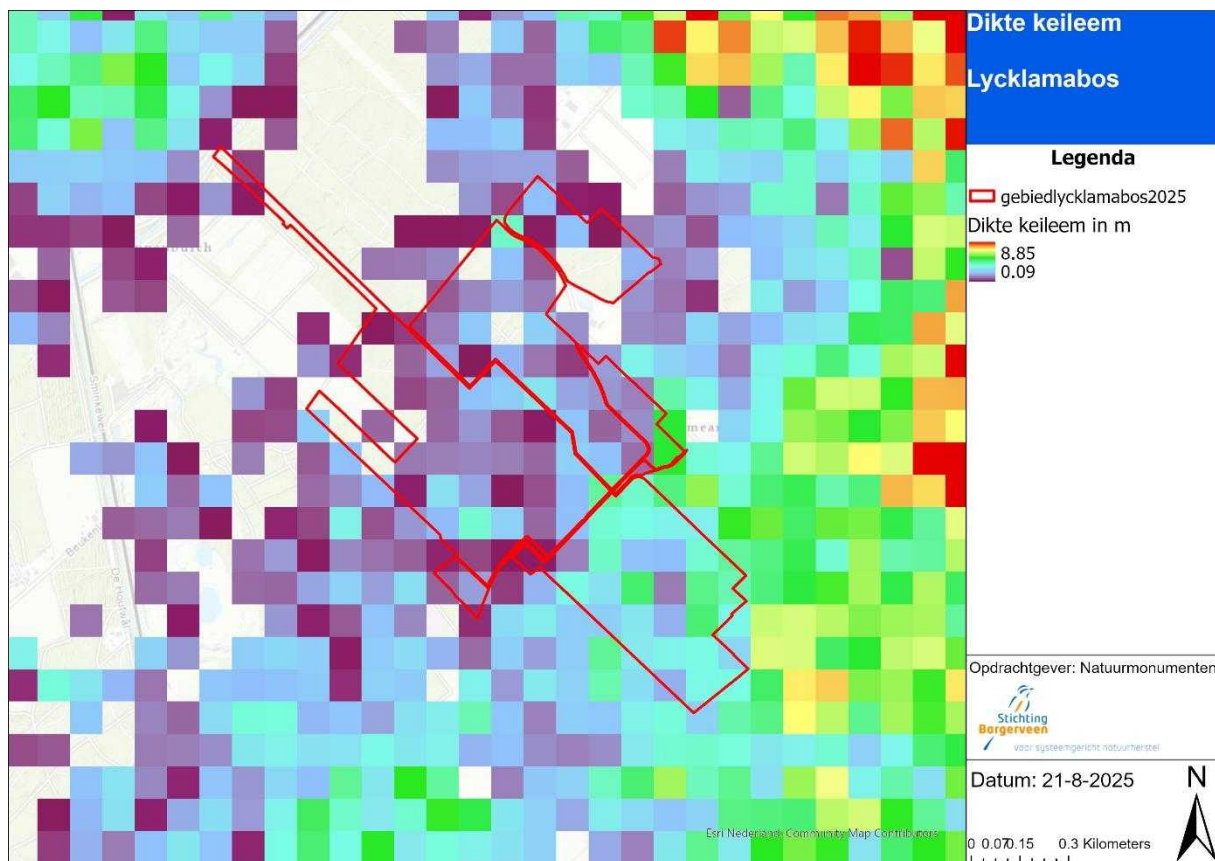


Figuur 4-3. Geohydrologische dwarsdoorsnede van het onderzoeksgebied en omgeving tot 45 meter diepte. De afbeelding is aangepast overgenomen van Koster (2015).

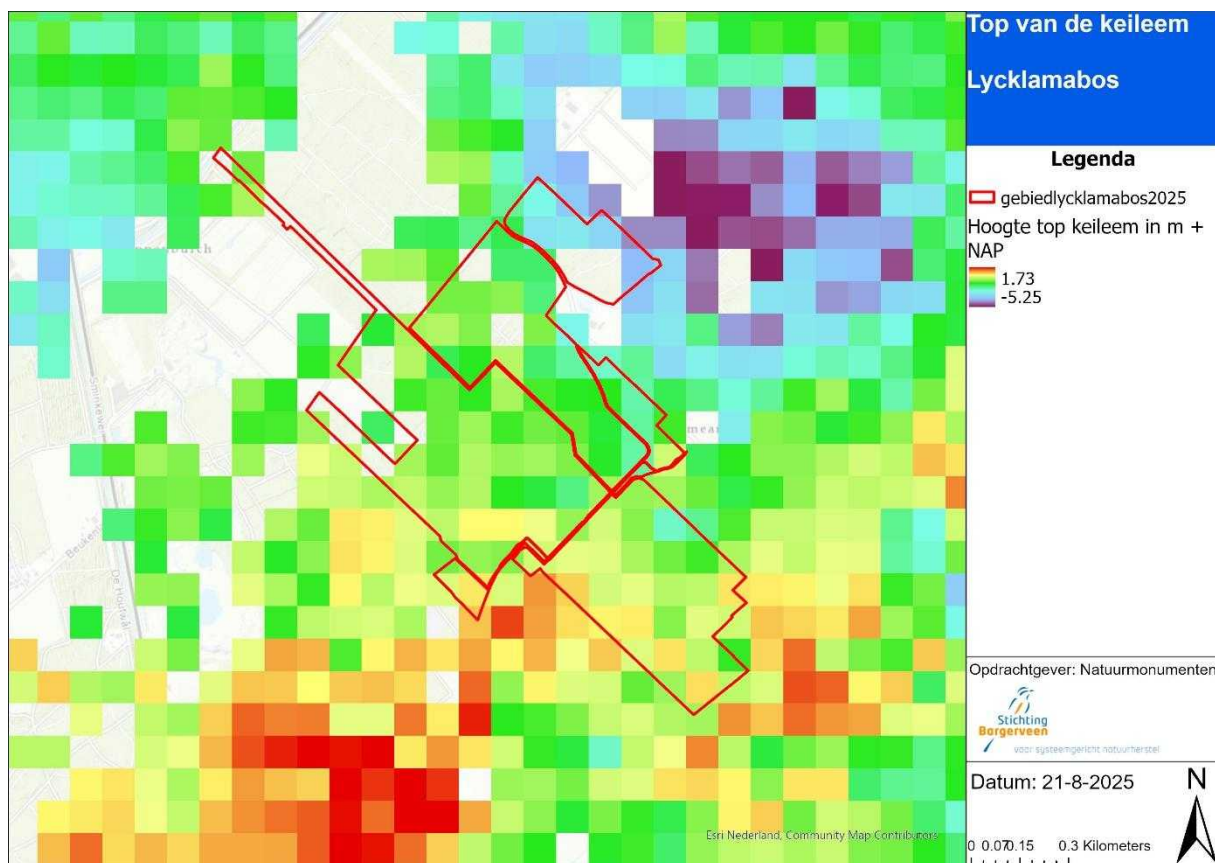
4.2.2 Keileem

Keileem vormt de scheiding tussen WVPI en WVPII en is daarom zeer belangrijk voor de lokale hydrologie in het gebied. Het model Geotop v1.6.1 geeft een verspreiding en dikte van de keileem weer (**Figuur 4-4** en **Figuur 4-5**) (TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-b).

Onder een deel van het gebied ligt keileem, maar plaatselijk ontbreekt de keileem of is de keileem zeer dun. Dit is voornamelijk in het noorden het geval met dikten tot 0,5 meter. Echter zijn er verschillende boringen in het noorden van het gebied binnen Dinoloket waarin geen keileem aanwezig is, terwijl die volgens Geotop V1.6.1 wel aanwezig zouden zijn (TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-a). Het lijkt er dus op dat in het noorden van het gebied een mozaïek aanwezig is van plekken waar de keileem dun is en plaatselijk ontbreekt. In het zuiden van het gebied liggen aanzienlijk dikkere keileemlagen (tot 4 m) volgens Geotop V1.6.1. Ook ligt de bovenkant van de keileem in het zuiden (0,5 m + NAP) ongeveer 2 meter hoger dan in het noorden (-1,5 m + NAP).



Figuur 4-4. Keileemverspreiding en hoogte in m + NAP in het onderzoeksgebied op basis van Geotop V1.6.1 (TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-b).

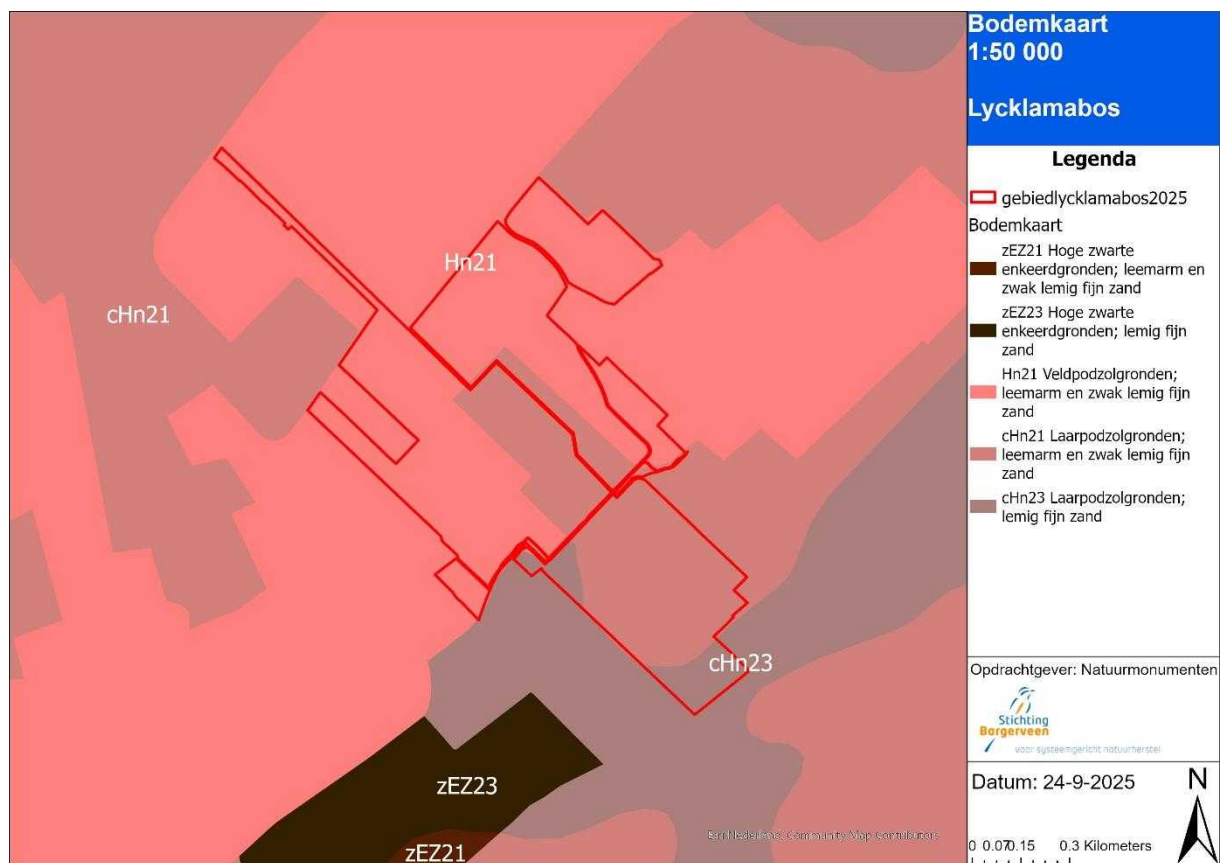


Figuur 4-5. Keileemdikte in m op basis van Geotop v1.6.1 (TNO Geologische Dienst Nederland, z.d.-b).

4.3 Bodem

4.3.1 Bodemtypen

De 1:50 000 bodemkaart geeft aan dat vrijwel het gehele projectgebied bestaat uit een veldpodzolgrond (Hn21) (**Figuur 4-6**). Veldpodzolgronden ontstaan onder invloed van infiltratie van regenwater en wissel natte condities, waardoor een loodgrijze uitspoelingshorizont (E) en vaak dikke donkerbruine inspoelingshorizont (B) ontstaat. Verder zijn hydromorfe kenmerken (gley-/ roestverschijnselen) in deze bodems tot hoog in het profiel aanwezig. Andere delen van het projectgebied bestaan uit laarpodzolgronden (cHn21 of cHn23). Dit zijn veldpodzolgronden waar grond is opgebracht (cultuurdek), waardoor een dikke humuslaag (A) boven op de E-horizont aanwezig is. Net buiten het projectgebied zijn enkeerdgronden (zEZ23) aanwezig. De ligging in het landschap doet vermoeden dat hier oorspronkelijk ook veldpodzolen zijn ontstaan, maar meer zijn opgehoogd dan de laarpodzolgronden, waardoor ze een aanzienlijk dikker cultuurdek hebben gekregen. De aanwezigheid van een cultuurdek of enkeerdgrond is vrijwel altijd het resultaat van opgebrachte plaggen met schapenmest (podstalsysteem) (Ten Cate et al., 1995; Jongmans et al., 2015).



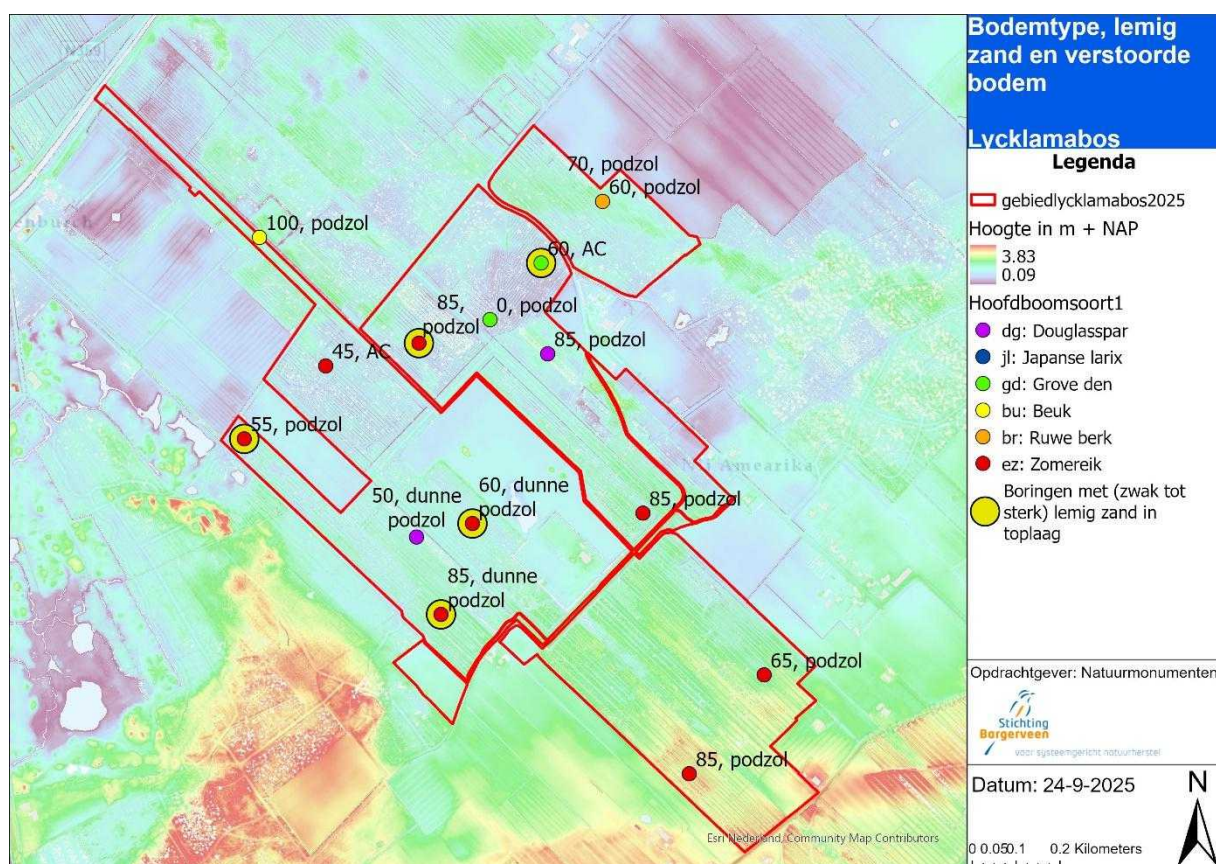
Figuur 4-6. Bodemkaart 1: 50 000 (Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit, 2023).

De eigen bodemboringen geven nieuwe inzichten op de 1: 50 000 bodemkaart. Opvallend is dat niet door het hele projectgebied heen veldpodzolgronden aanwezig zijn, maar in kommen AC (grondwaterafhankelijke bodems) zijn ontwikkeld. Op andere locaties is een zeer dunne podzol aanwezig. Vaak hebben deze bodems (zwak tot sterk) lemig zand in de toplaag van de bodem zitten. Dit materiaal heeft een fijnere korrelgrootte dan de keileem die dieper

in het profiel is gevonden. Over het algemeen bestaan de leemarme zanden in het gebied uit matig fijn zand (150-210 µm).

Verder is de toplaag van de bodem, op één locatie na, overal is doorploegd. Hierdoor is het bodemprofiel soms in zijn geheel op zijn kop gezet (zie **Bijlage 4**). In **Figuur 4-7** staat aangegeven hoe diep de toplaag is doorgeploegd en of er nog restanten van de podzol terug te vinden zijn. Hoewel een veldpodzol in systemen als deze vaak een verkitte en slecht doorlatende podzol B-horizont kan hebben (zie **Bijlage 1** voor toelichting op ontstaan verkitte B-horizonten), zal deze laag nu niet meer als slecht doorlatend functioneren.

Daarnaast lijkt bij verschillende boringen ook opgebrachte grond aanwezig. Dit is te zien aan de grote hoeveelheid organische stof aanwezig die vaak aanwezig is tot de onderkant van het verstoorde profiel. Echter is niet met zekerheid te zeggen hoeveel grond is opgebracht omdat de bodems doorploegd zijn.



Figuur 4-7. Opvallende bodemeigenschappen op basis van eigen uitgevoerde boringen die een aanvulling zijn op de verfijnde bodemkaart 1: 50 000 van **Figuur 4-6**. De cijfers staan voor de diepte van de omgeploegde bodem, gevolgd door het bodemtype (AC: grondwatergevoed, podzol: veldpodzol, laterale waterstroming). De leemverspreiding is nu in komen ingetekend, of dit overal zo is, is onduidelijk.

Op veel plekken zijn enorm dikke strooisellagen aanwezig boven op de bodem. De strooisellaag is met uitzondering van boring 25, 27 en 33 overal dikker dan 8 cm. Bij meer dan de helft van alle boringen is de strooisellaag dikker dan 12 cm.

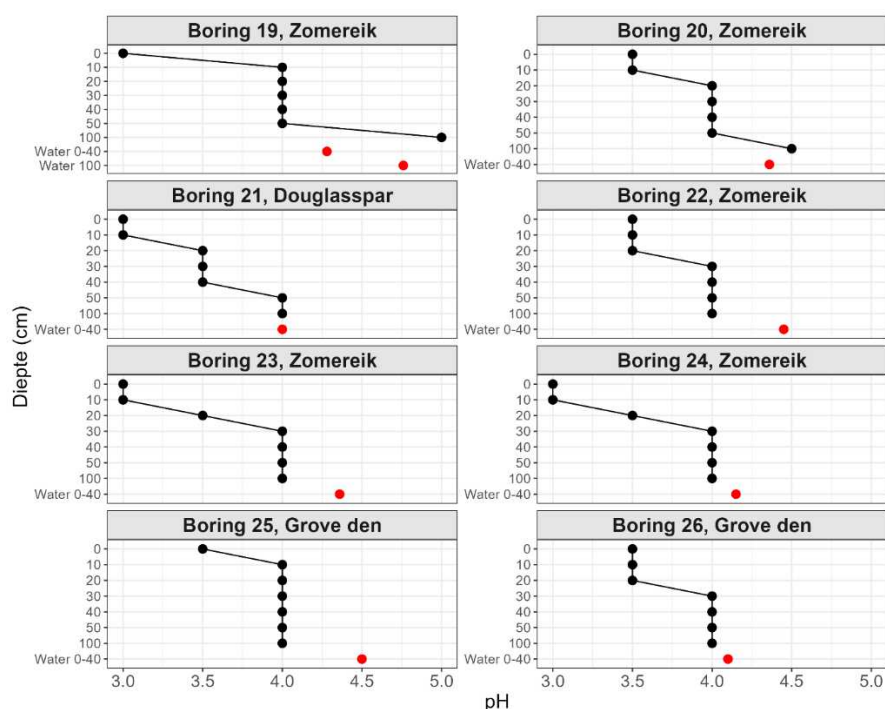
4.3.2 Zuurstatus van de bodem

4.3.2.1 pH en pH-profielen en vegetatie

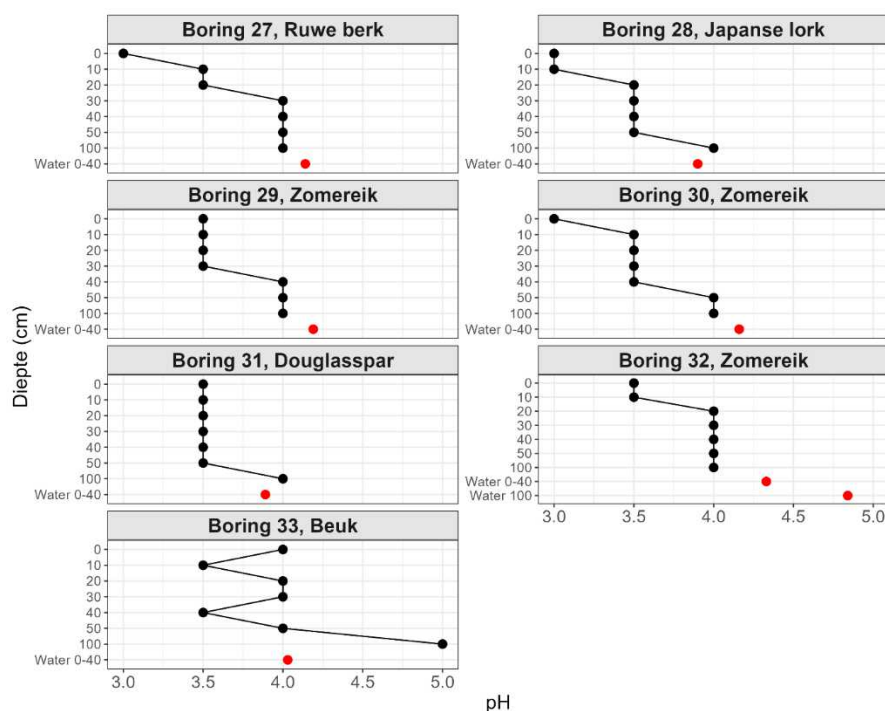
In elke grondboring is een pH-profiel gemaakt van de bodem met pH-papierjes (**Figuur 4-8** en **Figuur 4-9**). Alhoewel deze papierjes indicatief zijn laten ze wel de grote patronen zien. De bodem op basis van pH-veld is te bestempelen als "Zuur infiltratieprofiel" of zelfs "Zeer zuur infiltratieprofiel". De profielen hebben in de bovenste 40 cm vaak een pH-Veld van 3,0 of 3,5 (pH-water <4,5), wat te typeren is als zuur. Echter wordt ook op verschillende locaties binnen 40 cm een pH-Veld van 4,0 gevonden, wat vergelijkbaar is met pH-water 4,5-5. Dit is slechts matig zuur (Van Delft et al., 2024). Daarnaast valt op dat er redelijk veel variatie zit in bodem-pH in de diepte, dit is logisch gezien de verstoorde bodem in het gebied (**Figuur 4-7**).

Opvallend is dat pH-Veld op 50 en 100 cm diepte bijna overal een pH-waarde heeft van 4,0 of 4,5. Dit is matig zuur en te vergelijken met een pH-water van 4,5-5,5 (Van Delft et al., 2024). Ook de pH-water metingen van de bodemonsters op 100 cm diepte laten een pH-Veld zien tussen de 4,5 en 5,0.

Er zijn geen significante verschillen gevonden tussen naald- en loofbos (**Bijlage 2**). Wel is een significant verschil gevonden in pH-zout ($p = 0.0274$) en pH-Water in de 0-40 cm bodem ($p = 0.0007$), waarbij de pH significant hoger ligt in het Lycklamabos ten opzichte van Slotplaats Bakeveen. Dit gaat om relatief kleine verschillen: de pH ligt respectievelijk 0.2 en 0.25 pH eenheden hoger.



Figuur 4-8. Deel 1 van de pH-profielen op basis van pH-veld (pH-papierjes), geschat op 0,5 nauwkeurig op diepten 0, 10, 20, 30, 40, 50 en 100 in het Lycklamabos. Daarnaast is de pH op basis van het waterextract in het mengmonster 0-40 en 100 diepte weergegeven.

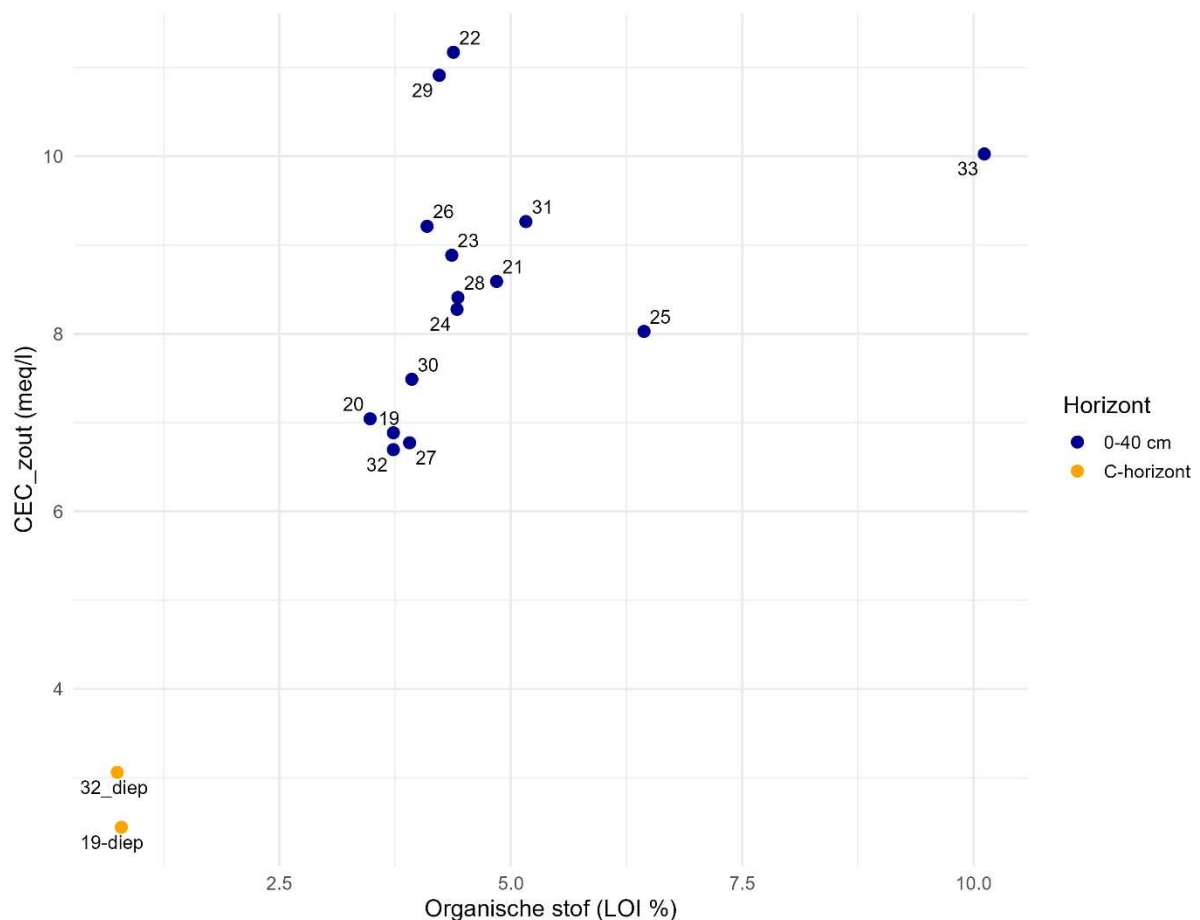


Figuur 4-9. Deel twee van de pH-profielen op basis van pH-veld (pH-papierjes), geschat op 0,5 nauwkeurig op diepten 0, 10, 20, 30, 40, 50 en 100 in het Lycklamabos. Daarnaast is de pH op basis van het waterextract in het mengmonster 0-40 en 100 diepte weergegeven.

4.3.2.2 Buffering en basenverzadiging

pH is slechts een maat voor de hoeveelheid H^+ en daarmee een indicator van verzuring. De hoeveelheid basische kationen Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Natrium (Na^+) en kalium (K^+), mede in relatie tot de zure anionen Aluminium (Al^{3+}), IJzer (Fe^{2+}), Mangaan (Mn^{2+}) en protonen (H^+) geeft een veel beter beeld van de verzuringstatus van de bodem. Om dit te goed te interpreteren, moeten we eerst kijken naar de hoeveelheid bindingsplaatsen die aanwezig zijn in de bodem. Dit wordt bepaald door middel van de som van alle basische kationen en anionen: de Cation Exchange Capacity (CEC) (Ulrich, 1981; Bobbink et al., 2017). Omdat kationen in deze systemen vaak gebonden zijn aan organische stof, is de verhouding tussen organische stof en CEC_zout in **Figuur 4-10** weergegeven.

Er is best veel variatie in de hoeveelheid organische stof van de 0-40 cm bodem aanwezig: 3,7 tot 10,1 procent. Dit is in vergelijking tot andere bosbodems in Nederland gemiddeld. De CEC is alleen bepaald op basis van het zoutextract, wat leidt tot een onderschatting van de werkelijke CEC. Dit maakt de CEC lastig te interpreteren, maar deze lijkt ook niet extreem hoog of laag in vergelijking met andere bosbodems in Nederland. De lagere CEC in C-horizonten lijkt goed samen te hangen met de lagere hoeveelheid organische stof en daarmee samenhangende lagere bindingsmogelijkheid voor kationen en anionen.

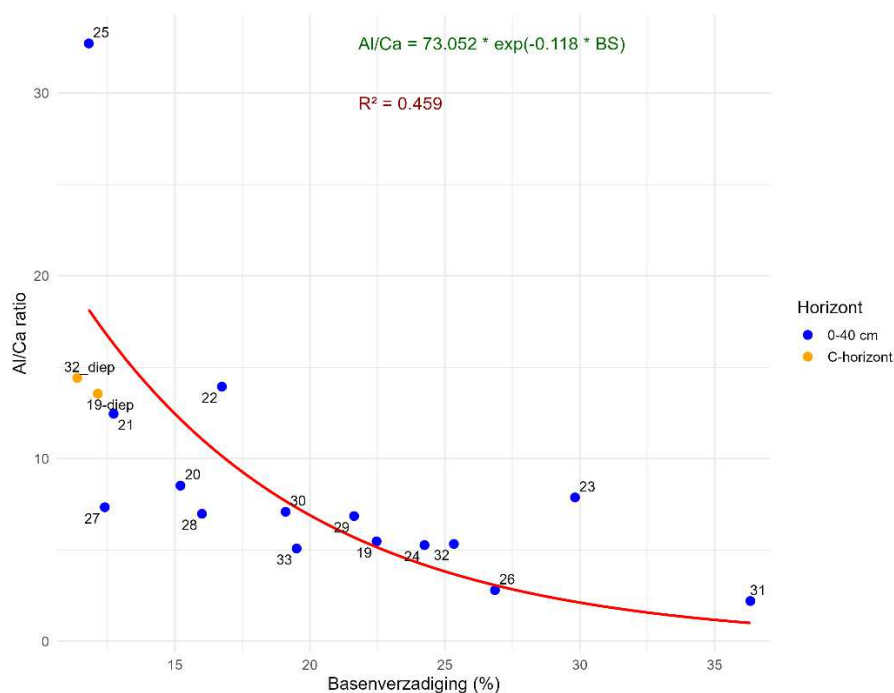


Figuur 4-10. De CEC van het zoutextract in relatie tot de hoeveelheid organische stof (LOI) in %. Zowel de 0-40 cm bodem als C-horizonten zijn weergegeven.

De term basenverzadiging wordt gebruikt om aan te geven hoeveel van het kationenuitwisselingscomplex bezet is met basische kationen. De basenverzadiging (BS) is bij benadering bepaald met het zoutextract, wat leidt tot een overschatting van de basenverzadiging. De basenverzadiging in de 0-40 cm bodemmonsters is laag (**Figuur 4-11**). Vrijwel alle monsters hebben een basenverzadiging lager dan 30% en de helft ligt onder de 20%.

Dit laat zien dat in de bosbodems van het Lycklamabos weinig basische kationen beschikbaar zijn om de bodem te bufferen, waardoor de bodem zich in het aluminium buffertraject bevindt. Hierbij komt het voor planten giftige aluminium vrijgemaakt om de bodem te bufferen (Ulrich, 1981; Bobbink et al., 2017). Dat is terug te zien in zeer hoge aluminiumconcentraties van 1500 tot 3000 $\mu\text{mol/l}$ en hoge Al/Ca-ratio's van vrijwel overal boven de 5. Dit is zeer hoog in vergelijking met andere bosbodems in Nederland.

Opvallend is dat ook de C-horizonten een lage basenverzadiging en hoge Al/Ca ratio hebben. Een basenverzadiging van 11 tot 12% en Al/Ca van 13,5 tot 14,5 bij boring 19 en 32 geven dit aan. Dit toont aan dat ook dat de C-horizont niet alleen minder bindingsplekken hebben, maar deze ook al veel zijn opgevuld met aluminium.

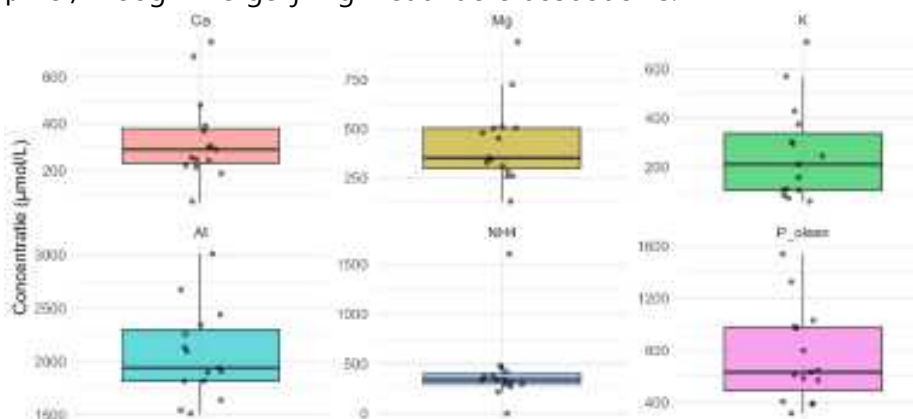


Figuur 4-11. Exponentieel verband tussen de Al/Ca ratio en de basenverzadiging in % op basis van het zoutextract. Het model is gemaakt op basis van de 0-40 cm bodem, de C-horizonten zijn hier overheen geplot.

4.3.2.3 Onderlinge verhoudingen bufferstoffen, aluminium en voedingsstoffen

Zowel de concentraties van Ca^{2+} , Mg^{2+} als K^+ liggen vaak onder de $500 \mu\text{mol/l}$ (Na^+ niet gemeten in zout (NaCl) oplossing) (**Figuur 4-12**). Dit is laag in vergelijking met andere bosbodems in Nederland. Aluminiumconcentraties zijn daarentegen juist zeer hoog in vergelijking met andere bosbodems in Nederland.

De dominante vorm van stikstof is ammonium. Nitraatconcentraties zijn laag en liggen bijna overal onder de $65 \mu\text{mol/l}$, terwijl alle ammoniumconcentraties boven de $200 \mu\text{mol/l}$ liggen. De concentraties zijn zeker niet laag in vergelijking met andere bosbodems, maar op slechts één locatie is een extreem hoge waarde gevonden. Het gaat om boring 23 waar $1604 \mu\text{mol/l}$ ammonium is aangetroffen. Dergelijke hoge waarden zijn toxisch voor planten die er groeien. De voor planten makkelijk beschikbare fosfaat, gemeten in P-olsen, is met gemiddeld $726 \mu\text{mol/l}$ hoog in vergelijking met andere bosbodems.



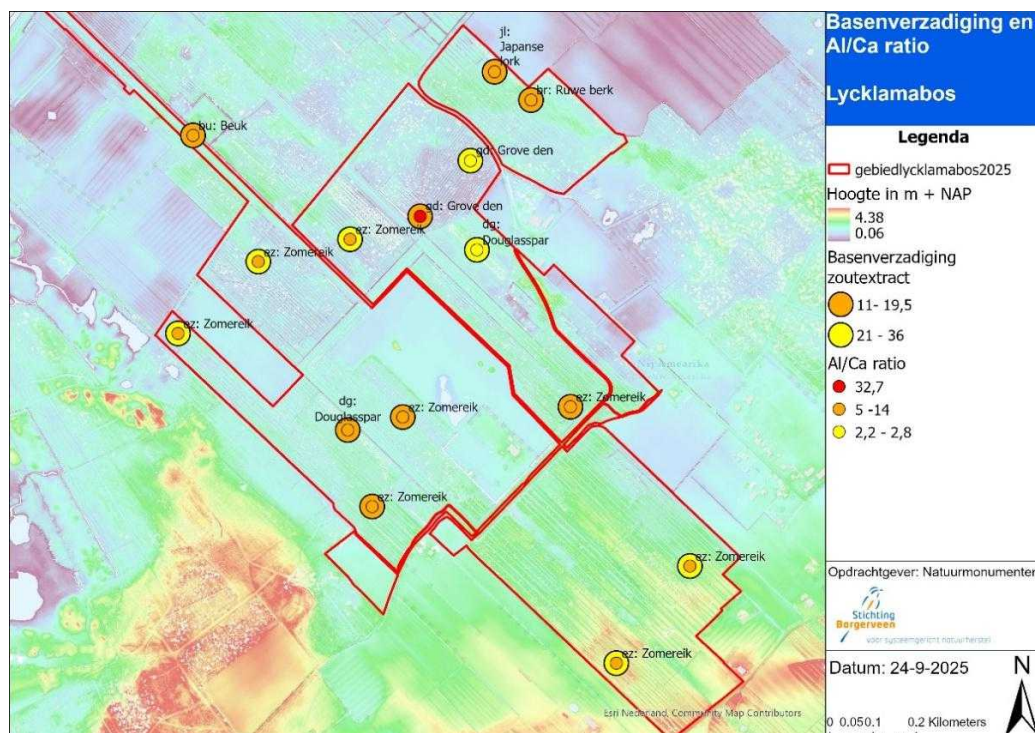
Figuur 4-12. Weergave van Calcium, Magnesium, Kalium, Aluminium en Ammonium op basis van het zoutextract en P op basis van Olsenextract in de verse bodem in $\mu\text{mol/l}$ van de 0-40 cm bodem.

Op twee bodemonsters die uit de C-horizonten zijn genomen is ook destructie uitgevoerd. Hieruit blijkt wat de totale hoeveelheid mineralen zijn die in de bodem aanwezig zijn. Calcium, Magnesium en Kalium waarden variëren van 5,3 tot 9,8 mmol/l. Deze waarden zijn niet laag, maar ook niet hoog in vergelijking met andere bosbodems. Aluminiumwaarden van 123 en 139 mmol/l en ijzerwaarden van 21 en 22 mmol/l zijn niet hoog en geven voornamelijk aan dat de C-horizonten op deze locaties leemarm zijn. Fosfaatwaarden van 2,4 en 2,6 mmol/l zijn iets lager dan gemiddeld.

4.3.2.4 Ruimtelijke patronen: verschillen tussen naald- en loofbos en Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos

Er is een klein effect zichtbaar op basis van het type boomsoort in het Lycklamabos en er is veel variatie op korte afstand (**Figuur 4-13**). Alleen de kaliumconcentratie is significant hoger ($p = 0.009$, verschil = 217 $\mu\text{mol/l}$) in delen met loofbos (zie **Bijlage 3**). Meer verschillen zijn aanwezig tussen Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos. De hoeveelheid organische stof in de 0-40 cm bodem is significant lager in het Lycklamabos dan in Slotplaats Bakkeveen ($p = 0.0023$, verschil = 2,5 % organische massa). CEC_zout is niet significant lager in het Lycklamabos, maar het gemiddelde ligt wel 1 mEq lager (9,6 in Slotplaats Bakkeveen ten opzichte van 8,5 in het Lycklamabos).

CEC_zout bestaat in het Lycklamabos significant meer uit magnesium ($p = 0,024$, verschil is 142 $\mu\text{mol/l}$) en significant minder uit aluminium ($p = 0,013$, verschil is 437 $\mu\text{mol/l}$) dan in Slotplaats Bakkeveen. Hierdoor de Al/Ca ratio significant lager ($p = 0,048$, verschil = 5,85) en BS_zout significant hoger ($p = 0,0016$, verschil = 7,6 %) in het Lycklamabos dan in Slotplaats Bakkeveen. P-olsen is significant hoger in het Lycklamabos ($p = 0.0005$, verschil = 355 $\mu\text{mol/l}$).



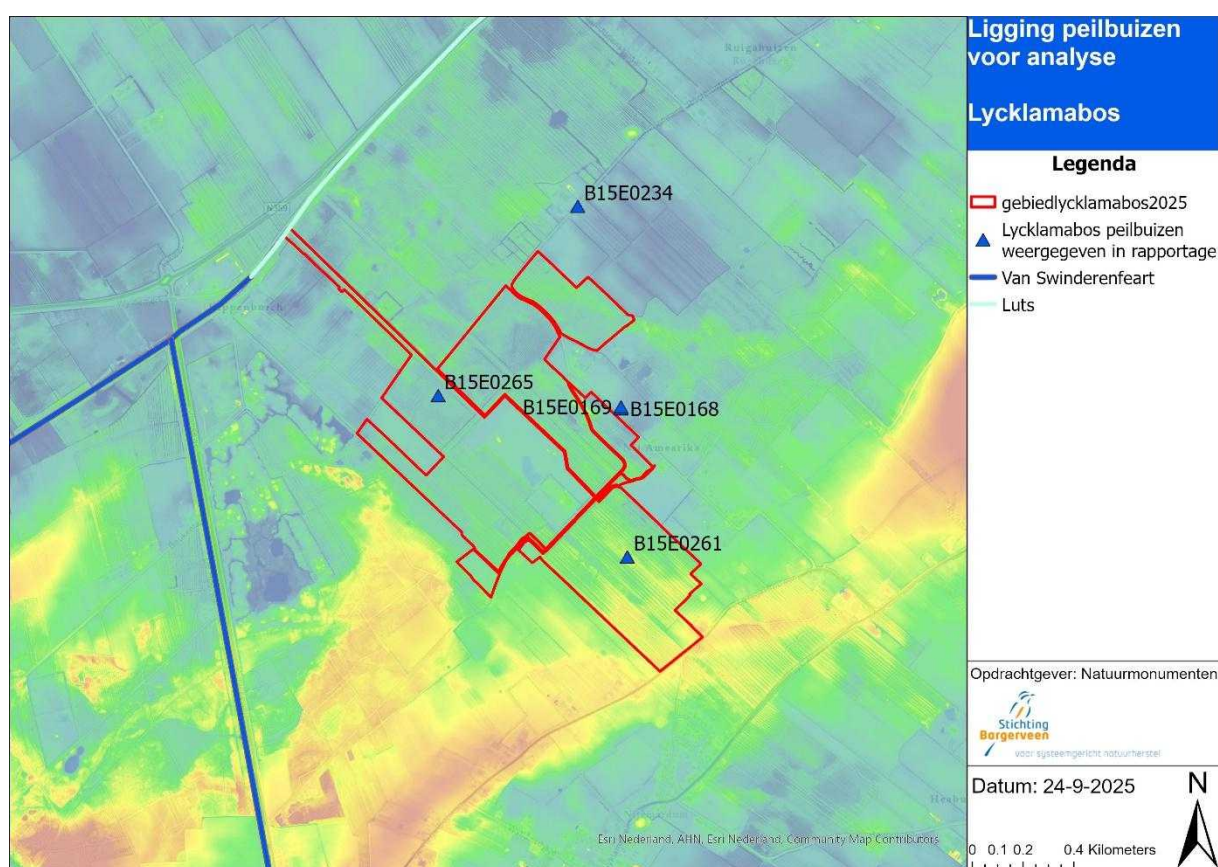
Figuur 4-13. De basenverzadiging in % en Al/ Ca op basis van het zoutextract is weergegeven in de cirkels. BS en Al/Ca zijn aan elkaar gerelateerd: de laagste BS hebben de hoogste Al/Ca ratio's. De labels geven de eerste hoofdboomsoort op een locatie weer.

4.4 Hydrologie

Voor het Lycklamabos zijn twee watervoerende pakketten van belang:

- Het regionale grondwatersysteem; deze bestaat uit het zandpakket boven de potklei, maar onder de keileem: watervoerend pakket II (WVP II);
- Het lokale of freatische grondwatersysteem, deze bestaat uit het zandpakket boven de keileem en loopt door tot in maaiveld: WVP I.

Er zijn veel verschillende peilbuizen in het gebied met lange meetreeksen en zeer diepe filters, maar zeker in de eerste jaren ontbreekt er vaak data, waardoor analyse van deze jaren moeilijk zijn. Daarnaast zijn sommige peilbuizen tussentijds verhoogt zonder dat de data hiervoor is gecorrigeerd. Bij de analyse is hiermee rekening gehouden. De peilbuizen die zijn geselecteerd om in dit hoofdstuk te bespreken zijn weergegeven in **Figuur 4-14**.

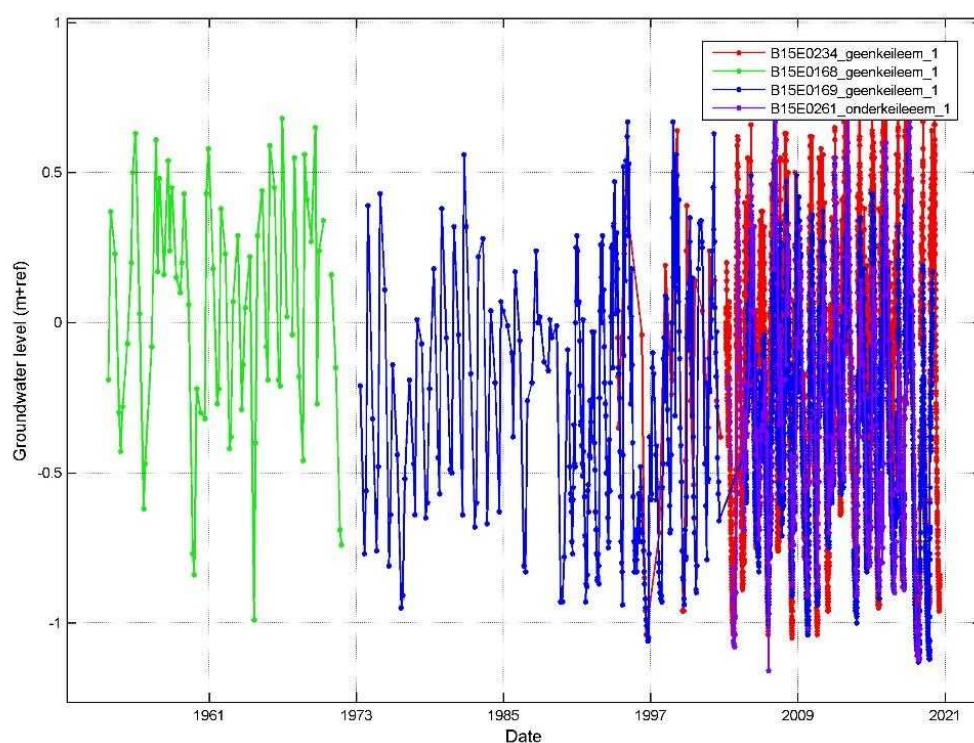


Figuur 4-14. Locaties peilbuizen gebruikt in rapportage na peilbuisanalyse.

4.4.1 Regionaal grondwatersysteem (WVP11)

Het systeem onder de keileem heeft zowel in het zuiden (B15E0261), het centrum (B15E0169 en daarvoor B15E0168) als het noorden (B15E0234) van het Lycklamabos vergelijkbare stijghoogten ten opzichte van NAP (**Figuur 4-15**), wat aangeeft dat geen sterke regionale grondwaterstroming aanwezig is. De aanwezige waterstandsfluctuaties verschillen sterk tussen natte en droge jaren, maar kunnen oplopen tot twee meter per jaar. Fluctuaties lijken vanaf 1970 ongeveer hetzelfde, maar waarschijnlijk al vanaf 1950 omdat het maaiveld van B15E168 20 cm hoger was gelegen dan B15E0169. Echter is dit lastig om precies te zeggen omdat in de eerste jaren maar weinig metingen zijn gedaan.

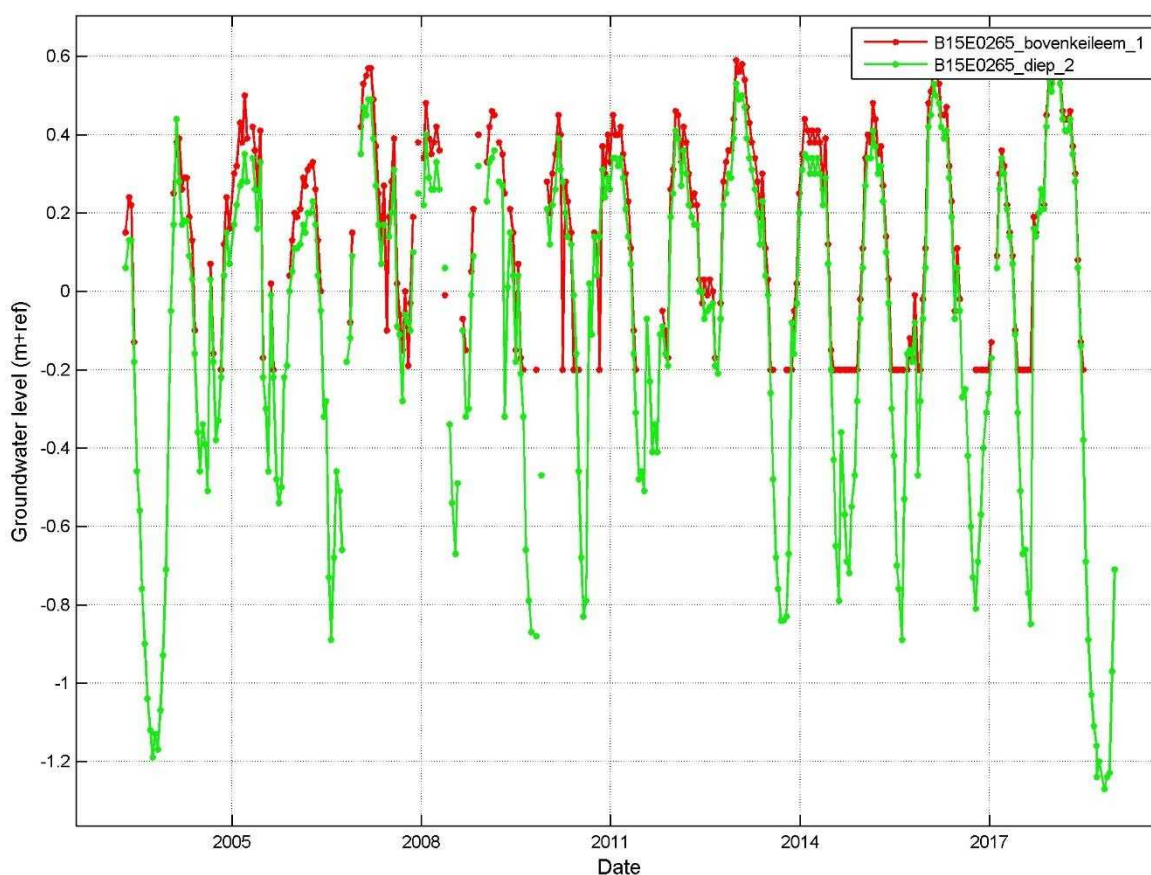
Alhoewel weinig verschillen ten opzichte van NAP aanwezig zijn tussen de peilbuizen door het gebied heen, zijn wel duidelijke verschillen ten opzichte van maaiveld zichtbaar. In de lagere kommen in het centrum (B15E0169) en noorden (B15E0234) kunnen waterstanden fluctueren van 0,1 meter tot 1,6 meter onder maaiveld. In het hogere zuiden kunnen waterstanden fluctueren van 1,5 meter tot 3 meter onder maaiveld.



Figuur 4-15. Weergave van de grondwaterstanddynamiek van vier peilbuizen met ondiepe filters op locaties zonder keileem of onder de keileem (B15E0234, B15E0168 en B15E0169 en B15E0261) in m + NAP.

4.4.2 Lokaal grondwatersysteem (WVPI)

In het hele gebied is nauwelijks verschil zichtbaar in waterstandsdynamiek tussen peilbuizen boven en onder de keileem (**Figuur 4-16**). Het systeem boven en onder de keileem lijkt hier dus zeer samenhangend te zijn: in de winter vindt door ontwatering eigenlijk geen opbolling meer plaats op de keileem, daarna valt het systeem boven de keileem snel droog en volgt deze het sterk fluctuerende regionale grondwatersysteem. De opbolling wordt laag gehouden door de vele sloten en rabatten die uiteindelijk uitkomen op het Van Swinderenfeart kanaal (**Figuur 4-14**). Er is door de jaren heen geen stijgende of dalende trend zichtbaar in het watersysteem boven de keileem.

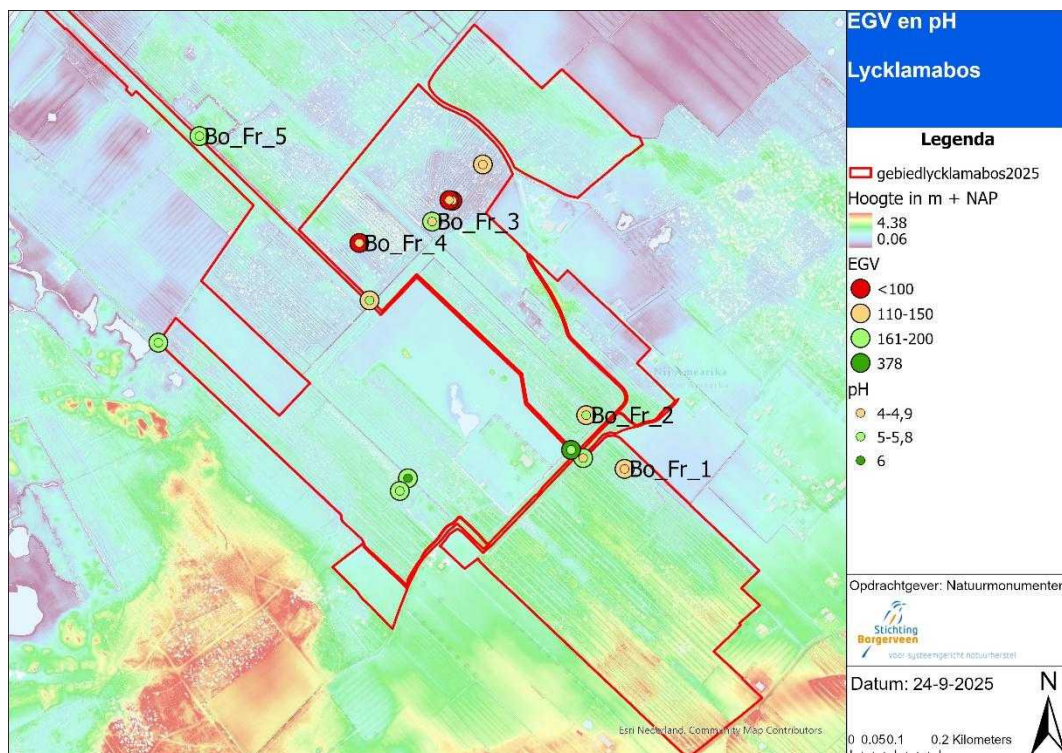


Figuur 4-16. Weergave van de meetreeks van het diepe filter en ondiepe filter (boven de keileem) van peilbuis B15E265 in m + NAP. Het filter boven de keileem valt een groot deel van het jaar droog, maar wanneer water aanwezig is zijn er zeer kort hogere waterstanden dan het systeem onder de keileem.

4.4.3 Waterkwaliteit, EGV en pH

Het voorjaar van 2025 was uitzonderlijk droog, waardoor op 21 en 22 mei 2025 vrijwel alle watergangen waren drooggefallen. Slechts een enkele watergang had nog water waarin EGV- en pH-metingen zijn uitgevoerd. Dit waren vaak zeer grote watergangen zoals tussen watermonsters Bo_Fr_1 en Bo_Fr_2 in **Figuur 4-17** of bij Bo_Fr_5. Andere metingen zijn uitgevoerd in boorgaten in rabatbodems. Alleen ten noordoosten van Bo_Fr_3 was nog (veel) water aanwezig in de sloten (tot 66 cm – mv).

In veelal geïsoleerde sloten en rabatten is de pH en EGV laag. Waarden van respectievelijk <5 en $<150 \mu\text{S}/\text{cm}$ geven aan dat voornamelijk regenwater aanwezig is in de rabatten. Hogere waarden zijn gevonden in hoofdsloten. pH-waarden van voornamelijk boven de 5 en EGV-waarden van voornamelijk $147\text{--}200 \mu\text{S}/\text{cm}$ geven aan dat in dit water iets meer aangereikt is, al zijn de verschillen relatief gezien klein.

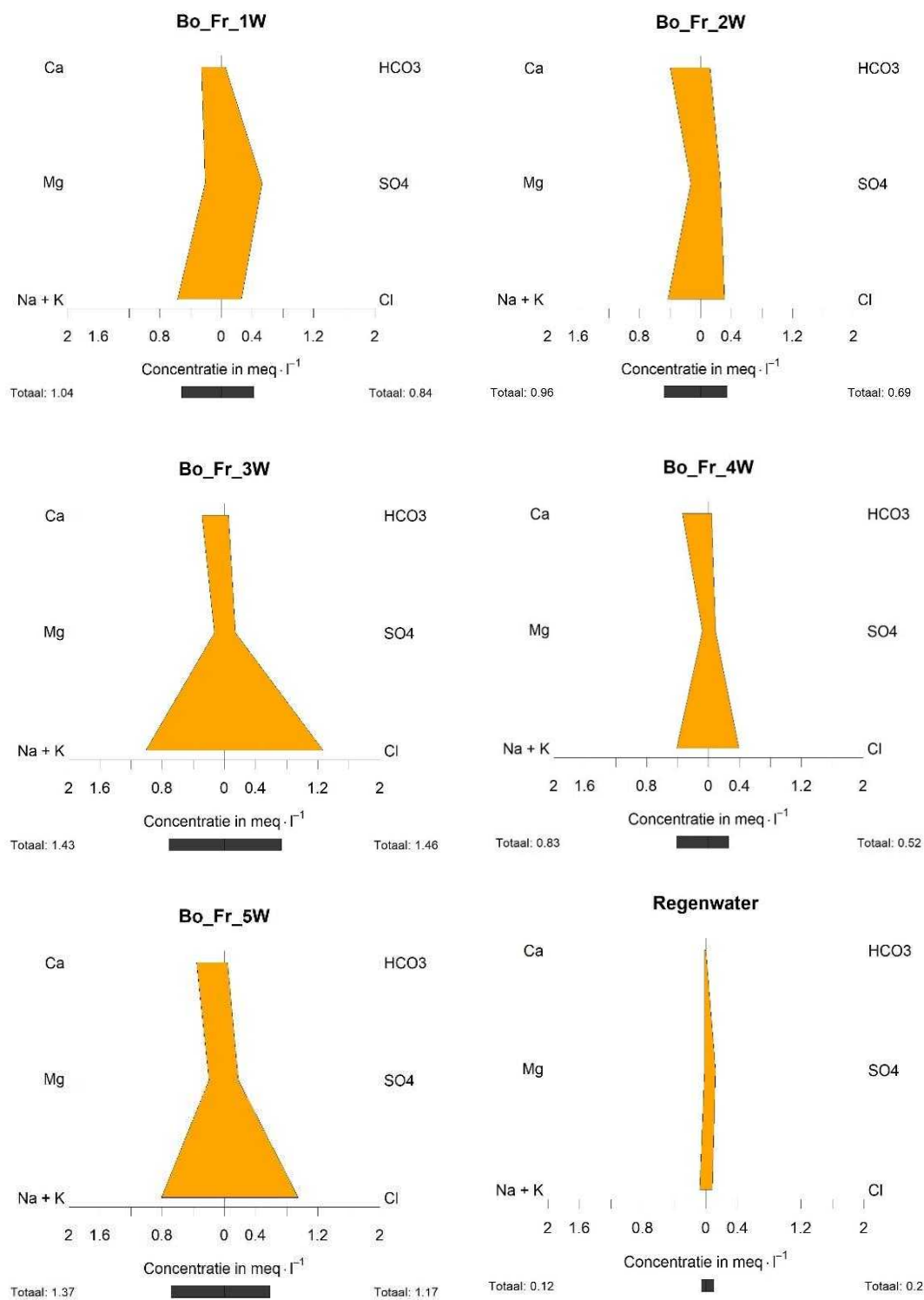


Figuur 4-17. EGV in $\mu\text{S}/\text{cm}$ en pH-metingen uitgevoerd in de nog watervoerende watergangen buiten op 21 en 22 mei 2025. De metingen Bo_Fr_... geven de locaties van watermonsters aan. De EGV en pH hiervan is niet in het veld, maar in het lab bepaald.

De watermonsters komen het meest overeen met de referentiewaarden van regenwater (Van Wirdum, 1991), zoals blijkt uit de vorm van de stiftdiagrammen (**Figuur 4-18**). Wel is een lichte aanrijking met Natrium (Na^+), Kalium (K^+) en Chloride (Cl^-) zichtbaar in Bo_Fr_3 en Bo_Fr_5.

De laagste alkaliniteit is gevonden bij Bo_Fr_4 (0,08 mEq/l), Bo_Fr_3 (0,17 mEq/l) en Bo_Fr_1 (0,13 mEq/l). Dit ook de locaties waar de laagste EGV en pH zijn gevonden en bevestigd dus dat in afgesloten rabatten en sloten water aanwezig is dat het meeste op regenwater lijkt. Een hogere alkaliniteit van 0,3 bij Bo_Fr_2 en 0,24 bij Bo_Fr_5 komt overeen met de hogere pH en EGV. Dit water is te typeren als zwak gebufferd.

De dominante vorm van stikstof is ook in de watermonsters ammonium, op uitzondering van Bo_Fr_1 na (79 $\mu\text{mol}/\text{l}$ nitraat). De concentraties van ammonium zijn met < 67 $\mu\text{mol}/\text{l}$ in de meeste monsters laag, alleen in Bo_Fr_3 is een hogere concentratie van 192 $\mu\text{mol}/\text{l}$ aangetroffen. Fosfaat en ortho-fosfaatconcentraties zijn zeer laag (<5 $\mu\text{mol}/\text{l}$).



Figuur 4-18. Stiff-diagrammen van de watermonsters die zijn verzameld in het Lycklamabos. Concentraties zijn in meq/l. De referentie van regenwater is op basis van Van Wirdum (1991).

4.5 Ondergroei bos en vitaliteit eiken

Een uitgebreide vegetatieanalyse maakt geen onderdeel uit van dit onderzoek. Tijdens het veldonderzoek zijn wel enkele indicatieve soorten opgevallen in Type N15.02. In veel opstanden groeit Wilde kamperfoelie, met plaatselijk Dubbelloof, Koningsvaren en Hazelaar. Dit zijn soorten die duiden op wat rijkere standplaatsen, vaak samenhangend met lemige bodems.

In de natte laagte in het noorden, nabij boring 25 en 26, groeit relatief veel Riet in het bos, en is een ondergroei van Zwarte els aanwezig. Deze soorten duiden op stabiele, natte, relatief voedselrijke omstandigheden. Daarnaast groeien hier Gewimperd en Gewoon veenmos langs de rabatsloten, die duiden op stabiele, natte, voedselarme tot matig voedselrijke omstandigheden. De soorten zijn nergens anders in dezelfde samenstelling het Lycklamabos aangetroffen.

Zomereik is in het Lycklamabos de belangrijkste hoofdboomsoort, maar de vitaliteit is bijna overal in het gebied slecht. Alhoewel de boomvitaliteit niet kwantitatief is bepaald, hebben veel eiken een open boomkroon en is sprake van waterlotvorming op eikenstammen (**Figuur 4-19**). In de natste delen (bij boring 25 en 26), zijn verschillende dode eiken aangetroffen. Zomereik kunnen, zeker op later leeftijd, slecht tegen plotselinge verhoging van de waterstand (Scharnweber et al., 2014).



Figuur 4-19. Links: open boomkronen van Zomereiken in het Lycklamabos. Rechts: Waterlotvorming op de stam van een eik nabij boring 25.

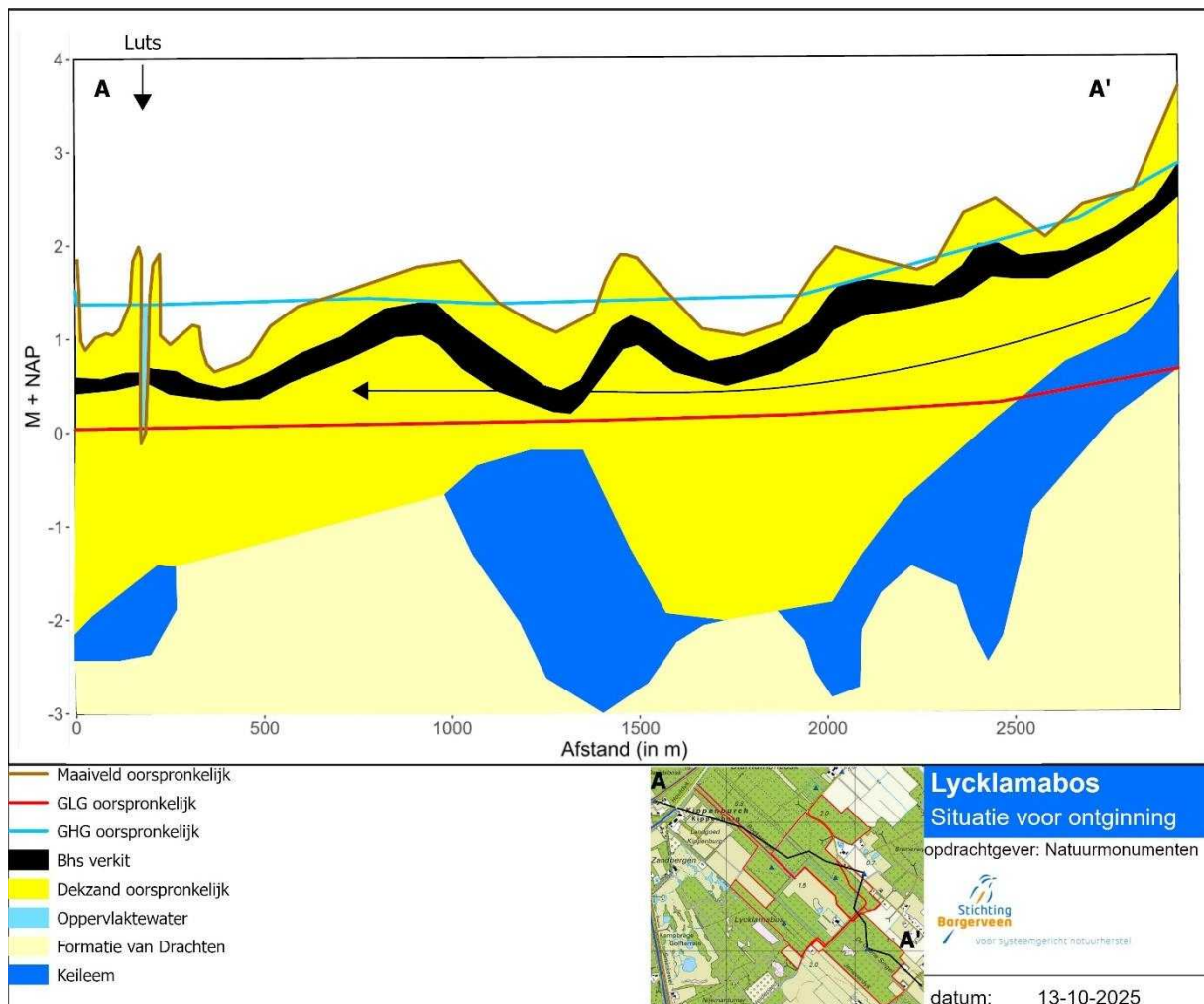
4.6 Synthese

4.6.1 Historische gesteldheid, hydrologie, bodem en vegetatie

De laatste twee ijstijden hebben het landschap gevormd. In het Saalien (370 000 tot 130 000 jaar geleden) is keileem afgezet op een 240 meter dik voornamelijk uit zand bestaand pakket (WVPII). In het Weichselien (115.000 tot 11.650 jaar geleden) is de keileem versneden geraakt door erosie van smeltwater, waardoor smeltwatergeulen ontstonden waarin de keileem ontbreekt. Later in het Weichselien zijn relatief goed doorlatende dekzanden afgezet op de keileem (WVPI) en ontstond het huidige dekzandlandschap (**Figuur 4-20**).

In het begin van het Holoceen (11 650 tot heden) werd het klimaat natter en warmer en steeg de zeespiegel. In een groot gebied rondom het projectgebied werd veen gevormd. De stuwwal van Gaasterland stak daarboven uit en vormde een hogere kom in het landschap. Door het hogere ligging was in deze kom overwegend sprake van wegzijging. Hierdoor ontstonden overwegend (veld)podzolgronden. De laagste delen en diepere kommetjes op de stuwwal stonden langdurig onder invloed van grondwater, waardoor hier grondwatergevoede AC-profielen ontstonden en daardoor gooreerdgronden. De hoge grondwaterstanden in de omliggende veengebieden remden de afvoer van grondwater vanaf de stuwwal. Dit resulteerde in hoge zomer- en winterwaterstand boven de keileem (WVPI) en daardoor zeer natte omstandigheden. De veldpodzolen raakten als gevolg hiervan verkit met disperse humus, ijzer en aluminium. Hierdoor werden ze steeds slechter doorlatend voor water (zie **Bijlage 1** voor de processen hierachter) en ontstonden natte laagten en vennen.

Vanaf het begin van de jaartelling nam de invloed van de zee toe, waardoor grote stukken veen en keileem zijn weggeslagen rondom het projectgebied. Pas na het bouwen van dijken in de dertiende en veertiende eeuw nam de invloed van de zee af. Door de aanwezige veengebieden en het ontbreken van grootschalige drainage zal dit niet direct tot een veel lagere grondwaterstand hebben geleid. In de Middeleeuwen (500 tot 1500 na Chr.) was het gebied nat, maar vanwege de hogere ligging ten opzichte van de omliggende moerassen droog genoeg om landbouw op te bedrijven. In deze periode werden de bossen gekapt, en ontwikkelden zich een heidelandschap. Deze gronden werden gebruikt voor als graasweiden voor de schapen, waarvan de mest samen met heideplaggen werd gebruikt op de akkers. Deze akkers zijn nu nog terug te vinden in de vorm van laarpodzolgronden (cHn23 en cHn21). Andere delen werden gebruikt om schapen op te grazen en hier ontstonden waarschijnlijk voornamelijk vochtige heiden/ heideveentjes.



Figuur 4-20. Dwarsdoorsnede van noord naar zuid in het Lycklamabos. De doorsnede geeft de verwachte situatie weer direct voordat de veenontginning startte (13^e eeuw).

4.6.2 Huidige gesteldheid hydrologie, bodem en vegetatie

Vanaf de 17^e eeuw is bos aangeplant in het gebied en is rondom het projectgebied op grotere schaal veen gewonnen. Verder zijn veel sloten (en rabatten) en zelfs kanalen, zoals de Van Swinderenfeart, aangelegd in het dekzandlandschap boven de keileem om de komvormige stuwwal van Gaasterland te ontwateren. Deze sloten snijden daarbij door dekzandruggen heen. Ten slotte is de bodem op grote schaal doorgeploegd waarbij verkitte podzol B-horizonten zijn doorbroken en deze nu niet meer slecht doorlatend zijn. Het gevolg is dat na de inrichting van het productiebos de grondwaterstanden aanzienlijk zijn gedaald.

In het huidige systeem vindt nauwelijks grondwateropbolling plaats in de dekzandruggen boven de keileem, waardoor het regionale grondwatersysteem (WVP11) vrijwel volledig de waterstandsfluctuaties in het gebied bepaald. Waterstanden ten opzichte van NAP zijn van noord naar zuid in het gebied gelijk en kunnen in droge jaren fluctueren van 0,7 m +NAP tot 1,2 meter -NAP. Daarmee fluctueert de grondwaterstand dus gemiddeld zo'n 2 meter. In de lagere gelegen kommen in het centrum en noorden van het gebied ligt de grondwaterstand tussen 10 en 160 cm onder maaiveld, terwijl de grondwaterstand in hogere delen in het zuidoosten 1,5 tot 3 meter onder maaiveld ligt. In nattere jaren staat de grondwaterstand in lagere kommen echter langdurig tot vlak onder maaiveld. In dergelijke kommen zorgen de

relatief natte, matig voedselrijke tot relatief voedselrijke omstandigheden voor de aanwezig van soorten zoals Gewimperd veenmos, Gewoon veenmos, Riet en Zwarte els. De waterstanden laten al gedurende lange tijd (1975) ongeveer dezelfde dynamiek zien. Water in afgesloten kommen en rabatten is zuur, basenarm en komt het best overeen met regenwater. Ook het water in hoofdwatgangen komt het meest overeen met regenwater, maar is zeer zwak gebufferd. Ammonium en fosfaatconcentraties in het water zijn over het algemeen laag.

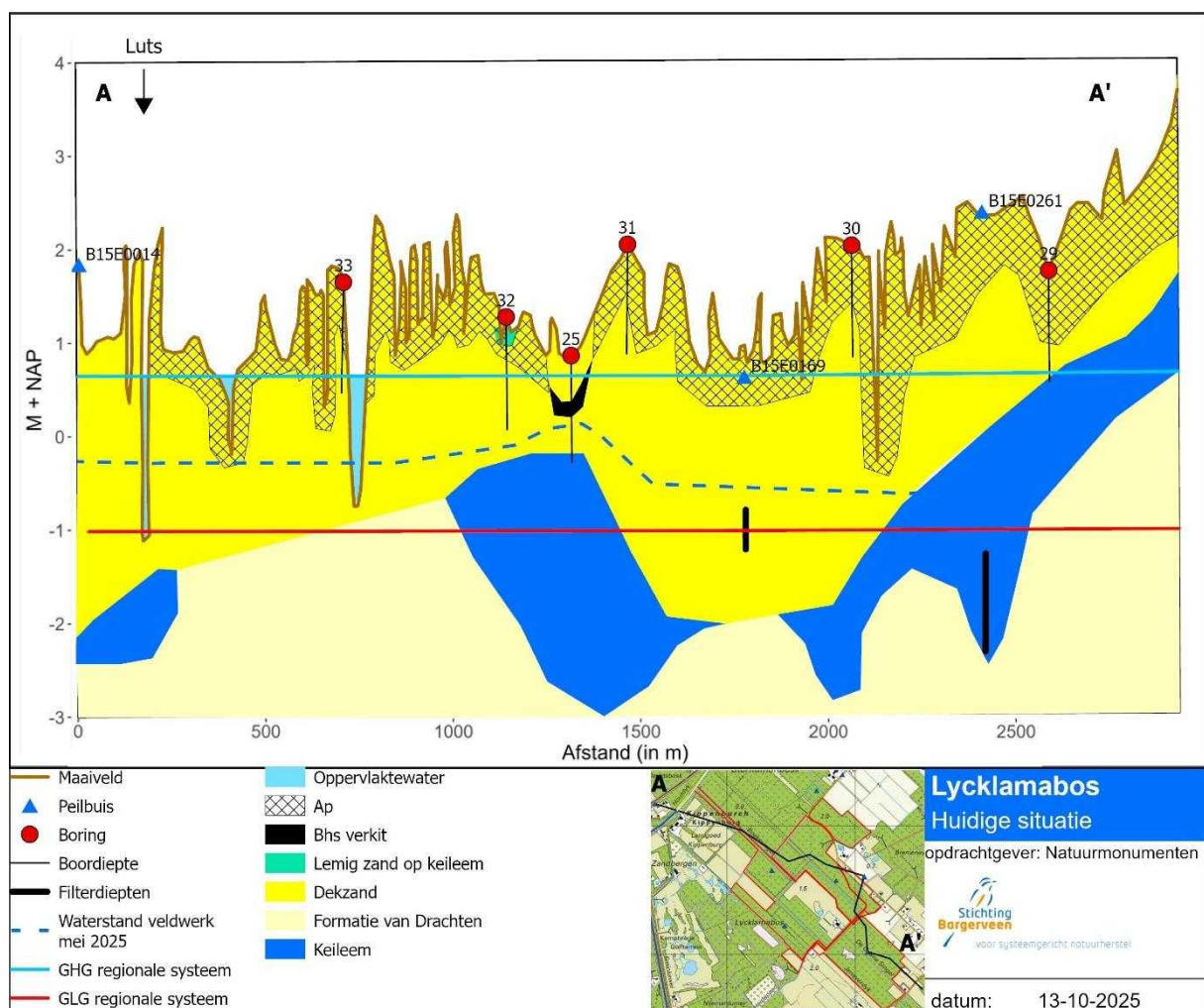
De totale calcium-, magnesium- en kaliumconcentraties van het moedermateriaal van de bosbodems zijn niet extreem laag of hoog. Door infiltratie van regenwater en sterk wisselende grondwaterstanden zijn veel van de basische kationen inmiddels uitgespoeld uit de bodem, waardoor de beschikbare concentraties voor planten in dit gebied van nature laag zijn. Doordat de grijze keileem in het gebied tot 2-3 meter ontkalkt is, bevat het lokale grondwater ook geen basische kationen. Vervolgens zijn de bosbodems doorploegd, soms zijn de bodems zelfs tot 85 cm diepte volledig op zijn kop gezet. Plaatselijk zijn hierdoor B-horizonten hoger in het profiel komen te liggen of liggen ze zelfs in maaiveld. Deze inspoelingshorizonten bevatten zeer hoge aluminium- en ijzerconcentraties en zijn zeer zuur, waardoor het toxische aluminium en ijzer vrij kan komen. Op andere plaatsen is juist het moedermateriaal (C-horizont) aan het oppervlak gekomen (zie **Bijlage 4**). Het moedermateriaal heeft weinig bindingsplaatsen (lage CEC) en verzuurt daarom makkelijker. De bosbodems zijn daardoor gevoelig voor verzuring door zwavel- en stikstofdepositie vanaf de jaren 1980 en zuur strooisel afkomstig van aangeplant naalddhout (Buijsman, 2008; Centraal Bureau voor de Statistiek et al., 2024; Scharnweber et al., 2014).

In het bos zijn geen gradiënten aanwezig in basenrijkdom. Alle bodems zijn op basis van pH-profielen te typeren als een zuur of zeer zuur infiltratieprofiel en op veel locaties zijn dikke strooiselpakketten aanwezig. De hoeveelheid basische kationen in relatie tot de zure anionen (basenverzadiging) is overal zeer laag. Vrijwel alle monsters hebben een basenverzadiging lager dan 30% en de helft ligt onder de 20%. Een basenverzadiging onder de 20% is voor de aanwezige bossen ongunstig (Wellbrock & Bolte, 2019). De Al/Ca ratio heeft slechts in twee locaties een waarde onder de 5,0. Een waarde boven de 5,0 betekent 100% kans op negatieve effecten op boomgroei en -voeding (Cronan & Grigal, 1995). De pH en basenverzadiging in het Lycklamabos is significant hoger dan in Slotplaats Bakkeveen, terwijl het organische stofgehalte significant lager is en daarmee ook het aantal bindingsplaatsen (CEC). Alhoewel het aantal bindingsplaatsen lager is, is in het Lycklamabos wel vaak tot dieper in het profiel organische stof aanwezig. Daardoor zijn ook tot dieper in het profiel meer bindingsplaatsen aanwezig, net als een groter vochtvasthoudend vermogen. Het voorkomen van organische stof tot diep in het profiel is te linken aan het voorkomen van laarpodzolgronden in delen van het gebied.

Naast verzuring en daaraan gekoppelde aluminiumtoxiciteit, vormt ammoniumtoxiciteit in de bosbodems waarschijnlijk een knelpunt. De dominante vorm van stikstof is ammonium. Dit is logisch aangezien onder de aangetroffen zure omstandigheden geen nitrificatie meer plaatsvindt (Bobbink et al., 2017). De ammoniumconcentraties zijn absoluut gezien niet extreem hoog omdat strooisel onder de huidige zure omstandigheden niet (snel) worden afgebroken. Totale hoeveelheden fosfaat in het moedermateriaal zijn laag, maar fosfaatconcentraties in de toplaag zijn hoog in vergelijking met andere bosbodems. Dit is te linken aan historie van het gebied. De laarpodzolen in het gebied geven aan dat in het verleden

relatief rijke grond is opgebracht. Het is bekend dat fosfaatconcentraties nog lang hoog kunnen zijn in historische akkers terwijl de basische kationen zijn uitgespoeld.

Zowel een hogere basenverzadiging, pH, fosfaatconcentratie in de 0-40 cm bodem en ook meer organische stof tot dieper in het profiel geven aan dat in de bodem rijkere omstandigheden aanwezig zijn in het Lycklamabos ten opzichte van Slotplaats Bakkeveen. Dit is terug te zien in het vele voorkomen van Wilde kamperfoelie als ondergroei, met plaatselijk Dubbelloof, Koningsvaren en Hazelaar in het Lycklamabos. Dit zijn soorten die ontbreken in de ondergroei in Slotplaats Bakkeveen. De Zomereiken in het gebied lijken veel last te hebben van de afwisseling tussen jaren met langdurige droogval en langdurig hoge grondwaterstanden. Dit is terug te zien in open boomkronen in combinatie met veel waterlot op de stammen en zelfs sterfte in de natste delen.



Figuur 4-21. Dwarsdoorsnede van noord naar zuid in het Lycklamabos. De doorsnede geeft de huidige situatie weer. In de doorsnede is data van eigen bodemboringen, peilbuizen en de diepere geologische opbouw op basis van Geotop v1.6.1 gebruikt. Slootdiepte en verspreiding van verkitte podzol B-horizonten zijn geïnterpreteerd.

4.7 Advies en maatregelen Lycklamabos

Uit de synthese komen een aantal hydrologische knelpunten en knelpunten met betrekking tot de bodembuffering naar voren. Deze worden hieronder kort toegelicht.

4.7.1 Knelpunten

4.7.1.1 Hydrologie in het centrum en noorden

De huidige hydrologische condities in het Lycklamabos zijn voor veel boomsoorten en voornamelijk voor zomereiken ongunstig. Voornamelijk in de lagere kommen in het centrum en noorden is een uitzonderlijke weerbaarheid van het boomwortelstelsel gevraagd. In droge jaren zakt het grondwaterstand ruim 1,6 meter onder maaiveld uit. Bomen investeren dan in hun wortelstelsel en proberen zo diep mogelijk op zoek te gaan naar water. In de doorploegde bodems zullen veel boomwortels zich in diepere organische lagen vestigen (zie **Bijlage 4**). In natte jaren staat de waterstand langdurig binnen enkele decimeters onder maaiveld. De diepe wortels komen dan langdurig onder water te staan waardoor ze een groot risico lopen op zuurstofgebrek (Olsthoorn et al., 2001). Zeker oudere Zomereiken kunnen slecht tegen plotselinge stijgingen van de waterstand (Scharnweber et al., 2014). Dit gaat ten koste van de vitaliteit van de bomen.

4.7.1.2 Bodemverzuring + boomsoorten

In de bosbodems zijn onder invloed van verzuring door depositie van zwavel en stikstof en aanplant van Grove dennen tussen de Zomereiken veel basische kationen uitgespoeld met het infiltrerende regenwater. Tegenwoordig bevinden deze bodem zich niet meer in het kationenuitwisselingcomplex, maar is aluminium de bodem gaan bufferen. Hierbij komt vrije aluminium vrij, wat zorgt voor aluminiumtoxiciteit in de bosbodems. Bovendien vindt er onder dergelijk zure condities weinig afbraak plaats van strooisel waardoor dit zich ophoopt tot dikke strooiselpakketten. Er komen vanuit de strooisellaag weinig voedingstoffen direct beschikbaar voor kruiden, struiken en bomen. Ook vindt weinig nitrificatie plaats, waardoor het toxische ammonium de dominante vorm van stikstof is. Dit zorgt ervoor dat voornamelijk in naalddhoutopstanden weinig ondergroei aanwezig is.

4.7.2 Advies

Het advies is als volgt opbouwt:

1. Hydrologisch herstel
2. Herstellen bodembuffering/ bestrijden bodemverzuring
3. Bosomvorming naar bomen die aansluiten op standplaatscondities in het systeem

4.7.2.1 *Hydrologisch herstel*

Binnen het gebied zijn in droge jaren zeer grote waterstandsfluctuaties aanwezig. Om stabielere condities te creëren is een verhoging van de laagste grondwaterstand (GLG) in het regionale systeem (WVP II) noodzakelijk. Hierbij is het van belang dat maatregelen niet zorgen voor een verhoging van de hoogste grondwaterstand (GHG) zonder dat de laagste grondwaterstand (GLG) wordt verhoogd. Een hogere GHG zonder verhoging van de GLG zorgt namelijk voor een verhoging van de extremen, wat niet voordelig is voor boomgroei.

Hoe de GLG in WVP II precies verhoogd kan worden valt buiten de scope van dit onderzoek. Interne maatregelen zoals het verondiepen van rabatten of opstuwen van watergangen hebben mogelijk een effect, maar voor een verhoging van de GLG zijn ook maatregelen buiten het gebied nodig. Het liefst gebeurt het verhogen van de (laagste) grondwaterstand stapsgewijs om grootschalige boomsterfte en in het bijzonder eikensterfte te voorkomen.

4.7.2.2 *Herstellen bodembuffering/ bestrijden bodemverzuring*

Om de basenverzadiging in het gebied te verbeteren en aluminium- en ammoniumtoxiciteit te verminderen adviseren we bufferstoffen toe te dienen. Kalk (dolokalk) wordt afgeraden omdat hiermee de kans op verzuuring te groot is, net als de kans op het ontwikkelen van onnatuurlijk rijke omstandigheden op de van nature uitgeloopte laarpodzolen/ veldpodzolgronden.

Een betere manier om de veldpodzolen terug te brengen naar een natuurlijkere basenverzadiging is door het toedienen van steenmeel. Het toepassen van steenmeel is maatwerk. In het Lycklamabos zijn significant lagere organische stofgehalten dan in Slotplaats Bakkeveen en daarmee samenhangend minder bindingsplaatsen (lagere CEC). De kleinere hoeveelheid bindingsplaatsen in het Lycklamabos zijn significant meer opgevuld met basische kationen (voornamelijk magnesium) en minder met aluminium. Ook zijn de fosfaatconcentraties relatief hoog waardoor er waarschijnlijk geen limitatie is van fosfaat. Er is dus een minder reactief steenmeel nodig om de basenverzadiging en Al/Ca ratio te verbeteren dan in Slotplaats Bakkeveen. Daarom adviseren we om Eifelgold of Soilfeed toe te passen met een doses van 10 ton/ha. Eifelgold zal sneller zorgen voor een betere bodembuffering op de zeer korte termijn (1,5 jaar), maar na enkele jaren is er weinig verschil aanwezig na toediening van beide type steenmeel (Weijters et al., 2023). Door één van deze steenmeeltypen toe te passen, is het risico op verzuuring in vergelijking met Biolit veel kleiner.

De hoogste prioriteit voor het toedienen van steenmeel ligt in monotone naalldhoutopstanden. Daarna hebben lagere kommen voorrang vanwege de vaak zeer slechte vitaliteit van Zomereiken op deze locaties. Vervolgens is het goed om te kijken naar delen van het gebied met de laagste basenverzadiging en hoogste Al/Ca ratio's (**Figuur 4-22**) voordat naar andere opstanden wordt gekeken. Het is niet verstandig om steenmeel vlakdekkend in het gebied te toe te passen, omdat niet alle (negatieve) effecten bekend zijn. Beter is om steenmeel kleinschalig toe te passen bijvoorbeeld op opstandniveau.

4.7.2.3 *Bosomvorming*

Soorten

Door de relatief hoge organische stofgehalten en matig fijne korrelgrootte van het zand, behoren de aangetroffen bossen niet tot de meest arme bossen. Echter verwachten we niet dat op de van nature relatief uitgeloogde laar/ -veldpodzolgronden boomsoorten van rijke omstandigheden kunnen groeien (zoals Winterlinde, Zoete kers, Haagbeuk). De verwachting is dat voornamelijk de zogeheten “kwartiermakers” goed zullen groeien. Dit zijn Ruwe Berk, Ratelpopulier, Lijsterbes en Sporkehout. Dit zijn pioniersoorten met relatief goed afbreekbaar strooisel, waardoor basische kationen snel opnieuw beschikbaar in de bodem kunnen komen en daardoor bijdragen aan een betere bodembuffering (De Bosgroepen, 2023) (**Tabel 4-1**).

In de lagere kommen (zie **Figuur 4-22** voor locaties) kunnen enkele andere soorten groeien. Vanwege de nattere omstandigheden, in combinatie met lemige zandlagen in de toplaag, verwachten we dat Zachte berk, Boswilg, Grauwe wilg en/ of Geoorde wilg, Hazelaar, Gelderse roos, Meidoorn en Gewone Vlier hier kunnen groeien. Op Hazelaar na zijn deze soorten rondom het projectgebied ook al autochtone struik gevonden (Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, z.d.). Dit zijn soorten die relatief goed bestand zijn tegen vernattingsmaatregelen.

De hogere zandkoppen in het zuidwesten van het gebied zijn nu geschikt om boomsoorten van de drogere omgeving aan te planten omdat waterstanden niet hoger dan 1,5 meter onder maaiveld komen. Echter adviseren we om dit niet te doen. Wanneer vernattingsmaatregelen gaan plaatsvinden verwachten we dat snel een hogere opbolling in het dekzandpakket zal plaatsvinden. Dan zullen standplaatscondities ontstaan die niet geschikt zijn voor boomsoorten van de droge omgeving.

Werkwijze bosomvorming

Het advies is om in te zetten op een geleidelijk omvormbeheer van naalddhout en Zomereiken naar een bos met de bovenstaande boomsoorten door open gaten te maken. De prioriteit ligt in de opstanden waar we ook Eifelgold/ Soilfeed adviseren. Hier kunnen gaten van één of twee keer de boomhoogte worden gemaakt, waardoor meer licht op de bodem kan vallen. Als aanvulling hierop kunnen de Grove dennen die tussen de Zomereiken staan worden geringd. Op deze manier blijft staand dood hout aanwezig in het bos, maar ontstaat wel ruimte voor de bovengenoemde soorten.

De hiervoor beschreven (pionier)soorten zullen het best kiemen op een kale bodem. Het is een terugkerend dilemma of de strooiselpakketten uit naalddhoutopstanden moeten worden weggehaald of niet. Wanneer het volledige strooiselpakket weggehaald wordt, zullen veel (nog niet voor planten beschikbare) voedingstoffen uit het systeem verdwijnen en verarmt het bos verder. Bij het laten liggen van dikke strooiselpakketten, zal minder kieming optreden, zeker wanneer op die locatie geen steenmeel wordt toegevoegd. Ook kan er in de toekomst nog veel zuur vrijkomen bij de afbraak van zure naalden. Om de aanwezige voedingstoffen in het bos te houden, maar wel een betere uitgangssituatie te creëren voor nieuwe boom- en struiksoorten, adviseren we om de onderste centimeters van de strooisellaag te laten liggen. Het bovenste deel, wat vooral bestaat uit grover strooisel, wordt dan afgevoerd. De onderkant van de strooisellaag (FH-horizont) blijft liggen omdat in deze horizont vaak nog veel voor planten beschikbare basische kationen aanwezig zijn, vaak meer dan in de toplaag van de bodem. Op deze bodem kan steenmeel worden toegediend.

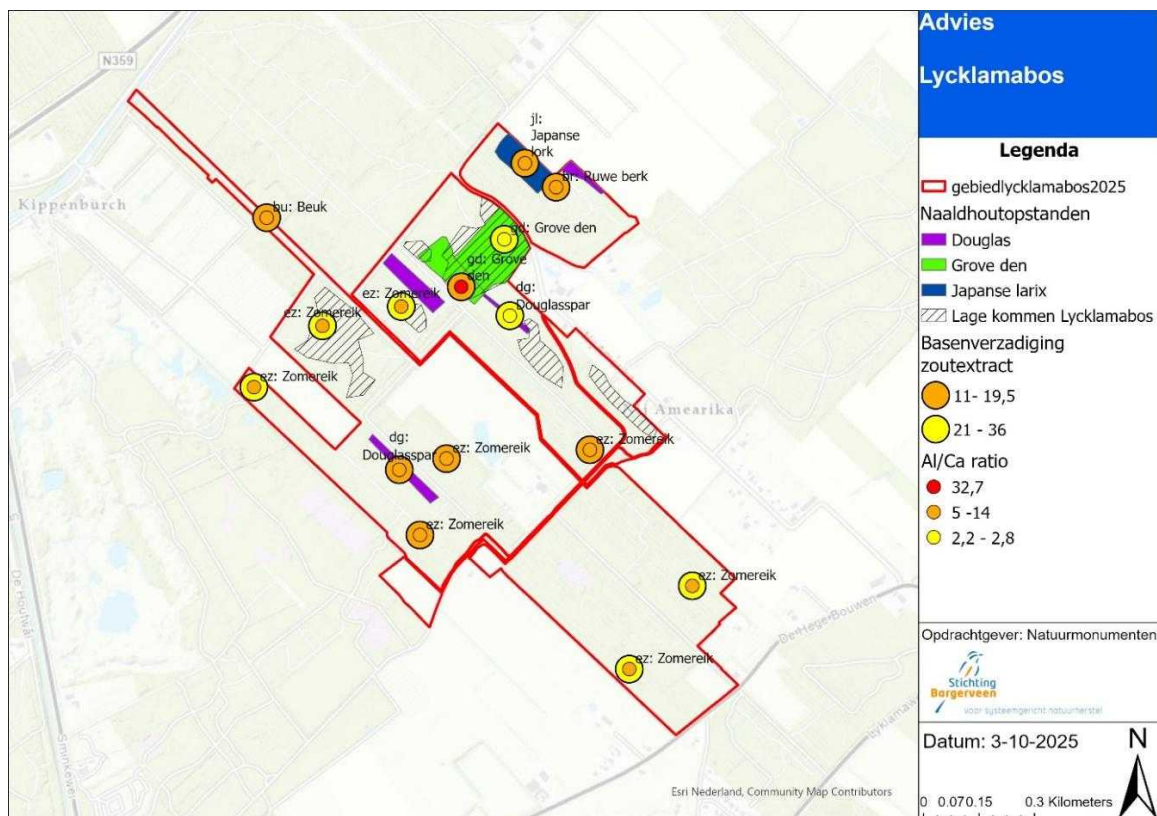
Het is op basis van de huidige kennis lastig te voorspellen of hiermee overal de juiste loofboomsoorten zullen kiemen. Mogelijk kiemen loofbomen makkelijker op een kale bodem. Daarom adviseren we op enkele locaties de bodem te bewerken met een bosfrees

voordat steenmeel wordt toegediend. Een diepte van vijf centimeter plus de strooisellaag is voldoende. Monitoring van deze opstanden zal binnen enkele jaren laten zien waar de beste verjonging plaatsvindt. Monitoring van de open gaten is ook nodig om verjonging van naaldbomen op tijd te signaleren. Beheer hierop kan nodig zijn om loofbomen ruimte te geven. Afhankelijk van de wilddruk kan het aanbrengen van een raster rondom de verjongingsgaten noodzakelijk zijn.

Door deze werkwijze zal weinig aanplant nodig zijn. Aanplant van Ratelpopulier is echter gewenst vanwege trage verjonging in open gaten in bossen, waarschijnlijk omdat de soort zeer veel licht nodig heeft voor de kieming. Verder zouden Hazelaar, Gelderse roos, Eenstijlige meidoorn en Gewone vlier in de lagere delen kunnen worden aangeplant, vanwege het weinige voorkomen van de soorten nu. Bij de aanplant is het van belang in ieder geval vijf individuen naast elkaar aan te planten om de kans te vergroten dat er één van de vijf bomen later als zaadboom/-struik gaat functioneren. Bij aanplant is het ook van belang voor autochtone exemplaren te kiezen en wildbescherming aan te brengen.

Tabel 4-1. Inheemse boomsoorten en struiken (die tenminste 2000 jaar in Nederland zijn) die in de toekomst geschikt worden geacht te groeien in het Lycklamabos en waarvan het strooisel (relatief) makkelijk wordt afgebroken. Hierbij is rekening gehouden met toekomstige vernattingsmaatregelen en klimaatverandering (zie voor toelichting over soorten zie De Bosgroepen (2023) en Nyssen et al. (2023).

Standplaats	Boomsoorten	Struiken
Hogere tot lagere delen: kunnen door het hele gebied staan	Ruwe berk (<i>Betula pendula</i>)	Sporkehout (<i>Frangula alnus</i>)
	Ratelpopulier (<i>Populus tremula</i>)	Wilde lijsterbes (<i>Sorbus aucuparia</i>)
Lagere laagten en kommen	Zachte berk (<i>Betula pubescens</i>)	Hazelaar (<i>Corylus avellana</i>)
	Boswilg (<i>Salix caprea</i>)	Gelderse roos (<i>Viburnum opulus</i>)
	Geoorde wilg (<i>Salix aurita</i>) en of Grauwe wilg (<i>Salix cinerea</i>)	Eenstijlige meidoorn (<i>Crateagus monogyna</i>)
	Zwarte els (<i>Alnus glutinosa</i>)	Gewone vlier (<i>Sambucus nigra</i>)



Figuur 4-22. De prioriteit bij bosomvorming ligt ten eerste bij de naaldhoutopstanden en vervolgens bij Zomereikopstanden in de laagste delen van het gebied omdat Zomereiken hier vaak al een zeer slechte vitaliteit hebben. Daarna kan worden gekeken naar opstanden met de laagste basenverzadiging en hoogste Al/Ca ratio. Andere boom- en struiksoorten worden geadviseerd (**Tabel 4-1**) voor lage delen in het gebied.

5 Referenties

- Besselink, D., Longemann, D., Van der Werfhorst, H., Jansen, A. J. M., & Reeze, B. (2017). *Handboek ecohydrologische systeemanalyse beekdallandschappen* (STOWA-rapport No. 2017-05). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. https://www.natuurkennis.nl/Uploaded_files/Publicaties/handboek-ecohydrologische-systeemanalyse-beekdallandschappen.021812.pdf
- Bobbink, R., Bersma, H. L. T., Den Ouden, J., & Weijters, M. J. (2017). Na het zuur geen zoet?: Bodemverzuring in droog zandlandschap blijvend probleem. *Landschap*, 34(2), 61. <https://edepot.wur.nl/417801>
- Bregman, E., Maas, G., Makaske, B., & Meijles, E. (2015). Vormgegeven door ijs, water en wind. In T. Spek, H. Elerie, J. P. Bakker, & I. Noordhoff (Reds.), *Landschapsbiografie van de Drentsche Aa* (pp. 18-53). Koninklijke Van Gorcum BV.
- Buijsman, E. (2008). [Yesterday, today, tomorrow. A retrospective look at the acid rain problem]. | Gisteren, vandaag, morgen. Een terugblik op het probleem van de zure regen. *Studium*, 1(4), 251-268.
- Centraal Bureau voor de Statistiek, Planbureau voor de Leefomgeving, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, & Wageningen University & Research. (2024). *Stikstofdepositie, 1990-2020 (indicator 0189, versie 20, 20 februari 2024)*. Centraal Bureau voor de Statistiek, Planbureau voor de Leefomgeving, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Wageningen University & Research. Geraadpleegd op 24 juni 2024, van <https://www.clo.nl/indicatoren/nl018920-stikstofdepositie-1990-2022>
- Cronan, C. S., & Grigal, D. F. (1995). Use of Calcium/Aluminum Ratios as Indicators of Stress in Forest Ecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 24(2), 209. <https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400020002x>
- De Bosgroepen. (2023). *Naar een gezonde bosgroeiplaats: Inbrengen rijkstrooiselsoorten*. https://bosgroepen.nl/documents/134/Inbrengen_rijkstrooiselsoorten_-_versie_november_2023.pdf
- De Goede, A. F., Van 't Hullenaar, J. W., & Altenburg, W. (1999). *Onderzoek naar anti-verdrogingsmaatregelen in de Bakkeveensterbossen* [Niet-gepubliceerd rapport](A&W-rapport 212). Altenburg & Wymenga en Hullenaar Ecohydrologisch Adviesbureau.
- De Schrijver, A., Wuyts, K., Schelfhout, S., Staelens, J., Verstraeten, G., & Verheyen, K. (2012). Verzuring van terrestrische ecosystemen: oorzaken, remedies en gevolgen voor biodiversiteit. *Natuur.focus*, 11(4), 136. https://www.natuurpunt.be/sites/default/files/documents/publication/natuur.focus_2012-4_biogeochemie_1_verzuring_van_terrestrische_ecosystemen.pdf
- Dekker, L. W., Booij, A. H., & Ritsema, C. J. (1997). IJzerbanden en ijzerwanden in onze zanden: de samenhang ervan met de stroming van water. *Stromingen*, 3(2), 29-40. <https://edepot.wur.nl/10116>.
- Dijk, H. F. G. V., Creemers, R. C. M., Rijniers, J. P. L. W. M., & Roelofs, J. G. M. (1989). Impact of Artificial Ammonium-enriched Rainwater on Soils and Young Coniferous Trees in a Greenhouse. Part I-Effects on the Soils. *Environmental Pollution*, 62, 317-336. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(89\)90151-6](https://doi.org/10.1016/0269-7491(89)90151-6)
- Douwes, R. (2009). *Natuurvisie 2008-2026: Lycklamabos* [Niet-gepubliceerd rapport]. Natuurmonumenten.
- Jongmans, A. G., Van den Berg, M. W., Sonneveld, M. P. W., Peek, G. J. W. C., & Van den Berg van Saparoea, R. M. (2015). *Landschappen van Nederland: Geologie, Bodem en Landgebruik* (Tweede, herziene druk ed.). Wageningen Academic Publishers.

- Koster, E. (2015). Geologie van gaast en klif. *Grondboor & Hamer*, 69(4), 144.
https://natuurtijdschriften.nl/pub/1020038/G-H2015nr4_art427-Koster-Gaasterland.pdf
- Makaske, B., Maas, G., Grootjans, A. P., Meijles, E., Everts, F. H., & De Vries, N. P. J. (2015). Veen verschijnt en verdwijnt. In T. Spek, H. Elerie, J. P. Bakker, & I. Noordhoff (Reds.), *Landschapsbiografie van de Drentsche Aa* (pp. 54-81). Koninklijke Van Gorcum BV.
- Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit. (2023). *Bodemkaart van Nederland 1:50.000*. Wageningen Environmental Research. <https://www.pdok.nl/introductie/-/article/bro-bodemkaart-sgm->
- Natuurmonumenten. (2022). *Gebiedsvisie De Slotplaats 2022-2040* [Niet-gepubliceerd rapport]. Natuurmonumenten.
- Natuurmonumenten. (z.d.). *Onze visie*. Natuurmonumenten. Geraadpleegd op 23 april 2025, van <https://www.natuurmonumenten.nl/visie>
- Nyssen, B., Den Ouden, J., Tomassen, E. A. H., Verheyen, K., & Muys, B. (2023). Ingeburgerde bomen in klimaatslim bos. *De Levende Natuur*, 124(2), 57.
<https://www.resilias.eu/wp-content/uploads/2023/03/Nyssen-et-al-2023-Ingeburgerde-bomen-in-klimaatslim-bos-Concept.pdf>
- Olsthoorn, A. F. M., Tolkamp, G. W., & Koch, M. J. (2001). *Effecten van vernatting op de groei en vitaliteit van eik, beuk en Douglas in Rhoden, Leende en Gees*. (Alterra-rapport 276). Alterra. <https://edepot.wur.nl/82357>
- PDOK. (2023). *Digital Terrain Model (DTM) 0,5m - Kaartbladen - EPSG:28992 - Cloud Optimized Geotiff (COG)*. Geraadpleegd op 25 april 2025, van https://service.pdok.nl/rws/ahn/atom/dtm_05m.xml
- Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. (z.d.). *Groen erfgoed*. Geraadpleegd op 23 september 2025, van <https://rce.webgis.nl/nl/map/groen-erfgoed>
- Scharnweber, T., Couwenberg, J., Heinrich, I., & Wilmking, M. (2014). New insights for the interpretation of ancient bog oak chronologies? Reactions of oak (*Quercus robur* L.) to a sudden peatland rewetting. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 417, 534-543.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.10.017>
- Sevink, J. (2019). 5. Bodemvorming en hoogveen. In A. J. M. Jansen & A. P. Grootjans (Reds.), *Hoogvenen: landschapsecologie, behoud, beheer, herstel*. Uitgeverij Noordboek.
- Stouthamer, E., Cohen, K. M., & Hoek, W. Z. (2015). *De vorming van het land: Geologie en geomorfologie*. Perspectief Uitgevers.
- Ten Cate, J. A. M., Van Holst, A. F., Kleijer, H., & Stolp, J. (1995). *Handleiding bodemgeografisch onderzoek: Richtlijnen en voorschriften. Deel D: interpretatie van bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik*. DLO-Staring Centrum.
- TNO Geologische Dienst Nederland. (z.d.-a). *Dinoloket: ondergrondgegevens*. Geraadpleegd op 23 april 2025, van <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>
- TNO Geologische Dienst Nederland. (z.d.-b). *Dinoloket: ondergrondmodellen*. Geraadpleegd op 25 april 2025, van <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen/kaart>
- Ulrich, B. (1981). Ökologische Gruppierung von böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 144(3), 289.
<https://doi.org/10.1002/jpln.19811440308>
- Van Belle, J., De Graaf, M. C. C., & Van Loon, H. (z.d.). Verfijnd rangordemodell inclusief biotisch systeem en invloeden van mens en maatschappij. In: OBN Natuurkennis,.

- Van Delft, B., Cruijsen, J. J. P., Harkema, T., Knotters, M., & Dijk, P. (2024). *pH-profielen als indicator voor zuurbuffering in de bodem* (Report No. 3336). Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/640483>
- Van der Molen, P. C., Baaijens, G. J., Grootjans, A. P., & Jansen, A. J. M. (2010). *LESA: Landschapsecologische Systeemanalyse*. <https://edepot.wur.nl/345262>
- Van Heuveln, B. (1991). Bodem onder de heide. In *Heide Nr.1*. Noorderbreedte.
- Van Schuylenborgh, J., & Bruggewert, M. G. M. (1965). On soil genesis in temperate humid climate. V. The formation of the "albic" and "spodic" horizon. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 13(3), 267-279. <https://doi.org/10.18174/njas.v13i3.17483>.
- Van Wirdum, G. (1991). *Vegetation and hydrology of floating rich-fens* [PhD-thesis, Rijksuniversiteit Amsterdam]. Maastricht. https://www.ecologischeautoriteit.nl/projectdocumenten/013386_5066_Van_Wirdum-1990-. Thesis -doctoral- -Universiteit van Amsterdam-. Vegetation and hydrology of floating rich-fens. .pdf
- Versluijs, R., Diepeveen, I., & Jansen, A. J. M. (2023). *Onderzoek en herstel Armveen en Meeuwenkolonie op het Holtingerveld: Landschapsecologische systeemanalyse t.b.v. herstel- en beheermaatregelen* [Niet-gepubliceerd rapport]. Stichting Bargerveen.
- Vogels, J. J., Possen, B. J. H. M., Nijssen, M., & Versluijs, R. (2023). *Bodemkwaliteit en -herstel Friese natuurgebieden* [Niet-gepubliceerd rapport]. Stichting Bargerveen. Wageningen Environmental Research. (z.d.). *Bodemdata.nl*. Geraadpleegd op 26 september 2025, van <https://bodemdata.nl/basiskaarten>
- Weijters, M. J., Bohnen-Verbaarschot, E., Vogels, J. J., Smits, L., Van de Riet, B., Siepel, H., Verbruggen, E., Emsens, W., Brouwer, E., & Bobbink, R. (2023). *Herstel van droge- en vochtige heide door middel van silicaatmineralen (steenmeel). Resultaten van negen jaar steenmeelonderzoek* (OBN-2019-109-DZ). <https://edepot.wur.nl/638956>
- Wellbrock, N., & Bolte, A. (2019). *Status and dynamics of forests in Germany: results of the national forest monitoring*. Springer Nature.

6 Bijlagen

- Bijlage 1. Ontstaan vochtige heiden/ heideveentjes op verkitte podzol-B horizonten
- Bijlage 2. Uitkomsten statistische toetsen pH-Veld, pH-zout en pH-water Slotplaats Bakkeveen en Lycklamabos
- Bijlage 3. Uitkomsten statistische toetsen binnen van de belangrijkste bodem chemische variabelen met uitzondering van pH
- Bijlage 4. Voorbeeld vergraven bodemprofiel met organische stof diep in het profiel
- Bijlage 5. Rangordemodel LESA

Bijlage 1. Ontstaan vochtige heiden/ heideveentjes op verkitte podzol-B horizonten

In het ijzerrijke dekzandlandschap in Nederland is het een natuurlijk proces dat licht gebufferde bodems onder invloed van natuurlijke verzuring en een regenwateroverschot mineralen gaan uitspoelen. In eerste instantie heeft dit gezorgd voor het ontstaan van “podzolen”, zoals haarpodzolen of veldpodzolen, met bruine Bs/Bw-inspoelingshorizonten (Bobbink et al., 2017; Van Heuveln, 1991). Wanneer hei aanwezig was en werd afgebroken ontstond meer zuur. Hierdoor spoelde meer mineralen uit en ontstonden zwarte compactere Bh-horizonten met daaronder Bs/Bw horizonten.

In compacte Bh-horizonten zijn veel poriën gevuld geraakt met ingespoelde humus. Bij veel regenval raken deze poriën nog meer opgevuld door mobiele humus, waardoor een beginnende slechtdoorlatende gliedelaag ontstaat. Hierop kon water zich ophopen. Wanneer onder een veldpodzol keileem aanwezig is (**Figuur 6-1**) zal dit proces worden versneld omdat hoge waterstanden kunnen zorgen voor meer inspoeling van mobiele humus.

Wanneer B-horizonten deels verkit zijn en water ophoopt ontstaan zuurstofloze condities en wordt ijzer uit het dekzand mobiel. Het ijzer slaat geoxideerd neer, in de vorm van een slechtdoorlatend ijzerbandje/ placic, op de grens van de Bh-horizont en de meer zuurstof bevattende Bs/Bw- horizont (Dekker et al., 1997). Hierna vinden de volgende processen naast elkaar plaats:

- Door afbraak van wortels op het ijzerbandje, die giftig is voor planten, neemt het organische stofgehalte van de Bh-horizont aanzienlijk toe (Van Schuylenborgh & Bruggewert, 1965);
- Onder de vochtige, wisselnatte condities kan meer mobiele humus inspoelen waardoor de (gliedelaag in de) Bh-horizont nog meer verstopt raakt (Sevink, 2019);
- Onder natte condities wordt het doorgraven en verplaatsen van grond door organismen (bioturbatie) sterk geremd, waardoor de Bh-horizont steeds compacter wordt (Sevink, 2019).

De Bh-horizont wordt hierdoor nog slechter doorlatend waardoor permanent natte omstandigheden ontstaat. Op locaties waar nog geringe wegzijging plaatsvindt zal opgeloste ijzer en aluminium in de meer zuurstof bevattende en lageregelegen Bs/Bw- horizont neerslaan. Hierdoor ontstaat een dikke verkitte podzol- B horizont die zich kan ontwikkelen tot een kom waarop vochtige heiden/ heideveentjes liggen met stabiele waterstanden (30-40 cm fluctuatie). In deze systemen is vaak ook de uitspoelingslaag (E) en humuslaag (Ah) verkit geraakt met gliede (**Figuur 6-2**) (Versluijs et al., 2023). Al zal dit laatste in Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos minder hebben plaatsgevonden in de bosbodem, maar wel binnen de pingo's waarin veen verdroogd is geraakt.



Figuur 6-1. Verkitten podzol B-horizont met lichte gliedeinspoeling bovenop keileem (Foto's: S.M.P. Meulepas).



Figuur 6-2. Gliedeinspoeling in zowel de Ah, E als een deel van de Bh. Het profiel is vrijwel tot de gliede afgegraven en overstoven geraakt (Versluijs et al., 2023).

Bijlage 2. Uitkomsten statistische toetsen pH-Veld, pH-zout en pH-water Slotplaats Bakkeveen en Lycklamabos

Binnen Slotplaats Bakkeveen zijn de verschillen tussen hoge en lage delen getoetst. Binnen Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos zijn de verschillen tussen naald- en loofhout getoetst. Ten slotte zijn de verschillen tussen gebieden getoetst (zie ook *Hoofdstuk 2*).

In deze bijlage worden schermafbeeldingen van R weergegeven van de uitkomsten van de toetsingen. De resultaten zijn als volgt opgebouwd: als eerst is in de kolom "diepte" zichtbaar. Diepte: 0, 10, 20, 30, 40, 50 en 100 zijn pH-veld metingen. Diepte "999" is pH-water of pH-zout in het 0-40 mengmonster van de bodem. C-horizonten (100 cm) zijn niet meegenomen in de toetsing omdat hiervoor te weinig metingen zijn (twee per gebied). De "test" is bepaald nadat voor normaliteit is getoetst. In kolom "Normaliteit_p" of "Shapiro_..." staan de uitkomsten van de normaliteitstoets. "Test_P" is de P-waarde. "Mean_diff" is het gemiddelde verschil tussen de twee groepen. Voor de vergelijking tussen de gebieden is het gemiddelde ("Mean_...") per gebied weergegeven. "N_..." is het aantal waarnemingen per groep. "Hogere_..." staat geeft aan welke "groep" een hoger gemiddelde heeft is als deze significant is, anders is "NA" weergegeven.

Verschillen tussen hoog en laag Slotplaats Bakkeveen

pH-zout 0-40 voor diepte "999":

```
> print(resultaten)
# A tibble: 8 x 7
  Diepte Test Normaliteit_p Test_p Mean_diff N Hogere_pH
  <dbl> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <int> <chr>
1 0 Wilcoxon signed-rank test 0.0373 1 0 9 NA
2 10 Wilcoxon signed-rank test 0.0373 1 0 9 NA
3 20 paired t-test 0.0810 1 0 9 NA
4 30 Wilcoxon signed-rank test 0.00521 0.299 0.167 9 NA
5 40 Wilcoxon signed-rank test 0.000463 0.182 0.222 9 NA
6 50 Wilcoxon signed-rank test 0.000153 0.149 -0.167 9 NA
7 100 Wilcoxon signed-rank test 0.0233 0.233 0.167 9 NA
8 999 paired t-test 0.764 0.0208 0.198 9 Hoog
```

pH-water 0-40 voor diepte "999":

```
8 999 paired t-test 0.569 0.0359 0.177 9 Hoog
```

Verschillen tussen naald- en loofhout in Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos

pH-zout 0-40 voor diepte "999":

```
> print(resultaten_loof_naald)
# A tibble: 16 x 10
  Diepte Gebied Test Shapiro_Loof_p Shapiro_Naald_p Test_p Mean_diff N_Loof N_Naald Hogere_pH
  <dbl> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <int> <int> <chr>
1 0 Slotplaats Mann-Whitney U-test 0.00135 0.000125 1 0 6 12 NA
2 0 Lycklamabos Mann-Whitney U-test 0.00849 0.00647 0.945 0 10 5 NA
3 10 Slotplaats Mann-Whitney U-test 0.00404 0.000234 0.786 0.0417 6 12 NA
4 10 Lycklamabos Mann-Whitney U-test 0.00374 0.314 0.780 0.05 10 5 NA
5 20 Slotplaats Mann-Whitney U-test 0.0000207 0.0119 0.432 -0.125 6 12 NA
6 20 Lycklamabos Mann-Whitney U-test 0.000169 0.000131 0.501 0.1 10 5 NA
7 30 Slotplaats Mann-Whitney U-test 0.0000207 0.00626 0.513 -0.0833 6 12 NA
8 30 Lycklamabos Mann-Whitney U-test 0.00000467 0.00647 0.155 0.2 10 5 NA
9 40 Slotplaats Mann-Whitney U-test 0.00135 0.00626 0.957 0 6 12 NA
10 40 Lycklamabos Mann-Whitney U-test 0.00000467 0.00647 0.155 0.2 10 5 NA
11 50 Slotplaats Mann-Whitney U-test 0.0000207 0.00000981 1 0 6 12 NA
12 50 Lycklamabos Constante waarden NA NA NA 0.2 10 5 NA
13 100 Slotplaats Mann-Whitney U-test 0.00135 0.000234 0.359 0.125 6 12 NA
14 100 Lycklamabos Constante waarden NA NA NA 0.25 10 5 NA
15 999 Slotplaats T-test 0.197 0.100 0.0392 -0.192 6 12 Naald
16 999 Lycklamabos T-test 0.838 0.579 0.386 0.119 10 5 NA
```

pH-water 0-40 voor diepte "999":

```
15 999 Slotplaats T-test 0.212 0.0761 0.551 -0.0475 6 12 NA
16 999 Lycklamabos T-test 0.729 0.112 0.220 0.167 10 5 NA
```

Verschillen tussen Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos

pH-zout 0-40 voor diepte "999":

```
> print(resultaten_gebieden)
# A tibble: 8 x 10
  Diepte Test Normaliteit_Slotplaats Normaliteit_Lycklamabos Test_p Mean_Slotplaats Mean_Lycklamabos N_Slotplaats N_Lycklamabos Hogere_pH
  <dbl> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 0 Mann-Whitney U-t. 0.00000688 0.00122 0.218 3.17 3.3 18 15 NA
2 10 Mann-Whitney U-t. 0.0000264 0.00277 0.0581 3.22 3.43 18 15 NA
3 20 Mann-Whitney U-t. 0.000018 0.0000274 0.107 3.5 3.67 18 15 NA
4 30 Mann-Whitney U-t. 0.0000247 0.0000274 0.0532 3.64 3.83 18 15 NA
5 40 Mann-Whitney U-t. 0.0000111 0.0000274 0.104 3.67 3.83 18 15 NA
6 50 Mann-Whitney U-t. 0.000000147 0.000000753 0.816 3.92 3.93 18 15 NA
7 100 Mann-Whitney U-t. 0.0000183 0.00000454 0.185 4.25 4.17 18 15 NA
8 999 Mann-Whitney U-t. 0.0431 0.280 0.0271 3.18 3.38 18 15 Lycklamabos
# | abbreviated name: 'Normaliteit_Lycklamabos'
```

pH-water 0-40 voor diepte "999":

```
999 T-test 0.136 0.765 7.14e-4 3.94 4.19 18 15 Lycklamabos
```

Bijlage 3. Uitkomsten statistische toetsen binnen van de belangrijkste bodem chemische variabelen met uitzondering van pH

Binnen Slotplaats Bakkeveen zijn de verschillen tussen hoge en lage delen getoetst. Binnen Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos zijn de verschillen tussen naald- en loofhout getoetst. Ten slotte zijn de verschillen tussen gebieden getoetst (zie ook *Hoofdstuk 2*).

In deze bijlage worden schermafbeeldingen van R weergegeven van de uitkomsten van de toetsingen. De resultaten zijn als volgt opgebouwd: als eerst is in de kolom "Variabele" zichtbaar. CEC_{meq} is de Cation Exchange Capacity op basis van het zoutextract, BS_{percent} is de basenverzadiging op basis van het zoutextract. Al/Ca ratio is ook op basis van het zoutextract. LOI (% organische massa) is het % organische stof. De overige variabelen wijzen voor zich. FW staat voor versgewicht. ZE voor zoutextract.

"Test" is de test die is bepaald nadat voor normaliteit is getoetst. In kolom "Normaliteit_p" staan de uitkomsten van de normaliteitstoets. "Test_P" is de P-waarde. "Mean_diff" is het gemiddelde verschil tussen de twee groepen. "N..." is het aantal waarnemingen per groep. "Hogere..." staat geeft aan welke "groep" een hogere gemiddelde heeft is als deze significant is, anders is "NA" weergegeven. Met "Normaliteit p1" of "N1" wordt de eerstgenoemde variabele binnen "Context bedoeld". De tweede genoemde variabele is "p2" "N2".

```
> print(results_hooglaag_slotplaats)
# A tibble: 10 x 8
```

Variabele	Context	Test	Normaliteit_p	Test_p	Mean_diff	N	Hogere
<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<int>	<chr>
1 CEC _{meq}	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.675	0.0200	-1.62	9	Laag
2 BS _{percent}	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.486	0.633	1.38	9	NA
3 Al _{Ca} ratio	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.658	0.934	0.409	9	NA
4 LOI (% organische massa)	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.981	0.000125	-4.13	9	Laag
5 Ca (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.740	0.881	13.4	9	NA
6 Mg (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.193	0.690	-18.0	9	NA
7 K (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.676	0.537	-24.7	9	NA
8 Al (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.679	0.0350	-432.	9	Laag
9 Ammonium (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Hoog vs Laag	paired t-test	0.962	0.395	-45.5	9	NA
10 P _{olsen}	Slotplaats: Hoog vs Laag	Wilcoxon signed-rank test	0.00331	0.477	12.3	9	NA

```
> print(results_loof_naald_slot)
# A tibble: 10 x 10
```

Variabele	Context	Test	Normaliteit_p1	Normaliteit_p2	Test_p	Mean_diff	N1	N2	Hogere
<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<int>	<int>	<chr>
1 CEC _{meq}	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.544	0.985	0.598	-0.467	6	12	NA
2 BS _{percent}	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.266	0.801	0.00592	7.23	6	12	Loof
3 Al _{Ca} ratio	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.355	0.638	0.00572	-10.1	6	12	Naald
4 LOI (% organische massa)	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.283	0.267	0.769	0.387	6	12	NA
5 Ca (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Loof vs Naald	Mann-Whitney U-test	0.843	0.0243	0.101	122.	6	12	NA
6 Mg (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.734	0.977	0.0678	110.	6	12	NA
7 K (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.595	0.189	0.0451	81.7	6	12	Loof
8 Al (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.827	0.993	0.0998	-428.	6	12	NA
9 Ammonium (µmol/l) FW ZE	Slotplaats: Loof vs Naald	T-test	0.289	0.862	0.0116	134.	6	12	Loof
10 P _{olsen}	Slotplaats: Loof vs Naald	Mann-Whitney U-test	0.00657	0.0647	0.743	94.9	6	12	NA

```
> print(results_loof_naald_lyck)
# A tibble: 10 x 10
```

Variabele	Context	Test	Normaliteit_p1	Normaliteit_p2	Test_p	Mean_diff	N1	N2	Hogere
<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<int>	<int>	<chr>
1 CEC _{meq}	Lycklamabos: Loof vs Naald	T-test	0.0809	0.491	0.644	-0.285	10	5	NA
2 BS _{percent}	Lycklamabos: Loof vs Naald	T-test	0.999	0.263	0.985	-0.0963	10	5	NA
3 Al _{Ca} ratio	Lycklamabos: Loof vs Naald	Mann-Whitney U-test	0.00643	0.0919	0.951	-4.16	10	5	NA
4 LOI (% organische massa)	Lycklamabos: Loof vs Naald	Mann-Whitney U-test	0.0000674	0.541	0.0574	-0.366	10	5	NA
5 Ca (µmol/l) FW ZE	Lycklamabos: Loof vs Naald	T-test	0.126	0.366	0.514	-98.1	10	5	NA
6 Mg (µmol/l) FW ZE	Lycklamabos: Loof vs Naald	Mann-Whitney U-test	0.716	0.0482	0.951	-61.4	10	5	NA
7 K (µmol/l) FW ZE	Lycklamabos: Loof vs Naald	T-test	0.621	0.140	0.00877	217.	10	5	Loof
8 Al (µmol/l) FW ZE	Lycklamabos: Loof vs Naald	T-test	0.0865	0.118	0.999	0.194	10	5	NA
9 Ammonium (µmol/l) FW ZE	Lycklamabos: Loof vs Naald	Mann-Whitney U-test	0.000125	0.828	0.501	125.	10	5	NA
10 P _{olsen}	Lycklamabos: Loof vs Naald	T-test	0.191	0.410	0.855	33.2	10	5	NA

```
> print(results_gebieden)
# A tibble: 10 x 10
```

Variabele	Context	Test	Normaliteit_p1	Normaliteit_p2	Test_p	Mean_diff	N1	N2	Hogere
<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<int>	<int>	<chr>
1 CEC _{meq}	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	T-test	0.985	0.353	0.0887	1.05	18	15	NA
2 BS _{percent}	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	T-test	0.378	0.526	0.00163	-7.61	18	15	Lycklamabos
3 Al _{Ca} ratio	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	Mann-Whitney U-test	0.101	0.000104	0.0488	5.85	18	15	Slotplaats
4 LOI (% organische massa)	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	Mann-Whitney U-test	0.203	0.0000648	0.00225	2.51	18	15	Slotplaats
5 Ca (µmol/l) FW ZE	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	Mann-Whitney U-test	0.104	0.0335	0.199	-73.8	18	15	NA
6 Mg (µmol/l) FW ZE	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	T-test	0.941	0.0938	0.0244	-142.	18	15	Lycklamabos
7 K (µmol/l) FW ZE	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	Mann-Whitney U-test	0.0537	0.0397	0.416	-91.7	18	15	NA
8 Al (µmol/l) FW ZE	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	T-test	0.818	0.505	0.0134	437.	18	15	Slotplaats
9 Ammonium (µmol/l) FW ZE	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	Mann-Whitney U-test	0.823	0.0000198	0.678	-74.1	18	15	NA
10 P _{olsen}	Gebieden: Slotplaats vs Lycklamabos	Mann-Whitney U-test	0.0000357	0.135	0.000485	-355.	18	15	Lycklamabos

Bijlage 4. Voorbeeld vergraven bodemprofiel met organische stof diep in het profiel

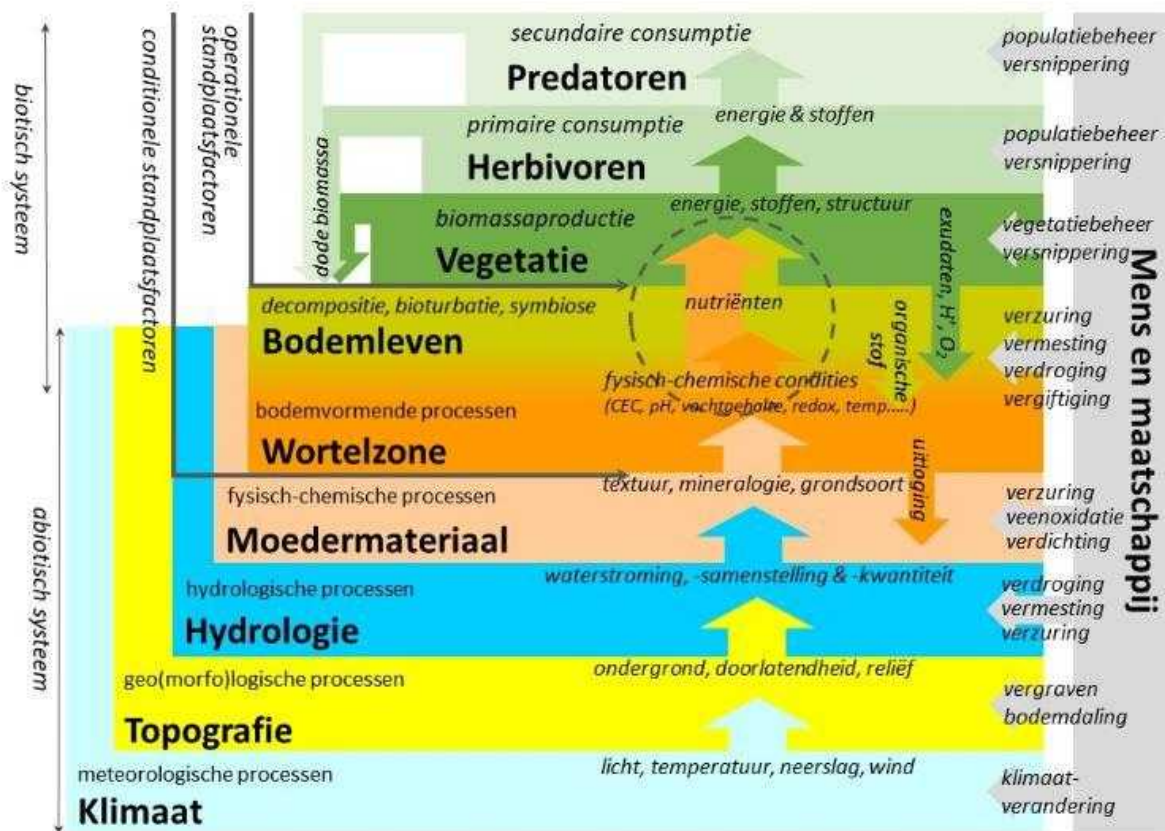
In vergraven profielen zoeken boomwortels dieper gelegen organische stof op. Hierdoor is het belangrijkste deel van de boomwortels niet meer gelegen in de top van de bodem, maar lager in de bodem. Bij vernatting bestaat een groot risico op zuurstofgebrek in deze wortels (Olsthoorn et al., 2001). In Slotplaats Bakkeveen en het Lycklamabos is geregeld organische stof diep in het profiel gevonden. Een profiel dat dit goed laat zien is nummer 15 (**Figuur 6-3**). Dit profiel is een uitzondering: nergens zijn zulke grote tegenstelling gevonden tussen weinig organische stof hoog in het profiel en meer organische stof lager in het profiel. Echter laat dit profiel de effecten van omploegen goed zien.

Op de foto komt de bodem in de eerste rij links overeen met een diepte van 0 cm en rechts op de eerste rij met een diepte van 40 cm. Links op de tweede rij komt de bodem overeen met een diepte van 40 cm, rechts op de tweede rij met een diepte van 80 cm, enzovoort. Organische stof die eerst aan maaiveld aanwezig was, is nu dus voornamelijk te vinden op een diepte van 80 cm onder maaiveld. Op 70 cm is een grijze E te zien. Het profiel van 0-80 lijkt dus in zijn geheel omgedraaid, met recente organische stof ontwikkeling in de 0-10 cm bodem. Bij vernatting tot 70 cm onder maaiveld zullen de Douglassen het in deze opstand moeilijk gaan krijgen.



Figuur 6-3. Ompgeploegde bodem (Foto's: S.M.P. Meulepas).

Bijlage 5. Rangordemodel LESA



(Van Belle et al., z.d.)