



Systeemgericht herstel van Droge heide in Natura 2000-gebied de Regte Heide, Noord-Brabant

Eindrapportage

L.S van Veenhuisen, MSc. & Dr. H. van Kleef

Stichting Bargerveen

December 2025

COLOFON

Titel: Systeemgericht herstel van Droge heide in het Natura 2000-gebied Regte Heide, Noord-Brabant. Eindrapportage

Auteurs: Laura van Veenhuisen, MSc. & Dr. Hein van Kleef

In samenwerking met: Brabants Landschap

Contactpersoon: Laura van Veenhuisen

Foto voorkant: Laura van Veenhuisen

Kenmerk project C2279964/4994453

Stichting Bargerveen | Nijmegen | December 2025

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



Samenvatting

De Droge heide (H4030) op de Regte Heide verkeert door stikstofdepositie en vergrassing in slechte staat, ondanks eerdere beheermaatregelen zoals plaggen. Hoewel plaggen de nutriëntenvoorraad kan verlagen en zo herstel van heidesoorten kan bevorderen, blijkt dat deze maatregel vaak leidt tot dominantie van ongewenste soorten zoals grijs kronkelsteeltje, verstoring van de N:P-verhouding en verzuring van de bodem. Om deze negatieve effecten te compenseren, worden in sommige gebieden bodemverbeterende maatregelen zoals bekalking of toevoeging van steenmeel toegepast. Dit project onderzoekt welke combinaties van beheermaatregelen—plaggen, bodemverbeteraars en inbreng van heidezaad—effectief zijn voor het herstellen van typische Droge heidevegetatie en het tegengaan van vermosing op de Regte Heide.

In augustus 2022 zijn op de Regte Heide 197 plots uitgezet op ondiep geplagde heide en op grijs kronkelsteeltje- of pijpenstrootje gedomineerde stukken van de heide. In deze plots zijn diverse beheermaatregelen toegepast: wel of niet plaggen, al dan niet gecombineerd met toevoeging van steenmeel of kalk, en het wel of niet uitstrooien van lokaal geoogst heidemaaisel. Vegetatieopnames zijn twee jaarlijks uitgevoerd tussen het najaar van 2022 (nulmeting) en het voorjaar van 2025, inclusief metingen van bedekking en dikte van grijs kronkelsteeltje. Bodem- en plantmonsters zijn aan het begin (2022) en het eind (2025) van het project verzameld om effecten van de behandelingen op pH, nutriëntenconcentraties, N:P-verhouding en plantchemie te bepalen.

Proef op geplagde bodem: Bekalking leidde tot een afname van grijs kronkelsteeltje in geplagde en heideplots. Steenmeel leidde in de heide tot afsterven van kronkelsteeltje, maar een toename op de geplagde stukken, al bleef de totale mat overal dun en ver onder dominante bedekking. Het toevoegen van heidemaaisel had geen merkbare invloed op de snelheid van het herstel van de vegetatie. Bodemanalyses tonen aan dat kalktoepassing, leidde tot een grote stijging van de pH, calcium en magnesium en een afname van aluminium. Kennelijk was dit niet gunstig voor korstmossen, want deze namen af na bekalking. Steenmeel leidde slechts een toename van kalium, maar ook tot een toename van korstmossen. Nitraat- en ammoniumgehaltes vertoonden geringe verschillen, terwijl fosfor (P-Olsen) in sommige behandelingen, zoals plaggen kalk laag, significant lager was dan in de controle of steenmeelplots. Vooral de chemische samenstelling van grijs kronkelsteeltje reageerde op de veranderde bodemchemie, met hogere gehalten van Ca en Mg in bekalkte plots en K in steenmeelplots. In de proefvlakken in pijpenstrootjevegetatie gebeurde weinig. De hoge bedekking van grassen bleef present en de behandelingen hadden geen effect op de aanwezigheid van grijs kronkelsteeltje tussen de grasvegetatie. Maatregelen om vergrassing te doorbreken blijven hier noodzakelijk.

Voor het kweekexperiment zijn in het najaar van 2022 in totaal 192 kweekpotten (doorsnede 36 cm) gevuld met verschillende bodem- en plantmaterialen van de Regte Heide; ondiep plaggen, diep plaggen, onverzuurd moedermateriaal en ongeplagde bodem bedekt met een dominante bedekking van pijpenstrootje of grijs kronkelsteeltje. De potten zijn geplaatst buiten het kassencomplex van de Radboud Universiteit. Direct na het vullen zijn nulmetingen van vegetatiebedekking en de dikte van de grijs kronkelsteeltje-mat uitgevoerd, en zijn bodemonsters genomen. Vervolgens zijn de verschillende behandelingen toegepast, bestaande uit lage en hoge concentraties steenmeel (5 of 10 ton/ha), kalk (0,5 of 2 ton/ha) en fragmenten van grijs kronkelsteeltje. Voor iedere bodemlaag was er ook een controle zonder toevoegingen. Uit de resultaten blijkt dat de effecten van plagdiepte en bodemverbeteraars sterk afhankelijk zijn van de startcondities en de toegepaste behandeling. Bij diep geplagde bodems heeft diep plaggen zonder toevoegingen of met grijs kronkelsteeltje-fragmenten geleid tot de hoogste bedekking en matdikte van grijs kronkelsteeltje, terwijl toevoeging van kalk, vooral op hoge dosis, resulteerde in een duidelijke remming van zowel totale matdikte als vitale toplaag. Steenmeelbehandelingen hadden een minder uitgesproken effect, maar verminderden of vertraagde eveneens de groei van de matdikte. Ondiep plaggen vertoonde een vergelijkbaar, zij het minder sterk effect: de toevoeging van kalk vertraagde de bedekking van grijs kronkelsteeltje, terwijl de matdikte bij

ondiep plaggen zonder toevoeging relatief hoog werd. In potten met niet verzuurd moedermateriaal of met een dominante startbedekking van grijs kronkelsteeltje of pijpenstrootje werden weinig significante verschillen gevonden tussen behandelingen, wat suggereert dat het effect van bodemverbeteraars beperkt is wanneer de vegetatie of bodemstructuur al dominant aanwezig is. Chemische analyses tonen dat kalk het meest effectief de pH verhoogde en aluminiumconcentraties verlaagde, terwijl steenmeel slechts bescheiden effecten had.

Voor heide op de Regte Heide lijken bodembehandelingen met lage concentraties kalk of steenmeel geschikt om de mat van grijs kronkelsteeltje af te laten sterven, zonder de bodem drastisch te verstoren. Hoge kalkdoseringen leiden tot te snelle en te grote pH-stijgingen, wat kan resulteren in overgroei door pijpenstrootje en verstoring van het bodemleven. Steenmeel heeft het voordeel van een geleidelijke pH-verhoging en stimuleert daarnaast korstmossen, wat bijdraagt aan de biodiversiteit. De werking van steenmeel is echter traag en de effecten van deze bodemverbeteraar zijn daardoor nog niet volledig vastgesteld gedurende dit project.

Enige terughoudendheid met het opschalen van de maatregelen is nog op zijn plaats aangezien er nog geen herstel is opgetreden van kenmerkende kruiden en er na het afsterven van grijs kronkelsteeltje een laag organisch materiaal achterblijft. Vandaar dat we adviseren maatregelen te toetsen om deze knelpunten op te lossen en de monitoring voort te zetten.

Inhoud

Samenvatting	3
1 Inleiding herstel Droge heide in Natura 2000-gebied de Regte Heide & Riels laag	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Kennisleemten en Projectdoel	8
1.3 Opzet project	8
2. Projectonderdeel: maatregelenplots	10
2.1 Opzet & methode plotonderdeel.....	10
2.1.1 Methode: Inzetten plots	10
2.1.2 Methode: Vegetatieopnames	12
2.1.3 Methode: Bodem en vegetatiemonsters	12
2.2 Resultaten plotonderdeel	14
2.2.1 Resultaten: Vegetatieopnames.....	14
2.2.2 Resultaten: Bodem.....	26
2.2.3 Vegetatiechemie	33
2.3 Discussie & conclusie plotonderdeel	36
3. Projectonderdeel: kweekexperiment.....	40
3.1 Opzet & methode kweekexperiment.....	40
3.1.1 Methode Potten inzetten	40
3.1.2. Methode Vegetatieopnames	41
3.1.3. Methode: Visuele analyse van vegetatiebedekking middels fotomateriaal	42
3.1.4. Methode: Bodemmonsters.....	42
3.2 Resultaten kweekexperiment	43
3.2.1 Resultaten: Vegetatieopnames.....	43
3.2.2 Resultaten: Bodemmonsters.....	54
3.3 Discussie & conclusie kweekexperiment	56
4. Overkoepelende discussie en vervolg.....	57
Dankwoord	60
Referenties.....	61
Bijlage 1: Toegepaste chemische analyses van de bodem.....	63
Bijlage 2: Resultaten bodemchemie analyse volledig overzicht.....	
Bijlage 3: Resultaten plantchemie analyse volledig overzicht.....	

1 Inleiding herstel Droge heide in Natura 2000-gebied de Regte Heide & Riels laag

1.1 Aanleiding

De landelijke staat van instandhouding van het habitatype Droge heide (H4030) is zeer ongunstig (Natura2000, 2008). De instandhoudingsdoelen stellen dat de kwaliteit van dit habitatype structureel verbeterd moet worden. In het Natura 2000-gebied de Regte Heide & Riels Laag (hierna: de Regte Heide) komt in totaal circa 115 hectare van het habitatype Droge heide voor (Figuur 1). Deze oppervlakte staat echter onder druk door vergrassing als gevolg van hoge atmosferische stikstofdepositie (Natura2000, 2021). De verhoogde beschikbaarheid van stikstof leidt tot de dominantie van grassen zoals pijpenstrootje (*Molinia caerulea*), wat de soortenrijkdom en structuur van heidevegetaties sterk ondermijnt.

Om deze effecten tegen te gaan, zijn in dit gebied meermaals maatregelen toegepast zoals plaggen of chopperen, waarbij de strooisellaag en bovengrondse vegetatie (deels) zijn verwijderd (R.F. van der Burg, 2019). Deze methoden kunnen effectief zijn in het reduceren van de nutriëntenvoorraad in de bodem, met name stikstof, en daarmee gunstige voorwaarden creëren voor kieming en vestiging van heidesoorten.

Toch is plaggen geen maatregel zonder risico's. Recent onderzoek, onder andere uitgevoerd door J. Vogels van Stichting Bargerveen, wijst erop dat intensieve plagmaatregelen ook negatieve effecten kunnen hebben op de bodemchemie en -ecologie. Bij het verwijderen van de bovenste bodemlagen wordt niet alleen stikstof (N) verwijderd, maar ook fosfor (P), wat kan leiden tot een verstoorde N:P-ratio (de verhouding tussen stikstof en fosfor). Deze disbalans kan problematisch zijn voor typische heidevegetaties. Vogels (2025) stelt in zijn proefschrift dat een te sterke verlaging van de Fosforconcentratie ertoe kan leiden dat herstel van kenmerkende soorten stagneert, omdat deze niet in staat zijn zich te vestigen bij een Fosfor-tekort, zelfs wanneer de stikstofdruk is verminderd. Hierdoor ontstaan condities waarin pioniersoorten of juist niet-heidesoorten (zoals grassen of mossen) domineren. Daarnaast blijkt uit beheerervaringen dat plaggen op de Regte Heide tot nu toe weinig heeft opgeleverd: behandelde oppervlakten ontwikkelen zich vaak richting dominantie van grijs kronkelsteeltje in plaats van naar soortenrijke heide. Dit onderstreept dat, naast maatregelen om stikstof af te voeren en vergrassing tegen te gaan, aanvullend onderzoek nodig is om een echte kwaliteitsimpuls te geven aan reeds geplagde heideoppervlakten.

Verder laat het proefschrift van Vogels zien dat het verwijderen van organisch materiaal ook de bufferende capaciteit van de bodem aantast, waardoor verzuring kan toenemen. Dit vergroot de kans op dominantie van soorten als grijs kronkelsteeltje (*Campylopus introflexus*), een invasieve exoot die zich met name weet te vestigen op grofzandige, zure bodems onder hoge stikstofbelasting (Sparrius & Kooijman, 2012). In de Regte Heide is dit fenomeen goed zichtbaar: grote delen van de heide worden na plagmaatregelen snel overgenomen door grijs kronkelsteeltje, waardoor kwaliteitsverbetering van het habitatype uitblijft (Sierdsema, 2013).

Om de negatieve effecten van plaggen – met name de disbalans in de N:P-ratio en verhoogde verzuring – te compenseren, worden in sommige Nederlandse natuurgebieden aanvullende maatregelen genomen zoals het toepassen van steenmeel en/of bekalking. Steenmeel, rijk aan basische mineralen, wordt gebruikt om verzuring tegen te gaan, de bufferende capaciteit van de bodem te herstellen en essentiële nutriënten (zoals calcium, magnesium en sporenelementen) toe te voegen. Bekalking heeft een vergelijkbaar effect: het verhoogt de pH van de bodem (sterker dan steenmeel) en verbetert

daarmee de beschikbaarheid van bepaalde nutriënten, met name fosfor. Volgens Vogels (2020) kunnen deze ingrepen bijdragen aan een gunstiger kiemingsmilieu voor heidesoorten, mits zorgvuldig gedoseerd en afgestemd op de lokale bodemgesteldheid. Een risico bij overmatig gebruik is echter dat het bodemmilieu te basisch wordt, wat nadelig kan zijn voor de typische heideflora en kan leiden tot een verschuiving richting soorten van voedselrijkere milieus. Mogelijk is het voordelig om i.p.v. eerst te plaggen in combinatie met het gebruik van een bodemverbeteraar ervoor te kiezen om geen plagmaatregelen uit te voeren en slechts een gift te geven van deze bodemverbeteraars.

Dit project heeft tot doel om oplossingen te bieden voor de hierboven geschetste knelpunten en om de kwaliteit van de Droge heide in de Regte Heide duurzaam te verbeteren. Daartoe zijn verschillende vernieuwende herstelmaatregelen getest in een combinatie van veldplots en kweekproeven. De focus ligt hierbij op het verbeteren van de vegetatiestructuur en -samenstelling, het terugdringen van grijs kronkelsteeltje, en het optimaal herstellen van de nutriëntenbalans in de bodem, met specifieke aandacht voor de N:P-verhouding, verzuringsgevoeligheid, en de vestigingscondities voor kenmerkende heidesoorten.



Figuur 1: Ligging natuurgebied de Regte Heide in rood en ligging plots in geel (Google Earth, 2022)

1.2 Kennisleemten en Projectdoel

In de PAS-gebiedsanalyse en het beheerplan de Regte Heide zijn kennisleemten voor het habitatype Droge heide (H4030) opgenomen (Provincie Noord-Brabant, 2017a, 2017b). Het streven is om een aantal van deze kennisleemten middels dit project op te lossen. De kennisleemten verhinderen de optimale uitvoering van het systeemgericht herstellen van het habitatype Droge heide. Dit project heeft als doel het oplossen van deze kennisleemten, om de beste maatregelen in kaart te brengen.

Voor het verhelderen van de kennisleemten, zijn deze in dit project vertaald in onderstaande concrete onderzoeksvragen:

- 1) Bij welke bodemdiepte wordt de vegetatie binnen korte tijd na plaggen sterk door ongewenste soorten zoals grijs kronkelsteeltje gedomineerd (vermossing)?
- 2) Is vermossing op deze bodems tegen te gaan door de bodem te bekalken of door steenmeel toe te passen?
- 3) Is de ontwikkeling van soortenrijke Droge heide te faciliteren door een groot deel van de organische bodem af te voeren (plaggen) of juist niet af te voeren (niet of ondiep plaggen)? Wellicht in combinatie met het verbeteren van de bodemkwaliteit (met kalk of steenmeel) en het inbrengen van heidezaad en -strooisel?
- 4) Afgaande op vraag 1 t/m 3: Hoe kan de kwaliteit van de Droge heide op de Regte Heide het beste hersteld worden? Welke, eventuele combinatie van, maatregel(en) is hier het meest efficiënt?

De resultaten worden in deze eindrapportage uitgewerkt tot gerichte advies voor herstelmaatregelen in het projectgebied en worden vertaald in vuistregels voor het optimaliseren van Droge heide en het tegengaan van grijs kronkelsteeltje in andere natuurgebieden in Noord-Brabant.

1.3 Opzet project

Dit project bestaat uit de drie onderstaande onderdelen, welke in de onderstaande hoofdstukken per onderdeel worden beschreven inclusief methode, resultaten en conclusies. In hoofdstuk 4 worden de resultaten vervolgens gecombineerd tot een overkoepelende discussie en beheeradvies

1. Voorbereidende maatregelenplots (Hoofdstuk 2): Op de Regte Heide worden regelmatig beheermaatregelen uitgevoerd met het doel de kwaliteit van de heide te verbeteren. In dit deel van het project zijn in het gebied 2x 60 plots van 4x4 meter uitgezet waarop verschillende beheermaatregelen werden gesimuleerd. Hierbij zijn verschillende maatregelen toegepast op de plots, namelijk: niets doen of plaggen, gecombineerd met het wel/niet toevoegen van kalk, steenmeel en/of het wel/niet toevoegen van lokaal verzameld (heide)maaisel.
2. Voorbereidend kweekonderdeel (Hoofdstuk 3): Parallel aan het plotonderdeel is buiten bij het kassencomplex van de Radboud Universiteit het kweekonderdeel in potten uitgevoerd. Met als doel het verhelderen van de verschillende factoren die de vegetatieontwikkeling na plaggen sturen. In het kweekonderdeel zijn op zeer kleine schaal veel (combinaties van) behandelingen uitgevoerd die in het veld moeilijker toepasbaar waren (zoals diep plaggen en plaggen tot het nog niet verzuurde moedermateriaal). Hierdoor was het mogelijk om de effecten van veel verschillende maatregelen in combinatie met behandelingen van kalk en steenmeel in een gecontroleerde omgeving te onderzoeken.

3. Uitvoeren beste maatregel (aparte subsidieaanvraag):

In dit project zijn de beoogde herstelmaatregelen eerst beoordeeld op kleine schaal, met de intentie om deze op te schalen naar gebiedsschaal. Hiervoor is gekozen omdat er veel onduidelijkheid bestond over wanneer de negatieve effecten van plaggen, zoals het verlies van soorten en de dominantie van grijs kronkelsteeltje, groter waren dan de positieve effecten, zoals het tegengaan van vergrassing en het bieden van ruimte voor soorten van open bodem. De methode die als meest belovend uit de kleinschalige voorbereidende onderdelen kwam kan als herstelmaatregel van droge heide gekozen worden.

Op basis van de resultaten van het plot- en kweekonderdeel wordt bepaald wat de meest belovende maatregel is voor herstel van Droge heide en het tegengaan van vermossing. Echter, aangezien het project voor 31 december 2025 afgerond moet zijn (Subsidieregeling natuur Noord-Brabant, artikel 2.13) en het maken van een goede kostenraming omtrent de uitvoering van de beste methode lastig te formuleren is zonder dat de methode al duidelijk is, was het niet mogelijk om in deze aanvraag al kosten voor uitvoering op te voeren. Advies omtrent uit te voeren maatregelen zijn opgenomen in hoofdstuk 4, Discussie en conclusie.

De totale projecttijd betrof 3 jaar, waarbij het streven was om in het voorjaar 2022 de plot- en kweekonderdelen te starten (deel 1 en 2). Het inzetten van de kweek- en pilot-experimenten werd echter, zoals beschreven in de tussenrapportage van 2022, verplaatst naar het najaar van 2022. Ieder jaar zijn de voortgang en resultaten gecommuniceerd middels een tussenrapportage. Gezien het project een half jaar later van start kon gaan dan gepland, werd het project, na goedkeuring van de opdrachtgever de Provincie Brabant, verlengd tot december 2025. Het voorliggende document betreft de eindrapportage met alle bevindingen en concrete adviezen omtrent dit project.

2. Projectonderdeel: maatregelenplots

2.1 Opzet & methode plotonderdeel

2.1.1 Methode: Inzetten plots

Alvorens het plaatsen van de plots en de geplande plagmaatregelen zijn er in het beoogde plangebied vegetatiemonsters genomen van grijs kronkelsteeltje, struikheide (*Calluna vulgaris*) en pijpenstrootje (*Molinia caerulea*). Van ieder vegetatietype zijn er vijf monsters genomen op vermoste bodem, vergraste bodem en op door struikheide gedomineerde bodem. De locaties van de genomen monsters zijn vastgelegd met GPS. Ook zijn er, als nulmeting drie bodemonsters genomen op vergraste bodem, vermoste bodem en stukken waar dominant struikheide aanwezig was.

In augustus 2022 zijn er op de Regte Heide 197 plots uitgezet van ieder 4*4 meter (16 m²). 77 plots zijn geplaatst op 0.15 ha grond ondiep geplagd, 80 plots op vegetatie gedomineerd door grijs kronkelsteeltje en 40 plots op door pijpenstrootje gedomineerde bodem (zie Tabel 1 voor een overzicht van alle behandelingen). De met grijs kronkelsteeltje gedomineerde plots zijn allemaal gelegen op stukken heide die in het najaar van 2022 (kort voor het inzetten van de proef) gemaaid zijn (pers. com. J. Oosterhout, 2025). Deze maaimaatregelen zijn uitgevoerd in stroken van circa 3.5 meter breed en lopen door het gehele plangebied (geel omheinde gebied in Figuur 1). Dit maaibeheer valt binnen het standaard beheer van de Droge heide op de Regte heide met als doel heideverjonging mogelijk te maken door oude heide te verwijderen. Al deze stroken werden aan het begin van het project gedomineerd door een dikke laag grijs kronkelsteeltje.

Op een kwart van de plots per behandeling is (na de nulmetingen) Soilfeed Nephaline steenmeel (10 ton/ ha) opgebracht. Ook is op een kwart van de plots per behandeling Dolokal poederkalk (2 ton/ha) uitgestrooid (Figuur 2) (bevat 5% MgO en 54% CaO per 100 kg). Daarnaast is er op een kwart van de plots een overmaat Dolokal poederkalk uitgestrooid (10 ton/ha). Ten slotte is een kwart van de plots per behandeling niet behandeld met een bodemverbeteraar, deze plots dienen als controle.

In de helft van alle plots (m.u.v. de door pijpenstrootje gedomineerde plots) is daarnaast maaisel uitgestrooid afkomstig van de Regte Heide (Figuur 3). Welke plots wel en geen maaisel ontvangen is random bepaald. Dit maaisel is speciaal voor dit experiment geoogst waarbij middels een maaimachine met een kiepbak maaisel is verzameld met zoveel mogelijk zaad (met name het bovenste deel van de planten). Dit is uitgevoerd nadat was vastgesteld dat de heideplanten rijp zaad hadden. In de plots met een dominante bedekking van pijpenstrootje is geen maaisel uitgestrooid omdat de dichtheid, hoogte en bedekking van pijpenstrootje zo hoog was dat ingeschat is dat de zaden van het maaisel hier niet konden aanslaan.

Tabel 1: Overzicht van alle behandelingen die zijn toegepast in de verschillende plots.

Nr. behandeling	Geplagd/samenstelling organische toplaag	Steenmeel/kalk/Controle	Maaisel?	Aantal plots
1	Geplagd	Controle	Nee	9
2	Geplagd	Controle	Ja	10
3	Geplagd	Steenmeel	Nee	9
4	Geplagd	Steenmeel	Ja	10
5	Geplagd	Kalk (laag)	Nee	10
6	Geplagd	Kalk (laag)	Ja	10
7	Geplagd	Kalk (hoog)	Nee	9
8	Geplagd	Kalk (hoog)	Ja	10
9	Dominant grijs kronkelsteeltje	Controle	Nee	10
10	Dominant grijs kronkelsteeltje	Controle	Ja	10
11	Dominant grijs kronkelsteeltje	Steenmeel	Nee	10

12	Dominant grijs kronkelsteeltje	Steenmeel	Ja	10
13	Dominant grijs kronkelsteeltje	Kalk (laag)	Nee	10
14	Dominant grijs kronkelsteeltje	Kalk (laag)	Ja	10
15	Dominant grijs kronkelsteeltje	Kalk (hoog)	Nee	10
16	Dominant grijs kronkelsteeltje	Kalk (hoog)	Ja	10
17	Dominant Pijpenstrootje	Controle	Nee	10
18	Dominant Pijpenstrootje	Steenmeel	Nee	10
19	Dominant Pijpenstrootje	Kalk (laag)	Nee	10
20	Dominant Pijpenstrootje	Kalk (hoog)	Nee	10



Figuur 2: Foto van het moment van uitstrooien van kalk over de geplagde plots



Figuur 3: Links: foto waarop te zien is dat op de helft van de geplagde plots maaisel is aangebracht Rechts: foto waarop duidelijk te zien is dat er recent kalk gestrooid is over de door grijs kronkelsteeltje gedomineerde plots.

2.1.2 Methode: Vegetatieopnames

In alle plots is een vegetatieopname gemaakt in het najaar van 2022 (nulmeting), in het voor- en najaar van 2023 en 2024 en in het voorjaar van 2025 (eindmeting). In alle plots met een dominante bedekking aan grijs kronkelsteeltje is op al deze momenten de dikte van acht random uitgekozen stukjes grijs kronkelsteeltje de dikte bepaald (met en zonder organisch bodemmateriaal, zie Figuur 4). De resultaten van deze vegetatieopnames worden in paragraaf 2.2 beschreven per plotsoort: (1) geplagde plots, (2) plots met een dominante grijskronkelsteeltje en struikheide bedekking en (3) vergraste plots.



Figuur 4: Voorbeeld van een stuk van een mat grijs kronkelsteeltje. Op de foto is aangegeven wat wordt gezien als de volledige mat en wat als het levende deel van de mat grijs kronkelsteeltje

Statistische analyse:

Voor zowel de heide- als de plagplots is de data geanalyseerd op de verschillen in bedekking tussen behandelingen met een niet-parametrische Dunn-test, indien er sprake was van een significant Kruskal-Wallis test resultaat. Deze keuze maakt de analyse robuust tegen de niet-normale verdeling van de data, die is vastgesteld met behulp van visuele inspectie van histogrammen en Shapiro-Wilk normaliteitstests. Dunn-testen met Bonferroni-correctie zorgen ervoor dat de verschillen tussen individuele behandelingen betrouwbaar worden geïdentificeerd zonder verhoogde kans op type I-fouten door meervoudige vergelijkingen.

De veranderingen in bedekking van verschillende soorten tussen 2022 en 2025 in de heideplots zijn beoordeeld met niet-parametrische toetsen. Omdat de bedekkingsdata niet normaal verdeeld zijn, bepalen is eerst met een Kruskal-Wallis test bepaald of er algemene verschillen zijn tussen de combinaties van behandeling en meetjaar. Vervolgens is ook hier een post-hoc Dunn-test toegepast met Bonferroni- of Benjamini-Hochberg-correctie om specifieke verschillen tussen groepen te identificeren.

2.1.3 Methode: Bodem en vegetatiemonsters

Om te bepalen wat het effect is van de verschillende behandelingen op de verzuringsgevoeligheid en nutriëntenstatus van de bodem in relatie met de vegetatieontwikkeling zijn aan het begin van het plotonderdeel, in het augustus 2022 mengmonsters genomen van de bodem om de chemie te onderzoeken (organische stof gehalte, zuurgraad, buffercapaciteit en stikstofconcentraties). Aanvullend zijn er in het augustus 2022 nulmetingen gedaan aan de plantchemie. Hierbij is de plantchemie bepaald voor vijf vegetatiemonsters op zowel grijs kronkelsteeltje gedomineerde stukken als op gras gedomineerde stukken van het beoogde plangebied, gemeten voor drie vegetatietypes: heide, grijs

kronkelsteeltje en pijpenstrootje. Aan het einde van het project in het augustus 2025 zijn opnieuw bodemmengmonsters genomen om zo te bepalen of het plaggen, de steenmeel en bekalking effect hebben op de kwaliteit en nutriënten ratio's in de bodem. Per behandeling (met m.u.v de grasplots) zijn er vijf mengmonsters genomen van de bovenste 2 tot 3 cm van de bodem verspreid over verschillende plots. Hiervoor is gekozen om een algemeen beeld te krijgen van de effecten van de behandeling zonder dat lokale verschillen in bodem een groot effect hebben op de resultaten. Slechts de bovenste 2-3 cm zijn gebruikt omdat grijs kronkelsteeltje oppervlakkig wortelt en dieper gelegen bodem naar verwachting geen effect heeft op de groei van de exoot. Van de bodemmonsters zijn de beschikbare concentraties van calcium, magnesium, kalium en aluminium, ammonium, sporenelementen en pH gemeten in een zoutextract, de pH-water en nitraatconcentratie zijn gemeten in een demiwaterextract. Fosfaat is in dit project op drie manieren gemeten, via een Olsen-extractie waarmee de beschikbare fosfaatconcentratie wordt bepaald, die ook deels vrijgemaakt kan worden door planten, schimmels en bacteriën in de bodem, via een zoutextractie en demi-waterextractie, waarbij de laatste twee een maat geven voor de vrij oplosbare fosfaatconcentraties. Een samenvatting van alle genomen monsters is weergegeven in Tabel 2. Een uitgebreidere beschrijving van de toegepaste bodemanalyses is te vinden in bijlage 1. Vervolgens zijn de uitkomsten van de bodemchemie-analyses statistisch getoetst, waarbij voor elke variabele is onderzocht in hoeverre de verschillende behandelingen leidden tot significante verschillen in pH, nutriëntenconcentraties en mineralenverhoudingen. Omdat de data niet voldeden aan de assumpties van normaliteit en homogene varianties, is gekozen voor niet-parametrische toetsen. Hiervoor zijn Kruskal-Wallis-testen uitgevoerd om te bepalen of er overall verschillen optraden tussen de behandelingen. Wanneer de Kruskal-Wallis-test significante verschillen liet zien, is een Dunn-post-hoc-test met Bonferroni p-waarde-correctie toegepast om vast te stellen welke behandelingsparen specifiek van elkaar verschilden.

In augustus 2025 zijn ook opnieuw plantmonsters genomen om zo te bepalen of het plaggen, de steenmeel en bekalking methodes effect hebben op de kwaliteit en nutriënten ratio's van de vegetatie (fosfaat, magnesium, mangaan, zink, stikstof en koolstof). Hierbij is de plantchemie bepaald voor vijf vegetatiemonster per behandeling (genomen over verschillende plots), gemeten voor drie vegetatietypes: heide, grijs kronkelsteeltje en gras. Niet in alle plots was voldoende grijs kronkelsteeltje en/of pijpenstrootje aanwezig om een volledig monster mee te maken, indien er niet voldoende materiaal aanwezig was is het monster komen te vervangen.

Voor het analyseren van vegetatiemonsters moeten de monsters eerst worden gedroogd en gemalen. Na het verzamelen worden de monsters daarom direct in een droogstoof geplaatst bij 70 graden celcius. De monsters worden 48 uur gedroogd. Na het drogen worden de monster gemalen, waarbij eerst gebruik wordt gemaakt van een vegetatiemolen (Retsch SM 200) of een vijzel en een stamper. Daarna worden de monsters verder gemalen met het gebruik van een kogelmolen, Mixer Mill MM 400 (Retsch).

Voor CN analyse, waarbij het totaal en koolstof en stikstof wordt geanalyseerd, wordt 3 milligram afgewogen in een tinnen cupje. De monsters CN worden gemeten op de CHNS Elemental analyser vario micro cube. De monsters in de tinnen cupjes worden hierin verbrand bij een temperatuur van 1800 graden celcius. Hierbij ontstaan gasvormige verbrandingsproducten die langs thermische geleidbaarheidsdetector (TCD) stromen die een elektrisch signaal produceert dat evenredig is aan de concentratie van stikstof, koolstof, waterstof en zwavel.

Door middel van de destructie van plantmateriaal wordt het mogelijk de totale concentratie van veel elementen in het materiaal te bepalen. Er wordt nauwkeurig 50-200 mg droog monster afgewogen en overgebracht in teflon-destructievaten. Aan de teflonvaten wordt 4 ml geconcentreerd salpeterzuur

(HNO₃, 65%) en 1 ml waterstofperoxide (H₂O₂, 30%) toegevoegd, waarna de vaten in een destructiemagnetron (Milestone magnetron type MLS 1200 Mega) worden geplaatst. De monsters worden in de teflonvaten gedestruëerd. Na destructie worden de monsters in glazen maatcilinders van 100 ml gegoten en aangevuld tot 100 ml met demiwater. De monsters worden vervolgens overgebracht in polypropyleen buisjes van 10 ml, voor de analyse.

De analyse van totaal calcium, magnesium, ijzer, aluminium, zink, mangaan, kalium, natrium, fosfor, silicium en zwavel wordt uitgevoerd met behulp van Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry (ICP-OES; Thermo Electron Corporation). Dit is een techniek die wordt gebruikt voor het meten van de concentraties van metalen en sommige niet-metalen in monsters middels het gebruik. Er zijn geen statistische analyses uitgevoerd op de plantchemiedata, omdat het aantal replicaten onvoldoende was voor robuuste statistische toetsen. Daarom is ervoor gekozen de resultaten uitsluitend te visualiseren en beschrijven/vergelijken literatuur en eerdere ervaringen van o.a. collega Dr. Joost Vogels in andere vergelijkbare heide gebieden.

Tabel 2: Overzicht van de bodem- en plantmonsters, meetmomenten en gemeten parameters in het GKS-behandelingsproject (2022–2025). Bodemonsters zijn genomen van de bovenste 2–3 cm van de bodem, en plantmonsters van drie vegetatietypes: heide, grijs kronkelsteelt

Categorie	Meetjaar	Monster	Aantal per behandeling/plot	Vegetatietype / locatie	Gemat parameters	Extra info
Bodem	2022	Mengmonster bodem	5 per bodemtype		Organische stofgehalte, pH, buffercapaciteit, stikstofconcentraties	Bovenste 2–3 cm
Plant	2022	Vegetatiemonster	5 per vegetatietype	Heide, grijs kronkelsteeltje, pijpenstrootje	Plantchemie: N, C, P, Mg, Mn, Zn	Grijs kronkelsteeltje-dominant & gras-dominant plots
Bodem	2025	Mengmonster bodem	5 per behandeling (m.u.v. pijpenstrootje gedomineerde plots)		Organische stofgehalte, pH, buffercapaciteit, stikstofconcentraties	Alleen bovenste 2–3 cm, verspreid over plots
Plant	2025	Vegetatiemonster	5 per behandeling	Heide, grijs kronkelsteeltje, gras	Plantchemie: P, Mg, Mn, Zn, N, C	Niet in alle plots voldoende materiaal voor grijs kronkelsteeltje/ pijpenstrootje

2.2 Resultaten plotonderdeel

2.2.1 Resultaten: Vegetatieopnames

Plagplots

De vegetatieopnames van het voorjaar van 2025 in de plagplots laten zien dat de bedekking van grijs kronkelsteeltje significant lager is in de behandelingen plaggen kalk laag en plaggen kalk hoog dan in de plaggen controle ($Z = 5.592$, $p < 0.001$ en $Z = 5.665$, $p < 0.001$) (Figuur 6). Plaggen kalk laag en plaggen kalk hoog verschillen niet significant van elkaar, maar beide scores duidelijk hoger dan plaggen steenmeel, waar de bedekking van grijs kronkelsteeltje het hoogst is ($Z = -5.741$, $p < 0.001$ en $Z = -5.813$, $p < 0.001$) al verschilt de bedekking van grijs kronkelsteeltje hier niet significant met de bedekking van

de geplagde controle plots. Opvallend is wel dat de totale bedekking van grijs kronkelsteeltje in de geplagde plots overal nog relatief laag is. In geen van de behandelingen heeft grijs kronkelsteeltje na bijna drie jaar een dominante bedekking bereikt. Ook was de mat van grijs kronkelsteeltje in het gehele geplagde stuk nog flinterdun (Figuur 5), te dun om op te meten middels de methode beschreven in 2.1.2. daarom is hier geen aanvullende analyse op uitgevoerd.



Figuur 5: foto uit een controleplot genomen in juni 2025 waarop opkomend grijs kronkelsteeltje duidelijk te zien is (foto: L. van Veenhuisen).

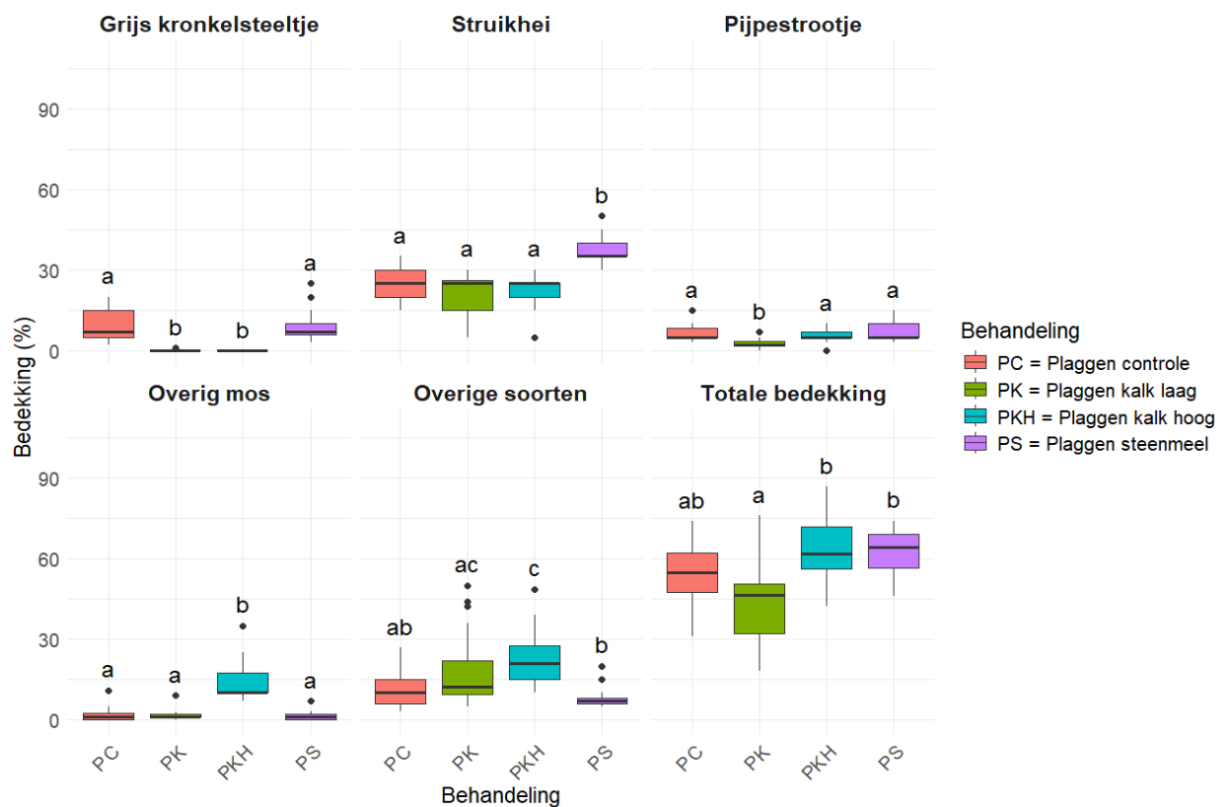
Voor struikhei zien we dat de bedekking in plaggen steenmeel significant hoger is dan in de andere behandelingen, waaronder plaggen controle ($Z = -4.338$, $p < 0.001$), plaggen kalk laag ($Z = -5.410$, $p < 0.001$) en plaggen kalk hoog ($Z = -5.748$, $p < 0.001$). Tussen plaggen controle, plaggen kalk laag en plaggen kalk hoog zijn er geen significante verschillen.

Voor pijpenstrootje valt op dat plaggen kalk laag minder bedekking van deze soort heeft dan plaggen controle ($Z = 4.384$, $p < 0.001$) en plaggen kalk hoog ($Z = -3.476$, $p = 0.003$) en plaggen steenmeel ($Z = -4.196$, $p < 0.001$). De overige vergelijkingen leveren geen significante verschillen op.

De bedekking van overig mos is duidelijk hoger in plaggen kalk hoog vergeleken met plaggen controle ($Z = -5.192$, $p < 0.001$), plaggen kalk laag ($Z = -5.144$, $p < 0.001$) en plaggen steenmeel ($Z = 5.331$, $p < 0.001$). Deze hogere bedekking van overig mos in de kalk hoog plots wordt veroorzaakt door een relatief hoge bedekking van ruig haarmos (*Polytrichum piliferum*) (Figuur 8)

Voor de totale bedekking van overige soorten (voornamelijk pilzegge, dophei en buntgras) geldt dat plaggen kalk hoog hoger scoort dan plaggen controle ($Z = -3.587$, $p = 0.002$) en plaggen steenmeel ($Z = 5.137$, $p < 0.001$). Plaggen kalk laag zit daar tussenin en heeft significant hogere bedekking van overige soorten dan plaggen steenmeel ($Z = 3.206$, $p = 0.008$). Pilzegge, dophei en buntgras waren de overige soorten met de hoogste bedekking. Korstmos is in geen van de geplagde plots aangetroffen.

Ten slotte ligt de totale bedekking in plaggen kalk laag lager dan in plaggen kalk hoog ($Z = -3.998$, $p < 0.001$) en plaggen steenmeel ($Z = -4.020$, $p < 0.001$). Andere verschillen tussen behandelingen zijn niet significant. Opvallend is dat de totale bedekking van soorten in de geplagde plots aan het einde van dit project nog relatief laag is, gemiddeld 66.5 % over alle plots. In het veld is het effect van de plagwerkzaamheden ook nog duidelijk te zien (Figuur 7).



Figuur 6: Boxplots van de bedekking van grijs kronkelsteeltje, Struikhei, Pijpestrootje, Overig mos, Overige soorten en totale bedekking in juni 2025 (%) per behandeling in de geplagde plots. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Waarnemingen buiten dit bereik worden als outliers weergegeven (indien van toepassing). Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).

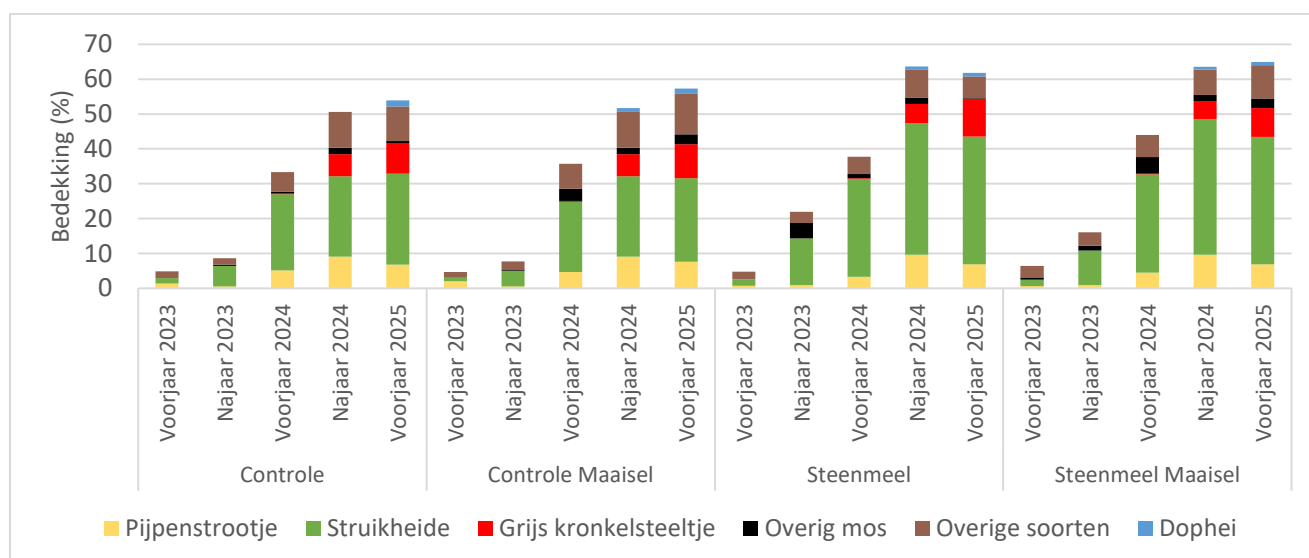


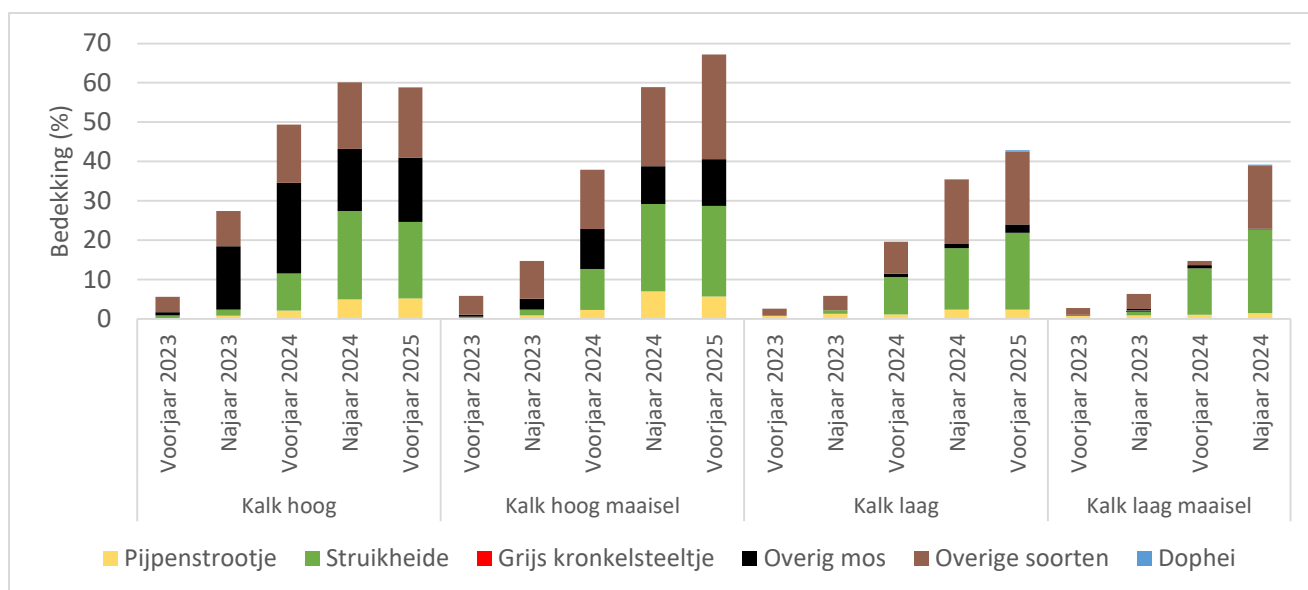
Figuur 7: Overzichtsfoto van een deel van de geplagde steenmeelplots in juni 2025 (foto: L. van Veenhuisen)



Figuur 8: Foto van een hoge bedekking overig mos (ruig haarmos) in de geplagde plots met een hoge kalkconcentratie in juni 2025 (foto: L. van Veenhuisen)

Ook is er gekeken naar hoe snel de heidevegetatie zich herstelt na plagwerkzaamheden en of het toevoegen van heidemaaisel direct na de plagwerkzaamheden dit proces versneld. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 9. In deze figuur is te zien dat het toevoegen van maaisel de snelheid van het heideherstel niet of nauwelijks versneld in alle behandelingen. De vegetatie ontwikkeling neemt in alle behandelingen het snelst toe in het voorjaar van 2024, ongeveer 1.5 jaar na uitvoeren van de plagwerkzaamheden. Hierna neemt de bedekking over tijd in alle behandelingen nog steeds toe maar dit proces verloopt nu langzamer. De bedekking neemt het traagst toe in de geplagde plots die behandeld zijn met een lage concentratie kalk. Dit is vooral te verklaren door het feit dat hier nauwelijks bedekking aanwezig is van grijs kronkelsteeltje maar dat ook de bedekking van overige mossen (met name ruig haarmos wat wel volop groeit in de plots met die behandeld zijn met een hoge concentratie kalk) hier achter blijft.





Figuur 9: Barplots van de gemiddelde bedekking van verschillende soorten in geplagde plots over tijd per behandeling. Hierbij is er ook een splitsing gemaakt tussen de plots die wel en niet een maaiselbehandeling hebben ontvangen in het najaar van 2022.

Heideplots

Bedekkingen

Uit de vegetatieopnames van de heideplots uit het voorjaar van 2025 blijkt dat grijs kronkelsteeltje duidelijk in een lagere bedekking voorkomt in de behandelingen heide kalk laag en heide kalk hoog ten opzichte van heide controle ($Z = 3.317$, $p = 0.005$ en $Z = 7.338$, $p < 0.001$) (Figuur 10). Ook tussen heide kalk laag en heide kalk hoog bestaat een significant verschil in bedekking ($Z = 4.021$, $p < 0.001$). Vergeleken met heide steenmeel is ook de bedekking van grijs kronkelsteeltje in de heide kalk hoog plots significant lager ($Z = -5.999$, $p < 0.001$). Deze testresultaten komen duidelijk overeen met het beeld dat te zien was in de plots. De bedekking van grijs kronkelsteeltje was buiten de plots zichtbaar hoger dan binnen de plots met een scherpe scheidingslijn op de rand van de plots (Figuur 13). Zeer lokaal leidde het verdwijnen van grijs kronkelsteeltje in de bekalkte behandelingen zelfs tot open bodem wat gunstig kan zijn voor bodembewonende fauna. Echter op de meeste plekken, bleef een laag van afgestorven kronkelsteeltje achter. Door handmatig op kleine schaal weg te halen verbeteren de omstandigheden voor bodemfauna sterk

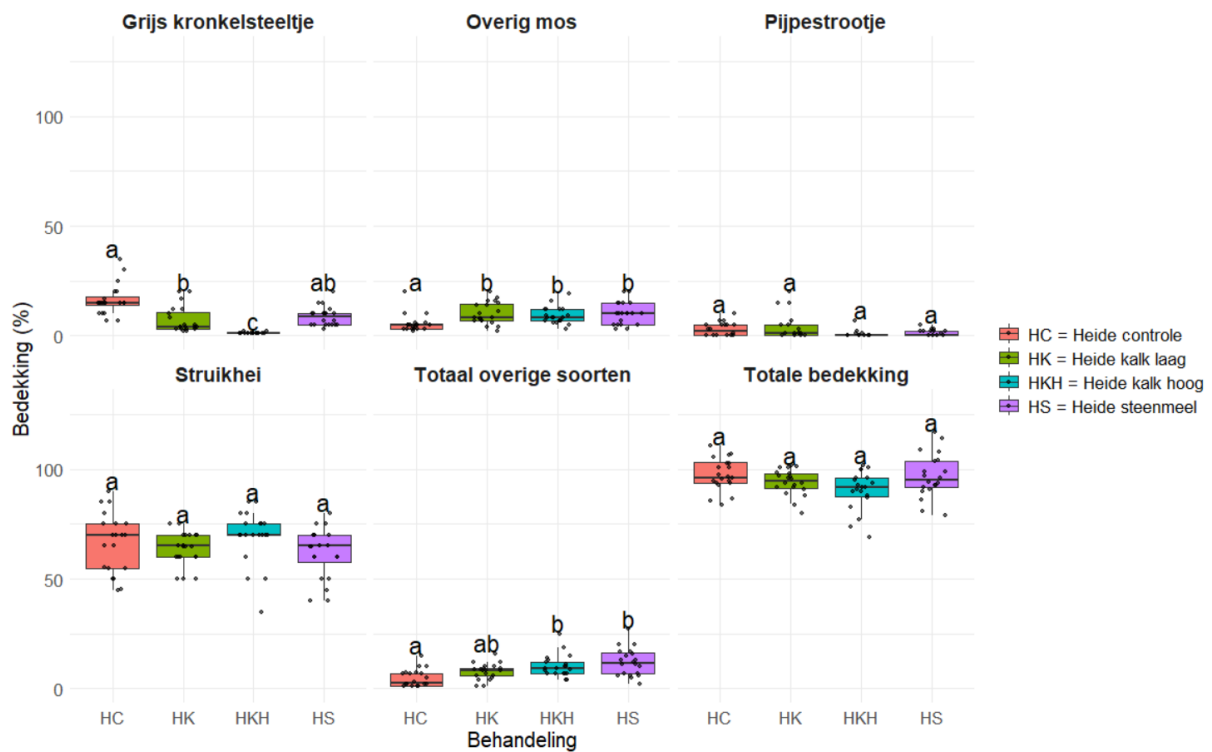
Voor struikheide zijn er geen significante verschillen tussen heide controle, heide kalk laag en heide kalk hoog.

Pijpenstrootje laat een licht verlaagde bedekking zien in heide kalk hoog vergeleken met heide controle ($Z = 2.600$, $p = 0.056$, marginale trend), met geen verdere significante verschillen tussen de behandelingen.

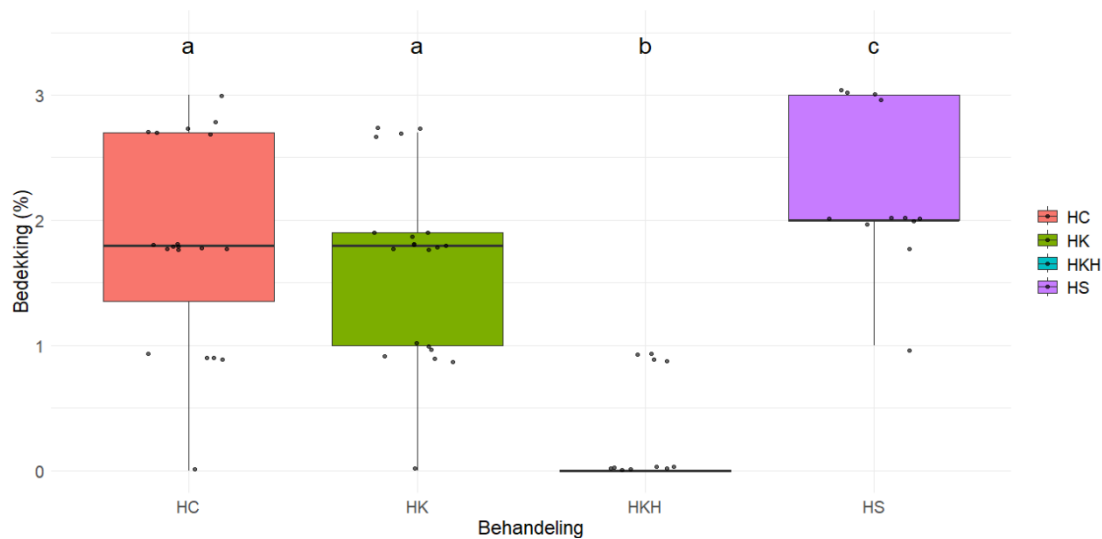
De bedekking van korstmossen (Figuur 11 & Figuur 12) stijgt significant in de behandeling heide steenmeel vergeleken met zowel heide controle ($Z = 4.394$, $p < 0.001$) als heide kalk laag ($Z = 3.923$, $p < 0.001$) en kalk hoog ($Z = -7.154$, $p < 0.001$). Tegelijkertijd daalt de bedekking van korstmossen in heide kalk hoog significant ten opzichte van alle andere behandelingen, met de sterkste afname ten opzichte van heide steenmeel. Dit duidt erop dat een steenmeelgift een duidelijke stimulerende invloed heeft op de groei van korstmossen, terwijl een hoge concentratie kalk juist remmend werkt.

De bedekking van overig mos (Figuur 10) is significant hoger zowel heide kalk laag, heide kalk hoog en heide steenmeel vergeleken met heide controle (respectievelijk; $Z = -3.454$, $p = 0.003$ en $Z = -3.146$, $p = 0.010$ & $Z=4.17$, $p<0.001$).

Bij de totale bedekking van overige soorten werden geen significante verschillen gevonden tussen de behandelingen.



Figuur 10: Boxplots van de bedekking van grijs kronkelsteeltje, Struikhei, Pijpestrootje, Overig mos, Overige soorten en Totale bedekking in juni 2025 (%) per behandeling in de heide plots. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).



Figuur 11: Boxplots van de korstmosbedekking in juni 2025 (%) per behandeling. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).



Figuur 12: Foto van een hoge bedekking aan korstmossen in de heide steenmeelplots in juni 2025 (foto: L. van Veenhuisen)

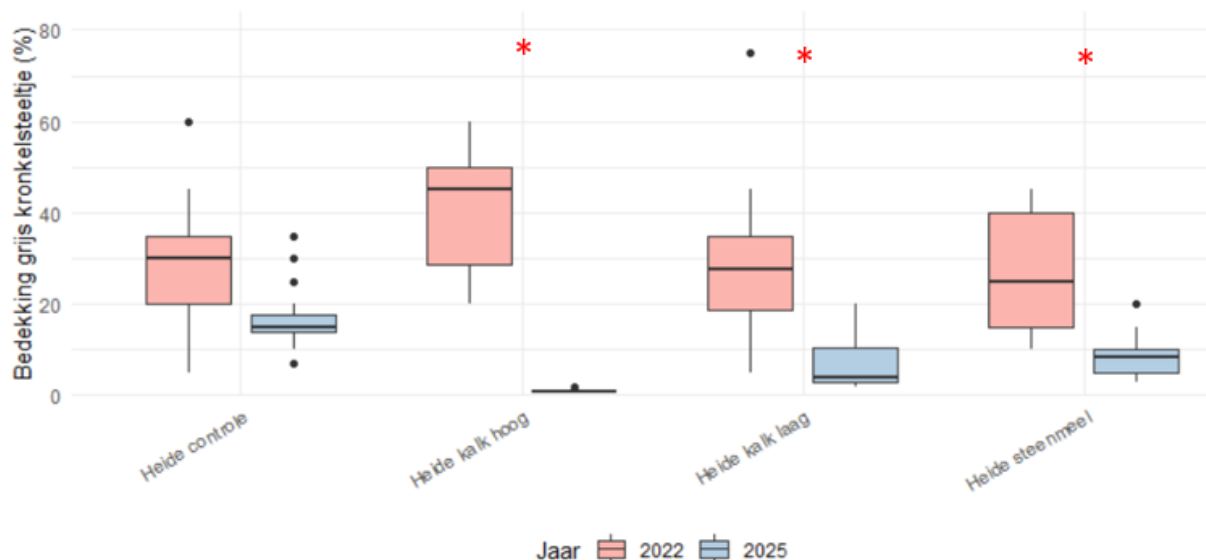


Figuur 13: Foto van de abrupte overgang in bedekking van grijs kronkelsteeltje buiten de plots (links) en binnen de heide kalk hoog plots(rechts) in juni 2025 (foto: L. van Veenhuisen)



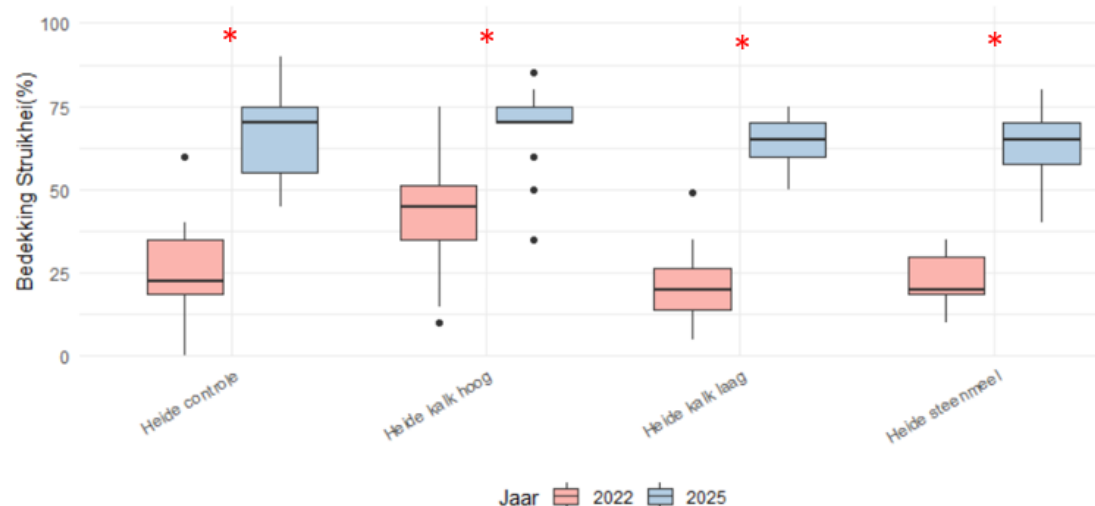
Figuur 14: Foto van de abrupte overgang in bedekking van grijs kronkelsteeltje buiten de plots (links) en binnen de heide kalk laag plots(rechts) in juni 2025 (foto: L. van Veenhuisen)

Aanvullend is er gekeken naar de verschuivingen in de vegetatiesamenstelling over tijd. De bedekking van grijs kronkelsteeltje verschilde significant tussen behandelingen en jaren ($\chi^2 = 117,07$, $df = 7$, $p < 0,001$). In 2025 was de bedekking significant lager dan in 2022 voor Heide kalk hoog ($Z = 8,67$, $p < 0,001$), Heide kalk laag ($Z = 4,20$, $p < 0,001$) en Heide steenmeel ($Z = 3,73$, $p = 0,005$) (Figuur 15). Voor de controlebehandeling werd geen verschil tussen jaren gevonden ($Z = 2,22$, $p = 0,731$).



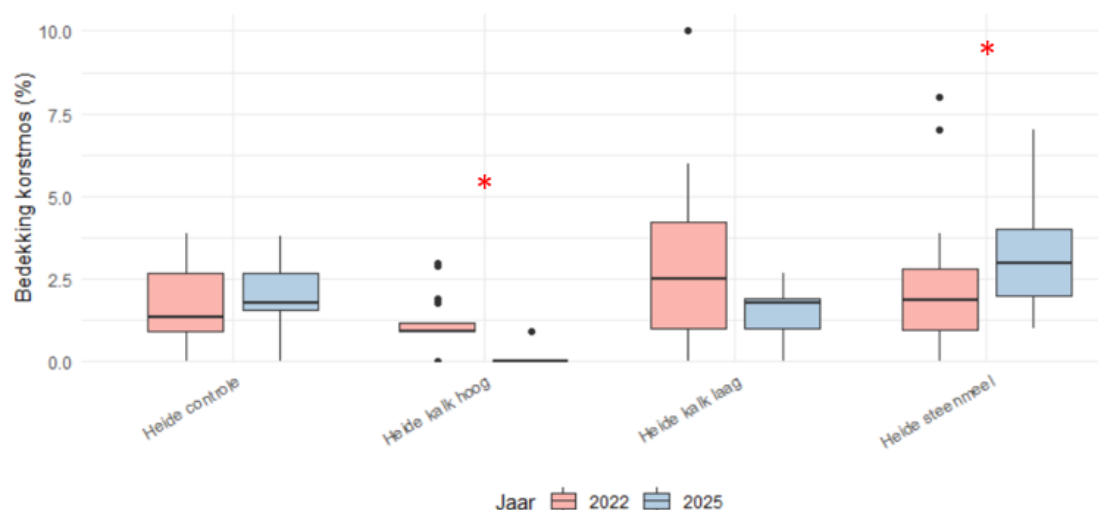
Figuur 15: Het verschil in de gemiddelde bedekking van grijs kronkelsteeltje tussen het najaar van 2022 en het voorjaar van 2025 in de verschillende behandelingen. De rode sterren geven significante verschillen in bedekking over tijd binnen de behandeling weer.

Voor struikheide is een significant verschil in bedekking gevonden tussen behandelingen en jaren (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 114.46$, $df = 7$, $p < 0.001$) (Figuur 16). De analyse toonden onder meer aan dat de bedekking in 2025 significant hoger was dan in 2022 binnen de behandelingen Heide kalk laag ($Z = -5.60$, $p < 0.001$) en Heide steenmeel ($Z = -5.26$, $p < 0.001$). Ook nam de bedekking toe in de controleplots van 2022 naar 2025 ($Z = -5.52$, $p < 0.001$).



Figuur 16: Het verschil in de gemiddelde bedekking van struikheide tussen het najaar van 2022 en het voorjaar van 2025 in de verschillende behandelingen. De rode sterren geven significante verschillen in bedekking over tijd binnen de behandeling weer.

Binnen de behandelingen zijn verschillende significante verschillen tussen 2022 en 2025 gevonden in de bedekking van korstmoss (Figuur 17). Bij Heide kalk hoog was de bedekking in 2025 significant lager dan in 2022 ($Z = 2.42$, $p = 0.03$). Terwijl Heide steenmeel een significante stijging in bedekking van korstmoss laat zien van 2022 naar 2025 ($Z = -2.80$, $p = 0.01$). Bij Heide controle werden geen significante verschillen tussen de jaren gevonden.



Figuur 17: Het verschil in de gemiddelde bedekking van korstmos tussen het najaar van 2022 en het voorjaar van 2025 in de verschillende behandelingen. De rode sterren geven significante verschillen in bedekking over tijd binnen de behandeling weer.

Analyse toonde geen verschil aan in de bedekking van pijpenstrootje over de twee jaren. Bij de heide kalk hoog behandeling steeg de bedekking van overig mos significant tussen 2022 en 2025 ($Z = -4.38$, $p < 0.001$). Heide kalk hoog laat daarnaast een significante toename zien van 2022 naar 2025 in de bedekking van overige soorten ($Z = -4.80$, $p_{\text{adj}} < 0.001$).

Bij de Heide controleplots nam de totale bedekking significant toe van 2022 naar 2025 ($Z = -4.36$, $p < 0.001$). Voor Heide kalk laag is eveneens een significante toename zichtbaar tussen 2022 en 2025 ($Z = -3.16$, $p = 0.007$). Heide steenmeel laat een bijna significant toename in totale bedekking zien ($Z = -2.35$, $p = 0.05$).

Dikte van de mat grijs kronkelsteeltje in heideplots

Naast vegetatieopnames zijn er ook metingen verricht aan de dikte van de grijs kronkelsteeltje mat in de heide plots. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 18. De totale matdikte verschilde op meerdere tijdstippen significant tussen behandelingen. In het najaar van 2023 was de mat in de heide kalk hoog behandeling significant dunner dan in de controlegroep ($z = -2.75$, $p = 0.006$), net als in de heide kalk laag behandeling ($z = -2.17$, $p = 0.030$) en steenmeelbehandeling ($z = -2.35$, $p = 0.019$). Dit patroon werd sterker in 2024: in het voorjaar was de matdikte in heide kalk hoog opnieuw significant lager dan in de controle ($z = -4.43$, $p < 0.001$), evenals in heide kalk laag ($z = -2.11$, $p = 0.035$) en heide steenmeel ($z = -2.43$, $p = 0.015$). In het najaar van 2024 zette dit zich voort met significante verschillen voor Heide kalk hoog ($z = -5.07$, $p < 0.001$), Heide kalk laag ($z = -2.39$, $p = 0.017$) en Heide steenmeel ($z = -3.51$, $p < 0.001$).

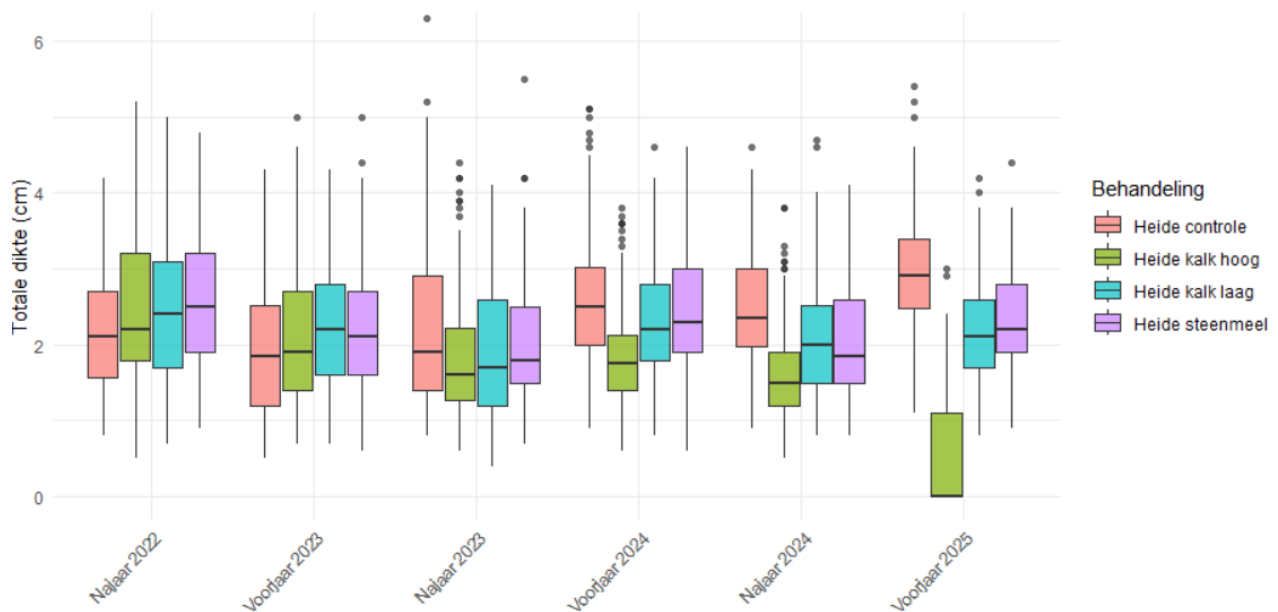
Opvallend hierbij is dat in de figuur te zien is dat de dikte van de totale mat in de controleplots toeneemt over tijd en in de behandelingen juist afneemt. Dit is ook zichtbaar in de resultaten van de statistische analyse. Binnen de Heide controle plots is een significante toename in matdikte waargenomen in het voorjaar van 2024 ($z = 2.35$, $p = 0.019$) en in het voorjaar van 2025 ($z = 4.30$, $p < 0.001$) ten opzichte van de beginsituatie. In de overige meetmomenten werden geen significante verschillen gevonden.

Voor de behandeling heide kalk hoog werd een consistente afname in totale matdikte over tijd vastgesteld. Deze was significant in het najaar van 2023 ($z = -2.75$, $p = 0.006$), het najaar van 2024 ($z =$

–5.07, $p < 0.001$) en het voorjaar van 2025 ($z = -13.13$, $p < 0.001$), wat wijst op een duidelijke negatieve trend.

Ook bij Heide kalk laag is een afname in matdikte gevonden over de tijd. Deze afname is significant in het najaar van 2023 ($z = -2.17$, $p = 0.030$), het voorjaar van 2024 ($z = -2.11$, $p = 0.035$), het najaar van 2024 ($z = -2.39$, $p = 0.017$) en het voorjaar van 2025 ($z = -3.97$, $p < 0.001$).

Bij de behandeling heide steenmeel werden over tijd significante verschillen in matdikte gevonden. In het najaar van 2023 was er een significante afname ten opzichte van de uitgangssituatie ($z = -2.35$, $p = 0.019$), evenals in het voorjaar van 2024 ($z = -2.43$, $p = 0.015$), het najaar van 2024 ($z = -3.51$, $p < 0.001$) en het voorjaar van 2025 ($z = -4.26$, $p < 0.001$).



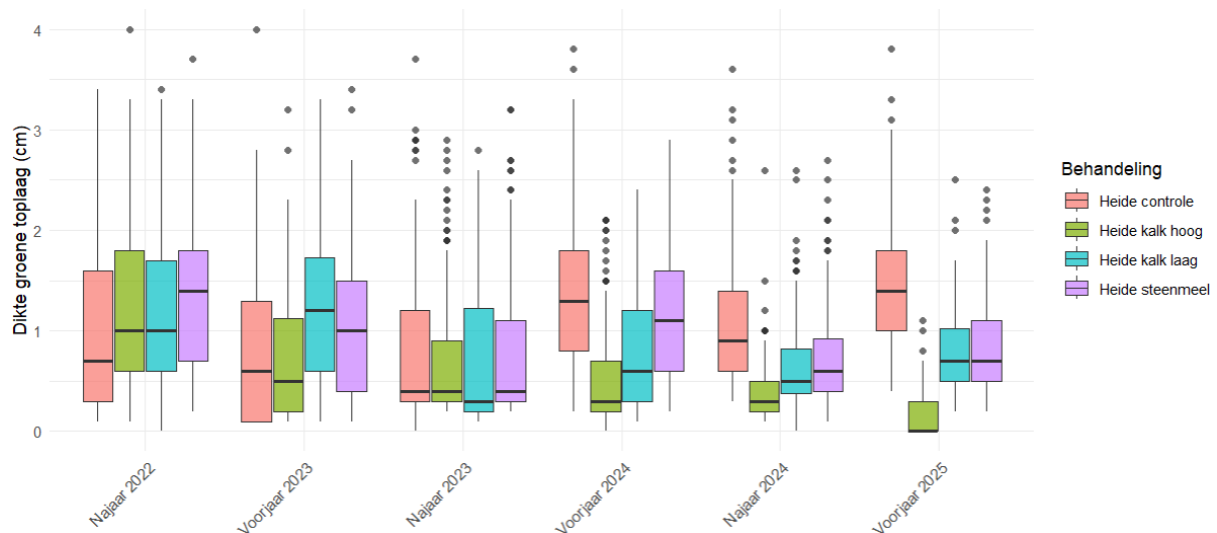
Figuur 18: Visualisatie middels boxplots van de dikte van de totale mat aan grijs kronkelsteeltje per behandeling per meetmoment.

Naast de totale dikte van de mat zijn ook metingen verricht aan de dikte van de groene toplaag van grijs kronkelsteeltje in de heideplots. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 19. De dikte van de groene toplaag verschilde op meerdere momenten significant tussen behandelingen.

De behandelingen heide kalk hoog, heide kalk laag en heide steenmeel lieten een significante afname in dikte van de groene toplaag zien ten opzichte van de controle bij het uitgangsniveau (respectievelijk $z = 2.23$, $p = 0.026$; $z = 2.06$, $p = 0.039$ & $z = 3.53$, $p < 0.001$).

Over de tijd traden significante verschillen op tussen de behandelingen en de controle. In het voorjaar van 2024 was de dikte van de groene toplaag significant hoger in de controle ($z = 4.00$, $p < 0.001$) dan in de behandelde plots. Zo was de toplaagdikte in heide kalk hoog in het voorjaar van 2024 significant lager dan in de controle (interactie $z = -7.38$, $p < 0.001$), en ook bij heide kalk laag ($z = -5.18$, $p < 0.001$) en heide steenmeel ($z = -4.11$, $p < 0.001$) werden sterke afnames in dikte waargenomen.

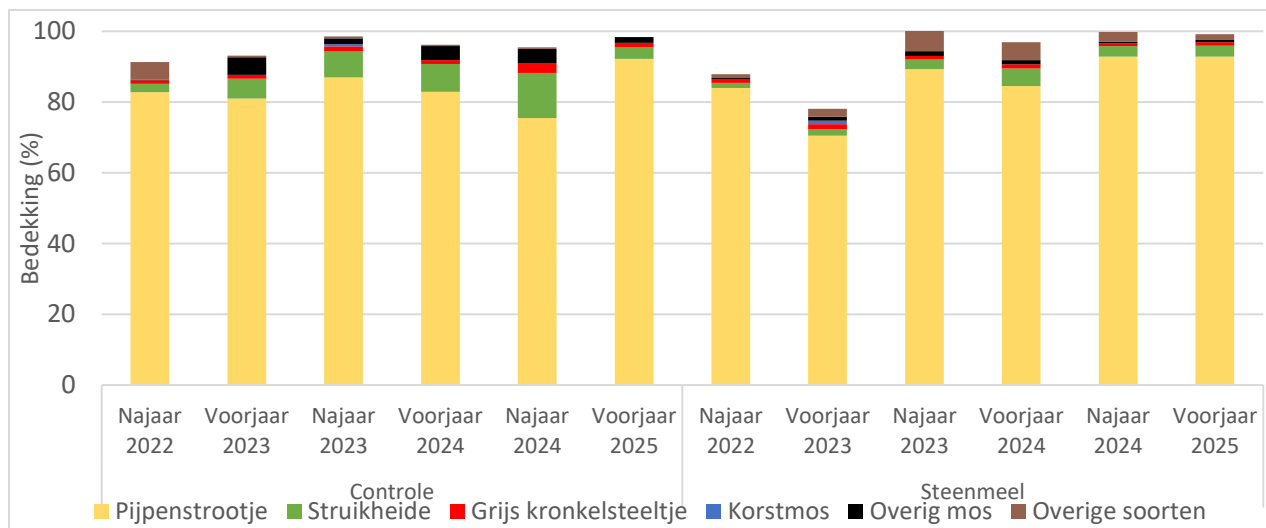
Eenzelfde patroon werd gezien in de opvolgende meetmomenten, waarbij in het najaar van 2023 en voorjaar en najaar van 2024 en in het voorjaar van 2025 significante negatieve interacties tussen behandeling en tijd werden gevonden. Dit wijst op een consistente afname van de groene top laagdikte in de behandelingen ten opzichte van de controle over de meetperiode. In de controleplots bleef de groene top laagdikte relatief stabiel of nam deze toe over tijd, terwijl de behandelingen duidelijk een dalende trend vertonen, wat wijst op een duidelijk effect van de kalk- en steenmeelbehandelingen op de vitaliteit van de groene top laag van grijs kronkelsteeltje.



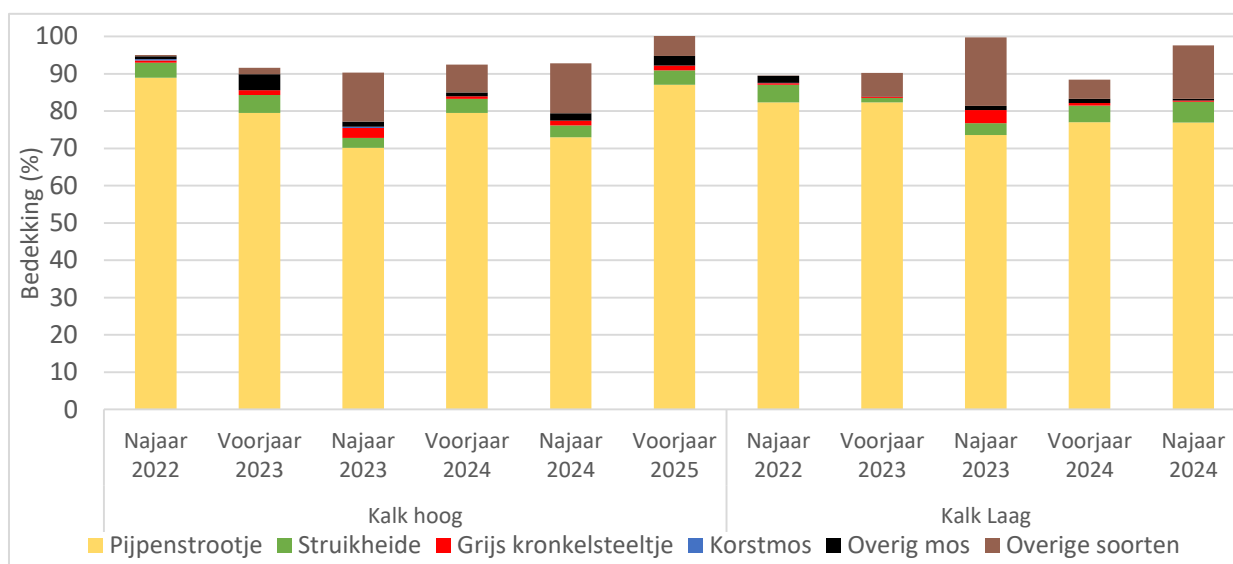
Figuur 19: Visualisatie middels boxplots van de dikte van de totale mat aan grijs kronkelsteeltje per behandeling per meetmoment.

Grasplots

Er zijn geen grote verschillen zichtbaar tussen behandelingen in de grasplots (Figuur 20 & Figuur 21). Pijpenstrootje is aan het einde van de meetreeks in het voorjaar van 2025 nog altijd dominant aanwezig in alle plots. Tussen het najaar van 2022 en het voorjaar van 2025 is de hoeveelheid pijpenstrootje in de kalk plots (hoog en laag) licht afgenomen, dit ging gepaard met een toename van met name de “overige” soorten, dit werd met name veroorzaakt door een toename in het aantal grassoorten anders dan pijpenstrootje, waaronder buntgras (*Corynephorus canescens*).



Figuur 20: Gemiddelde bedekking van de aangetroffen soorten/soortgroepen voor de controle en steenmeelbehandeling in de plots met een dominante pijpenstrootje bedekking in het najaar van 2022 en het voor- en najaar van 2023, 2024 en het voorjaar van 2025.



Figuur 21: Gemiddelde bedekking van de aangetroffen soorten/soortgroepen per kalkbehandeling in de plots met een dominante pijpenstrootje bedekking in het najaar van 2022 en het voor- en najaar van 2023, 2024 en het voorjaar van 2025.

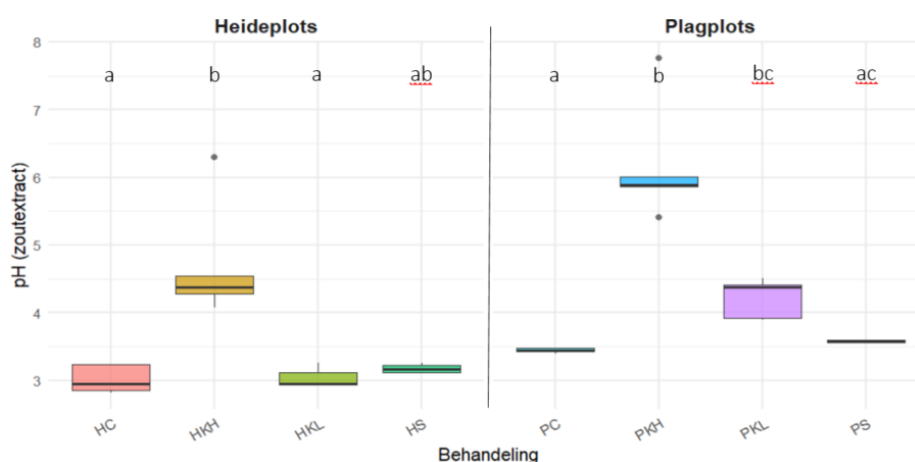
2.2.2 Resultaten: Bodem

Om te achterhalen wat de effecten van het toevoegen van kalk en steenmeel is op de bodem, zijn bodemanalyses uitgevoerd. Dit is gedaan voor de start van het onderzoek, in augustus 2022 (voordat de bodem geplagd is) en aan het einde van het onderzoek in augustus 2025. De belangrijkste resultaten worden hier beschreven, een volledig overzicht van de resultaten van de bodemanalyse is terug te vinden in bijlage 2.

pH van de bodem:

De resultaten van de statistische analyse laten zien dat de pH van de bodem in de heide kalk hoog plots (HKH) significant hoger is dan in zowel heide controle plots (HC) ($Z = -3,03$; $p = 0,015$) als de heide kalk laag plots (HKL) ($Z = 2,92$; $p = 0,011$) (Figuur 22). Dit betekent dat de behandeling in Heide kalk hoog heeft geleid tot een duidelijk pH stijging in vergeleken met deze andere heideplots. Voor de overige vergelijkingen werden geen significante verschillen gevonden: tussen heide kalk hoog en heide steenmeel pots (HS) ($Z = 2,09$; $p = 0,073$) is de pH wel iets hoger, maar dit verschil is niet statistisch significant.

De resultaten laten ook zien dat de pH van de bodem in plaggen kalk hoog (PKH) significant hoger is dan in de plaggen controle plots (PC) ($Z = -4,01$; $p = <0.001$) en ook significant hoger dan in de plaggen steenmeel plots (PS) ($Z = 2,67$; $p = 0,023$) (Figuur 22).



Figuur 22: Boxplots van pH van zoutextracten per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.

Tabel 3 laat zien hoe de bodem-pH veranderde tussen het begin van het onderzoek in 2022 en het einde in 2025, na toepassing van verschillende bodemverbeteraars. Bij de heideplots bleef de pH vrijwel constant in de controle (HC: 3,05 → 3,02, $\Delta = -0,03$) en de lage kalkbehandeling (HKL: 3,05 → 3,04, $\Delta = -0,01$). In de hoog kalkbehandeling (HKH) werd echter een aanzienlijke stijging in pH waargenomen (3,05 → 4,71, $\Delta = +1,66$), terwijl de steenmeelbehandeling (HS) slechts een lichte stijging gaf (3,05 → 3,17, $\Delta = +0,12$). Dit laat zien dat alleen een hoge kalktoepassing op heide de bodem sterk minder zuur maakte. Bij de plaggenplots waren de veranderingen groter. De controle (PC) vertoonde een bescheiden stijging (3,05 → 3,44, $\Delta = +0,39$), terwijl hoog kalk (PKH) het sterkste effect gaf met een pH-stijging van 3,05 naar 6,19 ($\Delta = +3,14$). De lage kalkbehandeling (PKL) resulteerde in een gemiddelde stijging van +1,17 (3,05 → 4,22), en de steenmeelbehandeling (PS) gaf een matige stijging (+0,53, 3,05 → 3,58).

Over het geheel genomen laat dit zien dat kalktoepassing vooral bij de plaggenplots het sterkste effect heeft op het verhogen van de bodem-pH, terwijl steenmeel slechts een beperkte pH-verhoging geeft en controleplots vrijwel onveranderd blijven.

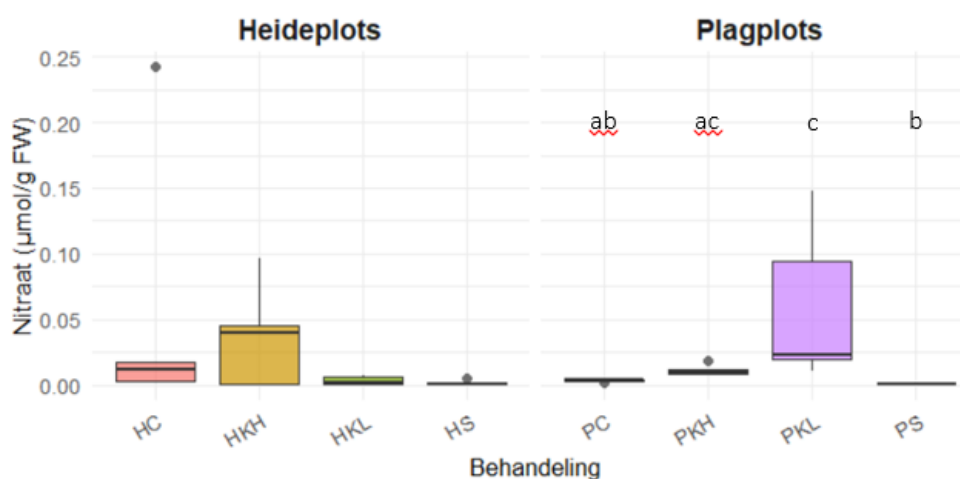
Tabel 3: Overzicht van de veranderingen in pH tussen de nulmeting in de zomer van 2022 (voor plaggen en toedienen behandeling) en de zomer van 2025 inclusief standaard deviatie.

Behandeling	Gemiddelde pH 2022 (n=11)	Gemiddelde pH 2025 (n=5 per behandeling)	Verskil in pH
Heide controle (HC)	3.05 (± 0.21)	3.02 (± 0.21)	-0.03

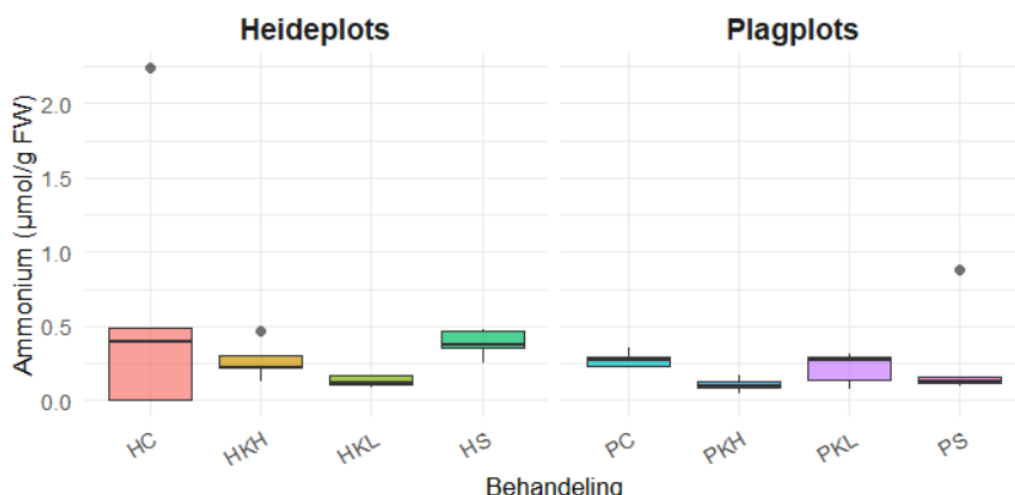
Heide kalk hoog (HKH)	3.05 (± 0.21)	4.71 (± 0.90)	+1.66
Heide kalk laag (HKL)	3.05 (± 0.21)	3.04 (± 0.14)	-0.01
Heide Steenmeel (HS)	3.05 (± 0.21)	3.17 (± 0.07)	+0.12
Plaggen controle (PC)	3.05 (± 0.21)	3.44 (± 0.04)	+0.39
Plaggen kalk hoog (PKH)	3.05 (± 0.21)	6.19 (± 0.29)	+3.14
Plaggen kalk laag (PKL)	3.05 (± 0.21)	4.22 (± 0.91)	+1.17
Plaggen steenmeel (PS)	3.05 (± 0.21)	3.58 (± 0.02)	+0.53

Stikstof en fosfor

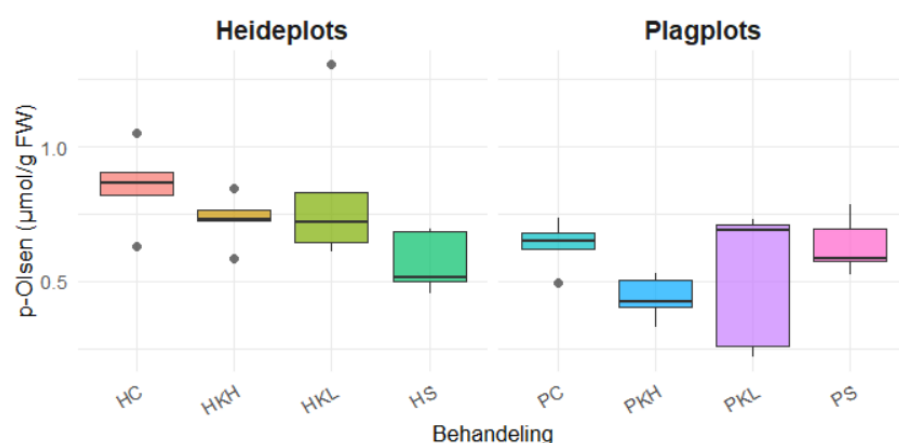
In de ongeplagde plots werd geen significant effect van de behandelingen op het nitraatgehalte gevonden (Kruskal–Wallis: $\chi^2 = 4.68$, $df = 3$, $p = 0.197$) (Figuur 23). In de geplagde plots daarentegen waren de verschillen wel significant ($\chi^2 = 16.81$, $df = 3$, $p < 0.001$). De Dunn-post-hocanalyse liet zien dat het nitraatgehalte in de plaggen kalk laag-behandeling (PKL) significant hoger was dan in de plaggen controle (PC) ($Z = -2.67$, $p = 0.023$) en in de steenmeelbehandeling (PS) ($p < 0.001$), terwijl plaggen kalk Hoog eveneens hogere waarden liet zien dan steenmeel ($Z = 3.80$, $p = 0.015$). Dit wijst erop dat kalktoepassing na plaggen leidt tot een duidelijke toename in nitraatbeschikbaarheid, terwijl steenmeel juist lagere concentraties kent. Voor ammonium werden in zowel de geplagde als ongeplagde plots geen significante verschillen gevonden tussen behandelingen (Figuur 24). Ook voor P-Olsen werden geen significante verschillen gevonden tussen behandelingen (Figuur 25).



Figuur 23: Boxplots van het nitraatgehalte in de bodem per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.



Figuur 24: Boxplots van het ammoniumgehalte in de bodem per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.

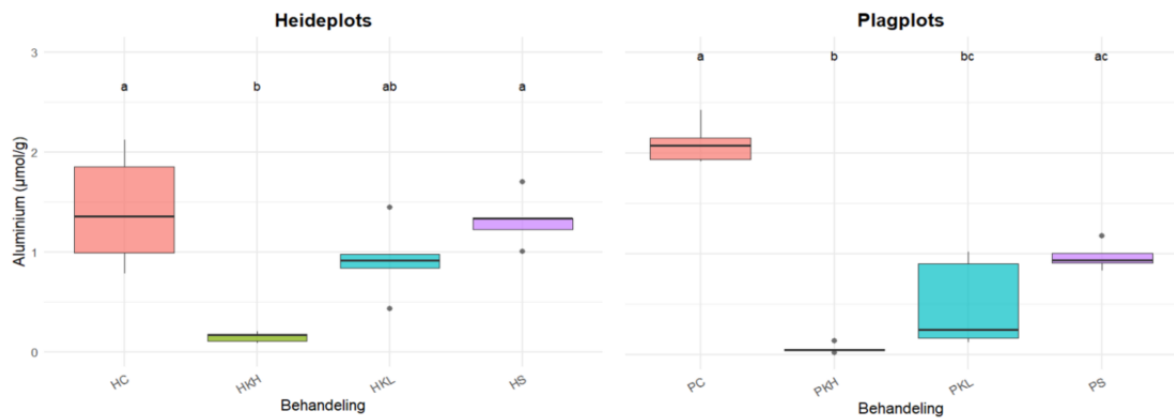


Figuur 25: Boxplots van het p-Olsengehalte in de bodem per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.

Aluminium en calcium

De post-hoc Dunn-test na een Kruskal-Wallis test laat zien dat in heideplots de aluminium concentratie significant lager is in de hoog kalkbehandeling (HKH) vergeleken met zowel de controle (HC; $Z = 3,10$, $P_{\text{adj}} = 0,012$) als de steenmeelbehandeling (HS; $Z = -3,05$, $P_{\text{adj}} = 0,007$) (Figuur 26). De lage kalkbehandeling (HKL) vertoont geen significant verschil ten opzichte van de controle ($Z = 1,23$, $P_{\text{adj}} = 0,33$) of de steenmeelbehandeling ($Z = -1,18$, $P_{\text{adj}} = 0,29$). Ook de vergelijking tussen HKH en HKL laat geen statistisch significant verschil zien na correctie voor meervoudige vergelijkingen ($Z = -1,87$, $P_{\text{adj}} = 0,12$). Dit toont aan dat alleen een hoge kalktoepassing de aluminium-concentratie in heideplots duidelijk verlaagt, terwijl lage kalk en steenmeel nauwelijks effect hebben.

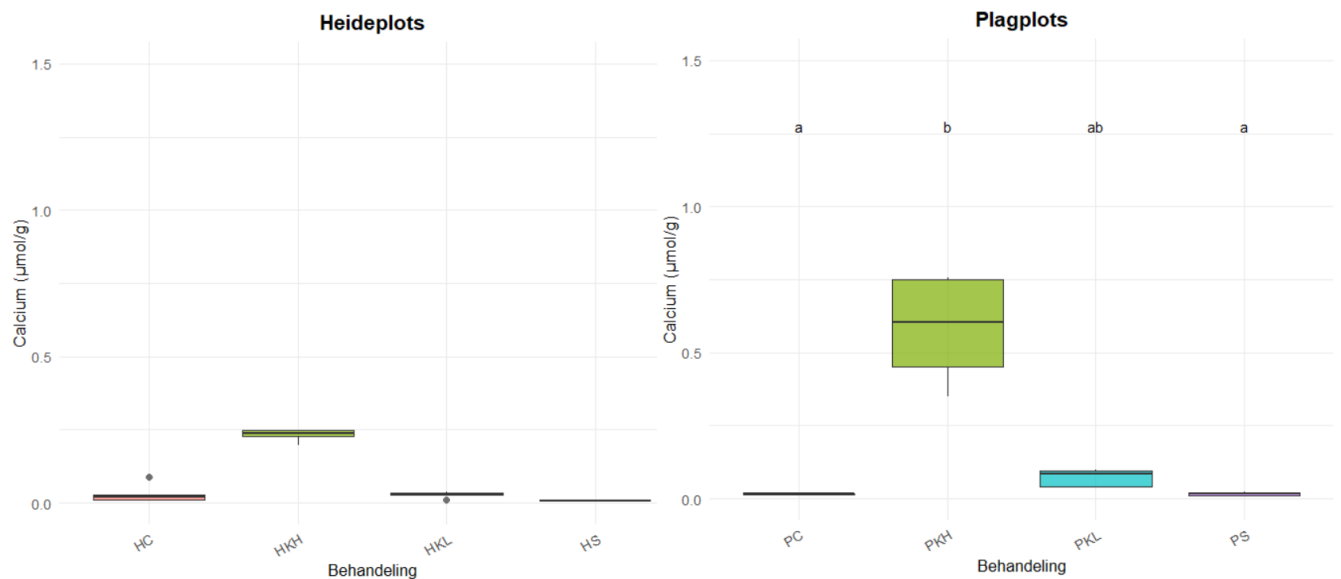
De post-hoc Dunn-test na een Kruskal-Wallis test laat zien dat in plagplots de aluminiumconcentratie significant lager is in de hoog kalkbehandeling (PKH) vergeleken met zowel de controle (PC; $Z = 3,96$, $P_{\text{adj}} = 0,00046$) als de steenmeelbehandeling (PS; $Z = -2,35$, $P_{\text{adj}} = 0,037$). De lage kalkbehandeling (PKL) vertoont een significant lagere Al-zout-concentratie dan de controle ($Z = 2,46$, $P_{\text{adj}} = 0,042$), maar verschilt niet significant van PKH ($Z = -1,50$, $P_{\text{adj}} = 0,16$) of PS ($Z = -0,86$, $P_{\text{adj}} = 0,39$). De controle en steenmeelbehandeling verschillen niet significant van elkaar ($Z = 1,60$, $P_{\text{adj}} = 0,16$). Dit toont aan dat kalktoepassingen, vooral hoge kalk, de aluminiumconcentratie in de plaggenplots duidelijk verlaagt, terwijl steenmeel nauwelijks effect heeft.



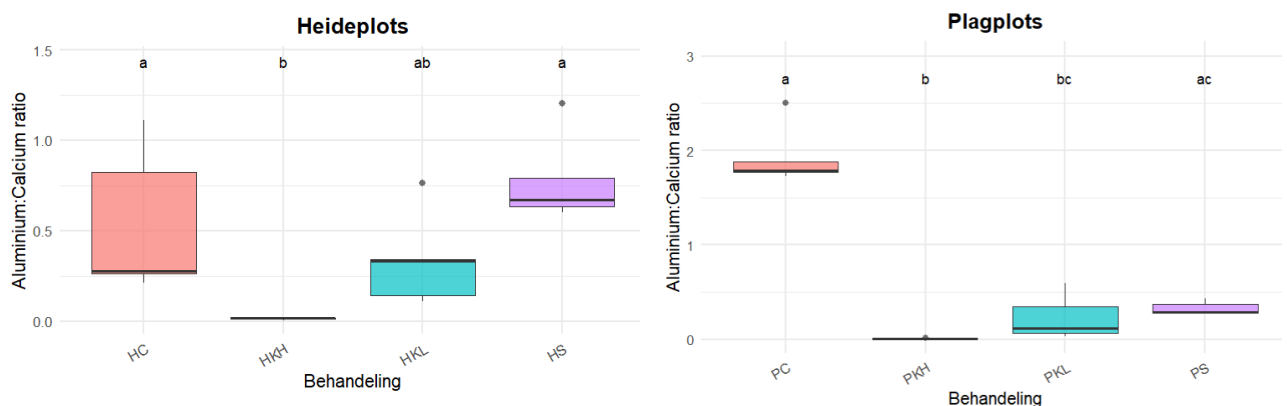
Figuur 26: Boxplots van aluminiumconcentratie in de bodemonsters per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.

De post-hoc Dunn-test na een Kruskal-Wallis test laat zien dat in de heideplots de calciumconcentratie het laagst is in de steenmeelbehandeling (HS) (Figuur 27). Heide steenmeel vertoont een significant lagere Ca-concentratie dan de hoog kalkbehandeling (HKH; $Z = 4,01$, $P_{\text{adj}} = < 0.001$). Dit wijst erop dat steenmeel in heideplots het calciumgehalte verlaagt, terwijl kalktoepassing, zowel hoog als laag, relatief weinig effect heeft.

In de plagplots is het effect van kalk duidelijker. De hoog kalkbehandeling (PKH) vertoont een significant hogere Ca-concentratie dan de controle (PC; $Z = 3,96$, $P_{\text{adj}} = 0,005$) en de steenmeelbehandeling (PS; $Z = 3,31$, $P_{\text{adj}} = 0,0028$).



Figuur 27: Boxplots van calciumconcentratie in de bodemonsters per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.

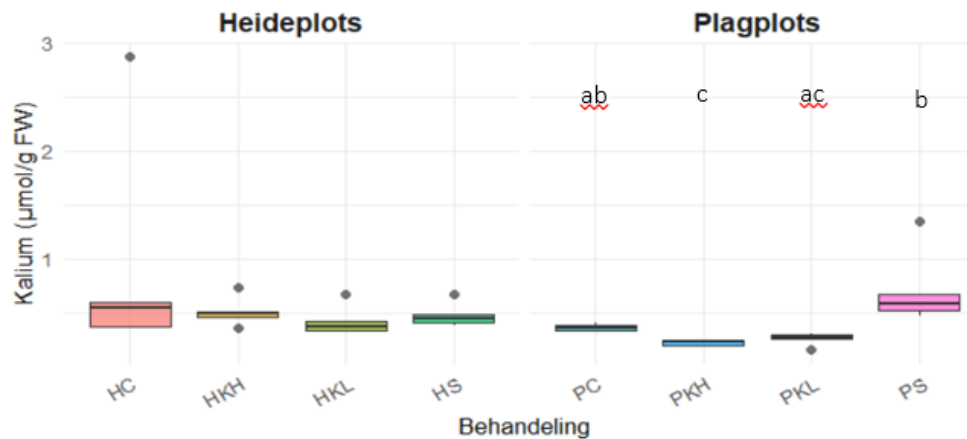


Figuur 28: Boxplots van calciumconcentratie in de bodemonsters per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.

Kalium

Voor kalium zijn in de ongeplagde plots geen significante verschillen gevonden tussen de behandelingen (Kruskal–Wallis: $\chi^2 = 3.05$, $df = 3$, $p = 0.385$), wat aangeeft dat de toepassing van kalk of steenmeel zonder plagen geen merkbare invloed had op de kaliumbeschikbaarheid in de bodem (Figuur 29). In de geplagde plots is daarentegen een duidelijk significant effect van de behandelingen vastgesteld ($\chi^2 = 16.71$, $df = 3$, $p = < 0.001$). Uit de analyse blijkt dat de plagen kalk hoog-behandeling (PKH) lagere kaliumwaarden heeft dan de controle (PC) ($Z = 2.40$, $p = 0.032$), terwijl zowel Plagen kalk hoog ($Z = -$

3.74, $p = 0.001$) als plaggen kalk laag (PKL) ($Z = -2.94$, $p = 0.01$) significant lagere concentraties lieten zien vergeleken met de plaggensteenmeelbehandeling (PS).

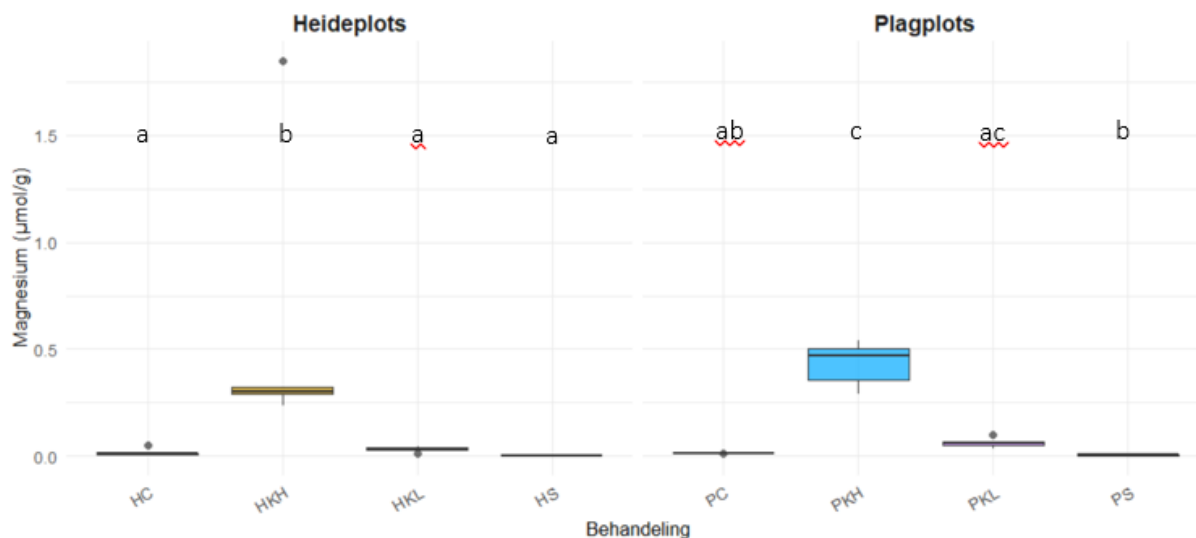


Figuur 29: Boxplots van kaliumconcentratie in de bodemonsters per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen.

Magnesium

Voor magnesium zijn zowel in de heideplots als in de plagplots duidelijke verschillen tussen de behandelingen gevonden. In de heideplots was het effect van de behandelingen significant (Kruskal–Wallis: $\chi^2 = 16.42$, $df = 3$, $p < 0.001$). Uit de analyse blijkt dat de Heide kalk hoog-plots (HKH) significant hogere magnesium waarden hadden dan zowel de Heide controle-plots (HC) ($Z = -2.30$, $p = 0.043$) als de heide steenmeel -plots (HS) ($Z = 4.01$, $p < 0.001$).

In de geplagde plots zijn eveneens significante verschillen gevonden ($\chi^2 = 17.86$, $df = 3$, $p < 0.001$). Hier laat de analyse zien dat Plaggen kalk hoog (PKH) significant hogere magnesium waarden heeft dan zowel de controle (PC) ($Z = -2.67$, $p = 0.015$) als de steenmeelbehandeling (PS) ($Z = 4.01$, $p < 0.001$), terwijl ook plaggen kalk laag (PKL) hogere concentraties magnesium in de bodem heeft dan steenmeel ($Z = 2.67$, $p = 0.0226$).



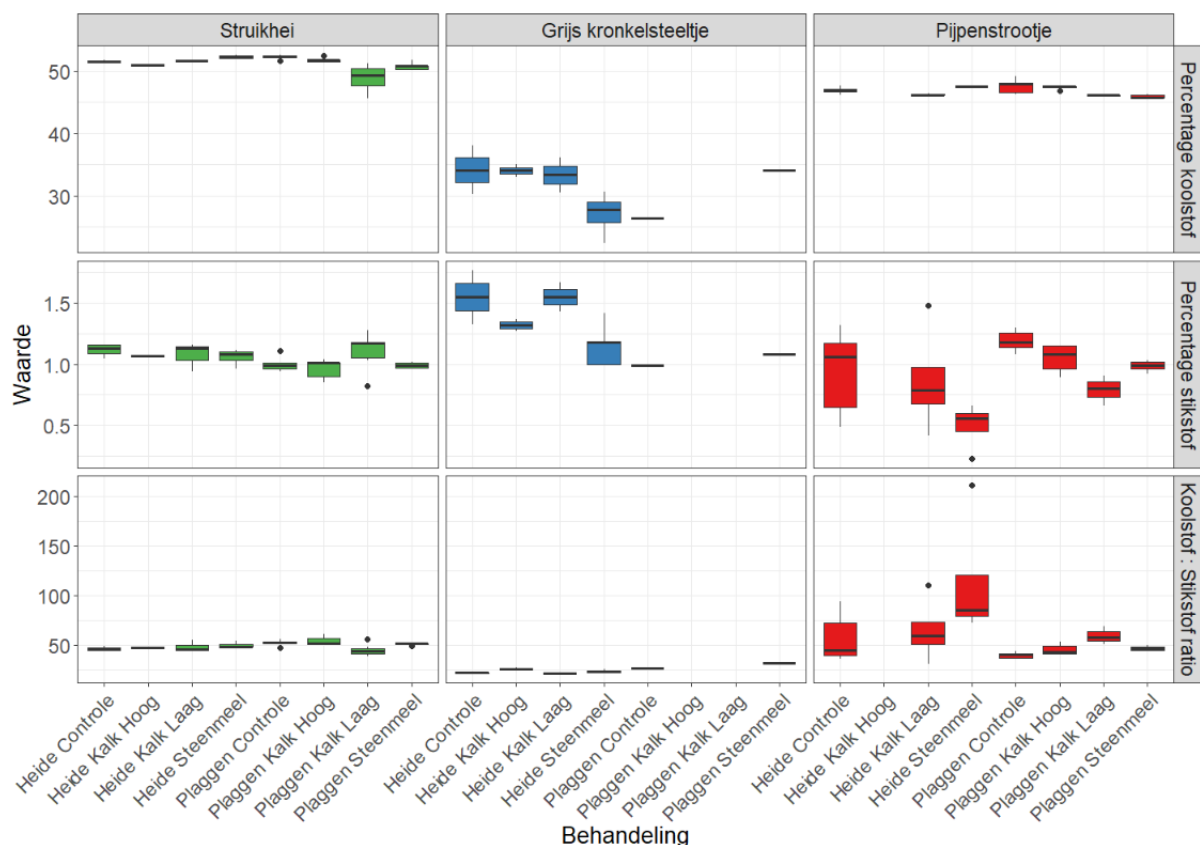
Figuur 30: Boxplots van magnesiumconcentratie in de bodemonsters per behandeling in 2025. Letters boven de boxen (a, b, c) geven significante verschillen aan op basis van een Dunn post-hoc test met Holm-correctie ($p < 0.05$). Boxen delen dezelfde letter als ze niet significant van elkaar verschillen

2.2.3 Vegetatiechemie

Om te achterhalen wat de effecten van het toevoegen van kalk en steenmeel is op de plantchemie, zijn plantchemie-analyses uitgevoerd van drie plantensoorten: struikheide, grijs kronkelsteeltje en pijpenstrootje, welke zijn verzameld in plots met verschillende behandelingen. Dit is gedaan aan het einde van het onderzoek in augustus 2025. De belangrijkste resultaten worden hieronder beschreven, een volledig overzicht van de resultaten van de bodemanalyse is terug te vinden in bijlage 3. Er is gestreefd om vijf plantmonsters per soort, per behandeling te verzamelen. Echter was niet in alle behandelingen voldoende plantmateriaal van iedere soort beschikbaar om vijf plantmonsters te maken. In de geplagde plots was, zoals beschreven in paragraaf 2.2.1, alleen een heel dun laagje, of in geval van de kalkplots helemaal geen grijs kronkelsteeltje opgekomen. Dit laagje grijs kronkelsteeltje was in veel gevallen te dun om te verzamelen waardoor er geen of slechts 1 monster van gemaakt kon worden. In de ongeplagde heide met een hoge kalkbehandeling was daarentegen juist weer te weinig pijpenstrootje aanwezig voor een monster. Gezien het beperkte aantal monsters per behandeling is ervoor gekozen om de plantchemiedata alleen te visualiseren en niet statistisch te testen.

Koolstof en Stikstof percentages

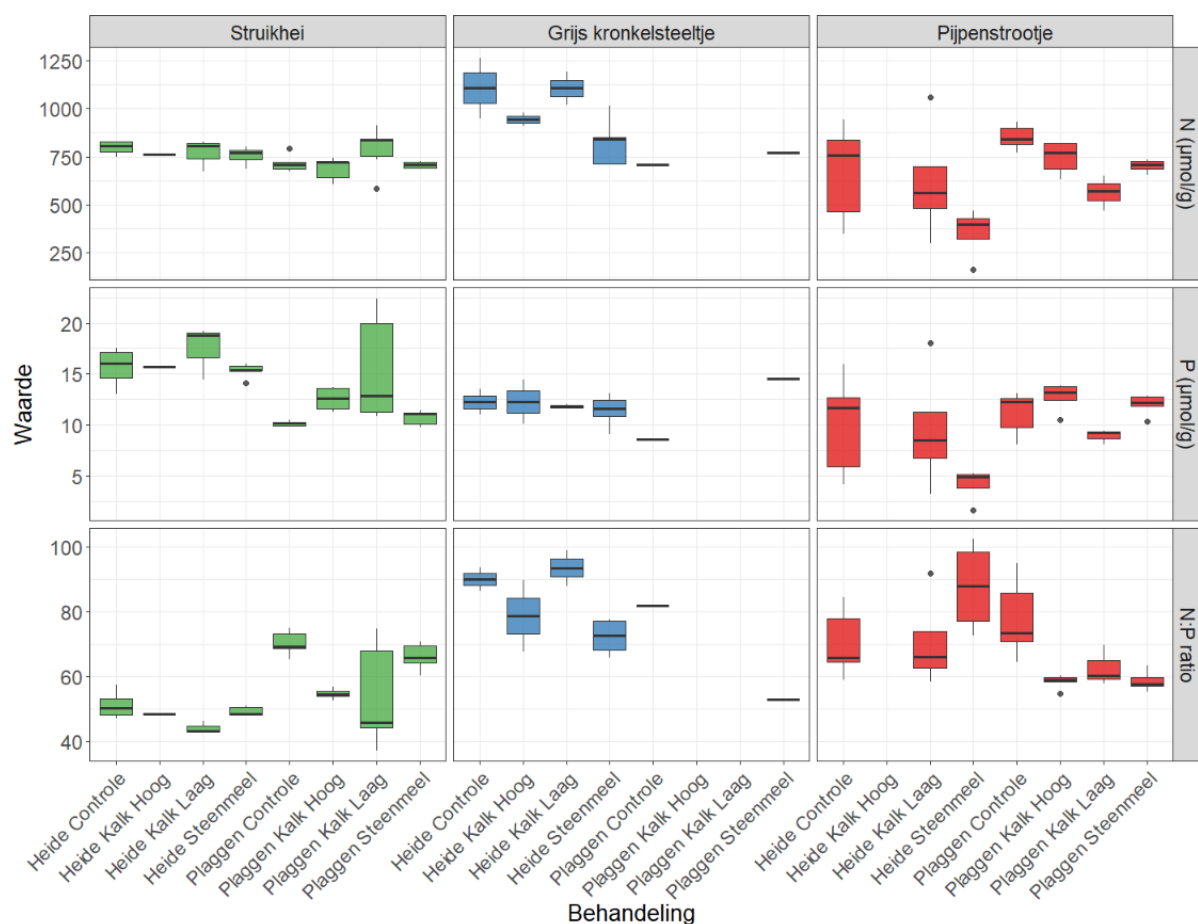
De variatie in N:C ratio van struikheide en grijskronkelsteeltje is gering en vertoont geen verschil tussen de behandelingen. In pijpenstrootje neemt de C:N ratio toe bij toevoeging van bufferstof, zowel in de heideplots als op de geplagde plots. In de geplagde plots komt dit overeen met hogere beschikbaarheid van nitraat in bekalkte bodems.



Figuur 31: Boxplots van de percentages van koolstof (C), stikstof (N) en de C:N-ratio voor drie plantensoorten (struikhei, grijs kronkelsteeltje en pijpenstrootje) onder de verschillende behandelingen. De grafiek toont de variatie binnen en tussen behandelingen, waarbij elke soort afzonderlijk is weergegeven. Indien een box bij een behandeling mist dan was er niet voldoende van het betreffende plantmateriaal beschikbaar binnen deze behandeling om geanalyseerd te worden.

Stikstof en Fosfor concentraties

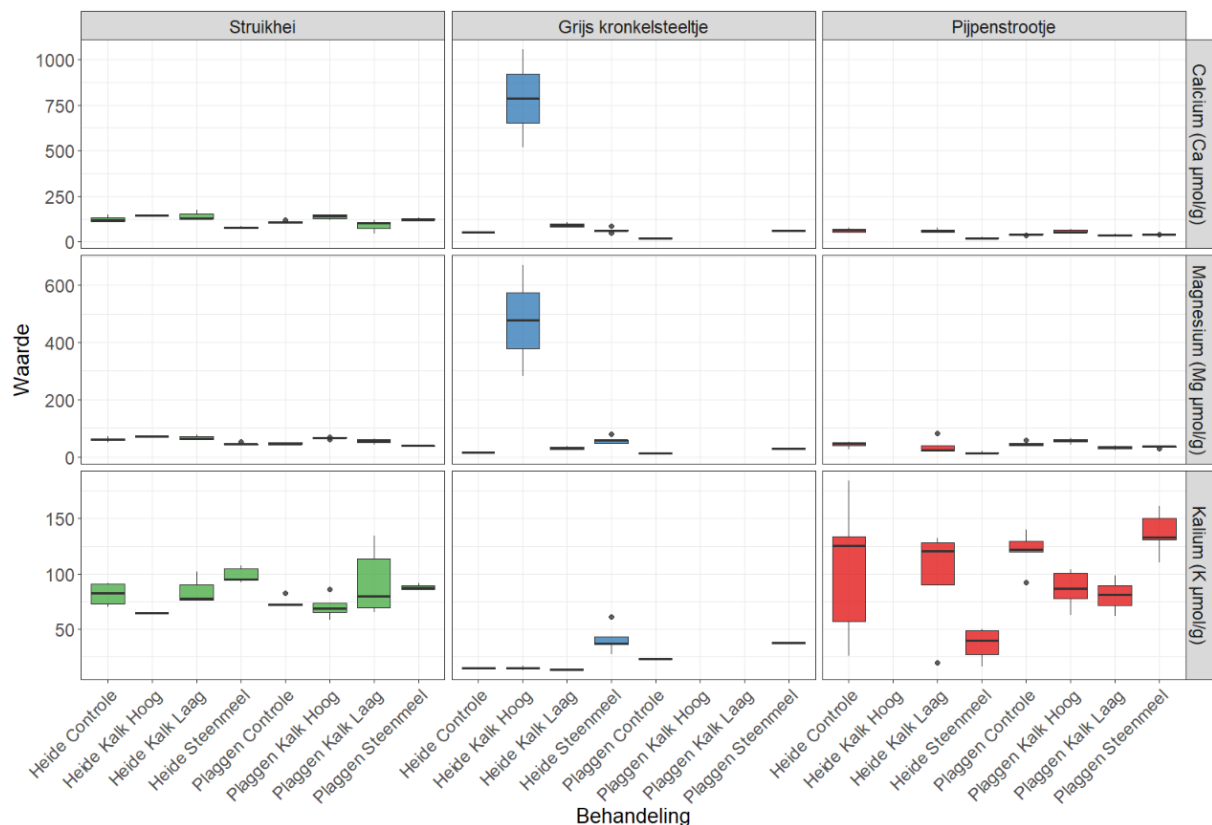
De N:P ratio in de planten is over het algemeen in de controleplots hoger dan in de plots waar kalk is toegediend. Het is de vraag of dit effect echt optreedt, aangezien de beschikbaarheid van P in bekalkte bodems juist iets afneemt. Steenmeel lijkt geen duidelijk effect te hebben. De N-concentratie in de planten is over de gehele linie laag. Dit is waarschijnlijk het gevolg van beheer gericht op het afvoeren van stikstof.



Figuur 32: Boxplots van de plantconcentraties van stikstof (N), fosfor (P) en de N:P-ratio voor drie plantensoorten (struikheide, grijs kronkelsteeltje en pijpenstrootje) onder de verschillende behandelingen. De grafiek toont de variatie binnen en tussen behandelingen, waarbij elk soort afzonderlijk is weergegeven. Indien een box bij een behandeling mist dan was er niet voldoende van het betreffende plantmateriaal beschikbaar binnen deze behandeling om geanalyseerd te worden.

Calcium, magnesium en kalium concentraties

Voor deze elementen volgt grijs kronkelsteeltje de beschikbaarheid in de bodem: hoge concentratie van Ca en Mg bij toedienen van veel kalk en K bij de steenmeelbehandeling. Ook calcium is iets verhoogd in struikheide. Bij pijpenstrootje zien we dat patroon niet terug.



Figuur 33: Boxplots van de plantconcentraties van calcium (Ca), magnesium (Mg) en kalium (K) voor drie plantensoorten (struikhei, grijs kronkelsteeltje en pijpenstrootje) onder de verschillende behandelingen. De grafiek toont de variatie binnen en tussen behandelingen, waarbij elk soort afzonderlijk is weergegeven. Indien een box bij een behandeling mist dan was er niet voldoende van het betreffende plantmateriaal beschikbaar binnen deze behandeling om geanalyseerd te worden.

2.3 Discussie & conclusie plotonderdeel

In zowel de geplagde als de ongeplagde heideplots blijkt dat kalktoediening – vooral in hoge dosering – de ontwikkeling van grijs kronkelsteeltje sterk remt en de soort zelfs doet afsterven. Dit effect is zichtbaar in zowel de bedekking als de matdikte, die in de kalkbehandelingen door de jaren heen consequent afneemt, terwijl de controleplots juist een toenemende en vitalere mosmat laten zien. Steenmeel remt grijs kronkelsteeltje ook enigszins, maar minder sterk dan kalk, en stimuleert bovendien duidelijk de ontwikkeling van korstmossen. In de geplagde plots herstelt de vegetatie langzaam. Na bijna drie jaar bereikt geen van de geplagde behandelingen een hoge totale bedekking, en grijs kronkelsteeltje blijft overal laag. Wel valt op dat struikhei het best herstelt in de steenmeelbehandeling.

In de heideplots verbeteren naast grijs kronkelsteeltje meerdere soortgroepen over tijd, maar de richting van verandering verschilt sterk per behandeling: struikhei neemt toe in de controle, kalk laag en steenmeel, terwijl korstmossen stijgen bij steenmeel toediening maar juist afnemen bij een hoge kalk toevoeging. In de grasplots blijven de verschillen tussen behandelingen klein; pijpenstrootje blijft dominant en de lichte afname in de kalkplots wordt vooral opgevuld door andere grassoorten zoals buntgras.

Wat in dit onderzoek opvalt is dat in geen enkele van de behandelingen – noch bij de geplagde, noch bij de ongeplagde bodemvariant – een duidelijk soortenrijke vegetatie van kruiden tot ontwikkeling is gekomen. In plaats daarvan bleef de begroeiing beperkt tot soorten zoals pilzegge, buntgras, braam, en sporadisch wat dophei, terwijl typische kruiden (zoals bijvoorbeeld: blauwe knoop, dwergviltkruid en

fraai hertshooi) nauwelijks tot niet zijn aangetroffen. Dit wijst erop dat bodemchemische correctie alleen niet voldoende is. Waarschijnlijk spelen meerdere factoren — zoals zaadbankbeperkingen, microsite-condities, bodemchemie, competitie door algemene soorten, en tijdsduur van herstel — een rol. In dit experiment is ook getest of het aanbrengen van heidemaaisel zorgt voor een sneller herstel van heidevegetatie, dit was niet het geval. Dit maaisel bestond echter vooral uit maaisel van struikheide met rijp zaad van deze plant. Er is hierbij niet specifiek gezocht naar maaisel met rijp zaad van karakteristieke kruiden. Voor toekomstig herstel van soortrijke droge heide op de Regte Heide zou worden aanbevolen om, naast bodembehandelingen, ook maatregelen te nemen zoals het aanbrengen van geschikte zaadmengsels van karakteristieke kruiden, het creëren van open microsites (bijv. lichte verstoring, bloot zand) en langdurige monitoring over een langere tijdsperiode.

De resultaten laten zien dat de effecten van bodemverbeteraars op de pH van de heideplots veel minder uitgesproken waren dan bij de plaggenplots. Zo steeg de pH in de heideplots alleen aanzienlijk bij de hoge kalk toevoeging terwijl de lage kalk- en steenmeelbehandelingen nauwelijks effect hadden. Dit verschil kan worden verklaard doordat de bodemverbeteraars op de heideplots bovenop de grijs kronkelsteeltje mat zijn aangebracht en daardoor minder goed in de bodem konden doordringen; bij het nemen van de bodemonsters is de grijs kronkelsteeltje mat aan de kant geschoven.

De gewenste pH van Droge heide ligt tussen de 4.5 - 5 maar wordt op slechts weinig plekken in Nederland bereikt (Smits et al., 2014). Momenteel ligt de pH van Nederlandse Droge heide vaak rond 3,5–4,0, wat vrij zuur is en suboptimaal voor bodemorganismen en plantengroei. De pH van de onbehandelde bodem van de Regte Heide ligt zelfs nog lager dan het landelijk gemiddelde, namelijk op 3.0. Het verhogen van de pH is daarom gewenst, maar grote sprongen in korte tijd (bijvoorbeeld meer dan 0,5 pH-eenheid binnen enkele jaren) zijn ongewenst omdat het bodemleven, zoals schimmels, dit niet goed kan bijhouden, wat kan leiden tot verdere verstoring (Vogels, 2025). In lijn met literatuur hebben de resultaten bevestigd dat kalk een sterker effect op de pH heeft dan steenmeel, terwijl steenmeel slechts een beperkte pH verhoging gaf (Vogels, 2025). In de plaggenplots zijn de effecten van kalk veel sterker dan in de ongeplagde plots. Plaggen met een hoge concentratie kalk verhoogt de pH tot ~6, ver boven het natuurlijke bereik voor droge heidebodems (pH 4.5-5) en bovendien een enorme stijging is van de pH in slechts 2.5 jaar tijd. Het toebrengen van een dermate hoge concentratie is daarom ongewenst. De verwachting is dat deze plots binnen enkele jaren zullen worden overgroeit met een dominante pijpenstrootje bedekking (pers. comm J. Vogels). Hoewel deze behandeling dus goed werkt tegen grijs kronkelsteeltje vorming, treden er dus andere nadelige effecten op. Ook een toevoeging van een lage concentratie kalk aan de geplagde plots zorgt voor een forse pH stijging in korte tijd van 1.17 pH. Hoewel de nieuwe pH dichtbij de streefwaarde van pH 4.5 komt is de stijging mogelijk nog steeds te snel. In dit onderzoek is er niet gekeken naar de effecten van deze snelle pH stijgingen op bijvoorbeeld schimmels, insecten en ander bodemleven. Dit zou een mooi onderwerp kunnen zijn voor een vervolgstudie. De lagere pH stijging van slechts 0.5 na toevoeging van steenmeel in de geplagde plots is meer in lijn met de gewenste stijging. Ook is bekend dat steenmeel een langzamere werking en langdurigere werking heeft op de bodem dan kalk, hierdoor is het goed mogelijk dat de pH de komende jaren nog wat verder toeneemt en dichterbij de streefwaarde komt, zonder dat dit ten koste gaat van ander bodemleven. Dit gezien het langere tijdspad van de stijging waardoor het bodemleven zich geleidelijker kan aanpassen aan de veranderingen. Toekomstige monitoring van de bodemchemie zou dit moeten uitwijzen. Al met al tonen de resultaten aan dat plaggenplots gevoeliger zijn voor pH-veranderingen door bodemverbeteraars, terwijl de ongeplagde heideplots slechts beperkte stijgingen vertoonden. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat de bodemverbeteraars bij het uitstrooien niet direct in contact kwamen met de bodem maar met de daarboven liggende mat van grijs kronkelsteeltje. Een lage kalkbehandeling had zelfs geen effect op de pH van de bodem. Hoewel het

toepassen van deze methodes dus goed werkt om de mat van grijs kronkelsteeltje te laten afsterven zorgen deze behandelingen (op de kalk hoog behandeling na waar de stijging te groot was) niet voor sterke veranderingen in bodem pH en daarmee lijkt het niet te helpen in het verbeteren van de kwaliteit van de bodem van de Droge heide. Overigens is het mogelijk dat er in de komende jaren nog wel een toename van de bodem pH gaat optreden, dit gezien de mat van grijs kronkelsteeltje duidelijk afsterft door de toevoegingen van de bodemverbeteraars. Dit betekent dat de mat vergaat en in deze mat opgeslagen voedingsstoffen etc. over tijd zullen vrijkomen in de bodem. Het is daarom nuttig om de bodemchemie over enkele jaren opnieuw te onderzoeken

De bodemonsters laten zien dat de stikstofbeschikbaarheid in de heidebodems extreem laag is, met nitraat $<0,10 \mu\text{mol/g}$ en ammonium $<1 \mu\text{mol/g}$ in alle behandelingen, ongeacht toegepaste behandelingen. In de ongeplagde plots zijn geen significante verschillen in nitraat of ammonium tussen behandelingen gevonden, terwijl in de geplagde plots nitraat iets hoger is in de lage concentratie kalk behandeling vergeleken met controle en steenmeel. De plant beschikbare fosforconcentraties (P-Olsen) zijn in sommige behandelingen lager, met name in de steenmeelplots in ongeplagde gebieden en in kalk-laag behandeling in de geplagde plots. Ondanks langdurige hoge stikstofdepositie van de afgelopen eeuw zijn de gemeten nitraat- en ammoniumwaarden in de doorgemeten bodems erg laag.

Opvallend was verder dat de aluminiumconcentraties in de bodems van alle behandelde en onbehandelde plots relatief laag was. Zeker gezien de lage pH van de bodem, hetgeen juist vaak gepaard gaat met een zeer hoge concentratie van aluminium (Vogels, 2025). Hoge concentratie aluminium ($> 50 \mu\text{mol/g}$) in de bodem is toxisch voor planten. Bij dermate lage pH's zou je normaal juist veel aluminium in oplossing verwachten, omdat Al^{3+} veel beter oplost bij lage pH. Dat er nu zulke lage waarden worden gemeten, wijst erop dat het aluminium niet in de vrije oplossing zit, maar ergens anders is gebonden of al is weggespoeld. Gezien de grove structuur van de bodem van de Regte heide is het aannemelijk dat het meeste aluminium over tijd is uitgespoeld (pers. comm. J. Vogels). Ook de concentratie calcium in de behandelde en onbehandelde bodems is zeer laag (overal $<1 \mu\text{mol/g}$) terwijl de waardes van gezonde droge heide tussen de $20\text{-}100 \mu\text{mol/g}$ ligt. Een mogelijk verklaring hiervoor is dat de bodem zeer doorlatend is en weinig kationen kan vasthouden, waardoor calcium snel uitspoelt naar diepere lagen. En gezien slechts de bovenste centimeters van de bodem zijn geanalyseerd is dit effect in deze oppervlakkige bodem mogelijk nog groter. Hoewel de pH in de zandige heidebodems door de toevoeging van kalk en steenmeel duidelijk is gestegen, blijven de calciumconcentraties extreem laag ($<1 \mu\text{mol/L}$). Dit duidt erop dat de verhoogde zuurgraad voornamelijk het waterstofionen-niveau heeft beïnvloed, terwijl calcium door de zeer doorlatende, organisch arme zandbodem snel uitspoelt en nauwelijks accumuleert. Hierdoor hebben de behandelingen de pH van de bodem veranderd, maar niet substantieel de beschikbaarheid van calcium voor planten verbeterd. Steenmeel is een bron van kalium, maar leidde slechts tot een lichte verhoging in de bodem. Ook hiervoor is de mate van uitspoeling mogelijk groot.

De analyse van de plantchemie bevestigt de voedingsarme toestand van de onderzochte locaties op de droge heide. Ondanks uitspoeling van elementen in de grove bodem van de Regte heide werden calcium en kalium vooral door grijs kronkelsteeltje snel opgenomen. Calciumconcentraties waren in ongeplande onbehandelde heide en pijpenstrootje laag, Aluminiumniveaus in heide en pijpenstrootje lagen ver onder toxische waarden, wat erop wijst dat Al-toxische effecten bij deze lage pH toch beperkt zijn. Behandelingen met kalk verhoogden het calciumgehalte in heide en mos duidelijk, terwijl steenmeel slechts een beperkt effect had, wat suggereert dat kalk beter opneembaar is of sneller de planten bereikt. Fosforgehaltes waren in veel struikheide- en pijpenstro-monsters laag, wat wijst op een fosforbeperking. Stikstofpercentages waren laag en C/N-ratio's hoog, wat de N-beperking in deze

voedselarme ecosystemen ondersteunt. Samen laten de bodem- en plantgegevens zien dat de heidearm milieu karakteristiek is voor lage basiskationen (Ca, Mg), lage P, en beperkte N, en dat kalktoepassing het calciumtekort kan verlichten zonder de overige voedingsbeperkingen volledig op te heffen. Het is natuurlijk opvallend dat de hoeveelheid stikstof in de bodem en planten laag is, zeker in de ongeplande plots. De lage zuurgraad en hoge stikstofdepositie in het gebied zouden veel hogere stikstofwaardes doen vermoeden. Dit verschil is te verklaren door het feit dat er ook in de ongeplande plots uit dit onderzoek in het verleden stikstof verlagende maatregelen zijn uitgevoerd. Bekend is dat er vrij kort voor aanvang van het onderzoek zeer kort gemaaid is op de locaties van de heide plots (pers. comm. J. van Oosterhout). Dit verklaart waarom de stikstofconcentraties in de struikheide al vrij laag is. Het is daarnaast ook aannemelijk dat er in het verleden op dezelfde locaties al eens geplagd is. Dit verklaart de dominantie van grijs kronkelsteeltje op deze locaties. Het mos doet het immers juist goed van geplagde bodems en verklaart eveneens waarom de concentraties stikstof in de bodem relatief laag zijn.

3. Projectonderdeel: kweekexperiment

3.1 Opzet & methode kweekexperiment

3.1.1 Methode Potten inzetten

Tussen augustus en september 2022 zijn 192 kweekpotten met een doorsnede van 36 cm, met gaten in de bodem bedekt met worteldoek, gevuld met verschillend bodem en plantmateriaal van de Regte Heide (Figuur 34). De gevulde potten zijn naar de buitenruimte van het kassencomplex van de Radboud Universiteit vervoerd. Hier zijn de potten at random geplaatst in twee rijen van zes potten breed op een watervasthoudend doek om het vasthoudend vermogen van diepere bodemlagen te simuleren. De potten zijn in de zon geplaatst en zijn blootgesteld aan alle plaatselijke weersomstandigheden. De stikstofdepositie in Nijmegen is vergelijkbaar met de stikstofdepositie op de Regte heide. Van alle kweekpotten is een vegetatieopname en een foto van bovenaf gemaakt ter nulmeting. Daarnaast is er gedurende het vullen van de potten een bodemonster genomen van iedere gebruikte bodemdiepte, en van de bodem direct onder een dominante grijs kronkelsteeltje en pijpenstrootje bedekking. Direct na het vullen van de potten is de dikte van de grijs kronkelsteeltje mat (inclusief bodem en enkel de organische laag) op twee random plekken opgemeten in iedere pot met een grijs kronkelsteeltje als dominante bedekking.

In september en oktober 2022 zijn het steenmeel, kalk en de fragmenten van grijs kronkelsteeltje toegevoegd aan de kweekpotten. Een overzicht van de 24 gebruikte behandelingen is weergegeven in Tabel 4.

Er is 40 (lage concentratie) of 80 (hoge concentratie) gram steenmeel toegevoegd aan de steenmeel behandelingen, hetgeen neerkomt op respectievelijk 5 en 10 ton steenmeel per hectare. Voor de kalkbehandelingen is 4 of 16 gram poederkalk gebruikt, hetgeen neerkomt op 0.5 en 2 ton kalk per hectare.

Daarnaast is aan de potten zonder organische toplaag grijskronkelsteeltje toegevoegd omdat de effecten van steenmeel en kalk op de vestiging van deze soort op verschillende bodemdieptes hiermee getest kan worden. Hiervoor is eerst circa 1 kg mat van grijs kronkelsteeltje verzameld op de Regte heide, waarvan eerst al het dode organische bodemmateriaal is verwijderd. De matten zijn daarna handmatig zover mogelijk uit elkaar getrokken en gemixt, waarna per kweekpot vijf gram natgewicht is afgewogen en verdeeld. Voor iedere bodemdiepte is er ook een controle ingericht waarbij er geen grijs kronkelsteeltje fragmenten aan acht kweekpotten zijn toegevoegd.

Tabel 4: Overzicht van alle ingezette combinaties van behandelingen

Nr.	Bodemdiepte	Organisch toplaag	Grijs kronkelsteeltje toegevoegd?	Code	Behandeling	Aantal potten
1	Toplaag	Grijs kronkelsteeltje	Nee	GKS	Controle	8
2	Toplaag	Grijs kronkelsteeltje	Nee	GKSSL	Steenmeel laag (5 ton/ha)	8
3	Toplaag	Grijs kronkelsteeltje	Nee	GKSSH	Steenmeel hoog (10 ton/ha)	8
4	Toplaag	Grijs kronkelsteeltje	Nee	GKSKL	Kalk laag (0.5 ton/ha)	8
5	Toplaag	Grijs kronkelsteeltje	Nee	GKSKH	Kalk hoog (2 ton/ha)	8
6	Toplaag	Pijpenstrotje	Nee	GR	Controle	8
7	Toplaag	Pijpenstrotje	Nee	GRSL	Steenmeel laag (5 ton/ha)	8
8	Toplaag	Pijpenstrotje	Nee	GRSH	Steenmeel hoog (10 ton/ha)	8
9	Toplaag	Pijpenstrotje	Nee	GRKL	Kalk laag (0.5 ton/ha)	8

10	Toplaag	Pijpenstrotje	Nee	GRKH	Kalk hoog (2 ton/ha)	8
11	Ondiep geplagd	Geen	Nee	OD	Controle	8
12	Ondiep geplagd	Geen	Ja	ODGKS	Controle	8
13	Ondiep geplagd	Geen	Ja	ODSL	Steenmeel laag (5 ton/ha)	8
14	Ondiep geplagd	Geen	Ja	ODSH	Steenmeel hoog (10 ton/ha)	8
15	Ondiep geplagd	Geen	Ja	ODKL	Kalk laag (0.5 ton/ha)	8
16	Ondiep geplagd	Geen	Ja	ODKH	Kalk hoog (2 ton/ha)	8
17	Diep geplagd	Geen	Nee	DP	Controle	8
18	Diep geplagd	Geen	Ja	DPGKS	Controle	8
19	Diep geplagd	Geen	Ja	DPSL	Steenmeel laag (5 ton/ha)	8
20	Diep geplagd	Geen	Ja	DPSH	Steenmeel hoog (10 ton/ha)	8
21	Diep geplagd	Geen	Ja	DPKL	Kalk laag (0.5 ton/ha)	8
22	Diep geplagd	Geen	Ja	DPKH	Kalk hoog (2 ton/ha)	8
23	Onverzuurd moedermateriaal	Geen	Nee	OM	Controle	8
24	Onverzuurd moedermateriaal	Geen	Ja	OMGKS	Controle	8



Figuur 34: Links: Recent gestoken kweekpotten op de Regte Heide met dominant bedekte bodem van grijs kronkelsteeltje. Rechts: de opstelling van de kweekpotten bij het kassencomplex van de Radboud Universiteit.

3.1.2. Methode Vegetatieopnames

Direct na het vullen van de potten en het plaatsen van de potten in het kassencomplex van de Radboud Universiteit (dus voor het toevoegen van steenmeel, kalk en/of grijs kronkelsteeltje fragmenten) zijn er vegetatieopnames gemaakt van iedere pot. In de potten met diep/ondiep geplagde bodem en niet verzuurd moedermateriaal was in het najaar van 2022 geen vegetatie aanwezig. Hiervan is in het voorjaar van 2023 voor het eerst een vegetatieopname gemaakt. Ook zijn in de potten met een dominante bedekking van grijs kronkelsteeltje in het najaar van 2022 en het voor- en najaar van 2023 metingen verricht aan de dikte van de totale en het nog levende deel van de grijs kronkelsteeltjemat (Figuur 4).

Alle statistische analyses zijn uitgevoerd in R. Voor de analyse van de vegetatiesamenstelling (bedekking) zijn dezelfde niet-parametrische methoden toegepast. Per bodemtype is voor elke soortgroep (grijs kronkelsteeltje, struikheide, pijpenstrootje, korstmossen, overige soorten en totale bedekking) afzonderlijk een Kruskal–Wallis-toets uitgevoerd om te bepalen of de bedekking verschilde tussen de behandelingen. Wanneer deze toets significante verschillen aantoonde, zijn Dunn-posthoc-toetsen met Bonferroni-correctie gebruikt om te identificeren welke behandelingen daadwerkelijk van elkaar

verschillen. De aangepaste p-waarden zijn vervolgens omgezet in significantielabels, zodat per soort duidelijk zichtbaar is welke behandelgroepen statistisch gelijk of verschillend waren in de figuren.

Omdat de data niet voldeed aan de aannames van normaliteit, zijn er ook niet-parametrische toetsen gebruikt om verschillen in totale matdikte en toplaagdikte tussen de behandelingen te beoordelen. Per bodemtype is voor elke variabele eerst een Kruskal–Wallis-toets uitgevoerd om te bepalen of er algemene verschillen tussen de behandelingsgroepen waren. Als deze toets significant was, zijn vervolgens Dunn-posthoc-toetsen met Bonferroni-correctie gebruikt om te testen welke behandelgroepen daadwerkelijk van elkaar verschilden. De aangepaste p-waarden zijn daarna omgezet in significantielabels, zodat groepen die statistisch gelijk waren eenvoudig herkenbaar zijn in de figuren..

3.1.3. Methode: Visuele analyse van vegetatiebedekking middels fotomateriaal

In het projectplan was aanvankelijk beoogd om aan het einde van het project de biomassa in alle potten te bepalen van grijs kronkelsteeltje, grassen en heide, om zo te kunnen beoordelen of er grote verschillen tussen de behandelingen waren. Tijdens de uitvoering bleek echter dat de laag grijs kronkelsteeltje nog zo dun was dat deze niet van de bodem te scheiden was zonder een aanzienlijke hoeveelheid bodem (zand) mee te nemen, waardoor een correcte oogst praktisch onmogelijk was. Bovendien zou de aanwezigheid van één struik van struikheide in een pot een disproportionele invloed hebben gehad op de totale biomassa, waardoor de resultaten tussen potten niet goed vergelijkbaar zouden zijn geweest. Om deze redenen is besloten af te zien van het meten van biomassa en in plaats daarvan een visuele analyse van de potten uit te voeren op basis van fotomateriaal. Direct na het inzetten van de potten zijn van alle potten foto's gemaakt, en deze opname is herhaald in het voorjaar van 2025. In de resultatensectie (3.2.1) worden van verschillende behandelingen per bodemtype één pot afgebeeld. Zo zijn bijvoorbeeld van de diep geplagde bodem zes foto's naast elkaar gezet, waarbij iedere foto een andere behandeling toont, om visueel de verschillen tussen de behandelingen te illustreren. De potten met niet verzuurd moedermateriaal, diep- en ondiep geplagde bodem hadden aan de start van het experiment geen vegetatie, hier is geen foto van toegevoegd.

3.1.4. Methode: Bodemonsters

Om te bepalen wat het effect is van de verschillende behandelingen op de verzuringsgevoeligheid en nutriëntenstatus van de bodem in relatie met de vegetatieontwikkeling zijn aan het begin en einde van het kweekonderdeel metingen verricht aan bodemchemie (organische stof gehalte, zuurgraad, buffercapaciteit en stikstofconcentraties). In augustus van 2022 zijn monsters genomen voor de nulmeting om de bodemchemie te onderzoeken. Van ieder getest bodemtype is één mengmonster genomen. Aan het einde van het project in augustus 2025 zijn opnieuw mengbodemmonsters van iedere bodemtype + iedere bodem verbeterende behandeling genomen (in totaal 22 bodemonsters) om zo te bepalen of het pluggen op verschillende dieptes, de steenmeel en bekalking methodes effect hebben op de bodemkwaliteit. Gekozen is om alleen de bovenste 2-3 cm van de bodem te verzamelen, dit omdat grijs kronkelsteeltje oppervlakkig wortelt en dieper gelegen bodem daarmee geen effect heeft op de groei van deze invasieve exoot.

Van de bodemonsters zijn de beschikbare concentraties van calcium, magnesium, kalium en aluminium, ammonium, sporenelementen en pH gemeten in een zoutextract, de pH-water en nitraatconcentratie zijn gemeten in een demiwaterextract. Fosfaat is in dit project op drie manieren gemeten, via een Olsen-extractie waarmee de beschikbare fosfaatconcentratie wordt bepaald, die ook deels vrijgemaakt kan worden door planten, schimmels en bacteriën in de bodem, via een zoutextractie en demi-waterextractie, waarbij de laatste twee een maat geven voor de vrij oplosbare fosfaatconcentraties. Een uitgebreidere beschrijving van de toegepaste bodemanalyses is te vinden in

bijlage 1. De resultaten van de bodemonsteranalyse van de kweekpotten worden beschreven maar er worden geen statistische analyses op uitgevoerd. Hiervoor was het aantal replica's per behandeling simpelweg te laag.

3.2 Resultaten kweekexperiment

3.2.1 Resultaten: Vegetatieopnames

Diep plaggen:

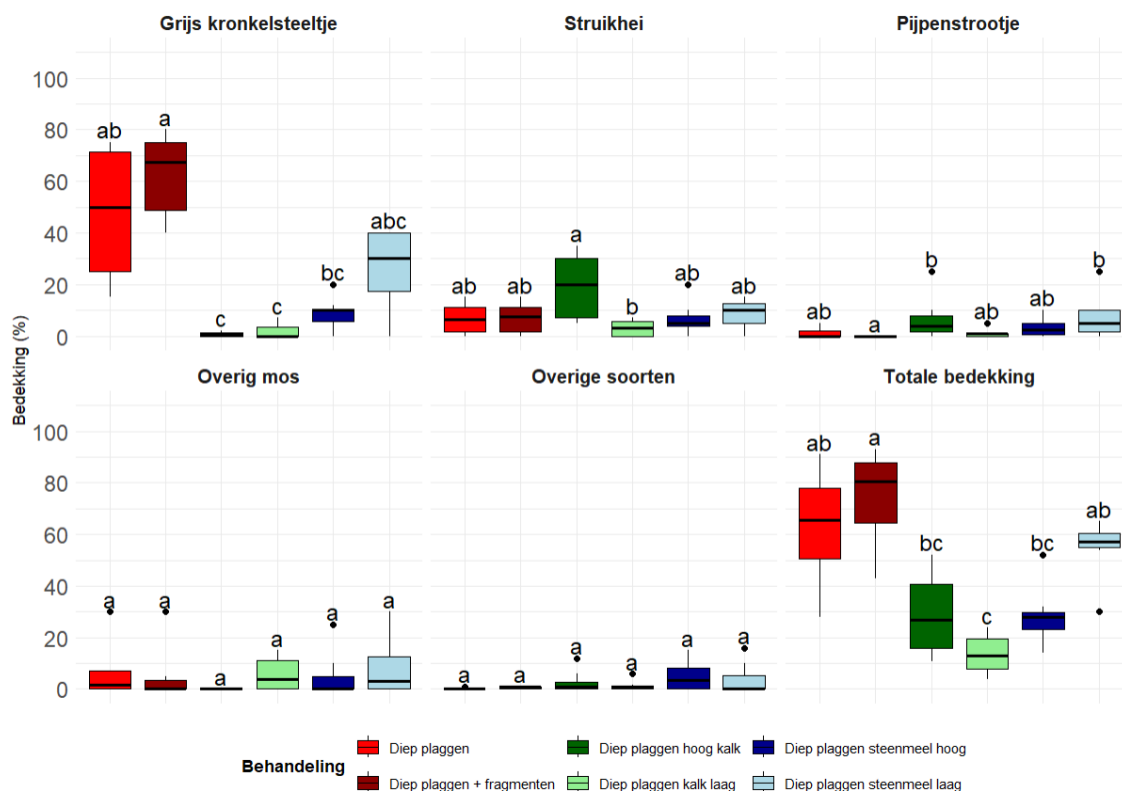
De bedekking van grijs kronkelsteeltje in 2025 verschilt significant tussen meerdere behandelingen op diep geplagde bodem (Figuur 35 & Figuur 36). Zo is de bedekking onder diep plaggen significant hoger dan onder diep plaggen hoog kalk ($Z = -3.84$, $p = 0.0018$) en diep plaggen kalk laag ($Z = -3.71$, $p = 0.0031$). Verder verschilt diep plaggen met fragmenten significant van diep plaggen hoog kalk ($Z = -4.55$, $p < 0.001$) en diep plaggen kalk laag ($Z = -4.42$, $p < 0.001$). Ook is diep plaggen met fragmenten significant lager dan diep plaggen steenmeel hoog ($Z = -3.01$, $p = 0.039$). Er zijn geen significante verschillen in grijs kronkelsteeltje bedekking tussen de kalk en steenmeelbehandelingen.

De bedekking van struikhei is significant verschillend tussen diep plaggen hoog kalk en diep plaggen kalk laag ($Z = -3.26$, $p = 0.017$). Waarbij de bedekking van struikhei significant lager is in de kalk laag behandeling.

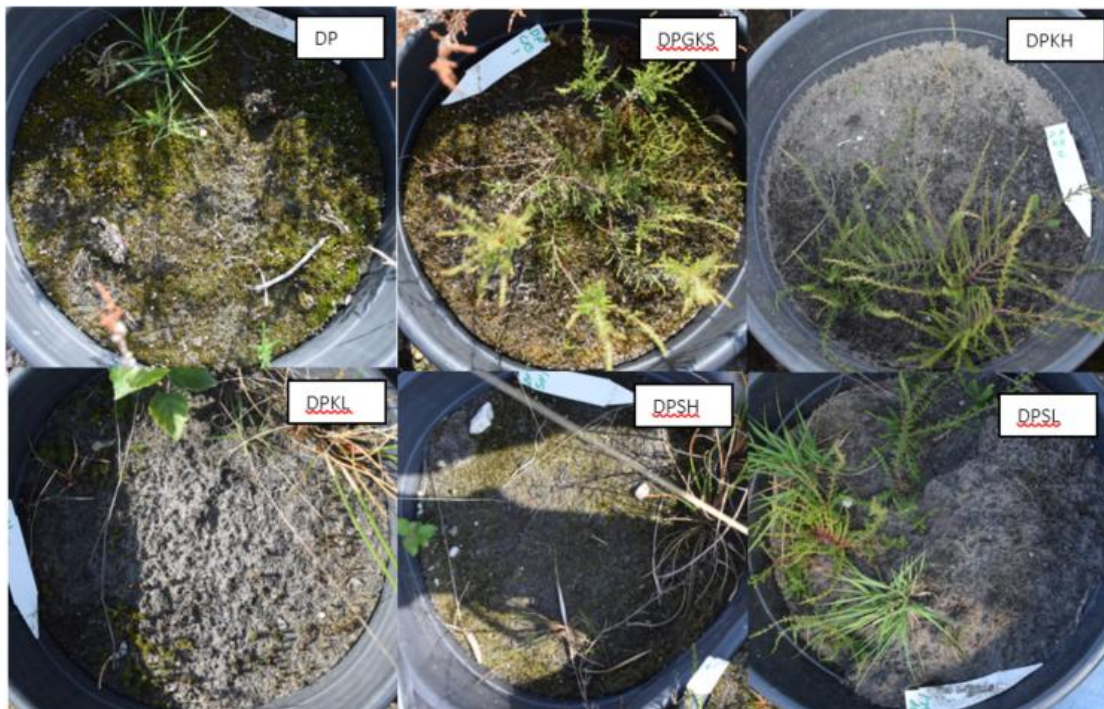
De bedekking van pijpenstrootje is bij diep plaggen met fragmenten significant lager dan diep plaggen hoog kalk ($Z = 3.13$, $p = 0.027$) en diep plaggen steenmeel laag ($Z = 3.12$, $p = 0.027$).

Er zijn geen significante verschillen tussen de behandelingen betreft de bedekking van overige mossen en overige soorten.

De totale bedekking varieert significant tussen diverse behandelingen. Diep plaggen heeft een significant hogere bedekking dan diep plaggen kalk laag ($Z = -3.94$, $p = 0.0012$). Ook verschilt diep plaggen met fragmenten significant van diep plaggen hoog kalk ($Z = -3.39$, $p = 0.0104$), diep plaggen kalk laag ($Z = -4.79$, $p < 0.001$) en diep plaggen steenmeel hoog ($Z = -3.34$, $p = 0.013$). Tenslotte verschilt diep plaggen kalk laag ook significant van diep plaggen steenmeel laag ($Z = 3.43$, $p = 0.009$).



Figuur 35: Boxplots van de bedekking in het najaar van 2025 van grijs kronkelsteeltje, Struikhei, Pijpenstrootje, Overig mos, Overige soorten en totale bedekking in juni 2025 (%) per diep geplagde bodem behandeling in de kweekpotten. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).

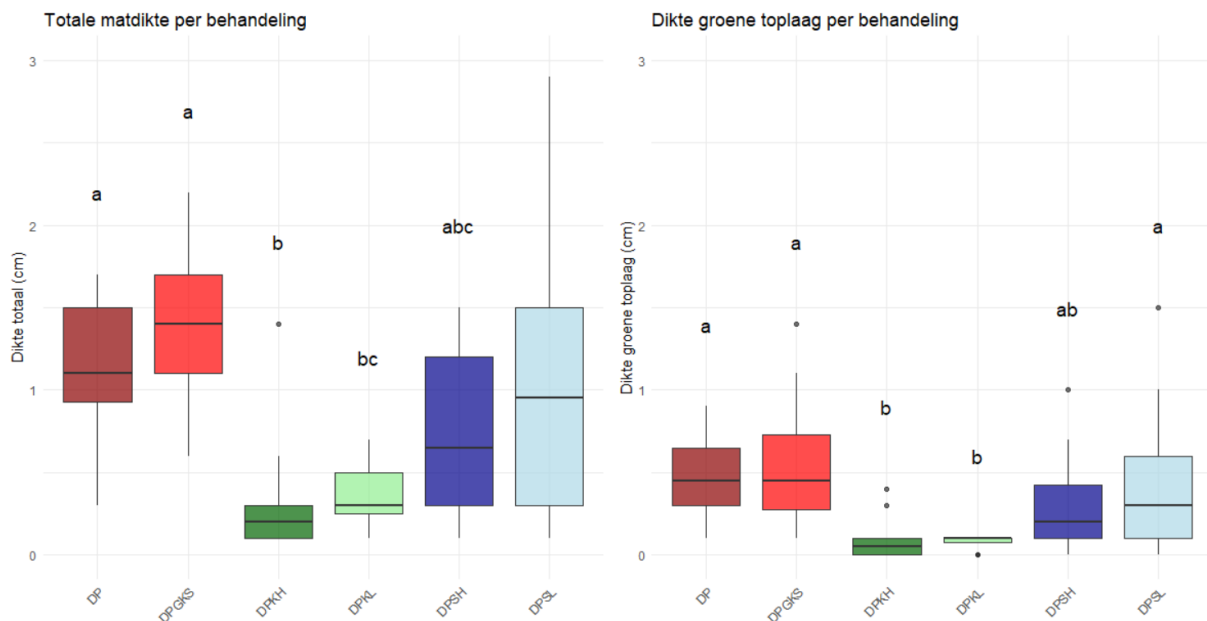


Figuur 36: Voorbeeld overzichtsfoto's van zes potten met diep geplagde bodem met zes verschillende behandelingen. Zoals op de foto duidelijk te zien is, hebben de potten zonder toegevoegde bodemverbeteraar (DP en DPGKS) een hogere bedekking van grijs kronkelsteeltje dan de overige behandelingen, de kalk behandelingen (DPKL en DPKH) hebben de laagste grijs kronkelsteeltje bedekking. Deze resultaten komen overeen met de statistische analyse.

De totale dikte van de grijs kronkelsteeltje-mat bij diep plaggen met een hoge concentratie kalk (DPKH) is significant lager dan bij zowel diep plaggen zonder toevoeging (DP; $Z = 4,23$, $p < 0,001$) als diep plaggen met grijs kronkelsteeltje-fragmenten (DPGKS; $Z = 5,24$, $p < 0,001$) (Figuur 37). Ook de matdikte bij diep plaggen met een kalklaag (DPKL) is significant lager dan bij DP ($Z = 3,57$, $p = 0,0053$) en DPGKS ($Z = 4,58$, $p < 0,0001$). Daarnaast is de mat bij diep plaggen met een lage concentratie steenmeel (DPSL) significant dikker dan bij diep plaggen met een hoge concentratie steenmeel (DPKH; $Z = -3,16$, $p = 0,024$).

De dikte van de groene toplaag van de grijs kronkelsteeltje-mat bij diep plaggen met een hoge concentratie kalk (DPKH) is significant lager dan bij zowel diep plaggen zonder toevoeging (DP; $Z = 4,48$, $p = 0,0001$) als diep plaggen met grijs kronkelsteeltje-fragmenten (DPGKS; $Z = 4,73$, $p < 0,001$) en bij diep plaggen met een lage steenmeelconcentratie (DPSL; $Z = 4,21$, $p = 0,0004$). Ook de toplaagdikte bij diep plaggen met een lage kalkconcentratie (DPKL) is significant lager dan bij DP ($Z = 4,46$, $p < 0,001$). Verder is de toplaag bij diep plaggen met een lage concentratie steenmeel (DPSL) significant dikker dan bij diep plaggen met een hoge concentratie kalk (DPKH; $Z = -3,21$, $p = 0,020$) en bij diep plaggen met een kalklaag (DPKL; $Z = -2,94$, $p = 0,049$).

http://127.0.0.1:33459/graphics/plot_zoom_png?width=982&height=711



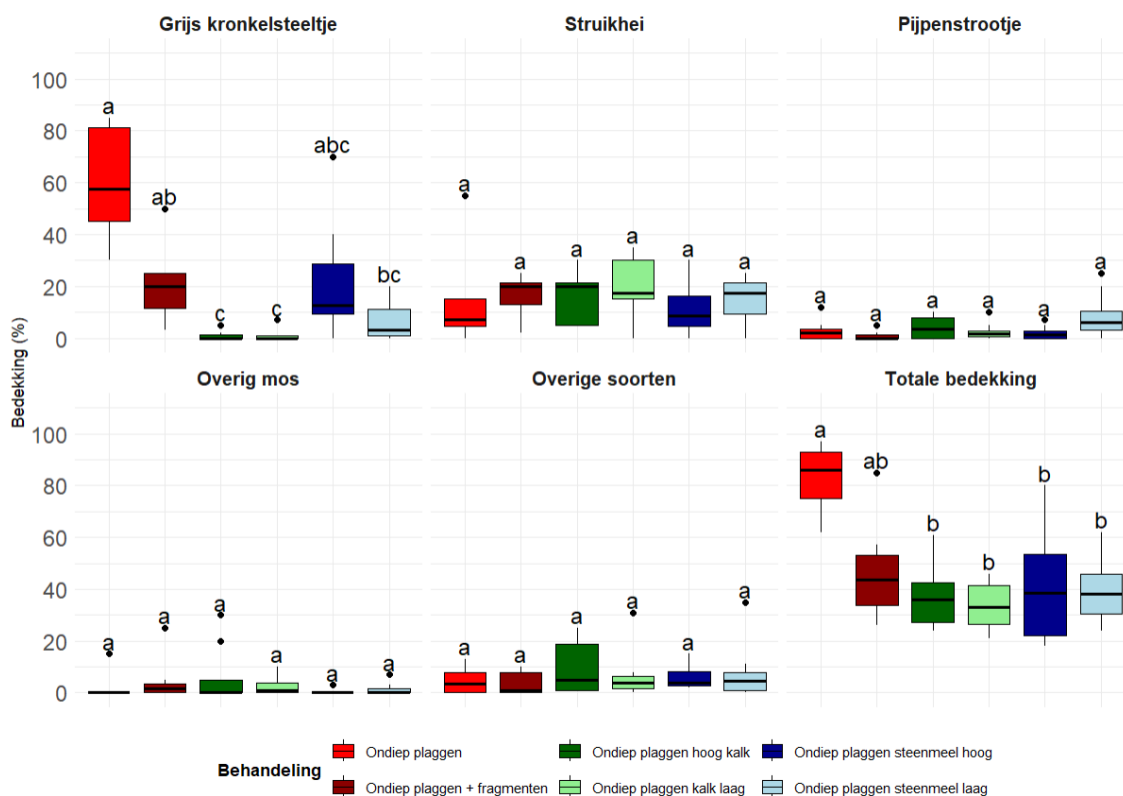
Figuur 37: Boxplots van de dikte van de totale mat (links) en groene toplaag (rechts) van grijs kronkelsteeltje in het voorjaar van 2025 per behandeling in de potten met Diep geplagde bodem. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).

Ondiep plaggen

De bedekking van Grijs kronkelsteeltje verschilt significant tussen enkele behandelingen (Figuur 38 & Figuur 39). De bedekking onder ondiep plaggen is significant lager dan onder ondiep plaggen hoog kalk ($Z = -4.62$, $p < 0.001$) en ondiep plaggen kalk laag ($Z = -4.65$, $p < 0.001$). Daarnaast is de bedekking onder ondiep plaggen ook lager dan onder ondiep plaggen steenmeel laag ($Z = -3.33$, $p < 0.001$). Verder is de bedekking onder ondiep plaggen + fragmenten significant lager dan onder ondiep plaggen hoog kalk ($Z = -2.98$, $p < 0.001$) en ondiep plaggen kalk laag ($Z = -3.01$, $p < 0.001$).

Voor pijpenstrootje en struikhei zijn er geen significante verschillen tussen behandelingen.

De totale bedekking varieert significant tussen behandelingen. Ondiep plaggen heeft een significant lagere bedekking dan ondiep plaggen hoog kalk ($Z = -3.39$, $p < 0.001$), ondiep plaggen kalk laag ($Z = -3.93$, $p < 0.001$), ondiep plaggen steenmeel hoog ($Z = -3.21$, $p < 0.001$) en ondiep plaggen steenmeel laag ($Z = -3.09$, $p < 0.001$).



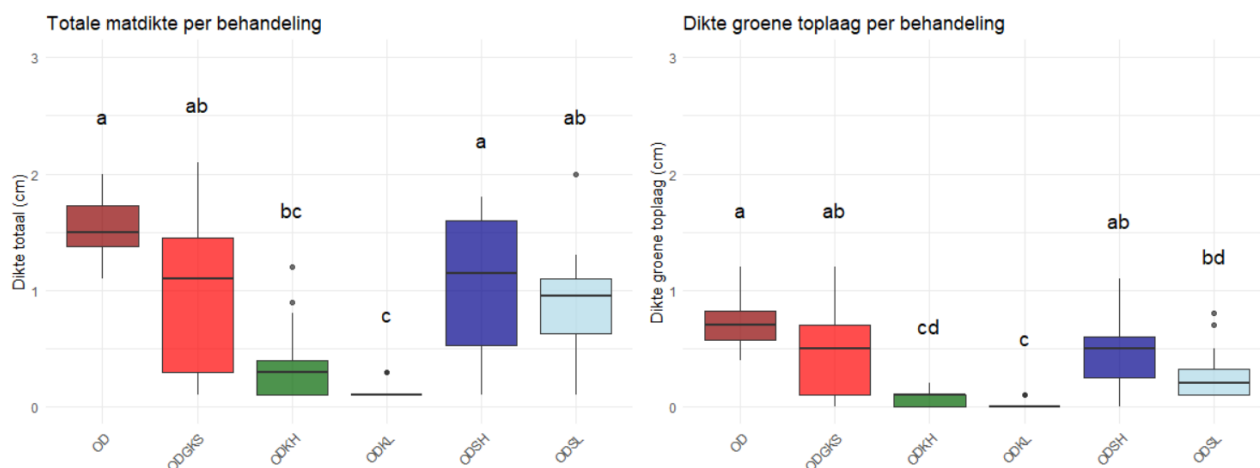
Figuur 38: Boxplots van de bedekking in het najaar van 2025 van grijs kronkelsteeltje, Struikhei, Pijpenstrootje, Overig mos, Overige soorten en totale bedekking in juni 2025 (%) per diep ondiep bodem behandeling in de kweekpotten. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).



Figuur 39: Voorbeeld overzichtsfoto's van zes potten met ondiep geplagde bodem met zes verschillende behandelingen. Zoals op de foto duidelijk te zien is, hebben de potten zonder toegevoegde bodemverbeteraar (OD en ODGKS) een hogere bedekking van grijs kronkelsteeltje dan de overige behandelingen, de kalk behandelingen (ODKL en ODKH) hebben de laagste grijs kronkelsteeltje bedekking. Deze resultaten komen overeen met de statistische analyse (figuur...)

De totale dikte van de grijs kronkelsteeltje-mat bij ondiep plaggen zonder toevoeging (OD) is significant dikker dan bij ondiep plaggen met een hoge concentratie kalk (ODKH; $Z = 5,06$, $p < 0,001$) en bij ondiep plaggen met een kalklaag (ODKL; $Z = 6,45$, $p < 0,001$) (Figuur 40). Ook de totale laagdikte bij ondiep plaggen met grijs kronkelsteeltje-fragmenten (ODGKS) is significant dikker dan bij ODKL ($Z = 4,30$, $p < 0,001$). Verder is matdikte bij ondiep plaggen met een lage concentratie steenmeel (ODSL) significant dikker dan bij OD ($Z = 2,87$, $p = 0,062$, bijna significant) en significant dunner dan bij ODKL ($Z = -3,59$, $p = 0,005$). De toplaagdikte bij ondiep plaggen met een hoge concentratie kalk (ODKH) is significant dikker dan bij ondiep plaggen met een hoge concentratie steenmeel (ODSH; $Z = -3,03$, $p = 0,036$) en bij ondiep plaggen met een kalklaag (ODKL) is de toplaag ook significant dikker dan bij ODSH ($Z = -4,43$, $p < 0,001$).

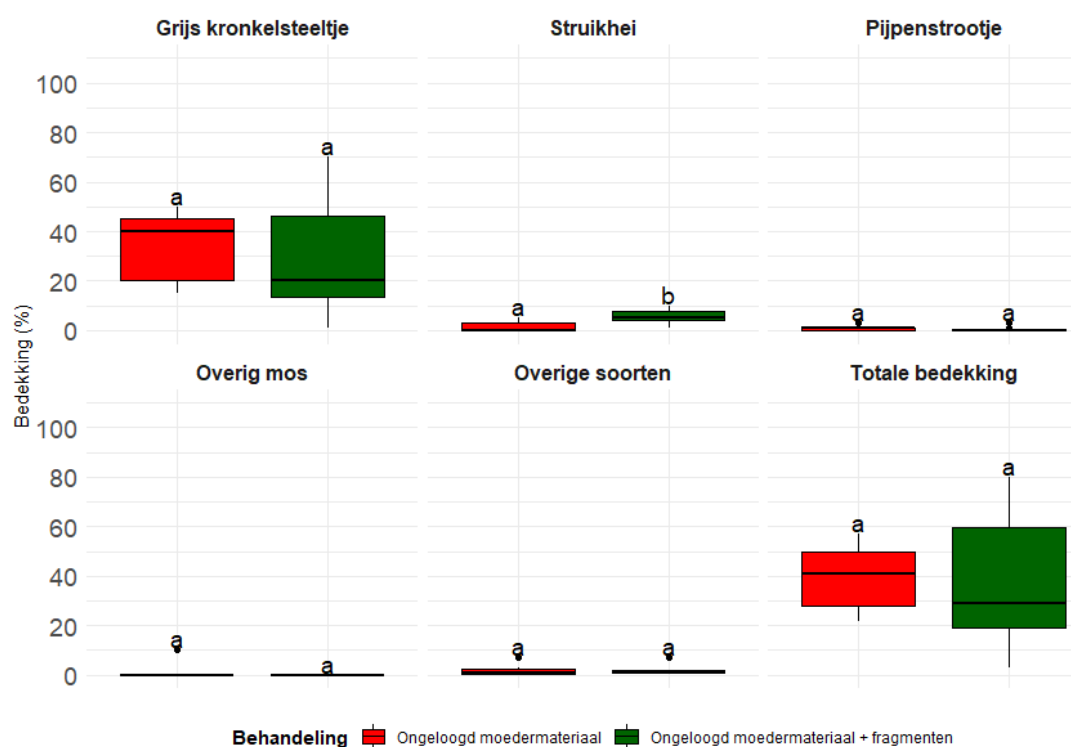
De totale dikte van de grijs kronkelsteeltje-mat bij ondiep plaggen zonder toevoeging (OD) is significant lager dan bij ondiep plaggen met een hoge concentratie kalk (ODKH; $Z = 5,23$, $p < 0,001$) en bij ondiep plaggen met een kalklaag (ODKL; $Z = 6,44$, $p < 0,001$). Ook bij ondiep plaggen met grijs kronkelsteeltje-fragmenten (ODGKS) is de matdikte significant lager dan bij ODKH ($Z = 3,39$, $p = 0,011$) en ODKL ($Z = 4,59$, $p < 0,0001$). Er zijn geen significante verschillen tussen ODKH en ODKL ($p > 0,05$). Daarnaast is de matdikte bij ondiep plaggen met een lage concentratie steenmeel (ODSL) significant dikker dan bij OD ($Z = 2,97$, $p = 0,045$) en lager dan bij ODKL ($Z = -3,47$, $p = 0,008$). Ten opzichte van de diep plaggen met hoge kalkconcentratie is ODSH significant dikker dan ODKH ($Z = -3,34$, $p = 0,013$) en ODKL ($Z = -4,55$, $p < 0,001$).



Figuur 40: Boxplots van de dikte van de totale mat (links) en groene toplaag (rechts) van grijs kronkelsteeltje in het voorjaar van 2025 per behandeling in de potten met ondiep geplagde bodem. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$)

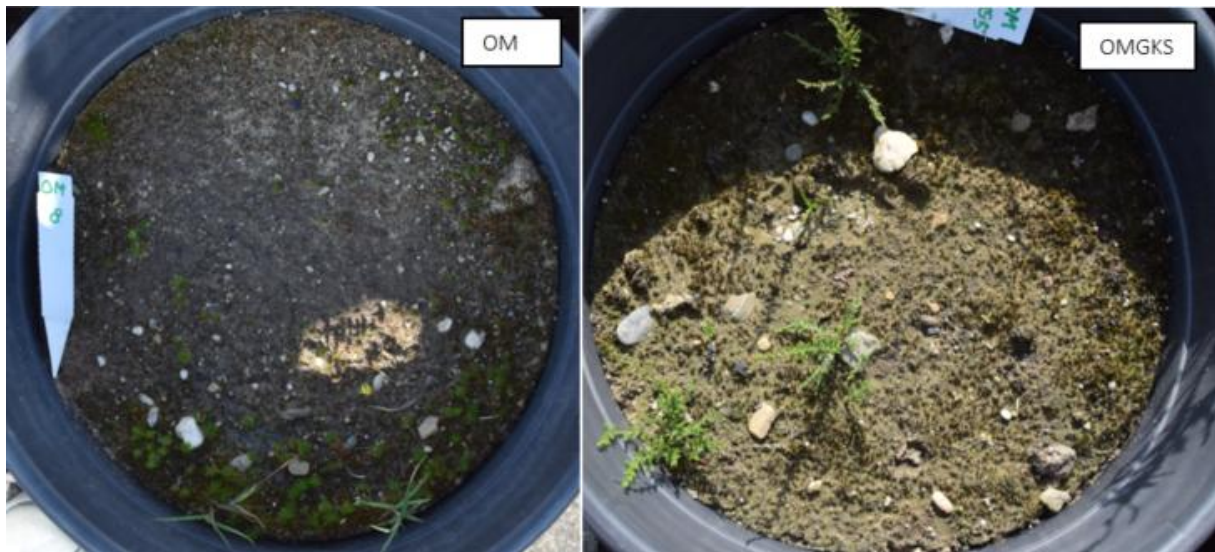
Niet verzuurd moedermateriaal

Tussen de behandeling niet verzuurd moedermateriaal en niet verzuurd moedermateriaal met toegevoegde fragmenten van grijs kronkelsteeltje zijn geen significante verschillen gevonden in bedekking van de verschillende soorten (Figuur 41) of in de dikte van de totale en de groene toplaag van grijs kronkelsteeltje



Figuur 41: Boxplots van de bedekking in het najaar van 2025 van grijs kronkelsteeltje, Strikheide, Pijpenstrootje, Overig mos, Overige soorten en totale bedekking in juni 2025 (%) per behandeling in de potten met niet verzuurd moedermateriaal als bodem. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de

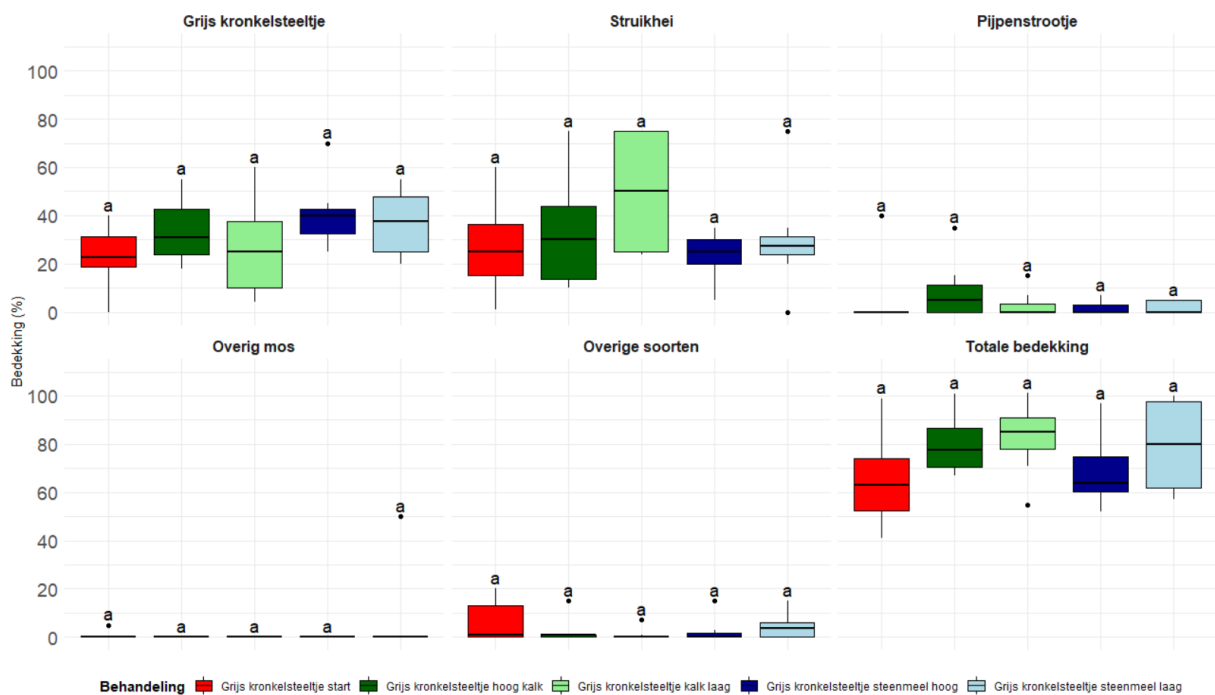
"whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).



Figuur 42: Voorbeeld overzichtsfoto's van twee potten met niet verzuurd moedermateriaal met en zonder toevoeging van grijs kronkelsteeltje-fragmenten. Er zijn geen duidelijke verschillen zichtbaar in de bedekking van grijs kronkelsteeltje.

Potten met dominante bedekking van grijs kronkelsteeltje

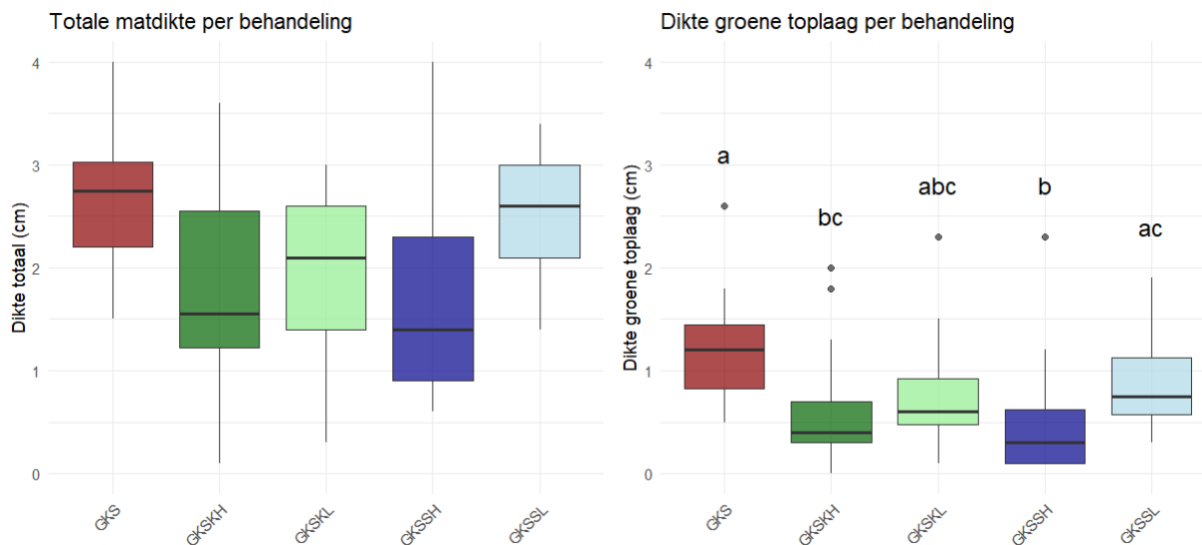
Er zijn geen significante verschillen gevonden in de bedekking van de verschillende soorten tussen de verschillende behandelingen in de potten met een dominante startbedekking van grijs kronkelsteeltje (Figuur 43)



Figuur 43: Boxplots van de bedekking in het najaar van 2025 van grijs kronkelsteeltje, Struikhei, Pijpenstrootje, Overig mos, Overige soorten en totale bedekking in juni 2025 (%) per behandeling in de potten met een dominante bedekking van grijs kronkelsteeltje aan de start van het experiment. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende

letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).

De totale dikte van de grijs kronkelsteeltje mat in de potten die bij de start van het experiment al een organische toplaag hadden van grijs kronkelsteeltje verschilt in het voorjaar van 2025 (einde experiment) niet significant tussen de behandelingen (Figuur 44). Opvallend is dat er wel significante verschillen tussen de behandelingen zichtbaar zijn als alleen gekeken wordt naar de dikte van de groene toplaag van grijs kronkelsteeltje in deze potten. Binnen de GKS-behandelingen is de dikte van de groene toplaag bij de controle (GKS) significant dikker dan bij GKS met een hoge concentratie kalk (GKSKH; $Z = 3,22$, $p = 0,013$) en bij GKS met een hoge concentratie steenmeel (GKSSH; $Z = 3,97$, $p < 0,001$). Daarnaast is de toplaagdikte bij GKSSH significant dunner dan bij GKSSL ($Z = -2,87$, $p = 0,042$).

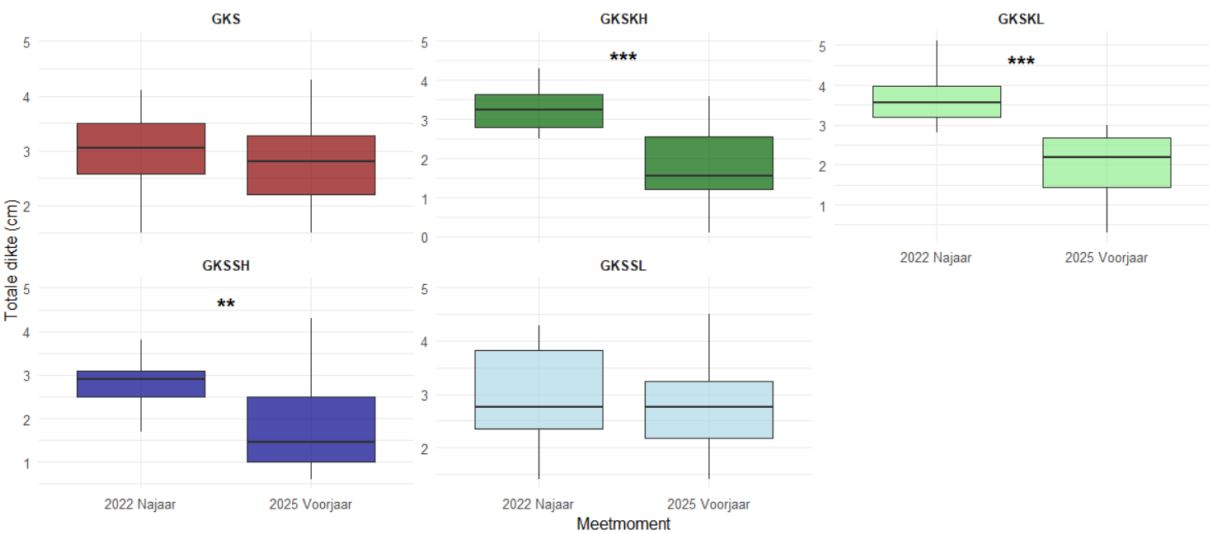


Figuur 44: Boxplots van de dikte van de totale mat (links) en groene toplaag (rechts) van grijs kronkelsteeltje in het voorjaar van 2025 per behandeling in de potten met waar grijs kronkelsteeltje dominant aanwezig was bij de start van het experiment. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$)

Terwijl de totale dikte van de mosmat in de controlegroep redelijk stabiel blijft, met kleine fluctuaties rond gemiddeld 3 cm (Tabel 5), is bij de behandelingen met steenmeel en kalk een duidelijke daling van de totale dikte te zien vanaf voorjaar 2024 en voortgezet in voorjaar 2025, vooral bij de kalkbehandelingen. Zo daalt de totale dikte bij kalk hoog van 3,22 cm (najaar 2023) naar 2,05 cm (najaar 2024) en verder naar 1,76 cm in voorjaar 2025, terwijl kalk laag van 3,01 cm naar 2,65 cm en vervolgens 2,16 cm daalt; ook steenmeel hoog vertoont een verdere afname tot 1,88 cm in voorjaar 2025. Dit suggereert dat vooral vanaf voorjaar 2024, en met duidelijk effect richting voorjaar 2025, de behandelingen het mos effectief dunner maken en mogelijk afbreken. Tussen het najaar van 2022 en het voorjaar van 2025 is de totale dikte van de grijs-kronkelsteeltje-mat in meerdere GKS-behandelingen significant veranderd: in controle behandeling bleef de totale dikte gelijk. De totale dikte nam af in de behandelingen GKSKH ($p < 0,001$), GKSKL9 ($p < 0,001$) en GKSSH ($p = 0,0127$) (Figuur 45). Voor de behandeling GKSSL werden geen significante verschillen tussen de meetmomenten gevonden.

Tabel 5: De gemiddelde dikte en standaardafwijking van de totale mat en de toplaag (levende deel) van grijs kronkelsteeltje in de potten met een dominante grijs kronkelsteeltje bedekking per behandeling gedurende de nulmeting in het najaar van 2022 en de eerste meting in het voorjaar van 2023. De grootste veranderingen over tijd zijn gemarkeerd in geel.

	Gemiddelde totale dikte (cm), najaar 2022	Gemiddelde totale dikte (cm), voorjaar 2023	Gemiddelde totale dikte (cm), najaar 2023	Gemiddelde totale dikte (cm), voorjaar 2024	Gemiddelde totale dikte (cm), najaar 2024	Gemiddelde totale dikte (cm), voorjaar 2025
Controle	3.04 (± 0.66)	3.12 (± 0.90)	2.89 (±1.11)	3.11 (±0.81)	2.79 (±0.91)	2.84 (±0.84)
Steenmeel hoog	2.86 (± 0.66)	2.76 (± 0.89)	3.21 (±0.73)	2.39 (± 0.57)	2.23 (±0.88)	1.88 (±1.16)
Steenmeel laag	2.93 (± 1.13)	3.10 (± 0.88)	3.36 (±0.68)	2.7 (± 1.06)	2.12 (±1.05)	2.80 (±0.98)
Kalk hoog	3.34 (± 0.69)	2.65 (± 0.77)	3.22 (±0.66)	1.83 (± 0.94)	2.05 (±0.95)	1.76 (±1.05)
Kalk laag	3.71 (± 0.64)	2.93 (± 0.85)	3.01 (±0.78)	1.88 (±1.10)	2.65 (±0.63)	2.16 (±1.05)



Figuur 45: Boxplots van de dikte van de totale mat grijs kronkelsteeltje in het najaar van 2025 en het voorjaar van 2025 per behandeling in de potten met waar grijs kronkelsteeltje dominant aanwezig was bij de start van het experiment. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende sterrentjes boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0.05 = *$, $p < 0.01 = **$ en $p < 0.001$)

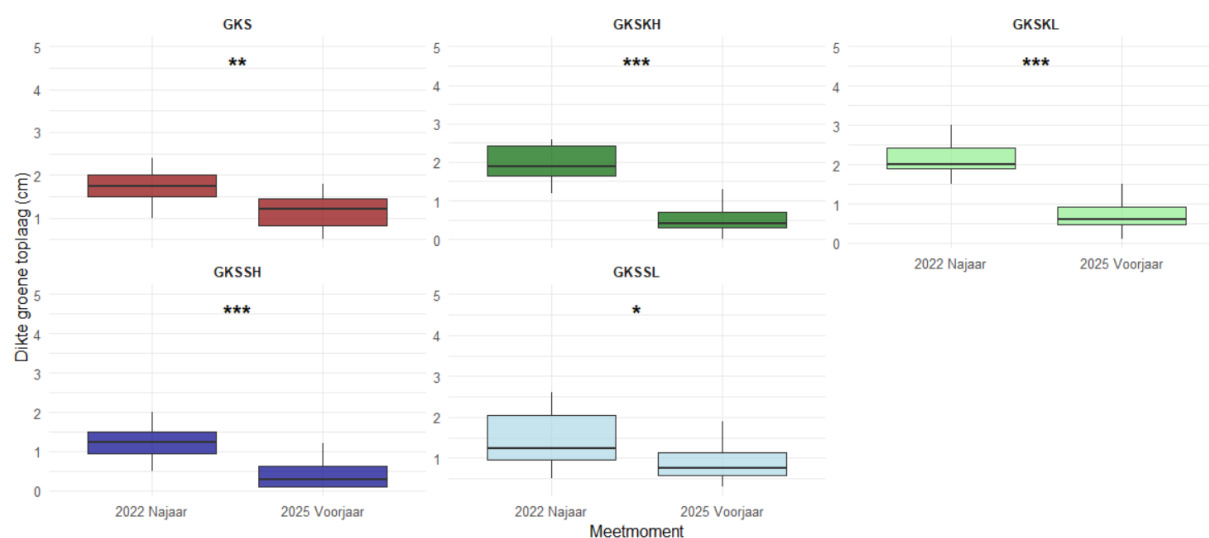
De dikte van de groene vitale toplaag vertoont een vergelijkbare trend: in de controle blijft deze relatief stabiel maar daalt wel geleidelijk van 1,71 cm in 2022 naar 1,18 cm in 2024 en 1,22 cm in voorjaar 2025 (Tabel 6). Bij de kalk- en steenmeelbehandelingen is de toplaagdikte in voorjaar 2024 en voorjaar 2025 duidelijk lager dan in de voorgaande jaren, waarbij kalk hoog en kalk laag dalen tot rond 0,63–0,78 cm en steenmeel hoog en laag vergelijkbare waarden rond 0,5–0,9 cm bereiken. Dit laat zien dat de behandelingen niet alleen de totale mosmat uitdunnen, maar ook de vitale bovenste laag aanzienlijk verminderen, wat waarschijnlijk samenhangt met de afname van grijs kronkelsteeltje bedekking die eerder werd geconstateerd. Over het geheel genomen lijken de kalkbehandelingen, vooral op hoge dosis, iets effectiever in het reduceren van mosdikte dan steenmeel, met het sterkste effect nu duidelijk zichtbaar in voorjaar 2025. Wel moet hierbij gesteld worden dat de bijbehorende standaarddeviaties van alle behandelingen relatief groot zijn (het verschil in dikte van grijs kronkelsteeltje matten binnen en tussen de plots met dezelfde behandeling is vrij groot), waardoor enige voorzichtigheid in de interpretatie nodig blijft. De verandering van de dikte van de groene toplaag van de grijs kronkelsteeltje-mat veranderde significant tussen het najaar van 2022 en het voorjaar van 2025 in alle potten met een dominante start bedekking van grijs kronkelsteeltje met uitzondering van de controle. Ook in de behandelingen GKSKH ($p < 0,001$) en GKSKL ($p < 0,001$) nam de dikte van de groene toplaag significant

af. Daarnaast waren er significante afnames in dikte in behandeling GKSSH ($p = 0,001$) en GKSSL ($p = 0,031$)(Figuur 46). Deze resultaten geven aan dat de groene top laag over de jaren duidelijk kleiner is geworden, ook bij de controle. Dit komt overeen met het beeld dat we in de potten te zien is, de kwaliteit van grijs kronkelsteeltje nam duidelijk af (Figuur 47)

In enkele met kalk behandelde potten is ook duidelijk zichtbaar dat het aanwezige grijs kronkelsteeltje afneemt in kwaliteit (lijkt af te sterven). Een duidelijk voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 13.

Tabel 6: De gemiddelde dikte en standaardafwijking van de totale mat en de top laag (levende deel) van grijs kronkelsteeltje in de potten met een dominante grijs kronkelsteeltje bedekking per behandeling gedurende de nulmeting in het najaar van 2022 en de eerste meting in het voorjaar van 2023. De grootste veranderingen over tijd zijn gemarkeerd in geel

	Gemiddelde top laag dikte (cm), najaar 2022	Gemiddelde top laag dikte (cm), voorjaar 2023	Gemiddelde top laag dikte (cm), najaar 2023	Gemiddelde top laag dikte (cm), voorjaar 2024	Gemiddelde top laag dikte (cm), najaar 2024	Gemiddelde top laag dikte (cm), voorjaar 2025
Controle	1.71 (± 0.44)	1.71 (± 0.70)	1.99 (± 0.45)	1.53 (± 0.63)	1.18 (± 0.59)	1.22 (± 0.55)
Steenmeel hoog	1.24 (± 0.40)	1.38 (± 0.77)	1.47 (± 0.58)	0.74 (± 0.43)	0.76 (± 0.61)	0.51 (± 0.58)
Steenmeel laag	1.44 (± 0.72)	1.44 (± 0.64)	2.20 (± 0.53)	1.03 (± 0.73)	0.96 (± 0.82)	0.93 (± 0.50)
Kalk hoog	2.03 (± 0.62)	1.24 (± 0.95)	2.17 (± 0.39)	0.69 (± 0.71)	0.67 (± 0.80)	0.63 (± 0.62)
Kalk laag	2.15 (± 0.42)	1.49 (± 0.69)	1.98 (± 0.35)	0.78 (± 0.73)	0.89 (± 0.73)	0.73 (± 0.54)



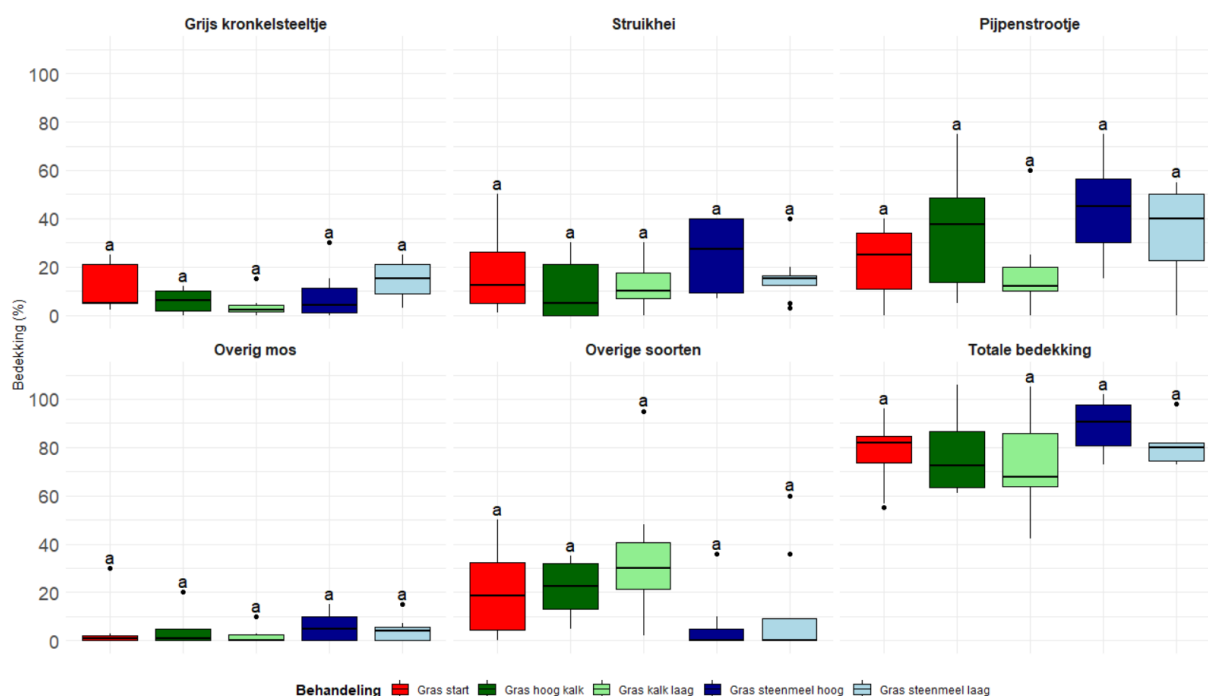
Figuur 46: Boxplots van de dikte van de groene top laag van de mat grijs kronkelsteeltje in het najaar van 2022 en het voorjaar van 2025 per behandeling in de potten met waar grijs kronkelsteeltje dominant aanwezig was bij de start van het experiment. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende sterrentjes boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0.05 = *$, $p < 0.01 = **$ en $p < 0.001$)



Figuur 47: Eén van de grijs kronkelsteeltje potten voor (najaar 2022, links) en een half jaar na (voorjaar 2023, rechts) een behandeling met een lage hoeveelheid kalk. Te zien is dat de vitaliteit van grijs kronkelsteeltje duidelijk is afgenomen over tijd.

Potten met een dominante pijpenstrootjebedekking

Er zijn geen significante verschillen gevonden in de vegetatiesamenstelling van de verschillende behandelingen in potten met een dominante pijpenstrootjebedekking in het najaar van 2025 (Figuur 48).



Figuur 48: Boxplots van de bedekking in het najaar van 2025 van grijs kronkelsteeltje, Struikhei, Pijpenstrootje, Overig mos, Overige soorten en totale bedekking in juni 2025 (%) per behandeling in de potten met een dominante bedekking van pijpenstrootje aan de start van het experiment. De middelste lijn in elke box geeft de mediaan weer; de box zelf toont het interkwartielbereik (Q1–Q3), en de "whiskers" geven de spreiding aan binnen 1,5 keer de interkwartielafstand. Verschillende letters boven de boxplots geven aan welke behandelingen statistisch significant van elkaar verschillen (post-hoc toets, $p < 0,05$).

3.2.2 Resultaten: Bodemonsters

De bodemeigenschappen zijn onderzocht in verschillende behandelingen met ondiep (OD) en diep (DP) plaggen, gecombineerd met kalk (hoog en laag) en steenmeel (hoog en laag) en niet verzuurd moedermateriaal (OM). Daarnaast zijn twee verschillende vegetatietypen meegenomen: grijs kronkelsteeltje (GKS), en grasdominante (GR) top laag ook in combinatie met dezelfde bodemverbeteraars. Een samenvatting van de belangrijkste uitkomsten van de bodemchemieanalyse is te vinden in Tabel 7 Het volledige overzicht is opgenomen in bijlage 2

De organische stofinhoud (LOI) varieert sterk tussen de vegetatietypen en diepte van plaggen. Het ongeroerde moedermateriaal (OM) vertoonde een laag organisch gehalte (LOI ~2.7%), typisch voor minerale ondergrond, terwijl de vegetatiebedekte top laag bij Grijs kronkelsteeltje en pijpenstrootje beduidend hoger was (LOI 8–22%).

De pH-waarde was in de controles laag (pH 3.0–3.9), wat wijst op zure bodemomstandigheden. Zowel kalkbehandeling met hoog en laag doseringsniveau als steenmeel verhoogden de pH, waarbij kalk duidelijk het sterkste effect had. Bij ondiep plaggen steeg de pH na hoog kalkbehandeling van 3.62 naar 4.84, en bij diep plaggen zelfs van 3.91 naar 5.86. Steenmeel gaf een meer bescheiden pH-stijging (ongeveer 0.2–0.6 pH-eenheden).

De aluminiumconcentratie was hoog in controlebehandelingen (tot 1.5 $\mu\text{mol/g}$), wat duidt op verzuurde bodemcondities. Kalkbehandelingen reduceerden aluminium tot vrijwel nul (0.03–0.07 $\mu\text{mol/g}$), terwijl

steenmeelbehandelingen slechts een gedeeltelijke reductie lieten zien. Calciumconcentraties namen sterk toe onder kalkbehandeling (tot circa 8 $\mu\text{mol/g}$), terwijl steenmeel minder effect had.

De gemeten aluminiumconcentraties in de verschillende behandelingen zijn relatief laag, meestal onder 0,1 $\mu\text{mol/g}$, wat ruim beneden de waarden ligt die als toxisch voor planten worden beschouwd (Marschner, 1995; Brady & Weil, 2008). Dit suggereert dat aluminiumtoxiteit in deze experimenten waarschijnlijk geen beperkende factor was voor plantengroei. De effecten van de kalk- en plagbehandelingen op bodemherstel zijn dan ook eerder te verklaren uit de stijging van de pH en verbetering van de Al:Ca-verhouding, en niet primair uit een reductie van aluminiumstress.

De nitraat- en ammoniumconcentraties bleven laag (<0.2 $\mu\text{mol/g}$) in alle behandelingen, wat wijst op een beperkte directe invloed op stikstofbeschikbaarheid. De P-Olsen waarden waren over het algemeen laag en veranderden weinig door de behandelingen, wat suggereert dat de kans op vermesting gering is. Mangaan en kalium vertoonden lichte variaties, waarbij kalkbehandeling leidde tot een verhoging van mangaan, passend bij de hogere pH-waarden.

Vegetatietypen met een organisch rijke toplaag (GKS en GR) hadden over het algemeen hogere organische stofgehalten en lagere pH's dan het ongeroerde moedermateriaal. Kalkbehandelingen verhoogden de pH en verbeterden de chemische condities ook in deze organische lagen, hoewel de buffering door organische stof de pH-stijging enigszins beperkte.

Diep pluggen maakt de bodems gevoeliger voor herstel door kalk, wat bleek uit hogere pH-waarden en sterkere verlaging van aluminiumconcentraties na kalkbehandeling dan bij ondiep pluggen.

Tabel 7: Overzicht van de resultaten van de belangrijkste bodemparameters van de bodemanalyse van de kweekpotten. De volledige tabel met resultaten is weergegeven in bijlage 2

Behandeling	Datum	LOI (% organische massa)	pH	Aluminium ($\mu\text{mol/g}$)	Calcium ($\mu\text{mol/g}$)	Al:Ca ratio	Nitraat ($\mu\text{mol/g}$)	Ammonium ($\mu\text{mol/g}$)	P-olsen ($\mu\text{mol/g}$)	Kalium ($\mu\text{mol/g}$)
DP (Start)	2022	4.36	3.68	1.89	0.19	9.72	0.01	0.04	0.42	0.16
DPGKS	2025	4.40	3.91	1.49	1.19	1.25	0.13	0.12	0.62	0.19
DPKH	2025	5.18	5.86	0.04	7.72	0.01	0.04	0.07	0.41	0.24
DPKL	2025	3.99	5.12	0.08	6.55	0.01	0.09	0.23	0.34	0.24
DPSH	2025	4.28	4.26	0.47	2.92	0.16	0.04	0.20	0.48	0.35
DPSL	2025	5.33	4.05	0.86	2.39	0.36	0.02	0.24	0.62	0.33
OD (Start)	2022	5.68	3.36	2.32	0.54	4.32	0.01	0.06	0.55	0.22
ODGKS	2025	6.17	3.62	1.45	2.74	0.53	0.01	0.22	0.63	0.21
ODKH	2025	6.57	4.84	0.07	7.89	0.01	0.02	0.15	0.62	0.21
ODKL	2025	5.86	4.21	0.48	7.67	0.06	0.00	0.11	0.54	0.27
ODSH	2025	7.03	3.97	0.70	4.26	0.16	0.02	0.25	0.78	0.41
ODSL	2025	6.48	3.90	0.73	4.01	0.18	0.05	0.39	0.75	0.41
OM (Start)	2022	2.22	4.02	0.99	0.06	16.69	0.01	0.08	0.31	0.12
OM	2025	2.71	4.19	0.90	1.29	0.70	0.11	0.04	0.38	0.18
OMGKS	2025	2.86	4.29	0.51	1.68	0.31	0.16	0.10	0.35	0.17
GKS	2025	11.68	3.02	1.51	3.10	0.49	0.04	0.87	1.10	0.43
GKSKH	2025	11.28	4.63	0.03	8.19	0.00	0.07	0.32	0.44	0.38
GKSKL	2025	8.59	3.44	0.55	3.74	0.15	0.03	0.86	0.63	0.38
GKSSH	2025	15.47	3.22	1.48	4.43	0.33	0.07	1.02	1.02	0.74
GKSSL	2025	8.26	3.45	0.96	2.74	0.35	0.11	1.43	0.73	0.69
GR	2025	21.80	3.24	1.23	4.63	0.27	0.46	2.17	1.38	1.11
GRKH	2025	9.65	4.25	0.14	8.12	0.02	0.07	0.32	0.72	0.54
GRKL	2025	10.99	3.57	0.77	4.06	0.19	0.07	0.61	1.26	0.38

GRSH	2025	10.00	3.83	0.50	6.21	0.08	0.09	0.34	0.70	1.01
GRSL	2025	14.97	3.39	1.62	3.18	0.51	0.15	1.20	1.02	0.76

3.3 Discussie & conclusie kweekexperiment

De resultaten laten zien dat kalkuitstrooiing op zowel diep als ondiep geplagde bodems de groei van grijs kronkelsteeltje effectief beperkt, waarbij zelfs een lage hoeveelheid kalk al zichtbaar effect geeft. Steenmeel vertoont een vergelijkbaar effect, hoewel de impact iets trager optreedt en vooral bij hogere concentraties significant is voor de dikte van de groene toplaag. Een voordeel van steenmeel ten opzichte van kalk is dat de pH minder snel stijgt, wat gunstiger is voor het overige bodemleven. Kalk of steenmeel uitstrooien zonder plaggen helpt ook bij het terugdringen van grijs kronkelsteeltje; kalk werkt hierbij sneller en effecten zijn al na één jaar duidelijk, terwijl steenmeel geleidelijker effect sorteert. Deze bevindingen zijn consistent met eerdere observaties van Weijters et al., (2023) en met studies waarin pH-verhogende behandelingen vooral de mosdikte en kwaliteit beïnvloeden, zonder de vegetatiesamenstelling drastisch te veranderen (Van der Heijden et al., 2015).

In de overige vegetatie werd nauwelijks effect van de behandelingen waargenomen. De bedekking van pijpenstrootje, struikhei en overige kruiden bleef grotendeels onveranderd, terwijl houtige opstanden zoals berk en pilzeggen dominant waren. Dit wijst op een beperkte zaadbank voor typische kruidensoorten in zowel geplagde als ongeplagde bodems, waardoor herstel van soortenrijke heidevegetaties mogelijk vertraagd verloopt. Ook viel op dat de grijs kronkelsteeltje-mat in de potten drie jaar na plaggen nog relatief dun was; het duurt blijkbaar langer voordat deze soort dichte matten vormt die kieming van andere soorten effectief kunnen beperken. Ondanks de lage pH in de onderzochte bodems zijn de gemeten aluminiumwaarden relatief laag en waarschijnlijk niet toxisch voor planten. Aluminium is vaak gebonden aan organisch materiaal en kleimineralen, waardoor het in oplosbare vormen voorkomt en weinig beschikbaar is voor wortels (Marschner, 1995; Brady & Weil, 2008). De gemeten Al-concentraties lagen in de meeste behandelingen onder 0,1 µmol/g, ruim beneden de waarden die als toxisch worden beschouwd. , dit verklaard dus niet waarom er geen heide typische kruiden opkomen. Aluminiumstress lijkt daarmee geen directe beperkende factor voor de vegetatieontwikkeling in dit experiment, terwijl effecten van kalk- en plagbehandelingen vooral te verklaren zijn uit stijging van de pH en verbetering van de Ca:Al-verhouding, en niet uit een reductie van aluminiumtoxiteit.

Samengevat suggereren de resultaten dat voor het terugdringen van grijs kronkelsteeltje en het verbeteren van bodemcondities pH-verhogende behandelingen zoals kalk en steenmeel effectief kunnen zijn, terwijl de ontwikkeling van een volledige soortenrijke vegetatie beperkt wordt door de afwezigheid van een zaadbank. Het herstellen van heidevegetaties zal daarom waarschijnlijk meerjarige monitoring en mogelijk aanvullende maatregelen vereisen, zoals inbreng van zaad of plantmateriaal van gewenste soorten.

4. Overkoepelende discussie en vervolg

Terugkomen op de volgende onderzoeksvragen:

1) Bij welke bodemdiepte wordt de vegetatie binnen korte tijd na plaggen sterk door ongewenste soorten zoals Grijs kronkelsteeltje gedomineerd (vermossing)?

De resultaten laten zien dat grijs kronkelsteeltje zich vooral snel vestigen op oppervlakkig geplagde bodems, waar de organische laag slechts deels is verwijderd. In diepe plagbehandelingen ontstaat deze dominantie ook maar iets minder uitgesproken in de eerste jaren. Op onverzurd moedermateriaal (diepe bodem) is de ontwikkeling van grijskronkelsteeltje het minst. Duidelijk is dat grijs kronkelsteeltje na 3 jaar na plaggen nog nergens echt dominante matten heeft gevormd. Dit komt door een lage beschikbaarheid van N en P. Het duurt dus langer voor daar sprake van is.

In alle gevallen was de soortenrijkdom laag, met slechts enkele algemene heidesoorten, wat laat zien dat de zaadbank van typische kruiden beperkt is en de vestiging van gewenste soorten traag. Daarnaast laat de bodemchemiedata zien dat de bodem arm is aan nutriënten en stikstof. Maar dat er ondanks de lage pH in elk geval geen sprake is van aluminium toxiciteit (aluminium is uitgespoeld).

2) Is vermossing op deze bodems tegen te gaan door de bodem te bekalken of door steenmeel toe te passen?

Kalk en steenmeel blijken effectief in het terugdringen van grijs kronkelsteeltje, zowel op diep geplagde als ondiep geplagde bodems. Kalk werkt relatief snel en zichtbaar al na één jaar, terwijl steenmeel vooral bij hogere concentraties effect sorteert en trager werkt. Een voordeel van steenmeel is dat het de pH minder snel verhoogt, wat gunstiger is voor het bodemleven. De effecten zijn voornamelijk zichtbaar op de dekking van grijs kronkelsteeltje; de overige vegetatie reageerde nauwelijks op de behandelingen, wat aansluit bij eerdere bevindingen dat pH-verhoging vooral de mosdikte en -chemie beïnvloedt.

Met name in het veld was ook duidelijk te zien dat kalk toevoegen een sterk effect heeft op ongeplagde bodems die gedomineerd worden door kronkelsteeltje. De dichte mat die aanwezig was aan het begin van het onderzoek, was vrijwel geheel verdwenen aan het einde. De pH steeg ook sterk in de bodem. Er was geen herstel zichtbaar van typische heidevegetatie. Zeer lokaal leidde het verdwijnen van grijs kronkelsteeltje tot open bodem wat gunstig kan zijn voor bodembewonende fauna. Echter op de meeste plekken, bleef een laag van afgestorven kronkelsteeltje achter. Door handmatig op kleine schaal weg te halen verbeteren de omstandigheden voor bodemfauna sterk.

3) Is de ontwikkeling van soortenrijke Droge heide te faciliteren door een groot deel van de organische bodem af te voeren (plaggen) of juist niet af te voeren (niet of ondiep plaggen)? Wellicht in combinatie met het verbeteren van de bodemkwaliteit (met kalk of steenmeel) en het inbrengen van heidezaad en –strooisel?

Plaggen is een ingrijpende maatregel die zowel nutriënten als belangrijke componenten van het bodemleven en de zaadbank verwijdert. Hoewel het tijdelijk een verminderde dominantie van grijs kronkelsteeltje kan bewerkstelligen, blijft de vestiging van typische heidesoorten beperkt gebrek aan zaadbank. Bovendien keert grijs kronkelsteeltje weer terug. Resultaten van dit experiment laten zien dat oppervlakkig of ondiep plaggen, in combinatie met kalk of steenmeel, een balans kan bieden tussen het verminderen van ongewenste soorten en het behoud van bodemkwaliteit. Inzaai van zaden van

typische heidekruiden kan mogelijk de soortenrijkdom verhogen, maar succes hangt af van de geschiktheid van de bodem en de aanwezigheid van microsites waar kieming kan plaatsvinden.

4) Afgaande op vraag 1 t/m 3: Hoe kan de kwaliteit van de Droge heide op de Regte Heide het beste hersteld worden? Welke, eventuele combinatie van, maatregel(en) is hier het meest efficiënt?

Op basis van de resultaten lijkt een gefaseerde en geïntegreerde aanpak het meest efficiënt:

Beperkt of ondiep plaggen om vermossing en vergrassing te verminderen, maar de bodemstructuur en zaadbank zoveel mogelijk te behouden.

- Gerichte (niet te snelle) pH-verhoging met kalk of steenmeel om de groei van grijs kronkelsteeltje te beperken, waarbij steenmeel de pH geleidelijker verhoogt en het bodemleven minder verstoort. En dit dan vooral op kleine schaal
- Eventuele verwijdering of openbreken van de organische laag van dood grijs kronkelsteeltje om microsites voor kieming van kruiden en insecten terug te winnen.
- Inzaai van typische heidekruiden en strooisel om de soortenrijkdom te verhogen en zaadbeperving te ondervangen.

Gezien het feit dat herstel van soortenrijke droge heide vaak pas na vijf tot tien jaar zichtbaar wordt (Weijters et al., 2023), is het raadzaam het experiment te verlengen en zorgvuldig te monitoren voordat gebiedsgrote opschaling wordt overwogen. Een verlenging biedt ook de mogelijkheid om lange termijn effecten van kalk en steenmeel, interacties met de organische laag en de terugkeer van fauna te onderzoeken.

De resultaten van dit onderzoek leveren kennis op voor terreinbeheerders in andere droge heidegebieden in Nederland. Let wel, het succes van maatregelen is afhankelijk van lokale omstandigheden, zaadbankkwaliteit en de combinatie met aanvullende herstelmaatregelen zoals bekalking of een steenmeeltoepassing. Het voortzetten en eventueel uitbreiden van het huidige experiment — ook naar andere natuurgebieden met verschillende bodemtypen — kan inzicht geven in hoe robuust de waargenomen patronen zijn en welke beheerstrategieën het meest kansrijk zijn voor duurzaam herstel van soortenrijke droge heide.

Aanbevelingen voor beheer:

Voor het beheer van de Regte Heide lijken bodembehandelingen met lage concentraties kalk of steenmeel geschikt om de mat van grijs kronkelsteeltje af te laten sterven, zonder de bodem drastisch te verstoren. Hoge kalkdoseringen leiden tot te snelle en te grote pH-stijgingen, wat kan resulteren in overgroei door pijpenstrootje en verstoring van het bodemleven. Steenmeel heeft het voordeel van een geleidelijke pH-verhoging en stimuleert daarnaast korstmossen, wat bijdraagt aan de biodiversiteit. De werking van steenmeel is echter traag en de effecten van deze bodemverbeteraar zijn daardoor nog niet volledig vastgesteld gedurende dit project.

Enige terughoudendheid is nog op zijn plaats aangezien er nog geen herstel is opgetreden van kenmerkende kruiden en er na het afsterven van grijs kronkelsteeltje een laag organisch materiaal achterblijft. Vandaar dat we hieronder adviseren maatregelen te toetsen om deze knelpunten op te lossen en de monitoring voort te zetten.

Voor een effectief herstel van heidevegetatie is het daarnaast noodzakelijk om zaad van karakteristieke kruiden in te brengen, open microsites te creëren en de vegetatie langdurig te monitoren.

Aanbevelingen voor vervolg:

Omdat effecten van de genomen maatregelen, zoals aanbrengen van steenmeel, waarschijnlijk nog onvoldoende tijd hebben gehad om zich te manifesteren, adviseren we om de metingen aan mospakket, vegetatie en bodem- en plantchemie voort te zetten. Overwogen kan worden om deze uit te breiden met bodemleven, zoals schimmels en bodemfauna.

Aangezien het ontbreken van een zaadbank en achtergebleven resten van grijskronkelsteeltje nog onopgeloste knelpunten zijn, adviseren we om op kleine schaal te testen of uitstrooien van zaden van kruiden en verwijderen van afgestorven mos leidt tot toename van kenmerkende heideflora en –fauna.

Dankwoord

Dit onderzoek is mogelijk gemaakt dankzij een subsidie uit Natura2000/PAS het subsidieprogramma van de Provincie Noord-Brabant (Subsidie C2338128/5977452), en met eigen bijdrage van Brabants Landschap.

Jeroen van Oosterhout en Wim de Jong van het Brabants Landschap danken wij voor de prettige samenwerking, hulp in het veld en het verlenen van betredingsvergunningen voor de uitvoering van het onderzoek op terreinen van het Brabants Landschap.

Dit onderzoek kon niet worden uitgevoerd zonder de medewerking en hulp van vele collega's en studenten in het veld. Aan iedereen die heeft bijgedragen; hartelijk bedankt!

Referenties

- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1996). The nature and properties of soils.
- Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants—Academic Press Inc. LTD London, 279-287.
- Natura 2000. (2008). Droge Europese heide (H4030). https://www.natura2000.nl/sites/default/files/profielen/Habitattypen_profielen/Profiel_habitattype_4030.pdf geraadpleegd op 24-02-2021
- Natura 2000 (2021). Regte Heide & Riels Laag. <https://www.natura2000.nl/gebieden/noordbrabant/regte-heide-riels-laag/regte-heide-riels-laag-gebiedsanalyse> (Geraadpleegd op 26-01-2021)
- R.F. van der Burg, L. J. L. v. d. B., A.A.M. Kieskamp, J.H. Bouwman, A.T.M. Eysink, M.A.P. Horsthuis, F. Meijer, M. Nijssen, D. Thomassen. (2019). Toelichting op de Maatregelenkaarten voor biodiversiteit en leefgebieden in Noord-Brabant. *Bosgroep Zuid Nederland*.
- Sierdsema H., V. J., Bobbink R. & L. van den Bremer. (2013). Advies beheer Regte Heide. Sovon-rapport 2013/33. Sovon Vogelonderzoek Nederland, Nijmegen.
- Smits, N. A. C., Beije, H. M., J.J. Vogels., & R.W. de Waal. (2014). Herstelstrategie H4030 Droge heiden. Natura 2000-gebieden.
- Sparrius, L. B., & Kooijman, A. M. (2012). Lange-termijneffecten van een invasie van Grijs kronkelsteeltje: in kustduinen en stuifzanden. *dare.uva.nl*.
- Van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., & van Straalen, N.M. (2015). Soil biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46, 123–147.
- Van Veenhuisen, L.S., Kleef, H., & van der Loop, J. (2022). Systeemgericht herstel van Droge heide in het Natura 2000-gebied Regte Heide, Noord-Brabant. Subsidie verzoek Provincie Noord-Brabant
-
- Vogels, J.J. (2025). Out of balance – A stoichiometric perspective on heathland biodiversity loss. PhD Thesis, Radboud University Nijmegen, The Netherlands
- Weijters, M., Bohnen-Verbaarschot, E., Vogels, J., Smits, L., Van de Riet, B., Siepel, H., Verbruggen, E., Emsens, W., Brouwer E., en Bobbink, R. 2023. Herstel van droge- en vochtige heide door middel van silicaatmineralen (steenmeel). Resultaten van negen jaar steenmeelonderzoek. Rapportnummer OBN-2019-109-DZ Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE), Driebergen

Bijlage 1: Toegepaste chemische analyses van de bodem

Vochtpercentage, organische stofconcentratie en bodemdichtheid

Om het vochtgehalte van het verse bodemmateriaal te bepalen werd het vochtverlies gemeten door bodemmateriaal in duplo af te wegen in aluminiumbakjes. De bakjes werden precies tot aan de rand afgevuld (volume = 40,5 ml), zodat de soortelijke massa van de bodem kan worden bepaald. De bodems werden gedurende minimaal 48 uur gedroogd in een stoof bij 60°C. Vervolgens werd het bakje met bodemmateriaal opnieuw gewogen en werd het vochtverlies berekend. De fractie organisch stof in de bodem werd berekend door via het gloeiverlies bepaald. Hiertoe werd gedroogd bodemmateriaal gedurende 4 uur verast in een oven bij 550°C. Na het uitgloeien werd het bakje met bodemmateriaal weer gewogen en werd het gloeiverlies berekend. Het gloeiverlies komt bij benadering overeen met het gehalte aan organisch materiaal in de bodem.

Olsenextractie

Aan de hand van een Olsen-extractie kan de concentratie plantbeschikbaar fosfaat worden bepaald (Olsen et al., 1954). Hiertoe werd aan 3 gram fijngemalen droog bodemmateriaal 60 ml 0,5 mol l⁻¹ natriumbicarbonaat (NaHCO₃) toegevoegd. De pH van het extractiemedium werd op pH 8,5 gesteld met behulp van NaOH. Gedurende 30 minuten werden de monsters uitgeschud op een schudmachine (105 rpm) waarna het supernatant onder vacuüm werd verzameld met behulp van teflon poriewaterbemonsteraars. Het extract werd bewaard bij 4 °C tot verdere analyse op de ICPOES.

Water- en Zoutextractie

Met een water- en zoutextractie kunnen de vrij in de bodem aanwezige ionen of de zoutuitwisselbare ionen bepaald worden. Hiervoor werd 17,5 gram verse bodem met 50 ml zoutextract (0,2 mol l⁻¹ NaCl) of 50 ml demiwater gedurende 2 uur geschud op een schudmachine bij 105 rpm. De pH werd gemeten met een HQD pH-electrode. De extracten werden gefilterd met 135 behulp van rhizons. Voor analyse op de ICP-OES werd een deel van het filtraat aangezuurd met salpeterzuur (eindconcentratie 1%) en bewaard bij 4 °C tot verdere analyse. Voor analyse op de autoanalyzers werd niet-aangezuurd filtraat bewaard bij -18 °C tot verdere analyse.

C/N-analyse bodemmateriaal

Voor de analyse van de totale hoeveelheid koolstof en stikstof werd een deel van het verzamelde bodemmateriaal fijngemalen in een kogelmaler. Afhankelijk van het soortelijk gewicht van het materiaal en de verwachte concentraties, werd een kleine hoeveelheid (3-40 mg) van het gemalen materiaal in een tinnen container afgewogen, waarna het in een CNS-elementenalyzer (Vario Micro Cube, Elementar) werd geanalyseerd.

Elementenanalyse (ICP en auto-analysers)

De concentraties calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), ijzer (Fe), mangaan (Mn), fosfor (P), zwavel (S), silicium (Si) en zink (Zn) werden bepaald met behulp van een Inductively Coupled Plasma Spectrofotometer (ARCOS MV of GREEN DUO, Spectro, Kleve, Duitsland). De concentraties nitraat (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺) en fosfaat (PO₄³⁻) werden colorimetrisch bepaald met een Seal autoanalyser III met behulp van resp. salicylaatreagens, hydrazinesulfaat en ammoniummolybdaat/ascorbinezuur. Chloride (Cl) werd colorimetrisch bepaald met een Seal autoanalyser III systeem met behulp van

mercuritiocyanide. Natrium (Na^+) en kalium (K^+) werden vlamfotometrisch bepaald met een Sherwood Model 420 Flame Photometer.