



Provinciaal Inpassingsplan RegioExpres

Toelichting bijlage 21

**Natuur: GNN bijlage Biogeochemisch
onderzoek**



Biochemisch onderzoek Landgoed Stilliwald

Maarten van Doorn

Romke Postma

Debby van Rotterdam

Dirk Thijssen

Referaat

Maarten van Doorn, Romke Postma, Debby van Rotterdam & Dirk Thijssen, 2023, Biochemisch onderzoek Landgoed Stilliwald, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1981.N.23, pp 29.

Rapport in het kort

Provincie Gelderland heeft het voornemen om natuur te ontwikkelen op twee percelen in het projectgebied Landgoed Stilliwald. De specifieke wens is het vergroten van de ecologische waarde door de ontwikkeling van vochtig hooiland en droog schraalland. Dit onderzoek heeft geleid tot inzicht in de bodemsamenstelling en met name de fosfaattoestand van de bodem. Aan de hand van deze inzichten wordt advies gegeven over de inrichtingsmogelijkheden ten behoeve van het verhogen van de ecologische waarde.

© 2023 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

Tim Puts, Provincie Gelderland

digitaal

Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies	2
1 Inleiding	4
2 Opzet en uitvoering	6
2.1 Veldwerk	6
2.2 Bodemanalyses	7
2.3 Interpretatie en advies	9
3 Resultaten, interpretatie en advies	12
3.1 Algemene bodemopbouw en bodemkenmerken	12
3.2 Fosfaattoestand	16
3.3 Sturen op stikstoflimitatie op het noordoostelijk gelegen perceel	19
3.4 Grondwater	20
3.5 Inrichtingsmaatregelen	21
4 Conclusies	26
Literatuurlijst	28
Bijlage I Boorbeschrijvingen	29
Bijlage II Analyseresultaten bodem	31

Samenvatting en conclusies

De Provincie Gelderland heeft het voornemen om vochtig hooiland (N10.02) en droog schraalland (N11.01) te ontwikkelen op twee percelen in projectgebied 'Landgoed Stilliwald' bij Wehl. Het doel van het huidige onderzoek is om inzicht te krijgen in de biogeochemie in relatie tot de gewenste natuurtypen en een passende ontwikkelingsstrategie. Specifiek omvat dit het verkrijgen van inzicht in (i) de fosfaattoestand van de bodem in relatie tot de doelvegetaties en (ii) beheersmogelijkheden om de fosfaattoestand van de bodem tot een gewenst niveau te verlagen voor de beoogde natuurontwikkeling. Hierbij is naast nutriënten ook rekening gehouden met standplaatsfactoren als de vochttoestand en zuurgraad.

Op negen monsternamelocaties zijn op drie dieptes grondmonsters genomen (0-10, 10-30 en 30-50cm -mv) en op drie locaties is het freatisch grondwater bemonsterd. De grondmonsters zijn onder andere geanalyseerd op meerdere fosfaatfracties (P_{CaCl_2} , P_{AL} , P_{OX} , FVG), parameters die belangrijk zijn voor fosfaatbinding (Fe_{OX} , Al_{OX}), het organisch stofgehalte, pH, textuur en het klei-humuscomplex (CEC) met basenverzadiging. Het grondwater is onder andere geanalyseerd op de zuurgraad, conductiviteit, basische kationen en carbonaat, chloride, zwavel, stikstofverbindingen en P-totaal.

Het biochemisch onderzoek heeft tot de volgende inzichten geleid:

- De bodems zijn geclassificeerd als hydrovaaggronden (vlakvaaggronden) met uitzondering van de bodem op het hoger gelegen deel van het noordoostelijk gelegen perceel die geclassificeerd is als een xerovaaggrond (vorstvaaggrond). De algemene bodemopbouw is een bovengrond van fijn zand op een ondergrond van matig fijn tot zeer grof zand.
- De zuurgraad van de bodem is licht zuur (4.8-5.7 in de bovenste 10cm van de bodem). Op het hoger gelegen deel van het noordoostelijk gelegen perceel ligt de pH boven de streefwaarde voor de ontwikkeling van droog schraalland. Op de overige locaties ligt de zuurgraad binnen de streefwaarde voor de ontwikkeling van vochtig hooiland. Er zijn geen maatregelen nodig om de zuurgraad te verhogen of te verlagen.
- De bodems zijn door een laag organische stof- en kleigehalte (lage CEC, klei-humus-complex) gevoelig voor verzuring. Dit is met name het geval voor diepere bodemlagen waar het organisch stofgehalte lager is dan in de toplaag ($OS = 2.5-4.2\%$ in de 0-10 bodemlaag, $OS = 0.5-2.4\%$ in de bodemlagen hieronder).
- De fosfaattoestand is in het noordoostelijk gelegen perceel erg hoog, waarbij de P_{AL} in de bovenste 30cm van het noordelijke deel varieert tussen 84-151 mg P_2O_5 100g⁻¹, de FVG tussen 62-91% en de P_{CaCl_2} tussen 6.1-10.7 mg P kg⁻¹. In het zuidelijk deel van het perceel varieert P_{AL} in de bovenste 30 cm van de bodem tussen 33-38 mg P_2O_5 100g⁻¹, de FVG tussen 40-48% en P_{CaCl_2} tussen 1.8-2.6 mg kg⁻¹. Daarmee is de bovengrond niet geschikt voor de gewenste natuurontwikkeling (droog schraalland op hooggelegen kop en vochtig hooiland op het lager gelegen deel). Ook in de daaronder liggende bodemlagen is de fosfaattoestand nog hoog en daarmee veelal niet optimaal of suboptimaal voor matig voedselrijke natuur, wat de kans op een succesvolle ontwikkeling verkleint. In het zuidwestelijk gelegen perceel was de fosfaattoestand in de bovenste 30 cm veel lager (P_{AL} 10-28 mg P_2O_5 100g⁻¹, FVG 23-37% en

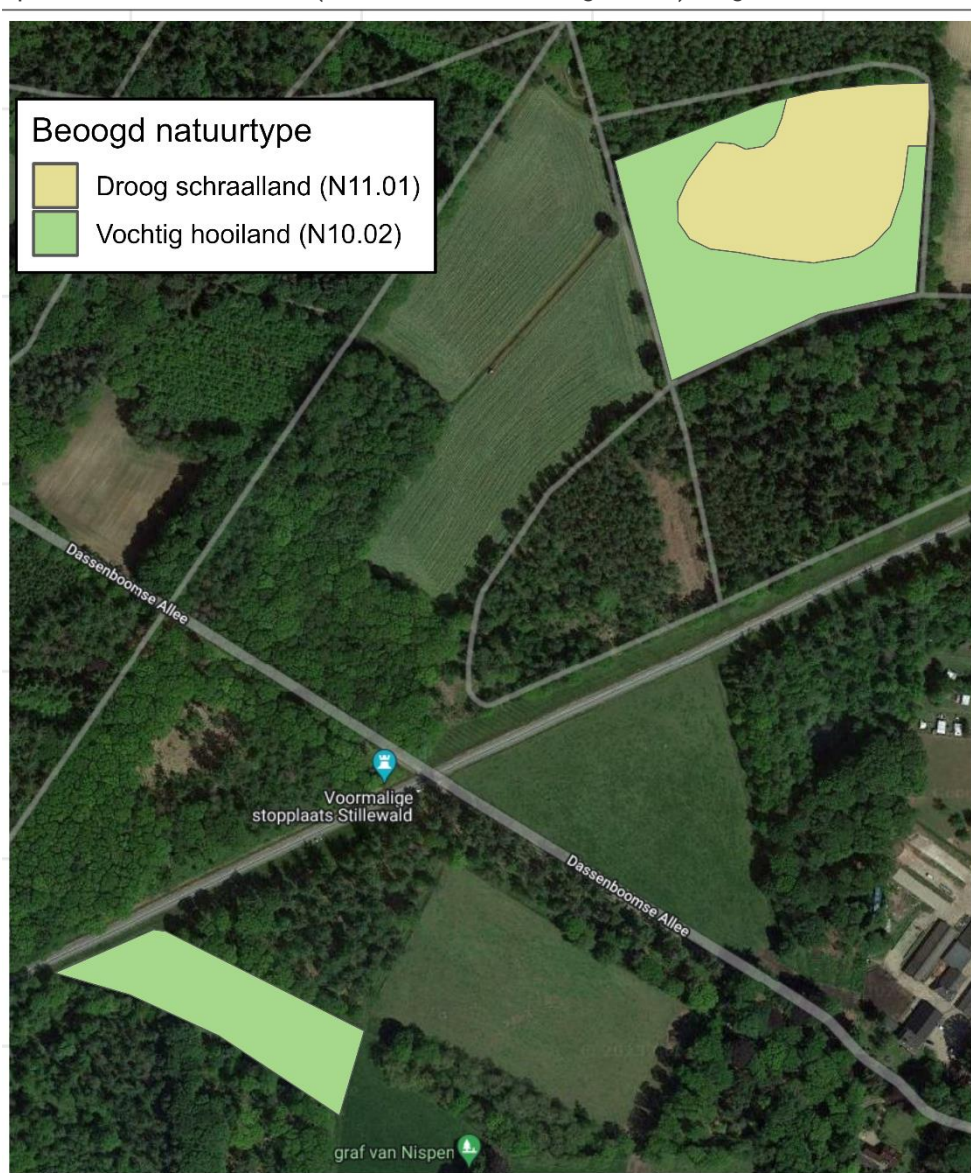
P_{CaCl_2} tussen 0.3-1.4 mg kg⁻¹) maar nog niet optimaal voor de beoogde natuur (vochtig hooiland). In bodemlagen >30 cm diepte is de fosfaattoestand wel laag genoeg.

Op basis van het biochemisch onderzoek worden de volgende adviezen gegeven, waarbij we onderscheid maken tussen het noordoostelijk en het zuidwestelijk gelegen perceel.

- Op het noordoostelijk gelegen perceel wordt droog schraalland beoogd op de hoger en centraal gelegen kop en vochtig hooiland op het lager gelegen deel daaromheen. De fosfaattoestand in de bovengrond van het gehele perceel is echter extreem hoog. Zeer ingrijpende maatregelen zijn nodig om natuur op basis van fosfaatlimitatie te ontwikkelen; een bodemlaag met een dikte van minimaal 50 cm dient afgegraven te worden. Het lijkt dan ook niet realistisch te sturen op fosfaatlimitatie. Alternatieve oplossingen zijn:
 - Het aanpassen van de natuurdoelstelling naar de ontwikkeling van kruiden- en faunarijk grasland (na afgraven van de bovenste 30 cm) of structuurrijk bos of
 - Afgraven van de bovenste 10cm tot 30cm van de bodem en vervolgens sturen op het ontwikkelen van schrale natuur op basis van stikstoflimitatie. Het lage organische stofgehalte en N-beschikbaarheid in de bodemlaag op een diepte van 30-50 cm lijkt dit mogelijk te maken. Door het verwijderen van de toplaag zullen de bodems echter gevoelig worden voor verzuring, omdat de bodemlaag die dan aan het oppervlak komt een lagere CEC en zuurbuffering heeft. Ook bestaat het risico dat er sprake is van een te hoge stikstofaanvoer vanuit externe bronnen (bijvoorbeeld depositie), waardoor de beoogde schrale natuur zich niet ontwikkelt of dat schrale natuur zich wel ontwikkelt maar dat het systeem snel eutroof wordt door stikstofaanvoer vanuit externe of interne bronnen (bijvoorbeeld fixatie door klavers). Verder leidt afgraven tot nattere condities op de lager gelegen delen van het perceel, waarvan nader bekeken moet worden of het daarmee niet te nat wordt.
- Op het zuidwestelijk gelegen perceel wordt vochtig hooiland beoogd. De fosfaattoestand van de bodem is in de uitgangssituatie echter te hoog. Voorgestelde maatregelen zijn:
 - Het afgraven van de bovenste 30cm van de bodem. Dit gaat gepaard met periodiek zeer natte condities (GHG boven maaiveld).
 - De fosfaattoestand te verlagen door uit te mijnen. Het benodigde aantal uitmijnjaren wordt grof geschat op 3-13 jaar, afhankelijk van de locatie. Verschralen duurt naar verwachting 6-26 jaar, ofwel twee keer zo lang dan uitmijnen. Mogelijk ligt het benodigde aantal uitmijnjaren hoger door de P-aanvoer vanuit diepere bodemlagen.

1 Inleiding

De Provincie Gelderland is de planuitwerking gestart naar het verbeteren van de spoorverbinding Arnhem-Doetinchem-Winterswijk. Het ruimtebeslag dat noodzakelijk is voor de verbetering gaat ten koste van areaal aan GNN en GO. Hiervoor geldt een versterkings- en compensatieopgave. Concreet zijn vier percelen op Landgoed Stilliwald bij Wehl aangewezen om invulling aan de compensatie te geven. Ten aanzien van de versterkings- en compensatieopgave voor het GNN/GO, is op twee van deze locaties (in totaal ca 3,09 ha; Figuur 1.1) biogeochemisch onderzoek uitgevoerd.



Figuur 1.1 Twee percelen op Landgoed Stilliwald waar biogeochemisch onderzoek wordt uitgevoerd. De kleur geeft het beoogde natuurtype aan.

Het betreft de volgende twee percelen:

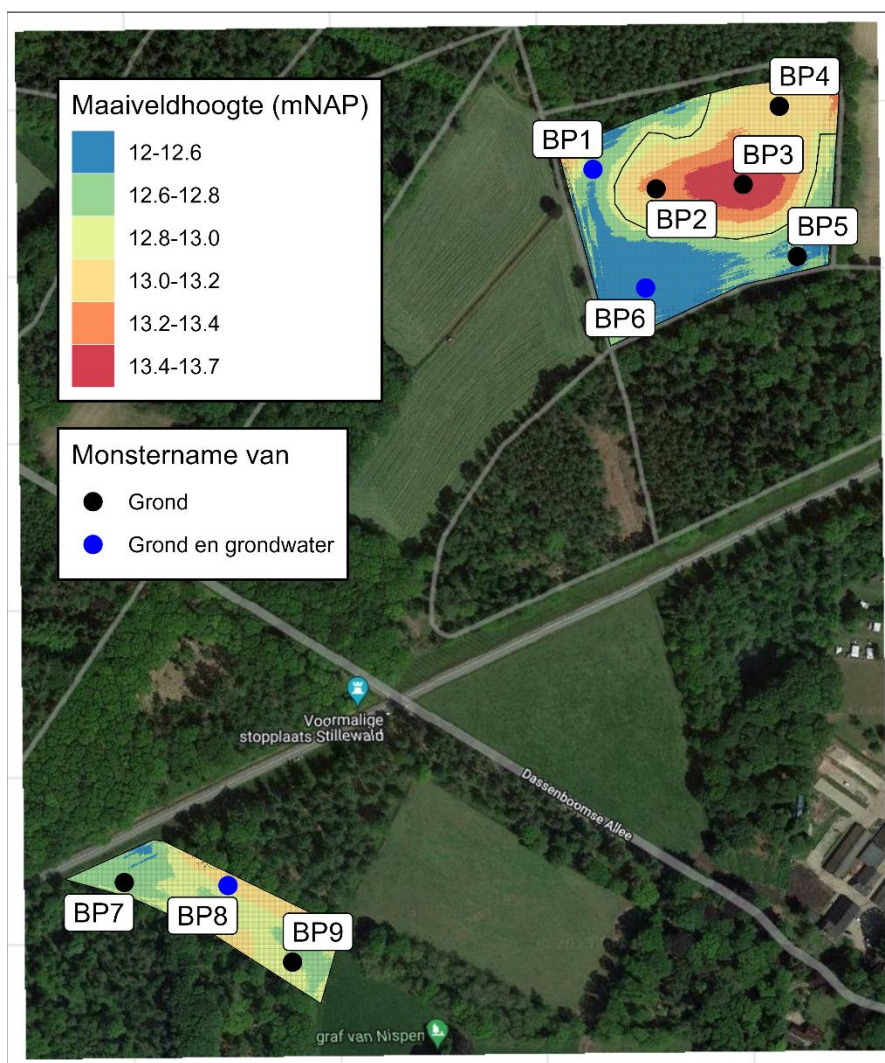
1. Een perceel agrarisch grasland ten noorden van de spoorlijn, dat wordt ingericht als N10.02 Vochtig hooiland (lagere delen) en N11.01 Droog schraalland (hogere kop). Het perceel heeft een oppervlakte van circa 2,28 ha;
2. Een perceel agrarisch grasland ten zuiden van de spoorlijn, dat wordt ingericht als N10.02 Vochtig hooiland. Het perceel heeft een oppervlakte van circa 0,81 ha.

Het doel van het voorliggend onderzoek is om inzicht te verkrijgen in de biogeochemie in relatie tot de gewenste natuurtypen (vochtig hooiland en droog schraalland) en ontwikkelingsstrategie. Specifiek omvat dit het verkrijgen van inzicht in (i) de fosfaattoestand van de bodem in relatie tot de doelvegetaties en (ii) beheersmogelijkheden om de fosfaattoestand van de bodem tot een gewenst niveau te brengen voor de beoogde natuurontwikkeling. Hierbij wordt naast nutriënten ook rekening gehouden met standplaatsfactoren als de vochttoestand en zuurgraad.

2 Opzet en uitvoering

2.1 Veldwerk

Bodems zijn bemonsterd volgens het monsternameplan aangeleverd door de Provincie. Monsterlocaties zijn over de percelen verspreid, waarbij de variatie in maaiveldhoogte is meegenomen (Figuur 2.1). Op het zuidwestelijk gelegen perceel is er weinig variatie in hoogte (maaiveldhoogte tussen de 12.6-13.1mNAP) en ligt boorpunt BP8 op een hoger gelegen deel (13mNAP) dan boorpunten BP7 en BP9 (12.7-12.8m NAP). Op het noordoostelijk gelegen perceel varieert de maaiveldhoogte tussen de 12.0 en 13.7mNAP). Boorpuntlocaties BP1 t/m BP6 liggen op verschillende maaiveldhoogten waarbij boorpunt BP6 in het lager gelegen deel (12.6mNAP) en boorpunt BP3 op het hoger gelegen deel (13.6mNAP) ligt.



Figuur 2.1 Boorpuntlocaties op een luchtfoto en maaiveldhoogtekaart.

Op 28 en 29 juni 2023 is per bemonsteringslocatie de bodem op drie diepten bemonsterd. Bemonsteringsdiepten van 0-10, 10-30 en 30-50cm -mv zijn aangehouden. De monsters zijn als mengmonsters genomen, waarbij circa 15 steken in een straal van 5 meter rond het monsterpunt zijn verzameld. Op drie locaties (BP8, BP1 en BP6) is naast monsternamen van de grond het freatisch grondwater bemonsterd. Het grondwater is bemonsterd volgens de open boorgatmethode, waarbij het grondwater voor bemonstering is voorgepompt tot een constante troebelheid. Verder is per bemonsteringslocatie het bodemprofiel beschreven tot 1.20 conform de Stiboka systematiek.

2.2 Bodemanalyses

Bodemanalyses

In de grondmonsters zijn de algemene bodemkenmerken organische stofgehalte, textuur (zand-, silt-, kleifractie), klei-humuscomplex (CEC) en de stikstofrijksdom van organische stof (C/N verhouding) bepaald. Daarnaast zijn analyses uitgevoerd om inzicht te krijgen in de directe beschikbaarheid en beschikbare reserves van de nutriënten stikstof, fosfaat, kalium, zwavel, calcium en magnesium. Ook zijn de zuurgraad, en de buffering door kalk en de basensamenstelling van het klei-humuscomplex gemeten.

Voor fosfaat zijn de volgende fosfaatfracties bepaald:

- Een maat voor de directe fosfaatbeschikbaarheid (P geëxtraheerd met 0,01 M CaCl₂);
- Een maat voor de potentieel snel beschikbare P-reserves, ofwel P_{AL} (P geëxtraheerd met ammoniumlactaat azijnzuur met pH 3,75);
- Een maat voor totaal beschikbaar P ofwel P_{OX} (P geëxtraheerd met ammoniumoxalaat-oxaalzuurextract);
- Een maat voor P-totaal (P-totaal met XRF); en
- Een maat voor de totale P-bindingscapaciteit (PSC) in de vorm van ijzer en aluminium (hydr)oxiden (Fe_{OX} + Al_{OX}; Fe en Al geëxtraheerd met ammoniumoxalaat-oxaalzuurextract);
- De fosfaatverzadigingsgraad (FVG). De FVG is het percentage van de totale P-bindingscapaciteit dat ook daadwerkelijk is bezet met fosfaat. De FVG wordt berekend op basis van de procentuele verhouding tussen P_{OX} en ½ keer de som van Fe_{OX} + Al_{OX}.

Voor de relatie tussen deze verschillende fracties en de fosfaatdynamiek in de bodem wordt verwezen naar het kader over fosfaat in de bodem (volgende sectie). De gemeten fosfaatfracties leveren de elementen aan waarmee de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem op korte en langere termijn goed kunnen worden beschreven en waarmee een inschatting kan worden gemaakt van de tijd die nodig is om door middel van verschralen of uitmijnen de fosfaattoestand te verlagen.

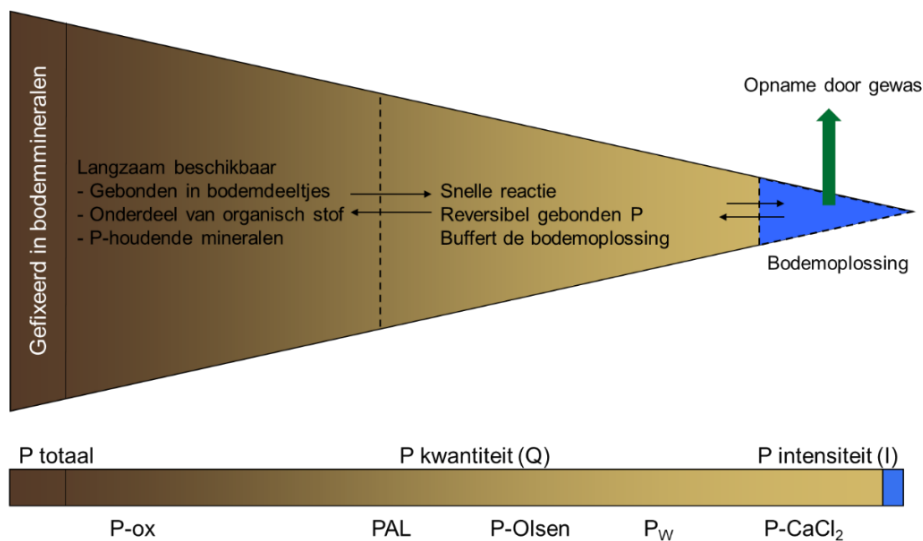
Het grondwater is onder andere geanalyseerd op de zuurgraad (pH), conductiviteit (EC), basische kationen en carbonaat (Ca, Mg, K, Na, HCO₃), chloride (Cl), zwavel (S), stikstofverbindingen (NH₄, NO₃) en fosfor (P-totaal).

Het gedrag van fosfaat in de bodem

Fosfaat zit in meerdere vormen in de bodem, waarbij onderscheid gemaakt kan worden in hoe sterk het gebonden is aan bodemdeeltjes. Om grip te krijgen op de verschillende vormen van fosfaat wordt onderscheid gemaakt tussen drie groepen:

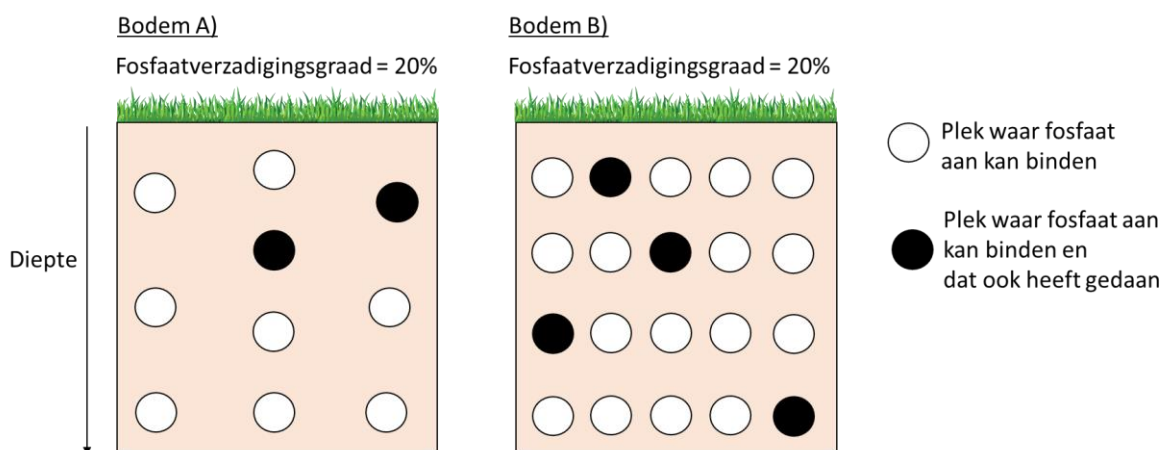
- Direct beschikbaar fosfaat (rechtterkant van de driehoek in Figuur 2.2). Dit betreft fosfaat wat in de bodemoplossing aanwezig is en daarom direct door een plant kan worden opgenomen. Deze vorm van fosfaat wordt gemeten met een calciumchloride-extractie (P_{CaCl₂}) en wordt ook wel P-intensiteit genoemd.

- Reversibel gebonden fosfaat (midden van de driehoek in Figuur 2.2). Deze vorm van P is matig gebonden aan het oppervlak van bodemdeeltjes en kan ook snel weer in een beschikbare vorm vrijkomen (desorberen). Dit is relevant voor het aanvullen van het direct beschikbaar fosfaat (P_{CaCl_2}) wanneer dit door een plant wordt onttrokken. Deze vorm van P wordt gemeten met een ammoniumlactaat-azijnzuur extractie (P_{AL}) en wordt ook wel P-kwantiteit genoemd. Verschillende methodes kunnen worden gebruikt om de P-kwantiteit te meten, elk met zijn eigen (analytische) voor- en nadelen.
- Sterk gebonden fosfaat dat slechts langzaam beschikbaar kan komen (linkerkant van de driehoek in Figuur 2.2). Deze vorm van fosfaat maakt deel uit van bodemdeeltjes of is daar sterk aan gebonden. Deze vorm van fosfaat wordt gemeten met een oxalaat extractie (P_{ox}) en is een indicator voor totaal anorganisch P. Deze vorm van fosfaat is in chemisch evenwicht met direct beschikbaar P (P intensiteit) en reversibel gebonden P (P kwantiteit).



Figuur 2.2 Schematische weergave van fosfaat in de bodem en de veel gebruikte meetmethodes om de beschikbaarheid te duiden.

De verhouding tussen totaal anorganisch fosfaat (P_{ox}), reversibel gebonden fosfaat (P_{AL}) en direct beschikbaar fosfaat (P_{CaCl_2}) is sterk afhankelijk van (i) de totale hoeveelheid anorganisch P in de bodem (P_{ox}), en (ii) het maximaal vermogen van een bodem om P te binden. In Nederlandse bodems wordt de maximale P bindingscapaciteit bepaald door de hoeveelheid amorfe ijzer- en aluminium(hydr)oxiden in de bodem. Bij hoge gehalten aan ijzer en aluminium (hoge bindingscapaciteit) kan de totale voorraad van P in de bodem erg hoog zijn terwijl de directe P beschikbaarheid voor de plant laag is (P is sterk gebonden). Bij lage gehalten aan ijzer en aluminium (lage bindingscapaciteit) kan de bodem nauwelijks P binden. Hierdoor kan een kleine totale hoeveelheid P in de bodem al leiden tot een hoge directe P beschikbaarheid. Dit in Figuur 2.3 gevisualiseerd voor twee bodems waarvan de maximale fosfaat bindingscapaciteit hoger is in bodem B dan in bodem A. De witte bolletjes zijn de lege bindingsplaatsen waar fosfaat nog aan kan binden en de zwarte bolletjes zijn de bindingsplaatsen waar P wel aan is gebonden. In bodems wordt de directe P beschikbaarheid (P aanwezig in bodemoplossing) bepaald door de mate waarin de bindingscapaciteit is opgeladen met fosfaat (fosfaatverzadigingsgraad). In het voorbeeld in Figuur 2.3 is de directe fosfaat beschikbaarheid gelijk (fosfaatverzadigingsgraad van 20%), maar door de twee keer zo hoge bindingscapaciteit in bodem B dan in bodem A (hogere gehalten aan ijzer en aluminium) zijn de fosfaatreserves ook twee keer zo hoog in bodem B dan in bodem A. Verschrallen en uitmijnen is hierdoor effectiever op bodem A dan op bodem B (minder fosfaat hoeft te worden onttrokken om de fosfaatverzadiging te doen dalen). Voor extra informatie wordt verwezen naar studies over het gedrag van fosfaat in de bodem (van Rotterdam et al., 2012; van Doorn et al., 2023).



Figuur 2.3: Illustratie van twee bodems met een gelijke fosfaatverzadigingsgraad (en directe P beschikbaarheid), maar met een verschillende maximale fosfaat bindingscapaciteit

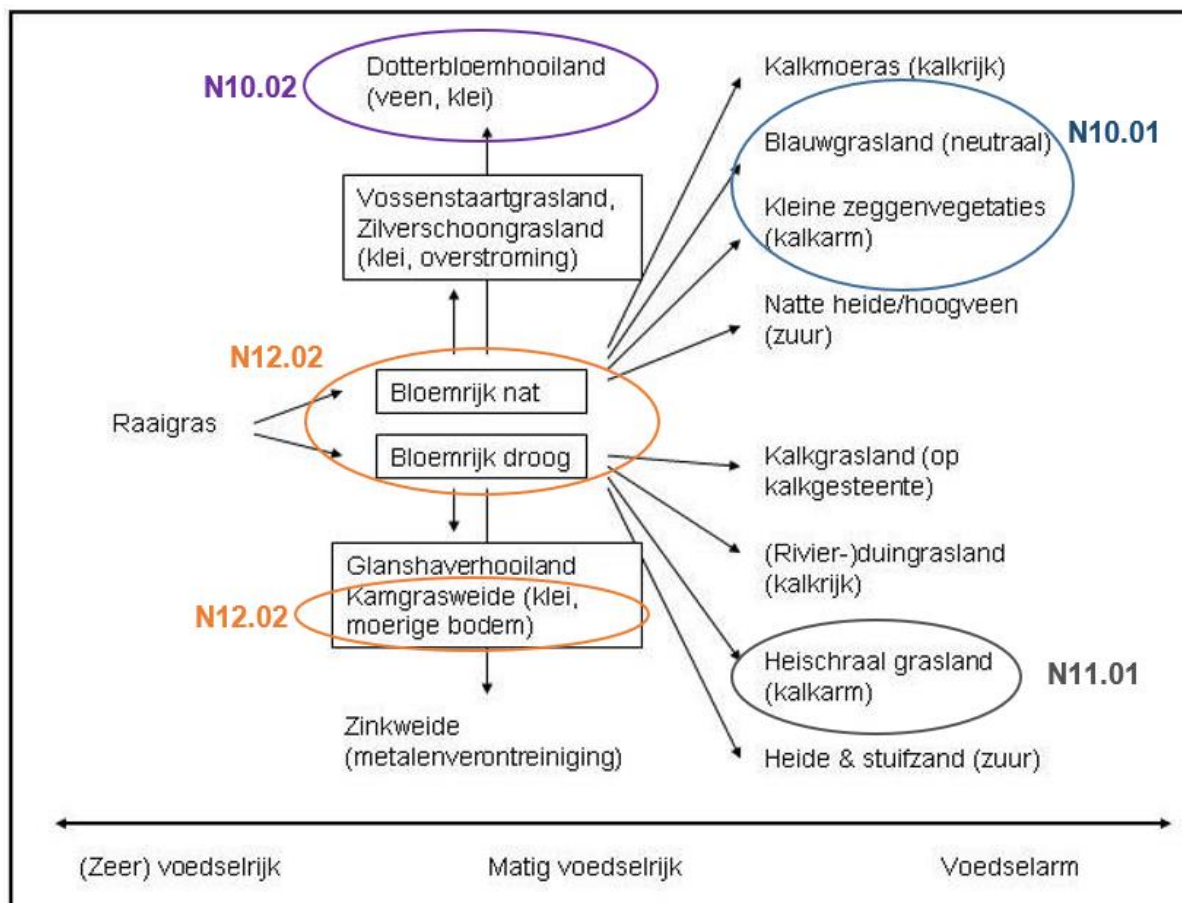
2.3 Interpretatie en advies

Om een inschatting te geven of de uitgangssituatie wat betreft de fosfaattoestand gunstig dan wel ongunstig is voor de ontwikkeling van gewenste beheer- en habitattypen wordt gebruik gemaakt van referentiewaarden. Verschillende onderzoeksbureaus en instellingen gebruiken verschillende methodes om de fosfaattoestand te karakteriseren. De schraalheid van een bodem is voor P niet direct gerelateerd aan de totale P reserves in de bodem (zoals bv gemeten met P_{ox}). Een maat voor de beschikbaarheid van deze P-reserves is een veel realistischer en nauwkeuriger indicator voor de potentie voor de ontwikkeling van natuur- en vegetatietypen. NMI gebruikt vooral P_{AL} en de FVG als indicatoren voor de P beschikbaarheid. Hiermee wordt inzicht verkregen in beide P kwantiteit (matig sterk gebonden P wat de P concentratie in bodemoplossing buffert, P_{AL}) en P intensiteit (P concentratie in oplossing, mechanistisch gerelateerd aan de FVG). Voor natuurontwikkeling op voormalige landbouwgrond zijn streefwaarden afgeleid voor P_{AL} en de FVG voor situaties waarbij wordt gestuurd op P-limitatie. De streefwaarden zijn gebaseerd op voorgaand onderzoek door meerdere onderzoeksinstituten, zoals Wageningen Universiteit & Research, NMI en LBI (o.a. Timmermans & van Eekeren, 2016; van Delft, 2013; van Rotterdam et al., 2021). P_{AL} en FVG zijn binnen een gebied vaak aan elkaar gerelateerd. Omdat P_{AL} en FVG vaak één op één aan elkaar zijn gerelateerd zijn de berekende grenswaarden voor P_{AL} (vrijwel) gelijk aan de grenswaarden voor de FVG. De streefwaarden zijn opgenomen in Tabel 2-1. Voor de beoordelingen worden de afzonderlijke beoordelingen op basis van P_{AL} en FVG gemiddeld en naar boven afgerond. Als bijvoorbeeld op basis van FVG de uitgangssituatie optimaal is voor voedselarme vegetaties (FVG < 12%) en op basis van P_{AL} optimaal voor matig voedselrijke vegetaties (P_{AL} tussen 8-18 mg P_2O_5 100g⁻¹) dan wordt de fosfaattoestand beoordeeld als “Optimaal matig voedselrijk” (klasse B).

Tabel 2-1 Streefwaarden voor P_{AL} en de FVG voor potentiële natuurontwikkeling

P_{AL} (mg P_2O_5 100g ⁻¹)	FVG (%)	Classificering fosfaattoestand van de bodem voor potentiële natuurontwikkeling	Fosfaatklasse
<10	<12	Optimaal voedselarm	A
10-18	12-18	Optimaal matig voedselrijk	B
18-26	18-26	Suboptimaal matig voedselrijk	C
26-40	26-40	Niet optimaal matig voedselrijk	D
>=40	>=40	Niet geschikt	E

De ontwikkeling van natuur kan worden gevisualiseerd door een verschuiving van raaigras links in Figuur 2.4 naar de b.v. natuurtypes matig voedselrijk (N10.02, N12.02, N12.03) en voedselarme vegetatietypen (N10.01 en N11.01) rechts in dezelfde figuur. In meer detail, vindt dus wat betreft eisen aan de voedselrijkdom een verschuiving plaats van (zeer) voedselrijke graslanden (raaigras) naar kruiden- en faunarijke grasland (N12.02) en vochtig hooiland /glanshaverhooiland (N10.02, N12.03) en naar nat schraalland (N10.01) en heischrale vegetaties (11.01).



Figuur 2.4 Schema van de belangrijkste Nederlandse graslandtypen, de positie in het schema verwijst naar de meest karakteristieke standplaats eigenschappen. De zwart omkaderde typen worden hier tot het bloemrijke grasland gerekend (<http://www.natuurkennis.nl>).

In een recente handreiking worden voor vochtig hooiland (N10.02) en droog schraalland (N11.01) P_{Olsen} streefwaarden van 287-380 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ met een maximumwaarde van 800 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (vochtig hooiland) en 138-381 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ met een maximumwaarde van 920 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (droog schraalland, verbond van heischrale graslanden) gegeven (VBNE, 2023). Dit komt overeen met P_{AL} streefwaarden van circa 8-10 mg P_2O_5 100g $^{-1}$ met een maximumwaarde van 19 mg P_2O_5 100g $^{-1}$ (vochtig hooiland) en P_{AL} streefwaarden van circa 4-10 mg P_2O_5 100g $^{-1}$ met een maximumwaarde van 21 mg P_2O_5 100g $^{-1}$ (droog schraalland). Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat voor de potentiële ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) en droog schraalland (N11.01) P_{AL} idealiter lager ligt dan 10 mg P_2O_5 100g $^{-1}$ en de FVG idealiter lager ligt dan 12% (fosfaatklasse A in Tabel 2-1). Vochtig hooiland is iets voedselrijker dan droog schraalland, en de potentiële ontwikkeling hiervan wordt daarom mogelijk geacht bij een P_{AL} tussen 10-18 mg P_2O_5 100g $^{-1}$ en een FVG van 12-18% (fosfaatklasse B in Tabel 2-1).

Tabel 2-2 Beheertype-specifieke streefwaarden voor de potentiële ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) en droog schraalland (N11.01). De letter tussen haakjes refereert naar de fosfaatklasse in Tabel 2-1

Beheertype	P _{AL} streefwaarde (mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)	FVG streefwaarde (%)
Vochtig hooiland (N10.02)	Optimaal: <10 (A) Suboptimaal: 10-18 (B)	Streefwaarde: <12 (A) Suboptimaal: 10-18 (B)
Droog schraalland (N11.01)	Optimaal: <10 (A) Suboptimaal: nvt	Optimaal: <12 (A) Suboptimaal: nvt

Referentiewaardes worden beschouwd als een richtlijn en geen harde grens. Onderzoek laat zien dat er een behoorlijke bandbreedte is in de fosfaattoestand waar matig voedselrijke vegetaties zich in potentie nog kunnen ontwikkelen (e.g. van Delft, 2014). In dit onderzoek is aangenomen dat de streefwaarden 'waar' zijn voor het onderzoeksgebied en is verondersteld dat de kans op de beoogde natuurontwikkeling groter wordt naarmate er meer naar de streefwaarde wordt toegewerkt.

3 Resultaten, interpretatie en advies

3.1 Algemene bodemopbouw en bodemkenmerken

Stiboka bodemkartering

De bodems zijn geclassificeerd als vlakvaaggronden met uitzondering van de bodem op de hogere kop op het noordoostelijk gelegen perceel (BP3) die geclassificeerd is als een vorstvaaggrond (Tabel 3-1). De algemene bodemopbouw is een bovengrond van fijn zand op een ondergrond van matig fijn tot zeer grof zand. Vlakvaaggronden behoren tot de (natte) hydrovaaggronden; er heeft weinig bodemvorming plaatsgevonden er kunnen periodiek hoge grondwaterstanden voorkomen. Wel is het waarschijnlijk dat het gebied vroeger natter was dan nu. Op basis van de bodemprofielen wordt ingeschat dat op het noordoostelijk gelegen perceel de (historische) GHG tot maaiveld kwam en de (historische) GLG tot 85-110cm -mv op het lager gelegen deel (BP1, BP5 en BP6). Op het zuidwestelijk perceel (BP7 t/m BP9) wordt ingeschat dat de (historische GHG) tot maaiveld kwam (o.a. door de aanwezigheid van ijzer op 10cm -mv) en wordt de (historische) GLG ingeschat op circa 100-135cm -mv. Vorstvaaggronden behoren tot de (droge) xerovaaggronden; er heeft weinig bodemvorming plaatsgevonden en er zijn weinig hydromorfe kenmerken in het bodemprofiel aanwezig. De (historische) GLG wordt op deze locatie (hoger gelegen kop) geschat op >120cm -mv (GHG kon niet aan de hand van het bodemprofiel geschat worden). De boorbeschrijvingen zijn opgenomen in Bijlage I.

Uit een bodemkundig en hydrologische vooronderzoek blijkt dat de actuele GHG en GLG lager liggen dan de historische GHG en GLG, o.a. door aanpassing van watergangen en de aanleg van de Didamse Waterleiding (Kieskamp & Smeenge, 2020). In Stillwald is verschil tussen de historische en actuele GHG geobserveerd van 80-100cm (actuele GHG is lager) en een verschil tussen de historische en actuele GLG van 20-70cm (actuele GLG is lager). De actuele GLG en GHG zijn op de percelen van het huidig onderzoeksgebied niet bepaald, maar volgens de beheerder (Bosgroepen) is het onwaarschijnlijk dat de GHG sinds 1970 nog boven maaiveld komt. Wel is het mogelijk dat in de nieuwe situatie het grondwater dicht bij het nieuwe maaiveld komt, maar alleen in de winterperiode. In de zomerperiode wordt de GLG nu op <100cm geschat, en is de verwachting dat het perceel, ook bij het eventueel afgraven van 30cm, voldoende droog is om meerdere keren gemaaid te worden in het groeiseizoen.

Tabel 3-1 Foto's en classificatie van de 9 boorprofielen

BP1 (vlakvaaggrond) 	BP2 (vlakvaaggrond) 	BP3 (vorstvaaggrond) 
BP4 (vlakvaaggrond) 	BP5 (vlakvaaggrond) 	BP6 (vlakvaaggrond) 
BP7 (vlakvaaggrond) 	BP8 (vlakvaaggrond) 	BP9 (vlakvaaggrond) 

Zuurgraad, zuurbuffering en algemene bodemkenmerken

De zuurgraad van de bodem is bij de ontwikkeling van natuurvegetaties (ook) belangrijk. Bij vochtig hooiland (N10.02) is een zuurgraad ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) van >4.7 optimaal en is een zuurgraad van 3.7-4.7 suboptimaal. Bij droog schraalland (N11.01) is een zuurgraad ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) van 3.2-4.2 optimaal en zijn zuurgraden van 2.7-3.2 en 4.2-4.8 suboptimaal (Rietra et al., 2012). De originele streefwaarden zijn voor $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ gerapporteerd en omgerekend naar $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - 0.8$). Hiermee wordt aangesloten op de wijze waarop de pH in dit onderzoek is gemeten.

Op het noordoostelijk perceel varieert de zuurgraad van de bodem tussen (i) 5.2-5.8 op het hoger gelegen deel waar de ontwikkeling van droog schraalland wordt beoogd (locaties BP2 t/m BP4); en (ii) 5.3-6.0 op het lager gelegen deel waar de ontwikkeling van vochtig hooiland wordt beoogd (locaties BP1, BP5 en BP6, Tabel 3-2). Op het hoger gelegen deel van het perceel is de pH hiermee aan de hoge kant voor de ontwikkeling van droog schraalland, en kan (tijdelijk) verzuring van de bodem worden toegelaten. Het is ook reëel dat de bodem gaat verzuren door het lage vermogen van de bodem om zuur te bufferen (zie tekst onder Tabel 3-3 over zuurbuffering). Op het lager gelegen deel van het perceel is de pH optimaal voor de ontwikkeling van vochtig hooiland. Er zijn geen maatregelen nodig om de pH te verhogen.

Tabel 3-2 De zuurgraad ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$), kleigehalte, organische stofgehalte (OS), klei-humuscomplex (CEC) en de bezetting van de CEC met basische kationen voor de locaties op het noordoostelijk gelegen perceel.

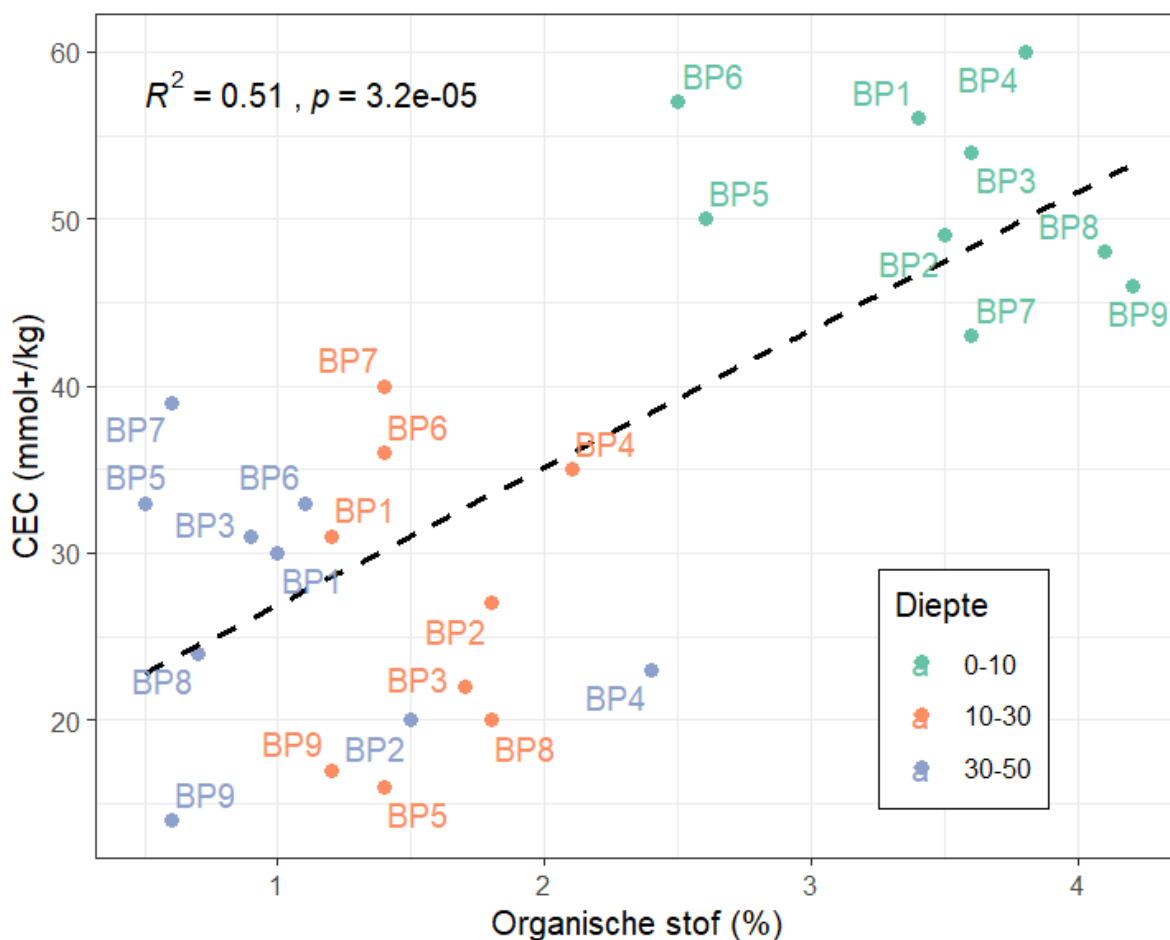
Locatie	Diepte	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	Klei (%)	OS (%)	CEC ($\text{mmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	Verzadiging van de CEC met Ca, Mg, K en Na (%)
Noordoostelijk perceel, hoger gelegen deel waar droog schraalland (N11.01) wordt beoogd						
BP2	0-10	5.2	5	3.5	49	96
BP2	10-30	5.2	5	1.8	27	87
BP2	30-50	5.3	4	1.5	20	100
BP3	0-10	5.7	2	3.6	54	95
BP3	10-30	5.5	3	1.7	22	100
BP3	30-50	5.7	5	0.9	31	96
BP4	0-10	5.6	3	3.8	60	99
BP4	10-30	5.8	4	2.1	35	97
BP4	30-50	5.6	3	2.4	23	99
Noordoostelijk perceel, lager gelegen deel waar vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd						
BP1	0-10	5.3	5	3.4	56	93
BP1	10-30	5.8	4	1.2	31	97
BP1	30-50	6	3	1	30	91
BP5	0-10	5.4	4	2.6	50	100
BP5	10-30	5.3	1	1.4	16	100
BP5	30-50	5.7	3	0.5	33	99
BP6	0-10	5.7	5	2.5	57	100
BP6	10-30	6	6	1.4	36	100
BP6	30-50	5.5	6	1.1	33	100

Op het zuidwestelijk gelegen perceel waar de ontwikkeling van vochtig hooiland wordt beoogd varieert de pH van de bovenste 10cm van de bodem tussen 4.8-5.3 (locaties BP7 t/m BP9, Tabel 3-3). De zuurgraad is hiermee optimaal voor de ontwikkeling van vochtig hooiland. Er zijn geen maatregelen nodig om de zuurgraad te verhogen of te verlagen.

Tabel 3-3 De zuurgraad (pH_{CaCl_2}), kleigehalte, organische stofgehalte (OS), klei-humuscomplex (CEC) en de bezetting van de CEC met basische kationen voor de locaties op het zuidwestelijk gelegen perceel.

Locatie	Diepte	pH_{CaCl_2}	Klei (%)	OS (%)	CEC ($mmol+ kg^{-1}$)	Verzadiging van de CEC met Ca, Mg, K en Na (%)
Zuidwestelijk perceel, waar de ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd						
BP7	0-10	4.8	6	3.6	43	100
BP7	10-30	5.6	4	1.4	40	93
BP7	30-50	5.8	6	0.6	39	66
BP8	0-10	4.8	4	4.1	48	85
BP8	10-30	4.9	5	1.8	20	98
BP8	30-50	5.7	6	0.7	24	100
BP9	0-10	5	5	4.2	46	100
BP9	10-30	5.3	5	1.2	17	85
BP9	30-50	4.9	6	0.6	14	100

Naast de zuurgraad van de bodem is het vermogen van de bodem om de zuurgraad te bufferen (constant te houden) ook van belang. De buffering van de zuurgraad wordt bepaald door de combinatie van (i) het vermogen van de bodem om kationen te binden, en (ii) de hoeveelheid aan kationen die daadwerkelijk is gebonden. Het vermogen van de bodem om kationen te binden wordt bepaald door de CEC (Cation Exchange Capacity, ook wel klei-humus complex genoemd). De CEC is op zandgronden vooral afhankelijk van het organische stofgehalte, waarbij de CEC toeneemt met een toenemend gehalte aan organische stof (Figuur 3.1). In het onderzoeksgebied is het organische stofgehalte laag tot zeer laag (1-4%), wat overeenkomt met een lage CEC ($14-60 mmol kg^{-1}$). Het organische stofgehalte (en hiermee de CEC) van de bovenste 10cm van de bodem is duidelijk hoger dan het organische stofgehalte van de bodemlagen hieronder (Figuur 3.1). De verzadiging van de CEC met basische kationen (Ca, Mg, K, Na) is hoog (85-100%). Bovenstaande resultaten geven aan dat de bodems een laag vermogen hebben om kationen te binden. Hoewel de basenverzadiging hoog is, zijn de bodems (door de lage CEC) gevoelig voor verzuring. Dit is sterker het geval voor bodemlagen dieper dan 10cm -mv, waar de CEC lager ligt dan de bovenste 10cm van de bodem door een lager organisch stofgehalte (OS varieert van 2.5-4.2% in de 0-10cm bodemlaag (gemiddelde van 3.5%), van 1.2-2.1% in de 10-30cm bodemlaag (gemiddelde van 1.6%) en van 0.5-2.4% in de 30-50cm bodemlaag (gemiddelde van 1%)).



Figuur 3.1 Organische stofgehalte uitgezet tegenover het klei-humus-complex (CEC) van de bodem. De kleur van de punten geeft de bemonsterde diepte aan. De tekst bij een datapunt staat voor de monsternamelocatie. De zwarte stippellijn correspondeert met een lineaire regressielijn.

3.2 Fosfaattoestand

De resultaten van de fosfaattoestand van de bodem zijn gepresenteerd in Tabel 3-4 voor het noordoostelijk gelegen perceel en in Tabel 3-5 voor het zuidwestelijk gelegen perceel. Naast het beschikbaar fosfaat dat reversibel gebonden is aan bodemdeeltjes (P_{AL}) en de mate waarin de fosfaat bindingscapaciteit (PSC) is bezet met fosfaat (fosfaatverzadigingsgraad, FVG) zijn ook de gehalten direct beschikbaar fosfaat (P_{CaCl_2}) en de totaal beschikbare fosfaatreserves (P_{ox}) in de tabel opgenomen.

Op het noordoostelijk gelegen perceel is de fosfaattoestand in de bovenste 30cm van de bodem extreem hoog (zelfs ook voor landbouwkundige begrippen), met name in het noordelijk deel van het perceel (locaties BP1 t/m BP4). In het zuidelijke deel van dit perceel (BP5 en BP6) is de fosfaattoestand van de bovenste 30cm ook hoog maar, maar veel lager dan in het noordelijke deel van het perceel.

In het noordelijk deel van het perceel varieert P_{AL} in de bovenste 30cm van de bodem tussen 84-151 mg P_2O_5 100g⁻¹ en de FVG tussen 62-91% (Tabel 3-4). Door de hoge FVG is de directe P beschikbaarheid (P_{CaCl_2} , P concentratie in bodemoplossing) ook zeer hoog (P_{CaCl_2} in de bovenste 30cm varieert van 6.1-10.7 mg P_{CaCl_2}). In het zuidelijk deel van het perceel (locaties BP5 en BP6) varieert P_{AL} in de bovenste 30cm van de bodem tussen 33-38 mg P_2O_5 100g⁻¹, de FVG tussen 40-48% en P_{CaCl_2} tussen 1.8-2.6 mg kg⁻¹. Hiermee zouden ze in de hoogste fosfaatklassen voor productiegrasland vallen bij (i) $P_{AL} > 30$ en $P_{CaCl_2} > 3.4$, of (ii) $P_{AL} > 45$ en P_{CaCl_2} 2.5-3.4, of (iii) $P_{AL} > 55$ en P_{CaCl_2} van 1.5-2.4.

Onder de sterk met P verrijkte toplaag (in de bodemlaag op een diepte van 30-50cm -mv) is de fosfaattoestand in het noordelijk deel van het perceel (locaties BP1 t/m BP4) nog steeds hoog (BP2 en BP4) tot zeer hoog (BP1 en BP3) in relatie tot natuurontwikkeling (én landbouw). De verhoogde fosfaattoestand in de bodemlaag 30-50cm-mv is op locatie BP2 niet optimaal, en op locatie BP4 suboptimaal voor de ontwikkeling van een matig voedselrijke vegetatie zoals kruiden -en faunarijk grasland, waarvoor een P-AL en FVG < 18 optimaal is. De ontwikkeling van kruiden- en faunarijk grasland lijkt echter wel haalbaar na afgraven van de bovenste 30 cm. Voor droog schraalland met streefwaardes van PAL < 10 en FVG < 12 zijn de mogelijkheden nog kleiner en ook na afgraven van de bovenste 30 cm niet kansrijk. In het zuidelijk deel (locaties BP5 en BP6) is de fosfaattoestand onder de toplaag (in de bodemlaag op een diepte van 30-50cm -mv) matig tot hoog. Op locatie BP5 is de fosfaattoestand in de ondergrond optimaal voor de ontwikkeling van een matig voedselrijke vegetatie zoals vochtig hooiland (N10.02; P-AL 10 op de bovengrens voor het gewenste traject <10). Op locatie BP6 is de fosfaattoestand iets hoger (P-AL 12) en daarmee suboptimaal voor de ontwikkeling van een matig voedselrijke vegetatie.

Op basis van de extreem hoge fosfaattoestand wordt de ontwikkeling van droog schraalland (N11.01) en vochtig hooiland (N10.02) op dit perceel niet als kansrijk gezien. Dit is met name het geval voor de ontwikkeling van droog schraalland (N11.01) op het hoger gelegen deel waar de fosfaattoestand het hoogst is, zelfs na afgraven van de bovenste 30 cm. Op het lager gelegen deel lijken er met name bij BP5 en BP6 wel mogelijkheden te zijn voor vochtig hooiland (N10.02) na afgraven van de bovenste 30 cm.

Tabel 3-4 Fosfaatklasse van de bodemlagen van het noordoostelijk gelegen perceel gekarakteriseerd met de maximale adsorptiecapaciteit (PSC), de totaal beschikbare P reserves (P_{OX}), de FosfaatVerzadigingsGraad (FVG), reversibel gebonden, snel beschikbaar P (P_{AL}) en direct beschikbaar P (P_{CaCl2}). De kleur refereert naar de fosfaatklasse ingedeeld op basis van P_{AL} en de FVG (Tabel 2-1). Lichtgroen: optimaal voor de ontwikkeling van voedselarme vegetatie (klasse A). Groen: optimaal voor de ontwikkeling van matig voedselrijke vegetatie (klasse B). Geel = suboptimaal voor de ontwikkeling van matig voedselrijke vegetatie (klasse C). Lichtbruin = optimaal voor de ontwikkeling van voedselrijke vegetatie (klasse D). Donkeroranje = Fosfaattoestand te hoog voor natuurontwikkeling (klasse E).

Locatie	Diepte	PSC (mmol kg ⁻¹)	P _{OX} (mmol kg ⁻¹)	FVG (%)	P _{AL} (mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)	P _{CaCl2} (mg kg ⁻¹)	Streef- waarde FVG	Streef- waarde P _{AL}	Fosfaat- klasse
Noordoostelijk perceel, hoger gelegen deel waar de ontwikkeling van droog schraalland (N11.01) wordt beoogd									
BP2	0-10	46	29	62	84	8.7	12	10	E
BP2	10-30	49	30	62	98	8.2	12	10	E
BP2	30-50	50	11	21	35	1.3	12	10	D
BP3	0-10	41	27	67	96	9.4	12	10	E
BP3	10-30	43	30	71	108	10.7	12	10	E
BP3	30-50	38	14	37	55	6.1	12	10	E
BP4	0-10	58	36	62	120	8.2	12	10	E
BP4	10-30	64	42	65	151	7.2	12	10	E
BP4	30-50	66	9	13	29	0.5	12	10	C

Locatie	Diepte	PSC (mmol kg ⁻¹)	P _{ox} (mmol kg ⁻¹)	FVG (%)	P _{AL} (mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)	P _{CaCl2} (mg kg ⁻¹)	Streef- waarde FVG	Streef- waarde P _{AL}	Fosfaat- klasse
Noordoostelijk perceel, lager gelegen deel waar de ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd									
BP1	0-10	34	26	76	100	8	12	10	E
BP1	10-30	28	26	91	123	7.7	12	10	E
BP1	30-50	23	14	62	69	4.6	12	10	E
BP5	0-10	30	14	44	35	2.6	12	10	E
BP5	10-30	29	14	48	38	2.3	12	10	E
BP5	30-50	15	3	23	10	0.4	12	10	B
BP6	0-10	37	15	40	33	2.6	12	10	E
BP6	10-30	35	14	41	33	1.8	12	10	E
BP6	30-50	35	7	19	12	0.4	12	10	C

Op het zuidwestelijk gelegen perceel (locaties BP7 t/m BP9) is de fosfaattoestand in de bovenste 30cm van de bodem aanzienlijk lager en suboptimaal voor de ontwikkeling van een matig voedselrijke vegetatie in het gedeelte rond BP7 en BP9 en niet optimaal voor de ontwikkeling van een matig voedselrijke vegetatie rond BP8. In de bodemlaag op 30-50 cm-mv is de fosfaattoestand laag en optimaal voor de ontwikkeling van een voedselarme vegetatie bij locaties BP8 en BP9 en optimaal voor de ontwikkeling van een matig voedselrijke vegetatie bij locatie BP7. Voor de beoogde ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02 met streefwaarde P_{AL} < 10 en FVG < 12) wordt geadviseerd om de fosfaatbeschikbaarheid te verlagen door uit te mijnen of door de fosfaatrijke toplaag (bovenste 30cm) af te graven (zie Hoofdstuk 3.4).

Tabel 3-5 Fosfaatklasse van de bodemlagen van het zuidwestelijk gelegen perceel gekarakteriseerd met de maximale adsorptiecapaciteit (PSC), de totaal beschikbare P reserves (P_{ox}), de FosfaatVerzadigingsGraad (FVG), reversibel gebonden, snel beschikbaar P (P_{AL}) en direct beschikbaar P (P_{CaCl2}). De kleur refereert naar de fosfaatklasse ingedeeld op basis van P_{AL} en de FVG (Tabel 2-1). Lichtgroen: optimaal voor de ontwikkeling van voedselarme vegetatie (klasse A). Groen: optimaal voor de ontwikkeling van matig voedselrijke vegetatie (klasse B). Geel = suboptimaal voor de ontwikkeling van matig voedselrijke vegetatie (klasse C). Lichtbruin = optimaal voor de ontwikkeling van voedselrijke vegetatie (klasse D). Donkeroranje = Fosfaattoestand te hoog voor natuurontwikkeling (klasse E).

Locatie	Diepte	PSC (mmol kg ⁻¹)	P _{ox} (mmol kg ⁻¹)	FVG (%)	P _{AL} (mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)	P _{CaCl2} (mg kg ⁻¹)	Streef- waarde FVG	Streef- waarde P _{AL}	Fosfaat- klasse
Zuidwestelijk perceel, waar de ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd									
BP7	0-10	37	9	23	10	0.3	12	10	C
BP7	10-30	39	11	27	16	0.4	12	10	C
BP7	30-50	25	4	17	7	<0.3	12	10	B
BP8	0-10	37	14	37	28	1.4	12	10	D
BP8	10-30	39	12	30	19	0.5	12	10	D
BP8	30-50	18	2	9	<3	<0.3	12	10	A

BP9	0-10	25	7	29	12	0.5	12	10	C
BP9	10-30	28	10	35	22	0.5	12	10	D
BP9	30-50	18	2	9	<3	<0.3	12	10	A

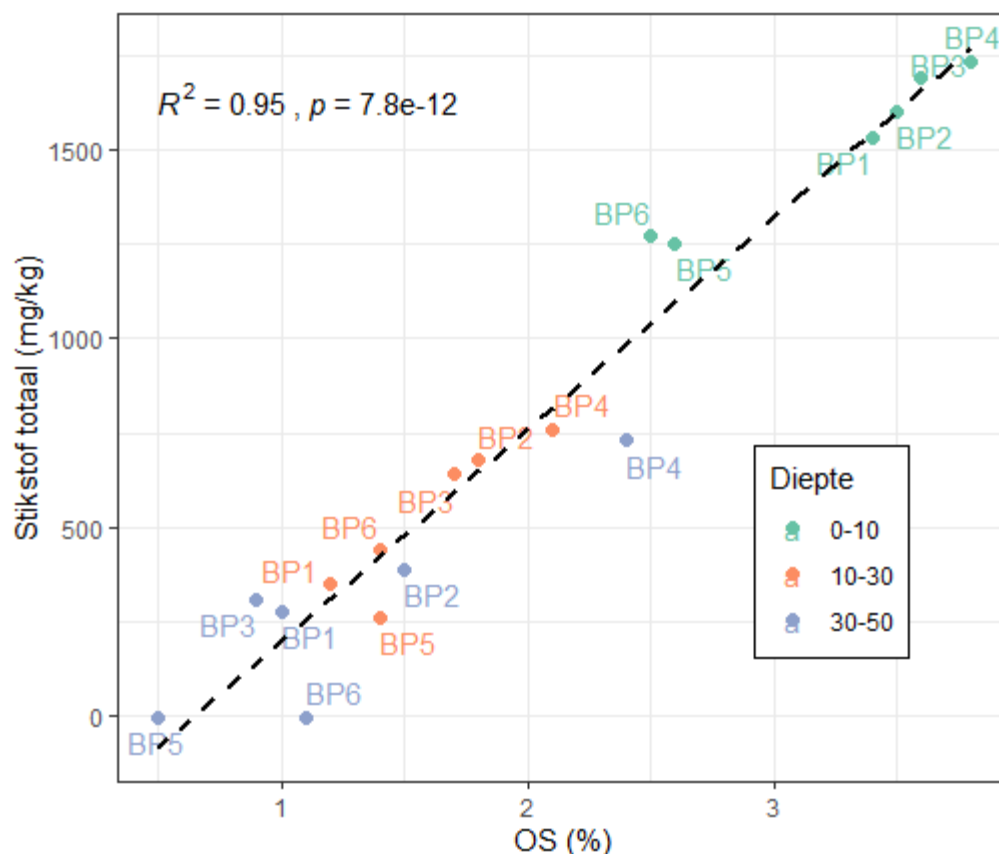
3.3 Sturen op stikstoflimitatie op het noordoostelijk gelegen perceel

Voor natuurontwikkeling is de stelregel dat er beter gestuurd kan worden op fosfaatlimitatie dan op stikstof- en kalilimitatie (VBNE, 2023). Wanneer fosfaatlimitatie wordt bereikt, wordt dit ook gehandhaafd omdat er geen fosfaat meer het systeem inkomt. Bij stikstof (N) en kalium (K) is dit wel het geval, bijvoorbeeld door stikstofdepositie, mineralisatie van organische stof, N-fixatie (door bijvoorbeeld klavers) en het vrijkomen van K door verwerking van silicaten (Smolders et al., 2006).

Op het noordoostelijk perceel is de fosfaattoestand dusdanig hoog dat ingrijpende maatregelen nodig zijn om de fosfaattoestand te verlagen tot het benodigde niveau om de beoogde natuur (droog schraalland en vochtig hooiland) te kunnen ontwikkelen. Afgraven van een bodemlaag met een dikte van minimaal 50 cm lijkt hier de enige optie om binnen afzienbare tijd voldoende P kwijt te raken. Een alternatieve maatregel is om de natuurdoelstelling aan te passen naar de ontwikkeling van structuurrijk bos, dat minder hoge eisen stelt aan de fosfaattoestand.

In sommige gevallen komt het echter voor dat de gewenste natuur zich (door stikstoflimitatie) ontwikkelt bij een hoge fosfaatbeschikbaarheid. Voorbeelden zijn bijvoorbeeld kruidenrijke akkers bij Bergherbos Beekweg (P_{AL} 90 mg P_2O_5 100g⁻¹) en Laarsenberg (P_{AL} 110 mg P_2O_5 100g⁻¹). Kenmerkend voor deze locaties zijn lage organische stofgehalten (1.6-1.7%) en lage gehalten aan totaal mineraal stikstof (11-22 kg N ha⁻¹ in de 0-20cm bodemlaag) (Eichorn & Ketelaar, Ecologie en beheer van kruidenrijke akkers op de zandgronden, 2011). In een onderzoek naar kruidenrijke graslanden kwam de ontwikkeling van gewenste natuur door N-limitatie niet naar voren (Eichorn & Ketelaar, 2016).

Op het noordoostelijk gelegen perceel is het organische stofgehalte in de 10-30cm-mv bodemlaag erg laag (1.2-2.6%) en is het totaal stikstofgehalte ook laag (260-760 mg kg⁻¹) (Tabel S2-1 en Figuur 3.2). In de bodemlaag hieronder (30-50cm -mv) is het organische stofgehalte en totaal stikstofgehalte nog lager (Figuur 3.2). Het is dus mogelijk om na het afgraven van bodemlaag met een dikte van 10 tot 30cm een situatie te creëren waar het stikstofleverend vermogen van de bodem erg laag is, wat mogelijk leidt tot stikstoflimitatie en de mogelijkheid om via dat mechanisme een voedselarme vegetatie te ontwikkelen. Wel wordt de bodem door afgraven gevoeliger voor verzuring omdat een laag organisch stofgehalte ook gepaard gaat met een lage CEC en daardoor minder buffering (Figuur 3.1). Hiernaast heeft afgraven meer potentie in het hoger gelegen deel van het perceel dan in het lager gelegen deel van het perceel; in het lager gelegen deel van het perceel is de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) op basis van de profielbeschrijvingen in eerste instantie op maaiveld geschat en zal het afgraven van de bodem leiden tot zeer natte condities (GHG boven maaiveld). Zoals in hoofdstuk 3.1 is aangegeven, blijkt uit een bodemkundig en hydrologische vooronderzoek dat de actuele GHG en GLG lager liggen dan de historische GHG en GLG, o.a. door aanpassing van watergangen en de aanleg van de Didamse Waterleiding (Kieskamp & Smeenge, 2020). De verwachting is dan ook dat de condities minder nat zullen zijn dan op basis van de boorbeschrijving is ingeschat.



Figuur 3.2 Relatie tussen het organische stofgehalte en het totaal stikstofgehalte in de bodem voor de locaties op het noordoostelijk gelegen perceel. De kleur van de punten geeft de bemonsterde diepte aan. De tekst bij een datapunt staat voor de monsternamelocatie. De zwarte stippellijn correspondeert met een lineaire regressielijn.

Als eerder genoemd wordt er vaak gestuurd op fosfaatlimitatie omdat stikstof vanuit externe bronnen kan worden aangevoerd. Hoewel er gestuurd kan worden op een lage stikstoflevering van de bodem door af te graven naar een bodemlaag met een laag organisch stofgehalte, is er ook aanvoer van stikstof via depositie. Volgens de Aeries-monitor (<https://monitor.aeries.nl>) varieert de gemiddelde jaarlijkse stikstofdepositie (voor 2020) in de N2000 gebieden in Gelderland van 18-27 kg N/ha¹. Voor de huidige onderzoekslocatie is geen stikstofdepositie waarde gerapporteerd. Generieke Kritische Depositiewaarden (KDWs) zijn 12 kg N ha⁻¹ jaar⁻¹ voor droog, kalkarm, heischraal grasland en 20-22 voor vochtig hooiland (KDWs van 'Dotterbloemgrasland' en 'Nat, matig voedselrijk grasland') (Dobben et al., 2012). Dit maakt het aannemelijk dat stikstofaanvoer via depositie hoger is dan de KDW, waardoor de kans op een succesvolle ontwikkeling van voedselarme natuur via stikstoflimitatie klein is, met name als de ontwikkeling van droog schraalland wordt beoogd.

3.4 Grondwater

De kwaliteit van het freatisch grondwater is opgenomen in Tabel 3-6. Het grondwater is zacht tot middelhard (totale hardheid van 6.2-9°D). Verder is het grondwater neutraal tot zwak basisch (pH van 6.0-7.2). In deze pH-range wordt de zuurgraad gebufferd door bicarbonaat. De buffering is hoger op het noordoostelijk perceel (HCO_3^- van 177-183 mg l⁻¹) dan op het zuidwestelijk gelegen perceel ($\text{HCO}_3^- = 43$

¹ 27.1 kg N ha⁻¹ (Bekendelle) > 25.8 kg N ha⁻¹ (Willinks Weust) > 23.6 kg N ha⁻¹ (Veluwe) > 23.0 kg N ha⁻¹ (Lingegebied & Diefdijk-Zuid) > 22.1 kg ha⁻¹ (Stelkampsveld) > 20.8 kg N ha⁻¹ (Korenburgerveen) > 20.5 kg N ha⁻¹ (Landgoederen Brummen) > 19.9 kg N ha⁻¹ (Wooldse Veen) > 18.4 kg N ha⁻¹ (De Bruuk) > 17.8 kg N ha⁻¹ (Rijntakken)

mg l⁻¹). Hierdoor zal een hoge N-depositie in de bodem in de huidige situatie niet direct leiden tot een lagere pH, wat gunstig is voor de beoogde natuurdoelen. De verwachting is dat de bufferende werking in de bodem sterk afneemt na het eventueel afgraven van de bovengrond. Verder is het grondwater rijk aan nitraat, met name op het zuidwestelijk gelegen perceel. Op het zuidwestelijk gelegen perceel is een nitraatgehalte van 87 mg l⁻¹ gemeten, en op het noordoostelijk gelegen perceel zijn nitraatconcentraties gemeten van 25-31 mg l⁻¹. Dit is een indicatie dat er in de huidige situatie sprake is van een overmaat aan N, waardoor er veel moet veranderen (b.v. door af te graven) voordat kan worden gestuurd op N-limitatie.

Tabel 3-6 Kwaliteit van het freatisch grondwater

Parameter	BP1 (noordoost)	BP6 (noordoost)	BP8 (zuidwest)
Cl (mg l ⁻¹)	14.0	7.1	11.0
pH	6.5	7.2	6.0
Totale hardheid (°D)	7.8	9.0	6.2
EC (mS cm ⁻¹)	0.4	0.4	0.3
HCO ₃ (mg l ⁻¹)	177	183	43
Ca (mg l ⁻¹)	40	56	36
Mg (mg l ⁻¹)	9.7	4.9	4.9
K (mg l ⁻¹)	23.0	7.8	7.8
Na (mg l ⁻¹)	4.6	4.6	6.9
NH ₄ (mg l ⁻¹)	<1.9	<1.9	<1.9
NO ₃ (mg l ⁻¹)	31	25	87
P (mg l ⁻¹)	<1.3	<1.3	<1.3
Fe (µg l ⁻¹)	134	<12	39
S (mg l ⁻¹)	6.4	3.2	3.2

3.5 Inrichtingsmaatregelen

Noordoostelijk gelegen perceel

Op het noordoostelijk gelegen perceel is de fosfaattoestand dusdanig hoog dat ingrijpende maatregelen nodig zijn voor de ontwikkeling van het beoogde vochtig hooiland (N10.02) en droog schraalland (N11.01) via fosfaatlimitatie. Op de locaties BP2, BP3 en BP4 levert afgraven van een bodemlaag met een dikte van 30 cm niet voldoende op om de streefwaarde voor droog schraalland te halen en is het onduidelijk of dat wel het geval is na afgegraven van 50 cm. Verlagen van de fosfaattoestand via uitmijnen zou zonder afgraven tientallen jaren vergen (23-30 jaar in het zuidelijk deel en 56-80 jaar op het overig deel van het perceel, zie Bijlage III) en is daarmee ook geen realistische optie. Hetzelfde geldt voor BP1, waar vochtig hooiland wordt beoogd. Op de zuidelijk gelegen locaties BP5 en BP6 leidt afgraven van de bovenste 30 cm tot een gunstiger beeld, aangezien de P_{AL} in de bodemlaag op een diepte van 30-50 cm gelijk is aan 10-12, wat grenst aan het optimale traject voor vochtig hooiland (PAL < 10). Aanvullend hierop zou uitmijnen naar schatting binnen 1-8 jaar een FVG van 12-18% kunnen worden gerealiseerd (Bijlage III). Het lijkt dan ook alleen voor de locaties BP5 en BP6 haalbaar om in te zetten op de ontwikkeling van vochtig hooiland na afgraven van de bovenste 30 cm, idealiter in combinatie met een aantal jaren verschraal of uitmijnbeheer. Voor de andere locaties worden twee alternatieve maatregelen voorgesteld:

1. Het aanpassen van de natuurdoelstelling. Er kan worden overwogen in te zetten op de ontwikkeling van kruiden- en faunarijck grasland of structuurrijk bos. Voor de potentiële ontwikkeling van kruiden- en faunarijck grasland dienen P_{AL} en FVG bij voorkeur in traject van 18-26 te vallen, maar zijn er ook mogelijkheden bij hogere P-toestanden. Zodoende is de ontwikkeling van kruiden- en faunarijck grasland na afgraven van de bovenste 30 cm reëel. Ook kan worden overwogen in te zetten op structuurrijk bos, waarbij geen eisen worden gesteld aan de P-toestand.
2. Sturen op stikstoflimitatie (Hoofdstuk 3.3). Voor deze maatregel dient de bovengrond die rijk is aan organische stof en stikstof (bovenste 10 tot 30cm) te worden afgegraven zodat een zeer laag organisch stofgehalte en stikstofleverend vermogen van de bodem aan de oppervlakte komt. Mogelijk treedt hierdoor stikstoflimitatie op en wordt de ontwikkeling van voedselarme vegetatie mogelijk. Risico's zijn dat er dan nog steeds te veel stikstof wordt aangevoerd vanuit externe bronnen (zoals stikstofdepositie of kwel) en dat de bodem gevoeliger wordt voor verzuring. Ook kan een plotselinge aanvoer van stikstof, bijvoorbeeld door N-fixatie vanuit klavers, er voor zorgen dat het systeem weer snel eutroof wordt. Verder was de inschatting op basis van de boorprofielen dat afgraven in de lager gelegen delen tot een periodiek zeer nat systeem (GHG wordt op maaiveld geschat) zou leiden. Op basis van nieuwere inzichten (zie hiervoor) lijkt dat mee te vallen.

Zuidwestelijk gelegen perceel

Op het zuidwestelijk perceel is de fosfaattoestand lager dan op het noordoostelijk perceel. Twee maatregelen worden voorgesteld om de beoogde natuur (vochtig hooiland) te ontwikkelen:

1. Het afgraven van de fosfaatrijke toplaag. Door de bovenste 30cm af te graven wordt een fosfaattoestand bereikt die optimaal is voor de ontwikkeling van een voedselarme vegetatie rond locaties BP8 en BP9 of die optimaal is voor de ontwikkeling van een matig voedselrijke vegetatie bij locatie BP7 (Tabel 3-5). Dit is geschikt voor de potentiële ontwikkeling van vochtig hooiland. Wel dient er rekening mee te worden gehouden dat het afgraven van de bovenste 30cm van de bodem gepaard gaat met een vernatting, maar die lijkt op basis van de laatste inzichten niet te nat te zijn.
2. Verschralen/Uitmijnen van de fosfaatrijke toplaag.

Om een schatting te geven van de benodigde tijdsduur van verschralen/uitmijnen bij optie 2 is gebruik gemaakt van Vergelijking 1 (zie sectie 4.4 in van Doorn et al. (2023) voor details). De volgende aannamen zijn gedaan:

Het doel voor de fosfaatverzadigingsgraad is 12-18% in de bovenste 10cm van de bodem (optimaal voor de ontwikkeling van matig voedselrijke vegetatie,

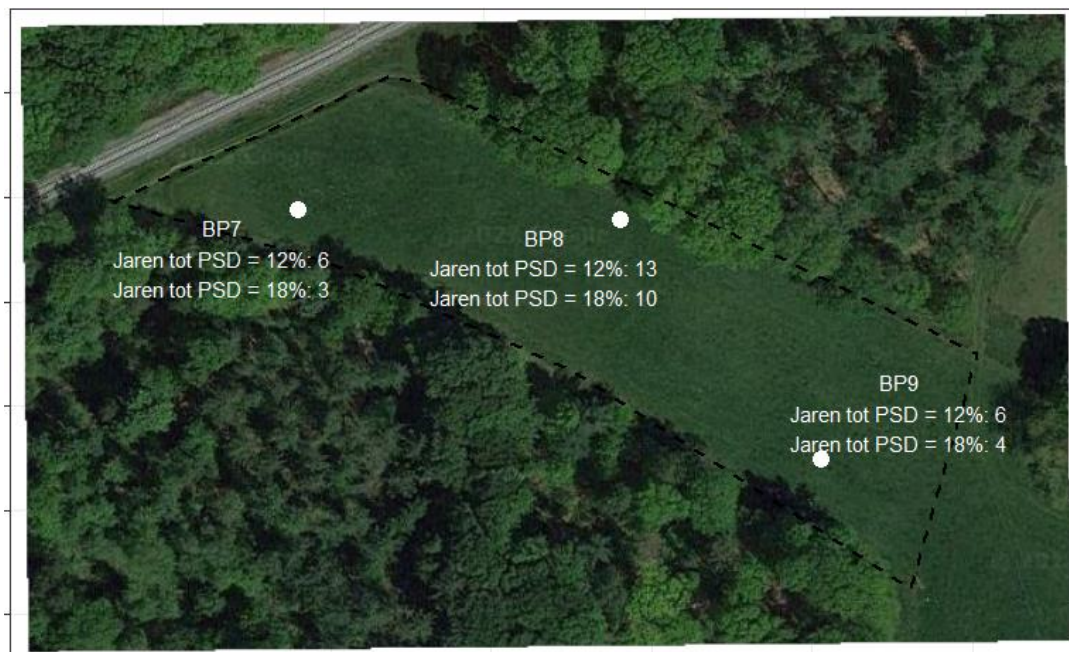
- Tabel 2-1).
- Gras onttrekt P uit de 0-10cm bodemlaag
- De bulkdichtheid is $1 / (0.02525 * OS + 0.6541) * 1000$
- De P balans bij uitmijnen is -30 kg P ha^{-1} (varieerde tussen -28 tot -40 kg P ha^{-1} in een 5-jarige uitmijnproef op grasland, van der Salm et al., 2009)
- Verschralen duurt circa 2x langer dan uitmijnen (van Rotterdam et al., 2021)

$$Jaren = \frac{(FVG_{doel} - FVG_{huidig}) * PSC * \rho * d * 31 * 10^{-4}}{P_{balans}} \quad (1)$$

Waar FVG_{doel} = doel voor de fosfaatverzadigingsgraad (%), FVG_{huidig} = huidige fosfaatverzadigingsgraad (%), PSC = maximale adsorptiecapaciteit (mmol kg^{-1}), ρ = bulkdichtheid (kg m^{-3}), d de dikte van de bodemlaag (m), 31 de molmassa van fosfor (mg mmol^{-1}) en P_{balans} de gemiddeld P balans (kg P ha^{-1})

jaar⁻¹), die bestaat uit de optelsom van P inputs (P-aanvoer via bemesting) en outputs (P wat wordt opgenomen door het gras).

De geschatte tijdsduur die nodig is om met uitmijnen de fosfaatverzadigingsgraad te verlagen tot 12-18% is circa 3-6 jaar voor locaties BP7 en BP9 en circa 10-13 jaar voor locatie BP8 (Figuur 3.3). De benodigde tijdsduur om met verschralen hetzelfde resultaat te bereiken is naar verwachting circa 6-12 jaar voor locaties BP7 en BP8 en circa 20-26 jaar voor locatie BP8, wat het dubbele is van de benodigde tijdsduur bij uitmijnen. Bij een fosfaatverzadigingsgraad <12% is de fosfaatbeschikbaarheid geschikt voor de potentiële ontwikkeling van matig voedselrijke vegetatie, zoals vochtig hooiland.



Figuur 3.3 Berekende tijdsduur van uitmijnen voor het verlagen van de fosfaatbeschikbaarheid tot een fosfaatverzadigingsgraad van 12-18%.

In de bovenstaande berekening is de verticale verplaatsing van fosfaat door het bodemprofiel niet meegenomen. In de lager gelegen delen van het perceel is er echter een grote fluctuatie in grondwaterstand waarbij de GHG tot vlak onder maaiveld wordt geschat. Dit kan leiden tot aanvoer van fosfaat vanuit diepere bodemlagen en versmering van fosfaat over het bodemprofiel. In een 10-jarige uitmijnproef leidde dit tot een afname in de effectiviteit van uitmijnen, waarbij niet kon worden aangetoond dat uitmijnen sneller de fosfaatbeschikbaarheid deed dalen dan verschralen (van Rotterdam et al., 2021). In dit onderzoek zijn totale P reserves in diepere bodemlagen (30-50 cm) laag, waardoor niet verwacht wordt dat er veel P vanuit diepere bodemlagen wordt aangevoerd. Het is echter wel mogelijk dat door P mobilisatie vanuit diepere bodemlagen (versmering van P door het bodemprofiel door een fluctuerende grondwaterstand) het aantal uitmijnjaren door de periodiek natte condities hoger ligt dan berekend.

Uitmijnadvies

Hiervoor is een inschatting gemaakt van de benodigde uitmijnperiode om de FVG te verlagen tot het gewenste niveau (FVG 12-18) voor de beoogde natuur (vochtig hooiland). Daarbij is ervan uitgegaan dat het uitmijnen wordt uitgevoerd met de bestaande grasmatten en dat daarmee een onttrekking van 30 kg P/ha/jaar wordt gerealiseerd (op basis van Van der Salm et al, 2009). Voor het uitvoeren van het uitmijnen is een advies van belang, waarbij hierna wordt ingegaan op een aantal aspecten die daarbij van belang zijn.

- Gewaskeuze: door Sival & Chardon (2004) is ingegaan op de fosfaatonttrekking van gewassen voor uitmijnen. Grasland en grasklaver hebben in het algemeen de hoogste fosfaatonttrekking, waarbij wel moet worden opgemerkt dat de beworteling relatief ondiep is. De meeste P zal worden onttrokken uit de 0-20 cm bodemlaag. Voor het goed aanslaan van de klaver is het gewenst om de grasklaver opnieuw in te zaaien. Als er op een perceel sprake is van grasland, betekent dat dat de grasmant eerst ingewerkt (gescheurd) moet worden. Dat zorgt voor een behoorlijke verstoring van de toplaag van de bodem, die soms ongewenst is. Timmermans & Van Eekeren (2016) beschreven een uitmijn-experiment met grasklaver in Brabant (Hengstven) dat gelopen heeft van 2003 en 2009. Postma et al. (2019) beschreven een praktijkexperiment in het Drents-Friese Wold, waarin is uitgemijnd in samenwerking met pachters, waarbij een deel van de percelen is uitgemijnd met grasklaver (ingezaaid in bouwland), een deel met productiegrasland en een deel met natuurlijk grasland. Als fosfaat op grotere diepte aanwezig is in de bodem is luzerne een interessant alternatief, aangezien het een hoge fosfaatonttrekking combineert met een grotere bewortelingsdiepte.
- Voor een maximale P-onttrekking dient het aanbod van overige nutriënten, vooral N en K, voldoende te zijn voor een goede gewasgroei. Ook de pH is van belang. Daartoe kan gebruik worden gemaakt van de (landbouwkundige) bemestingsadviezen, waarbij voor grasklaver een streef-pH van 5,5 wordt aangehouden en voor grasland van 5,0. Voor grasklaver is geen of slechts een beperkt N-gift nodig, omdat N uit de lucht wordt gebonden door Rhizobium-bacteriën die in symbiose leven met een vlinderbloemig gewas als klaver. Een K-gift is wel nodig, waarbij de hoogte afhangt van het K-gehalte in de bodem en het aantal snedes. Ook in het geval van (bestaand) grasland is zowel een N- als een K-gift nodig, die o.a. afhangt van het aantal snedes. Hieronder is een voorbeeld gegeven van de N- en K-bemesting van bestaand grasland, uitgaande van 2-3 snedes.
- Voor een uitmijnproef in Drenthe (Van Rotterdam et al., 2021) is daarbij het volgende schema aangehouden, waarbij op de drogere delen van de percelen 3 snedes werden geoogst en op de nattere delen slechts 2. De bemesting werd daarop aangepast.

Tabel 3.7. Hoogte van de N- en K-gift per snede in de uitmijn-objecten in 2010 (Postma et al., 2015).

Snedes	N-bemesting		K-bemesting	
	N-gift, kg N/ha	meststof	K-gift, kg K ₂ O/ha	meststof
1	120	Kalkammonsalpeter	180	Kornkali
2	100	Kalkammonsalpeter	100	KCI-60
3	80	Kalkammonsalpeter	100	KCI-60

In het geval van grasklaver, kan de N-gift worden beperkt tot de eerste snede en dan volstaat 50 kg N/ha. De K-gift dient wel op peil te worden gehouden.

Behalve een meststofgift met N en K kan een bekalking worden overwogen in het geval van uitmijning. Een (te) lage pH kan de grasgroei namelijk beperken. De optimale pH voor minerale gronden volgens de adviesbasis bemesting is weergegeven in Tabel 3.8.

Tabel 3.8. Landbouwkundige waardering van de pH-KCl op grasland op minerale gronden (en bijbehorende bekalkingsadviezen).

Waardering	pH-KCl	Advies
Te laag	< 4,4	bekalken tot 5,0
Vrij laag	4,4-4,7	bekalken tot 5,0
Goed	4,8-5,5	niet bekalken
Vrij hoog	5,6-6,1	niet bekalken
Hoog	> 6,1	niet bekalken

De pH-KCl is in het algemeen iets (enkele tienden) lager dan de pH-CaCl₂. Dit betekent dat op locaties van BP7, BP8 en BP9 net wel of net geen bekalking nodig is om de pH op het gewenste niveau te brengen, aangezien de pH-CaCl₂ in de toplaag daar varieerde tussen 4,8 en 5,0.

- De P-onttrekking hangt af van een aantal factoren, waaronder de productiviteit van het grasland / de grasklaver, de intensiteit van het beheer en de fosfaattoestand van de bodem. Timmermans & Van Eekeren (2016) lieten zien dat de P-onttrekking van grasklaver op een zandgrond in Brabant met een hoge P-uitgangstoestand in de periode van 2003 tot 2009 gelijk was aan 20-45 kg P/ha/jr. Daarbij werd gewerkt met 5 sneden. Van Rotterdam et al. (2021) hebben een uitmijnproef beschreven met een bestaande grasmat in een Drents beekdal, waarbij de P-onttrekking op vijf van de zes locaties met een relatief lage P-toestand (P_{AL} 3-23 mg P₂O₅/100 g) in de periode 2010-2014 gelijk was aan 26-35 kg P/ha/jr. In een meerjarige praktijkproef met pachters in het Drents-Friese Wold liep de P-onttrekking bij een uitmijnbeheer in de periode 2015-2018 uiteen van 13-22 kg P/ha/jaar op regulier grasland en van 13-30 kg P/ha/jaar op percelen met grasklaver. Op extensief beheerd natuurlijk grasland zonder bemesting bedroeg de P-onttrekking 5-10 kg P/ha/jr (Postma et al., 2019).

4 Conclusies

Het biochemisch onderzoek heeft tot de volgende inzichten geleid:

- De bodems zijn geclassificeerd als hydrovaaggronden (vlakvaaggronden) met uitzondering van de bodem op het hoger gelegen deel van het noordoostelijk gelegen perceel die geclassificeerd is als een xerovaaggrond (vorstvaaggrond). De algemene bodemopbouw is een bovengrond van fijn zand op een ondergrond van matig fijn tot zeer grof zand.
- De zuurgraad van de bodem is licht zuur (4.8-5.7 in de bovenste 10cm van de bodem). Op het hoger gelegen deel van het noordoostelijk gelegen perceel ligt de pH boven de streefwaarde voor de ontwikkeling van droog schraalland gemeten. Op de overige locaties ligt de zuurgraad binnen de streefwaarde voor de ontwikkeling van vochtig hooiland gemeten. Er zijn geen maatregelen nodig om de zuurgraad te verhogen.
- De bodems zijn door een laag organische stof -en kleigehalte (lage CEC, klei-humus-complex) gevoelig voor verzuring. Dit is met name het geval voor diepere bodemlagen waar het organisch stofgehalte lager is in dan de toplaag (OS = 2.5-4.2% in de 0-10 bodemlaag, OS = 0.5-2.4% in de bodemlagen hieronder).
- De fosfaattoestand is in het noordoostelijk gelegen perceel erg hoog, waarbij de P_{AL} in de bovenste 30cm van het noordelijke deel varieert tussen 84-151 mg P_2O_5 100g⁻¹, de FVG tussen 62-91% en de P_{CaCl_2} tussen 6.1-10.7 mg P kg⁻¹. In het zuidelijk deel van het perceel varieert P_{AL} in de bovenste 30 cm van de bodem tussen 33-38 mg P_2O_5 100g⁻¹, de FVG tussen 40-48% en P_{CaCl_2} tussen 1.8-2.6 mg kg⁻¹. Daarmee is de bovengrond niet geschikt voor de gewenste natuurontwikkeling (droog schraalland op hooggelegen kop en vochtig hooiland op het lager gelegen deel). Ook in de daaronder liggende bodemlagen is de fosfaattoestand nog hoog en daarmee veelal niet optimaal of suboptimaal voor matig voedselrijke natuur, wat de kans op een succesvolle ontwikkeling verkleint. In het zuidwestelijk gelegen perceel was de fosfaattoestand in de bovenste 30 cm veel lager (P_{AL} 10-28 mg P_2O_5 100g⁻¹, FVG 23-37% en P_{CaCl_2} tussen 0.3-1.4 mg kg⁻¹) maar nog niet optimaal voor de beoogde natuur (vochtig hooiland). In bodemlagen >30 cm diepte is de fosfaattoestand wel laag genoeg.

Op basis van het biochemisch onderzoek worden de volgende adviezen gegeven, waarbij we onderscheid maken tussen het noordoostelijk en het zuidwestelijk gelegen perceel.

- Op het noordoostelijk gelegen perceel wordt droog schraalland beoogd op de hoger en centraal gelegen kop en vochtig hooiland op het lager gelegen deel daaromheen. De fosfaattoestand in de bovengrond is echter op het gehele perceel extreem hoog. Zeer ingrijpende maatregelen zijn nodig om natuur op basis van fosfaatlimitatie te ontwikkelen; een bodemlaag met een dikte van minimaal 50 cm dient afgegraven te worden. Het lijkt dan ook niet realistisch te sturen op fosfaatlimitatie. Alternatieve oplossingen zijn:
 - Het aanpassen van de natuurdoelstelling naar de ontwikkeling van kruiden- en faunarijk grasland (na afgraven van de bovenste 30 cm) of structuurrijk bos of
 - Afgraven van de bovenste 10cm tot 30cm van de bodem en vervolgens sturen op het ontwikkelen van schrale natuur op basis van stikstoflimitatie. Het lage organische stofgehalte en N-beschikbaarheid in de bodemlaag op een diepte van 30-50 cm lijkt dit

mogelijk te maken. Door het verwijderen van de toplaag zullen de bodems echter gevoelig worden voor verzuring, omdat de bodemlaag die dan aan het oppervlak komt een lagere CEC en zuurbuffering heeft. Ook bestaat het risico dat er een te hoge stikstofaanvoer is vanuit externe bronnen (bijvoorbeeld depositie), waardoor de beoogde schrale natuur zich niet ontwikkelt of dat schrale natuur zich wel ontwikkelt maar dat het systeem snel eutroof wordt door stikstofaanvoer vanuit externe of interne bronnen (bijvoorbeeld fixatie door klavers). Verder leidt afgraven tot nattere condities op de lager gelegen delen van het perceel, waarvan nader bekeken moet worden of het daarmee niet te nat wordt.

- Op het zuidwestelijk gelegen perceel wordt vochtig hooiland beoogd. De fosfaattoestand van de bodem is in de uitgangssituatie echter te hoog. Voorgestelde maatregelen zijn:
 - Het afgraven van de bovenste 30cm van de bodem. Dit gaat gepaard met periodiek zeer natte condities (GHG boven maaiveld).
 - De fosfaattoestand te verlagen door uit te mijnen. Het benodigde aantal uitmijnjaren wordt grof geschat op 3-13 jaar, afhankelijk van de locatie. Verschralen duurt naar verwachting 6-26 jaar, ofwel twee keer zo lang dan uitmijnen. Mogelijk ligt het benodigde aantal uitmijnjaren hoger door de P-aanvoer vanuit diepere bodemlagen.

Literatuurlijst

- Dobben, H. v., Bobbink, R., Bal, D., & Hinsberg, A. v. (2012). *Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en leefgebieden van Natura2000*. Wageningen: Alterra.
- Eichorn, K., & Ketelaar, R. (2011). *Ecologie en beheer van kruidenrijke akkers op de zandgronden*. Zeist: Eichorn Ecologie & Natuurmonumenten.
- Eichorn, K., & Ketelaar, R. (2016). *Ecologie en beheer van kruidenrijke graslanden op de zandgronden*. Zeist: Eichorn Ecologie & Natuurmonumenten.
- Rietra, R., Brus, D., Wamelink, G., Kemmers, R., & Voogd, J. (2012). *Inrichtingsontwerp van het bodemmeetnet voor de natuur in de provincie Gelderland*. Wageningen: Alterra.
- Smolders, A., Lucassen, E., Tomassen, H., Lamers, L., & Roelofs, J. (2006). De problematiek van fosfaat voor natuurbeheer. *Natuur, Bos en Landschap*, pp. 5-11.
- van der Salm, C., Chardon, W. J., Koopmans, G. F., van Middelkoop, J. C., & Ehler, P. A. (2009, 03 01). Phytoextraction of Phosphorus-Enriched Grassland Soils. *Journal of Environmental Quality*. doi:10.2134/jeq2008.0068
- van Doorn, M., van Rotterdam, D., Ros, G., Koopmans, G. F., Smolders, E., & de Vries, W. (2023, 07 28). The phosphorus saturation degree as a universal agronomic and environmental soil P test. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, pp. 1-20. doi:10.1080/10643389.2023.2240211
- van Rotterdam, A., Bussink, D., Temminghoff, E., & van Riemsdijk, W. (2012, 08 05). Predicting the potential of soils to supply phosphorus by integrating soil chemical processes and standard soil tests. *Geoderma*, pp. 617-626. doi:10.1016/j.geoderma.2012.07.003
- van Rotterdam, D., Postma, R., & van Doorn, M. (2021). *Natuurontwikkeling Roeghoorn; Resultaten van 10 jaar uitmijnen en verschrallen in het beekdal van het Oostervoortschediep*. Wageningen: NMI.
- VBNE. (2023). *Handreiking voor de omvorming van voormalige landbouwgronden naar schrale natuur*. Driebergen: Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren.

Bijlage I Boorbeschrijvingen

Tabel S1-1 Boorbeschrijving BP1 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: 97cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-31	1Ah	Zwak lemig, matig fijn zand
31-40	2Ag	Overgang naar humusloos, leem arm, matig fijn zand
30-70	1Bg	Leem arm, matig fijn zand. Aanwezigheid van ijzeroer op 50-60cm
70-80	2Bg	Leem arm, matig grof zand
80-120	Cg	Leem arm. Matig grof zand. Vanaf 100cm bijna geen ijzer meer te zien

Tabel S1-2 Boorbeschrijving BP2 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: 150cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-30	1Ah	Matig humus arm, zwak lemig, matig fijn zand
30-40	2A	Overgang naar humusloos, leem arm, matig fijn zand
40-50	1Bg	Leem arm, matig fijn zand
50-60	2Bg	Zeer sterk lemig, matig fijn zand. IJzeroer vorming, nog geen korrels
60-95	3Bg	Zwak lemig, matig grof zand
95-120	Cg	Leem arm, zeer grof zand. Op 100cm ijzeroer en verhoogde afzetting van silt.

Tabel S1-3 Boorbeschrijving BP3 (vorstvaaggrond). Grondwaterstand: 180cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-32	Ah	Matig humus arm, zwak lemig, matig fijn zand
32-70	1B	Leem arm, matig tot zeer fijn zand
80-100	2Bg	Leem arm, matig fijn zand
100-120	3Bg	Zwak lemig, matig fijn zand

Tabel S1-4 Boorbeschrijving BP4 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: circa 120 cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-30	Ah	Matig humus arm, zwak lemig, matig fijn zand
30-50	1Bg	Zeer humus arm, leem arm, matig fijn zand
50-100	2Bg	Leem arm, matig grof zand. IJzeroer op 40-60cm
100-120	3Bg	Sterk lemig, matig grof zand

Tabel S1-5 Boorbeschrijving BP5 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: 79cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-10	1Ahg	Zeer humus arm, leem arm, matig fijn zand
10-30	2Ag	Overgang naar humusloos, leem arm, matig fijn zand.
30-110	Bg	Zwak lemig, matig grof zand. Op 30-40cm ijzerafzettingen.
110-120	C	Zeer grof, leem arm zand

Tabel S1-6 Boorbeschrijving BP6 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: 75cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-25	1Ahg	Matig humus arm, leem arm, matig grof zand
25-50	2Ag	Overgang naar humusloos, leem arm, matig grof zand. Inspoeling van humus uit de bovengrond.
50-85	Bg	Leem arm, matig grof zand. Op 50-60cm
85-120	Cr	Leem arm, zeer grof zand

Tabel S1-7 Boorbeschrijving BP7 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: 80cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-40	Ahg	Matig humus arm, zwak lemig, matig fijn zand. IJzeroer brokjes op 20cm
40-80	Bg	Leem arm, matig grof zand. Sporen van humus waar ijzer in wordt afgezet
80-110	1Cg	Sterk lemig, matig fijn zand
110-120	2C	Leem arm, matig grof zand

Tabel S1-8 Boorbeschrijving BP8 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: 110cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-32	Ahg	Matig humus arm, zwak lemig, matig fijn zand. IJzer op 10cm.
32-75	1Bg	Leem arm, matig tot zeer fijn zand. Bijmenging met gesorteerd leem.
75-80	2Bg	Zeer sterk, lemig zand
80-110	3Bg	Leem arm, matig grof zand
110-135	1Cg	Siltig leem
135-150	2Cr	Leem arm, zeer grof tot uiterst grof zand

Tabel S1-9 Boorbeschrijving BP9 (vlakvaaggrond). Grondwaterstand: 83 cm -mv

Diepte	Horizont	Opmerking
0-10	1Ahg	Matig humeus, zwak tot zeer sterk lemig, matig fijn zand. Zichtbaar >10 jaar niet geploegd.
10-32	2Ahg	Zeer humus arm, zwak tot sterk lemig, matig fijn zand. IJzer op 10cm.
32-60	1Bg	Sterk lemig, matig fijn zand
60-100	2Bg	Leem arm, matig grof zand
100-120	Cr	Siltig leem en matig grof zand.

Bijlage II Analyseresultaten bodem

Tabel S2-1 Zuurgraad, textuur, organische stof, stikstof totaal en het klei-humuscomplex (CEC) van de locaties op het noordoostelijk gelegen perceel

Locatie	Diepte	pH _{CaCl2}	Klei (%)	Zand (%)	Silt (%)	OS (%)	N-totaal (mg kg ⁻¹)	CEC (mmol+ kg ⁻¹)
Noordoostelijk perceel, hoger gelegen deel waar de ontwikkeling van droog schraalland (N11.01) wordt beoogd								
BP2	0-10	5.2	5	82	9	3.5	1600	49
BP2	10-30	5.2	5	80	13	1.8	680	27
BP2	30-50	5.3	4	80	14	1.5	390	20
BP3	0-10	5.7	2	80	14	3.6	1690	54
BP3	10-30	5.5	3	84	11	1.7	640	22
BP3	30-50	5.7	5	82	12	0.9	310	31
BP4	0-10	5.6	3	78	14	3.8	1730	60
BP4	10-30	5.8	4	83	11	2.1	760	35
BP4	30-50	5.6	3	89	6	2.4	730	23
Noordoostelijk perceel, lager gelegen deel waar de ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd								
BP1	0-10	5.3	5	73	18	3.4	1530	56
BP1	10-30	5.8	4	87	8	1.2	350	31
BP1	30-50	6	3	86	10	1	280	30
BP5	0-10	5.4	4	82	11	2.6	1250	50
BP5	10-30	5.3	1	96	1	1.4	260	16
BP5	30-50	5.7	3	94	3	0.5	<200	33
BP6	0-10	5.7	5	83	9	2.5	1270	57
BP6	10-30	6	6	91	1	1.4	440	36
BP6	30-50	5.5	6	84	8	1.1	<200	33

Tabel S2-2 Zuurgraad, textuur, organische stof, stikstof totaal en het klei-humuscomplex (CEC) van de locaties op het zuidwestelijk gelegen perceel

Locatie	Diepte	pH _{CaCl2}	Klei (%)	Zand (%)	Silt (%)	OS (%)	N-totaal (mg kg ⁻¹)	CEC (mmol+ kg ⁻¹)
Zuidwestelijk perceel, waar de ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd								
BP7	0-10	4.8	6	78	12	3.6	1640	43
BP7	10-30	5.6	4	90	4	1.4	620	40
BP7	30-50	5.8	6	92	1	0.6	300	39
BP8	0-10	4.8	4	79	12	4.1	1810	48
BP8	10-30	4.9	5	85	8	1.8	730	20
BP8	30-50	5.7	6	87	6	0.7	310	24
BP9	0-10	5	5	76	14	4.2	1930	46
BP9	10-30	5.3	5	84	10	1.2	470	17
BP9	30-50	4.9	6	76	17	0.6	350	14

Tabel S2-3 De maximale P adsorptiecapaciteit (PSC), totaal beschikbare P reserves/totaal anorganisch fosfaat (P_{ox}), reversibel gebonden fosfaat wat de P concentratie in oplossing buffert (P_{AL}) en direct beschikbaar fosfaat (P_{CaCl2}) van de locaties op het noordoostelijk gelegen perceel

Locatie	Diepte	PSC (mmol kg ⁻¹)	P _{ox} (mmol kg ⁻¹)	FVG	P _{AL} (mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)	P _{CaCl2} (mg kg ⁻¹)
Noordoostelijk perceel, hoger gelegen deel waar de ontwikkeling van droog schraalland (N11.01) wordt beoogd						
BP2	0-10	46	29	62	84	8.7
BP2	10-30	49	30	62	98	8.2
BP2	30-50	50	11	21	35	1.3
BP3	0-10	41	27	67	96	9.4
BP3	10-30	43	30	71	108	10.7
BP3	30-50	38	14	37	55	6.1
BP4	0-10	58	36	62	120	8.2
BP4	10-30	64	42	65	151	7.2
BP4	30-50	66	9	13	29	0.5
Noordoostelijk perceel, lager gelegen deel waar de ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd						
BP1	0-10	34	26	76	100	8
BP1	10-30	28	26	91	123	7.7
BP1	30-50	23	14	62	69	4.6
BP5	0-10	30	14	44	35	2.6
BP5	10-30	29	14	48	38	2.3

Locatie	Diepte	PSC (mmol kg ⁻¹)	P _{OX} (mmol kg ⁻¹)	FVG	P _{AL} (mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)	P _{CaCl2} (mg kg ⁻¹)
BP5	30-50	15	3	23	10	0.4
BP6	0-10	37	15	40	33	2.6
BP6	10-30	35	14	41	33	1.8
BP6	30-50	35	7	19	12	0.4

Tabel S2-4 De maximale P adsorptiecapaciteit (PSC), totaal beschikbare P reserves/totaal anorganisch fosfaat (P_{OX}), reversibel gebonden fosfaat wat de P concentratie in oplossing buffert (P_{AL}) en direct beschikbaar fosfaat (P_{CaCl2}) van de locaties op het zuidwestelijk gelegen perceel

Locatie	Diepte	PSC (mmol kg ⁻¹)	P _{OX} (mmol kg ⁻¹)	FVG	P _{AL} (mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹)	P _{CaCl2} (mg kg ⁻¹)
Zuidwestelijk perceel, waar de ontwikkeling van vochtig hooiland (N10.02) wordt beoogd						
BP7	0-10	37	9	23	10	0.3
BP7	10-30	39	11	27	16	0.4
BP7	30-50	25	4	17	7	0.2
BP8	0-10	37	14	37	28	1.4
BP8	10-30	39	12	30	19	0.5
BP8	30-50	18	2	9	<3	<0.3
BP9	0-10	25	7	29	12	0.5
BP9	10-30	28	10	35	22	0.5
BP9	30-50	18	2	9	<3	<0.3

Bijlage III Berekende uitmijnjaren noordoostelijk gelegen perceel

Een schatting van de benodigde tijdsduur van uitmijnen is berekend met Vergelijking 1 (zie hoofdstuk 3.5). De volgende aannamen zijn gemaakt:

Het doel voor de fosfaatverzadigingsgraad is 12-18% in de bovenste 20cm van de bodem (optimaal voor de ontwikkeling van matig voedselrijke vegetatie,

- Tabel 2-1).
- Gras onttrekt P uit de 0-20cm bodemlaag. Dit is een dikkere bodemlaag dan aangenomen bij het zuidwestelijk gelegen perceel; reden hiervoor is dat er op het noordoostelijk gelegen perceel meer P buffering vanuit diepere bodemlagen verwacht wordt.
- De bulkdichtheid is $1 / (0.02525 * OS + 0.6541) * 1000$
- De P balans bij uitmijnen is -30 kg P ha^{-1} (varieerde tussen -28 tot -40 kg P ha^{-1} in een 5-jarige uitmijnproef op grasland, van der Salm et al., 2009)
- Verschralen duurt circa 2x langer dan uitmijnen (van Rotterdam et al., 2021)
- Voor de locaties waar vochtig hooiland wordt beoogd is een uitmijntijd berekend voor de uitgangssituatie (niet afgraven) en voor het scenario dat er 30cm wordt afgegraven.

$$Jaren = \frac{(FVG_{doel} - FVG_{huidig}) * PSC * \rho * d * 31 * 10^{-4}}{P_{balans}} \quad (1)$$

Waar FVG_{doel} = doel voor de fosfaatverzadigingsgraad (%), FVG_{huidig} = huidige fosfaatverzadigingsgraad (%), PSC = maximale adsorptiecapaciteit (mmol kg^{-1}), ρ = bulkdichtheid (kg m^{-3}), d de dikte van de bodemlaag (m), 31 de molmassa van fosfor (mg mmol^{-1}) en P_{balans} de gemiddeld P balans ($\text{kg P ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$), die bestaat uit de optelsom van P inputs (P-aanvoer via bemesting) en outputs (P wat wordt opgenomen door het gras).

De geschatte tijdsduur die nodig is om in de uitgangssituatie met uitmijnen de fosfaatverzadigingsgraad te verlagen tot 12-18% is circa 23-30 jaar voor het meest zuidelijk gelegen deel waar de ontwikkeling van vochtig hooiland wordt beoogd (locaties BP5 en BP6), 56-62 jaar voor het meest noordwestelijk gelegen deel waar de ontwikkeling van vochtig hooiland wordt beoogd (locatie BP1) en 56-80 jaar op het hoger gelegen deel waar de ontwikkeling van droog schraalland wordt beoogd (locaties BP2 t/m BP4) In het scenario dat er 30cm van de bodem wordt afgegraven voor de ontwikkeling van vochtig hooiland is het aantal uitmijnjaren naar schatting 1-6 jaar in het zuidelijk gelegen deel (locaties BP5 en BP6) en 32-36 jaar op het noordwestelijk gelegen deel (locatie BP1) (Figuur 3.1). Bij een fosfaatverzadigingsgraad $<12\%$ is de fosfaatbeschikbaarheid geschikt voor de potentiële ontwikkeling van vochtig hooiland en droog schraalland.



Figuur S3-1 Berekende tijdsduur van uitmijnen voor het verlagen van de fosfaatbeschikbaarheid tot een fosfaatverzadigingsgraad van 12-18%.



Nutriënten Management Instituut BV
Nieuwe Kanaal 7c
6709 PA Wageningen

tel: (06) 29 03 71 03
e-mail: nmi@nmi-agro.nl
website: www.nmi-agro.nl