

Bodemverdichting door houtoogst op Noord-Brabantse zandgronden

Onderzoek naar de invloed van de aanleg van en het gebruik van permanente dunningspaden met bosbouwmachines met behulp van de Steady Speed-No Impact Penetrologger



door
Stijn Verhoeven

Colofon:

Opdrachtgever:	Staro Natuur en Buitengebied & Lectoraat Duurzaam bosbeheer
Titel:	Bodemverdichting door houtoogst op Noord-Brabantse zandgronden
Ondertitel:	Onderzoek naar de invloed van de aanleg en het gebruik van permanente dunningspaden met bosbouwmachines met behulp van de Steady Speed-No Impact Penetrologger
Status:	Eindversie
Datum:	8 januari 2024
Auteur:	Stijn Verhoeven
Begeleidend docent:	Harrie Schreppers
Externe begeleider:	Daniël Joppe (Staro Natuur en Buitengebied)
Lector:	Ute Sass-Klaassen (Bos- en Natuurbeheer)
Opleiding:	Bos- en Natuurbeheer
Major:	Beheer Bos en Natuur
Onderwijsinstelling:	Hogeschool Van Hall Larenstein

Afbeelding titelpagina: Stijn Verhoeven

Alle afbeeldingen in dit rapport zijn gemaakt door de auteur, tenzij anders vermeld

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerrapport “Bodemverdichting door houtoogst op Noord-Brabantse zandgronden”. Het rapport is het product van mijn afstudeerperiode voor de opleiding Bos- en Natuurbeheer aan Hogeschool Van Hall Larenstein, welke ik in september 2019 ben gestart.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Staro Natuur en Buitengebied en lectoraat Duurzaam bosbeheer van Hogeschool Van Hall Larenstein. Voor Staro Natuur en Buitengebied staat het onderzoek te boek als vervolgonderzoek naar aanleiding van een voorgaand onderzoek uitgevoerd tot 2020 door Peter Kappert.

Graag wil ik mijn opdrachtgever en begeleider Daniël Joppe bedanken voor de uitstekende begeleiding tijdens de uitvoering van het onderzoek. Dankzij Daniël Joppe is het gelukt de problematiek helder te krijgen en zijn geschikte veldwerkmethoden uitgekozen voor de uitvoering van het onderzoek.

Ook wil ik Harrie Schreppers, mijn begeleider vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein, bedanken voor de gesprekken boordevol feedback en suggesties tijdens de planfase waardoor ik mijn onderzoek goed heb uit kunnen voeren.

Verder wil ik lector Ute Sass-Klaassen bedanken voor de feedback die ik heb ontvangen op mijn projectplan waardoor het schrijven van mijn afstudeerrapport in goede banen is geleid. Bovendien wil ik Ute Sass-Klaassen en Linar Akhmetzyanov bedanken voor de brainstormsessies en de e-mailgesprekken waarin de keuze voor statistische methodiek is gekozen en specifiek nogmaals Linar Akhmetzyanov voor de hulp die ik heb gekregen bij het uitvoeren van de analyse.

Een speciaal dankwoord gaat uit naar Wietse de Vries, mede-afstudeerder bij Staro Natuur en Buitengebied, met wie ik het afgelopen halfjaar een kantoor heb gedeeld. Doordat Wietse de Vries en tegelijkertijd in hetzelfde onderwerp onderzoek deden, konden we samen praten over het onderwerp en elkaar ondersteunen bij de uitvoering.

Bovendien wil ik Erik van der Staak van Staro Natuur en Buitengebied bedanken voor de gelegenheid om bij Staro te kunnen afstuderen en voor het beschikbaar stellen van gegevens en middelen.

Ten slotte wil ik Dries Bierens bedanken voor de ondersteuning in het veldwerk. Dries Bierens heeft mij uitleg gegeven over het gebruik van de apparatuur en heeft de uitvoering van het onderzoek logistiek gezien mogelijk gemaakt.

Met dit voorwoord wil ik iedereen bedanken die een bijdrage heeft geleverd aan de totstandkoming van dit rapport. Ik heb het afgelopen halfjaar als zeer leerzaam ervaren en kijk ernaar uit om met mijn rapport een bijdrage te leveren aan het werkveld in bosbouwsector.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Stijn Verhoeven
Veldhoven, januari 2024

Samenvatting

Houtoogst heeft een langdurige invloed op bodemverdichting en daarmee indirect op andere abiotische en biotische eigenschappen van een bos. Hoewel de effecten van houtoogst op bodem en milieu veelvuldig in beeld zijn gebracht is de grootte van de invloedssfeer van zware machines op de verdichting van de bosbodem nog nooit tot in detail onderzocht. Staro Natuur en Buitengebied heeft daarom opdracht gegeven voor de uitvoering van een onderzoek die deze invloedssfeer in kaart brengt. Hiervoor is gebruik gemaakt van de volgende onderzoeks- en deelvragen:

Wat is de invloedssfeer op bodemverdichting van het berijden door zware machines op dunningspaden in bossen op zandgrond?

1. *Hoe verloopt de indringingsweerstand in een onverstoord bodemprofiel tot 80 centimeter diepte?*
2. *Hoe verloopt de indringingsweerstand in een bodem van 0 tot 500 centimeter van het hart van een dunningspad tot 80 centimeter diepte?*
3. *Wat is het verschil tussen de indringingsweerstand op dieptes van 0 tot en met 80 centimeter onder maaiveld van onverstoorde bodemprofielen en bodemprofielen van 0 tot en met 500 centimeter afstand van het hart van een dunningspad?*

Om de deelvragen te beantwoorden is er een uitgebreid veldonderzoek uitgevoerd. In dit veldonderzoek zijn dwarsdoorsneden gemaakt van onaangetaste bodems en bodems onder permanente dunningspaden in haarpodzolbodems in gemeente Bergeijk. Deze doorsneden zijn gemaakt met behulp van de SSNIP, een armatuur waarmee met de penetrologger van Royal Eijkelpark met een constante snelheid indringingsweerstandsmetingen tot 80 centimeter diepte gedaan worden.

Aan de hand van de gesorteerde gegevens uit het veldonderzoek is een gegevensanalyse uitgevoerd waarbij deelvraag 1 en 2 beantwoord zijn aan de hand van gemiddelden per diepte per meetlocatie. Een variantieanalyse is gebruikt om het verschil tussen waarden van verschillende meetlocaties met elkaar te vergelijken. Zodoende is deelvraag 3 beantwoord.

Uit de resultaten is gebleken dat in onverstoorde bodemprofielen de indringingsweerstand geleidelijk toeneemt naarmate er dieper wordt gemeten (deelvraag 1). Onder het dunningspad werden op afstanden van 60 tot 160 centimeter van het hart van het dunningspad, precies onder de rijwielen, hogere indringingsweerstand gemeten, vooral op diepten van 10 tot 30 centimeter onder het oppervlak. Op 0 tot 20 centimeter en vanaf 180 centimeter was dit soms het geval, maar deze verdichting kon niet verklaard worden door het berijden van de bodem met zware machines (deelvraag 2). De indringingsweerstand is significant hoger op de afstanden van 40 tot 160 centimeter van het hart op de meeste diepten en op sommige diepten verder van het hart van het dunningspad op opgeschijnd willekeurige locaties (deelvraag 3).

Aan de hand van de antwoorden op de deelvragen en literatuuronderzoek is de conclusie dat de invloedssfeer van houtoogst klein is, namelijk alleen onder de rijwielen. Hier veranderen lokaal de abiotische eigenschappen en daarmee ook de biotische eigenschappen, maar er is geen sprake van een groot effect op bosopstanden en grotere organismen ondervinden geen hindering qua ruimte door houtoogst.

De bosbouwsector kan door dit onderzoek betere keuzes maken in de methoden die gekozen worden bij houtoogst, zodat dit zo duurzaam mogelijk wordt uitgevoerd. Het gebruik van permanente dunningspaden wordt aanbevolen, mits deze sporadisch zijn aangelegd.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	3
Samenvatting.....	4
1. Inleiding.....	7
1.1 Maatschappelijk kader	7
1.1.1 Abiotische effecten.....	8
1.1.2 Biotische effecten	9
1.1.3 Herstelproces.....	10
1.2 Wetenschappelijk kader	11
1.3 Problematiek	12
1.3.1 Onderzoeksvraag	16
1.3.2 Deelvragen.....	16
1.4 Bijdrage aan duurzaamheid.....	17
1.5 Doelstellingen	18
1.6 Randvoorwaarden en afbakening.....	18
1.7 Leeswijzer	19
2. Methode.....	20
2.1 Voorbereidend werk.....	21
2.1.1 Methodiek	21
2.1.2 Onderbouwing.....	21
2.2 Gegevens verzamelen.....	21
2.2.1 Methodiek	21
2.2.2 Onderbouwing.....	25
2.3 Gegevens analyseren.....	25
2.3.1 Methodiek	25
2.3.2 Onderbouwing.....	27
3. Resultaten.....	28
3.1 Boxplots	28
3.2 Resultaten per deelvraag.....	32
3.3 Discussie	44
4. Conclusies.....	46
4.1 Antwoorden deelvragen.....	46
4.2 Antwoord onderzoeksvraag.....	47
4.3 Aanbevelingen	48
4.4 Reflectie op bijdrage aan duurzaamheid	48
Bronvermelding	50

Bijlage 1 – Alle doorsneden onaangetaste bodem	54
Bijlage 2 – Alle doorsneden dunningspaden	65
Bijlage 3 – Resultaten, discussie en conclusie per centimeter	76
Bijlage 4 – Detailzaken methodiek	119

1. Inleiding

Al duizenden jaren is hout een belangrijke grondstof voor de mens. Het wordt gebruikt in de bouw, voor meubels, voor gebruiksvoorwerpen en in de industrie. Het hout dat we gebruiken is afkomstig uit het bos: de houtfabriek. Hoewel er veel hout wordt geïmporteerd, zoals de 4,6 miljoen kuub bouwhout per jaar (Probos & Centrum Hout, 2023), is de binnenlandse bijdrage aan houtproductie niet te verwaarlozen.

Met de jaren is de Nederlandse houtproductie van karakter veranderd. Dit werd veroorzaakt door de verandering in de gebruiksdoeleinden van het hout. Hakhoutbossen maakten plaats voor bossen waarin zeer efficiënt op dikke, rechte stammen werd beheerd. Gebruikte technieken zijn hier ook mee veranderd. De handmatige houtvelling verdween en maakte plaats voor de harvester en de forwarder verving het paard en de tractor (Ampoorter et al., 2010). Het gewicht van de harvesters die in Nederland gebruikt worden, bedraagt gemiddeld 12 tot 15 ton en een volgeladen forwarder kan tot wel 30 ton wegen (Ampoorter et al., 2010).

Later werd ook de "vrije kuur" voor bestuurders van deze machines ingeruild voor een vooropgezet plan met permanente paden. Waar deze permanente dunningspaden zijn aangelegd mogen machines alleen nog maar op deze paden rijden, en niet meer kriskras door het bos (Potvliet en Delforterie, 2016). De paden zijn ongeveer vier meter breed, er moeten immers grote machines rijden, en liggen op een afstand van 10 tot 20 meter van elkaar. Het gebruik van permanente dunningspaden zorgt voor een verminderde impact op het bos, maar daarentegen kan het wel het natuurlijke karakter van een bos aantasten. Het idee van permanente dunningspaden is niet nieuw, Adams en Froehlich (1981) en Froehlich et al. (1981) melden in de jaren 1980 al de eerste uitgewerkte methoden om permanente dunningspaden aan te leggen in en geven een uitgebreide uitleg van de (positieve) gevolgen. In de 21^e eeuw wordt de aanleg en het gebruik van permanente dunningspaden steeds meer aangemoedigd, omdat het effect van houtoogst maatschappelijk een steeds belangrijker thema is geworden. In het Vlaamse Natuurrapport 2005 wordt houtexploitatie nog een bedreiging voor de bosbodem genoemd, met het gebruik van permanente dunningspaden als belangrijkste maatregel (De Maeyer et al., 2005). Nemestothy (2009) en Parajuli et al. (2022) wijzen naast het belang van permanente dunningspaden ook op de mogelijkheid om bredere banden te gebruiken en op het gebruik van hout dwars over dunningspaden om zo de druk die wordt uitgeoefend te verdelen. Het hout dat hiervoor gebruikt kan worden is het tak- en top hout. De bescherming die dit hout levert, is afhankelijk van het aantal passages met de machines, het vochtgehalte en het bodemtype (Crawford et al., 2021). Bovendien heeft de dikte van het hout invloed op de effecten. Dikker hout heeft een kleinere kans op breken, waardoor het gewicht van machines over een groter oppervlak verdeeld blijft, waardoor de bescherming beter is (Han et al., 2006). Ook een grotere hoeveelheid banden of het gebruik van rupsbanden vermindert de druk op de bodem (VBNE, 2020).

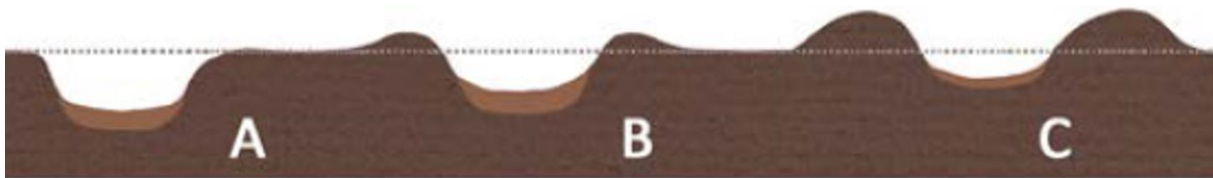
1.1 Maatschappelijk kader

De bodem zelf, maar ook flora en fauna dat in de bodem leeft of afhankelijk is van de bodem, ondervindt gevolgen van het berijden met zware machines (Ampoorter et al., 2010). Hieruit valt onderscheid te maken tussen abiotiek en biotiek. De veranderingen in de abiotiek zijn een direct effect van houtoogst. De biotische veranderingen die optreden ten gevolge van houtoogst zijn indirect, omdat deze alleen veranderen omdat de biotiek is veranderd. Na verdichting is het echter de biotiek die invloed uitoefent op de abiotiek tijdens het bodemherstelproces.

1.1.1 Abiotische effecten

Het berijden van de bosbodem met machines heeft invloed op de abiotische eigenschappen van de desbetreffende bodem. Deze abiotische aantasting kan op verschillende manier plaatsvinden (Ampoorter et al., 2010).

- 1- Bodemverwonding: de bovenste lagen van de bodem worden omgewoeld waardoor diepere lagen naar boven worden gehaald en organisch materiaal juist dieper terechtkomt.
- 2- Bodemverdichting: de bulkdichtheid (gewicht per volume) en de indringingsweerstand worden groter. Dit wordt veroorzaakt door de afname van het poriënvolume. Ten gevolge van het kleinere poriënvolume veranderen ook de hydraulische bodemeigenschappen; het watervasthoudend vermogen neemt toe en daarmee ook het hydraulische geleidingsvermogen. Bovendien verandert de mate waarin er gasuitwisseling plaats kan vinden tussen bodem en atmosfeer. Koolstofdioxide blijft hierbij in de bodem aanwezig terwijl er een tekort van zuurstof optreedt. Chemische bodemprocessen worden hierdoor aangetast en daarmee ook de bodemvruchtbaarheid.
- 3- Spoorvorming: de draagkracht van de bodem wordt overschreden. De draagkracht van een bodem is lager in vochtige bodems. Dit houdt in dat er sneller spoorvorming optreedt wanneer houtoogst plaatsvindt in of vlak na een regenachtige periode. Spoorvorming kan op drie verschillende manieren plaatsvinden (zie ook figuur 1).
 - A. Omlaag: er vindt bodemverdichting plaats.
 - B. Zijwaarts en omlaag: er vindt bodemverdichting plaats, maar er zijn ook bodemdeeltjes die zijwaarts verschuiven (bodemvervorming).
 - C. Zijwaarts en omhoog: naast de rijsporen ontstaan bultjes (bodemvervorming), maar onder het wielspoor vindt geen verdichting plaats.



Figuur 1, dwarsdoorsnede door een bodemprofiel van een dunningspad met verschillende patronen. A) bodemverdichting; B) bodemverdichting en -vervorming; C) bodemvervorming (De Schrijver et al., 2020).

Het type bodemaantasting dat plaatsvindt als gevolg is afhankelijk van het bodemtype, het organische stofgehalte en het vochtgehalte (De Schrijver et al., 2020). In klei- en leembodems zijn in droge omstandigheden het beste opgewassen tegen verdichting tijdens houtoogst. Wanneer deze bodems vochtig of nat zijn, vindt vervorming daarentegen juist snel plaats. In bodems met een grovere textuur, zoals de zandgronden in Noord-Brabant, is het vochtgehalte minder van belang. Doordat deze zandgronden veel grote poriën bevatten, welke, ongeacht er sprake is van een hoog of laag vochtgehalte, niet gevuld zijn met vocht, maar met lucht (gas), vindt er zowel in droge als in natte omstandigheden verdichting en vervorming plaats. In het geval van vorst bevest het bodemwater waardoor de bodemstructuur wordt verstevigd. Dit houdt in dat tijdens vorst de beste periode is om houtoogst uit te voeren met minimale bodemaantasting.

Belangrijke begrippen die door verscheidene bronnen worden genoemd zijn bulkdichtheid, poriënvolume en indringingsweerstand. Dit zijn meetbare maatstaven aan de hand waarvan de fysieke eigenschappen van een bodem beschreven kunnen worden. Door aan de hand van deze eigenschappen onderzoek te doen naar verschillen tussen bepaalde bodems, kunnen de effecten van maatregelen in kaart worden gebracht.

De bulkdichtheid wordt uitgedrukt in het gewicht per volume van de droge bodem. Bij bodemverdichting wordt een gedeelte van de bodem samengeperst, waardoor de totale hoeveelheid minerale en organische stof per volume groter wordt. Dit betekent dat bij bodemverdichting de bulkdichtheid toeneemt. Het samenpersen van de bodem resulteert bovendien in een afname van het poriënvolume. Het poriënvolume is het totale volume van de bodem dat niet bestaat uit vaste stof (zoals minerale en organische stof), maar uit vocht of gas. Poriën in de bodem worden onderverdeeld in macro- ($>50\text{ }\mu\text{m}$), meso- ($0,2 - 50\text{ }\mu\text{m}$) en microporiën ($<0,2\text{ }\mu\text{m}$). Wanneer bodemverdichting plaatsvindt, veranderen macroporiën in meso- en microporiën. Het gevolg hiervan is dat de vocht-waterbalans van de bodem sterk verandert (de Schrijver et al., 2020) (Cambi et al., 2015). De chemische compositie van de bodem verschilt sterk van de oorspronkelijke situatie en chemische bodemprocessen kunnen niet meer of in mindere mate plaatsvinden. De afname van poriënvolume en de toename van de bulkdichtheid resulteert in een toename van de indringingsweerstand. De indringingsweerstand, ook wel penetratieweerstand genoemd, is een weergave van de kracht die een bodem kan weerstaan zonder dat deze door de indringer (bv. wortels) wordt doorboord. De indringingsweerstand wordt weergegeven in megapascal (MPa), waarbij 1 megapascal gelijk staat aan een druk van 10 bar. Volgens Van Prooijen (2019) neemt de wortelactiviteit af bij een MPa van 1,5 en stopt deze helemaal bij een MPa van 3. Miller et al. (2004) melden zelfs bij een MPa van 0,5 een verminderde wortelgroei en een halt op de wortelgroei vanaf 2 MPa. Nawaz et al. (2012) melden voor vier specifieke boomsoorten, waaronder de Corsicaanse den, een grote hinder qua wortelgroei bij een MPa van 3,0.

1.1.2 Biotische effecten

De veranderde abiotiek kan invloed uitoefenen op de biotische eigenschappen in en rondom een verdichte bodem (Miller et al., 2004). Een verminderde gasuitwisseling en een afname van de doorwortelbaarheid kunnen zorgen voor een afname van de worteldichtheid, aantal aanwezige mycorrhizaschimmels (schimmels die een symbiose bewerkstelligen met en tussen plantenwortels) en biodiversiteit in de bodem, waaronder het aantal aanwezige regenwormen. In andere woorden kan gesproken worden van een effect op de leefbaarheid van de bodem.

- Wortelgroei: een afnemend poriënvolume en een toename van de bulkdichtheid is de oorzaak van een hogere indringingskracht die gevegd wordt van wortels om de bodem te penetreren. Bovendien is het afsterven van wortels ook het gevolg van het (gedeeltelijk) verdwijnen van macro- en mesoporiën, waardoor het zuurstofgehalte in de bodem lager is dan dat de wortels eisen (De Bosscher et al., 2008). Wel is het belangrijk te vermelden dat in sommige gevallen een licht verdichte bodem juist een positief effect heeft op wortelgroei, indien de oorspronkelijke situatie van de bodem te los is voor beworteling. Ook is het effect van bodemverdichting op wortelgroei afhankelijk van de soort. Bepaalde tredvegetatie, zoals pitrus, heeft baat bij de aangepaste situatie. Ook zijn er boomsoorten die zich in verdichte omstandigheden beter kunnen handhaven (Ampoorter et al., 2010).
- Afname mycorrhizaschimmels: een zuurstofgebrek in de bodem is een directe oorzaak voor het afnemen van het aantal mycorrhizaschimmels. Bomen gaan via hun wortels een symbiose aan met mycorrhizaschimmels om op een meer productieve manier voedingsstoffen uit de bodem op te nemen. Wanneer er minder mycorrhizaschimmels in een bodem aanwezig zijn, betekent dit dat de bomen minder productief voedingsstoffen kunnen opnemen. Mycorrhizaschimmels hebben bovendien positieve effecten op bodemeigenschappen, het buffert voedingselementen en toxische elementen en het maakt antibiotica wat wortels beschermd tegen schadelijke organismen (Kutscheidt & Van der Laan, 2011). De meeste bomen, waaronder alle dennen (*Pinus*), gaan een symbiose aan met ectomycorrhiza-

schimmels. Bij dit type mycorrhiza vormt het schimmelweefsel een mantel om de worteltopjes. Hierdoor verloopt het contact tussen de boomwortels en de bodem bijna volledig via de schimmels (Ozinga et al., 2013). Mycorrhizaschimmels hebben minder last van bodemverdichting dan wortels, omdat deze gebruik kunnen maken van poriën die voor wortels te klein zijn (Miller et al., 2004).

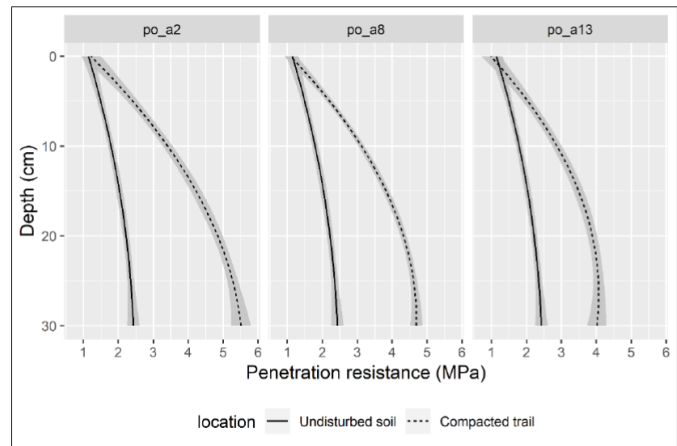
- Invloed op biodiversiteit: doordat de bodem een hogere indringingsweerstand heeft kan bodemfauna moeilijker door de bodem bewegen. Ook een verandering in de aanwezigheid van zuurstof en voedsel zorgt voor een afname van bodemleven. De familie van de regenwormen is een belangrijke groep organismen die problemen ondervindt in een verdichte bodem. Regenwormen leveren een bijdrage aan de strooiselafbraak en het creëren van een gezonde bodemstructuur. Het verminderde voorkomen van regenwormen kan jaren na de verdichting van de bodem nog aanhouden (Cambi et al., 2015). Doordat regenwormen minder of niet meer in een bodem kunnen leven, neemt hiermee ook de vruchtbaarheid en de productiviteit van het bos op de desbetreffende bodem af. De bodemverdichting die optreedt ten gevolge van houtoogst heeft niet uitsluitend een negatief effect op de biodiversiteit. Er ontstaan bodemeigenschappen die voor bepaalde soortgroepen juist uiterst gunstig zijn. Bij een afname van poriënvolume kan stagnerend water optreden. Dit zorgt voor een ecologische niche die voor bepaalde amfibieën, insecten en vochtminnende plantensoorten interessant is. De totale biodiversiteit van een groter bosareaal (zoals een bosopstand of een geheel bos) is dus potentieel hoger wanneer er (permanente) dunningspaden aanwezig zijn. Dit is wel enkel het geval wanneer deze plekken met lokale bodemverdichting niet in overvloed aanwezig zijn, omdat het herstelproces veel tijd in beslag kan nemen (De Schrijver et al., 2020).

1.1.3 Herstelproces

Het bodemherstelproces dat optreedt is, sterk afhankelijk van de biologische activiteit die na de bodemverdichting nog plaats heeft kunnen vinden, de weersomstandigheden en het oorspronkelijke bodemtype.

- Biologische activiteit: de graafactiviteiten van regenwormen leveren een bijdrage aan het herstel van bodems. Deze activiteit is door de verdichting echter ook afgenomen. Ook wortelgroei levert een bijdrage doordat het poriënvolume wordt vergroot. Bovendien wordt de onderlinge verbinding tussen poriën vergroot ten gevolge van wortelgroei.
- Weersomstandigheden: water zet uit wanneer het bevroert en slinkt weer in bij dooi. Door dit proces neemt het poriënvolume weer toe en neemt de bulkdichtheid weer af.
- Bodemtype: kleibodems en kleihoudende bodems zwellen en krimpen wanneer deze bevochtigd worden en weer opdrogen. Deze dynamiek zorgt voor een gedeeltelijk herstel van de bodem. Dit fenomeen vindt niet plaats in zandgronden. De bodems van zandgronden zijn niet goed in staat water vast te houden, waardoor het effect van weersomstandigheden minder sterk is. Ook de biologische activiteit in zandbodems is zeer beperkt in tegenstelling tot die in klei- en leembodems (de Schrijver et al., 2020).

Het herstelproces begint bovenin het bodemprofiel en gaat geleidelijk dieper de bodem in (Von Wilpert & Schäffer, 2006). De tijd die het herstelproces in beslag neemt, is sterk afhankelijk van de genoemde variabelen, hierdoor is het moeilijk te voorspellen hoelang het herstelproces zal duren voor een specifieke casus. Op basis van een chronosequentie na 2, 8 en 13 jaar na verdichting (figuur 2) meldt Mohieddinne een verwachte herstelperiode van ongeveer 70 jaar voor podzolgronden voor het volledige herstel van de bovenste 30 centimeter van de bodem (Mohieddinne, 2019; Mohieddinne et al., 2019).



Figuur 2, de chronosequentie van Mohieddinne (2019) waarin de indringingsweerstand in podzolgronden na 2, 8 en 13 jaar na verdichting wordt vergeleken met een onaantaste bodem (Mohieddinne, 2019) (Mohieddinne et al., 2019).

Von Wilpert en Schäffer (2006) melden gelijkwaardige bodemdoorluchting en worteldichtheid tussen onaantaste bodems en aangetaste bodems 18 jaar na de aantasting. Wel is het duidelijk dat het herstelproces veel langer is dan de periode van ongeveer 10 jaar die doorgaans tussen twee dunningsronden zit. Het herstelproces duurt door de verandering in bosbouwmachines langer dan dat het vroeger duurde, omdat de moderne machines zwaarder zijn (Von Wilpert & Schäffer, 2006). Dat het herstel van de bodem zo lang duurt, zet goed in perspectief wat de gevolgen kunnen zijn van slechts één aantasting. Volgens Adams en Froehlich (1981) en Ampoorter et al. (2012) wordt de meeste bodemverdichting al bij de eerste passering van de bodem veroorzaakt.

Nazari et al. (2021) melden een mogelijke afname van economische waarde van het bos door bodemverdichting, omdat mogelijk de kwaliteit en kwantiteit van oogstbaar hout afneemt. Over dit onderwerp is echter nog niet genoeg informatie beschikbaar.

1.2 Wetenschappelijk kader

De mate waarin een bodem verdicht kan worden gemeten aan de hand van de indringingsweerstand. Deze weerstand wordt uitgedrukt in megapascal (MPa). De MPa kan worden gemeten met een indringingsweerstandsmeter, zoals de penetrometer, penetrograaf of penetrologger. Deze apparatuur heeft een staaf met aan het uiteinde een conus. De conus heeft doorgaans een oppervlakte van 1 vierkante centimeter. Bij een penetrometer wordt op een wijzerplaat aangegeven wat de kracht is die wordt gebruikt om de conus de grond in te duwen, bij een penetrograaf wordt deze kracht op een penetrograafkaartje per diepte weergegeven en bij een penetrologger wordt deze kracht digitaal opgeslagen.

In tegenstelling tot de penetrometer wordt bij het gebruik van een penetrograaf en penetrologger continu gemeten. Een penetrograaf of penetrologger gaat doorgaans tot een diepte van 80 centimeter onder maaiveld. Er zijn bepaalde aspecten waarmee rekening gehouden moet worden bij het gebruik van een indringingsweerstandsmeter:

- Vochtgehalte van de bodem: een verzadigde bodem geeft weinig weerstand terwijl een droge bodem meer weerstand geeft. Dit effect is echter sterker in kleigronden dan op zandgronden. Zeker op de droge zandgronden in Noord-Brabant zakt vocht snel weg naar diepere bodemlagen, waardoor het effect van neerslag minder lang invloed heeft op indringingsweerstandsmetingen. Penetrologgers zijn soms uitgerust met een vochtsensor zodat voor elke meting het vochtgehalte bepaald kan worden. Het tijdstip van

indringingsweerstandsmetingen is dus van belang, omdat het vochtgehalte sterk kan verschillen tussen verschillende jaargetijden (Nawaz et al., 2012; Parajuli et al., 2022).

- Snelheid van de meting: de conus dient met een gelijkmatige snelheid de grond in te worden geduwd de metingen zo vergelijkbaar mogelijk zijn (Royal Eijkelpark, 2022).

De penetrologger van Royal Eijkelpark slaat verzamelde gegevens van de indringingsweerstandsmetingen direct op en deze informatie kan getransporteerd worden naar pc of laptop. Hiervoor heeft Royal Eijkelpark de PenetroViewer gelanceerd (Royal Eijkelpark, 2023). In de PenetroViewer worden meetplannen voorbereid welke vervolgens naar de penetrologger getransfereerd worden. Deze kunnen vervolgens verplaatst worden naar een programma waarin deze gegevens verwerkt en geanalyseerd kunnen worden, zoals Excel of SPSS (IBM, 2023).

De Steady Speed-No Impact-Penetrologger (SSNIP) (figuur 3) is een door Staro Natuur en Buitengebied (hierna Staro) ontwikkelde machine, ontworpen om de penetrologger van Royal Eijkelpark met een constante snelheid en zonder verdere impact de bodem in te duwen (Staro Natuur en Buitengebied, 2024b). Het gebruik van de SSNIP bij de uitvoering van bodemtechnisch onderzoek is een verbetering ten opzichte van onderzoek waarbij de SSNIP niet wordt gebruikt, omdat het voor de onderzoeker lastig is om de conus van de penetrologger met een constante kracht in de grond te drukken. Doordat op de SSNIP de snelheid van de indringingsweerstandsmeting bepaald kan worden, en hiermee alle metingen van de dataset op exact dezelfde wijze uitgevoerd kunnen worden, neemt de betrouwbaarheid van het onderzoek toe.



Figuur 3, de interface van de penetrologger van Eijkelpark na het uitvoeren van een indringingsweerstandsmeting, welke is gemonteerd op de SSNIP.

1.3 Problematiek

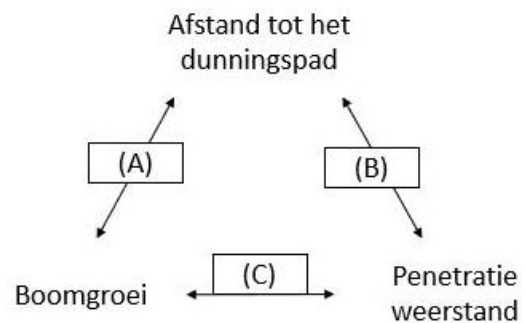
In 2020 is het afstudeerrapport van Peter Kappert gepubliceerd door Staro (Kappert, 2020). In dit afstudeerrapport is onderzoek gedaan naar de invloed van bodemverdichting door de aanleg en het gebruik van vaste dunningspaden op de groei van douglassen (*Pseudotsuga menziesii*). De hoofdvraag die Kappert daarbij heeft beantwoord is: *Hoeveel effect heeft bodemverdichting op de groei van douglas (Pseudotsuga menziesii) op de Noord-Brabantse zandgronden?* Deze hoofdvraag is door Kappert beantwoord aan de hand van de volgende deelvragen: (1) *Wat is er al bekend over de gevolgen van bodemverdichting?*; (2) *Hoeveel zijn de douglassen op de Noord-Brabantse zandgronden gegroeid?*; (3) *Hoeveel invloed hebben de dunningspaden op de bodemverdichting?*; (4) *Wat is de hoeveelheid van de indringingsweerstand op de meetlocaties?* en (5) *Wat is het verband tussen de verschillende parameters?*

Bij het onderzoek van Kappert zijn 175 QD-bomen geïnventariseerd binnen de gekozen douglasopstanden. Dat zijn vitale bomen met takvrije stammen en grote kronen, het product van een beheermethode met als doel kwaliteitshout. Deze opstanden zijn gelegen op de haarpodzolgronden in de gemeente Bergeijk (Noord-Brabant). Per boom is de afstand tot het dunningspad, de boomgroei en de indringingsweerstand rondom de boom opgenomen. Dit heeft Kappert gedaan aan de hand van de volgende methoden:

- Afstand tot het dunningspad: Kappert heeft per boom de afstand tot het hart van het dunningspad in centimeters gemeten met een meetlint.
- Boomgroei: Kappert heeft in 2019 de diameter op borsthoogte (dbh) per boom gemeten. De dbh van elke boom is enkele jaren eerder vastgelegd door Staro op het moment dat deze bomen zijn opgesnoeid. Aan de hand van het verschil in DBH tussen beide opnames is de bijgroei per groeiseizoen bepaald.
- Indringingsweerstand: Kappert heeft rondom boom op een afstand van één meter van de stamvoet acht indringingsweerstandsmetingen gedaan met de SSNIP. De SSNIP is sinds het onderzoek van Kappert veranderd. Wel werd er al gebruik gemaakt van de penetrologger van Royal Eijkelkamp.

In het onderzoek van Kappert (2020) zijn de verbanden tussen deze drie parameters onderzocht (zie figuur 4).

- A: de relatie tussen afstand tot het dunningspad en boomgroei
- B: de relatie tussen afstand tot het dunningspad en indringingsweerstand
- C: de relatie tussen boomgroei en indringingsweerstand



Figuur 4, de onderzochte variabelen van Peter Kappert (penetratieweerstand = indringingsweerstand) (Kappert, 2020).

Van de drie verbanden is enkel verband B als significant aangetoond. Dit betekent dat Kappert heeft aangetoond dat de indringingsweerstand significant verschilt wanneer deze op verschillende afstanden van het dunningspad wordt gemeten. Deze relatie werd door Kappert met name aangetoond tot een diepte van 50 centimeter onder maaiveld.

Relatie A en C zijn door Kappert dus niet als significant aangetoond. Dit houdt in dat de door Kappert gemeten bomen een vergelijkbare groei hadden, ongeacht de bodemverdichting rondom de boom en de afstand tot een dunningspad. Een mogelijke verklaring hiervoor is, is dat de bomen weinig last hebben van bodemverdichting. In dat geval zou bij de keuze van QD-bomen geen rekening gehouden moeten worden met de ligging van dunningspaden.

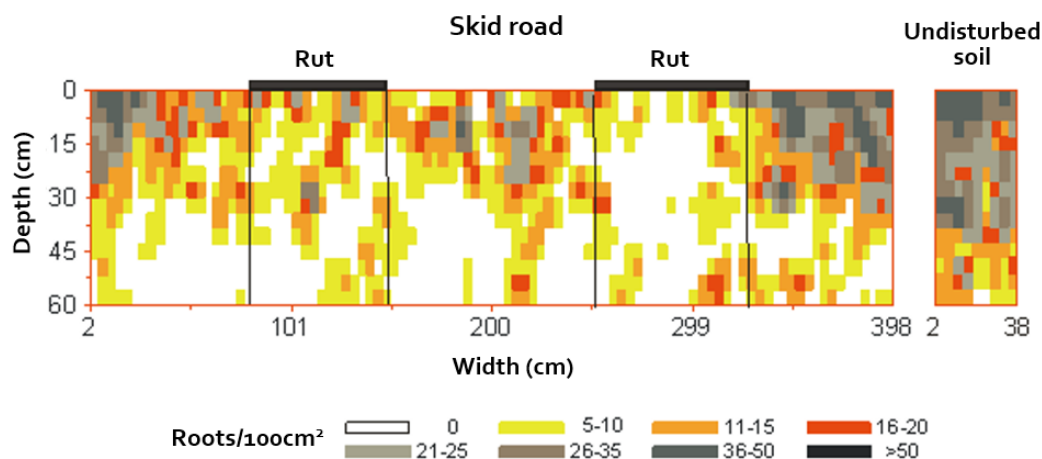
Een mogelijke verklaring voor de uitkomst van het onderzoek van Kappert is dat er, ondanks er zeer veel bomen (175) zijn gemeten, er geen rekening is gehouden met het eindigen van de invloedssfeer van de zware machines dunningspaden, met bodemverdichting als gevolg. Door gebruik te maken van een regressieanalyse wordt gesuggereerd dat het effect van zware machines als gradiënt van bodemverdichting vanuit het pad richting de aanliggende bosopstand ver zal reiken. Er zou dan ook een verschil aanwezig moeten zijn tussen de boomgroei van bomen die op 7 meter en op 10 meter van een dunningspad af staan, terwijl deze beide waarschijnlijk buiten de genoemde invloedssfeer liggen. Kappert heeft echter ook gebruik gemaakt van een t-toets om deze relatie te toetsen. Bij een t-toets worden twee onafhankelijke groepen met elkaar vergeleken. Kappert heeft de keuze gemaakt om de groepen in te delen op basis van afstand tot het dunningspad, waarbij alle bomen dichterbij dan 280 centimeter van het dunningspad bij de ene groep (selected) horen en alle bomen verder dan 280 centimeter van het dunningspad bij de andere groep (not selected). Kappert onderbouwt deze keuze op basis van de grootte van een wortelkluif van 100 centimeter en de afstand van het hart tot de rand van het dunningspad van 180 centimeter, maar deze keuze wordt niet wetenschappelijk onderbouwd.

Deze conclusie van Kappert dat bodemverdichting en afstand tot het dunningspad geen invloed hebben op boomgroei is opmerkelijk. Volgens Kremers en Boosten (2018), Ampoorter (2011), De Schrijver et al. (2020) en Ampoorter et al. (2010) heeft bodemverdichting meerdere negatieve

effecten op de abiotiek en biotiek van een bodem waardoor de groei van bomen beperkt wordt (zie 1.1 Maatschappelijk kader). Ook Froehlich en McNabb (1983) rapporteren een verminderde bijgroei, vooral omdat de bodemverdichting zo lang aanhoudt na aantasting.

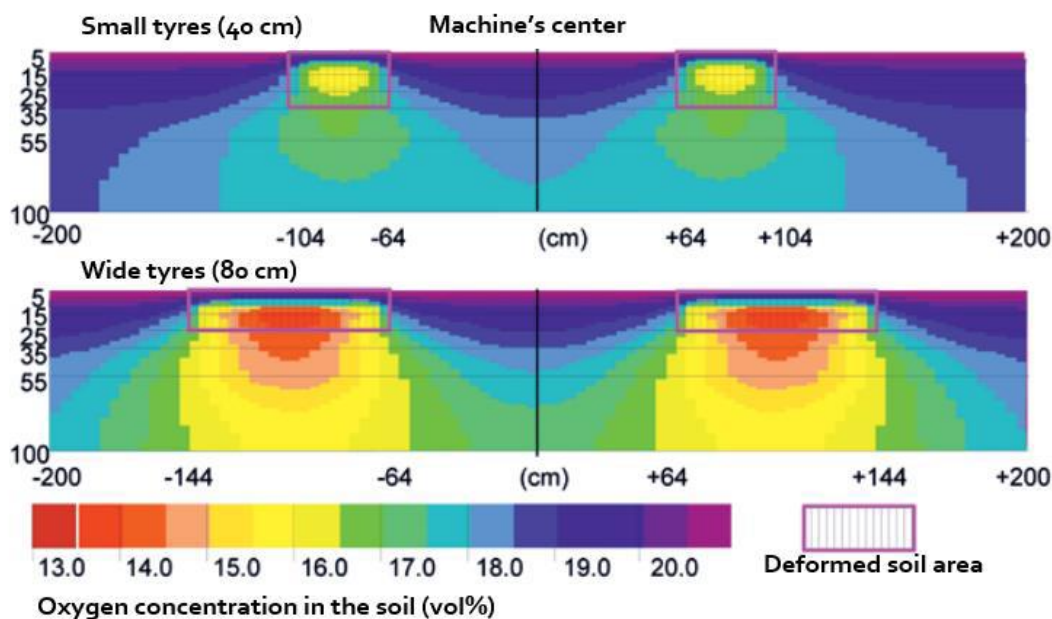
Omdat er wel een relatie is aangetoond tussen bodemverdichting en afstand tot een dunningspad (relatie B), maar niet tussen deze parameters en de groei van bomen (relatie A en C), kan men door de informatie uit het Wetenschappelijk kader zich afvragen wat precies de invloedssfeer is van zo een dunningspad. Het is namelijk nog onbekend wat het verloop is van de relatie tussen de afstand tot een dunningspad en de bodemverdichting en tot welke afstand van het dunningspad deze relatie aanblijft.

Vermoedelijk is er een zeer abrupt einde aan de invloedssfeer van zware machines op de bosbodem vanaf een bepaalde afstand van het vaste dunningspad. Dit vermoeden wordt ondersteund door het onderzoek van Schäffer (2002) waaruit is gebleken dat de verdeling van fijne wortels (wortels met een diameter kleiner dan 2 mm) onder een dunningspad vrij dicht bij het dunningspad bovenin het bodemprofiel al overeenkomt met een onaantaste bodem. Dieper in de bodem is dit echter nog niet het geval (figuur 5).



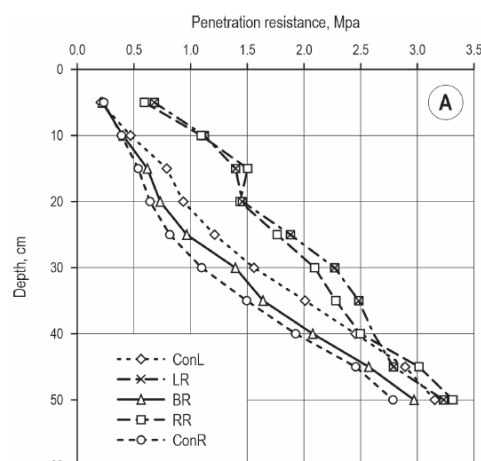
Figuur 5, het voorkomen van fijne wortels (diameter kleiner dan 2 mm) per 100 cm³ tot een diepte (depth) van 60 centimeter. Links het profiel onder een dunningspad (skid road), waarbij de wielsporen (ruts) zijn aangegeven en rechts het profiel onder een onaantaste bodem (undisturbed soil) (Schäffer, 2002).

In figuur 6 is de simulatie uit het onderzoek van Schack-Kirchner (2010) te zien. In deze simulatie is de zuurstofconcentratie onder de rijbanen weergegeven. Er lijkt als het ware een 'ballon' onder elk spoor te vormen waar de invloedssfeer van het berijden met zware machines merkbaar is. Wel is belangrijk te vermelden dat wortelintensiteit en bodemverdichting twee zeer verschillende variabelen zijn. Juist op zandbodems kan de poriëngrootte in normale omstandigheden te groot zijn om water vast te houden. Doordat bij bodemverdichting deze poriëngrootte afneemt en het watervasthoudend vermogen toeneemt kan het op deze zandbodems juist een positief effect hebben voor de groei van bomen (Dexter, 2004).



Figuur 6, simulatie van de zuurstofconcentratie (oxygen concentration) onder rijbanen met smalle banden (small tyres) boven en brede banden (wide tyres) beneden, wat belangrijk is voor de wortelademhaling, tot een diepte van 100 centimeter. In beide profielen is aangegeven waar de bodem vervormd is (deformed soil area) (Schack-Kirchner, 2010).

Een derde onderzoek dat bijdraagt aan het vermoeden is dat van Dvořák en Kormanek (2022). In dit onderzoek is de indringingsweerstand gemeten met een penetrologer op 5 verschillende meetpunten: 1 meter links van het rijspoor (ConL), in het linker rijspoor (LR), tussen de rijsporen in (BR) (het hart van het dunningspad), in het rechter rijspoor (RR) en 1 meter rechts van het rijspoor (ConR). In het onderzoek zijn in de rijsporen tot 50 centimeter diepte duidelijk hogere indringingsweerstand gemeten dan daarbuiten (zie figuur 7).



Figuur 7, de resultaten van het onderzoek van Dvořák en Kormanek (2022).

Door de bodemverdichting door de aanleg en het gebruik van dunningspaden bij houtoogst veranderen dus de ondergrondse eigenschappen, waaronder een kleiner poriënvolume met een lagere zuurstofconcentratie en een verminderde wortelgroei als gevolg. Deze gevolgen kunnen op hun beurt weer invloed hebben op de groei van bomen naast de dunningspaden. Het is wetenschappelijk interessant om te onderzoeken wat het verloop van de relatie is en tot welke afstand van het dunningspad er een veranderde bodemdichtheid gemeten wordt en vanaf welke afstand de indringingsweerstand gelijk is aan die van een onbereden stuk bos met dezelfde oorspronkelijke eigenschappen als referentie. De beheerder kan op basis van dit onderzoek beter weloverwogen keuzes maken bij het uitkiezen van QD-bomen. Als de invloedssfeer zeer klein blijkt te zijn kan de beheerder ook bomen die dicht(er) bij het dunningspad aanwijzen als QD-bomen. Daar tegenover staat dat als de invloedssfeer groot blijkt te zijn de beheerder er voor kan kiezen om het aanwijzen van QD-bomen vlak naast het dunningspad juist achterwege te laten. Wel moet genoemd worden dat bodemverdichting slechts één factor is die de groei van bomen bepaald. In een gelijktijdig afstudeeronderzoek van Wietse de Vries wordt onderzocht of de groei van bomen vlak naast het dunningspad verschilt van de groei van bomen verder van het dunningspad af. Op deze

manier kan worden geconcludeerd of bomen die op een theoretisch minder gunstige locatie staan ook in de praktijk daadwerkelijk minder bijgroei hebben.

Beide onderzoeken worden uitgevoerd in opdracht van Staro. Staro heeft de taak op zich genomen om voor de bosbouwsector kennis te vergaren over de gevolgen van bosbeheermaatregelen op bodemverdichting. Staro pakt dit onderwerp niet alleen op, maar wordt ondersteund door Hogeschool Van Hall Larenstein. Vooral met het lectoraat Duurzaam bosbeheer, met lector dr. Ute Sass-Klaassen, wordt nauw samengewerkt. Het lectoraat is ook betrokken bij de begeleiding geweest.

1.3.1 Onderzoeksvraag

Wat is de invloedssfeer op bodemverdichting van het berijden door zware machines op dunningspaden in bossen op zandgrond?

1.3.2 Deelvragen

Het beantwoorden van de onderzoeksvraag zal ondersteund worden door de volgende deelvragen:

1. *Hoe verloopt de indringingsweerstand in een onverstoord bodemprofiel tot 80 centimeter diepte?*
2. *Hoe verloopt de indringingsweerstand in een bodem van 0 tot 500 centimeter van het hart van een dunningspad tot 80 centimeter diepte?*
3. *Wat is het verschil tussen de indringingsweerstand op dieptes van 0 tot en met 80 centimeter onder maaiveld van onverstoorde bodemprofielen en bodemprofielen van 0 tot en met 500 centimeter afstand van het hart van een dunningspad?*

Staro beheert de bossen van gemeente Bergeijk, een Noord-Brabantse gemeente in de streek de Kempen. In deze bossen heeft ook Kappert zijn onderzoek uitgevoerd. Van de Bergeijkse bossen die door Staro worden beheerd is de keuze gemaakt al het onderzoek in één van de opstanden te doen. Het betreft een opstand met Corsicaanse dennen (*Pinus nigra* subsp. *laricio*) en grove dennen (*Pinus sylvestris*). De exacte onderzoekslocatie is gelegen op de plaats waar tot 1950 de Wilreitsche heide was gelegen. Op deze locatie is sprake van een haarpodzolgrond. In de bossen op deze locatie zijn vanwege de houtoogstfunctie permanente dunningspaden aangelegd. Dit betekent dat alle deelvragen beantwoord zullen worden voor dit specifiek bodemtype en alle dunningspaden die onderzocht worden zijn permanente dunningspaden. In 1.6 Randvoorwaarden en afbakening meer over de keuze voor deze bosopstand.

De keuze om tot 80 centimeter diepte de bodems in kaart te brengen is gemaakt aan de hand van de dimensies van de penetrologger. Deze kan tot een diepte van 80 centimeter meten. De keuze om de dunningspaden te onderzoeken van 0 tot 500 centimeter afstand van het hart van het dunningspad is gemaakt tijdens een persoonlijke communicatie met D. Joppe en H. Schreppers (21 september 2023). Op het moment van de communicatie bestond het vermoeden dat de invloedssfeer enkele meters, maar niet meer dan 4 meter, van het hart van het dunningspad zou reiken. Omdat het doel van het onderzoek is om de invloedssfeer van machines in kaart te brengen is de keuze gemaakt om voor de zekerheid tot 500 centimeter afstand te meten, om een grotere kans te hebben om het einde van de invloedssfeer in kaart te brengen.

1.4 Bijdrage aan duurzaamheid

De bijdrage die het onderzoek levert aan de duurzaamheid van de bosbouwsector is meetbaar aan de hand van de Sustainable Development Goals (SDG's) van de Verenigde Naties (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2023). Het behouden en duurzaam gebruiken van natuurlijke hulpbronnen, zoals bossen, is een belangrijk onderdeel van deze doelen.

Doordat houtoogst op een duurzamere manier plaats kan vinden door de kennis die in dit onderzoek wordt vergaard wordt een bijdrage geleverd aan SDG 12.2 (figuur 8); Duurzaam gebruik en beheer van natuurlijke hulpbronnen. Het bosbeheer op de Noord-Brabantse zandgronden en vergelijkbare gebieden kan door de kennis zodanig aangepast worden, zodat er betere keuzes gemaakt worden en daarmee de efficiëntie van de houtproductie. Het efficiënt produceren van hout zorgt er bovendien voor dat er minder hout geïmporteerd dient te worden.

Ook SDG 15.1 en 15.2 worden ondersteund door het onderzoek (figuur 9). De focus van SDG 15.1 ligt op het behoud, herstel en duurzaam gebruik van ecosystemen zoals bossen. Door de toename van kennis over de invloed van bosexploitatie kunnen beheerders de keuze maken op methodes die de minste invloed hebben op het ecosysteem. De toename van kennis over bodemverdichting ten gevolge van bosexploitatie kan ook leiden tot een ontwikkeling van herstelmaatregelen, wat invulling geeft aan SDG 15.2.

Een andere manier waarop de bijdrage aan duurzaamheid kan worden gemeten is aan de hand van het Triple Bottom Line-principe, ook wel bekend als de drie P's: People (mensen), Planet (milieu) en Profit (markt) (Elkington, 1997). De in 1994 door Elkington geïntroduceerde term, Triple Bottom Line, werd in 1997 verder beschreven in zijn boek *Cannibals with Forks: the Triple Bottom Line of 21st Century Business*. In dit boek beschrijft Elkington dat als gevolg van activisme voor sociale gelijkheid en milieuactivisme het voor overheden en bedrijven steeds belangrijker zou worden om niet alleen naar de financiële winst-verliesrekening te kijken als maatstaf voor succes, maar ook naar de bijdrage aan de maatschappij en het milieu.

De winst-verliesrekening, ofwel de "Economic Bottom Line" (Profit), werd in de jaren nadien vergezeld door de "Social Bottom Line" (People), waar onder andere publieke gezondheid en educatie onder vallen, en de "Environmental Bottom Line" (Planet), met het minimaliseren van milieuvervuiling en het natuurbehoud. Deze drie "Bottom Lines" vormen samen de Triple Bottom Line. Zo houden bedrijven naast een financiële boekhouding ook steeds vaker bij wat de invloed van het bedrijf is op maatschappelijke- en omgevingskwesties.

De uitvoering van het onderzoek heeft als gevolg dat er meer informatie over de effecten van houtoogst ontstaat. Deze informatie is van belang voor bedrijven die in de bosbouwsector werkzaam zijn, zoals Staro. Deze bedrijven kunnen aan de hand van de nieuwe informatie beter afgewogen keuzes maken in hun werkwijzen en beheersmaatregelen, zodat alle drie Bottom Lines optimaal kunnen worden benut.



Figuur 8, Sustainable Development Goal 12 (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2023).



Figuur 9, Sustainable Development Goal 15 (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2023).

- **Economic Bottom Line (Profit):** houtoogst is een winstgevend voor bosbouwbedrijven. De effecten van houtoogst op bodemeigenschappen hebben eventuele gevolgen voor de bijgroei van hout. Doordat deze gevolgen tijdens het onderzoek naar bodemverdichting, en ook tijdens het onderzoek naar bijgroei van Wietse de Vries, beter in kaart worden gebracht kunnen de bedrijven een afweging maken in welke mate en op welke manier zij houtoogst in de toekomst willen uitvoeren. De afwegingen hebben invloed op de financiële situatie van de bedrijven.
- **Environmental Bottom Line (Planet):** doordat de gevolgen van houtoogst op het bosesysteem beter in beeld worden gebracht, kunnen door het onderzoek bosbouwbedrijven een betere afweging maken bij de keuzes omtrent houtoogst, zodat het bosesysteem hiervan zo min mogelijk effecten ondervindt.
- **Social Bottom Line (People):** een gezond ecosysteem draagt bij aan de instandhouding van het bos. De nabijheid van bos is goed voor de publieke gezondheid. Zo hebben bossen invloed op de fijnstofproblematiek, de mentale gezondheid van mensen (die in het bos recreëren), de stimulatie van fysieke activiteit en het faciliteren van sociale contacten (S. de Vries et al., 2009).

Ten slotte zal het onderzoek een bijdrage leveren aan educatie, doordat de informatie uit het onderzoek ter beschikking gesteld zal worden gesteld voor studenten en onderzoeksinstanties. Het rapport zal door Hogeschool Van Hall Larenstein vanuit het lectoraat Duurzaam bosbeheer gepubliceerd worden.

1.5 Doelstellingen

Het doel van het onderzoek is om een bijdrage te leveren aan de kennis over houtoogst en haar effecten. Specifiek is het onderzoek gericht op het vergaren van kennis over de effecten van de aanleg en het gebruik van permanente dunningspaden met zware bosbouwmachines op de bosbodem. Het onderzoek is onderdeel van een groter project van Staro waarin bodemverdichting, de gevolgen van bodemverdichting en mogelijkheden voor het beperken van bodemverdichting worden onderzocht. Staro heeft dit project opgepakt om voor de bosbouwsector kennis te vergaren over deze onderdelen (Staro Natuur en Buitengebied, 2024a) (Staro Natuur en Buitengebied, 2024b). Het onderzoek is, na het literatuuronderzoek van Kremers en Boosten (2018) en het praktijkonderzoek van Kappert (2020), samen met het onderzoek van Wietse de Vries het derde onderzoek binnen dit project dat Staro uit laat voeren. In het onderzoek wordt onderzocht hoe groot de invloedssfeer van houtoogst op bodemverdichting precies is. Zodoende wordt invulling gegeven aan de kennis die miste zoals beschreven in 1.3 Problematiek, namelijk wat de omvang is van bodemverdichting die optreedt ten gevolgen van houtoogst. De kennis die hierbij wordt vergaard wordt beschikbaar gesteld aan geïnteresseerden in de bosbouwsector. Doordat bosbeherende organisaties zo meer informatie hebben over de gevolgen van houtoogst kunnen de beheerders die de keuzes maken een betere afweging maken, zodat economische winst wordt vergezeld door maatschappelijke en ecologische winst. Dit duurzaamheidsprincipe, het Triple Bottom Line-principe, is beschreven in 1.4 Bijdrage aan duurzaamheid.

1.6 Randvoorwaarden en afbakening

Het onderzoek spitst zich toe op de invloedssfeer van houtoogst op bodemverdichting. Idealiter worden er bij zo een onderzoek zo veel mogelijk gegevens verzameld. De beperkte tijd, effectief 4 maanden, zorgt ervoor dat er een keuze gemaakt moest worden in welke gegevens wel verzameld worden en welke niet. De keuze is er hierbij op gevallen om het onderzoek uit te voeren in de bossen op haarpodzolgronden in gemeente Bergeijk, omdat dit ook de locatie is waar Kappert zijn onderzoek heeft uitgevoerd en omdat deze bossen door opdrachtgever Staro worden beheerd. Dit betekent dat

de conclusies die uit dit onderzoek worden getrokken alleen van toepassing is op haarpodzolgronden of andere gronden die vergelijkbare eigenschappen hebben en dus niet op klei- of leemgronden die elders in Nederland en Vlaanderen voorkomen.

In de bosopstand waar de gegevens verzameld zouden worden moesten permanente dunningspaden aanwezig zijn. In tegenstelling tot het onderzoek van Kappert zijn alle gegevens verzameld in een dennenopstand (Corsicaanse den en grove den, kiemjaar 1985). De keuze is gevallen op deze bosopstand omdat hier op de dunningspaden minder tak- en tophout lag. Tak- en tophout moest voor elke meting verwijderd worden zodat er gemeten kon worden. Door te kiezen voor een opstand met weinig tak- en tophout is veel tijd bespaard. In figuur 10 is één van de onderzochte dunningspaden vanuit het betreffende dunningspad te zien alsook het satellietbeeld van de gehele opstand (Esri et al., 2021). Op het satellietbeeld zijn de van noordoost tot zuidwest georiënteerde, parallel liggende dunningspaden goed te zien. Op de afbeelding van het satellietbeeld is ook de locatie van de foto en de richting waarin deze is genomen weergegeven.



Figuur 10, boven één van de dunningspaden in de opstand en onder een satellietbeeld van de opstand (Esri et al., 2021) en de locatie en richting van de foto.

Een voorwaarde van de inventarisatie is dat alle metingen zo gelijk mogelijk moeten verlopen. Het gebruik van de SSNIP heeft daar een bijdrage aan geleverd, maar door andere invloeden, zoals veranderende weersomstandigheden, is dit niet altijd mogelijk geweest.

Ten slotte wordt in het onderzoek alleen de invloed van houtoogst op de indringingsweerstand onderzocht en dus niet de effecten van houtoogst op de andere abiotische gevolgen (toename bulkdichtheid en afname poriënvolume). Ook biotische gevolgen, zoals worteldichtheid, zuurstofgehalte, bodemleven of aantal mycorrhizaschimmels zijn in dit onderzoek niet onderzocht.

1.7 Leeswijzer

In hoofdstuk 2. Methode worden de stappen besproken die worden genomen om tot resultaten te komen. De drie hoofdstappen zijn voorbereidend werk (2.1), gegevens verzamelen (2.2) en gegevens analyseren (2.3). Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd (3. Resultaten) en is er een korte discussie op de betrouwbaarheid van de resultaten (3.1 Discussie). Aan de hand van de resultaten worden in hoofdstuk 4. Oordelen de deelvragen beantwoord (4.1 Beantwoorden deelvragen) en vervolgens de onderzoeksvraag (4.2 Conclusie). Aan de hand van de conclusie en het maatschappelijk kader worden aanbevelingen gedaan (4.3 Aanbevelingen). Ten slotte is er een terugblik op de bijdrage die het onderzoek levert op de duurzaamheid van de bosbouwsector (4.4 Reflectie op bijdrage aan duurzaamheid).

2. Methode

De inleiding is geschreven aan de hand van informatie uit verschillende bronnen. Bij het achterhalen van bronnen is gebruik gemaakt van Google Scholar (Google, 2023), ResearchGate (ResearchGate GmbH, 2023) en Elicit (Elicit, 2023). Elicit is een instrument waarbij door artificial intelligence (AI) vragen worden beantwoord aan de hand van online-beschikbare literatuur.

Om de deelvragen te kunnen beantwoorden is een praktijkonderzoek uitgevoerd waarbij gegevens over de bodemverdichting verzameld zijn. Zodra de methode is bepaald, dient er een stappenplan gemaakt. Dit stappenplan is weergegeven in figuur 11. De verschillende onderdelen van dit stappenplan zijn vervolgens stap-voor-stap toegelicht. Deze stappen zijn voorbereidend werk, gegevens verzamelen en gegevens analyseren. Het voorbereidend werk en het verzamelen van de gegevens zijn elke dag opnieuw uitgevoerd tijdens de onderzoeksperiode. In totaal gaat het om 14 werkdagen, verdeeld over 4 werkweken, waar deze cyclus heeft plaatsgevonden. Zodra de onderzoeksperiode voorbij was zijn alle gegevens pas geanalyseerd.



Figuur 11, stappenplan van de methodiek. Bovenin zijn de drie stappen weergegeven met zwarte omlijning. Onderin zijn deze stappen weergegeven in sub-stappen. Sub-stappen met rode omlijning zijn binnen uitgevoerd en sub-stappen met groene omlijning zijn in het bos uitgevoerd.

2.1 Voorbereidend werk

Het voorbereidend werk is een stap die elke dag waarop werd gemeten opnieuw moest worden uitgevoerd. Tijdens deze stap wordt de penetrologger in gereedheid gebracht om in het veld gegevens te kunnen verzamelen. Deze stap vindt plaats voordat de onderzoeker naar het bos gaat. Voor deze stap zijn enkel de penetrologger en een laptop of PC met de PenetroViewer nodig. Tijdens het onderzoek is gebruik gemaakt van Eijkelkamp PenetroViewer 6.08 (Royal Eijkelkamp, 2023).

2.1.1 Methodiek

Het voorbereidend werk bestaat uit drie sub-stappen (zie figuur 11). In deze paragraaf wordt van elke sub-stap de methodiek behandeld. In Bijlage 4 wordt het gebruik van de PenetroViewer gedetailleerd uitgelegd.

Nieuw plan aanmaken in de PenetroViewer

In de PenetroViewer maakt de onderzoeker een nieuw plan aan en geeft dit plan een naam. Om ervoor te zorgen dat de gegevens in stap Gegevens analyseren gemakkelijk te sorteren zijn, is gebruik gemaakt van de datum als projectnaam. Bij de uitvoering van het onderzoek is gebruik gemaakt van een conus met een oppervlakte van 1 cm², hier staat de PenetroViewer standaard op. De snelheid die is gehanteerd is een snelheid van 2,0 centimeter per seconde.

Aantal plots en metingen per plot selecteren

De onderzoeker dient in hetzelfde venster een aantal plots en een aantal indringingsweerstandsmetingen per plot te selecteren. Het is belangrijk dat de onderzoeker voldoende indringingsweerstandsmetingen programmeert, zodat er in het bos geen belemmering plaatsvindt door een tekort aan geprogrammeerde indringingsweerstandsmetingen. Het is in dat geval beter te veel metingen te programmeren dan te weinig. Tijdens het onderzoek is de keuze gemaakt elke dag 10 plots te programmeren met 20 indringingsweerstandsmetingen per plot. Dit betekent dat er per dag 200 indringingsweerstandsmetingen stonden geprogrammeerd. In de praktijk bleek dat er op één werkdag bij de juiste omstandigheden ongeveer 120 metingen konden worden gedaan.

Plan transporteren naar de penetrologger

Zodra het plan naar gelieve is geprogrammeerd kan deze geëxporteerd worden naar de penetrologger. Hiervoor moeten de PC en de penetrologger met een datakabel met elkaar zijn verbonden.

2.1.2 Onderbouwing

De gebruikte methodiek bij het voorbereidend werk wordt ondersteund door de handleiding van de penetrologger (Royal Eijkelkamp, 2022). In hoofdstuk 6 van de handleiding wordt deze methodiek beschreven.

2.2 Gegevens verzamelen

De penetrologger is nu voorbereid op het verzamelen van gegevens op de projectlocatie. Per dag werd een nieuw plan gehanteerd en aan het einde van elke dag werden de verzamelde gegevens weer opgeslagen op de PC. Het verzamelen van gegevens heeft op 14 verschillende dagen plaatsgevonden. Tijdens deze dagen werden er zoveel mogelijk metingen gedaan. In de praktijk bleek dat 120 metingen per dag ongeveer de limiet was.

2.2.1 Methodiek

Het verzamelen van de gegevens bestaat eveneens uit enkele sub-stappen (figuur 11). Deze sub-stappen worden per stap besproken. In Bijlage 4 wordt het gebruik van de penetrologger en de SSNIP gedetailleerd uitgelegd.

Penetrologger en SSNIP monteren

Voordat de metingen kunnen beginnen moeten de penetrologger en de SSNIP aan elkaar gemonteerd worden.

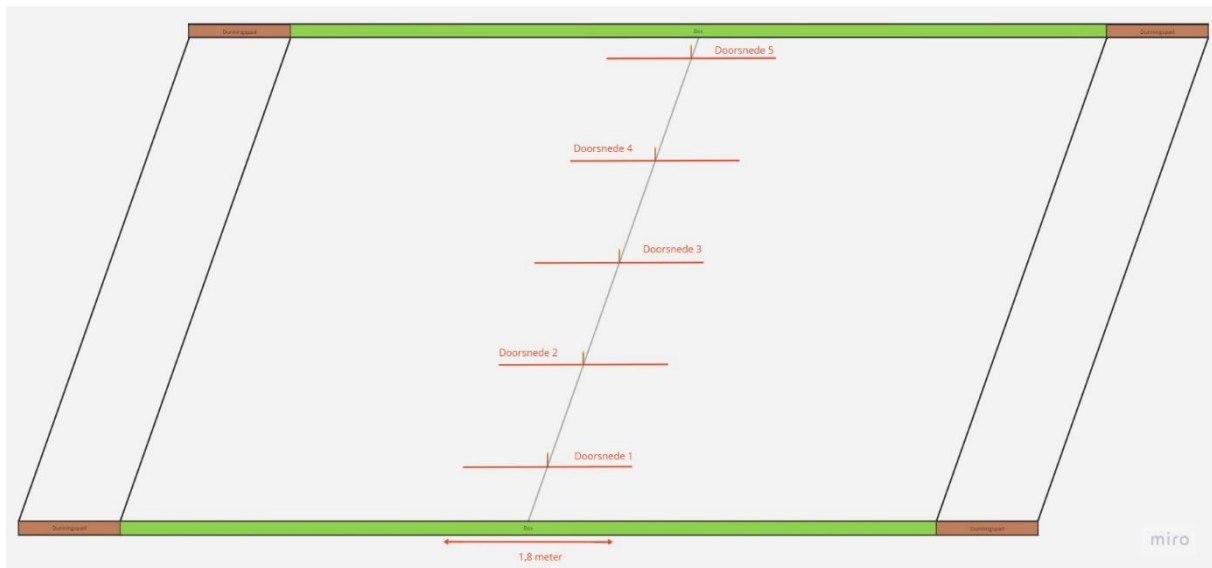
Doorsnede voorbereiden

Alvorens het uitvoeren van de metingen daadwerkelijk kan plaatsvinden, dient de beoogde doorsnede voorbereid te worden. Deze voorbereiding is nodig om de opeenvolging van metingen te bespoedigen. Tijdens de voorbereiding wordt de exacte locatie van de doorsnede vastgesteld, en daarmee de locaties van alle metingen binnen die doorsnede. Verder worden belemmerende terreinkenmerken zoals tak- en tophout van de doorsneden verwijderd. Doordat er gebruik wordt gemaakt van twee typen doorsneden, zijn de voorbereidende werkzaamheden iets verschillend. In totaal zijn er tijdens het onderzoek 42 doorsneden gemaakt: 21 bij onaangetaste bodem en 21 dwars over dunningspaden heen.

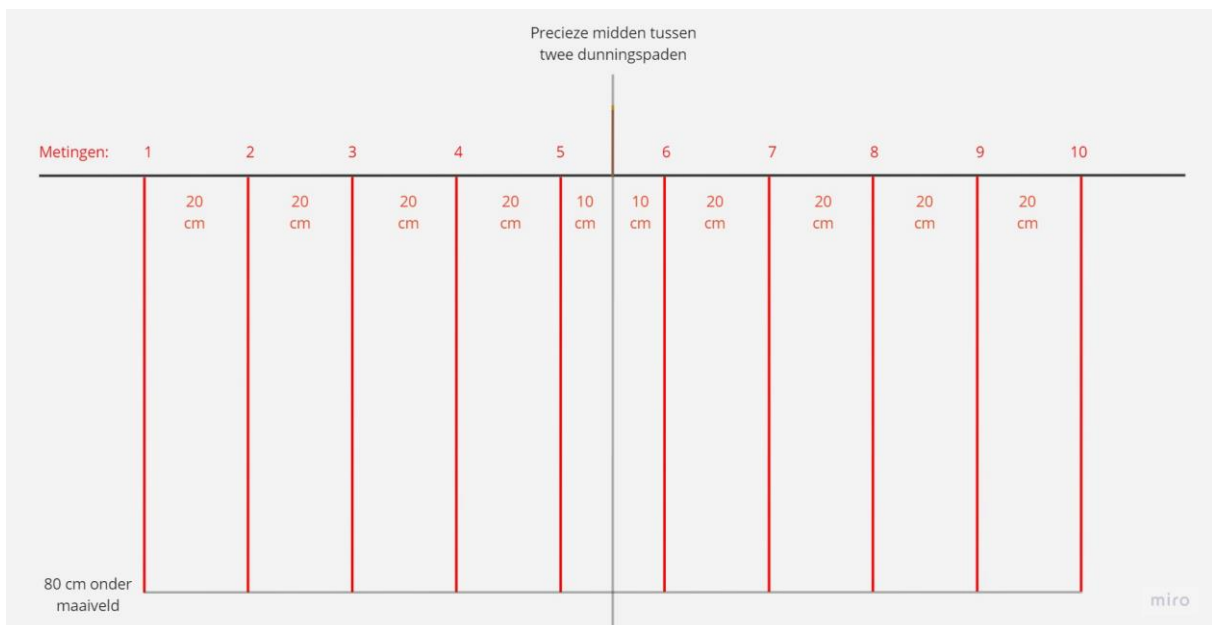
Vorbereiden doorsnede bos

Om deelvraag 1 te beantwoorden worden metingen gedaan in onverstoorte bodemprofielen. Om dit te bewerkstelligen worden metingen gedaan in een vermoedelijk onaangetaste bosbodem gelegen precies tussen twee dunningspaden. Omdat het nog niet bekend is waar de bodem wel en waar niet is aangetast is de keuze gemaakt om de onaangetaste doorsneden precies tussen 2 dunningspaden in te doen, op de verst mogelijke afstand van de dunningspaden. Er kan echter niet met 100% zekerheid gezegd worden dat er in het verleden geen verdichting heeft plaatsgevonden op de specifieke locaties. Wel is bekend dat sinds de aanleg van permanente dunningspaden de bodem onverstoord is gebleven.

Met een meetlint wordt de onderlinge afstand tussen 2 dunningspaden gemeten. Precies in het midden tussen deze twee dunningspaden wordt een piketpaaltje geplaatst. Bij een onderlinge afstand van 14 meter zal dit piketpaaltje dus op 7 meter van beide paden worden geplaatst. Dit piketpaaltje staat symbool voor het midden tussen 2 dunningspaden. Aan weerszijde van het piketpaaltje worden 5 metingen uitgevoerd, in totaal 10 metingen. Tussen de metingen zit een afstand van 20 centimeter. Dit houdt in dat de totale doorsnede een afstand heeft van 180 centimeter. In figuur 12 is een overzicht gegeven van de locaties van de doorsneden in onaangetaste bodems. Figuur 13 geeft een weergave van de lay-out van metingen binnen deze doorsnede. In dit figuur is 80 centimeter onder maaiveld aangegeven, dit is de maximale diepte tot waar de penetrologger kan meten.



Figuur 12, de ligging van de doorsneden in onaangetaste bodem. Precies in het midden van twee dunningspaden staat een piketpaaltje om het midden van de 180 centimeter lange doorsnede te markeren.

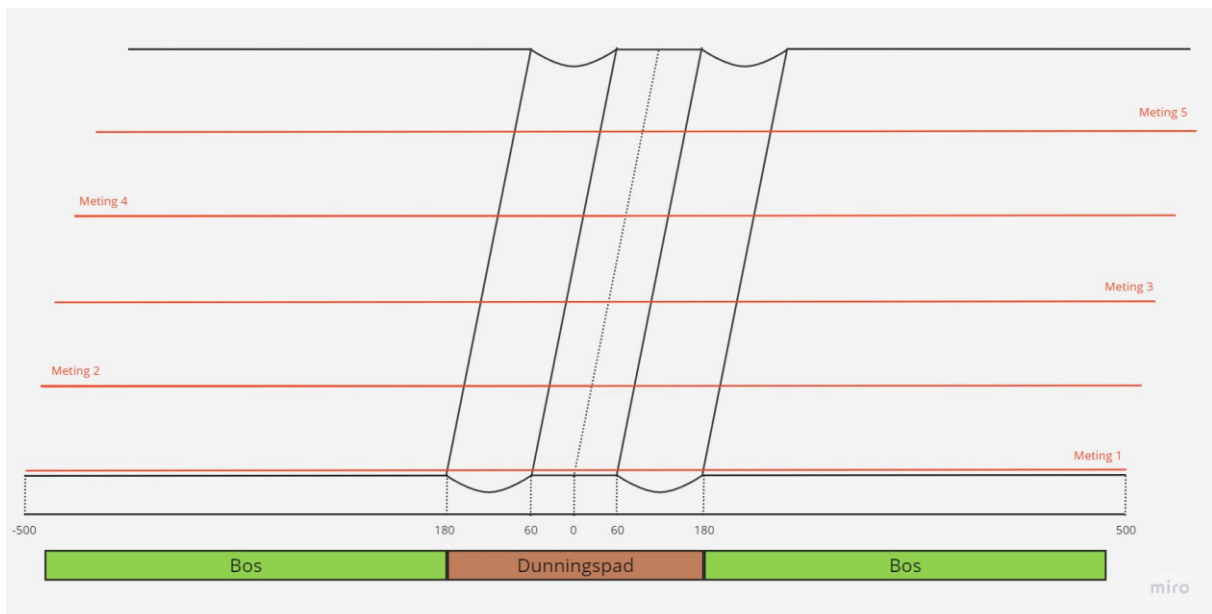


Figuur 13, schematische lay-out van het tiental metingen per doorsnede in onaangetaste bodem. De afstand tussen elke meting is 20 centimeter. 80 centimeter onder maaiveld is weergegeven omdat dit de maximale diepte is tot waar met de penetrologger kan worden gemeten.

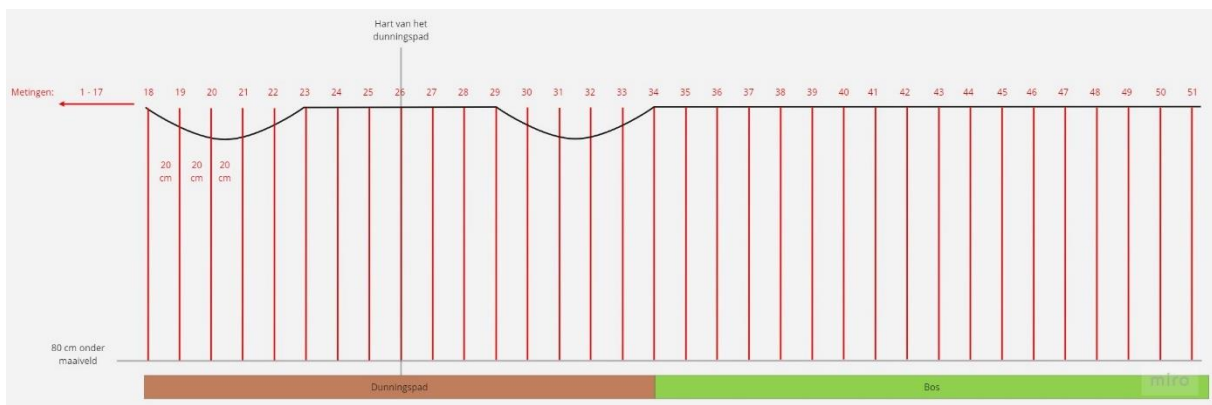
Vorbereiden doorsnede pad

Het beantwoorden van deelvraag 2 vindt plaats aan de hand van indringingsweerstandsmetingen op doorsneden die dwars over de dunningspaden lopen. Als eerste stap wordt het midden van het dunningspad bepaald en deze wordt gemarkeerd met een piketpaaltje. Vervolgens wordt vanaf dit midden met een meetlint een afstand van 5 meter beide kanten het bos in gemeten, ook deze afstanden worden met piketpaaltjes gemarkeerd. Hierdoor ontstaat een doorsnede van in totaal 10 meter (figuur 14).

Op deze doorsnede wordt wederom om de 20 centimeter een meting gedaan. Dit houdt in dat er per doorsnede 51 metingen worden verricht (25 beide kanten op en eentje precies in het midden) (figuur 15).



Figuur 14, de ligging van de doorsneden dwars over de dunningspaden.



Figuur 15, schematische lay-out van de 51 metingen per doorsnede over een dunningspad. Aan de linkerkant zijn de eerste 17 metingen weggelaten om de afbeelding duidelijk te houden. De afstand tussen elke meting is 20 centimeter. 80 centimeter onder maaiveld is weergegeven omdat dit de maximale diepte is tot waar met de penetrologger kan worden gemeten.

Uitvoeren meting

Zodra de doorsnede is voorbereid, hetzij een op een onaangetaste bodem of over een pad, is het tijd om daadwerkelijk indringingsweerstandsmetingen te verrichten. De SSNIP wordt op de gewenste locatie neergezet. Rond de dunningspaden komt het regelmatig voor dat de grond niet waterpas is. Metingen met de penetrologger dienen echter wel waterpas uitgevoerd te worden. Om dit op te lossen zijn blokken onder de SSNIP gelegd waar het nodig was. Zodra de SSNIP helemaal naar wens is gepositioneerd kan de meting worden uitgevoerd.

Wanneer de meting is uitgevoerd en opgeslagen kan de SSNIP met de penetrologger worden verplaatst naar het volgende meetpunt van de doorsnede. Dit proces wordt herhaald tot alle metingen van een doorsnede zijn uitgevoerd.

Doorsnede opruimen

Zodra alle metingen van de doorsnede zijn uitgevoerd wordt de doorsnede weer opgeruimd. De piketpaaltjes worden verwijderd en de strooisellaag wordt weer hersteld. Wanneer de doorsnede is

opgeruimd kan weer een nieuwe doorsnede worden voorbereid, indien er nog tijd over is op de dag, of alle apparatuur kan worden opgeruimd.

Plan uitlezen met PenetroViewer

Na een dag meten worden de opgeslagen gegevens uit de penetrologger uitgelezen met de PenetroViewer. In de PenetroViewer wordt per plan een visuele weergave gegeven van alle indringingsweerstandsmetingen die op de dag zijn uitgevoerd.

Gegevens opslaan als tekst

Voor de gegevensanalyse zijn de gemeten waarden belangrijk. Daarom moeten deze waarden als tekst worden opgeslagen zodat deze in Excel of SPSS kunnen worden geanalyseerd.

Zodra de gegevens zijn opgeslagen als tekst kan de onderzoeker ervoor kiezen weer een nieuw plan te maken in de PenetroViewer (stap 1). Aan het einde van het veldwerk gaat de onderzoeker over op het analyseren van de gegevens (stap 3).

2.2.2 Onderbouwing

De keuze voor het maken van dwarsprofielen wordt ondersteund door de onderzoeken van Schäffer (2002) en Schack-Kirchner (2010) (figuur 5 en figuur 6).

De gebruikte methodiek bij het gegevens verzamelen met de penetrologger wordt ondersteund door de handleiding van de penetrologger (Royal Eijkelpark, 2022).

Het onderzoek wijkt af van de inmiddels ingetrokken Nederlandse norm voor elektrische sonderingen (Nederlands Normalisatie-instituut, 1996). Deze norm raadt een onderlinge afstand aan van ten minste 100 centimeter tussen metingen. Door het streven naar doorsneden met hoge resolutie is de keuze gemaakt af te wijken van deze norm. Bij het verzamelen van de gegevens is een onderlinge afstand van 20 centimeter gehanteerd. Bij deze onderlinge afstand was het mogelijk om een groot aantal metingen te doen, zonder het risico te lopen dat de resolutie van de doorsneden te laag zou worden.

In het tijdsbestek dat vrij was voor het veldwerk zijn 42 doorsneden gemaakt: 21 van onaangetaste bodem en 21 dwars over dunningspaden.

2.3 Gegevens analyseren

Zodra de gegevens zijn verzameld is het tijd om deze gegevens te gaan analyseren. Het doel van de gegevensanalyse is het verkrijgen van resultaten aan de hand waarvan de deelvragen en de onderzoeksvraag beantwoord kan worden.

2.3.1 Methodiek

Ook de gegevensanalyse is opgedeeld in meerdere sub-stappen (figuur 11). Hieronder worden alle sub-stappen besproken. In Bijlage 4 wordt het gebruik van Excel en SPSS gedetailleerd uitgelegd.

Gegevens openen in Excel

Alle gegevens zijn na het verzamelen opgeslagen als tekstbestanden. Alvorens de analyse van de gegevens daadwerkelijk plaats kan vinden, moeten alle gegevens in één bestand geplaatst worden. Tijdens dit onderzoek is de keuze gemaakt om dit te doen in een Excel-bestand.

Gegevens sorteren

Om de gegevensanalyse uit te voeren, dienen alle gegevens gesorteerd te worden. In Excel is voor alle gegevens een overzicht gemaakt. In dit overzicht heeft elke gemeten waarde, dus elke centimeter die is gemeten, een rij. In totaal bedraagt de totale dataset 103.761 rijen. In het overzicht zijn per rij de volgende waarden in kolommen weergegeven:

- Dag van de meting
- Metingnummer
- Bodemverdichting (MPa)
- Diepte (0 tot en met 80)
- Vochtgehalte (%)
- Afstand tot hart van het dunningspad (-500 cm, -480 cm, -460 cm enzovoorts tot +500 cm én “onaangetast” voor de metingen in de doorsneden over onaangetaste bodems)
- Doorsnede nummer (Pad 1 tot en met Pad 21 en Onaangetast 1 tot en met Onaangetast 21)
- Dieptecategorie (1 tot en met 8. Categorie 1 is van 0 tot en met 10 centimeter, categorie 2 van 11 tot en met 20 enzovoorts tot categorie 8 van 71 tot en met 80 centimeter).

De gesorteerde gegevens in deze Excel-tabel vormen de basis voor de statistische gegevensanalyse in SPSS. Bovendien zijn de gegevens gedeeld met L. Akhmetzyanov. Akhmetzyanov heeft geholpen met de gegevensanalyse en heeft daarbij R gebruikt. R is een programmeertaal specifiek voor statistisch onderzoek.

Gemiddelden berekenen

De manier waarop de visuele beschrijving plaatsvindt, is door doorsneden te creëren van de gemiddelde MPa waarde per afstand én diepte, zoals Schäfer (2002) en Schack-Kirchner (2010) dat voor beworteling en zuurstofgehalte hebben gedaan.

Gegevens exporteren naar SPSS

De gesorteerde Excel-tabel dient naar SPSS (IBM, 2023) geëxporteerd te worden zodat er een statistische gegevensanalyse kan plaatsvinden.

Gegevens opschonen en filteren per dieptecategorie

Voor de gegevensanalyse maakt het niets uit of een meting is gemeten op -500 centimeter of +500 centimeter van het hart van het dunningspad (dit is immers afhankelijk van de kant waar is begonnen met de metingen van de betreffende doorsnede). Voor elke afstand van het hart van het dunningspad dienen deze waarden dus opgeschoond te worden. Een andere variabele die opgeschoond dient te worden is de MPa. De metingen gaan zelden tot een diepte van 80 centimeter, omdat de penetrologer vanzelf stopt op een diepte tussen 75 en 80 centimeter onder maaiveld. De dieptes waarvan geen waarden worden verzameld worden echter door de penetrologer vanzelf ingevuld als -1.

Het beantwoorden van deelvraag 3 vraagt om een gegevensanalyse van de verzamelde gegevens per dieptecategorie. De dataset dient dus gesplitst te worden in 8 datasets, één voor elke dieptecategorie.

Gegevens per dieptecategorie analyseren

De beantwoording van deelvraag 1 en deelvraag 2 is beschrijvend. Per dieptecategorie zijn in SPSS boxplots gemaakt die de gemiddelde indringingsweerstand per locatie weergeven.

Voor het beantwoorden van deelvraag 2 worden ook resultaten gebruikt uit de gegevensanalyse van L. Akhmetzyanov, docent/onderzoeker op Hogeschool Van Hall Larenstein. Er is gebruik gemaakt van een “Generalized Additive Model” (GAM) waarin de invloed van diepte en afstand tot het hart van het dunningspad op de indringingsweerstand wordt weergegeven. Deze GAM is gemaakt met gebruik van R.

In alle 8 datasets, dus per dieptecategorie, wordt dezelfde statistische gegevensanalyse uitgevoerd in SPSS, namelijk de enkelvoudige variantieanalyse (One-Way ANOVA). Om te achterhalen op welke locaties de MPa significant verschilt met de MPa van een onaangetaste bodem is het nodig gebruik te

maken van de post-hoc-Tukey-toets. Uit de post-hoc-Tukey-toets wordt het verschil tussen verschillende groepen uitgedrukt in een p-waarde. Uit resultaten van de post-hoc-Tukey-toets wordt de significantie in verschil tussen gemiddelden van de groep “Onaangetast” met alle andere groepen geselecteerd. Deze gegevens zeggen per groep of de indringingsweerstand significant verschilt met de indringingsweerstand in een onaangetaste bodem en dus of er sprake is van bodemverdichting of niet. Er wordt gesproken van een significant verschil wanneer de p-waarde 0,05 of kleiner is.

Ook worden uit de post-hoc-Tukey-toets subsets gegenereerd. Deze subsets groeperen de gemiddelden van verschillende afstanden in groepen met ongeveer dezelfde waarden. Een waarde kan in meerdere subgroepen worden ingedeeld. Binnen deze subgroepen is er geen statistisch significant verschil tussen de grootste en de kleinste waarde. Tussen verschillende subsets is daarentegen wel een significant verschil. Wanneer twee afstanden dus geen enkele subset met elkaar delen, zijn deze significant verschillend met elkaar.

Resultaten opslaan in Excel

Wanneer de ANOVA alle dieptecategorieën heeft plaatsgevonden, kunnen de resultaten overgezet worden in Excel. Voor elke dieptecategorie wordt de significantie tussen onaangetaste bodem en alle andere groepen gekopieerd en in Excel geplaatst. Zo ontstaat een overzicht van waar in de bodem de gemiddelde MPa significant verschilt met de MPa van een onaangetaste bodem in dezelfde dieptecategorie. Aan de hand van deze resultaten wordt een uitspraak gedaan over het verschil in indringingsweerstand tussen onaangetaste bodem en onder dunningspaden.

2.3.2 Onderbouwing

De methode die is gebruik voor de statistische analyse is de ANOVA met post-hoc-Tukey-toetst. De keuze voor deze statistische analyse is gemaakt in overleg met U. Sass-Klaassen en L. Akhmetzyanov (persoonlijke communicatie, oktober 2023). In SPSS wordt deze methode One-Way ANOVA genoemd. Een ANOVA is een variantieanalyse waarbij de gemiddelden van 2 of meer groepen met elkaar worden vergeleken. De vergelijking die in dit onderzoek gemaakt moest worden was de vergelijking tussen de indringingsweerstand in onaangetaste bodem en (mogelijk) aangetaste bodem, omdat zodoende in kaart wordt gebracht waar wél en waar géén significant verschil is waargenomen.

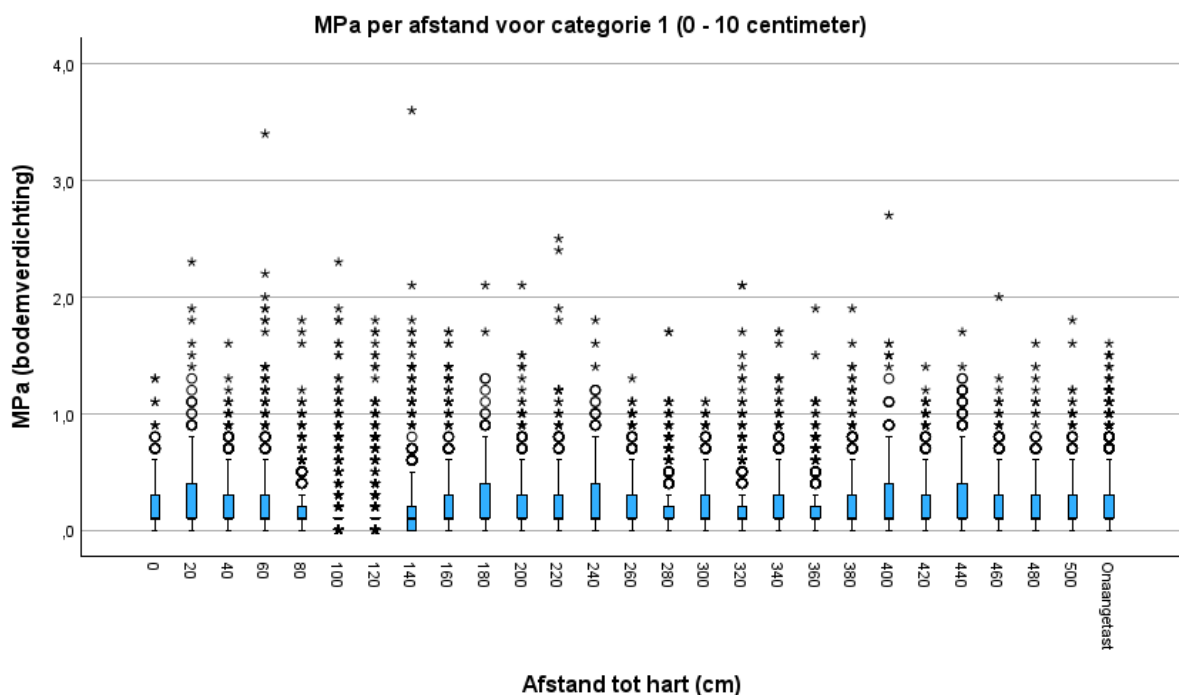
Zoals genoemd geeft deze methode een overzicht van de invloedssfeer van zware machines op verschillende afstanden van het dunningspad, maar niet direct op verschillende diepten. Om ook de invloedssfeer van deze zware machines in beeld te krijgen, was het nodig om de ANOVA voor verschillende dieptes uit te voeren. De keuze is hierbij gevallen op het uitvoeren van de ANOVA voor dieptecategorieën. In overleg met L. Akhmetzyanov (persoonlijke communicatie, december 2023), is besloten om per 10 centimeter een dieptecategorie te maken waarmee per categorie de statistische gegevensanalyse uitgevoerd zou worden. Bij deze dieptecategorieën zijn de resultaten uit de analyse betrouwbaarder dan wanneer elke centimeter in diepte apart geanalyseerd zou worden, omdat het aantal gegevens per analyse groter is en er dus een kleinere kans is op het opdrijven van de p-waarden. De analyse per centimeter is echter wel uitgevoerd en is terug te vinden in Bijlage 3.

3. Resultaten

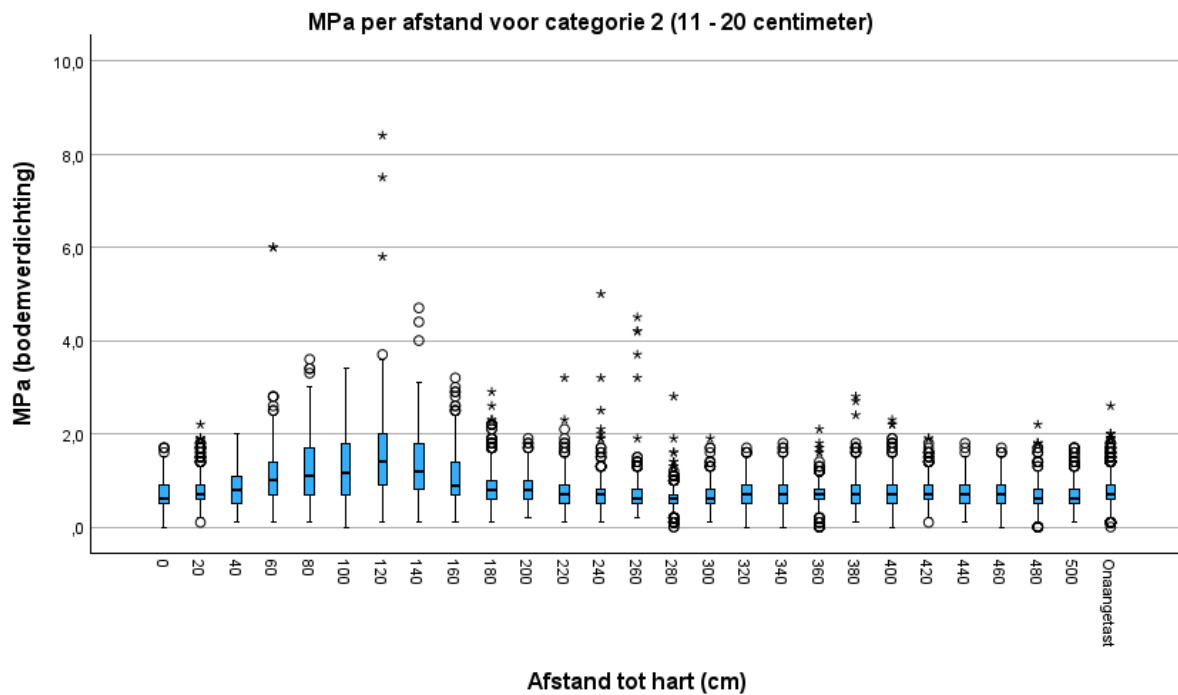
De resultaten zijn het product van de eerder uitgevoerde gegevensverzameling, gevolgd door de gegevensanalyse. De presentatie van de resultaten beperkt zicht tot het weergegeven van de waarden. De resultaten worden in dit onderzoek dus nog niet geïnterpreteerd en er worden nog geen conclusies getrokken. Deze zijn weergegeven in 4. Conclusies. Wel worden in dit hoofdstuk de drie verschillende deelvragen gebruikt om de lezer een overzichtelijke presentatie te geven van de resultaten, omdat zo duidelijk wordt gemaakt welke resultaten van toepassing zijn bij het beantwoorden van welke deelvraag.

3.1 Boxplots

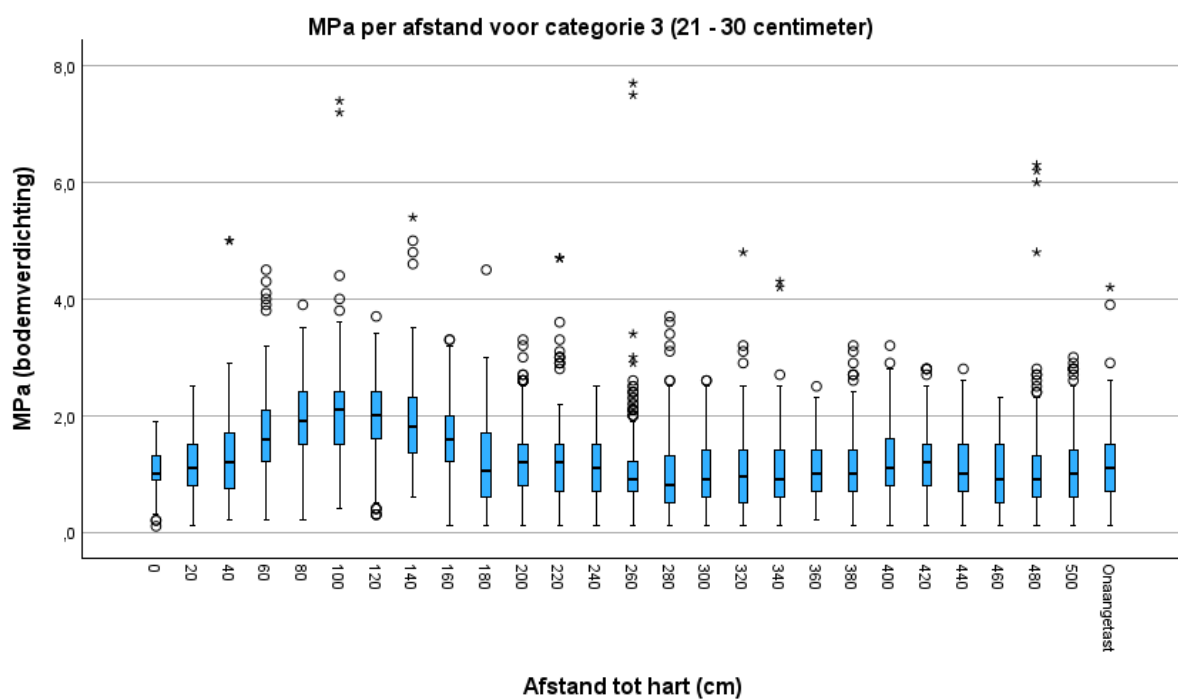
Alvorens de resultaten per deelvraag worden gepresenteerd, worden eerst de boxplots per dieptecategorie weergegeven (zie figuur 16 tot en met figuur 23). Helemaal links in de figuren zijn de boxplots voor afstand 0 centimeter van het hart van het dunningspad. Elk volgend boxplot binnen het figuur geeft de gegevens weer voor 20 centimeter verder van het hart van het dunningspad, tot 500 centimeter. Helemaal rechts in de figuren zijn de gegevens voor de onaangetaste bodem te zien. In de boxplots zijn rondjes en sterretjes te zien, dit zijn uitbijters. Hierbij zijn sterretjes extreme uitbijters. Deze extreme uitbijters worden veroorzaakt doordat bij de meting de penetrologger op een boomwortel of kei is gestuit. Op de y-as van de boxplots is de bodemverdichting in MPa weergegeven. Hoe hoger deze is, hoe meer de bodem is verdicht. De schaal is niet in alle boxplots hetzelfde, omdat in de diepere bodemlagen de indringingsweerstand van nature hoger is. De afstanden 60 tot en met 160 centimeter afstand tot het hart zijn in deze boxplots interessant om naar te kijken, omdat dit de locaties direct onder de rijsporen zijn.



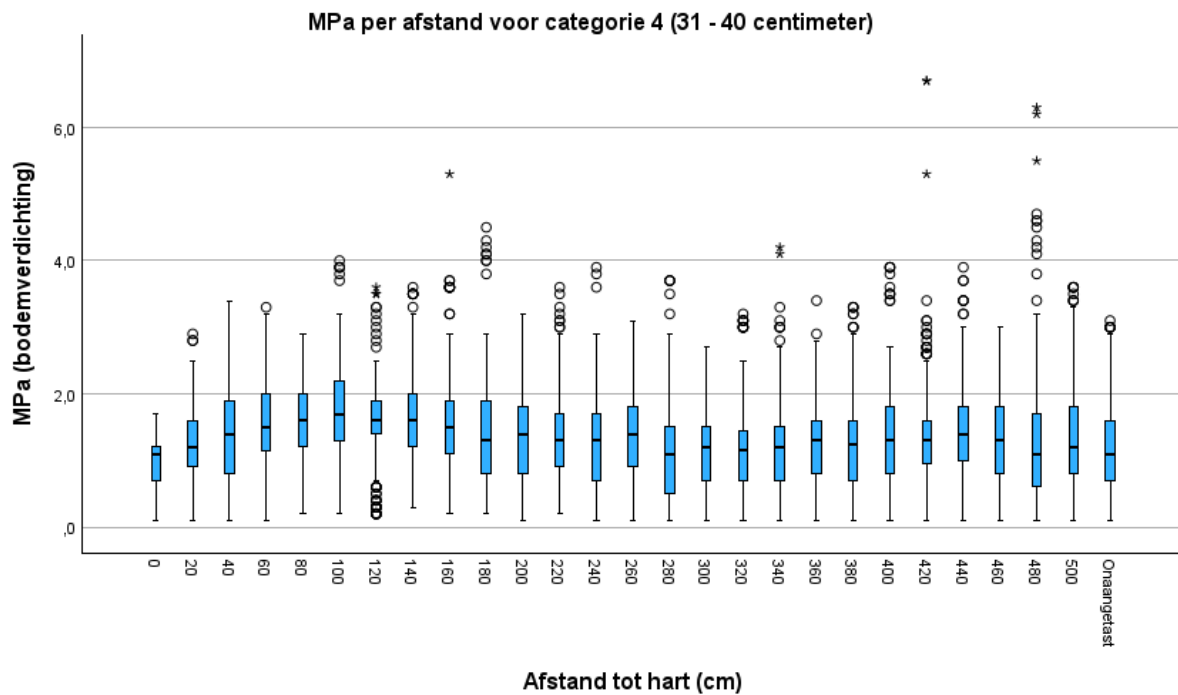
Figuur 16, boxplots voor dieptecategorie 1. De gemeten indringingsweerstand zijn laag, omdat de meeste metingen in de strooisellaag hebben plaatsgevonden.



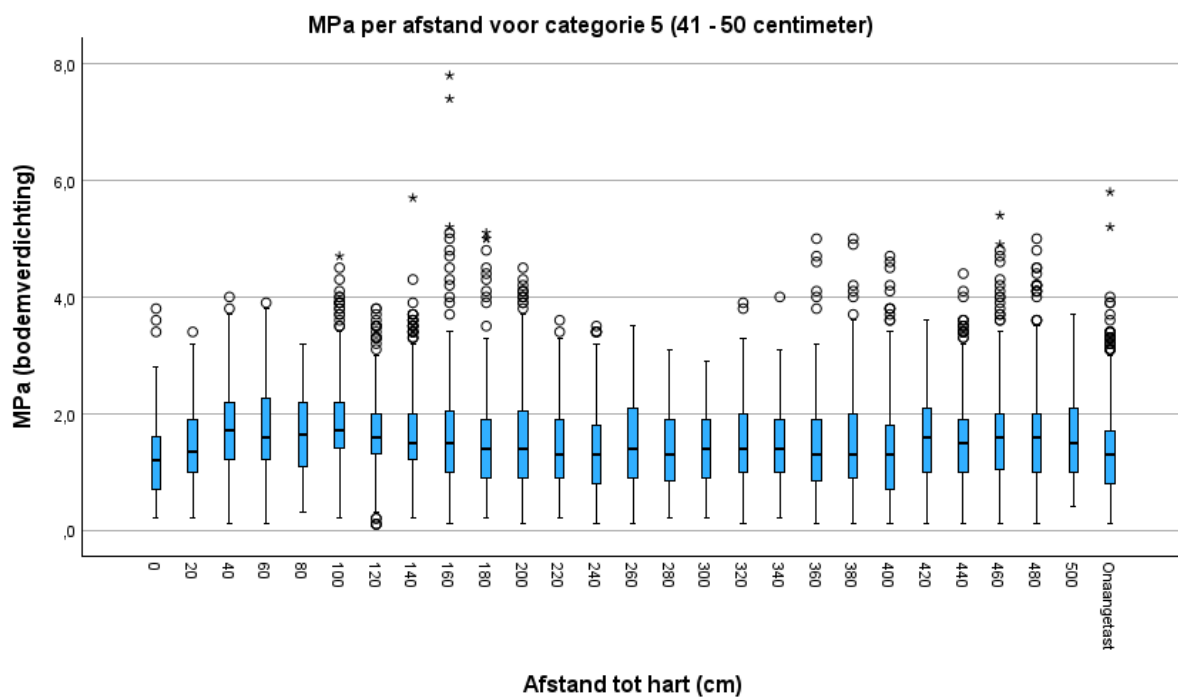
Figuur 17, boxplots voor dieptecategorie 2. Van 60 tot 160 centimeter afstand van het hart zijn duidelijk hogere waarden gemeten dan op andere locaties. Uitbijters zijn te verklaren door de aanwezigheid van boomwortels.



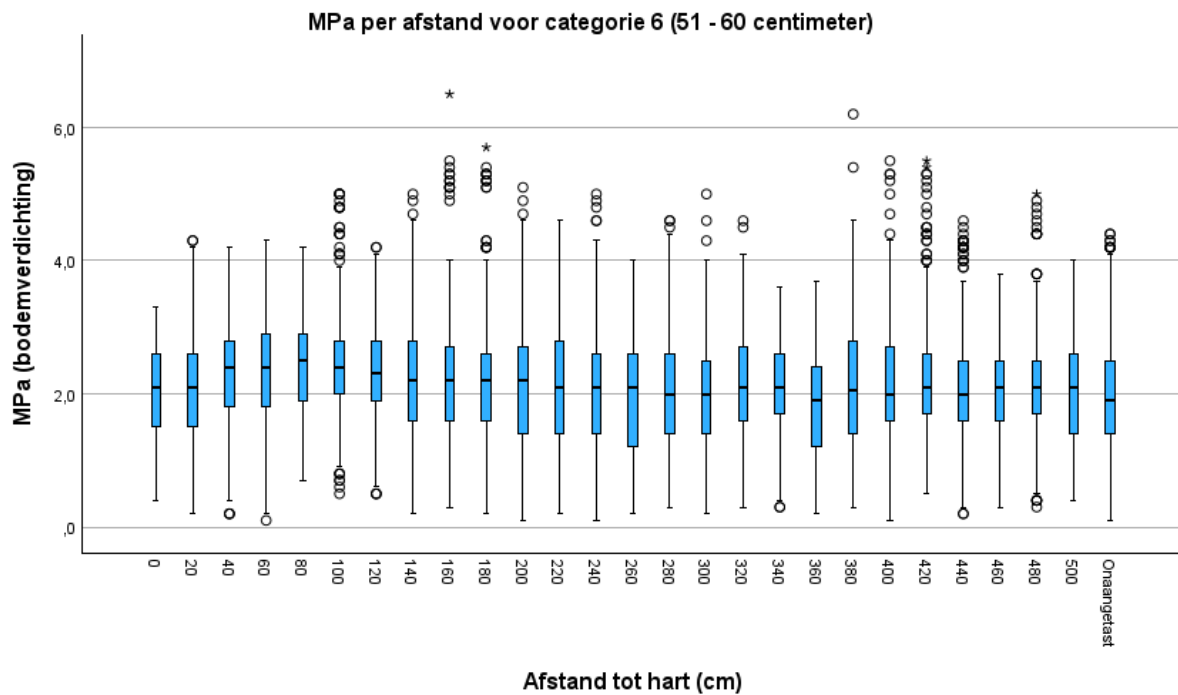
Figuur 18, boxplots voor dieptecategorie 3. Van 60 tot 160 centimeter afstand van het hart zijn duidelijk hogere waarden gemeten dan op andere locaties.



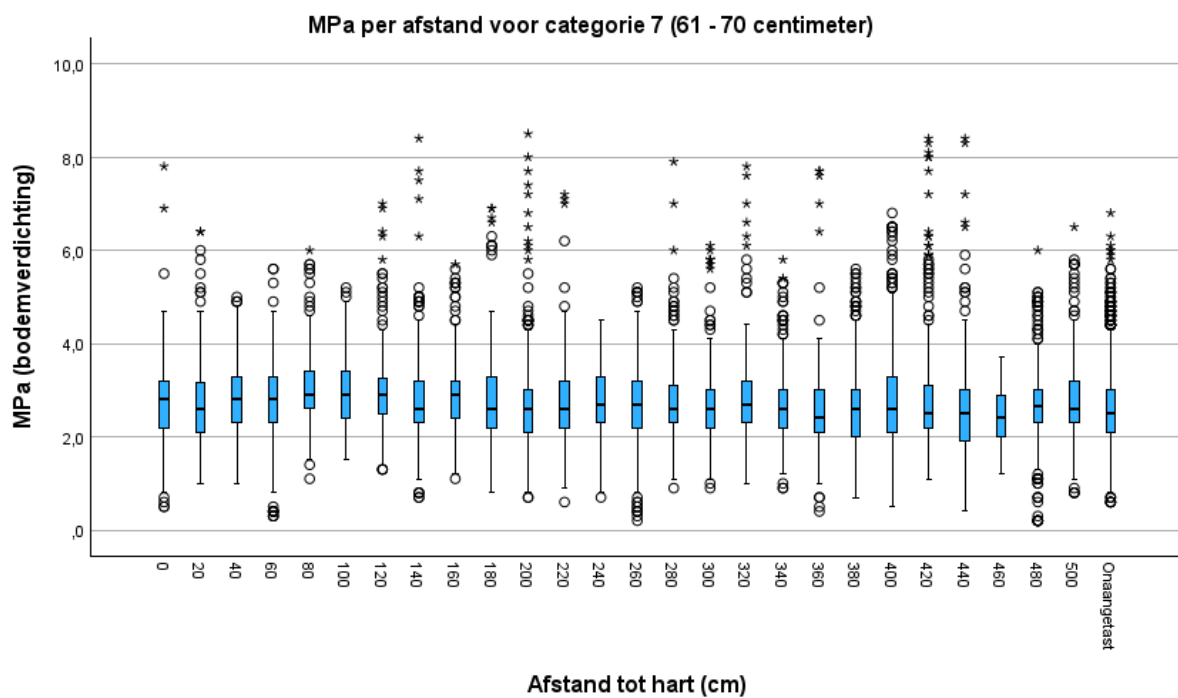
Figuur 19, boxplots voor dieptecategorie 4. Van 60 tot 160 centimeter afstand van het hart zijn nog wel hogere waarden gemeten dan op andere locaties.



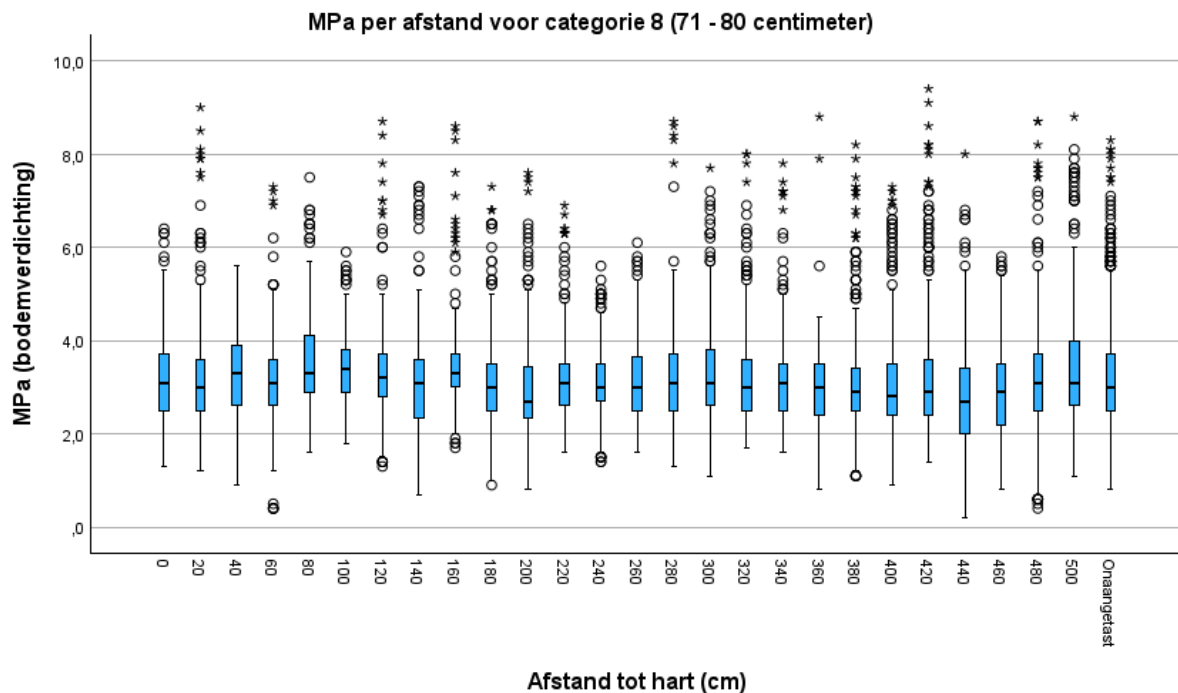
Figuur 20, boxplots voor dieptecategorie 5. Van 60 tot 160 centimeter afstand van het hart zijn nog wel hogere waarden gemeten dan op andere locaties.



Figuur 21, boxplots voor dieptecategorie 6. Er is geen specifieke locatie waar hogere indringingsweerstand worden gemeten. De van nature verdichte bodemlaag is bereikt.



Figuur 22, boxplots voor dieptecategorie 7. Er is geen specifieke locatie waar hogere indringingsweerstand worden gemeten. De van nature verdichte bodemlaag is bereikt.



Figuur 23, boxplots voor dieptecategorie 8. Er is geen specifieke locatie waar hogere indringingsweerstand worden gemeten. De van nature verdichte bodemlaag is bereikt.

3.2 Resultaten per deelvraag

Vervolgens worden resultaten weergegeven die specifiek van belang zijn voor de deelvragen.

1. Hoe verloopt de indringingsweerstand in een onverstoord bodemprofiel tot 80 centimeter diepte?

In figuur 25 is in een doorsnede het verloop van de gemiddelde indringingsweerstand in onverstoorde bodemprofielen tot 80 centimeter diepte te zien. De doorsnede is opgemaakt aan de hand van de kleurschaal uit figuur 24. Alle 21 uitgevoerde doorsneden zijn terug te vinden in Bijlage 1.

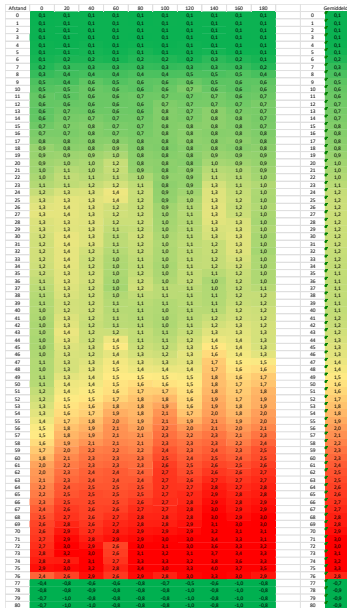
Alle cellen opmaken op basis van de waarden:

Opmaakstijl:

	Minimum	Middelpunt	Maximum
Type:	Getal	Getal	Getal
Waarde:	0	1,5	3
Kleur:	Groen	Geel	Rood

Voorbeeld:

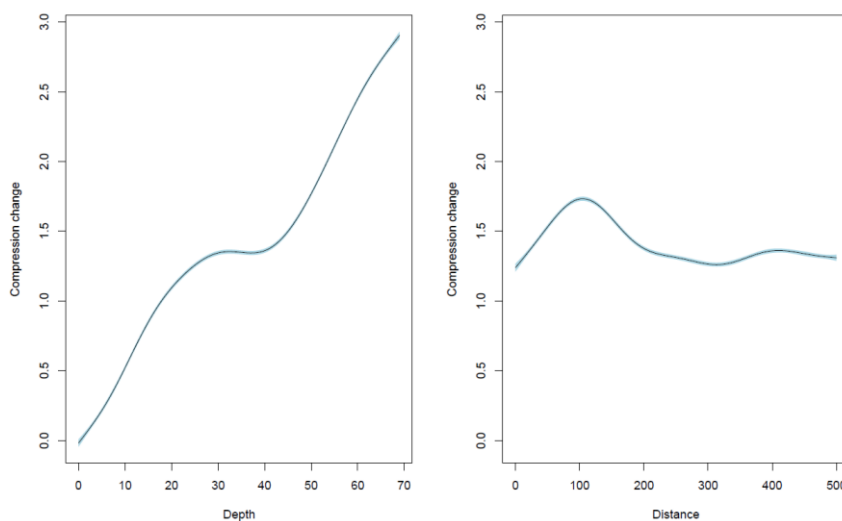
Figuur 24, kleurschaal voor de opmaak van de waarden in de doorsneden. Deze waarden zijn gekozen omdat bij een MPa van 1,5 de wortelactiviteit afneemt, en bij een MPa van 3 is beworteling niet meer mogelijk. Waarden onder 0 (die in de diepste lagen aanwezig zijn ten gevolge van het automatisch stoppen van de penetrolgger) zullen ook groen zijn en waarden groter dan 3 zullen ook rood zijn.



Figuur 25, links in de afbeelding de gemiddelde 180 centimeter lange doorsnede (afstanden op de x-as) van 0 tot 80 centimeter diepte (diepte op de y-as) van de 21 uitgevoerde doorsneden in onaangetaste bodem en rechts de gemiddelde indringingsweerstand per diepte in een onaangetaste bodem. Lage MPa's zijn groen en hoge MPa's zijn rood. Een hogere MPa betekent dat de bodem meer verdicht is. Vanaf een diepte van 76 centimeter zijn de gemiddelden niet representatief, omdat de penetrologger vanaf die diepte vaak automatisch stopt.

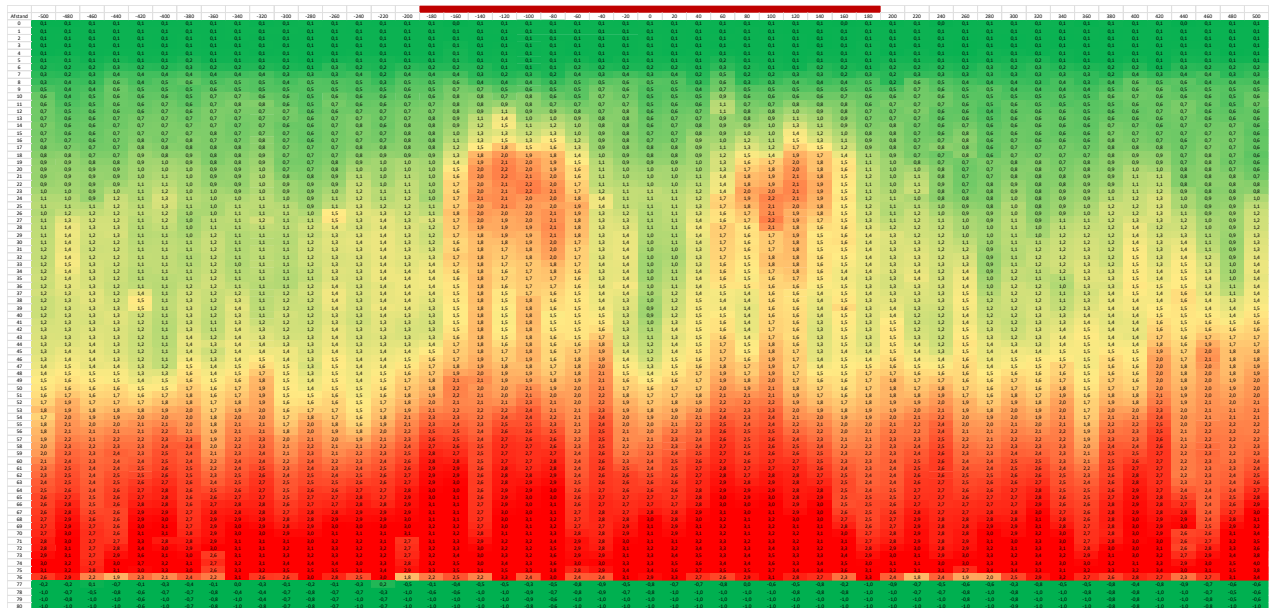
2. Hoe verloopt de indringingsweerstand in een bodem van 0 tot 500 centimeter van het hart van een dunningspad tot 80 centimeter diepte?

In het onderzoek wordt verwacht dat de indringingsweerstand verandert op verschillende diepten in de bodem en op verschillende afstanden van het hart van het dunningspad. Dit is onderzocht met een "Generalized Additive Model" met behulp van L. Akhmetzyanov. Het model is weergegeven in figuur 26. In de linker grafiek in figuur 26 is te zien dat indringingsweerstand toeneemt met diepte van 0 tot 30 centimeter, vervolgens tot 40 centimeter diepte ongeveer gelijk blijft en vervolgens zeer sterk stijgt. In de rechter grafiek in figuur 26 is te zien dat de indringingsweerstand toeneemt van 0 tot 100 centimeter afstand van het hart van het dunningspad, vervolgens tot 200 centimeter afstand weer afneemt tot hetzelfde niveau als op 0 centimeter en daarna min of meer gelijk blijft.



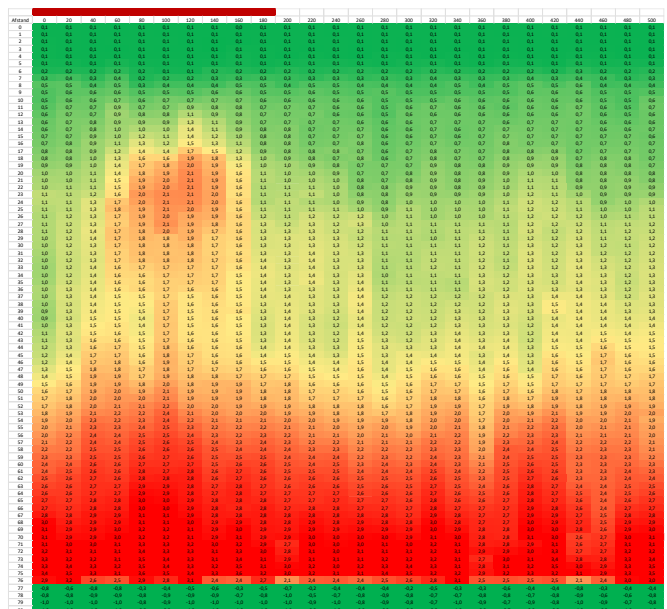
Figuur 26, Generalized Additive Model door L. Akhmetzyanov met R. Op de y-assen de indringingsweerstand. In de linker grafiek met diepte in centimeter op de x-as en in de rechter grafiek afstand tot het hart van het dunningspad in centimeter op de x-as. De grafieken zijn enkel voor de gegevens van de doorsneden over dunningspaden.

In figuur 27 en figuur 28 zijn in doorsneden het verloop van de gemiddelde indringingsweerstand onder en tot een afstand van 500 centimeter van het hart van dunningspaden tot 80 centimeter diepte te zien. In figuur 27 is hierbij de gehele doorsnede weergegeven. Deze doorsnede heeft een lengte van 10 meter. Links in de figuur begint de doorsnede op 5 meter van het hart van het dunningspad (-500) en rechts in het figuur eindigt deze ook weer op 5 meter van het hart van het dunningspad (500). Boven in de figuur is de ligging van het dunningspad weergegeven met een bruine balk. Lage MPa's zijn groen en hoge MPa's zijn rood. Een hogere MPa betekent dat de bodem meer verdicht is. De doorsnede is opgemaakt aan de hand van de kleurschaal uit figuur 24 op pagina 32. Alle 21 individuele doorsneden zijn terug te vinden in Bijlage 2.



Figuur 27, de gemiddelde doorsnede tot 80 centimeter diepte van de 21 uitgevoerde doorsneden. Vanaf een diepte van 76 centimeter zijn de gemiddelden niet representatief, omdat de penetrologger vanaf die diepte vaak automatisch stopt. De rijsporen zijn te zien van -160 tot -60 en van 60 tot 160 centimeter afstand van het hart van het dunningspad.

In figuur 28 is een halve doorsnede weergegeven. In deze halve doorsnede is slechts een half dunningspad te zien, maar wel met alle gegevens van het onderzoek. Dit betekent dat ongeacht aan welke kant van het dunningspad is gemeten, alle gegevens zijn gecombineerd. De figuur begint links op een afstand van 0 centimeter van het hart van het dunningspad (0) en eindigt rechts op een afstand van 5 meter van het hart van het dunningspad (500). Boven in het figuur is van 0 tot en met 180 centimeter weer de ligging van het dunningspad weergegeven.



Figuur 28, de gemiddelde halve doorsnede tot 80 centimeter diepte van de 21 uitgevoerde doorsneden. In deze halve doorsneden zijn de afstanden gecombineerd. Dat houdt in dat ongeacht aan welke kant van het hart de meting is gedaan, de waarden zijn samengevoegd (bijvoorbeeld -500 en 500 zijn nu samen 500).

3. *Wat is het verschil tussen de indringingsweerstand op dieptes van 0 tot en met 80 centimeter onder maaiveld van onverstoorde bodemprofielen en bodemprofielen van 0 tot en met 500 centimeter afstand van het hart van een dunningspad?*

Vervolgens worden de resultaten van de ANOVA met post-hoc-Tukey-toets weergegeven. Er is sprake van een significante invloed wanneer Sig. (p) kleiner of gelijk is aan 0,05. Daarna worden de p-waarden van de post-hoc-Tukey-toets in tabelvorm getoond die de significantie weergeven tussen de locaties bij de dunningspaden en de onaangetaste bodem voor de betreffende dieptecategorie. Voor elke afstand van het hart van het dunningspad zijn de p-waarden die het verschil met onaangetaste bodem beschrijven weergegeven. Links in de tabellen is de p-waarde op 0 centimeter afstand tot het hart weergegeven. Met stappen van 20 centimeter eindigt de tabel rechts met de p-waarde van een afstand van 500 centimeter van het hart van het dunningspad. Wanneer een p-waarde gelijk of lager is dan 0,05, dan is deze in het rood weergegeven en waarden hoger dan 0,05 in het groen. Deze waarden geven een significant verschil aan. Dat houdt in dat de gemiddelde waarde op die locatie significant hoger of significant lager is dan in dezelfde dieptecategorie op onaangetaste bodem. In de statistiek wordt $p \leq 0,05$ doorgaans gebruikt als grens voor statistische significantie. Dat betekent dat je een kans van 5% accepteert dat je de onjuiste conclusie trekt. Ten slotte worden de homogene subsets die eveneens bij de post-hoc-Tukey-toets zijn bepaald. Categorieën die geen enkele subset met elkaar delen verschillen significant met elkaar. Alle afbeeldingen met resultaten worden in de bijschriften toegelicht. In tabel 1 is een overzicht te zien van de figuren en tabellen die de verschillende resultaten per dieptecategorie weergeven.

Tabel 1, verwijzing naar figuren en tabellen van verschillende resultaten per dieptecategorie.

	ANOVA	Tukey p-waarde	Tukey subsets
Categorie 1	<i>Figuur 29</i>	<i>Tabel 2</i>	<i>Figuur 30</i>
Categorie 2	<i>Figuur 31</i>	<i>Tabel 3</i>	<i>Figuur 32</i>
Categorie 3	<i>Figuur 33</i>	<i>Tabel 4</i>	<i>Figuur 34</i>
Categorie 4	<i>Figuur 35</i>	<i>Tabel 5</i>	<i>Figuur 36</i>
Categorie 5	<i>Figuur 37</i>	<i>Tabel 6</i>	<i>Figuur 38</i>
Categorie 6	<i>Figuur 39</i>	<i>Tabel 7</i>	<i>Figuur 40</i>
Categorie 7	<i>Figuur 41</i>	<i>Tabel 8</i>	<i>Figuur 42</i>
Categorie 8	<i>Figuur 43</i>	<i>Tabel 9</i>	<i>Figuur 44</i>

Categorie 1 (0 tot en met 10 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 1					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3,559	26	0,137	1,532	0,041
Within Groups	1256,283	14064	0,089		
Total	1259,842	14090			

Figuur 29, de significantie is kleiner dan 0,05, er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 2, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op geen enkele afstand significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 1	1,00	1,00	1,00	0,31	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,86	1,00	0,99	1,00

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)			
Tukey HSD _{a,b,c}			
Afstand tot hart (cm)	N	Subset	
		1	2
480	462	0,198	
80	462	0,199	0,199
300	462	0,211	0,211
120	462	0,213	0,213
360	462	0,214	0,214
460	462	0,218	0,218
100	462	0,219	0,219
500	462	0,221	0,221
280	462	0,222	0,222
260	462	0,223	0,223
200	462	0,225	0,225
0	231	0,226	0,226
Onaangetast	2310	0,226	0,226
320	462	0,227	0,227
40	462	0,227	0,227
220	462	0,233	0,233
340	462	0,233	0,233
380	462	0,234	0,234
140	462	0,235	0,235
240	462	0,235	0,235
420	462	0,235	0,235
180	462	0,236	0,236
20	462	0,246	0,246
400	462	0,253	0,253
160	462	0,254	0,254
440	462	0,261	0,261
60	462		0,272
Sig.		0,214	0,050

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,089.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 458,603.
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
c. Alpha = 0,05.

Figuur 30, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie delen de gemiddelden van alle afstanden minstens één subset met onaangetaste bodem.

Categorie 2 (11 tot en met 20 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 2					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	656,005	26	25,231	135,151	0,000
Within Groups	2386,416	12783	0,187		
Total	3042,421	12809			

Figuur 31, de significantie is kleiner dan 0,05, en er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 3, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op 40 tot en met 160, 280, 300, 480 en 500 centimeter van het hart significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 2	1,00	1,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,96	1,00	0,99	0,38	0,00	0,01	1,00	0,16	0,13	1,00	1,00	1,00	0,34	0,06	0,00	0,00

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)											
Tukey HSD _{a,b,c}											
Afstand tot hart (cm)	N	Subset									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
280	420	0,610									
480	420	0,666	0,666								
500	420	0,670	0,670								
300	420	0,672	0,672								
460	420	0,685	0,685	0,685							
360	420	0,691	0,691	0,691							
340	420	0,693	0,693	0,693							
440	420	0,700	0,700	0,700							
260	420	0,701	0,701	0,701							
0	210	0,716	0,716	0,716	0,716						
240	420		0,729	0,729	0,729						
320	420		0,732	0,732	0,732						
380	420		0,745	0,745	0,745	0,745					
220	420		0,752	0,752	0,752	0,752					
420	420		0,765	0,765	0,765	0,765	0,765				
Onaangetast	2100		0,769	0,769	0,769	0,769	0,769				
400	420		0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772			
20	420			0,791	0,791	0,791	0,791				
200	420				0,816	0,816	0,816				
180	420					0,847	0,847				
40	420						0,867				
160	420							1,102			
60	420							1,109			
80	420								1,261		
100	420								1,266		
140	420								1,350		
120	420									1,524	
Sig.		0,085	0,079	0,085	0,139	0,124	0,124	1,000	0,352	1,000	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,187.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 416,912.
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
c. Alpha = 0,05.

Figuur 32, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie deelt het gemiddelde van afstand 280 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant lager is. Verder delen in deze categorie de gemiddelden van 40 tot en met 160 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant hoger zijn.

Categorie 3 (21 tot en met 30 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 3					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1211,331	26	46,590	127,802	0,000
Within Groups	4659,983	12783	0,365		
Total	5871,313	12809			

Figuur 33, de significantie is kleiner dan 0,05, er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 4, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op 40 tot en met 160, 280 tot en met 340, 460 en 480 centimeter van het hart significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 3	0,99	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,18	0,00	0,01	0,00	0,00	0,14	0,89	0,99	1,00	1,00	0,00	0,05	0,63

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)											
Tukey HSD _{a,b,c}											
Afstand tot hart (cm)	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
280	420	0,937									
320	420	0,986	0,986								
460	420	1,000	1,000	1,000							
340	420	1,002	1,002	1,002							
300	420	1,010	1,010	1,010	1,010						
480	420	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025					
360	420	1,036	1,036	1,036	1,036	1,036	1,036				
260	420	1,039	1,039	1,039	1,039	1,039	1,039				
500	420	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060			
0	210	1,065	1,065	1,065	1,065	1,065	1,065	1,065			
380	420	1,073	1,073	1,073	1,073	1,073	1,073	1,073			
440	420		1,105	1,105	1,105	1,105	1,105	1,105			
240	420		1,130	1,130	1,130	1,130	1,130	1,130	1,130		
Onaangetast	2100			1,145	1,145	1,145	1,145	1,145	1,145		
20	420			1,146	1,146	1,146	1,146	1,146	1,146		
420	420				1,161	1,161	1,161	1,161	1,161		
200	420				1,164	1,164	1,164	1,164	1,164		
180	420					1,177	1,177	1,177	1,177		
220	420						1,191	1,191	1,191		
400	420							1,201	1,201		
40	420								1,284		
160	420									1,608	
60	420									1,674	
140	420										1,850
80	420										1,890
120	420										1,989
100	420										1,997
Sig.		0,192	0,113	0,097	0,050	0,061	0,050	0,133	0,053	0,999	0,092

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,365.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 416,912.
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
c. Alpha = 0,05.

Figuur 34, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie delen de gemiddelden van afstand 280 en 320 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant lager zijn. Verder delen in deze categorie de gemiddelden van 60 tot en met 160 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant hoger zijn.

Categorie 4 (31 tot en met 40 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 4					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	388,163	26	14,929	34,646	0,000
Within Groups	5508,376	12783	0,431		
Total	5896,539	12809			

Figuur 35, de significantie is kleiner dan 0,05, er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 5, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op 40 tot en met 220, 260, 400 tot en met 460 en 500 centimeter van het hart significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 4	0,08	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73	0,00

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)									
Tukey HSD _{a,b,c}									
Afstand tot hart (cm)	N	Subset							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0	210	0,976							
280	420	1,113	1,113						
Onaangetast	2100		1,145	1,145					
300	420		1,146	1,146					
320	420		1,159	1,159	1,159				
340	420		1,169	1,169	1,169				
480	420		1,233	1,233	1,233	1,233			
380	420		1,236	1,236	1,236	1,236			
360	420		1,241	1,241	1,241	1,241			
20	420		1,248	1,248	1,248	1,248			
240	420		1,268	1,268	1,268	1,268			
400	420			1,299	1,299	1,299			
500	420			1,302	1,302	1,302			
460	420			1,309	1,309	1,309			
420	420				1,324	1,324			
200	420					1,343			
220	420					1,347			
180	420					1,355			
260	420					1,360			
440	420						1,372		
40	420					1,388	1,388		
160	420						1,539	1,539	
60	420							1,575	1,575
80	420							1,598	1,598
140	420							1,632	1,632
120	420							1,647	1,647
100	420								1,714
Sig.		0,332	0,118	0,068	0,063	0,119	0,057	0,816	0,300

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,431.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 416,912.
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
c. Alpha = 0,05.

Figuur 36, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie deelt het gemiddelde van afstand 0 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant lager is. Verder delen in deze categorie de gemiddelden van 40 tot en met 220, 260, 420 en 440 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant hoger zijn.

Categorie 5 (41 tot en met 50 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 5					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	268,541	26	10,329	18,096	0,000
Within Groups	7296,082	12783	0,571		
Total	7564,623	12809			

Figuur 37, de significantie is kleiner dan 0,05, er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 6, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op 40 tot en met 200, 260, 320, 340, 380 en 420 tot en met 500 centimeter van het hart significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 5	1,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	1,00	0,00	1,00	0,94	0,03	0,00	0,98	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)												
Tukey HSD _{a,b,c}												
Afstand tot hart (cm)	N	Subset										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	210	1,259										
Onaangetast	2100	1,318	1,318									
400	420	1,356	1,356	1,356								
280	420	1,357	1,357	1,357								
240	420	1,385	1,385	1,385	1,385							
360	420	1,396	1,396	1,396	1,396	1,396						
300	420	1,403	1,403	1,403	1,403	1,403						
220	420	1,432	1,432	1,432	1,432	1,432						
20	420	1,449	1,449	1,449	1,449	1,449	1,449					
320	420		1,474	1,474	1,474	1,474	1,474	1,474				
340	420		1,492	1,492	1,492	1,492	1,492	1,492				
380	420		1,493	1,493	1,493	1,493	1,493	1,493	1,493			
260	420		1,501	1,501	1,501	1,501	1,501	1,501	1,501			
180	420		1,503	1,503	1,503	1,503	1,503	1,503	1,503			
440	420			1,535	1,535	1,535	1,535	1,535	1,535	1,535		
200	420			1,545	1,545	1,545	1,545	1,545	1,545	1,545		
420	420				1,568	1,568	1,568	1,568	1,568	1,568	1,568	
480	420				1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575
500	420					1,587	1,587	1,587	1,587	1,587	1,587	1,587
80	420						1,630	1,630	1,630	1,630	1,630	1,630
460	420						1,641	1,641	1,641	1,641	1,641	1,641
160	420							1,643	1,643	1,643	1,643	1,643
140	420							1,658	1,658	1,658	1,658	1,658
120	420								1,686	1,686	1,686	1,686
40	420									1,717	1,717	1,717
60	420										1,740	1,740
100	420											1,845
Sig.		0,062	0,083	0,067	0,061	0,057	0,055	0,088	0,053	0,098	0,175	0,073

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,571.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 416,912.
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
c. Alpha = 0,05.

Figuur 38, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie delen de gemiddelden van 40 tot en met 200 en 420 tot en met 500 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant hoger zijn.

Categorie 6 (51 tot en met 60 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 6					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	298,729	26	11,490	16,406	0,000
Within Groups	8947,488	12776	0,700		
Total	9246,217	12802			

Figuur 39, de significantie is kleiner dan 0,05, er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 7, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op 40 tot en met 200, 320, 340, 380 tot en met 420 en 480 centimeter van het hart significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 6	1,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,48	1,00	1,00	1,00	0,04	0,03	0,98	0,00	0,00	0,00	0,49	0,10	0,01	0,45

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)											
Tukey HSD _{a,b,c}											
Afstand tot hart (cm)	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
360	420	1,848									
Onaangetast	2100	1,933	1,933								
260	420	1,972	1,972	1,972							
300	420	1,978	1,978	1,978							
280	420	1,990	1,990	1,990							
0	210	2,016	2,016	2,016	2,016						
440	420	2,059	2,059	2,059	2,059	2,059					
240	420	2,059	2,059	2,059	2,059	2,059					
500	413	2,062	2,062	2,062	2,062	2,062					
220	420		2,083	2,083	2,083	2,083					
20	420		2,087	2,087	2,087	2,087					
460	420		2,089	2,089	2,089	2,089					
320	420		2,103	2,103	2,103	2,103	2,103				
340	420		2,104	2,104	2,104	2,104	2,104				
480	420		2,117	2,117	2,117	2,117	2,117	2,117			
200	420			2,151	2,151	2,151	2,151	2,151	2,151		
380	420			2,154	2,154	2,154	2,154	2,154	2,154		
400	420			2,172	2,172	2,172	2,172	2,172	2,172		
160	420				2,210	2,210	2,210	2,210	2,210	2,210	
180	420				2,213	2,213	2,213	2,213	2,213	2,213	
140	420					2,241	2,241	2,241	2,241	2,241	
420	420					2,251	2,251	2,251	2,251	2,251	
60	420						2,313	2,313	2,313	2,313	2,313
40	420							2,319	2,319	2,319	2,319
120	420								2,357	2,357	2,357
80	420									2,390	2,390
100	420										2,474
Sig.		0,050	0,233	0,111	0,123	0,159	0,063	0,098	0,080	0,271	0,516

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,700.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 416,652.
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
c. Alpha = 0,05.

Figuur 40, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie delen de gemiddelden van 40 tot en met 200 en 380 tot en met 420 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant hoger zijn.

Categorie 7 (61 tot en met 70 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 7					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	171,011	26	6,577	8,924	0,000
Within Groups	9413,893	12772	0,737		
Total	9584,905	12798			

Figuur 41, de significantie is kleiner dan 0,05, er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 8, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op 80 tot en met 120, 160, 320, 400 en 460 centimeter van het hart significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 7	0,99	1,00	0,29	0,10	0,00	0,00	0,00	0,39	0,02	0,66	1,00	0,83	0,97	1,00	1,00	1,00	0,03	1,00	1,00	1,00	0,00	0,31	1,00	0,01	1,00	0,34

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)							
Tukey HSD _{a,b,c}							
Afstand tot hart (cm)	N	Subset					
		1	2	3	4	5	6
460	420	2,450					
440	419	2,567	2,567				
360	420	2,571	2,571				
Onaangetast	2100	2,642	2,642	2,642			
380	420	2,659	2,659	2,659			
300	420	2,662	2,662	2,662			
480	420	2,664	2,664	2,664			
340	420		2,677	2,677			
260	420		2,688	2,688			
280	420		2,697	2,697			
20	420		2,704	2,704	2,704		
200	420		2,711	2,711	2,711		
240	420		2,733	2,733	2,733		
220	420		2,750	2,750	2,750		
0	210		2,755	2,755	2,755		
180	420		2,761	2,761	2,761	2,761	
140	420		2,777	2,777	2,777	2,777	2,777
420	420		2,782	2,782	2,782	2,782	2,782
500	410		2,782	2,782	2,782	2,782	2,782
40	420		2,784	2,784	2,784	2,784	2,784
60	420			2,802	2,802	2,802	2,802
320	420			2,817	2,817	2,817	2,817
160	420			2,827	2,827	2,827	2,827
400	420			2,856	2,856	2,856	2,856
120	420				2,918	2,918	2,918
100	420					2,981	2,981
80	420						2,993
Sig.		0,071	0,059	0,071	0,067	0,051	0,063

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,737.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 416,502.
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
c. Alpha = 0,05.

Figuur 42, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie delen de gemiddelden van 80 tot en met 120 centimeter van het hart geen enkele subset met onaangetaste bodem, omdat deze significant hoger zijn.

Categorie 8 (71 tot en met 80 centimeter)

ANOVA

ANOVA dieptecategorie 8					
MPa (bodemverdichting)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	181,470	26	6,980	5,258	0,000
Within Groups	10130,024	7631	1,327		
Total	10311,494	7657			

Figuur 43, de significantie is kleiner dan 0,05, er is dus sprake van een significante invloed.

Significantie (p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets)

Tabel 9, p-waarden voor de verschillen per afstand van het hart van het dunningspad en onaangetaste bodem. In deze categorie zijn de waarden op 80, 460 en 500 centimeter van het hart significant verschillend.

	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
Cat. 8	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,79	0,99	1,00	0,19	1,00	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,64	1,00	1,00	0,81	0,12	0,03	1,00	0,00

Homogene subsets

MPa (bodemverdichting)								
Tukey HSD _{a,b,c}								
Afstand tot hart (cm)	N	Subset						
		1	2	3	4	5	6	7
460	257	2,886						
440	242	2,912	2,912					
360	251	2,980	2,980	2,980				
200	239	3,014	3,014	3,014	3,014			
380	252	3,129	3,129	3,129	3,129	3,129		
240	249	3,132	3,132	3,132	3,132	3,132		
180	250	3,148	3,148	3,148	3,148	3,148		
60	245	3,181	3,181	3,181	3,181	3,181	3,181	
260	252	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	
140	247	3,188	3,188	3,188	3,188	3,188	3,188	3,188
Onaangetast	1264	3,189	3,189	3,189	3,189	3,189	3,189	3,189
40	247	3,207	3,207	3,207	3,207	3,207	3,207	3,207
340	256	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224
400	248	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225	3,225
220	254	3,238	3,238	3,238	3,238	3,238	3,238	3,238
280	252	3,254	3,254	3,254	3,254	3,254	3,254	3,254
0	126	3,260	3,260	3,260	3,260	3,260	3,260	3,260
20	255		3,287	3,287	3,287	3,287	3,287	3,287
320	254		3,292	3,292	3,292	3,292	3,292	3,292
480	258			3,315	3,315	3,315	3,315	3,315
120	254			3,335	3,335	3,335	3,335	3,335
300	254			3,353	3,353	3,353	3,353	3,353
420	250				3,380	3,380	3,380	3,380
100	253				3,380	3,380	3,380	3,380
160	249					3,448	3,448	3,448
80	254						3,558	3,558
500	246							3,568
Sig.		0,063	0,053	0,065	0,082	0,282	0,059	0,053
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.								
Based on observed means.								
The error term is Mean Square(Error) = 1,327.								
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 248,909.								
b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.								
c. Alpha = 0,05.								

Figuur 4, de homogene subsets gebaseerd op de gemiddelden waarden uit de post-hoc-Tukey-toets. In deze categorie delen de gemiddelden van alle afstanden minstens één subset met onaangetaste bodem.

3.3 Discussie

De uitvoering en de gekozen methodiek van het onderzoek hebben de resultaten beïnvloed. Naar beschikbare tijd en middelen is een methodiek gekozen waarvan werd verondersteld dat deze het meest geschikt waren voor het beantwoorden voor de opgestelde onderzoeks- en deelvragen.

Een belangrijke factor voor het uitvoeren van onderzoek is dat alle gegevens onder dezelfde omstandigheden worden verzameld. Het is gelukt om alle metingen uit te voeren in één bosopstand, en dus in één bodemtype. Door weersomstandigheden is het echter tweemaal voorgekomen dat doorsnedes halverwege gestaakt dienden te worden door zware regenval, waardoor het dus tweemaal is voorgekomen dat niet alle metingen binnen één doorsnede op dezelfde dag zijn gemeten. Het gevolg hiervan is dat er een risico is dat gemeten indringingsweerstand andere waarden hebben dan dat ze zouden hebben op de originele meetdag. De manier waarop dit voor kan komen is door een hoger vochtgehalte in de bovenste lagen van de bodem (hangwater) ten gevolge van de regenval. In de diepere lagen is dit risico kleiner, omdat in de gehele opstand sprake is van grondwatertrap VII (7). Bij deze grondwatertrap staat het water op zijn hoogst op 80 centimeter onder maaiveld. Het is dus ondenkbaar dat een eventueel stijgende grondwaterspiegel invloed heeft gehad op diepere metingen, omdat metingen tot maximaal 80 centimeter diepte hebben plaatsgevonden.

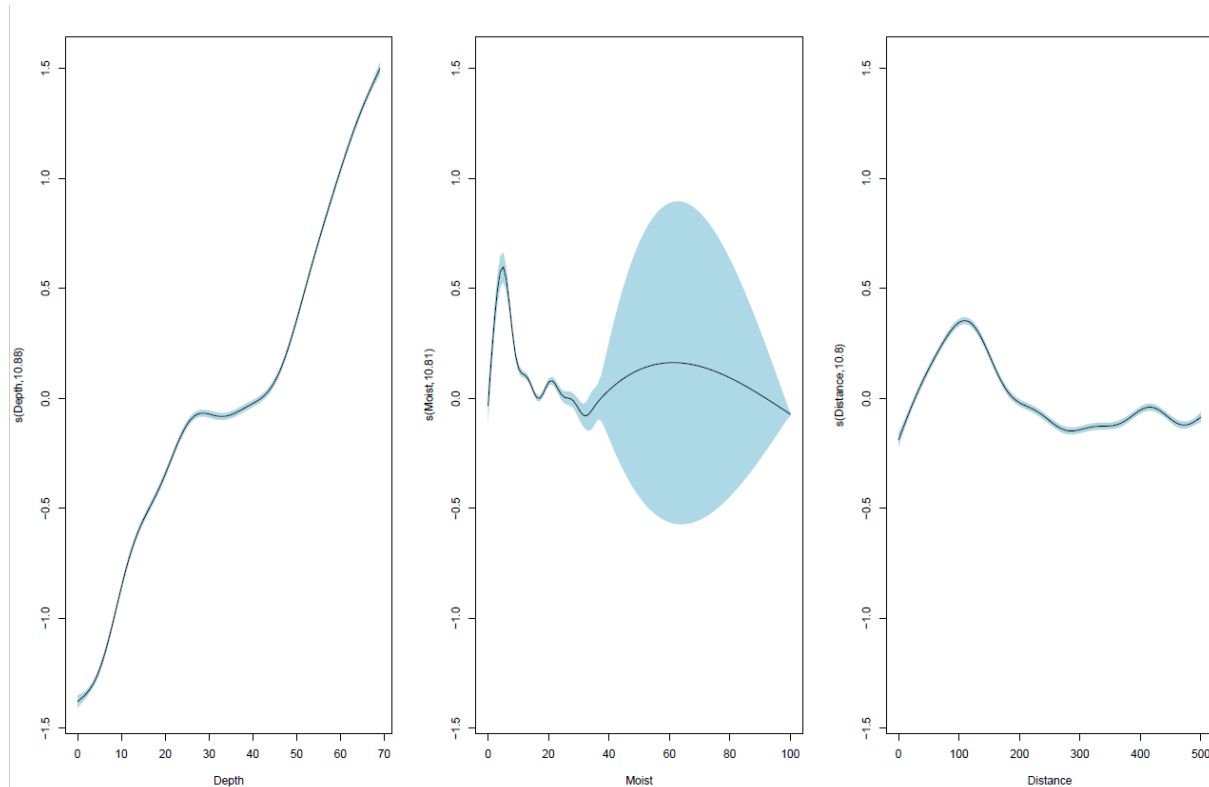
Het hanteren van penetrologger moet ook zo consistent mogelijk gebeuren bij elke meting. Door het gebruik van de SSNIP was het mogelijk om elke meting met dezelfde snelheid te doen en zonder een neveneffect (in de vorm van impact op de bodem) achter te laten. Wel maakte de SSNIP het moeilijker om de metingen waterpas uit te voeren. Het is belangrijk om indringingsweerstandsmetingen met een penetrologger waterpas te doen, zodat alle druk die wordt uitgeoefend op de conus komt, en niet op de stang waar de conus aan zit. Doordat de SSNIP een redelijk grote armatuur is, kon reliëf in het landschap (soms ten gevolge van houtoogst) het moeilijk maken de SSNIP waterpas neer te zetten. Dit probleem is duidelijk geworden bij de uitvoering van pilot waarbij de methode werd getest. Om het probleem op te lossen zijn blokken gebruikt van verschillende grootten die onder de SSNIP konden worden gelegd om deze waar nodig te balanceren. Tijdens het veldonderzoek is dit zo secuur mogelijk gedaan, maar het is niet uitgesloten dat de oplossing geen 100% effectiviteit heeft.

Het is pas de tweede keer dat een uitgebreid onderzoek heeft plaatsgevonden met de SSNIP. De SSNIP als wetenschappelijk betrouwbaar meetinstrument is echter nog niet bevestigd door Staro. Er heeft nog geen onderzoek plaatsgevonden waarin indringingsweerstandsmetingen met behulp de SSNIP worden vergeleken met analyses naar indringingsweerstand uit het laboratorium. Het vermoeden is daar dat het gebruik van de SSNIP betrouwbaardere resultaten geeft, maar dit vermoeden is tot zover nog niet ondersteund.

Het uitvoeren van indringingsweerstandsmetingen is tijdens het onderzoek tijdsintensiever gebleken dan vooraf verwacht. Voor de uitvoering van het onderzoek was verwacht dat 100 doorsneden over dunningspaden en 100 doorsneden in onaangetaste bodem uitgevoerd konden worden. Al vroeg in tijdens het uitvoeren van de metingen bleek dat dit onrealistische aantallen waren. In de beschikbare tijd zijn er uiteindelijk zoveel mogelijk metingen uitgevoerd als lukte door de onderzoeker. Dit waren 21 doorsneden over dunningspaden en 21 doorsneden over onaangetaste bodem. Door dit lagere aantal uitgevoerde metingen is het mogelijk dat afwijkingen van bodemprofielen die per toeval in de steekproef zijn meegenomen een groter effect hebben op de uitkomst van het onderzoek.

In de derde week van gegevens verzamelen is de ThetaProbe, de vochtsensor, kapot gegaan. Door dit defect was het niet mogelijk om bij de overige metingen het vochtpercentage te meten. Aanvankelijk

was het idee om het vochtpercentage mee te nemen in de statistische gegevensanalyse en zo de gemeten indringingsweerstand te verklaren aan de hand van diepte, afstand tot het hart van het dunningspad en vochtgehalte, maar dit is door het defect onmogelijk geworden. Met de vochtgehalten van de metingen die wel uitgevoerd waren, de diepte-waarden en de afstands-tot-hart-waarden heeft L. Akhmetzyanov een “Generalized additive model” toegepast, een methode die niet-lineaire relaties kan weergeven. Deze methode is enkel toegepast voor de metingen uit de doorsneden over de dunningspaden. Het model is weergegeven in figuur 45. In het figuur is te zien dat de grafieken voor diepte (links) en afstand tot het dunningspad (rechts) betrouwbaar zijn, maar de middelste grafiek met vochtgehalte toont te veel spreiding. Hieruit is af te leiden dat de gemeten vochtgehalten niet bruikbaar zijn in de statistische gegevensanalyse van het onderzoek.



Figuur 45, Generalized Additive Model door L. Akhmetzyanov. Op de y-assen de verandering in indringingsweerstand. In de linker grafiek met diepte in centimeter op de x-as, in de middelste grafiek vochtgehalte in procent op de x-as en in de rechter grafiek afstand tot het hart van het dunningspad in centimeter op de x-as. De grafieken zijn enkel voor de gegevens van de doorsneden over dunningspaden. De blauwe gloed geeft de standaardfout aan. In de grafieken van afstand en diepte zien we dat de standaardfout minimaal is, maar bij de grafiek van vochtgehalte neemt na een vochtpercentage van 30% de standaardfout en daarmee de betrouwbaarheid van resultaten af.

Ten slotte heeft het gebruik van dieptecategorieën invloed gehad op de conclusies die getrokken kunnen worden. Door het gebruik van dieptecategorieën zijn de resultaten weliswaar zeer betrouwbaar, doordat de omvang van gegevens per analyse groot is, maar de onderzoeker kan minder precies bepalen tot welke diepte de invloedssfeer van houtoogst op bodemverdichting reikt. Het is door het gebruik van de gekozen dieptecategorieën namelijk alleen mogelijk om uitspraken te doen per categorie, maar in de praktijk is het mogelijk dat de invloedssfeer halverwege een dieptecategorie ophoudt. Een preciezere, maar minder betrouwbare, gegevensanalyse is te zien in Bijlage 3.

4. Conclusies

In dit hoofdstuk worden de resultaten geïnterpreteerd. Aan de hand van de resultaten wordt antwoord gegeven op deelvragen (4.1) en vervolgens de onderzoeksvraag (4.2). Daarna wordt een reflectie op de bijdrage van dit onderzoek aan duurzaamheid gegeven (4.3) gevolgd door aanbevelingen voor het werkveld (4.4).

4.1 Antwoorden deelvragen

Alle drie de deelvragen worden één voor één beantwoord aan de hand van de resultaten uit de statistische gegevensanalyse.

1. *Hoe verloopt de indringingsweerstand in een onverstoord bodemprofiel tot 80 centimeter diepte?*

Uit het onderzoek is gebleken dat de indringingsweerstand in een onverstoord bodemprofiel tot een diepte van 75 geleidelijk hoger wordt (figuur 25) met uitzondering van de diepten 24 tot 34 centimeter waar sprake is van een iets hogere indringingsweerstand dan verwacht. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door een hogere doorworteling dan andere lagen in het bodemprofiel. De kritische waarde van 1,5 MPa wordt bereikt op een diepte van 49 centimeter onder maaiveld. Vanaf deze waarde wordt de wortelactiviteit geremd. Beworteling is absoluut niet meer mogelijk vanaf een diepte van 71 centimeter onder maaiveld, omdat daar de MPa 3,0 is (Van Prooijen, 2019). De resultaten voor de diepten 76, 77, 78, 79 en 80 centimeter zijn onbetrouwbaar, omdat daar veel -1-waarden zijn ingevuld door de penetrologer.

2. *Hoe verloopt de indringingsweerstand in een bodem van 0 tot 500 centimeter van het hart van een dunningspad tot 80 centimeter diepte?*

Uit het Generalized Additive Model (figuur 26) is gebleken dat de indringingsweerstand van de bodem tussen 0 en 100 centimeter van het hart van het dunningspad toeneemt. In de daaropvolgende meter, van 100 tot 200 centimeter van het hart van het dunningspad, neemt de indringingsweerstand weer af tot het oorspronkelijke niveau op 0 centimeter afstand van het hart. Op afstanden vanaf 200 centimeter van het hart blijft de indringingsweerstand min of meer gelijk, al zijn er nog wel wat kleine schommelingen terug te zien.

Uit hetzelfde model blijkt dat de indringingsweerstand is tevens gebleken dat de indringingsweerstand toeneemt tot een diepte van 30 centimeter, vervolgens tot 40 centimeter diepte gelijk blijft en daarna zeer sterk stijgt.

Zoals in figuur 27 en figuur 28 is te zien, is het verloop van de indringingsweerstand geleidelijk op de afstanden 0, 20 en vanaf 180 centimeter afstand van het dunningspad. Op de afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad is deze natuurlijke opbouw onderbroken door een sterk verhoogde indringingsweerstand op de diepten 10 tot en met 40 centimeter onder maaiveld. Op deze locaties overschrijdt de indringingsweerstand wel de 1,5, maar niet de 3,0. Wortelactiviteit wordt hier dus geremd, maar er is geen sprake van een complete stop (Van Prooijen, 2019). Voor de afstand 100 centimeter van het hart van het dunningspad is deze verhoogde indringingsweerstand ook nog dieper te zien, deze gaat geleidelijk over in de natuurlijk verdichtte onderlaag die vanaf 45 tot 50 centimeter onder maaiveld begint.

Uit het onderzoek blijkt dus dat verhoogde indringingsweerstand bij dunningspaden enkel optreedt direct onder de rijsporen, ofwel de exacte plekken waar de zware machines hun druk op de bodem uitoefenen.

3. *Wat is het verschil tussen de indringingsweerstand op dieptes van 0 tot en met 80 centimeter onder maaiveld van onverstoorde bodemprofielen en bodemprofielen van 0 tot en met 500 centimeter afstand van het hart van een dunningspad?*

Uit resultaten van de statistische gegevensanalyse blijkt dat de indringingsweerstand op verschillende plekken onder een dunningspad significant verschilt van de indringingsweerstand in onaangetaste bodem. Deze significante verschillen zijn terug te vinden in verschillende dieptecategorieën en verschillende afstanden het dunningspad. Om deze reden wordt deelvraag 3 per dieptecategorie beantwoord:

- Dieptecategorie 1 (0 tot 10 centimeter): Er zijn geen significante verschillen tussen bodem onder dunningspaden en onaangetaste bodem.
- Dieptecategorie 2 (11 tot 20 centimeter): Van 40 tot 160 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant hoger dan in onaangetaste bodem. Op 280, 300, 480 en 500 afstand van het hart is de indringingsweerstand significant lager dan op onaangetaste bodem.
- Dieptecategorie 3 (21 tot 30 centimeter): Van 40 tot 160 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant hoger dan in onaangetaste bodem. Van 280 tot 340, op 466 en op 480 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant lager dan op onaangetaste bodem.
- Dieptecategorie 4 (31 tot 40 centimeter): Van 40 tot 220 en op 260, 420 en 440 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant hoger dan op onaangetaste bodem. Op 0 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant lager dan op onaangetaste bodem.
- Dieptecategorie 5 (41 tot 50 centimeter): Van 40 tot 200 en van 420 tot 500 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant hoger dan in onaangetaste bodem.
- Dieptecategorie 6 (51 tot 60 centimeter): Van 40 tot 200 en van 380 tot 420 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant hoger dan in onaangetaste bodem.
- Dieptecategorie 7 (61 tot 70 centimeter): Van 80 tot 120 centimeter afstand van het hart is de indringingsweerstand significant hoger dan in onaangetaste bodem.
- Dieptecategorie 8 (71 tot 80 centimeter): Er zijn geen significante verschillen tussen bodem onder dunningspaden en onaangetaste bodem.

De verdichting die optreedt van 40 tot 160 centimeter afstand van het hart valt te verklaren door het berijden van de bodem met zware machines. Deze afstanden zijn direct onder de rijsporen gelegen en dit zijn dus precies de plekken waar de bodemverdichting in eerste instantie optreedt.

De oorzaak van de verdichting die op verschillende diepten terug is te vinden van 260 tot 340 en van 380 tot 500 centimeter afstand van het hart zijn daarentegen niet aan het berijden met zware machines toe te schrijven. Er is namelijk geen verdichting tussen de rijsporen (de locatie van verdichting) en de verdichting elders. De verdichting, die overigens minder sterk is dan de verdichting direct onder dunningspaden, wordt vermoedelijk veroorzaakt door lokale, natuurlijke eigenschappen van de bodem of verstoringen die door de relatief kleine steekproef een grote invloed hebben gehad op de resultaten.

4.2 Antwoord onderzoeksvraag

Aan de hand van de antwoorden op de deelvragen kan antwoord worden gegeven op de onderzoeksvraag:

Wat is de invloedssfeer op bodemverdichting van het berijden door zware machines op dunningspaden in bossen op zandgrond?

Het berijden van zware machines in bossen op dunningspaden heeft direct onder de rijsporen effect op de bodemverdichting. De sterkste bodemverdichting treedt op van 40 tot 160 afstand van het hart van het dunningspad op de diepten van 10 tot 30 centimeter. De indringingsweerstand is op deze locaties significant hoger dan op dezelfde diepten in onaangetaste bodems. De invloed van bodemverdichting is hier zodanig sterk dat de abiotische eigenschappen van de bodem erg sterk veranderen en daarmee de bodem minder geschikt maakt voor beworteling door bomen. Hierdoor ontstaan er een plaatselijke biotische eigenschappen die voor sommige flora en fauna niet geschikt zijn, zoals de optimale groei van boomwortels. Op dezelfde locaties is bodemverdichting ook nog terug te zien van 30 tot 50 centimeter, maar wel in mindere mate.

De invloedssfeer van de druk die door zware machines wordt veroorzaakt reikt niet tot buiten het dunningspad. Hogere indringingsweerstand buiten het pad worden veroorzaakt door andere invloeden of zijn het gevolg van een oudere verdichting die heeft opgetreden voordat dunningspaden werden gebruikt.

4.3 Aanbevelingen

Deze conclusie is in lijn met de resultaten van het onderzoek van Kappert (2020), maar tegen de verwachting in als wordt gekeken naar de onderzoeken van Schäffer (2002) en Schack-Kirchner (2010).

Hoewel de invloedssfeer van houtoogst zich niet vanaf het dunningspad zich verder het bos in verspreid is er wel sprake van een ondergrondse barrière recht onder de rijsporen. Deze barrière is getekend door veranderde abiotische eigenschappen van de bodem. In deze barrière is op bepaalde diepten de indringingsweerstand zo hoog dat er sprake is van een verminderde wortelactiviteit, en ook bodemfauna, zoals mycorrhizaschimmels en regenwormen, komen in verminderde mate voor. Het herstelproces van de bodem wordt hierdoor ook vertraagd.

Het is niet wenselijk om in een bos veel van dit soort barrières te veroorzaken. Hierdoor blijft relatief gezien een groot gedeelte van het boscossysteem intact en is er alsnog de mogelijkheid om houtoogst uit te voeren. Het gebruik van permanente dunningspaden, zoals dat in Bergeijk het geval is, is hier een goede invulling van, omdat het percentage van het oppervlak van het bos dat verloren gaat aan dunningspaden kleiner is dan wanneer er sprake is van een vrije kuur. Dit percentage is ongeveer 20% wanneer er om de 20 meter een dunningspad van vier meter breed wordt aangelegd (Potvliet en Delforterie, 2016). Mogelijkerwijs levert het aanleggen van dunningspaden (in kleine getale) zelfs een bijdrage aan de lokale biodiversiteit, omdat er door de verandering in plaatsgebonden biotische eigenschappen juist zeer specifieke niches ontstaan die voor de aanleg niet aanwezig waren (Ampoorter et al., 2010; De Schrijver et al., 2020).

Het effect van verhoogde indringingsweerstand op dunningspaden op boomgroei was in 2020 al door Kappert onderzocht, maar is nu nogmaals door Wietse de Vries onderzocht. Uit dit onderzoek is, net als in het onderzoek van Kappert, geen direct effect op de groei van bomen direct naast een dunningspad gebleken. De invloedssfeer van houtoogst is dus zeer lokaal te noemen. Grotere organismen zoals bomen kunnen vermoedelijk gebruik maken, ofwel compenseren, van rondom liggende, onverstoorde, bodems en hun eigenschappen.

4.4 Reflectie op bijdrage aan duurzaamheid

Het onderzoek heeft een bijdrage geleverd aan kennis over de effecten van houtoogst op de Nederlandse bossen. Aan de hand van deze kennis kunnen mensen en instanties binnen de bosbouw-

sector beter afwegingen maken, zodat zo goed mogelijk een bijdrage kan worden geleverd aan de Economic Bottom Line-, de Environmental Bottom Line- en de Social Bottom Line-effecten van genomen maatregelen. Bovendien kunnen deze partijen beter rekening houden met het duurzaam beheer van bossen, wat een natuurlijke hulpbron is, (Sustainable Development Goal 12) en het behoud en herstel van het boscosysteem (Sustainable Development Goal 15).

Bronvermelding

- Adams, P. W., & Froehlich, H. A. (1981). Compaction of forest soils. *Oregon State University*. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/2f75r834n>
- Ampoorter, E. (2011). *Soil compaction due to mechanized forest harvesting: quantification of ecosystem effects and exploration of recovery potential* [PhD-Proefschrift, Universiteit Gent]. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://biblio.ugent.be/publication/1189326>
- Ampoorter, E., De Schrijver, A., Van Nevel, L., Hermey, M., & Verheyen, K. (2012). Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of forest science*, 69(5), 533–542. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0199-y>
- Ampoorter, E., Goris, R., & Verheyen, K. (2010). Maatregelen bij houtoogst. In J. den Ouden, B. Muys, F. Mohren, & K. Verheyen (Reds.), *Bosecologie en Bosbeheer* (pp. 477–484). Acco.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
- Crawford, L. J., Heinse, R., Kimsey, M. J., & Page-Dumroese, D. S. (2021). *Soil Sustainability and Harvest Operations: A Review* (General Technical Report RMRS-421). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-421>
- De Bosscher, L., De Cleene, L., De Haeck, A., Demeyere, D., De Winter, P. J., Geerts, P., Joye, T., Lievens, F., Moerdijk, W., Peeraer Marcel, Peeters, W., Ramaekers, J., Schauvliege, M., Van Bogaert, J., Vanderlinden, G., Van Herp, P., Vanhove, A., Van Reusel, E., & Verhaeghe, R. (2008). F.3.4.1.2 Bodemverdichting. In T. Joye, J. Ramaekers, P. Van Herp, J. De Wael, P. Geerts, & M. Schauvliege (Reds.), *Technisch Vademecum Bomen* (pp. 133–136). Agentschap voor Natuur en Bos.
- De Maeyer, W., Dumortier, M., & Van der Aa, B. (2005). #26 Bosbouw. In M. Dumortier, L. De Bruyn, M. Hens, J. Peymen, A. Schneiders, T. Van Daele, W. Van Reeth, G. Weyenberh, & E. Kuijken (Reds.), *Natuurrapport 2005* (pp. 268–277). Instituut voor Natuurbehoud.
- De Schrijver, A., Ampoorter, E., van der Burg, R., Demey, A., Schelfhout, S., Olsthoorn, A., De Smet, P., Vangansbeke, P., Van Nevel, L., Hommel, P., De Frenne, P., Mertens, J., & Verheyen, K. (2020). Groeiplaatsverbetering. In P. Jansen, M. Boosten, M. Cassaert, J. Cornelis, E. Thomassen, & M. Winnock (Reds.), *Praktijkboek Bosbeheer* (pp. 64–97). Inverde en Stichting Probos.
- De Vries, S., Maas, J., & Kramer, H. (2009). Effecten van nabije natuur op gezondheid en welzijn: Mogelijke mechanismen achter de relatie tussen groen in de woonomgeving en gezondheid. In *Wageningen University & Research*. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://edepot.wur.nl/3287>
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3–4), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Dvořák, J., & Kormanek, M. (2022). Use of impact penetrometer to determine changes in soil compactness after Entracon Sioux EH30 timber harvesting. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 43(2), 325–337. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>
- Elicit. (2023, december). *Elicit: The AI Research Assistant*. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://elicit.com/?workflow=table-of-papers>

Elkington, J. (1997). *Cannibals with Forks: the triple bottom line of 21st century business*. Capstone Publishing Limited.

Esri, Maxar, Earthstar Geographics, & GIS User Community. (2021). *Satellietbeelden* [Dataset; Web Map]. Esri Dutch. Geraadpleegd op 23 december 2023, van <https://hub.arcgis.com/maps/4ea02439803c44d18e52264839e3b9d6/about>

Froehlich, H. A., Aulerich, D. E., & Curtis, R. O. (1981). Designing skid trail systems to reduce soil impacts from tractive logging machines. *Oregon State University*. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/dj52w595c>

Froehlich, H. A., & McNabb, D. (1983). Minimizing soil compaction in Pacific Northwest Forests. *Oregon State University*. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/9c67ws83n?locale=en>

Google. (2023, december). *Google Scholar*. Google Scholar. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://scholar.google.com/>

Han, H., Page-Dumroese, D. S., Han, S., & Tirocke, J. M. (2006). Effects of slash, machine passes, and soil moisture on penetration resistance in a cut-to-length harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 17(2), 11–24. <https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702532>

IBM. (2023). *SPSS Statistics* (29.0.2.0) [Software]. Geraadpleegd op 17 decemebr 2023, van <https://www.ibm.com/spss>

Kappert, P. (2020). *Invloed van bodemverdichting op de boomgroei van douglas (Pseudotsuga menziesii)* [Afstudeerrapport]. Hogeschool Van Hall Larenstein.

Kremers, J., & Boosten, M. (2018). *Soil compaction and deformation in forest exploitation: A literature review on causes and effects and guidelines on avoiding compaction and deformation*. Stichting Probos.

Kutscheidt, J., & Van der Laan, P. (2011). De meerwaarde van mycorrhiza-schimmelpreparaten voor aanplant en revitalisering van bomen (A. Hemmink, Vert.). *Boomzorg*, 22–25. Geraadpleegd op 23 december 2023 van, <https://www.boomzorg.nl/article/24165/de-meerwaarde-van-mycorrhiza-schimmelpreparaten-voor-aanplant-en-revitalisering-van-bomen>

Miller, R., Colbert, S., & Morris, L. (2004). Effects of heavy equipment on physical properties of soils and on long-term productivity: A review of literature and current research. In *NCASI Technical Bulletin* 887. NCASI.

Mohieddinne, H. (2019). *Impact du tassement actuel et ancien par les engins sylvicoles sur les pédosystèmes et la végétation* [Thesis]. Université de Picardie Jules Verne.

Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, É., Buridant, J., Kobeissi, A., & Horen, H. (2019). Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management*, 449, 117472. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117472>

Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2012). Soil Compaction Impact and Modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>

Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M. A., Bilyera, N., & Zamanian, K. (2021). Impacts of Logging-Associated Compaction on Forest soils: A Meta-Analysis. *Frontiers in forests and global change*, 4. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.780074>

Nederlands Normalisatie-instituut (Red.). (1996). Geotechniek – Bepaling van de conusweerstand en de plaatselijke wrijvingsweerstand van grond – Elektrische sondeermethode. *NEN 5140*.

Nemestothy, N. (2009). Boden unter Druck: sind Bodenschutz und Holzernte vereinbar? Geraadpleegd op 23 december 2023, van *BFW-Praxisinformation*, 19. https://shop.bfw.ac.at/index.php?controller=attachment&id_attachment=15

Ozinga, W., Arnolds, E., Keizer, P., & Kuyper, T. (2013). Paddenstoelen in het natuurbeheer : OBN preadvies paddenstoelen: Deel 1: Ecologie, knelpunten en kennislacunes. *Boschap, bedrijfsschap voor bos en natuur*. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/449111>

Parajuli, M., Hiesl, P., Hagan, D., & Khanal, P. (2022). Logging Operations and Soil Compaction. *Land-Grant Press by Clemson Extension*, 1135. Geraadpleegd op 23 december 2023, van <https://lgpress.clemson.edu/publication/logging-operations-and-soil-compaction/>

Potvliet, G., & Delforterie, W. (2016). Nooit meer van de gebaande paden?: Permanente dunningspaden als mogelijke oplossing voor het beperken van bodemverdichting. *Vakblad Natuur, Bos en Landschap*, 3–5 (2016).

Probos & Centrum Hout. (2023). Bouwhout: Waar komt ons bouwhout vandaan? In *De circulaire bouweconomie*. Stichting Probos. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2023/05/Herkomst-hout-voor-de-bouw-Uitleg-infographics-mei-2023.pdf>

ResearchGate GmbH. (2023, december). *ResearchGate*. ResearchGate. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://www.researchgate.net/>

Royal Eijkelpark. (2022). Penetrologger: Handleiding. *Royal Eijkelpark*.

Royal Eijkelpark. (2023). *PenetroViewer* (6.08) [Software]. Geraadpleegd op 23 december 2023, van <https://www.royaleijkelpark.com/nl/producten/veldmeetapparatuur/indringingsweerstand/elektronisch-met-datalogger/penetrologger-met-gps-standaard-set/#section-downloads>

Schack-Kirchner, H. (2010). 30 Jahre Forschung zur Bodenverformung durch Forstmaschinen in Deutschland: Rückblick und Perspektiven. *FTI*, 4–6.

Schäffer, J. (2002). Befahren von Waldböden: ein Kavaliersdelikt? *Der Waldwirt*, 29 (12), 21–23.

Staro Natuur en Buitengebied. (2024a). *Literatuurstudie bodemdruk*. Geraadpleegd op 5 januari 2024, van <https://www.starobv.nl/literatuurstudie-bodemdruk/>

Staro Natuur en Buitengebied. (2024b). *Metten met de SSNIP*. Geraadpleegd op 5 januari 2024, van <https://www.starobv.nl/metten-met-de-ssnip/>

United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2023, december). *The 17 goals*. Geraadpleegd op 17 december 2023, van <https://sdgs.un.org/goals>

Van Prooijen, G.-J. (2019). 7. Bodem- en grondonderzoek. In IPC Groene Ruimte (Red.), *Stadsbomen Vademecum 2A: Groeiplaatsaspecten* (pp. 151–178). IPC Groene Ruimte.

VBNE. (2020). Bodemverdichting en insporing in het bos. VBNE.

Von Wilpert, K., & Schäffer, J. (2006). Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research*, 125, 129–138.
<https://doi.org/10.1007/s10342-005-0108-0>

Bijlage 1 - Alle doorsneden onaangetaste bodem

In deze bijlage worden alle 21 doorsneden van onaangetaste bodems getoond die zijn gemaakt tijdens het veldwerk. Dit zijn dan ook de gegevens die zijn gebruikt bij de uitvoering van de statistische gegevensanalyse. In alle doorsneden is in rij 1 het vochtpercentage weergegeven. In rij 2 is de afstand tot het begin van de doorsnede te zien, deze afstand is puur toegevoegd om het sorteren van de gegevens overzichtelijk te maken voor de onderzoeker. Tussen elke afstand zit 20 centimeter. In de overige 81 rijen is per diepte de gemeten MPa weergegeven. Alle doorsneden zijn met behulp van kleurenschaal in figuur 24 (te zien in 3. Resultaten) verhelderd.

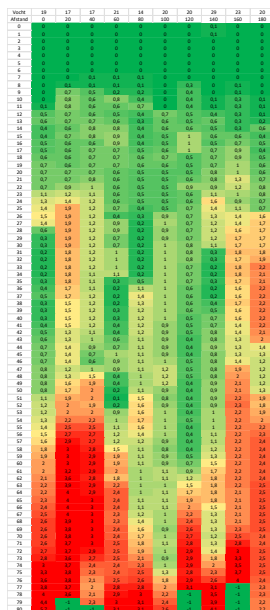
Voort	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
afstand	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820	840	860	880	900	920	940	960	980	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200	1220	1240	1260	1280	1300	1320	1340	1360	1380	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580	1600	1620	1640	1660	1680	1700	1720	1740	1760	1780	1800	1820	1840	1860	1880	1900	1920	1940	1960	1980	2000	2020	2040	2060	2080	2100	2120	2140	2160	2180	2200	2220	2240	2260	2280	2300	2320	2340	2360	2380	2400	2420	2440	2460	2480	2500	2520	2540	2560	2580	2600	2620	2640	2660	2680	2700	2720	2740	2760	2780	2800	2820	2840	2860	2880	2900	2920	2940	2960	2980	3000	3020	3040	3060	3080	3100	3120	3140	3160	3180	3200	3220	3240	3260	3280	3300	3320	3340	3360	3380	3400	3420	3440	3460	3480	3500	3520	3540	3560	3580	3600	3620	3640	3660	3680	3700	3720	3740	3760	3780	3800	3820	3840	3860	3880	3900	3920	3940	3960	3980	4000	4020	4040	4060	4080	4100	4120	4140	4160	4180	4200	4220	4240	4260	4280	4300	4320	4340	4360	4380	4400	4420	4440	4460	4480	4500	4520	4540	4560	4580	4600	4620	4640	4660	4680	4700	4720	4740	4760	4780	4800	4820	4840	4860	4880	4900	4920	4940	4960	4980	5000	5020	5040	5060	5080	5100	5120	5140	5160	5180	5200	5220	5240	5260	5280	5300	5320	5340	5360	5380	5400	5420	5440	5460	5480	5500	5520	5540	5560	5580	5600	5620	5640	5660	5680	5700	5720	5740	5760	5780	5800	5820	5840	5860	5880	5900	5920	5940	5960	5980	6000	6020	6040	6060	6080	6100	6120	6140	6160	6180	6200	6220	6240	6260	6280	6300	6320	6340	6360	6380	6400	6420	6440	6460	6480	6500	6520	6540	6560	6580	6600	6620	6640	6660	6680	6700	6720	6740	6760	6780	6800	6820	6840	6860	6880	6900	6920	6940	6960	6980	7000	7020	7040	7060	7080	7100	7120	7140	7160	7180	7200	7220	7240	7260	7280	7300	7320	7340	7360	7380	7400	7420	7440	7460	7480	7500	7520	7540	7560	7580	7600	7620	7640	7660	7680	7700	7720	7740	7760	7780	7800	7820	7840	7860	7880	7900	7920	7940	7960	7980	8000	8020	8040	8060	8080	8100	8120	8140	8160	8180	8200	8220	8240	8260	8280	8300	8320	8340	8360	8380	8400	8420	8440	8460	8480	8500	8520	8540	8560	8580	8600	8620	8640	8660	8680	8700	8720	8740	8760	8780	8800	8820	8840	8860	8880	8900	8920	8940	8960	8980	9000	9020	9040	9060	9080	9100	9120	9140	9160	9180	9200	9220	9240	9260	9280	9300	9320	9340	9360	9380	9400	9420	9440	9460	9480	9500	9520	9540	9560	9580	9600	9620	9640	9660	9680	9700	9720	9740	9760	9780	9800	9820	9840	9860	9880	9900	9920	9940	9960	9980	10000	10020	10040	10060	10080	10100	10120	10140	10160	10180	10200	10220	10240	10260	10280	10300	10320	10340	10360	10380	10400	10420	10440	10460	10480	10500	10520	10540	10560	10580	10600	10620	10640	10660	10680	10700	10720	10740	10760	10780	10800	10820	10840	10860	10880	10900	10920	10940	10960	10980	11000	11020	11040	11060	11080	11100	11120	11140	11160	11180	11200	11220	11240	11260	11280	11300	11320	11340	11360	11380	11400	11420	11440	11460	11480	11500	11520	11540	11560	11580	11600	11620	11640	11660	11680	11700	11720	11740	11760	11780	11800	11820	11840	11860	11880	11900	11920	11940	11960	11980	12000	12020	12040	12060	12080	12100	12120	12140	12160	12180	12200	12220	12240	12260	12280	12300	12320	12340	12360	12380	12400	12420	12440	12460	12480	12500	12520	12540	12560	12580	12600	12620	12640	12660	12680	12700	12720	12740	12760	12780	12800	12820	12840	12860	12880	12900	12920	12940	12960	12980	13000	13020	13040	13060	13080	13100	13120	13140	13160	13180	13200	13220	13240	13260	13280	13300	13320	13340	13360	13380	13400	13420	13440	13460	13480	13500	13520	13540	13560	13580	13600	13620	13640	13660	13680	13700	13720	13740	13760	13780	13800	13820	13840	13860	13880	13900	13920	13940	13960	13980	14000	14020	14040	14060	14080	14100	14120	14140	14160	14180	14200	14220	14240	14260	14280	14300	14320	14340	14360	14380	14400	14420	14440	14460	14480	14500	14520	14540	14560	14580	14600	14620	14640	14660	14680	14700	14720	14740	14760	14780	14800	14820	14840	14860	14880	14900	14920	14940	14960	14980	15000	15020	15040	15060	15080	15100	15120	15140	15160	15180	15200	15220	15240	15260	15280	15300	15320	15340	15360	15380	15400	15420	15440	15460	15480	15500	15520	15540	15560	15580	15600	15620	15640	15660	15680	15700	15720	15740	15760	15780	15800	15820	15840	15860	15880	15900	15920	15940	15960	15980	16000	16020	16040	16060	16080	16100	16120	16140	16160	16180	16200	16220	16240	16260	16280	16300	16320	16340	16360	16380	16400	16420	16440	16460	16480	16500	16520	16540	16560	16580	16600	16620	16640	16660	16680	16700	16720	16740	16760	16780	16800	16820	16840	16860	16880	16900	16920	16940	16960	16980	17000	17020	17040	17060	17080	17100	17120	17140	17160	17180	17200	17220	17240	17260	17280	17300	17320	17340	17360	17380	17400	17420	17440	17460	17480	17500	17520	17540	17560	17580	17600	17620	17640	17660	17680	17700	17720	17740	17760	17780	17800	17820	17840	17860	17880	17900	17920	17940	17960	17980	18000	18020	18040	18060	18080	18100	18120	18140	18160	18180	18200	18220	18240	18260	18280	18300	18320	18340	18360	18380	18400	18420	18440	18460	18480	18500	18520	18540	18560	18580	18600	18620	18640	18660	18680	18700	18720	18740	18760	18780	18800	18820	18840	18860	18880	18900	18920	18940	18960	18980	19000	19020	19040	19060	19080	19100	19120	19140	19160	19180	19200	19220	19240	19260	19280	19300	19320	19340	19360	19380	19400	19420	19440	19460	19480	19500	19520	19540	19560	19580	19600	19620	19640	19660	19680	19700	19720	19740	19760	19780	19800	19820	19840	19860	19880	19900	19920	19940	19960	19980	20000	20020	20040	20060	20080	20100	20120	20140	20160	20180	20200	20220	20240	20260	20280	20300	20320	20340	20360	20380	20400	20420	20440	20460	20480	20500	20520	20540	20560	20580	20600	20620	20640	20660	20680	20700	20720	20740	20760	20780	20800	20820	20840	20860	20880	20900	20920	20940	20960	20980	21000	21020	21040	21060	21080	21100	21120	21140	21160	21180	21200	21220	21240	21260	21280	21300	21320	21340	21360	21380	21400	21420	21440	21460	21480	21500	21520	21540	21560	21580	21600	21620	21640	21660	21680	21700	21720	21740	21760	21780	21800	21820	21840	21860	21880	21900	21920	21940	21960	21980	22000	22020	22040	22060	22080	22100	22120	22140	22160	22180	22200	22220	22240	22260	22280	22300	22320	22340	22360	22380	22400	22420	22440	22460	22480	22500	22520	22540	22560	22580	22600	22620	22640	22660	22680	22700	22720	22740	22760	22780	22800	22820	22840	22860	22880	22900	22920	22940	22960	22980	23000	23020	23040	23060	23080	23100	23120	23140	23160	23180	23200	23220	23240	23260	23280	23300	23320	23340	23360	23380	23400	23420	23440	23460	23480	23500	23520	23540	23560	23580	23600	23620	23640	23660	23680	23700	23720	23740	23760	23780	23800	23820	23840	23860	23880	23900	23920	23940	23960	23980	2400

[illegible]

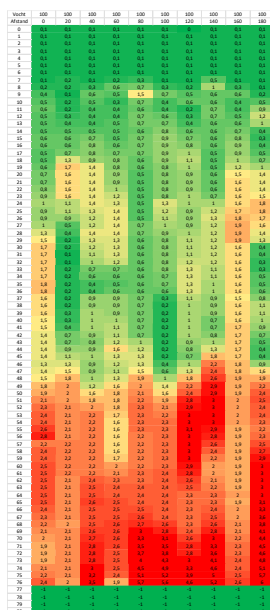
Doorsnede onaangetast 3
Gemeten op: 18 oktober 2023

Player	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100	2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	2116	2117	2118	2119	2120	2121	2122	2123	2124	2125	2126	2127	2128	2129	2130	2131	2132	2133	2134	2135	2136	2137	2138	2139	2140	2141	2142	2143	2144	2145	2146	2147	2148	2149	2150	2151	2152	2153	2154	2155	2156	2157	2158	2159	2160	2161	2162	2163	2164	2165	2166	2167	2168	2169	2170	2171	2172	2173	2174	2175	2176	2177	2178	2179	2180	2181	2182	2183	2184	2185	2186	2187	2188	2189	2190	2191	2192	2193	2194	2195	2196	2197	2198	2199	2200	2201	2202	2203	2204	2205	2206	2207	2208	2209	2210	2211	2212	2213	2214	2215	2216	2217	2218	2219	2220	2221	2222	2223	2224	2225	2226	2227	2228	2229	2230	2231	2232	2233	2234	2235	2236	2237	2238	2239	2240	2241	2242	2243	2244	2245	2246	2247	2248	2249	2250	2251	2252	2253	2254	2255	2256	2257	2258	2259	2260	2261	2262	2263	2264	2265	2266	2267	2268	2269	2270	2271	2272	2273	2274	2275	2276	2277	2278	2279	2280	2281	2282	2283	2284	2285	2286	2287	2288	2289	2290	2291	2292	2293	2294	2295	2296	2297	2298	2299	2300	2301	2302	2303	2304	2305	2306	2307	2308	2309	2310	2311	2312	2313	2314	2315	2316	2317	2318	2319	2320	2321	2322	2323	2324	2325	2326	2327	2328	2329	2330	2331	2332	2333	2334	2335	2336	2337	2338	2339	2340	2341	2342	2343	2344	2345	2346	2347	2348	2349	2350	2351	2352	2353	2354	2355	2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	2363	2364	2365	2366	2367	2368	2369	2370	2371	2372	2373	2374	2375	2376	2377	2378	2379	2380	2381	2382	2383	2384	2385	2386	2387	2388	2389	2390	2391	2392	2393	2394	2395	2396	2397	2398	2399	2400	2401	2402	2403	2404	2405	2406	2407	2408	2409	2410	2411	2412	2413	2414	2415	2416	2417	2418	2419	2420	2421	2422	2423	2424	2425	2426	2427	2428	2429	2430	2431	2432	2433	2434	2435	2436	2437	2438	2439	2440	2441	2442	2443	2444	2445	2446	2447	2448	2449	2450
--------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Doorsnede onaangetast 4
Gemeten op: 19 oktober 2023



Doorsnede onaangetast 7
Gemeten op: 24 oktober 2023



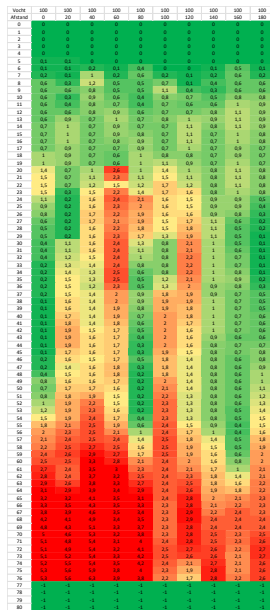
Doorsnede onaangetast 8
Gemeten op: 31 oktober 2023
Vochtmeting ontbreekt

[illegible]

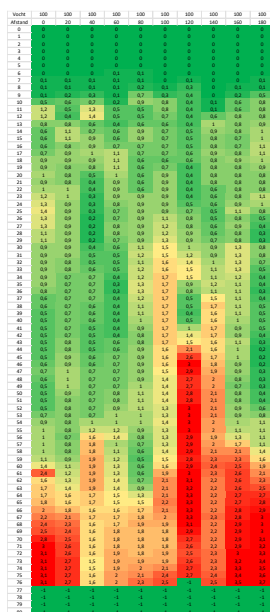
Doorsnede onaangetast 9
Gemeten op: 31 oktober 2023
Vochtmeting ontbreekt

[illegible]

Doorsnede onaangetast 10
Gemeten op: 31 oktober 2023
Vochtmeting ontbreekt



Doorsnede onaangetast 13
Gemeten op: 7 november 2023
Vochtmeting ontbreekt



Doorsnede onaangetast 14
Gemeten op: 7 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

[illegible]

Doorsnede onaangetast 15
Gemeten op: 8 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

Player	000	001	010	011	100	101	110	111	200	201	210	211
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Doorsnede onaangetast 16
Gemeten op: 8 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

[illegible]

Doorsnede onaangetast 17
Gemeten op: 9 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

[illegible]

Doorsnede onaangetast 18
Gemeten op: 9 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

[illegible]

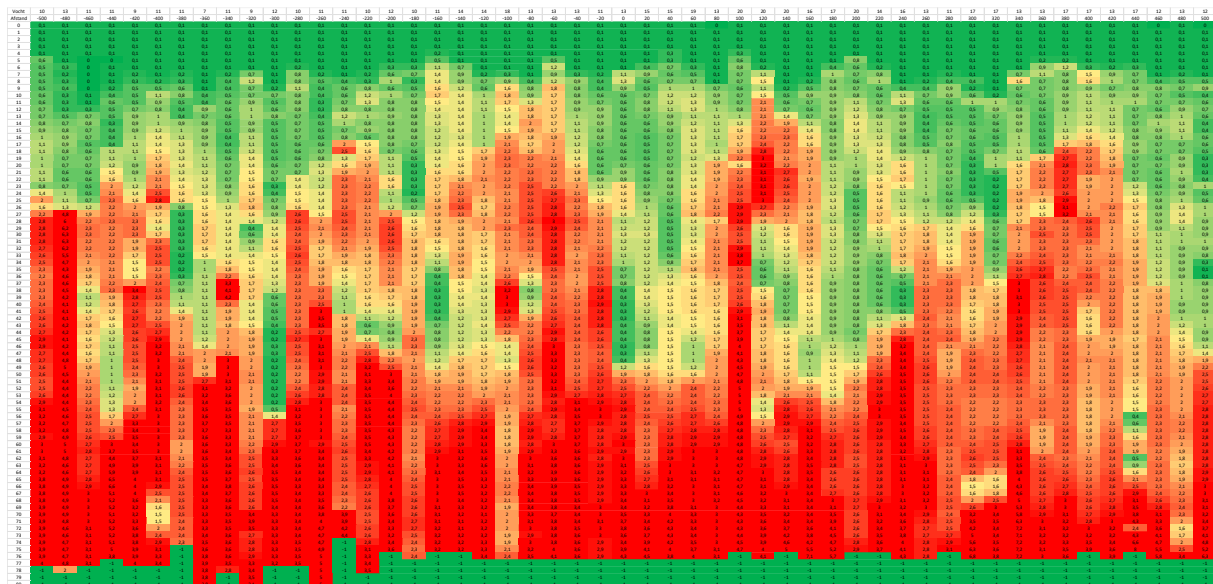
Doorsnede onaangetast 19
Gemeten op: 9 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

[illegible]

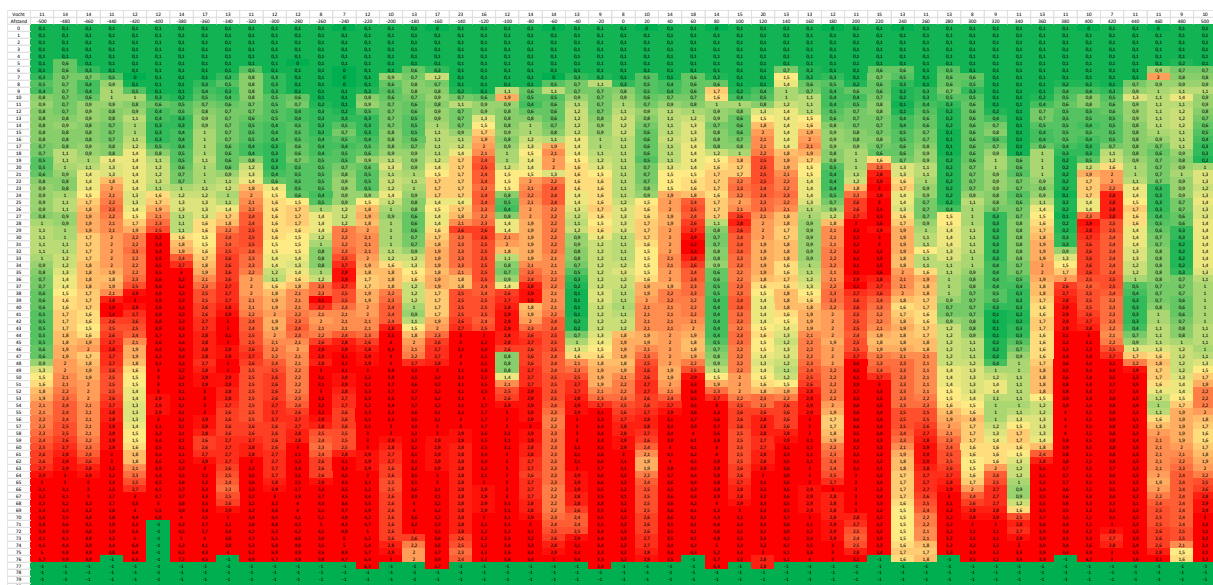
Doorsnede onaangetast 20
Gemeten op: 9 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

Bijlage 2 - Alle doorsneden dunningspaden

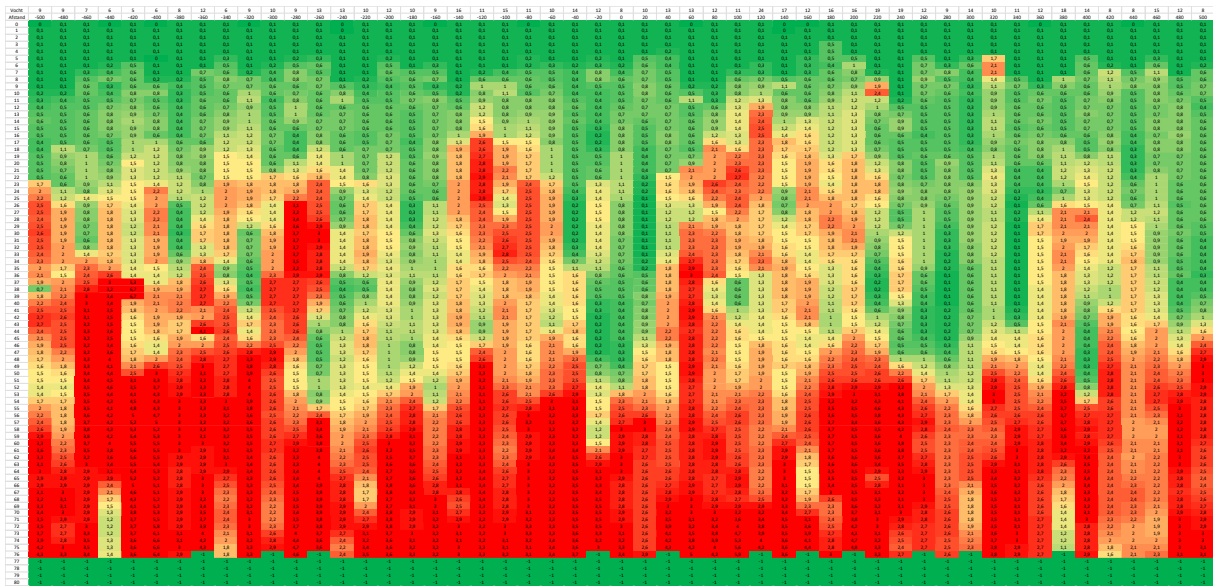
In deze bijlage worden alle 21 doorsneden over permanente dunningspaden getoond die zijn gemaakt tijdens het veldwerk. Dit zijn dan ook de gegevens die zijn gebruikt bij de uitvoering van de statistische gegevensanalyse. In alle doorsneden is in rij 1 het vochtpercentage weergegeven. In rij 2 is de afstand tot het begin van de doorsnede te zien, deze afstand begint bij -500 en in eindigt bij 500. Tussen elke afstand zit 20 centimeter. In de overige 81 rijen is per diepte de gemeten MPa weergegeven. Alle doorsneden zijn met behulp van kleurenschaal in figuur 24 verhelderd (zie 3. Resultaten).



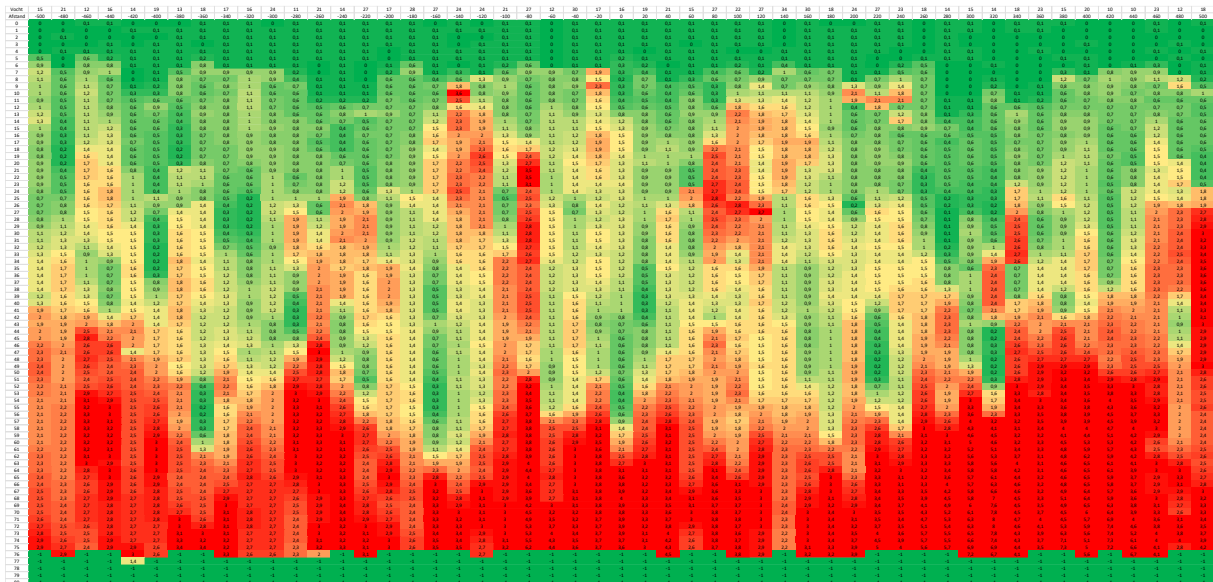
Doorsnede dunningspad 1
Gemeten op 17 oktober 2023



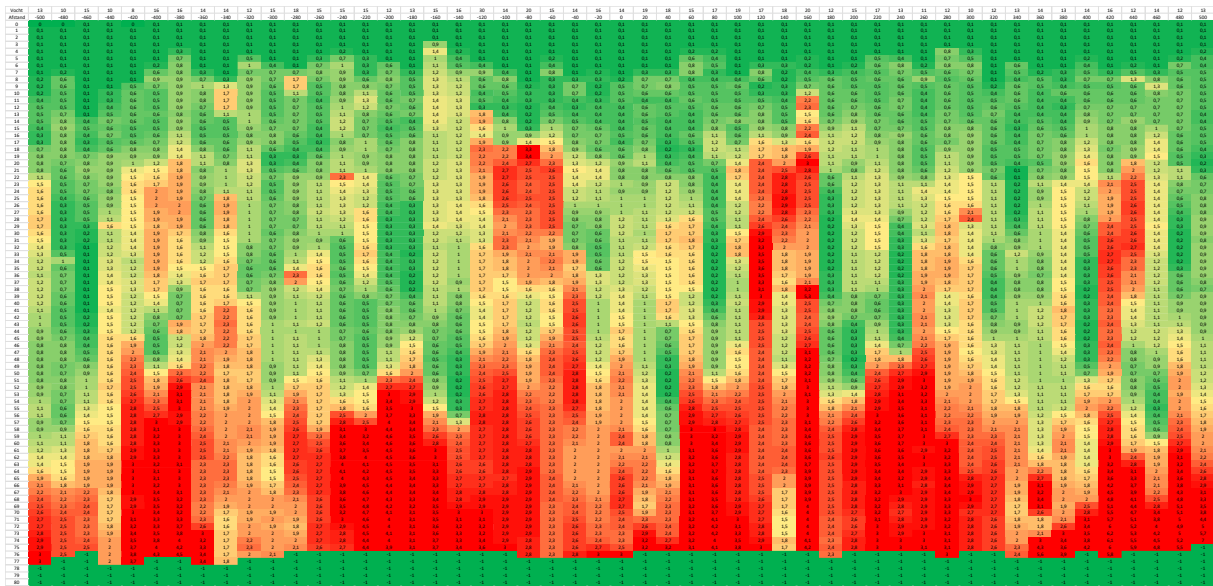
Doorsnede dunningspad 2
Gemeten op 17 oktober 2023



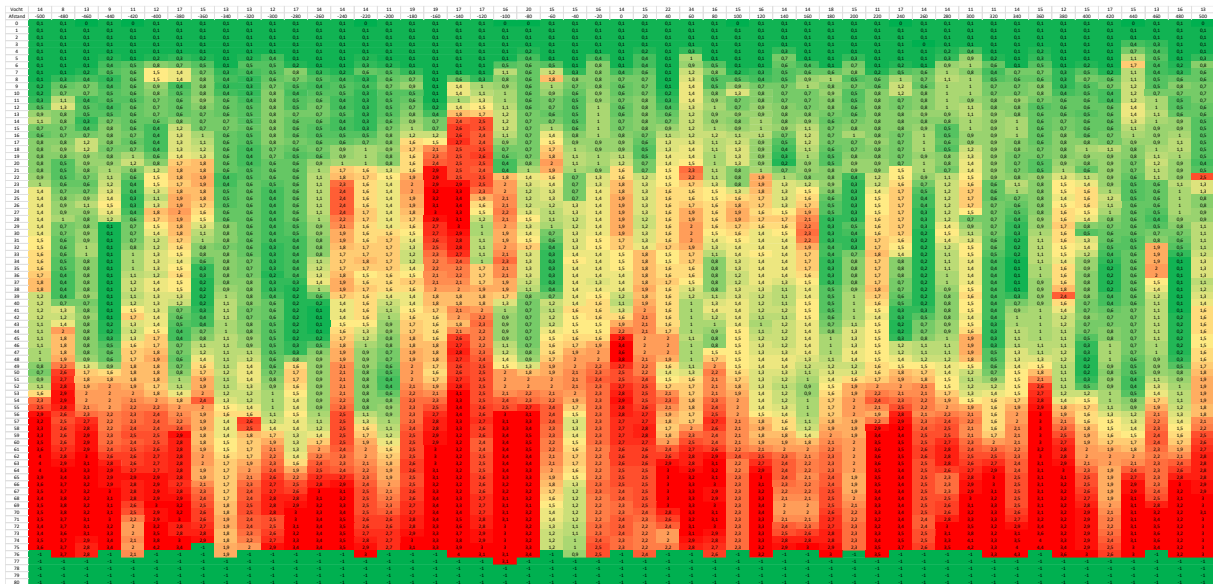
Doorsnede dunningspad 3
Gemeten op 18 oktober 2023



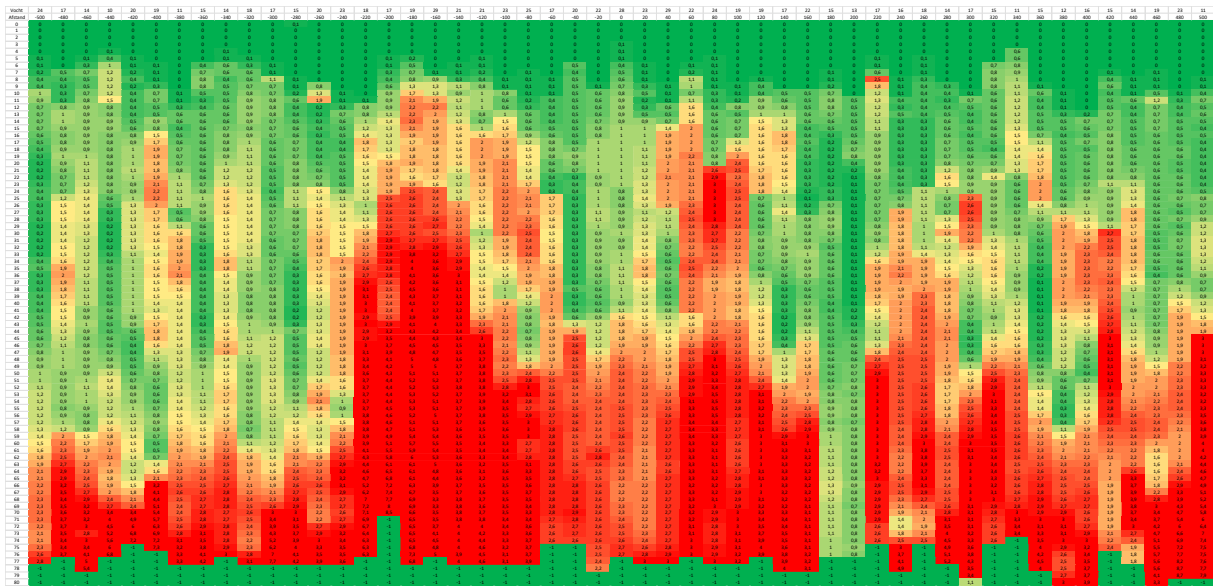
Doorsnede dunningspad 4
Gemeten op 19 oktober 2023



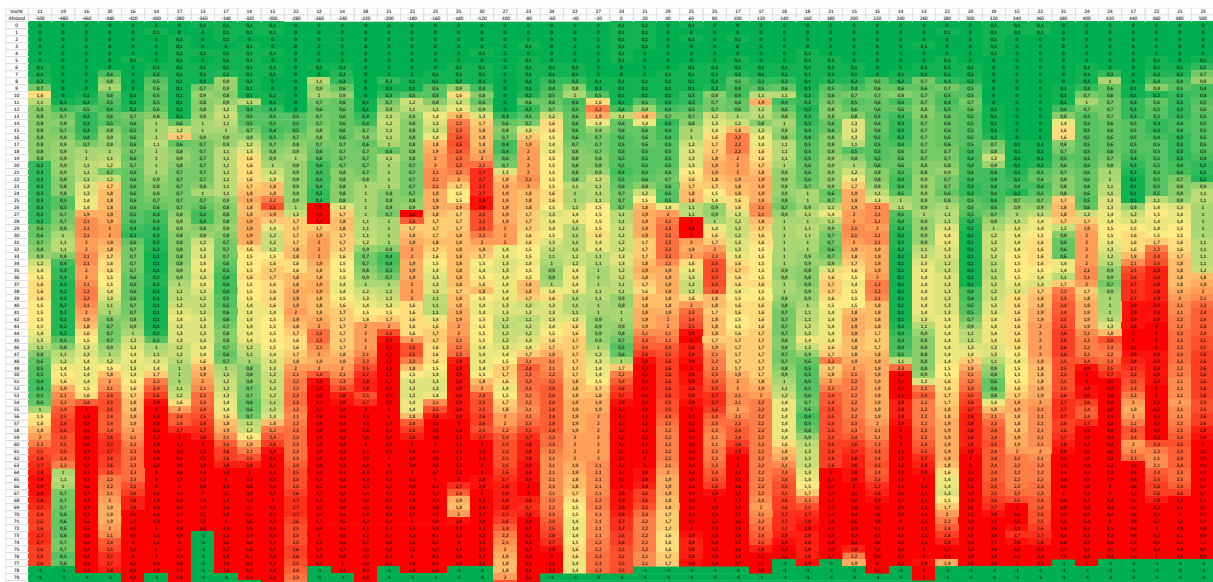
Doorsnede dunningspad 5
Gemeten op 23 oktober 2023



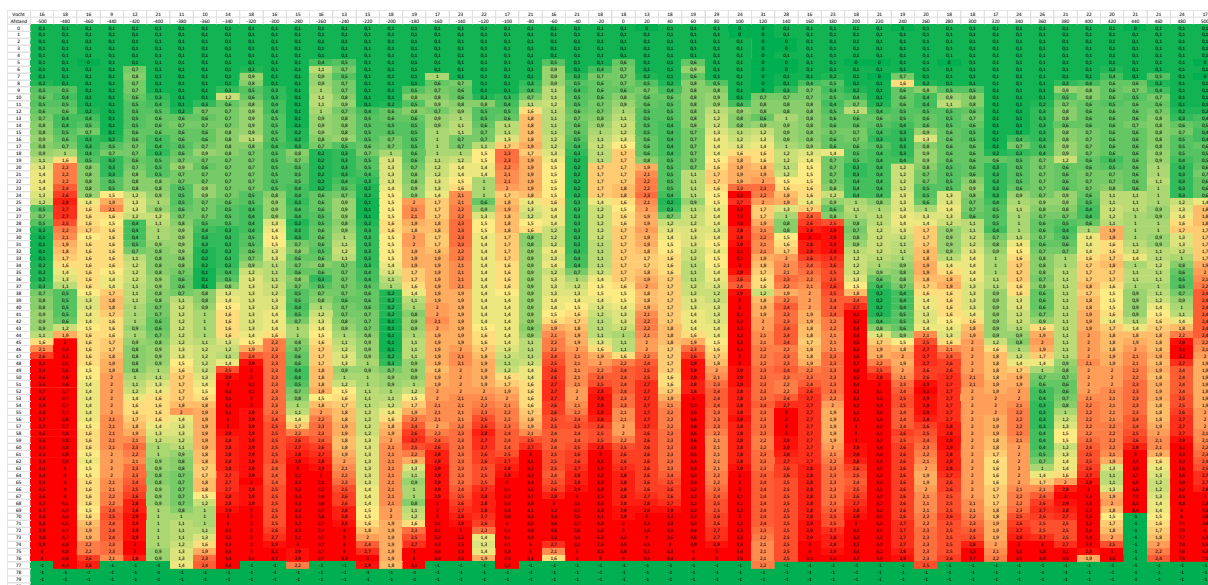
Doorsnede dunningspad 6
Gemeten op 23 oktober 2023



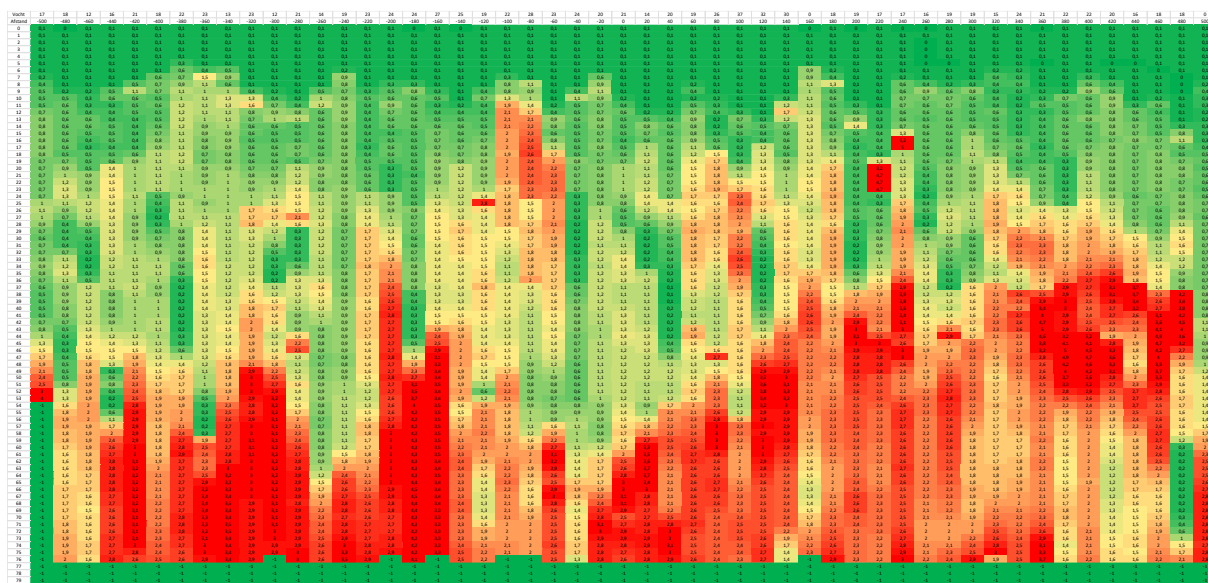
Doorsnede dunningspad 7
Gemeten op 24 oktober 2023



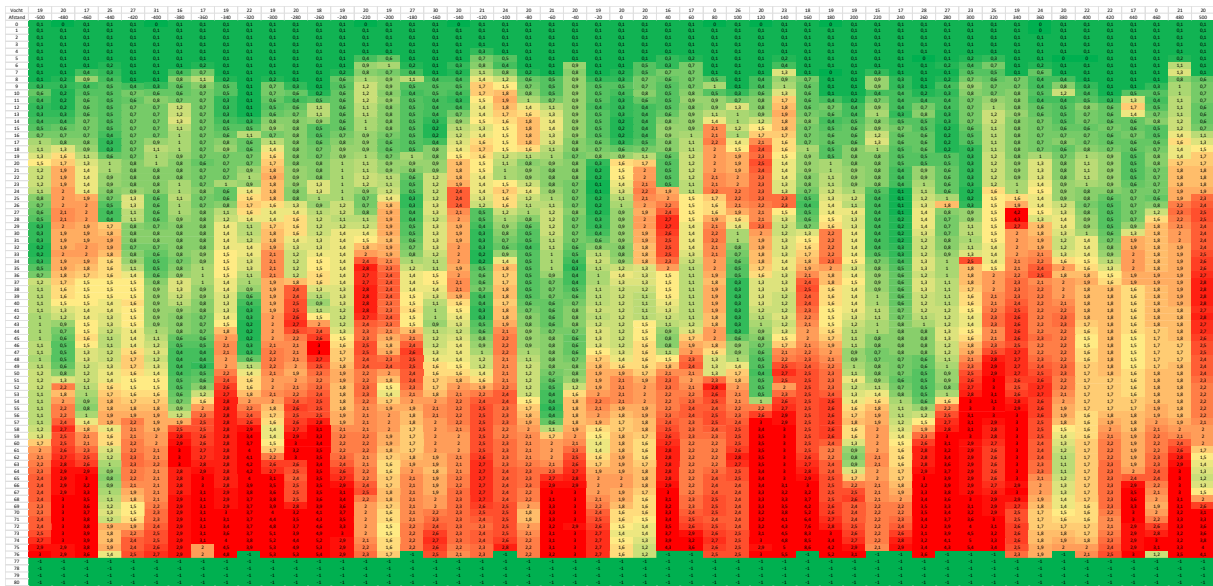
Doorsnede dunningspad 8
Gemeten op 24 oktober 2023



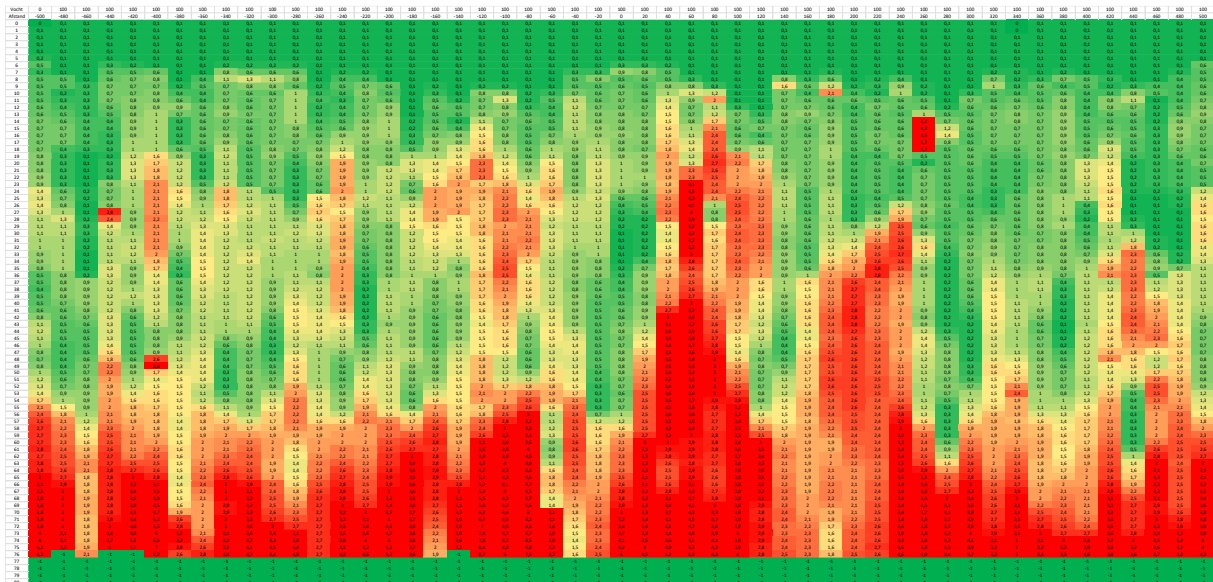
Doorsnede dunningspad 9
Gemeten op 25 en 26 oktober 2023



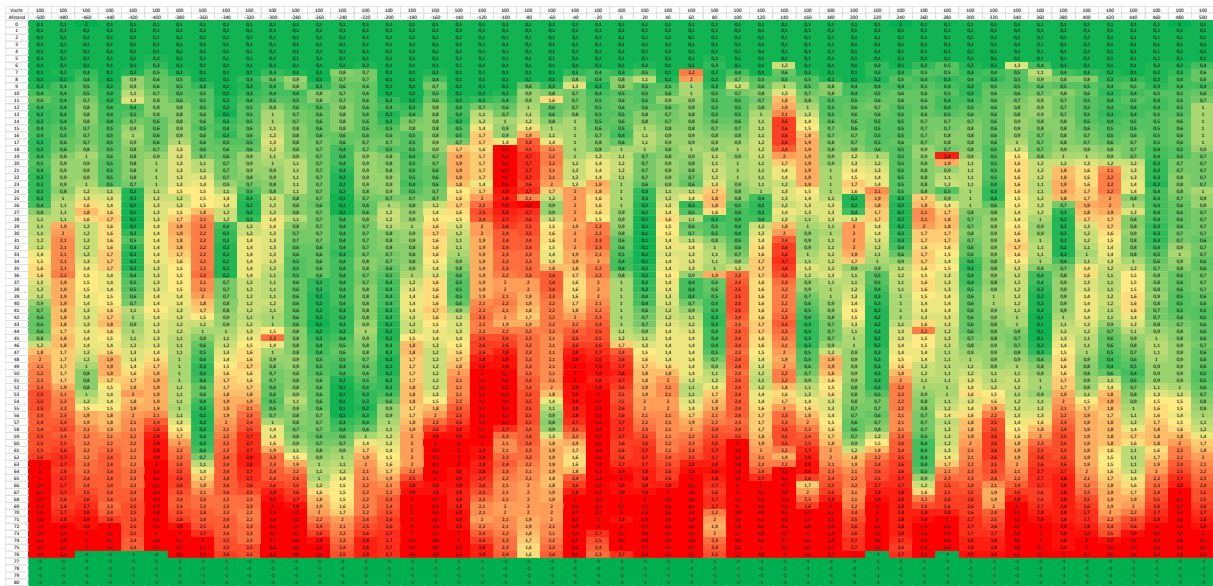
Doorsnede dunningspad 10
Gemeten op 26 oktober 2023



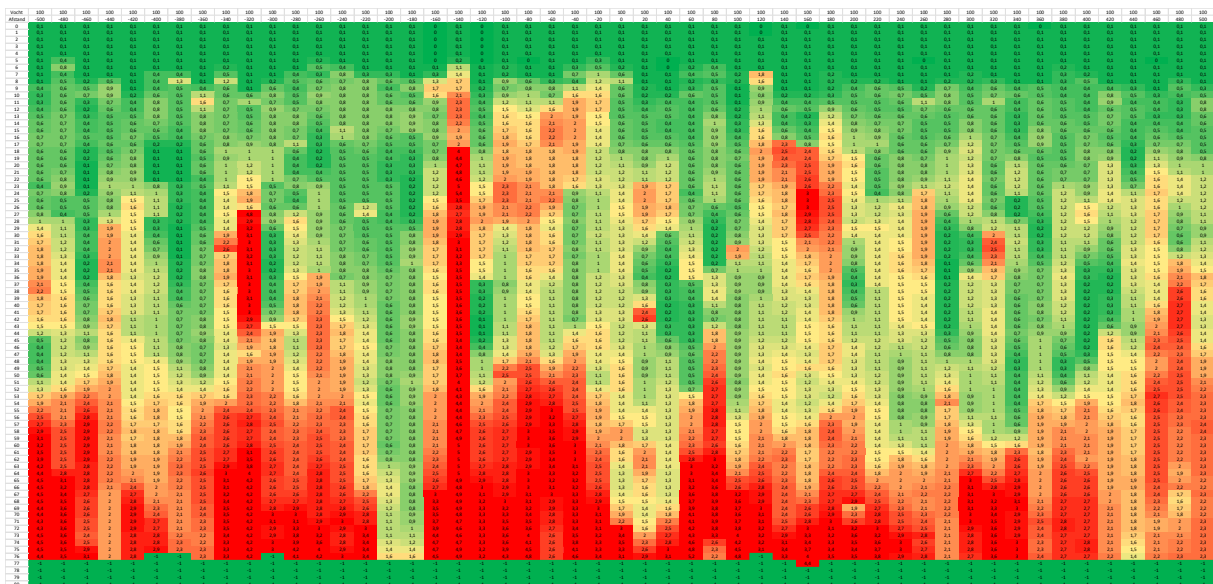
Doorsnede dunningspad 11
Gemeten op 26 oktober 2023



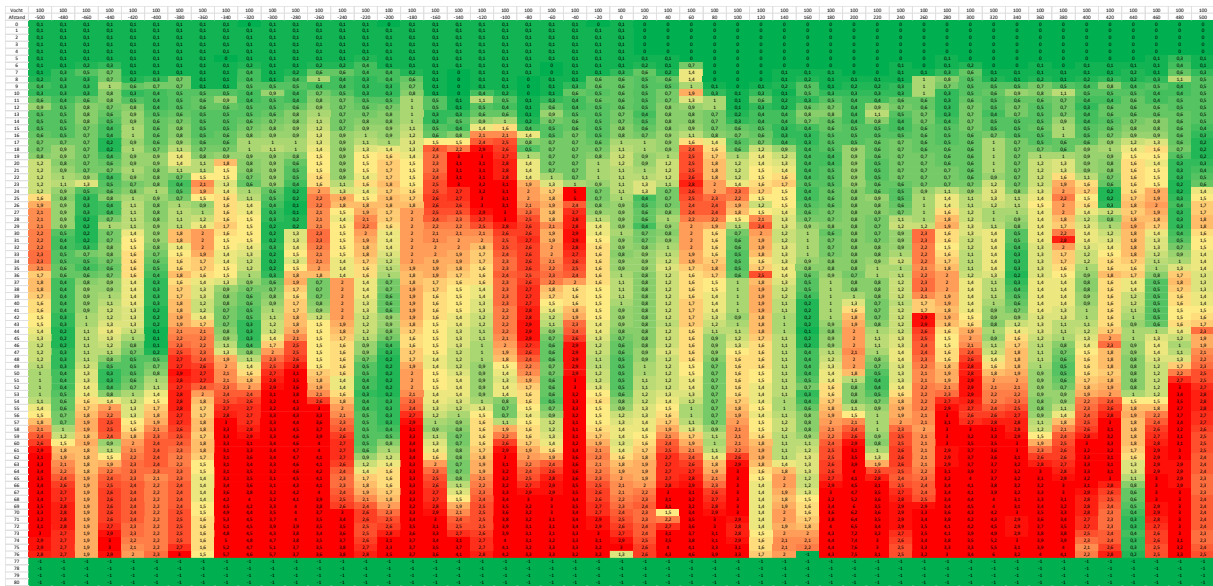
Doorsnede dunningspad 12
Gemeten op 30 oktober 2023
Vochtmeting ontbreekt



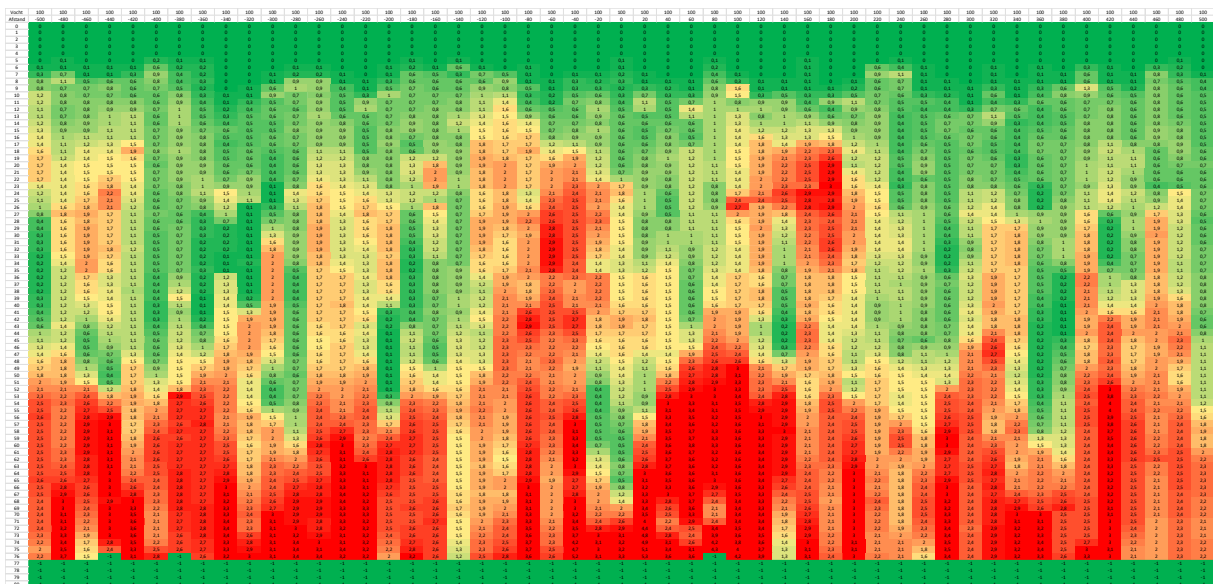
Doorsnede dunningspad 13
Gemeten op 30 oktober 2023
Vochtmeting ontbreekt



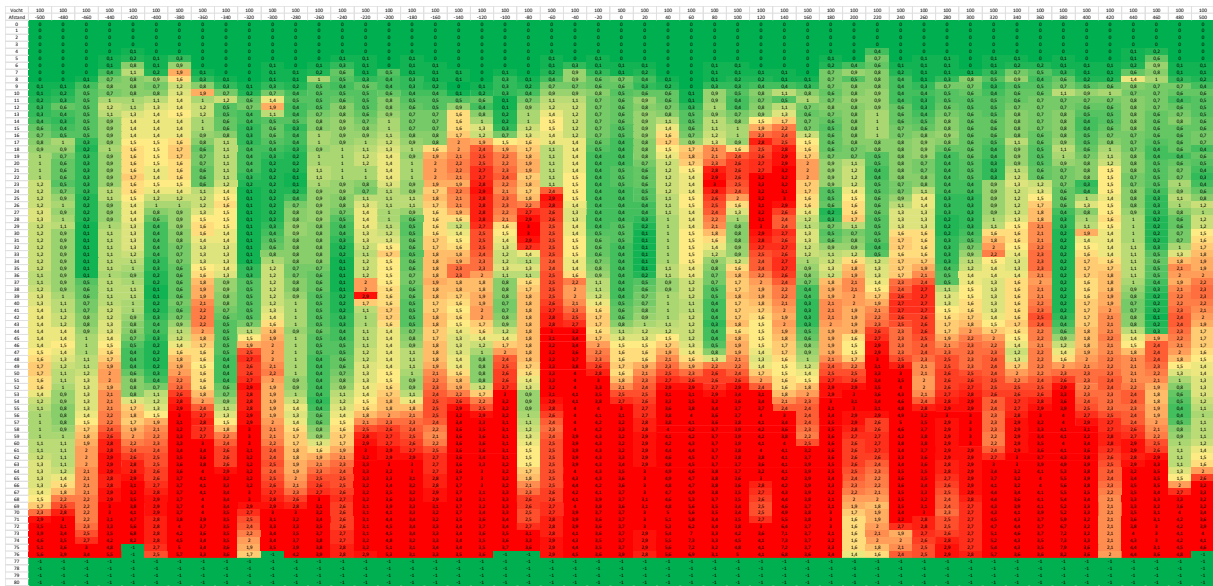
Doorsnede dunningspad 14
Gemeten op 31 oktober 2023
Vochtmeting ontbreekt



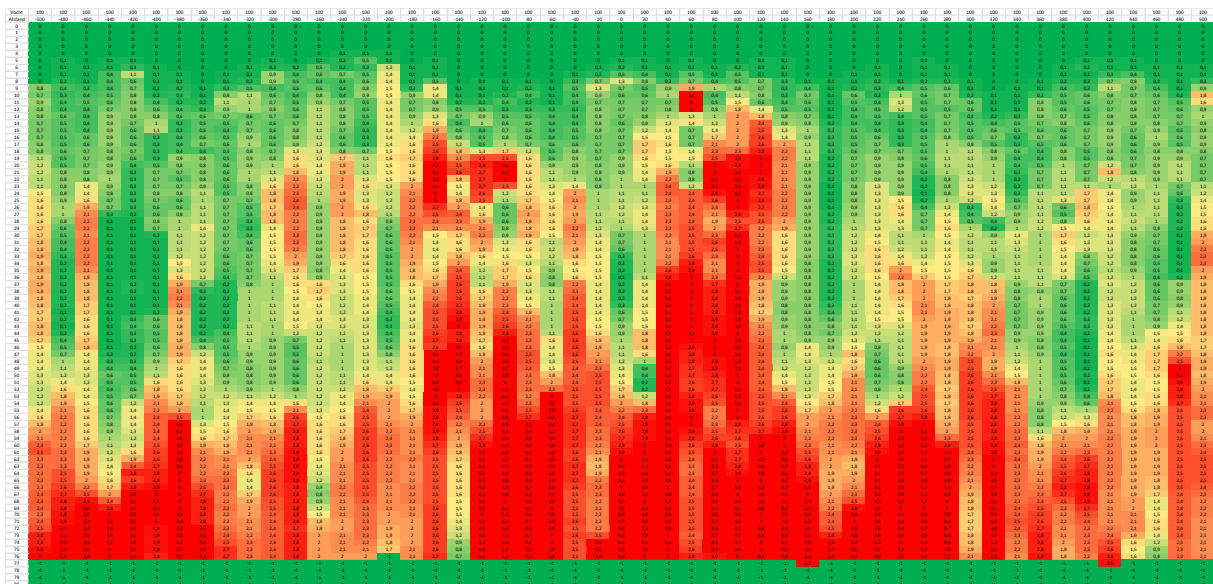
Doorsnede dunningspad 15
Gemeten op 31 oktober en 1 november 2023
Vochtmeting ontbreekt



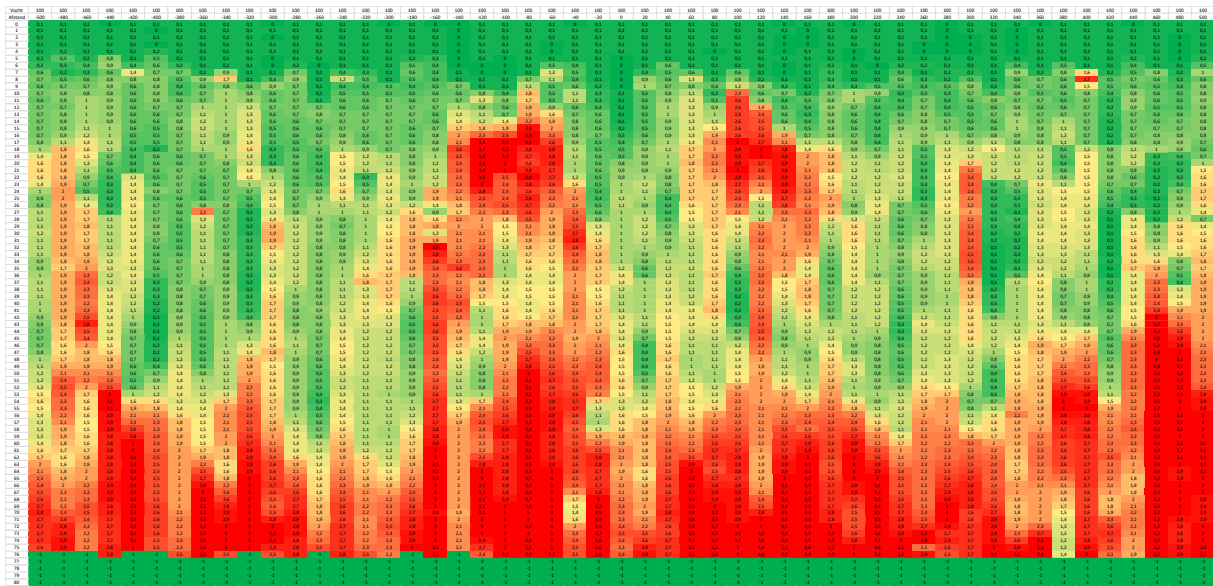
Doorsnede dunningspad 16
Gemeten op 1 november 2023
Vochtmeting ontbreekt



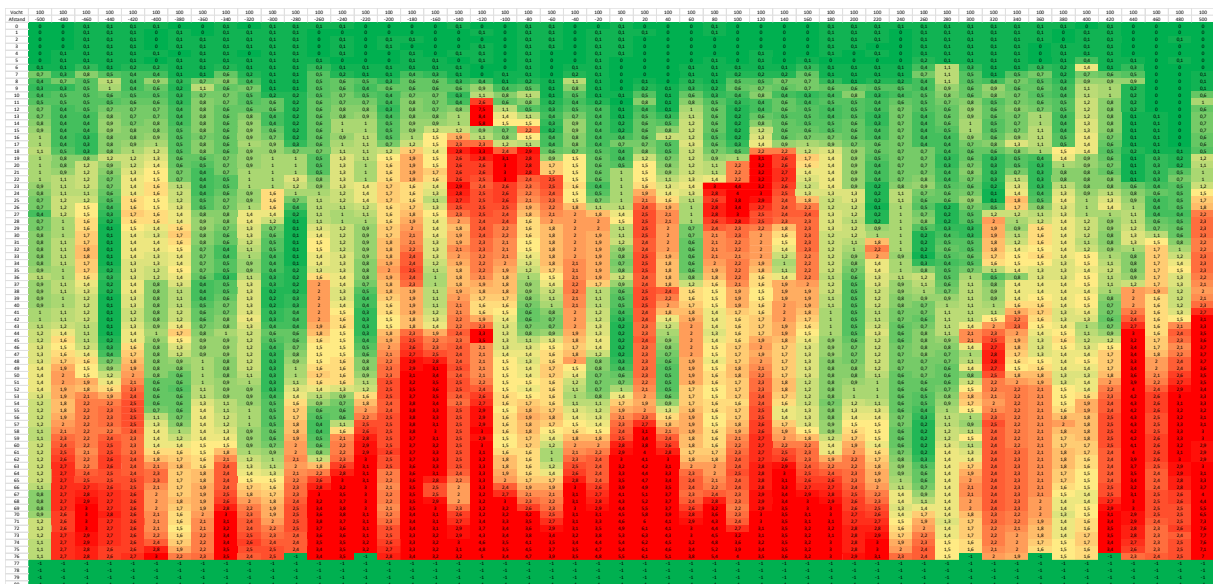
Doorsnede dunningspad 17
Gemeten op 1 en 7 november 2023
Vochtmeting ontbreekt



Doorsnede dunningspad 18
Gemeten op 7 november 2023
Vochtmeting ontbreekt



Doorsnede dunningspad 19
Gemeten op 8 november 2023
Vochtmeting ontbreekt



Doorsnede dunningspad 20
Gemeten op 8 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

Doorsnede dunningspad 21
Gemeten op 9 november 2023
Vochtmeting ontbreekt

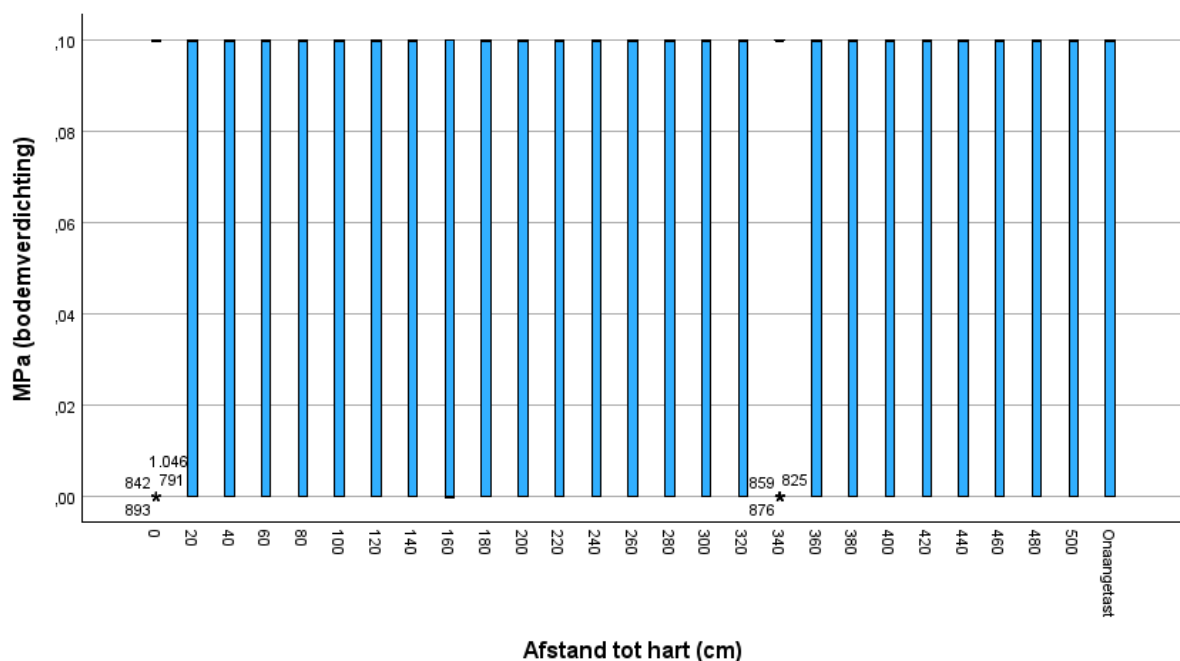
Bijlage 3 - Resultaten, discussie en conclusie per centimeter

In deze bijlage zijn de resultaten weergegeven van de gegevensanalyses die zijn uitgevoerd voor elke centimeter diepte. Deze resultaten geven een exacter beeld van de grootte van de invloedssfeer van houtoogst, maar doordat in deze methode minder gegevens per analyse zijn gebruikt zijn de resultaten ook minder betrouwbaar dan de analyse bij het gebruik van dieptecategorieën. In deze bijlage wordt voor elke centimeter diepte de boxplots per centimeter diepte weergegeven, vervolgens de p-waarden van de post-hoc-Tukey-toets waarin het verschil in significantie tussen een onaangetaste bodem en de locaties bij het dunningspad voor elke centimeter diepte worden vergeleken. Vervolgens is er een discussie ten aanzien van deze resultaten en ten slotte worden deze resultaten geïnterpreteerd.

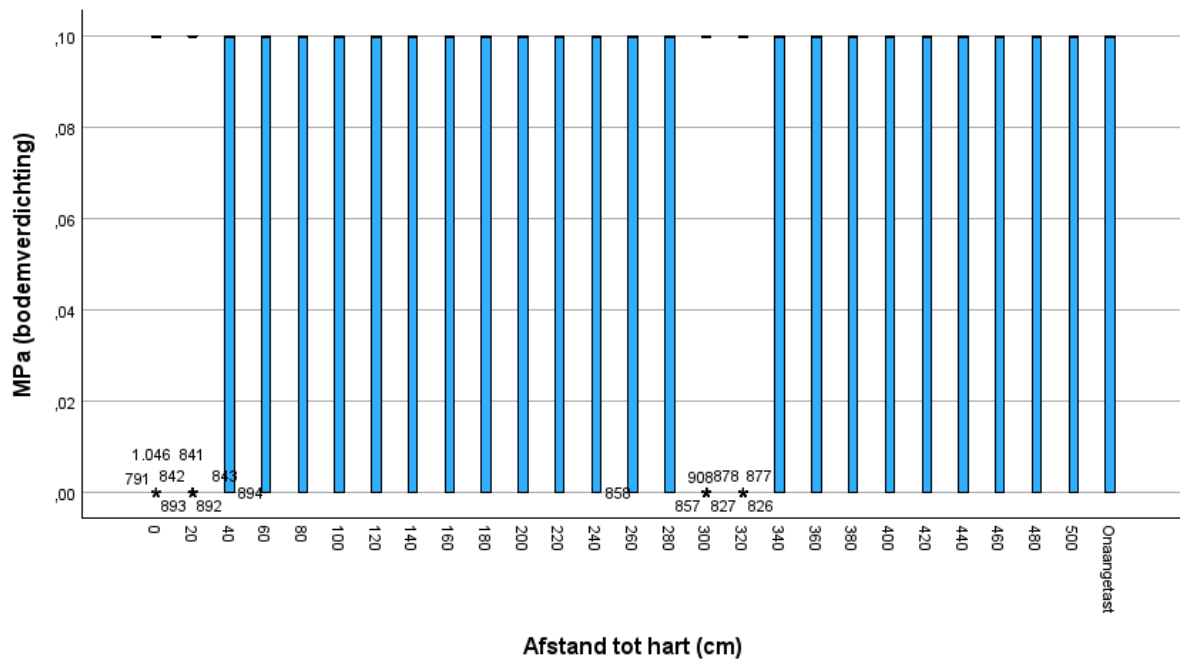
Boxplots per centimeter onder maaiveld

Hieronder volgen de 81 boxplots waarin per centimeter onder maaiveld de gemeten MPa-waarden per locatie zijn weergegeven (Boxplot 1 tot en met Boxplot 81). In elk figuur zijn 27 boxplots te zien. Helemaal links in het figuur is de boxplot voor afstand 0 centimeter van het hart van het dunningspad. Elk volgend boxplot geeft de gegevens weer voor 20 centimeter verder van het hart van het dunningspad, tot 500 centimeter. Helemaal rechts in de figuren zijn de gegevens voor de onaangetaste bodem te zien.

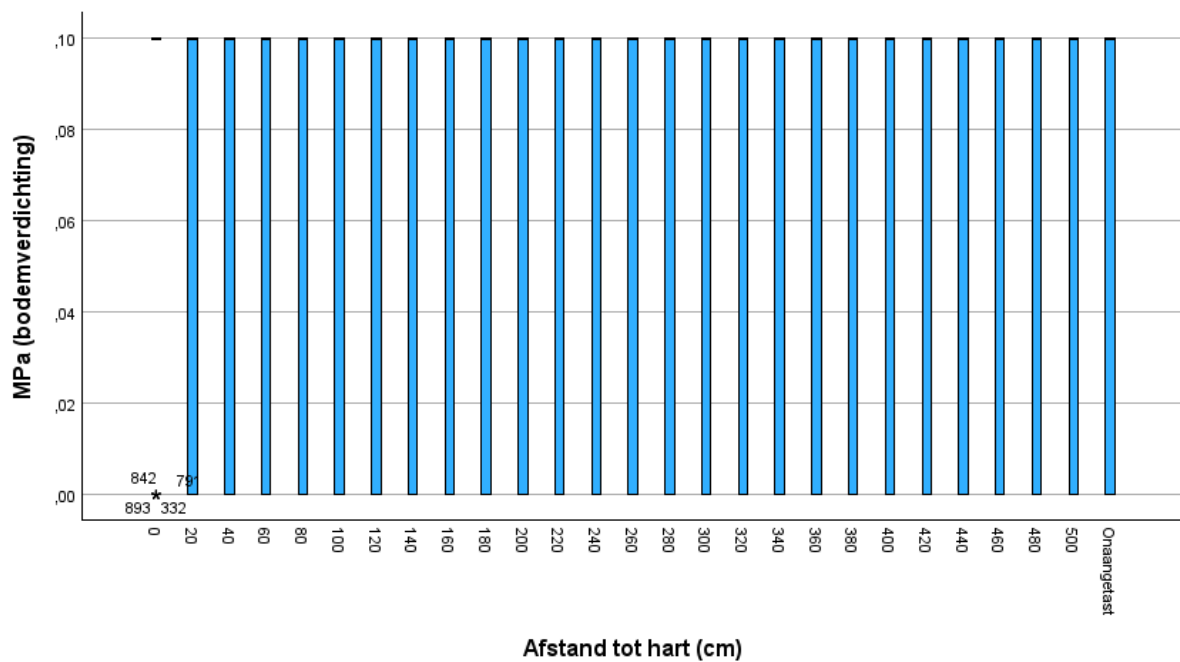
Op de y-as is de bodemverdichting in MPa weergegeven. Hoe hoger deze is, hoe meer de bodem is verdicht. De schaal is niet in alle boxplots hetzelfde, naarmate de diepere bodemlagen worden bereikt zijn de gemeten waarden gemiddeld hoger. Bijzonderheden van de boxplots worden in de bijschriften toegelicht.



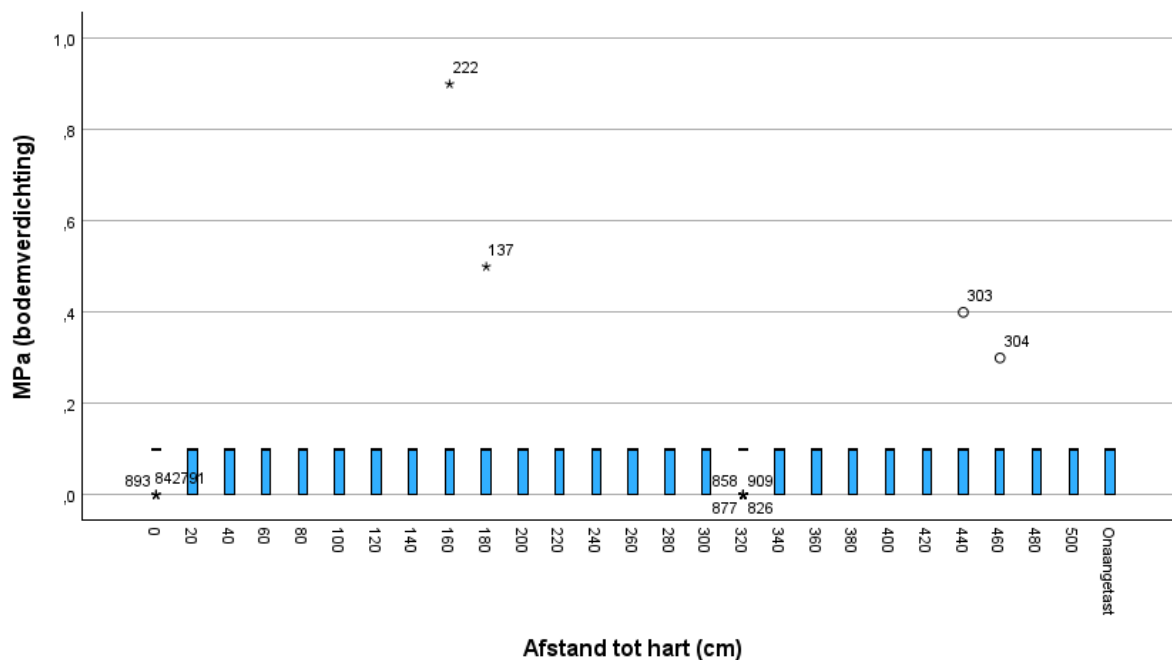
Boxplot 1, MPa per afstand voor diepte 0. Alle metingen zijn van de strooisellaag, de y-as gaat tot 0,1 MPa.



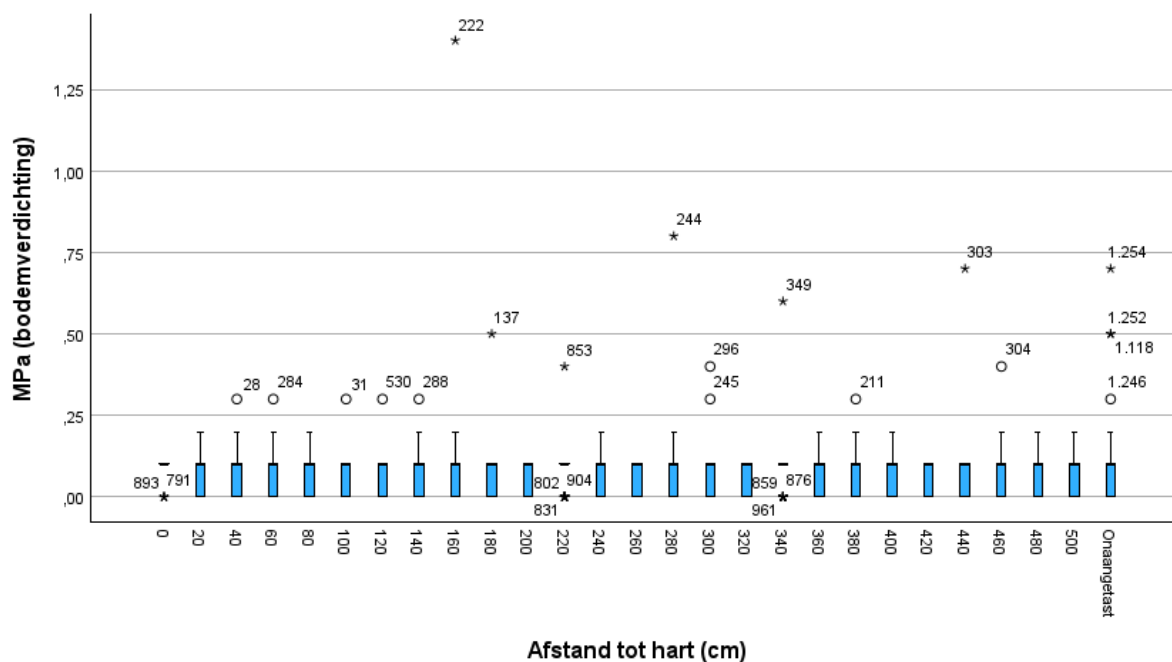
Boxplot 2, MPa per afstand voor diepte 1. Alle metingen zijn van de strooisellaag, de y-as gaat tot 0,1 MPa.



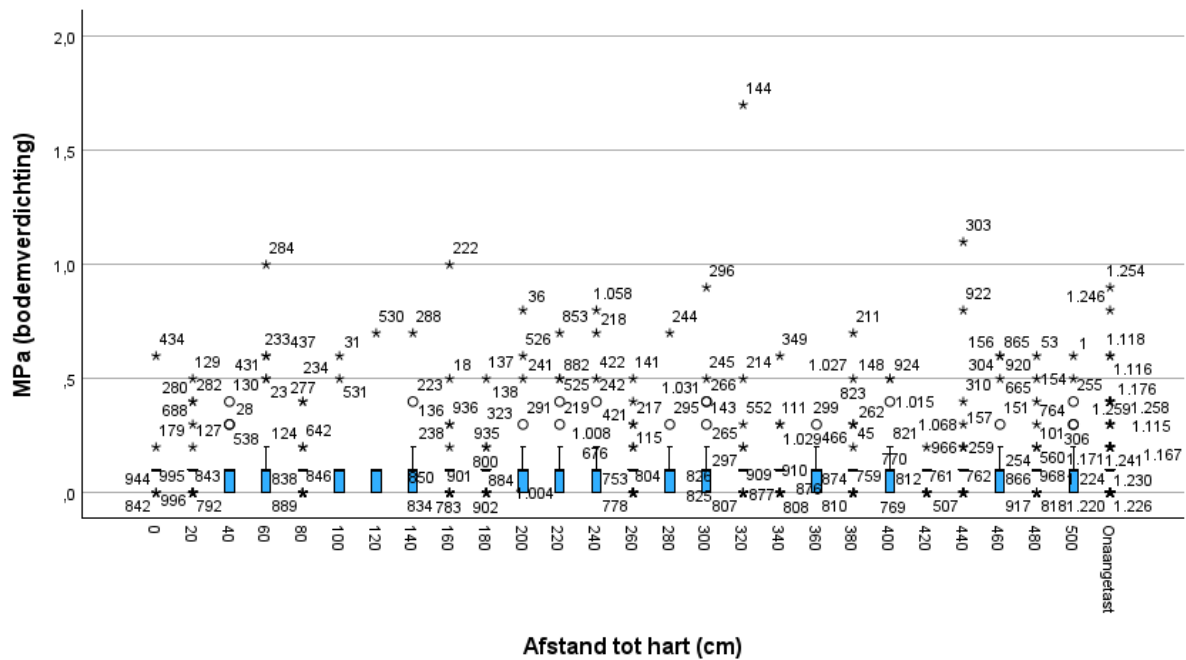
Boxplot 3, MPa per afstand voor diepte 2. Alle metingen zijn van de strooisellaag, de y-as gaat tot 0,1 MPa.



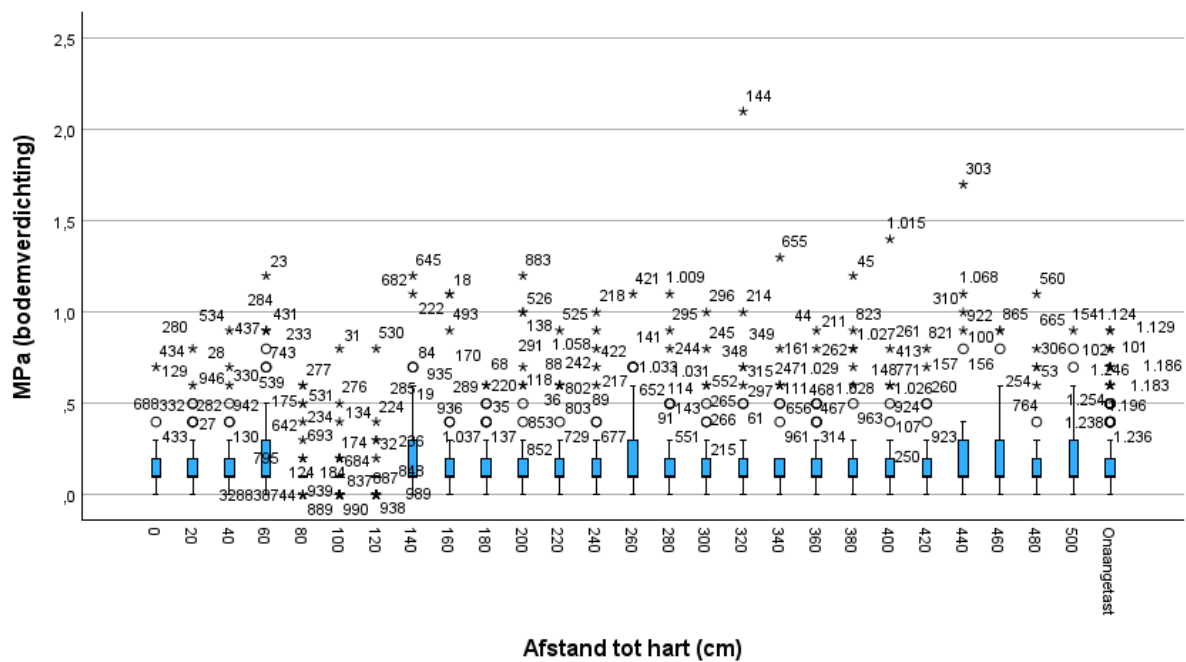
Boxplot 4, MPA per afstand voor diepte 3. Bijna alle metingen zijn van de strooisellaag. Er zijn enkele uitschieters, maar de 1,0 MPa wordt nog niet overschreden.



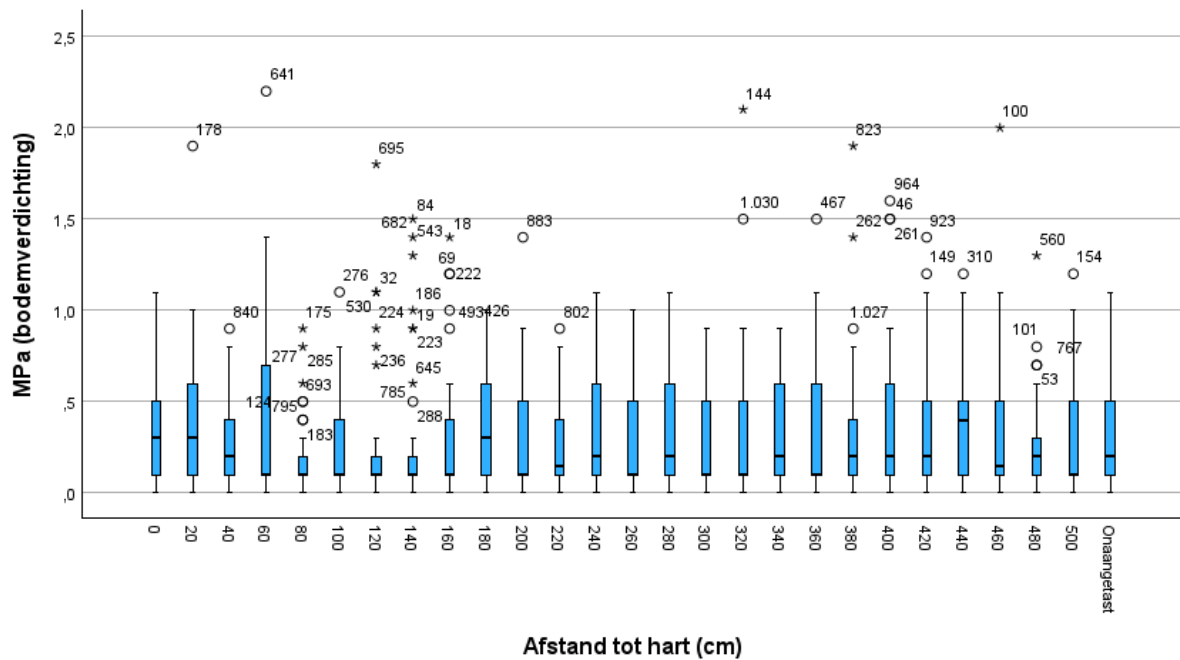
Boxplot 5, MPA per afstand voor diepte 4. De meeste metingen zijn in de strooisellaag. Een enkele uitschieter overschrijdt de 1,0 MPa, maar anderen blijven onder deze waarde.



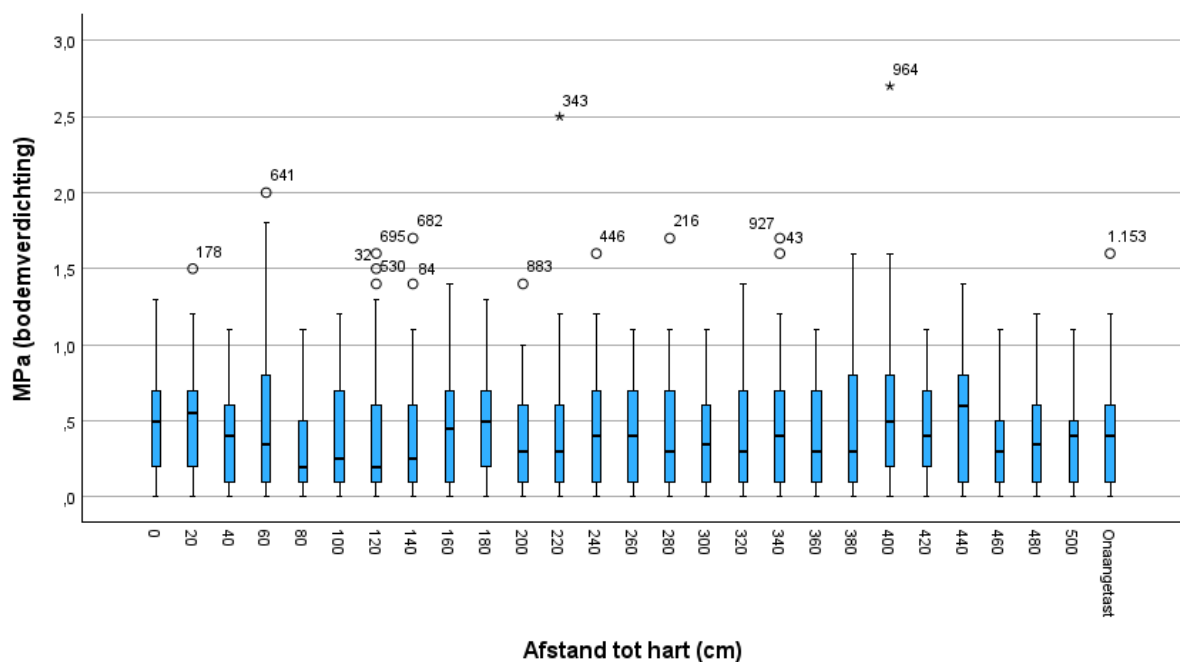
Boxplot 6, MPA per afstand voor diepte 5. Steeds minder metingen zijn van de strooisellaag.



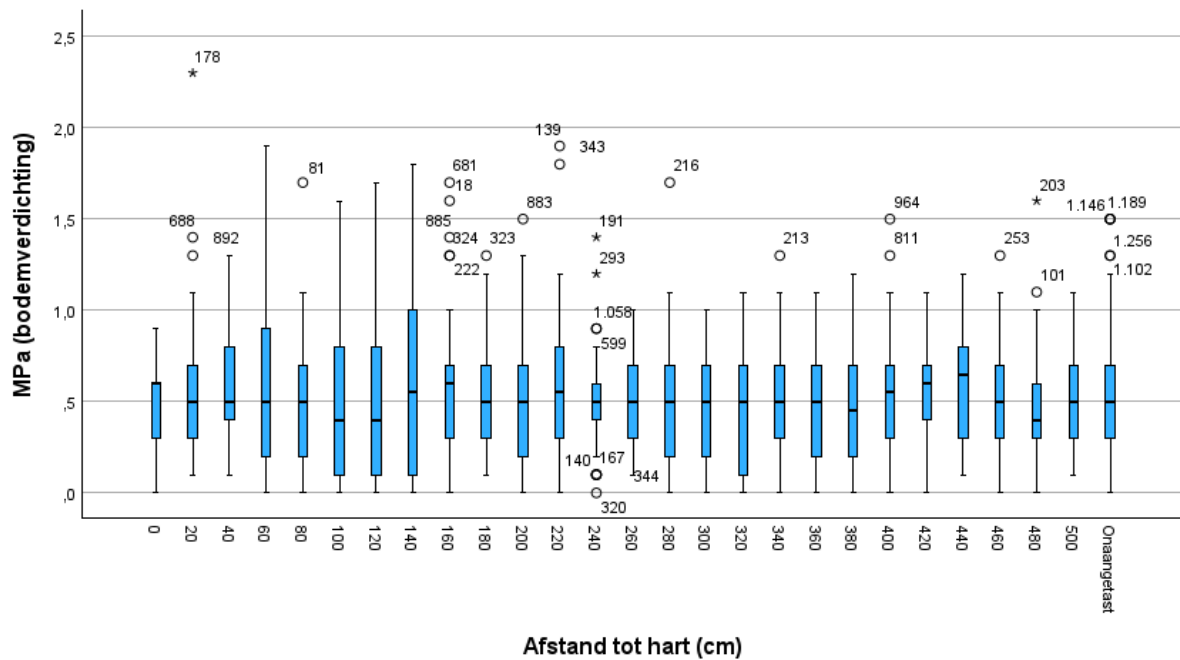
Boxplot 7, MPA per afstand voor diepte 6



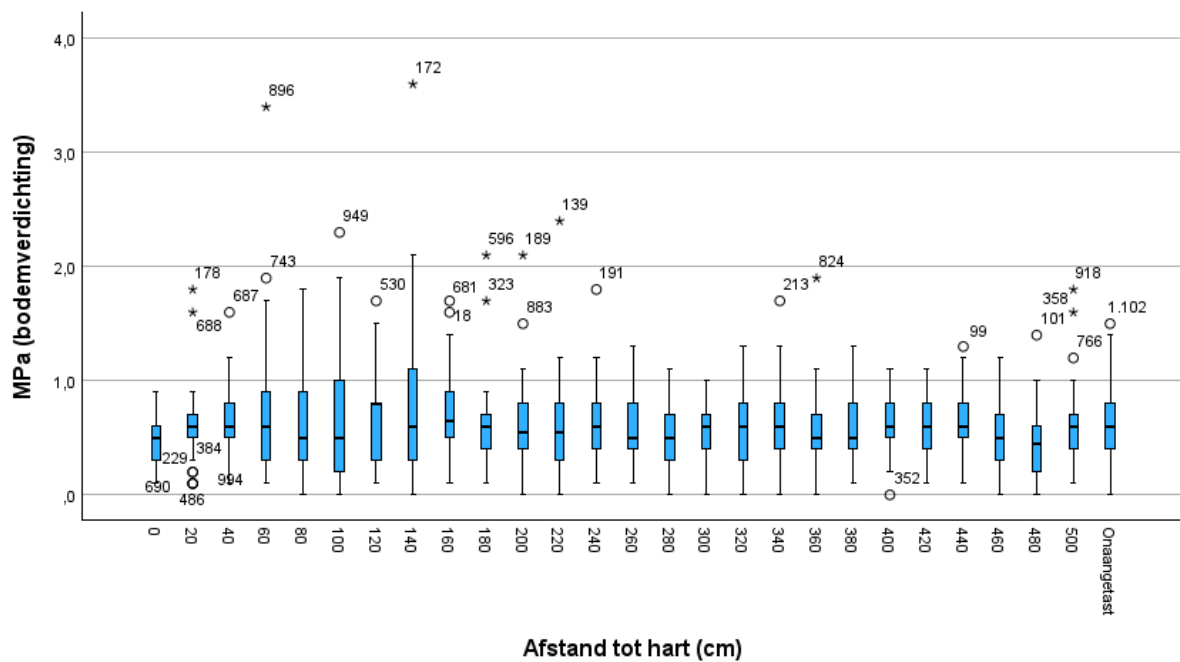
Boxplot 8, MPa per afstand voor diepte 7. Vanaf dit boxplot zijn de meeste metingen daadwerkelijk van de bodem. Op deze diepte is de bodem, met gemiddelde waarden ruim onder 0,5 MPa, niet verdicht.



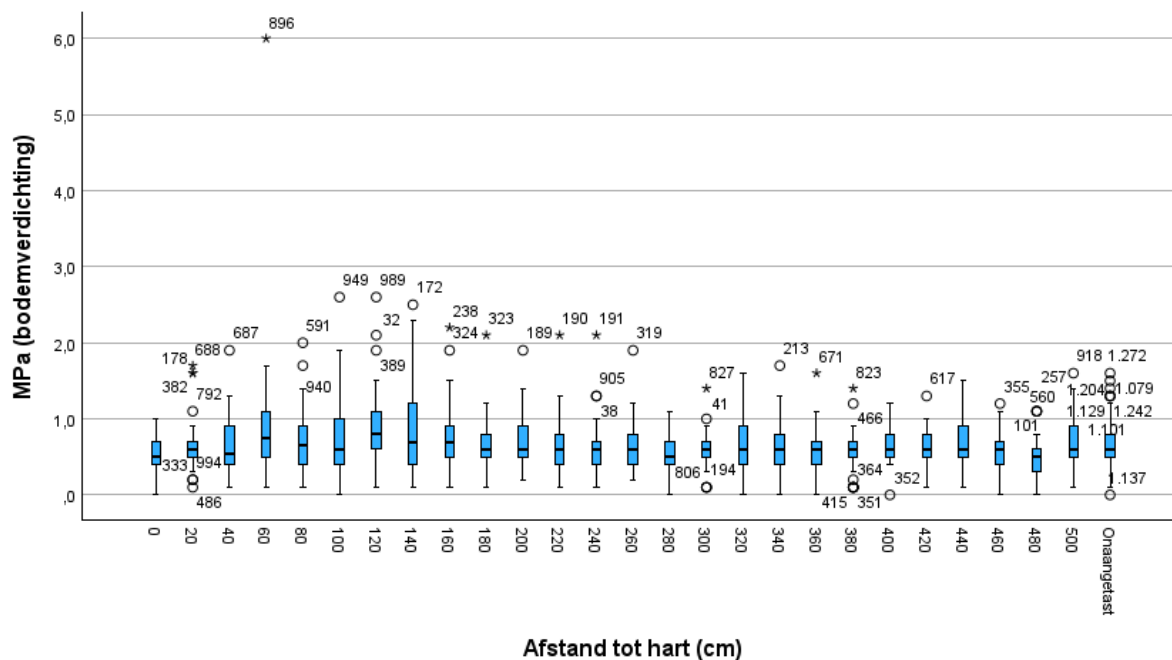
Boxplot 9, MPa per afstand voor diepte 8



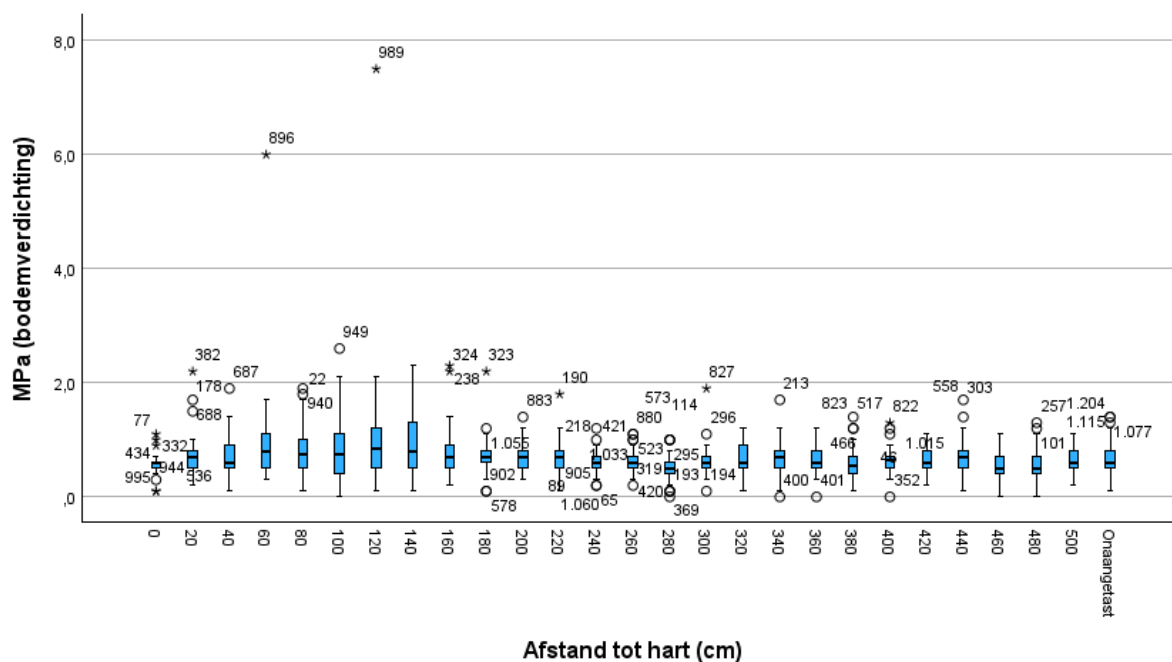
Boxplot 10, MPa per afstand voor diepte 9



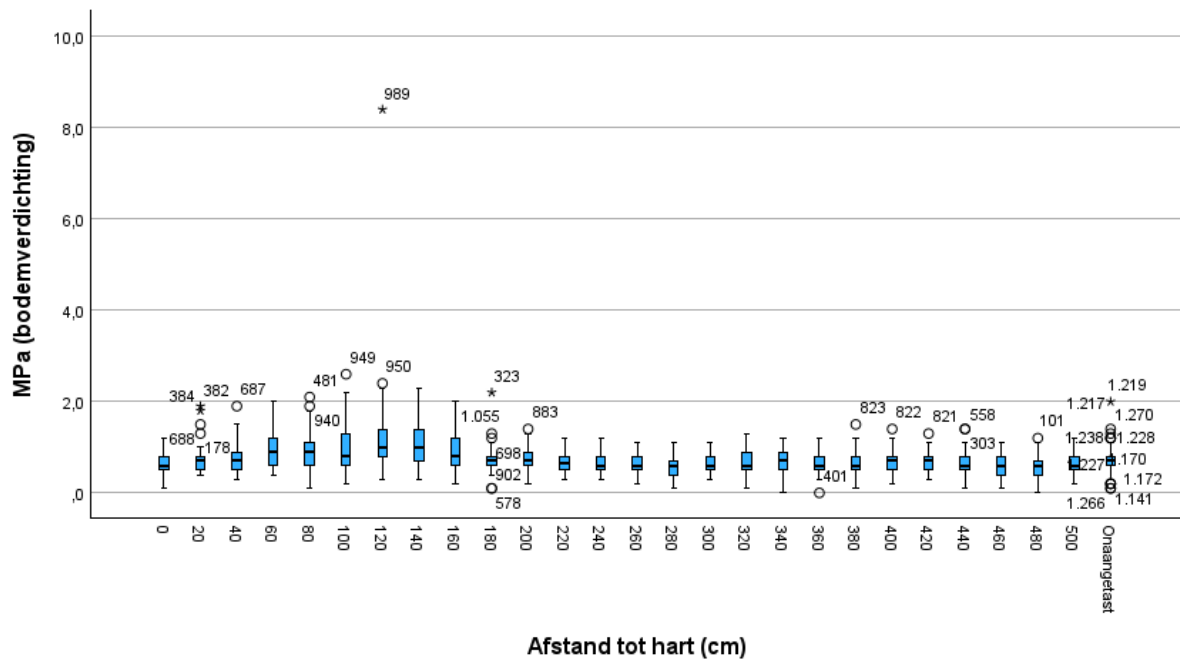
Boxplot 11, MPa per afstand voor diepte 10. Verschillen tussen locaties beginnen vanaf deze diepte duidelijk te worden. Gemiddelden liggen nog steeds onder de 1,0 MPa. Enkele uitschieters passeren de 3 MPa, bij deze metingen is de penetrologger op een boomwortel of een kei gekomen.



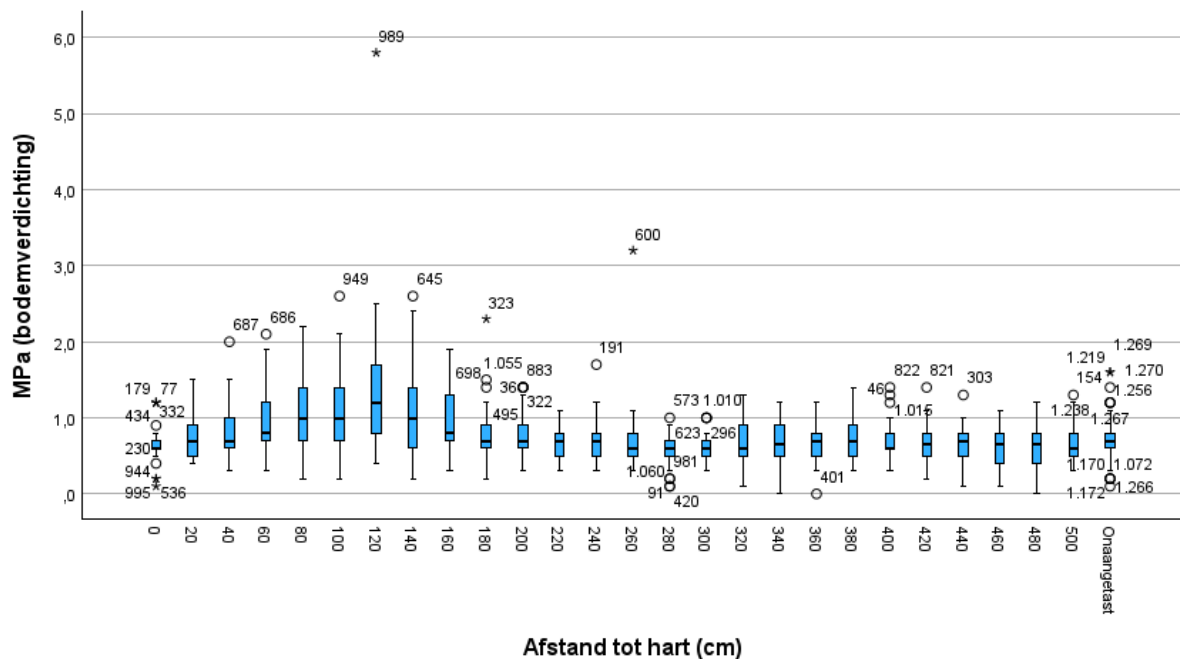
Boxplot 12, MPa per afstand voor diepte 11. De verschillen zijn nog steeds duidelijk. De uitschieter van 6,0 MPa op 60 centimeter van het hart van het dunningspad is veroorzaakt doordat de penetrologger op een boomwortel stuitte.



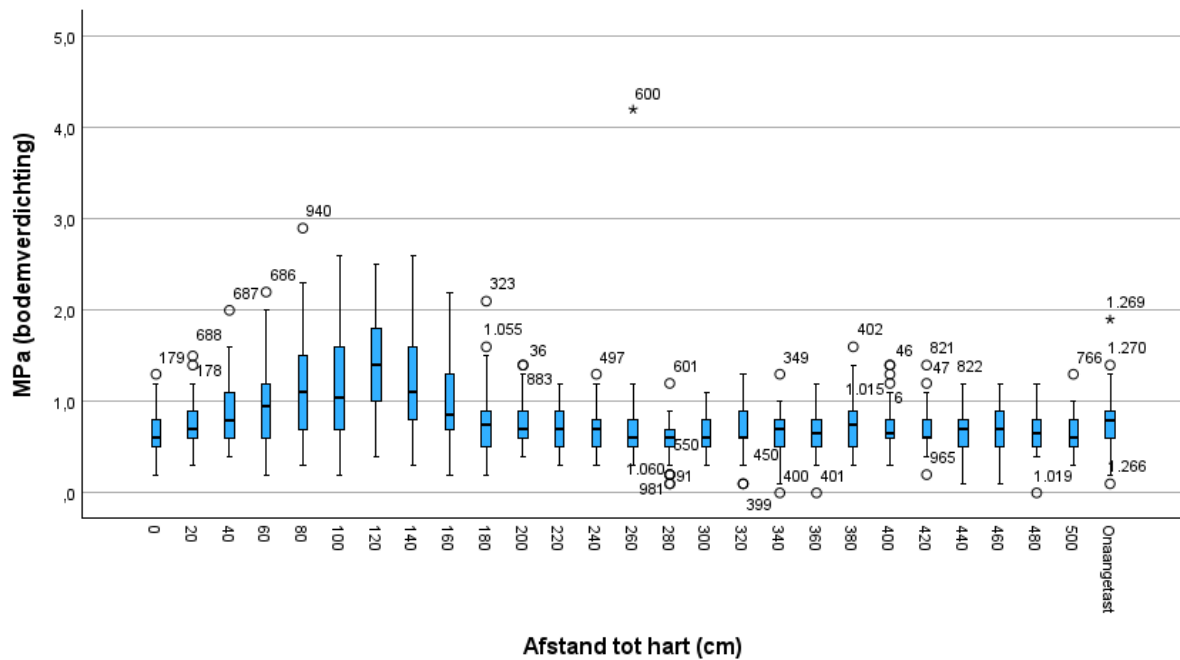
Boxplot 13, MPa per afstand voor diepte 12. De uitschieters op 60 en 120 centimeter van het hart van het dunningspad zijn veroorzaakt doordat de penetrologger op een boomwortel stuitte



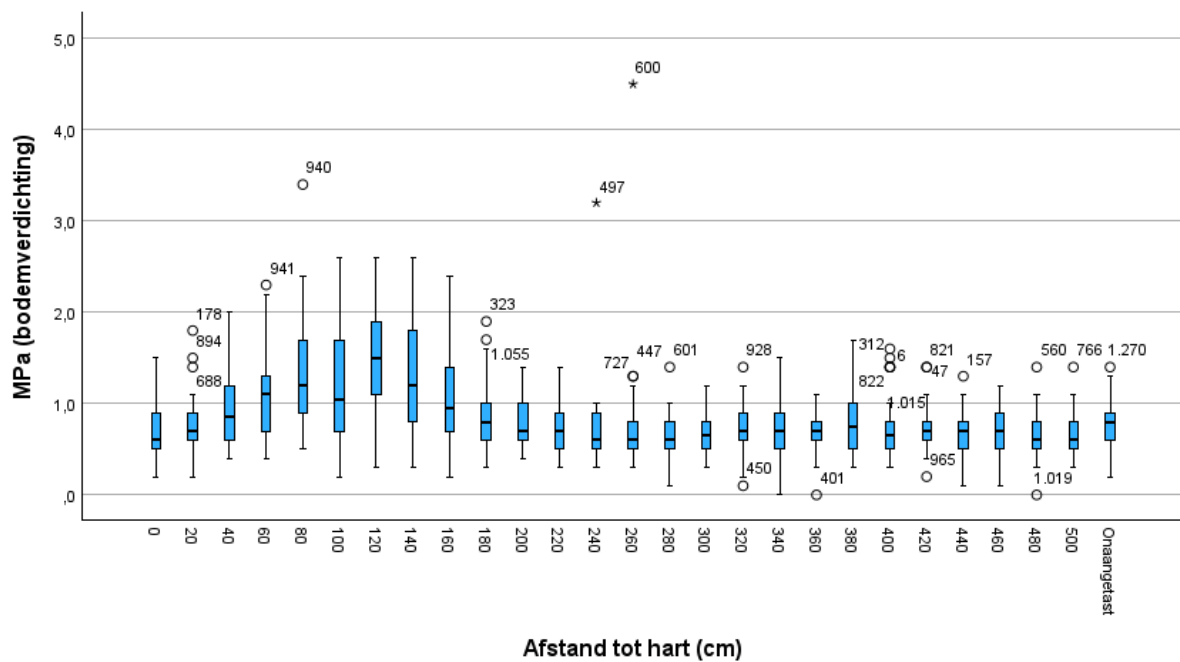
Boxplot 14, MPa per afstand voor diepte 13. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 80 tot en met 180 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden. De uitschieter op 120 centimeter van het hart van het dunningspad is veroorzaakt doordat de penetrologger op een boomwortel stuitte.



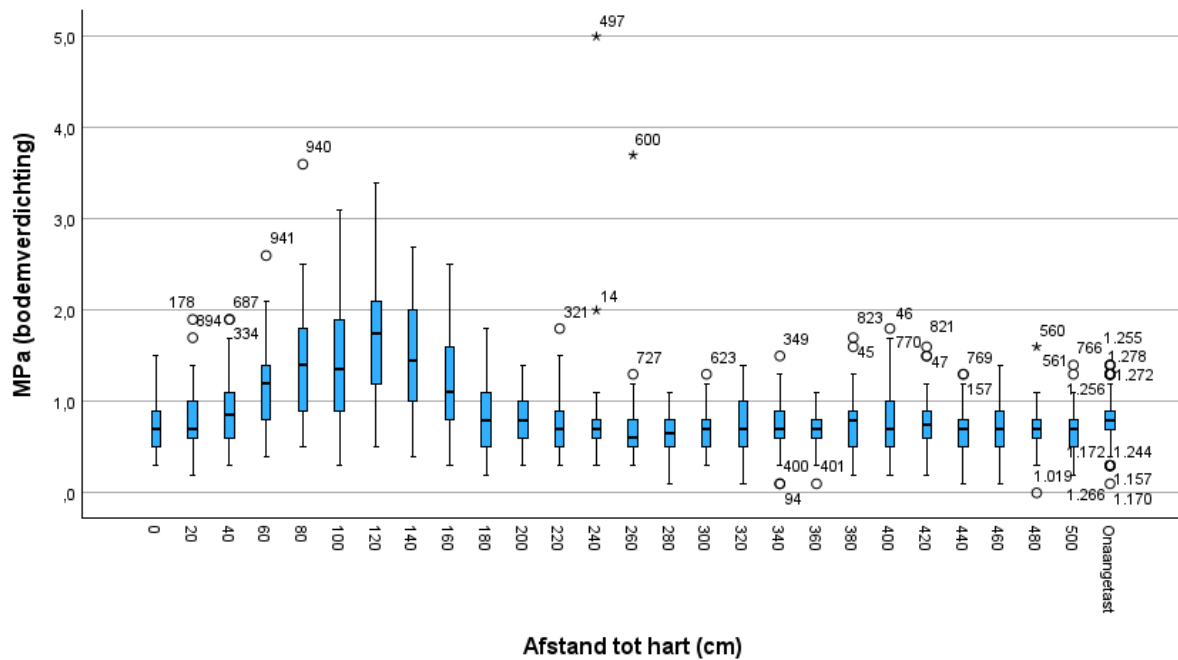
Boxplot 15, MPa per afstand voor diepte 14. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 80 tot en met 180 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



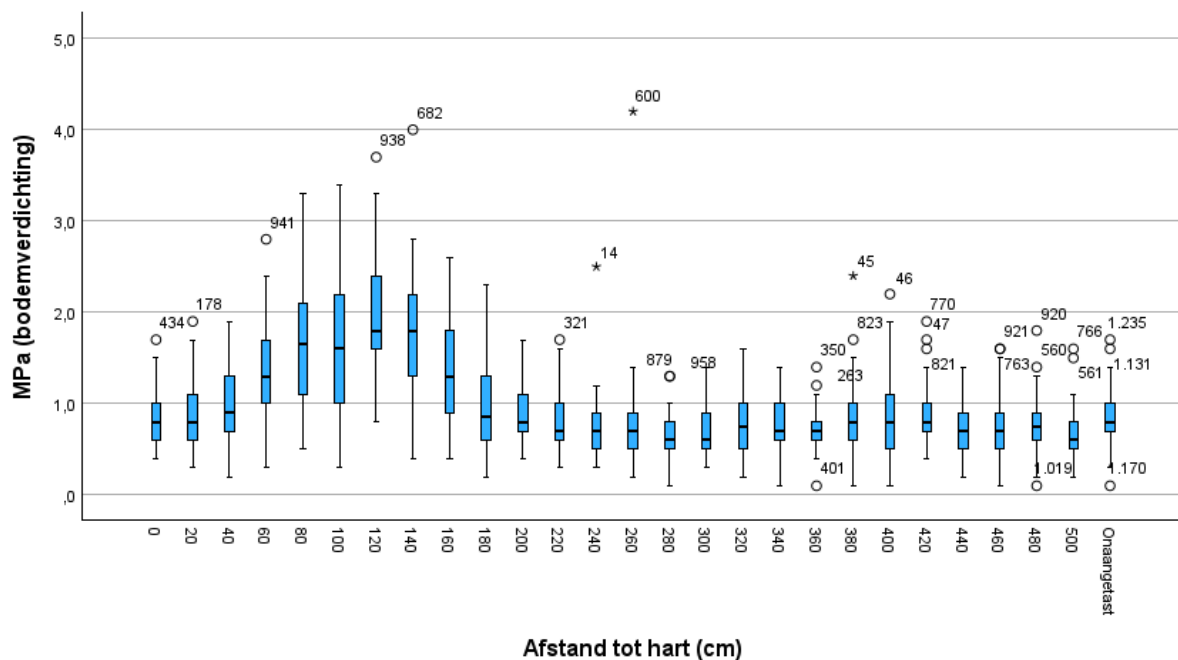
Boxplot 16, MPa per afstand voor diepte 15. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



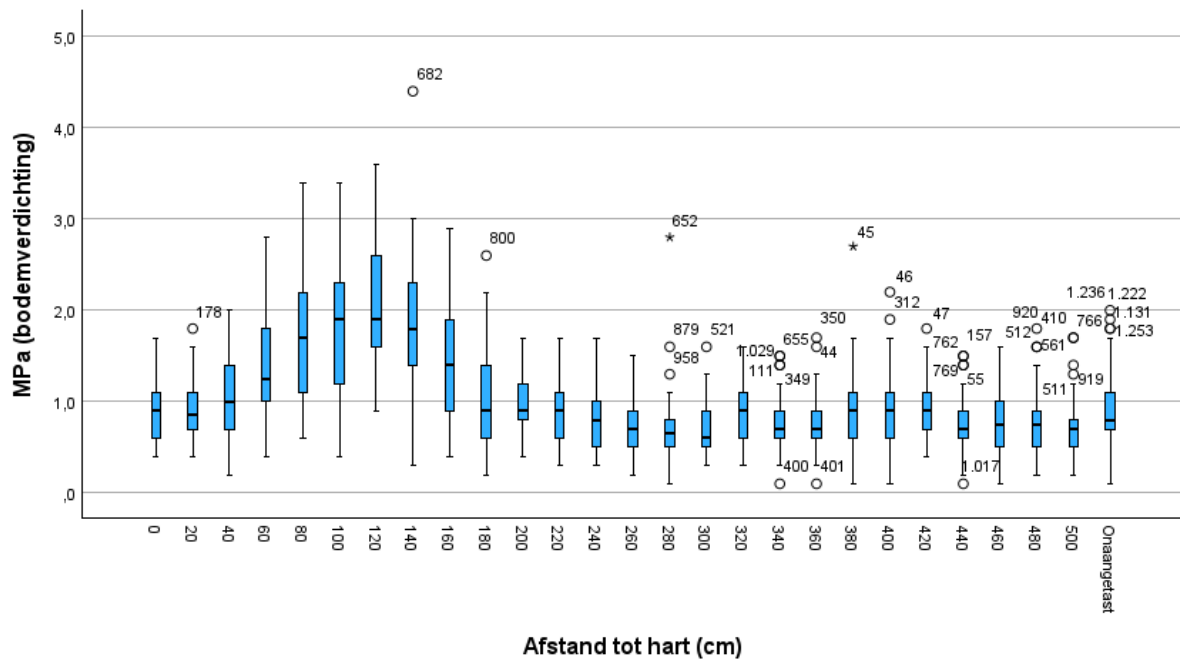
Boxplot 17, MPa per afstand voor diepte 16. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



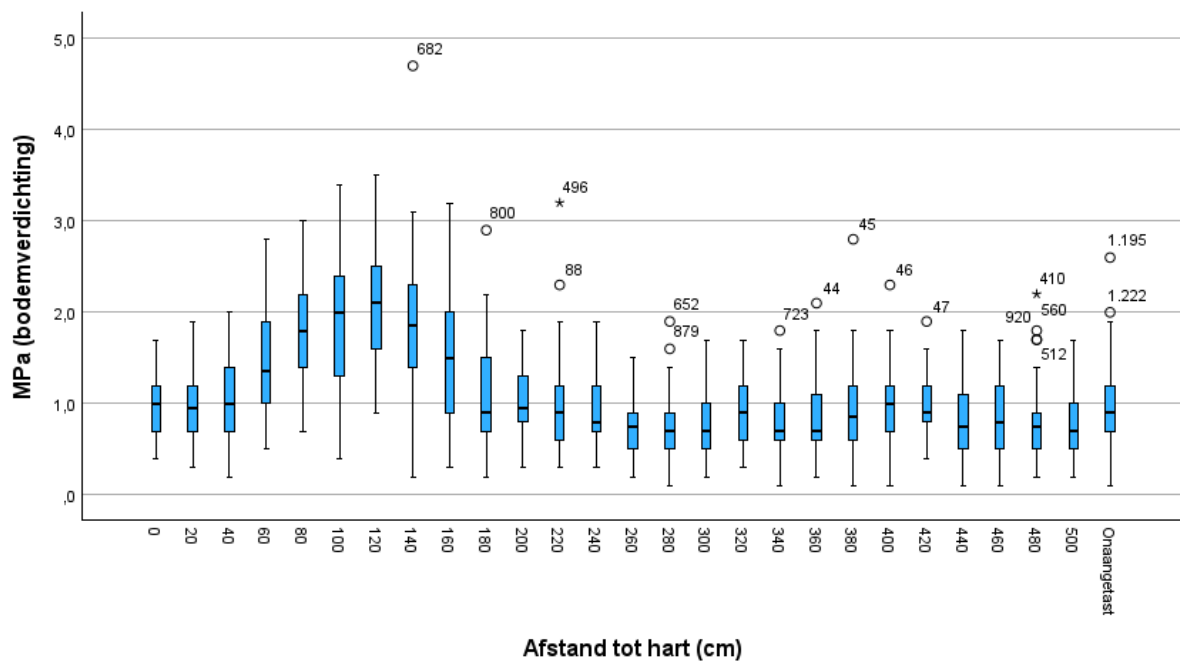
Boxplot 18, MPa per afstand voor diepte 17. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



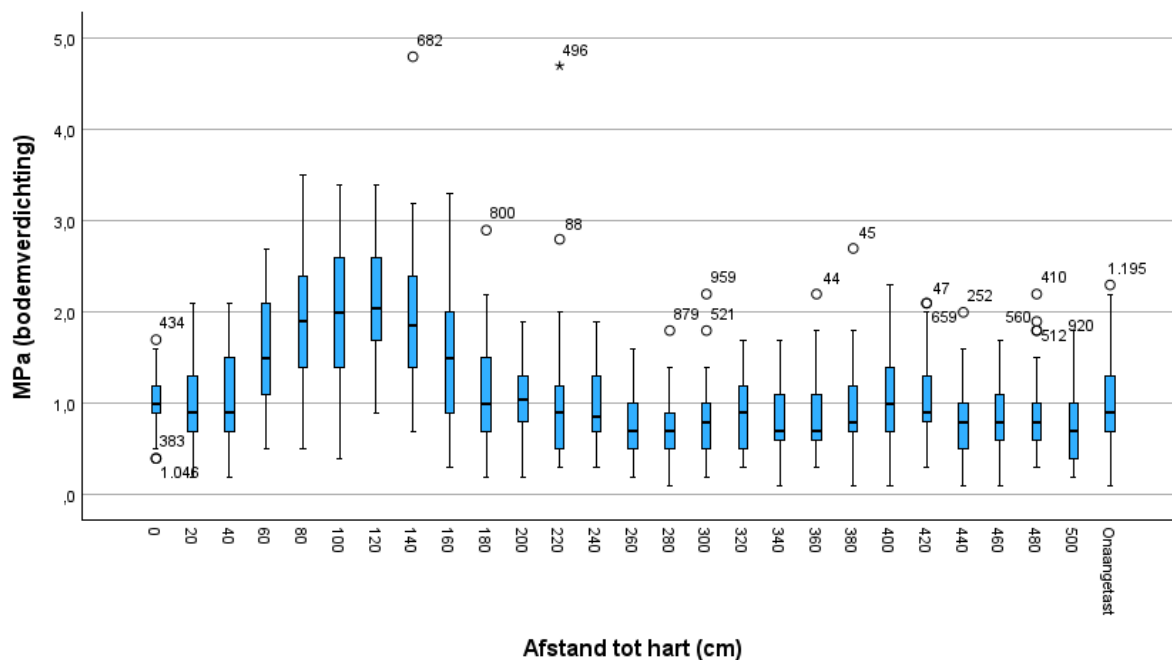
Boxplot 19, MPa per afstand voor diepte 18. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



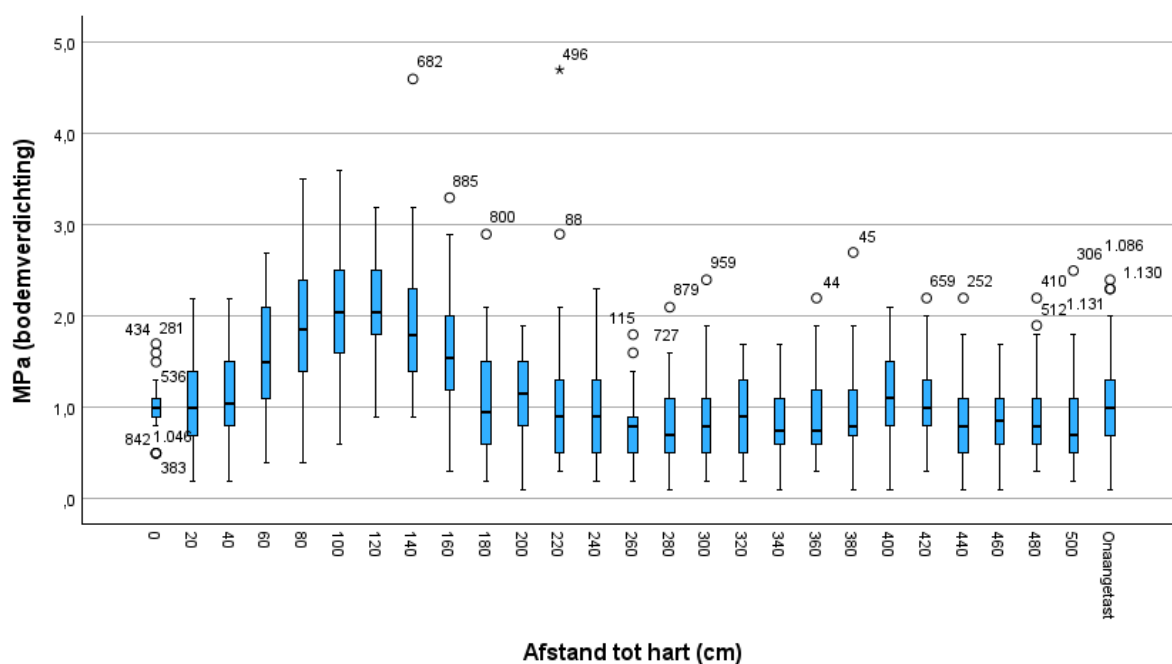
Boxplot 20, MPa per afstand voor diepte 19. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



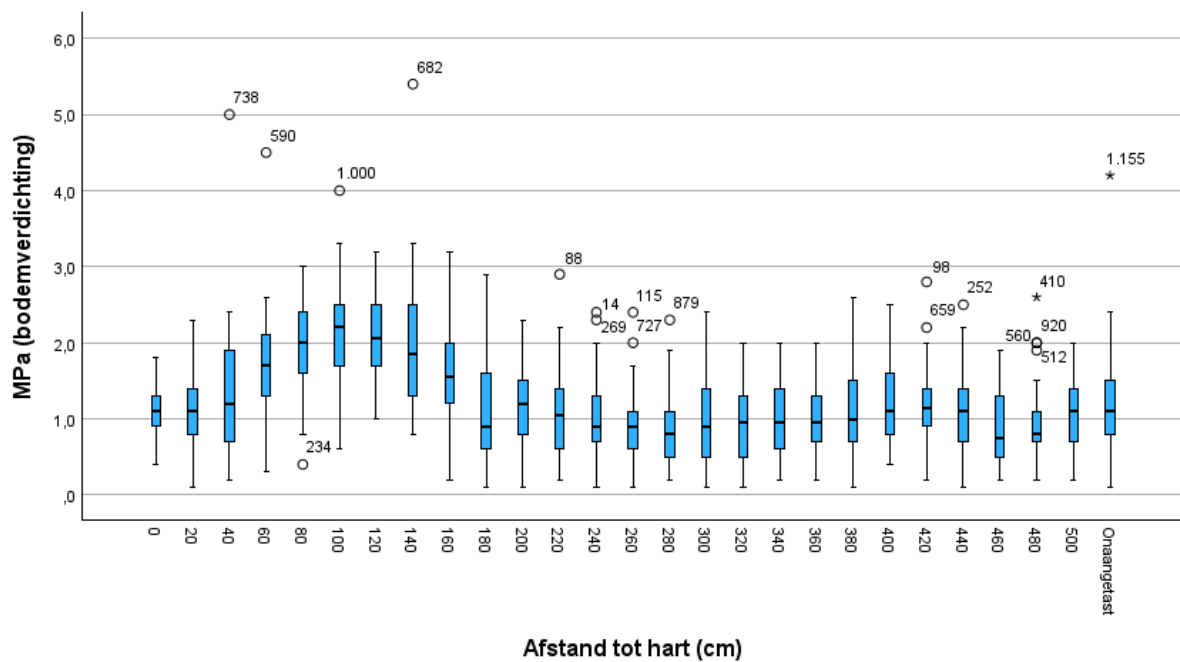
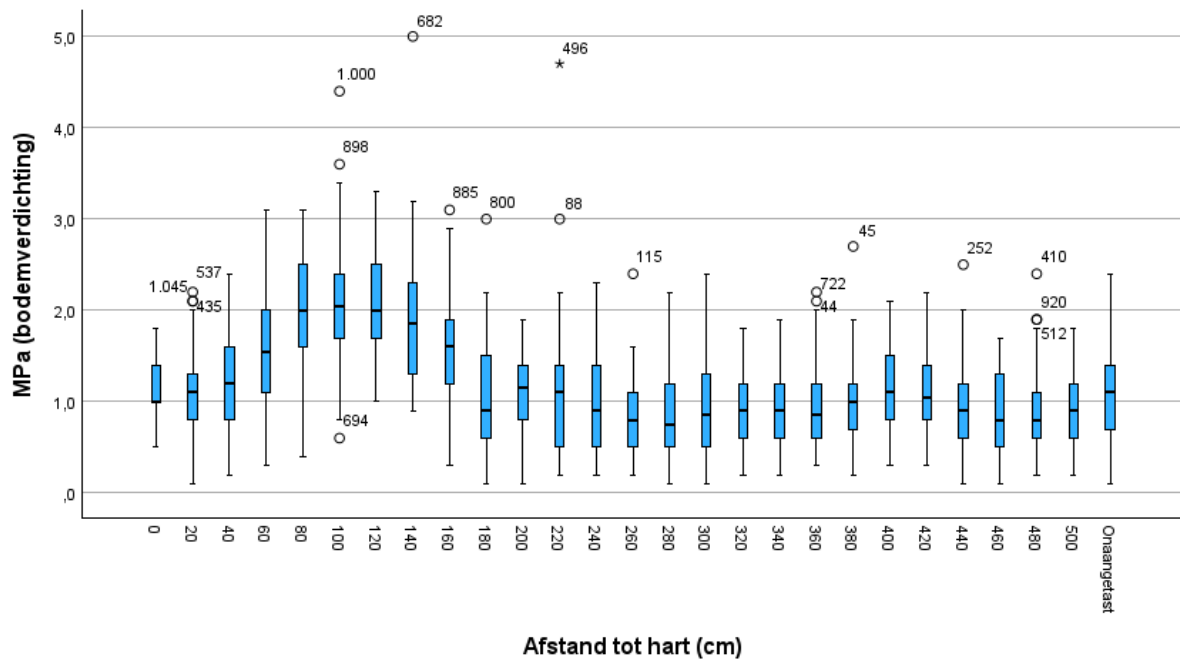
Boxplot 21, MPa per afstand voor diepte 20. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.

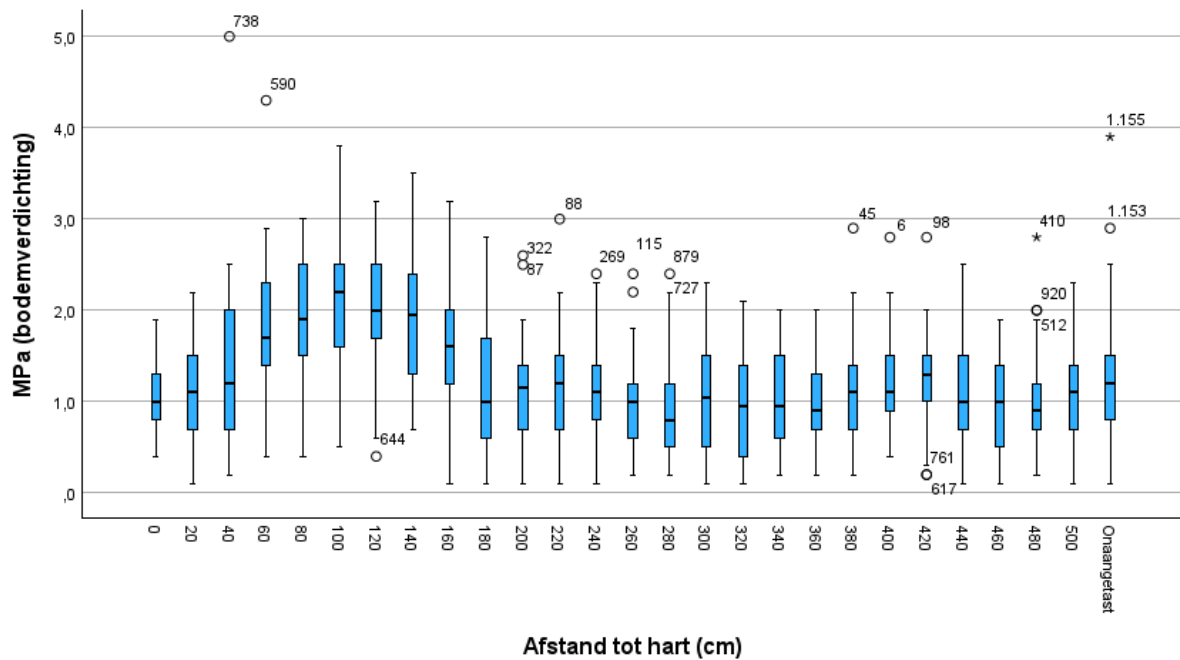


Boxplot 22, MPa per afstand voor diepte 21. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.

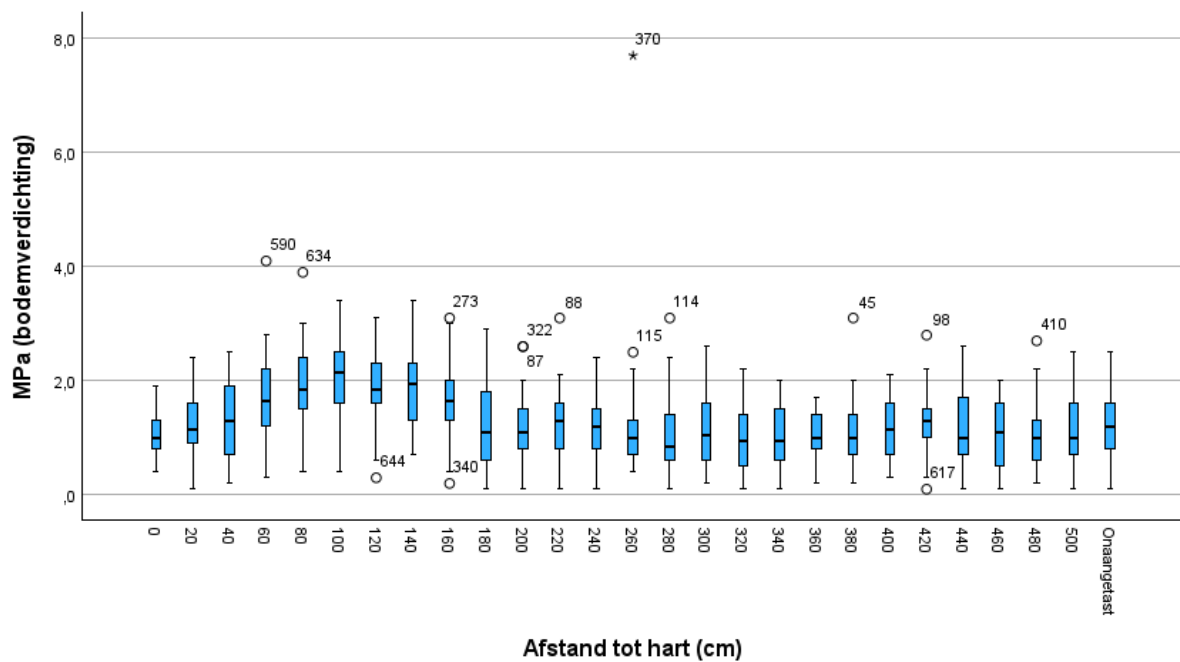


Boxplot 23, MPa per afstand voor diepte 22. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.

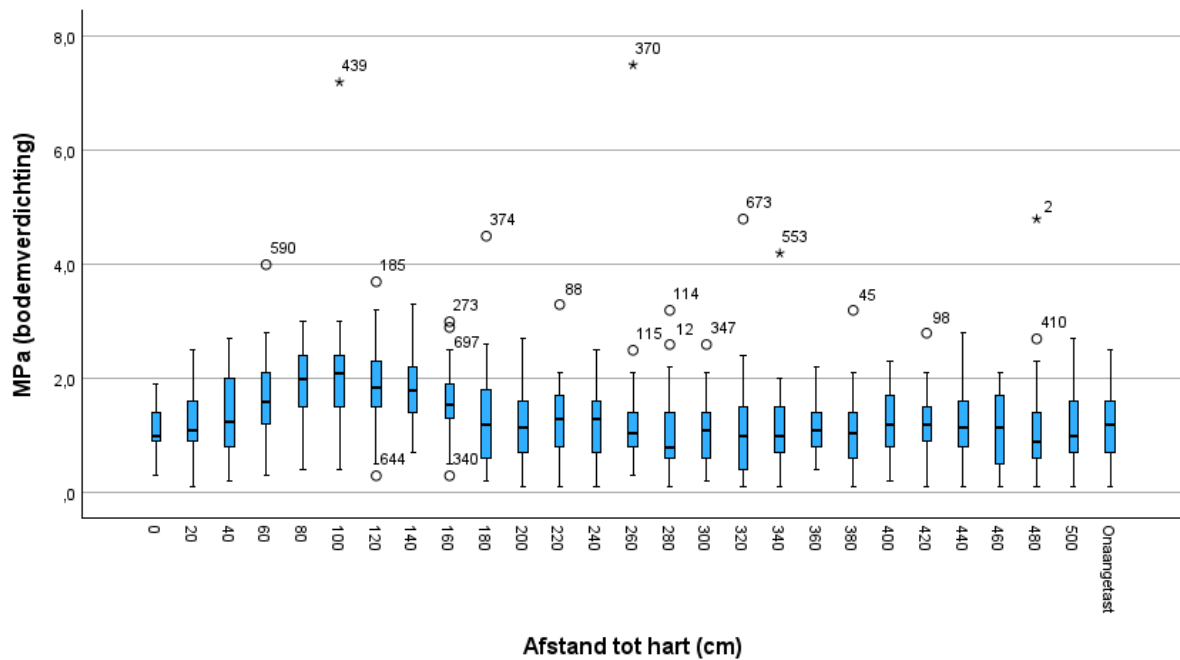




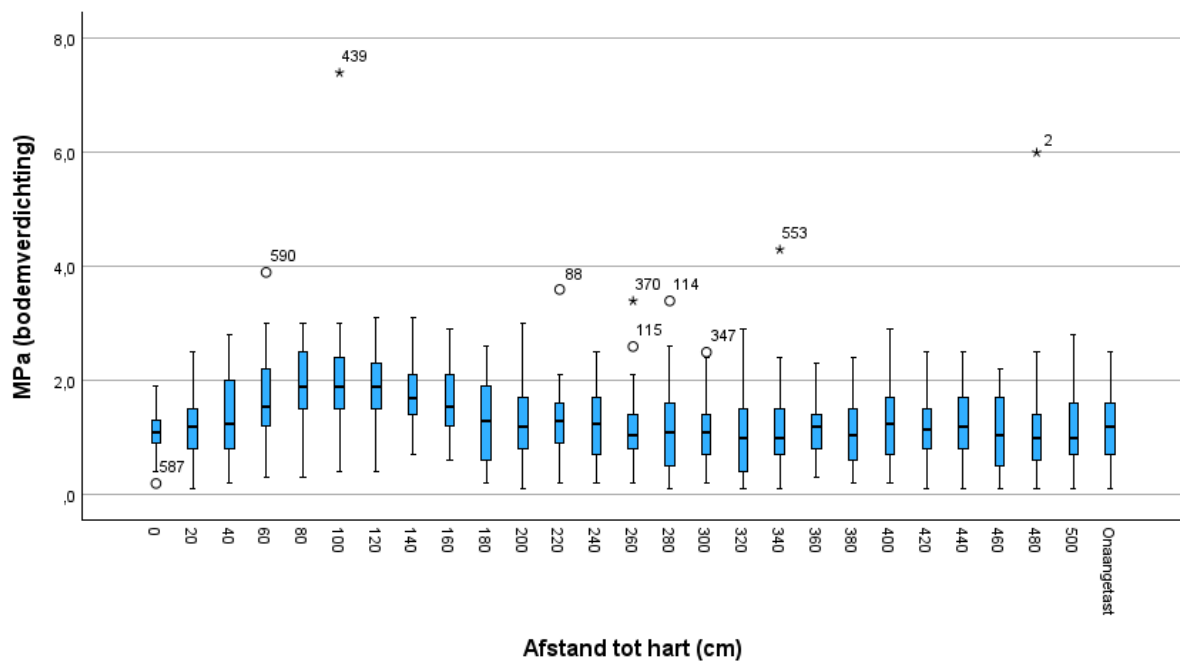
Boxplot 26, MPa per afstand voor diepte 25. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



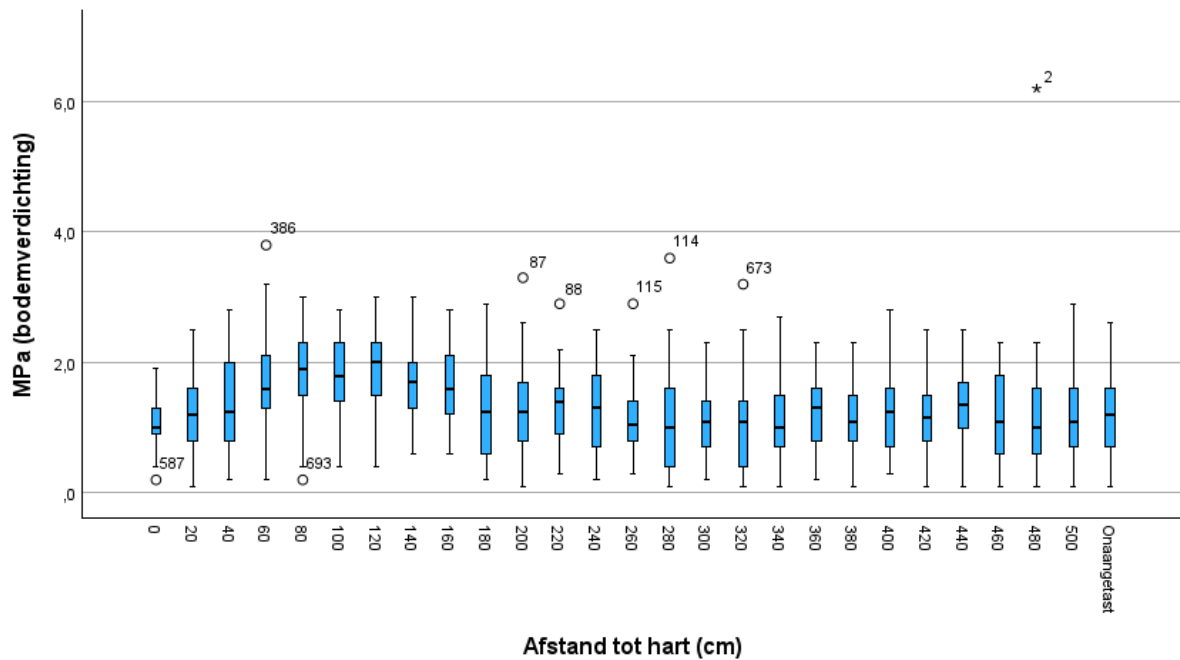
Boxplot 27, MPa per afstand voor diepte 26. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



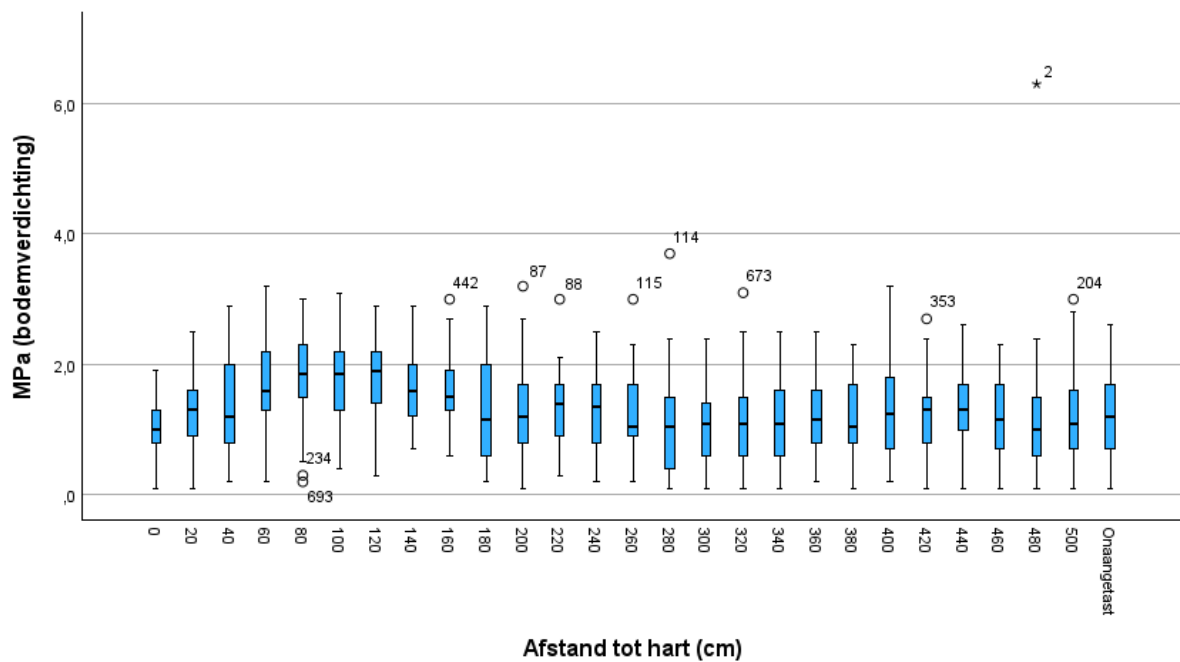
Boxplot 28, MPa per afstand voor diepte 27. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



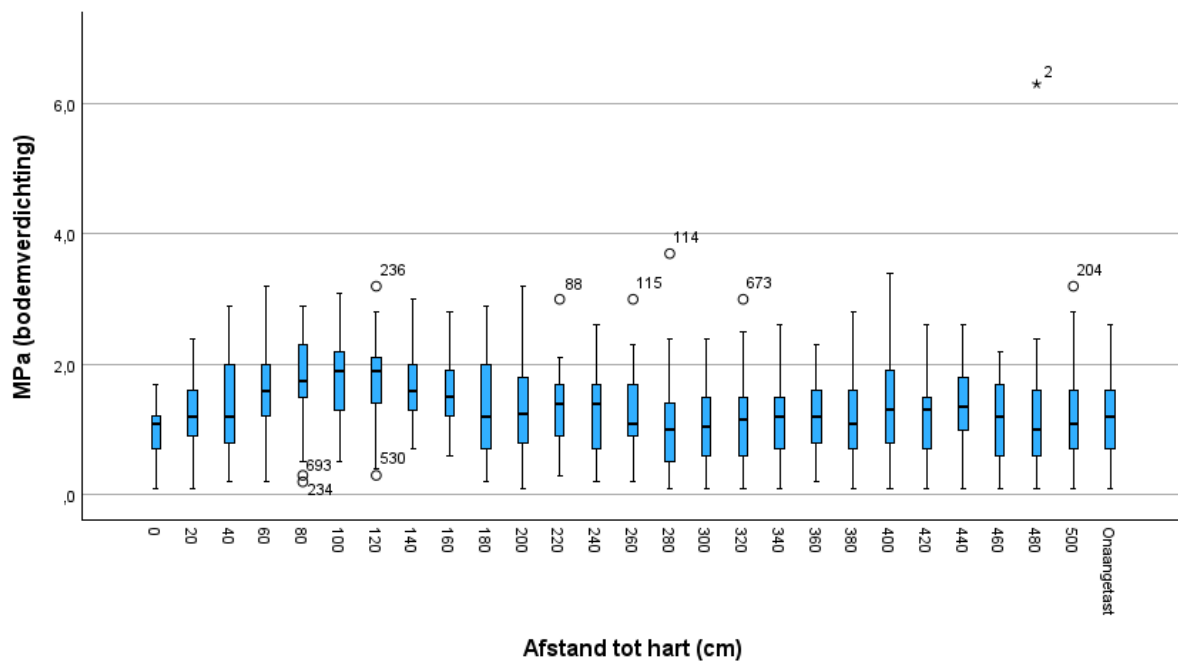
Boxplot 29, MPa per afstand voor diepte 28. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



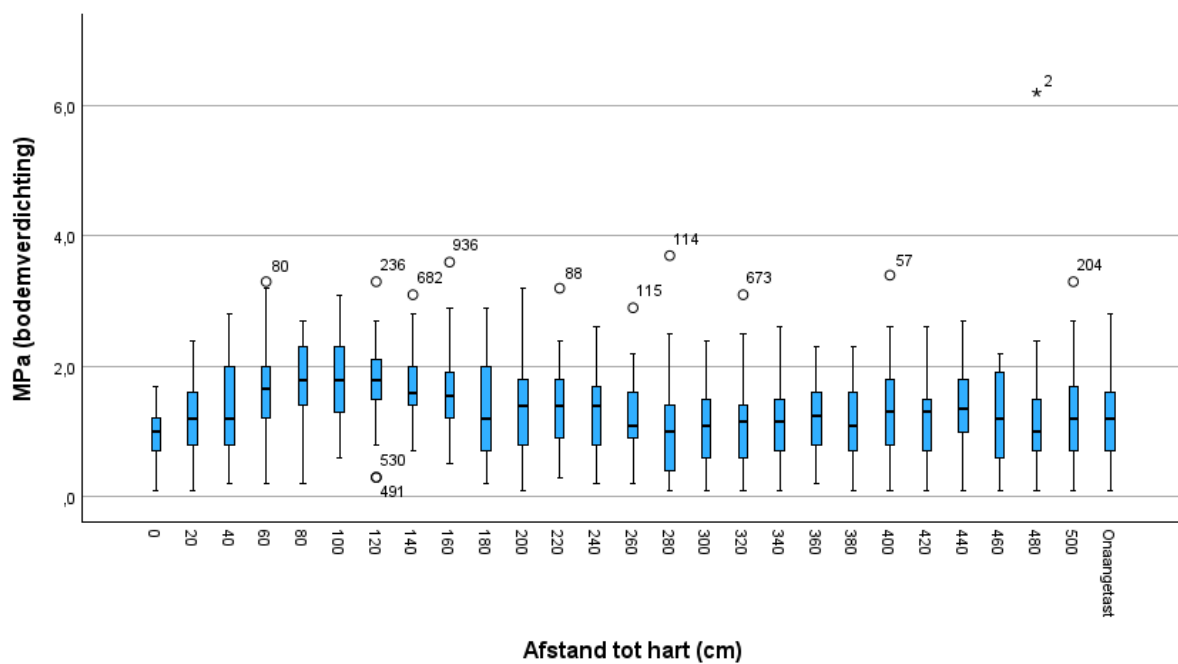
Boxplot 30, MPa per afstand voor diepte 29. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



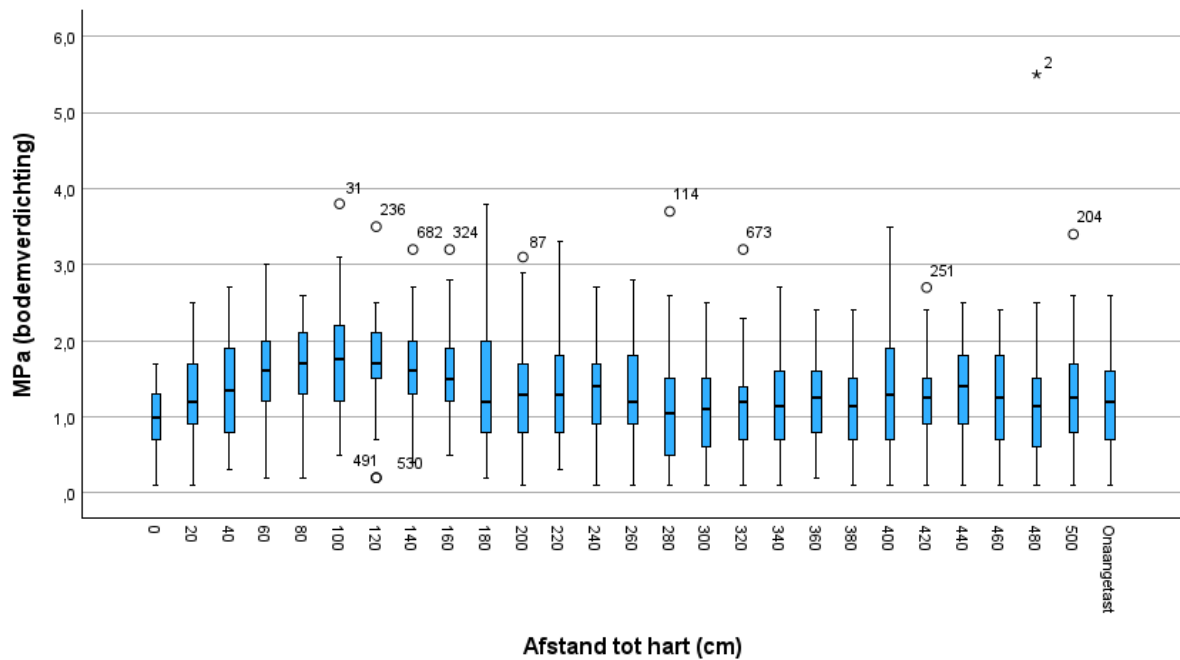
Boxplot 31, MPa per afstand voor diepte 30. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



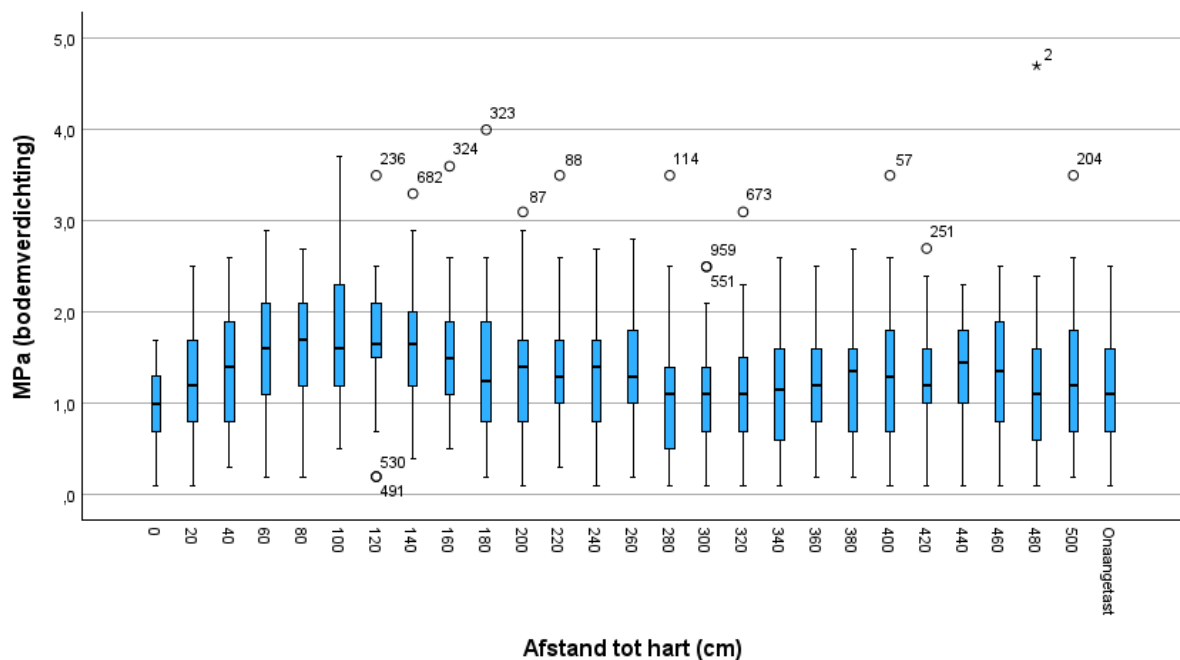
Boxplot 32, MPa per afstand voor diepte 31. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



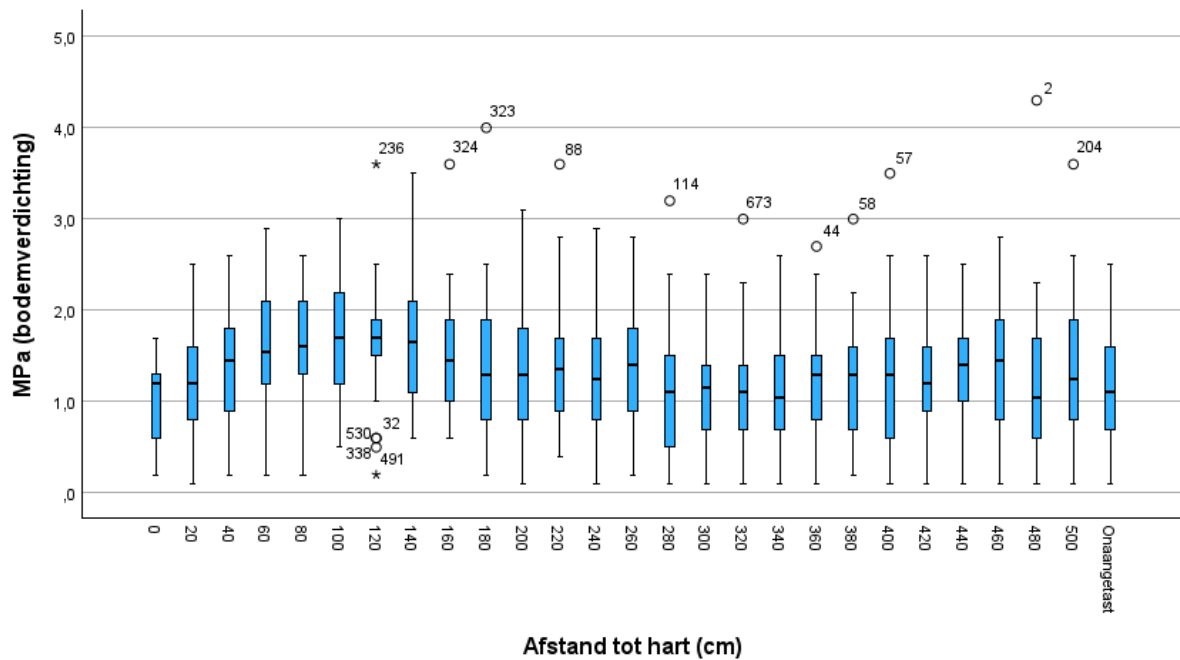
Boxplot 33, MPa per afstand voor diepte 32. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



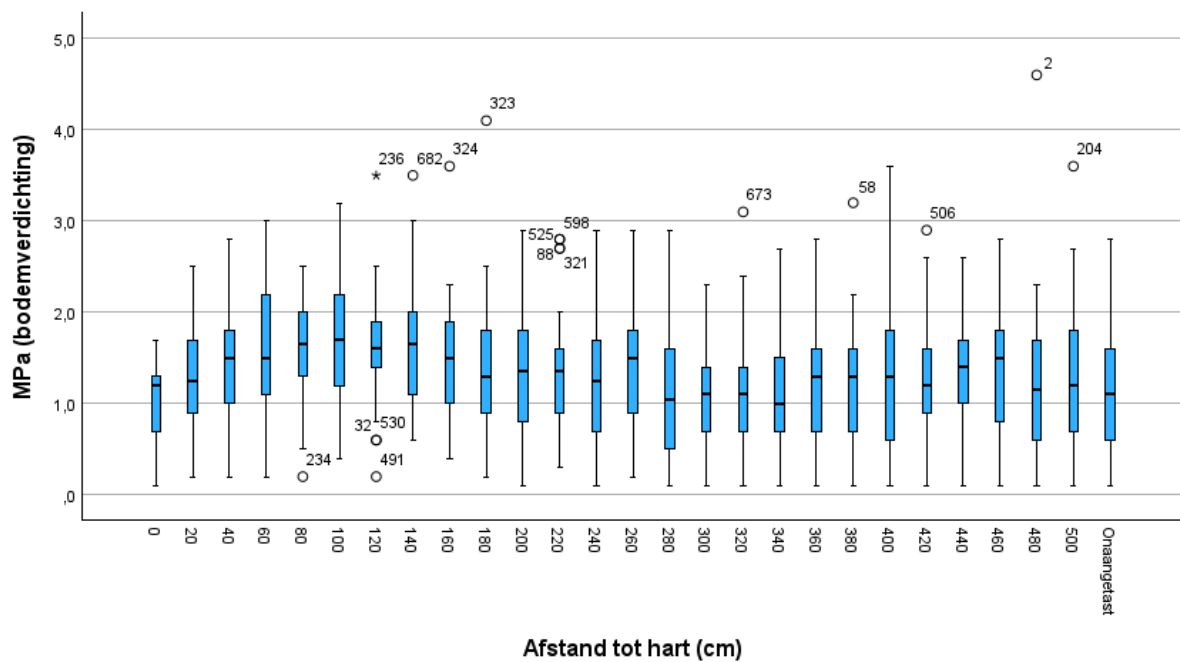
Boxplot 34, MPa per afstand voor diepte 33. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



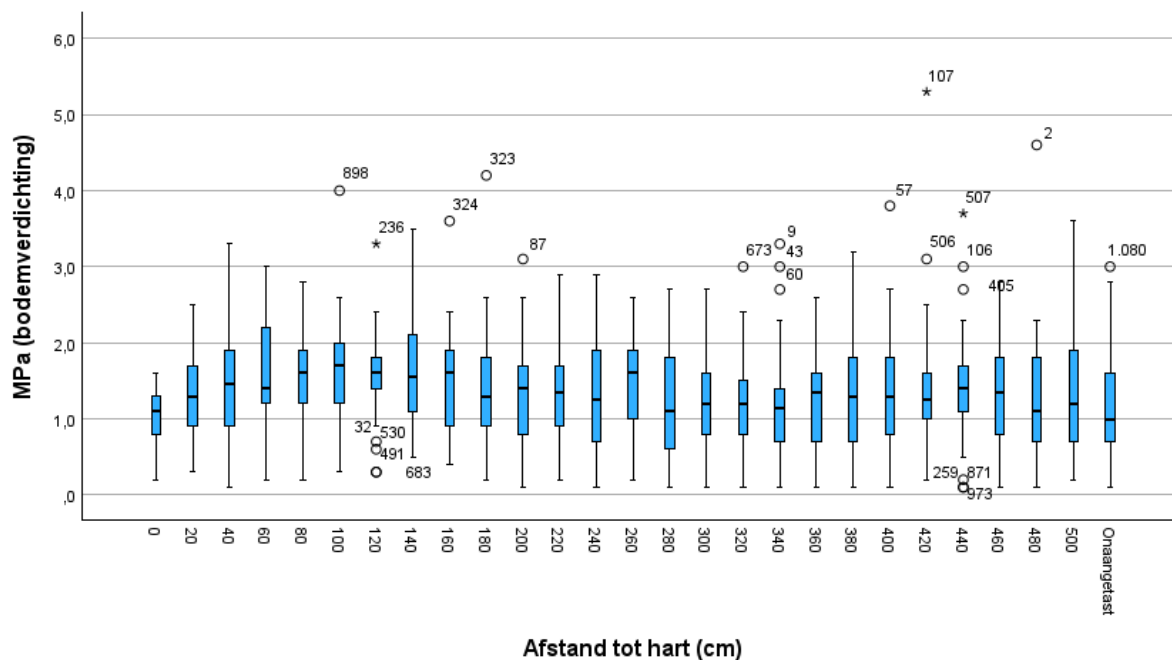
Boxplot 35, MPa per afstand voor diepte 34. Duidelijk hogere waarden zijn te zien op afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad ten opzichte van de andere afstanden.



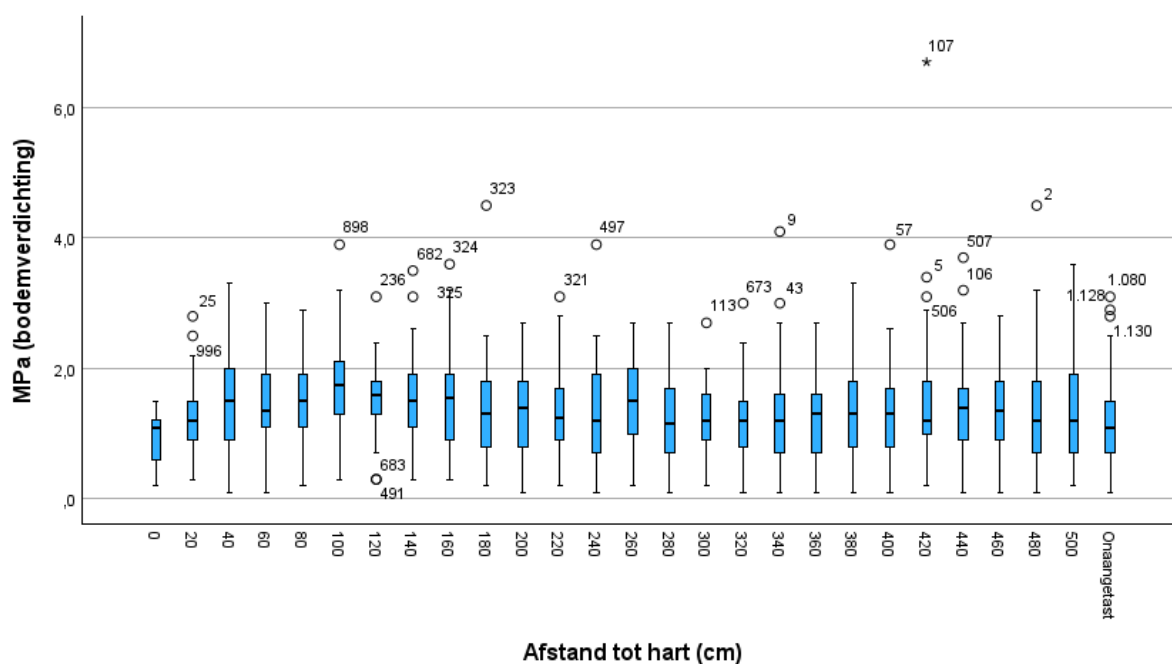
Boxplot 36, MPa per afstand voor diepte 35. Verschillen tussen de afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad en andere afstanden worden minder duidelijk.



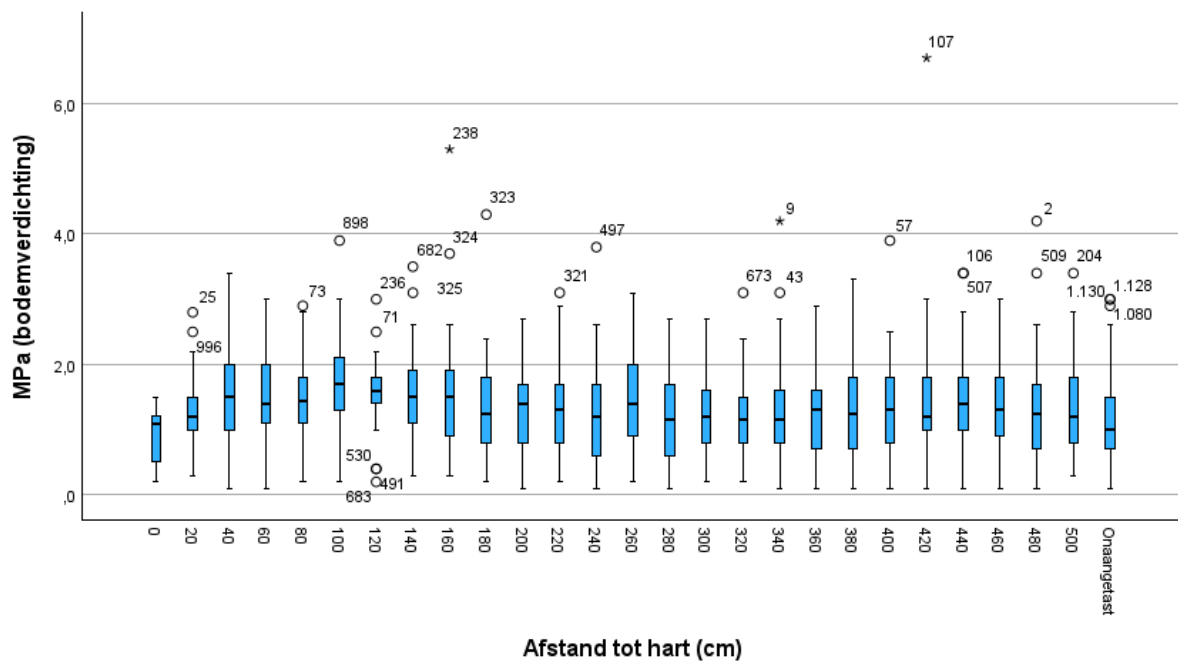
Boxplot 37, MPa per afstand voor diepte 36



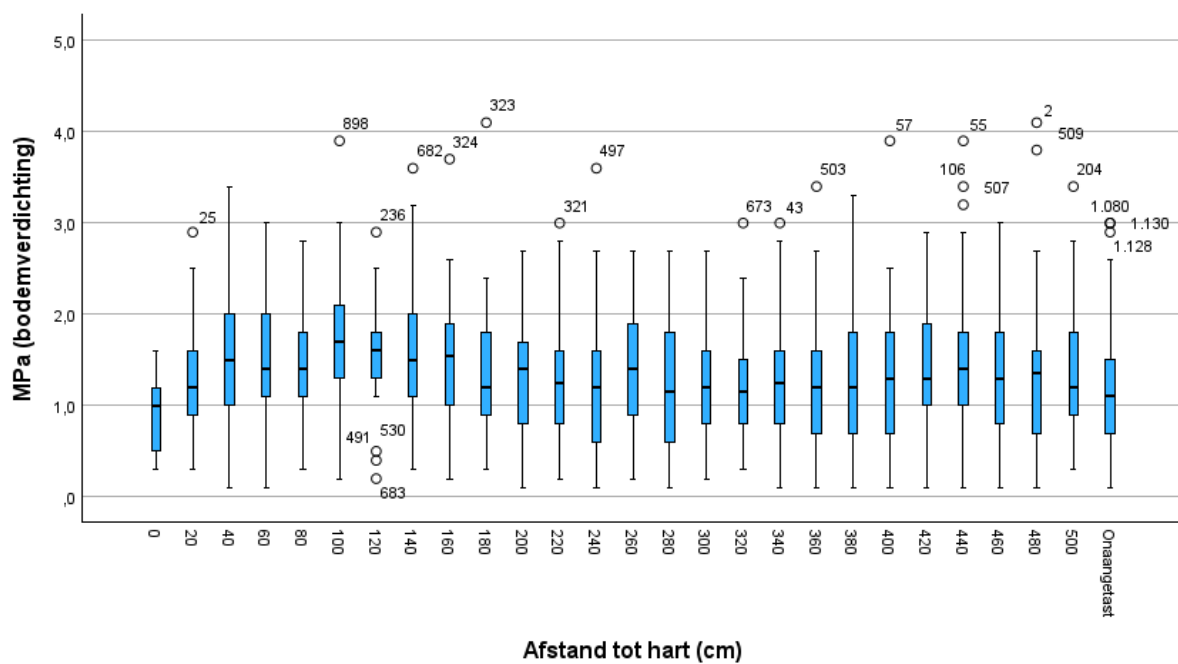
Boxplot 38, MPa per afstand voor diepte 37



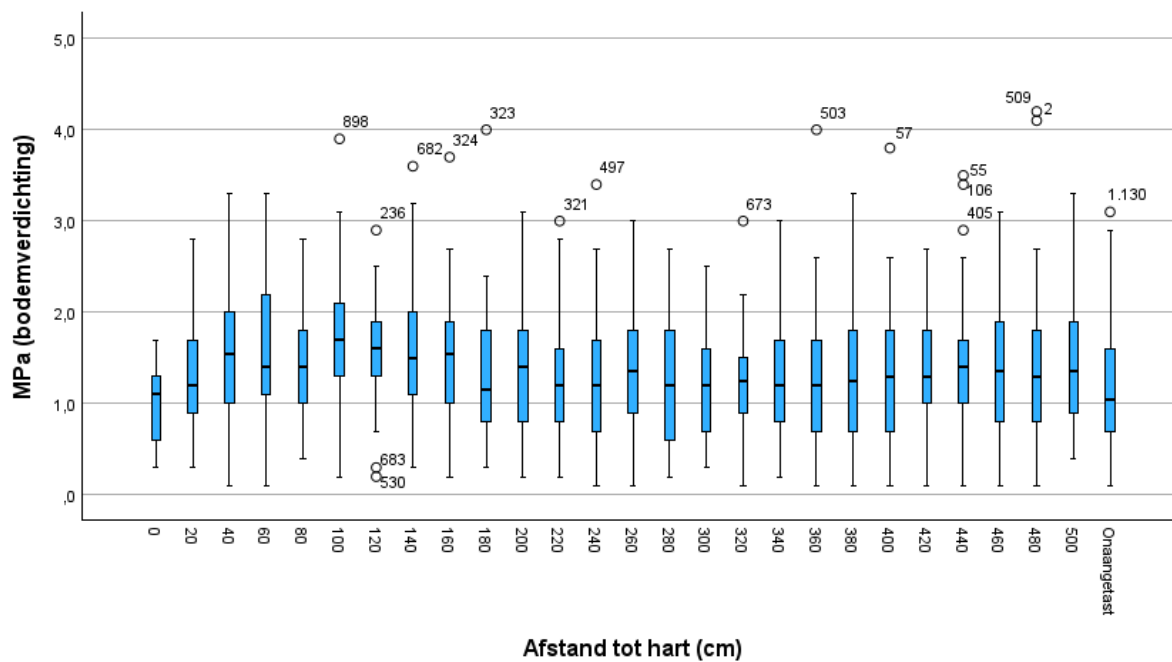
Boxplot 39, MPa per afstand voor diepte 38



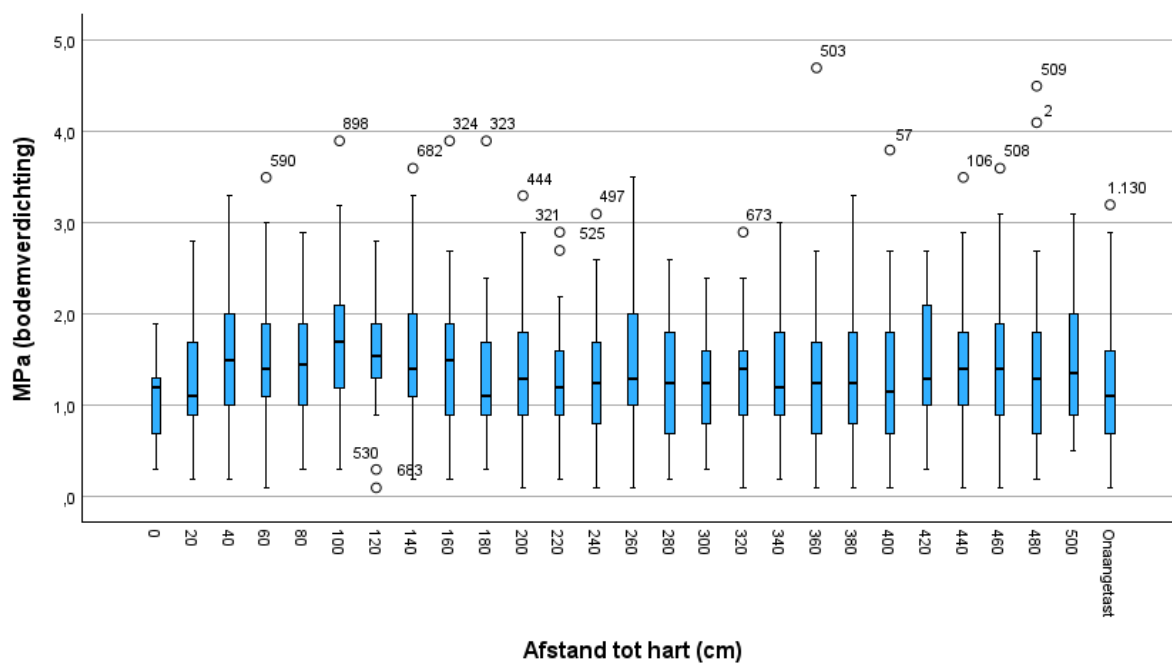
Boxplot 40, MPa per afstand voor diepte 39



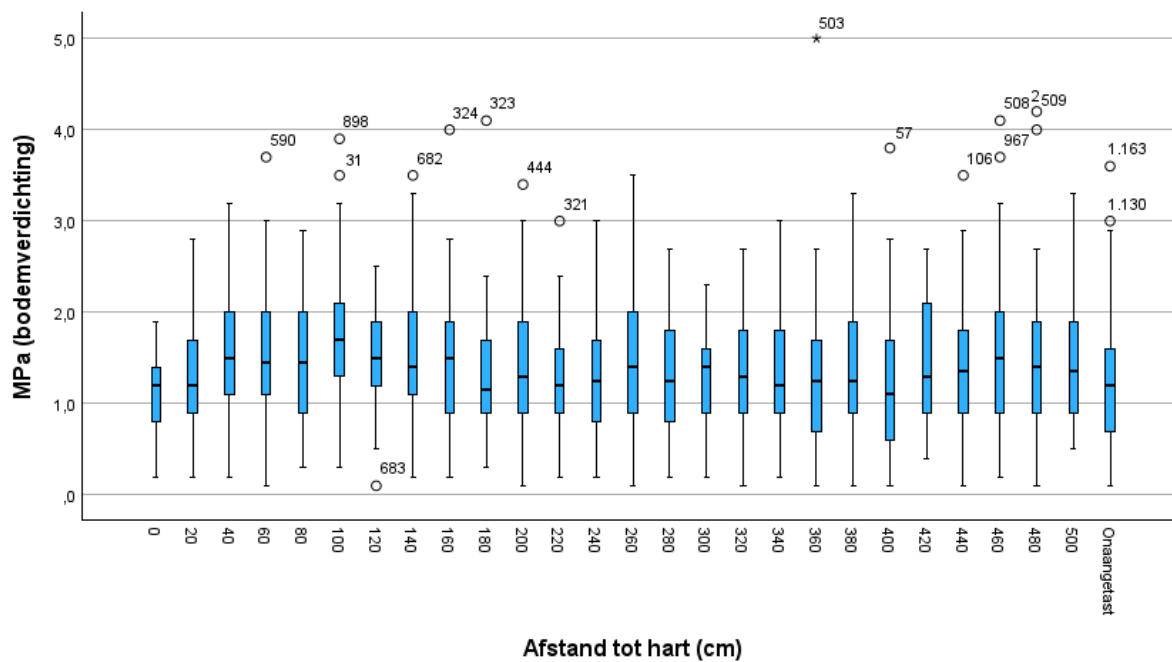
Boxplot 41, MPa per afstand voor diepte 40



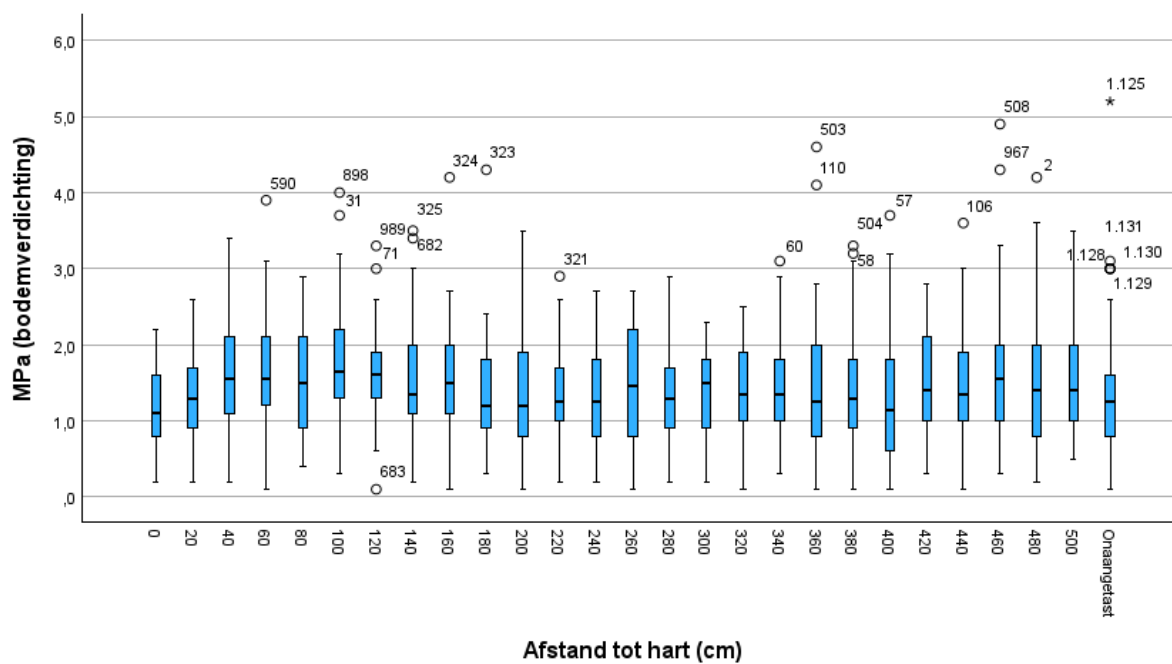
Boxplot 42, MPa per afstand voor diepte 41



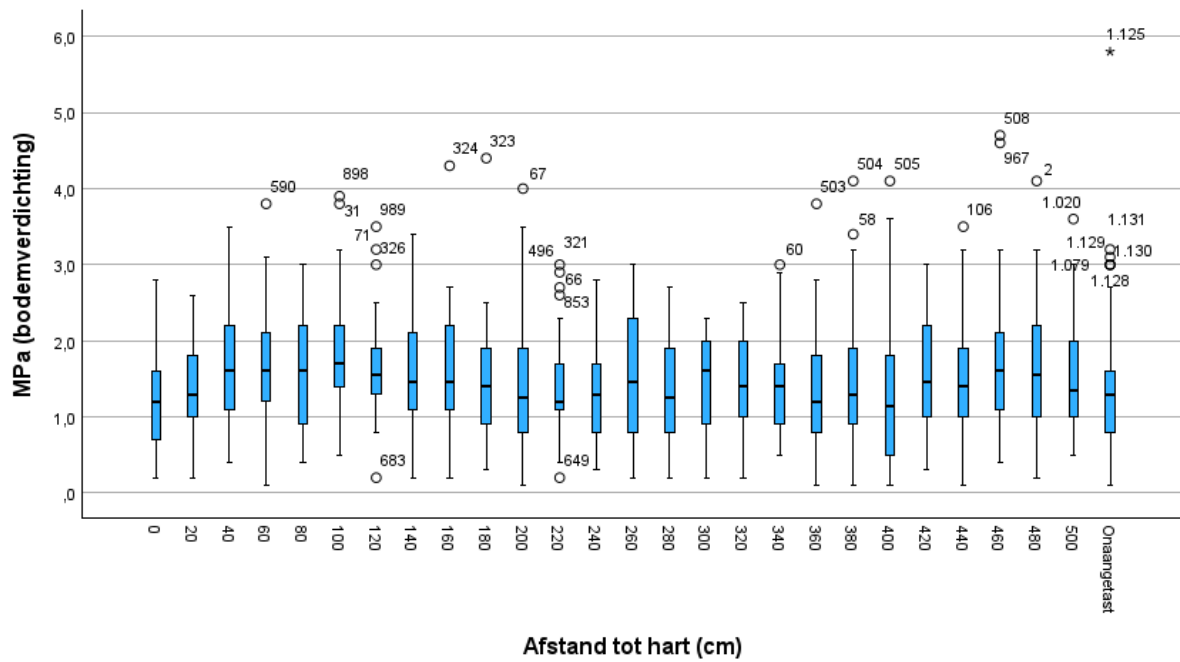
Boxplot 43, MPa per afstand voor diepte 42



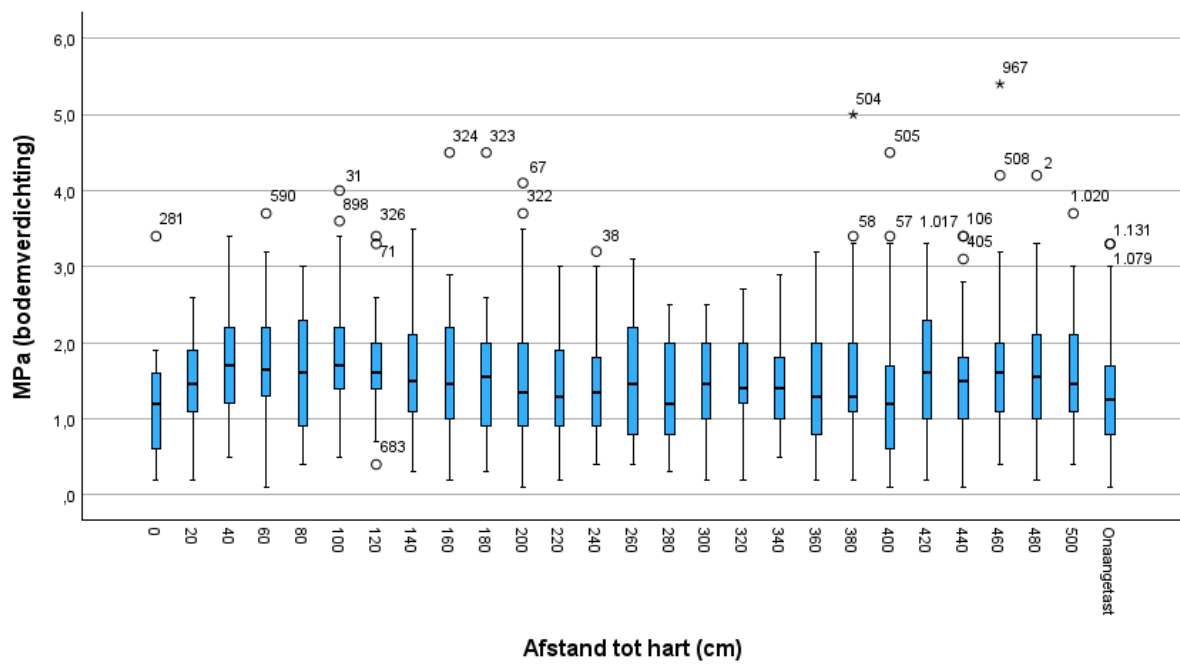
Boxplot 44, MPa per afstand voor diepte 43



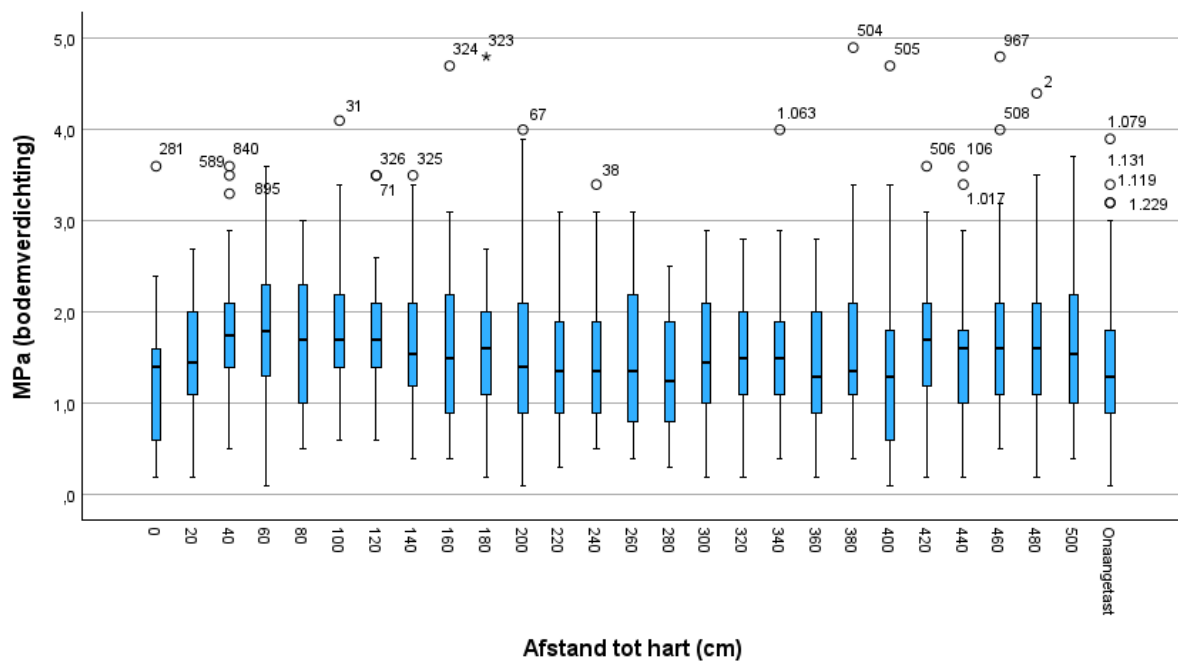
Boxplot 45, MPa per afstand voor diepte 44



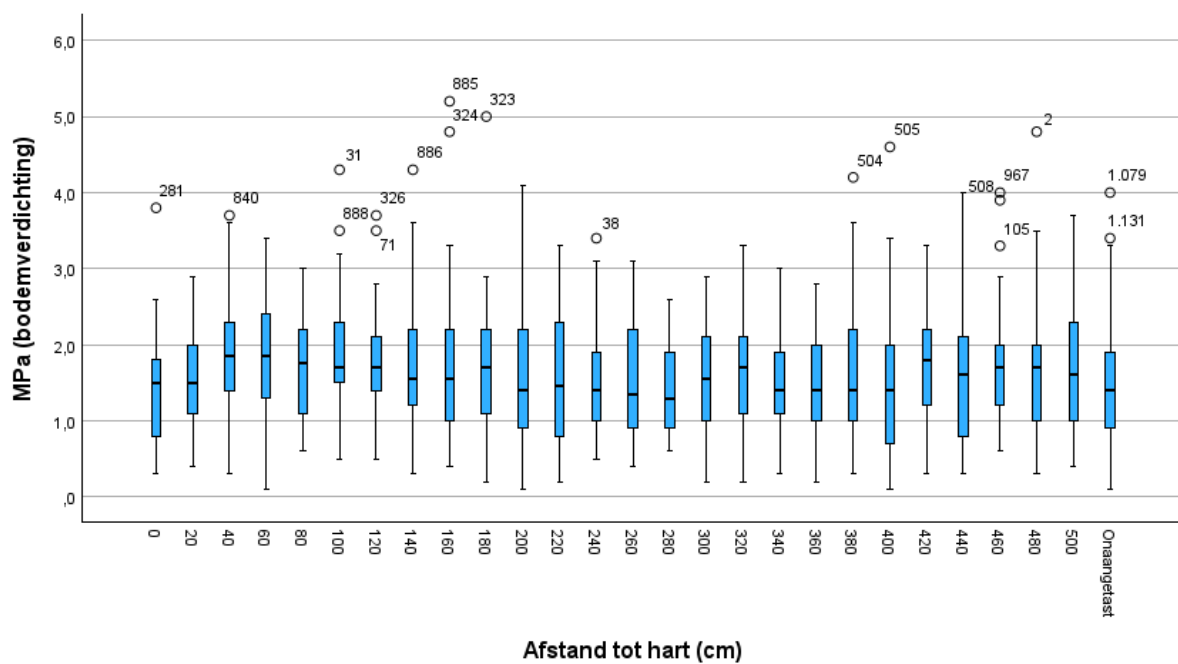
Boxplot 46, MPa per afstand voor diepte 45



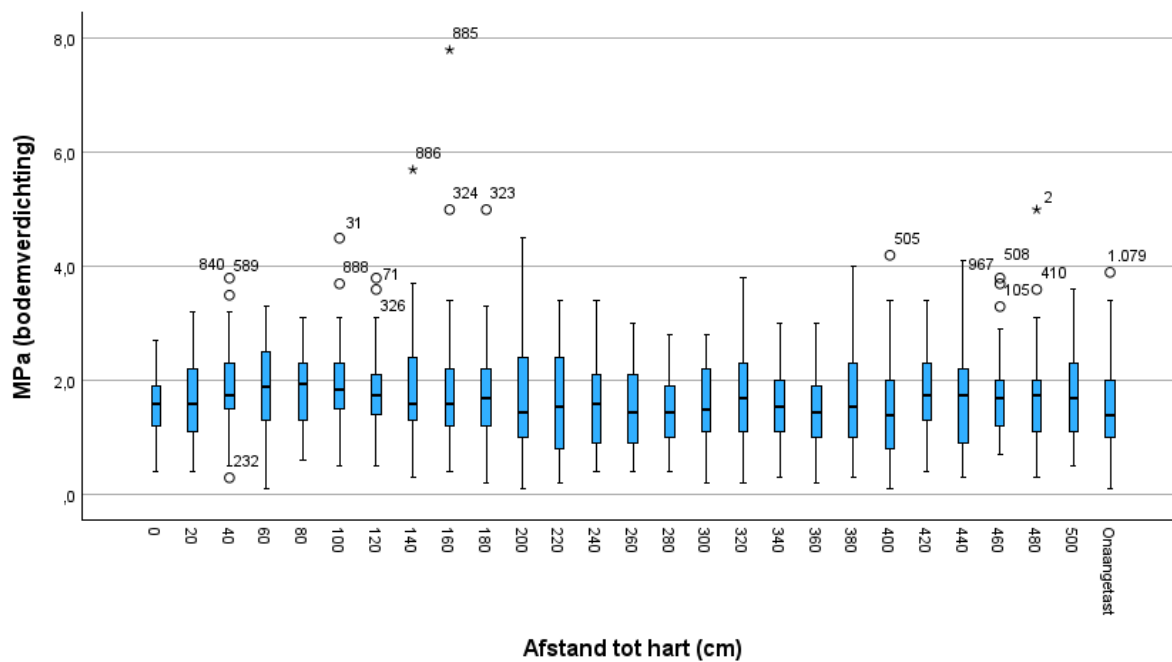
Boxplot 47, MPa per afstand voor diepte 46



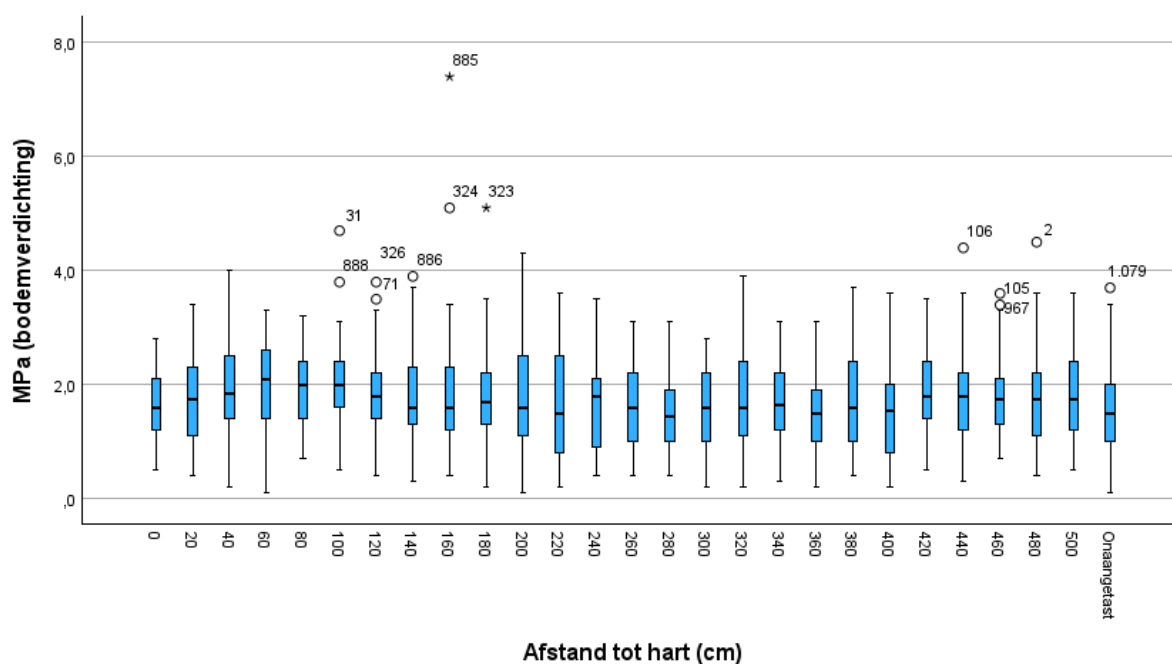
Boxplot 48, MPa per afstand voor diepte 47



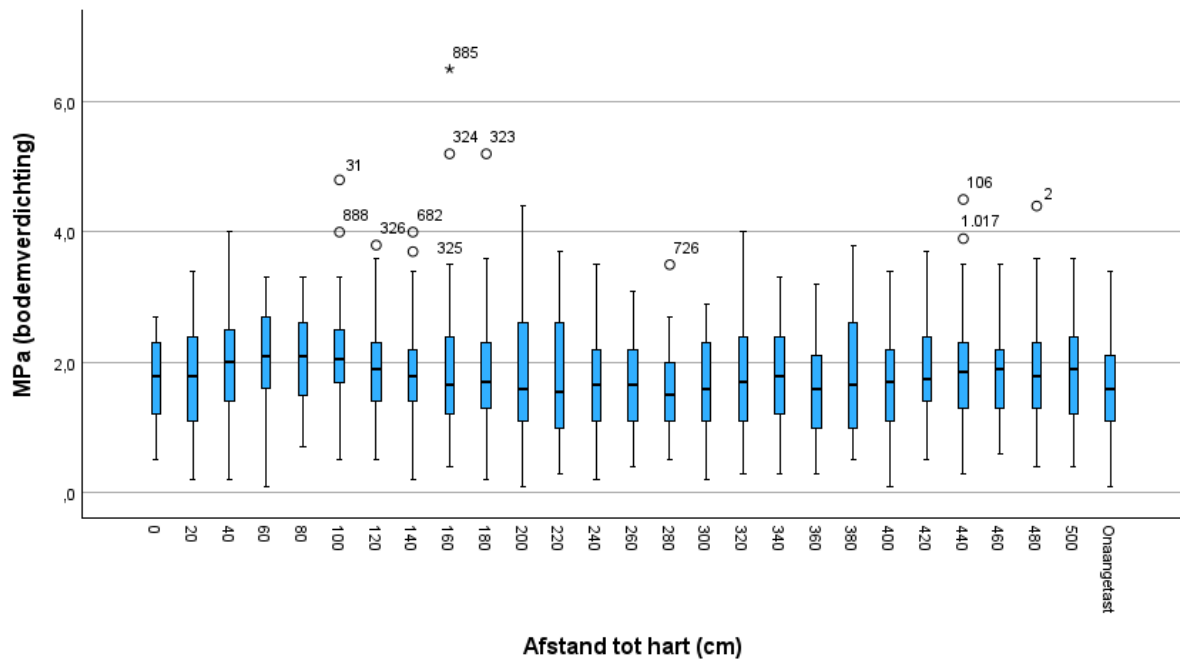
Boxplot 49, MPa per afstand voor diepte 48



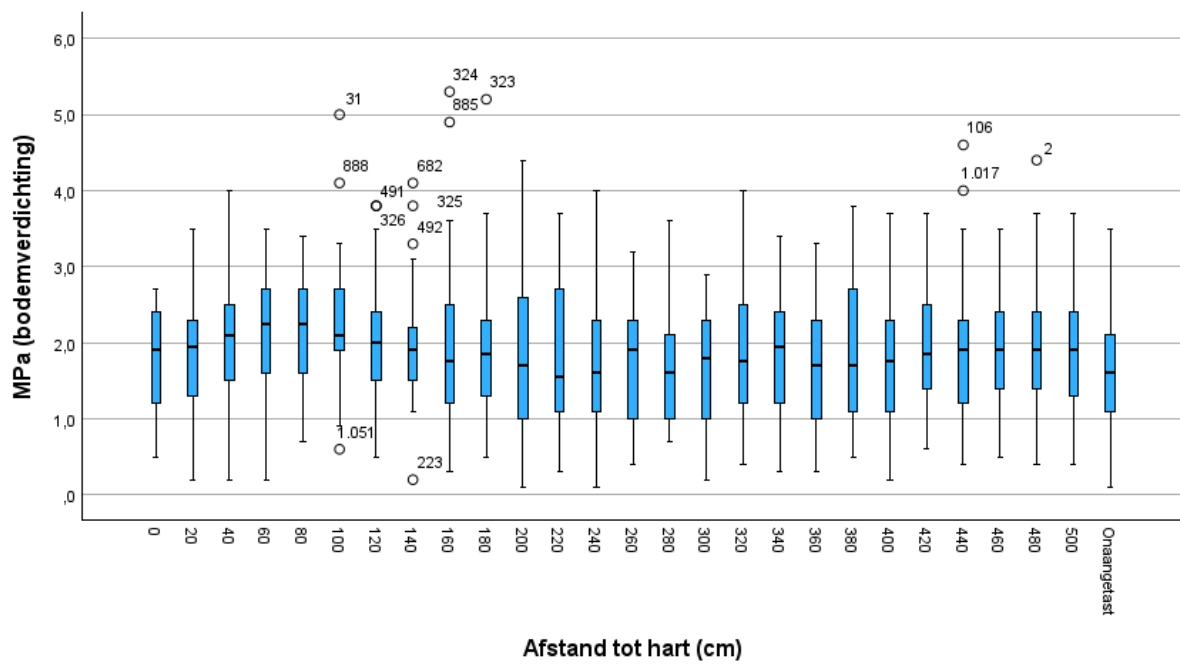
Boxplot 50, MPa per afstand voor diepte 49



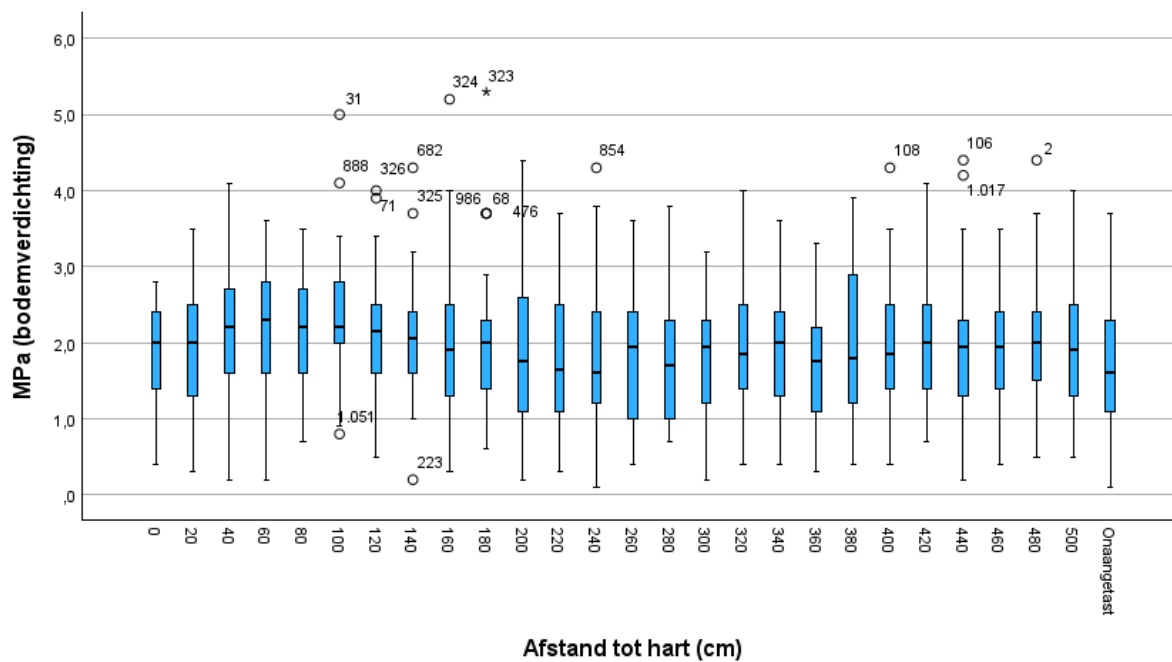
Boxplot 51, MPa per afstand voor diepte 50



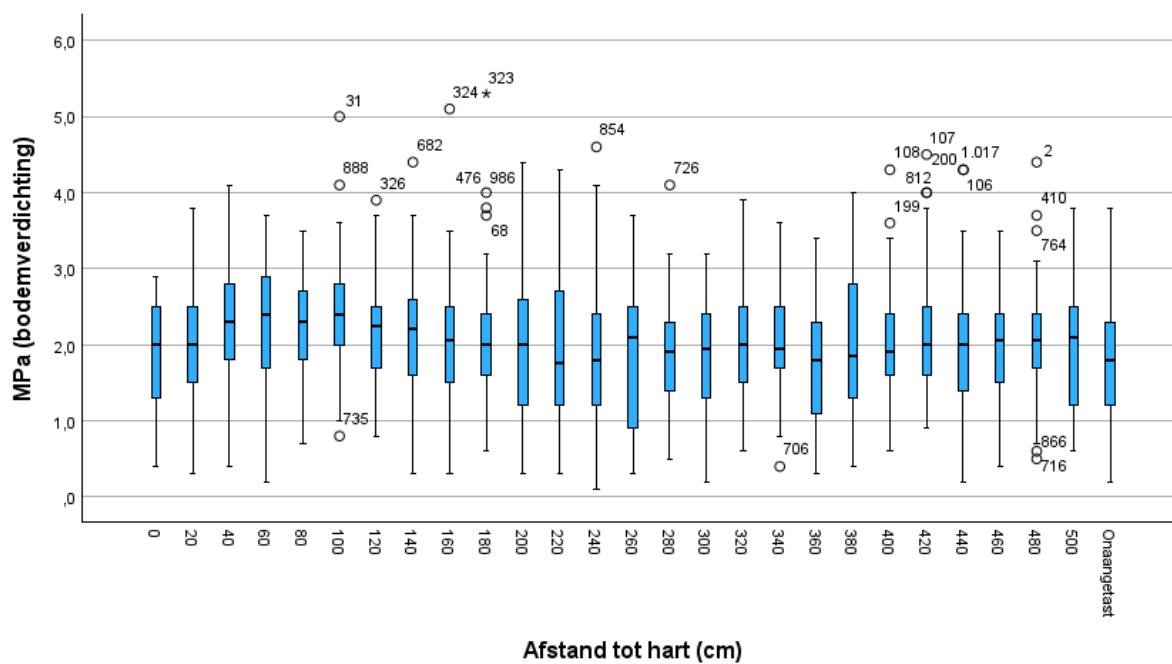
Boxplot 52, MPa per afstand voor diepte 51



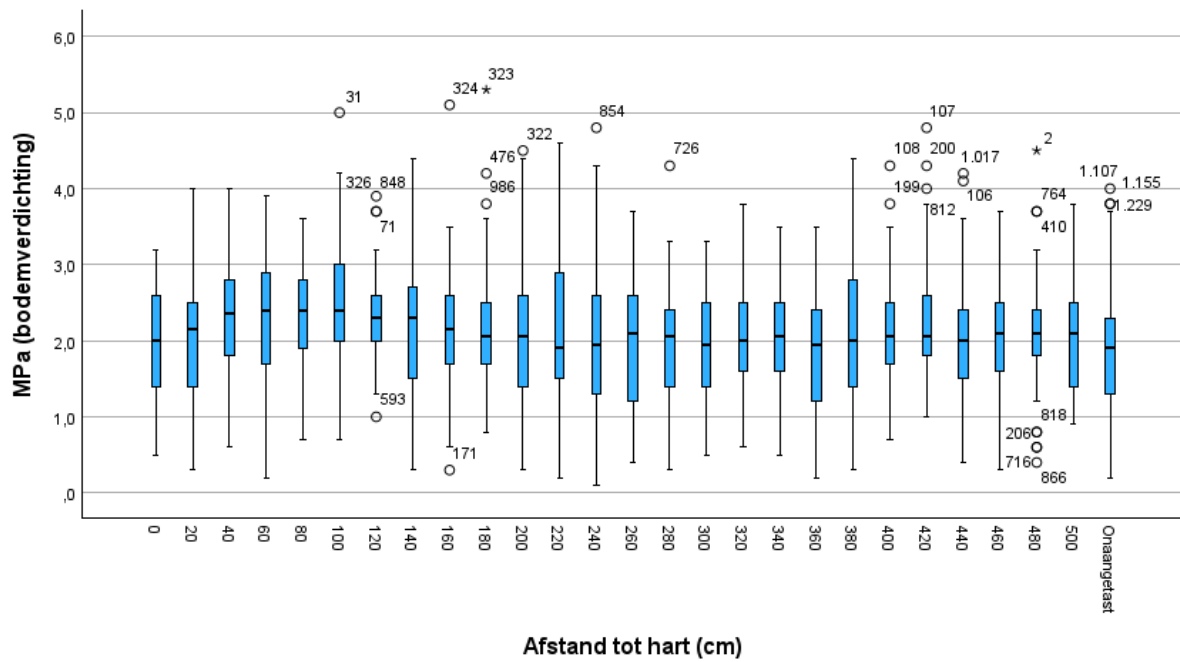
Boxplot 53, MPa per afstand voor diepte 52



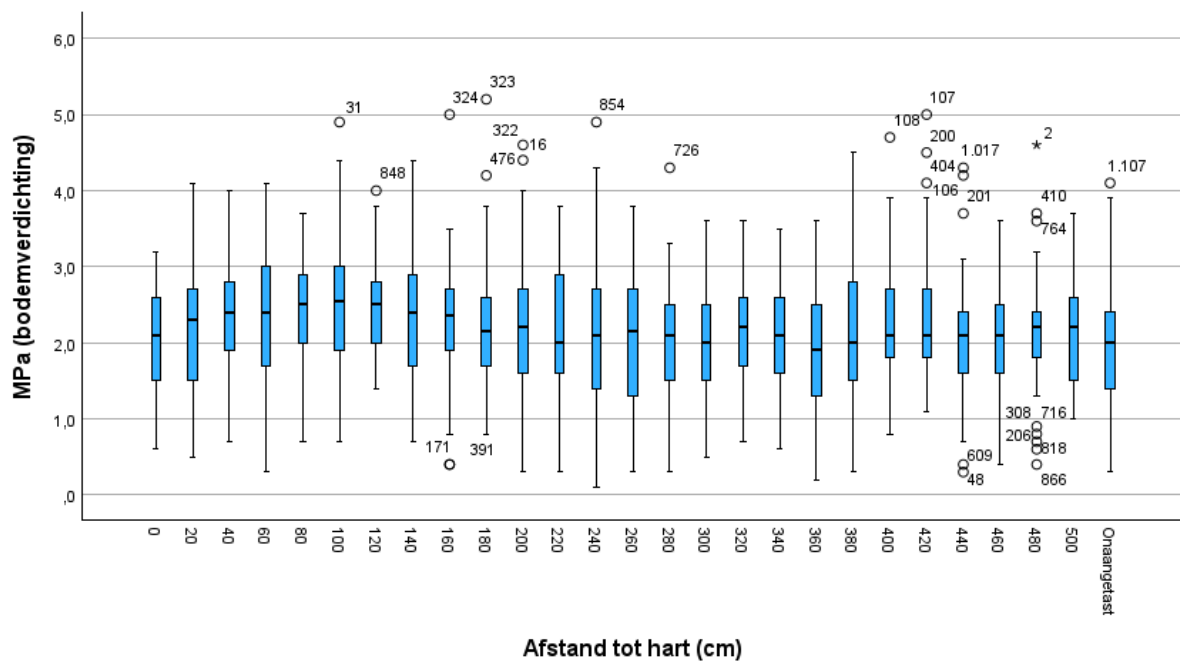
Boxplot 54, MPa per afstand voor diepte 53



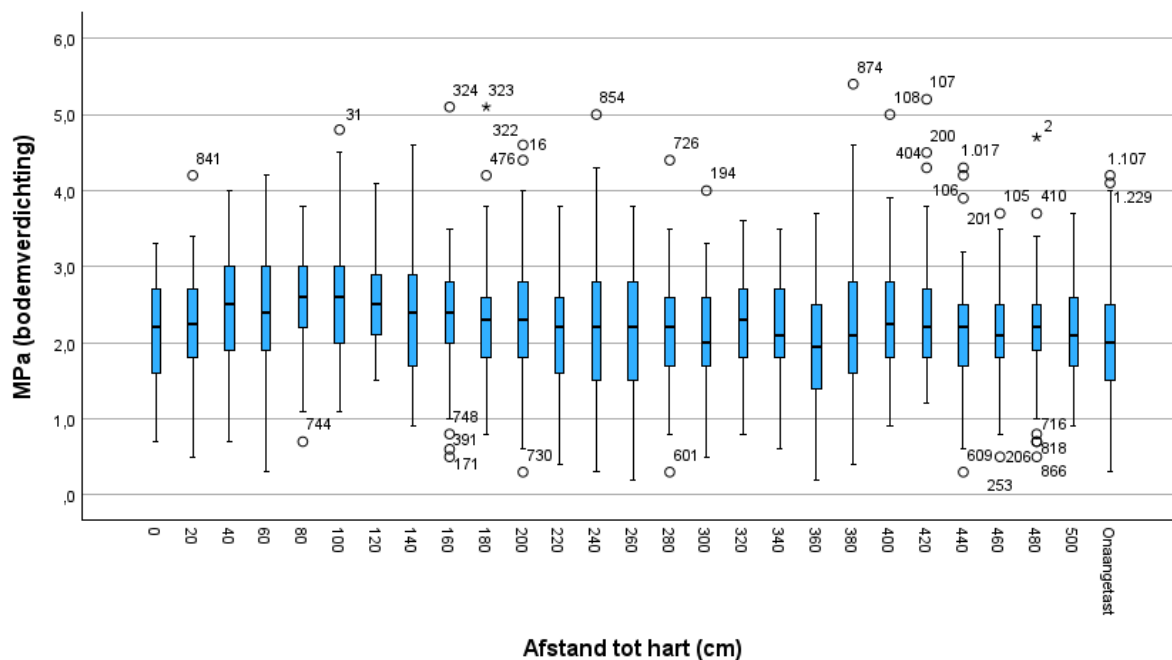
Boxplot 55, MPa per afstand voor diepte 54



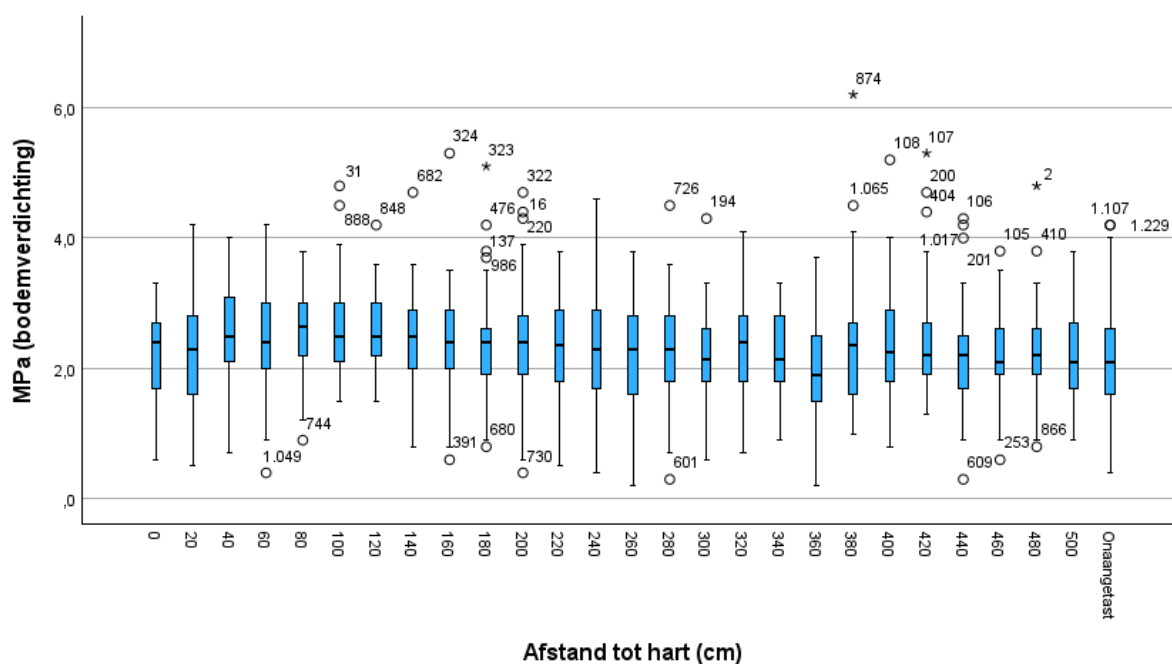
Boxplot 56, MPa per afstand voor diepte 55



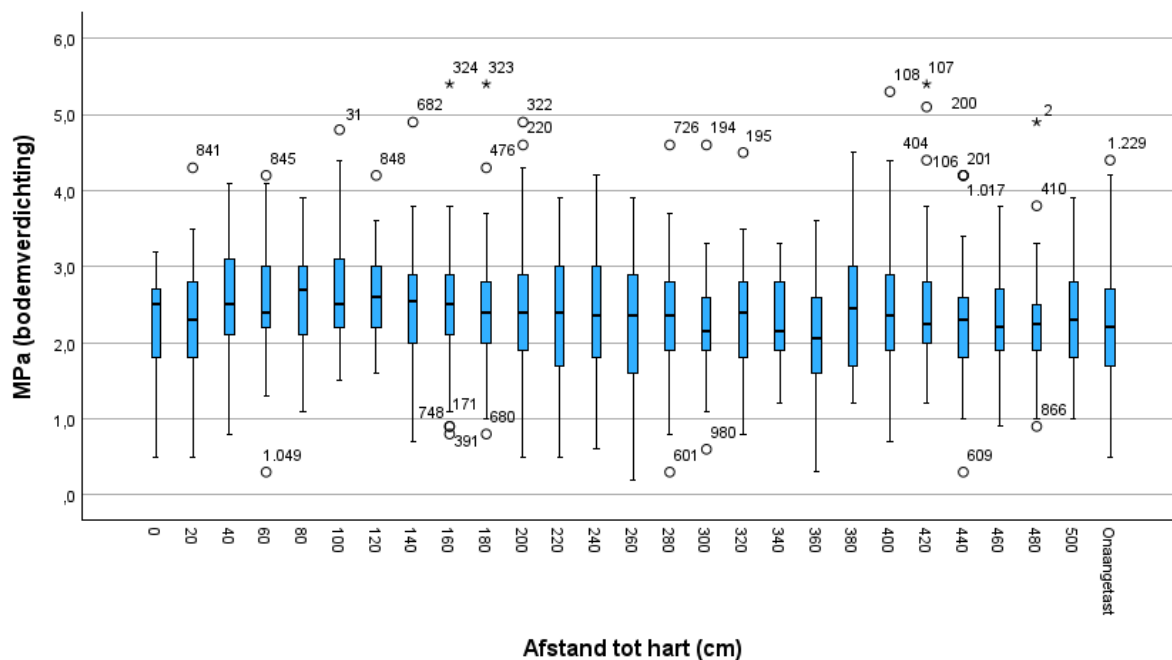
Boxplot 57, MPa per afstand voor diepte 56



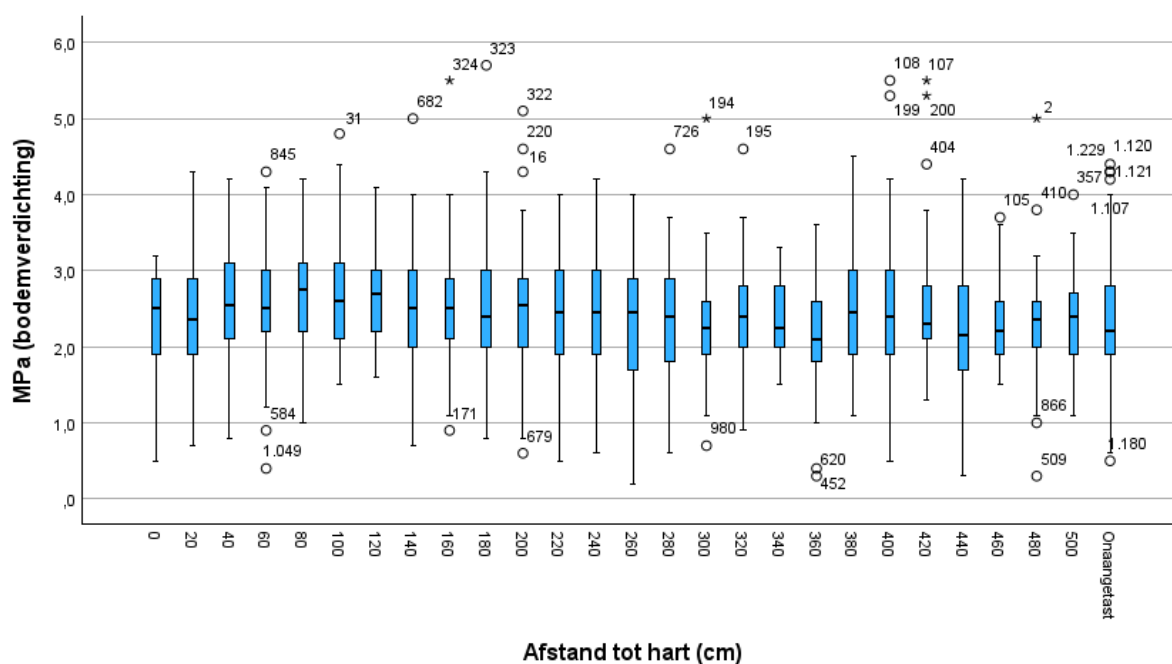
Boxplot 58, MPa per afstand voor diepte 57



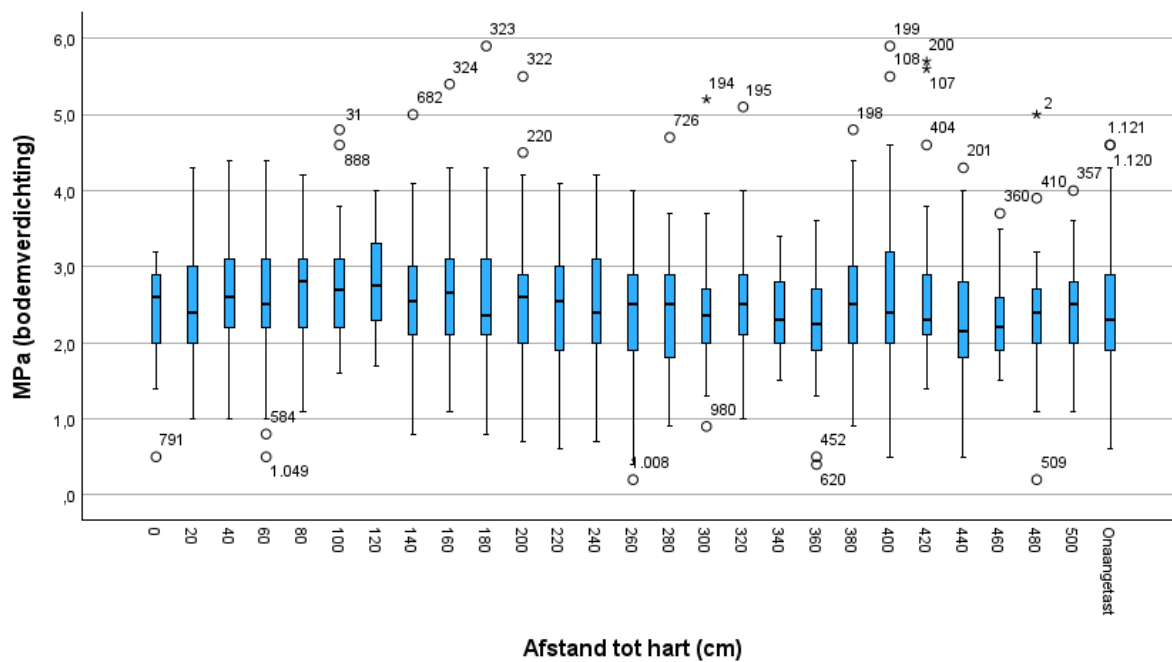
Boxplot 59, MPa per afstand voor diepte 58



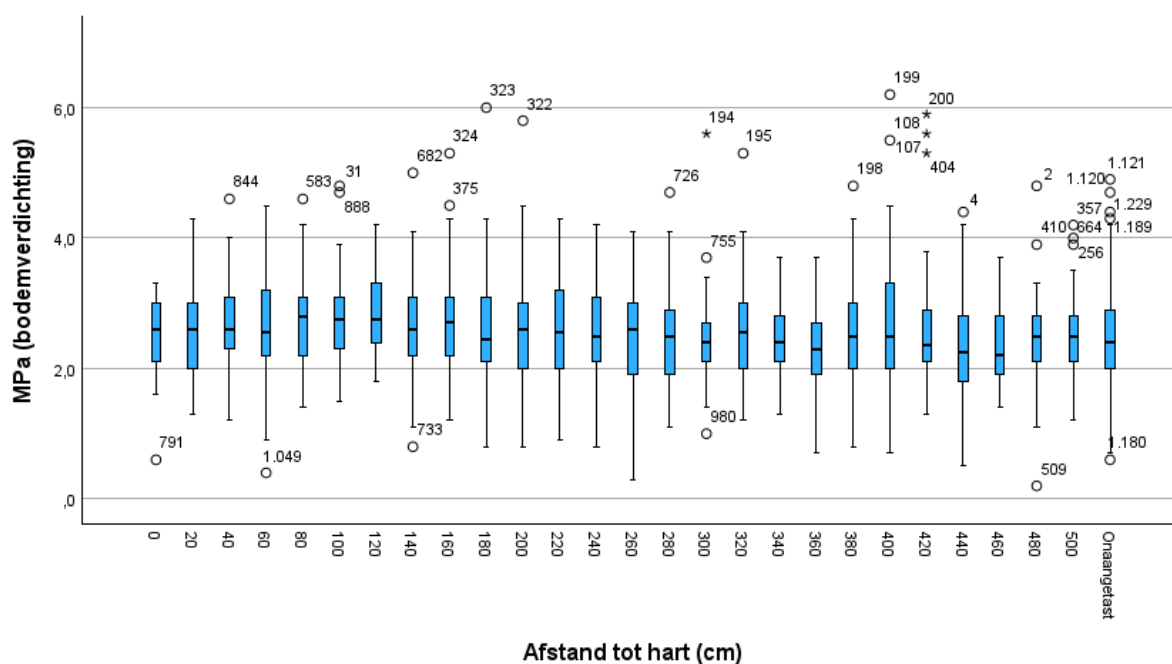
Boxplot 60, MPa per afstand voor diepte 59



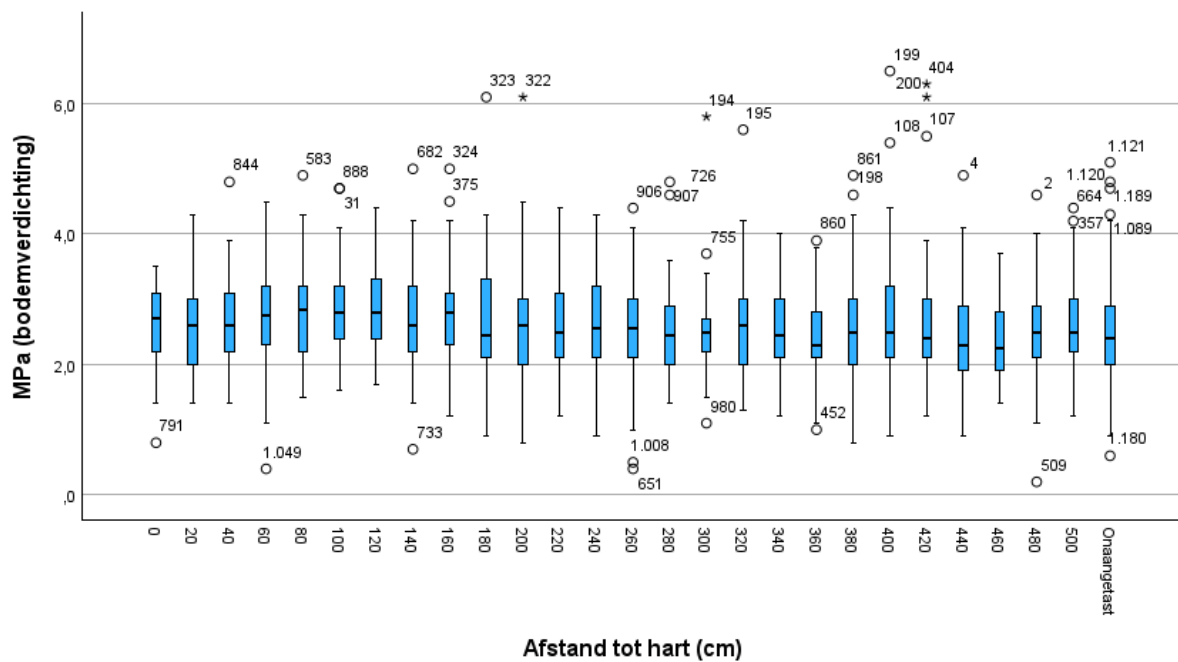
Boxplot 61, MPa per afstand voor diepte 60



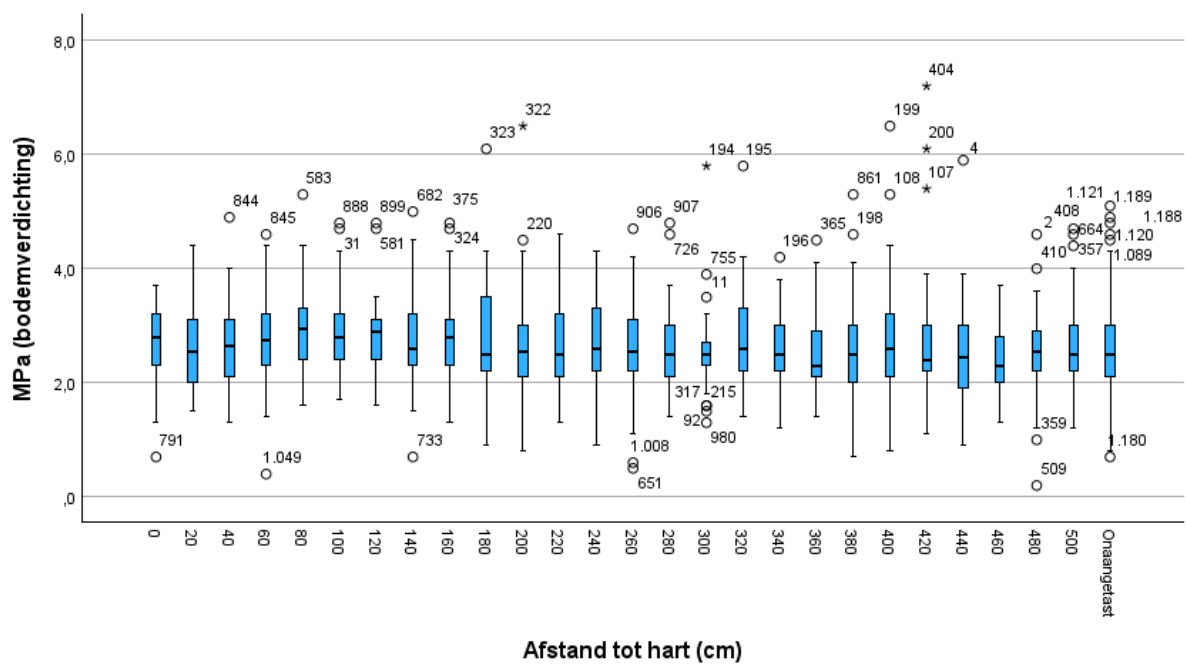
Boxplot 62, MPA per afstand voor diepte 61



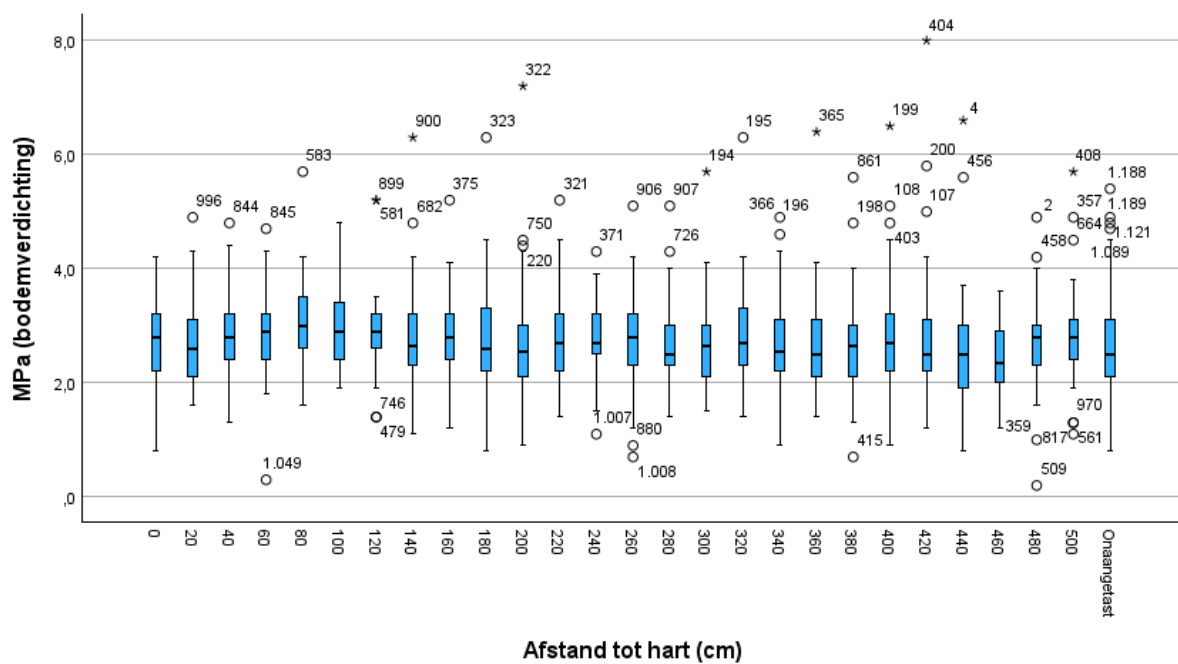
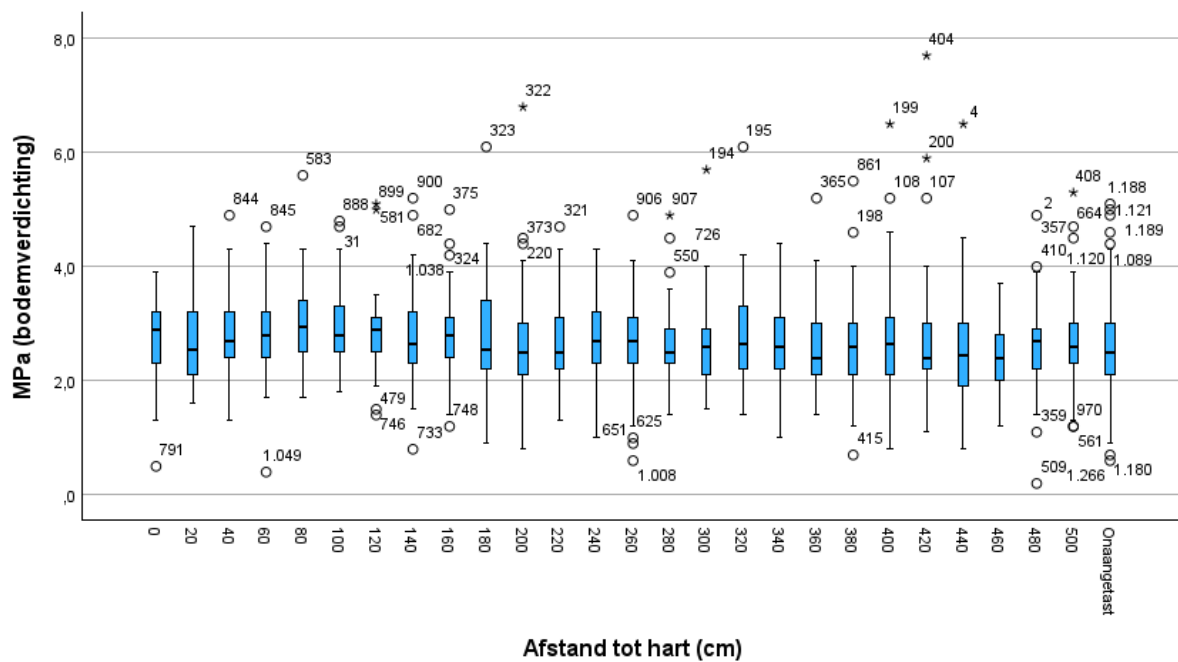
Boxplot 63, MPA per afstand voor diepte 62

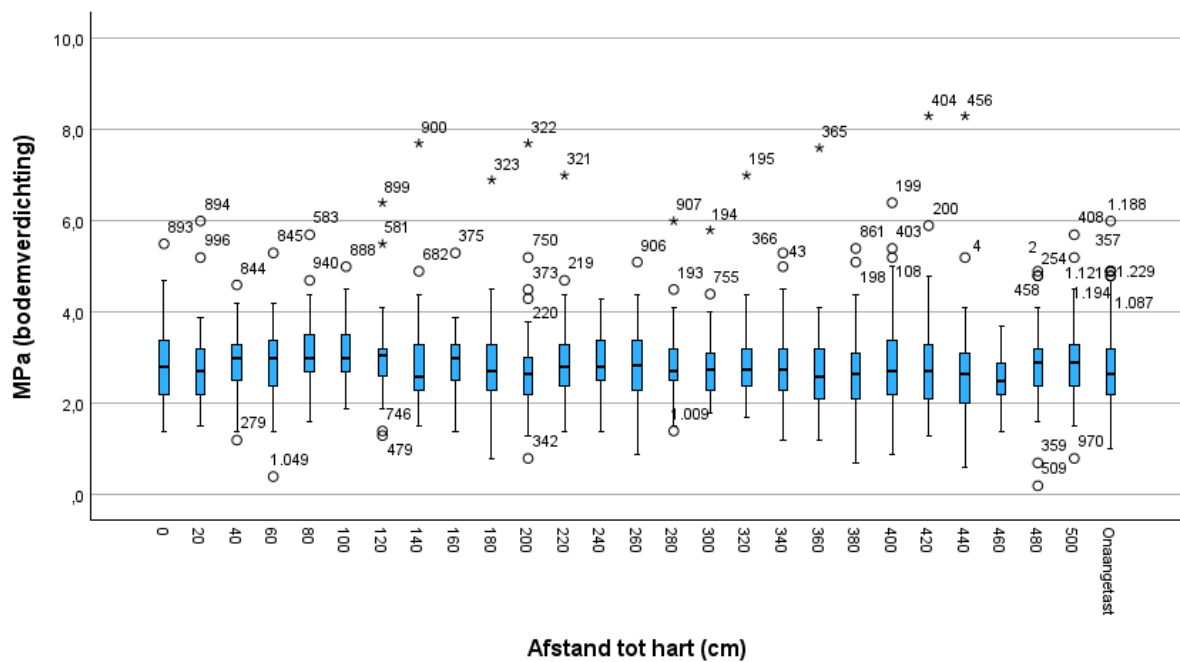
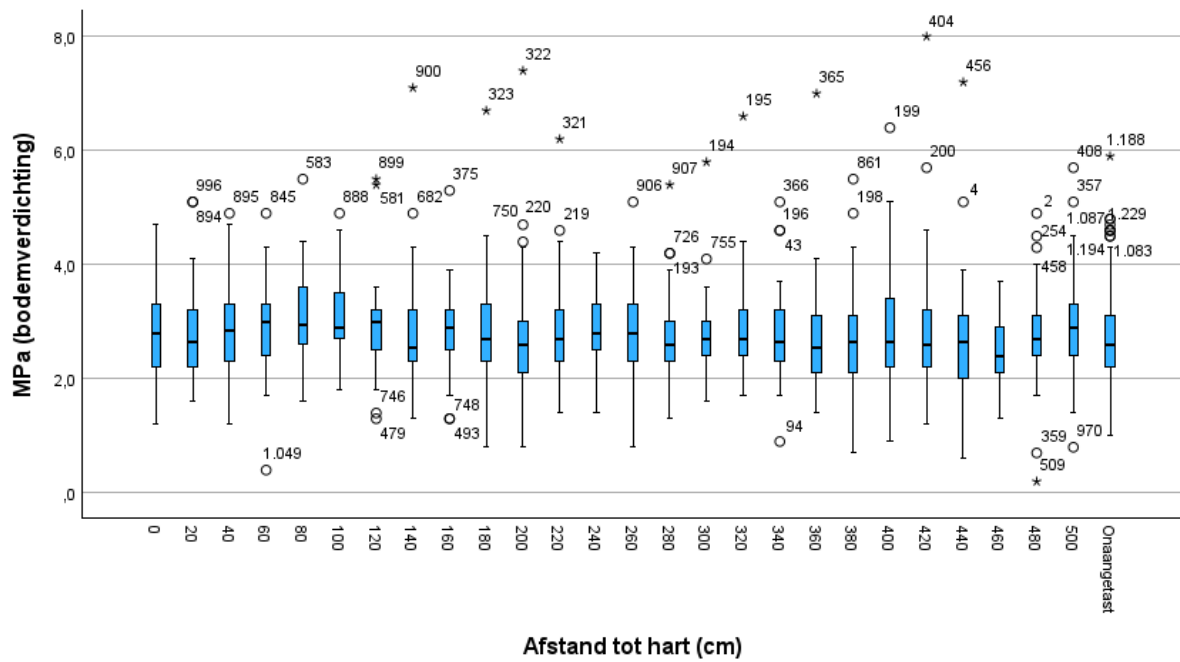


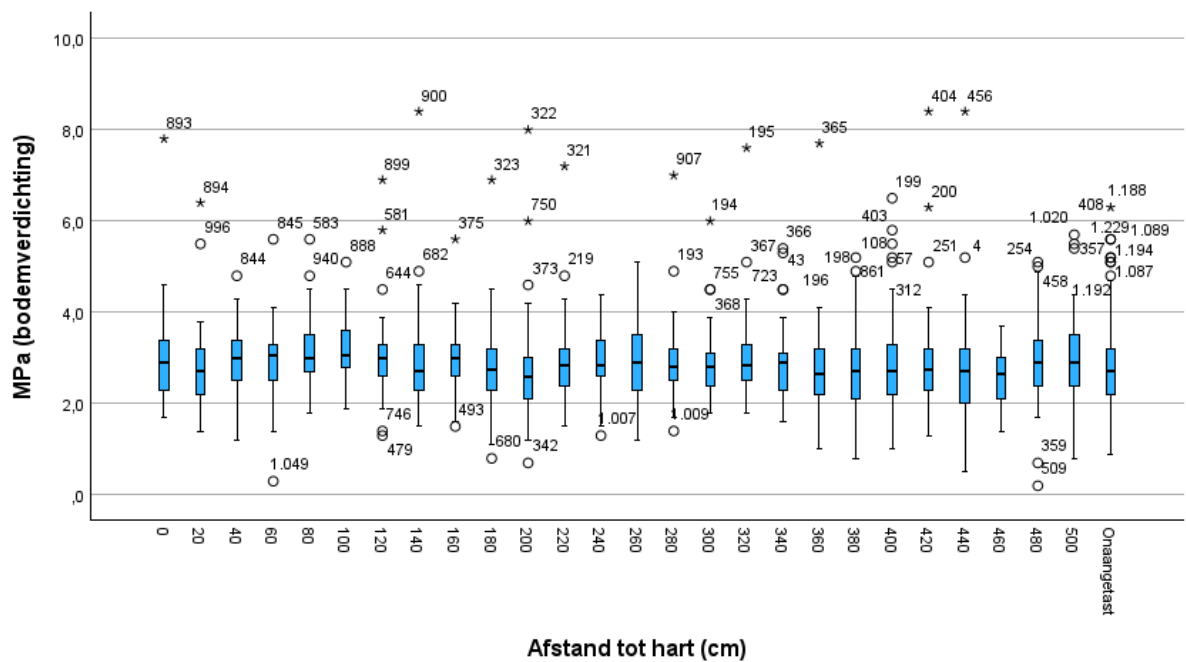
Boxplot 64, MPa per afstand voor diepte 63. Op deze diepte komt het voor het eerst voor dat gemiddelden de kritische waarde van 3,0 MPa overschrijden.



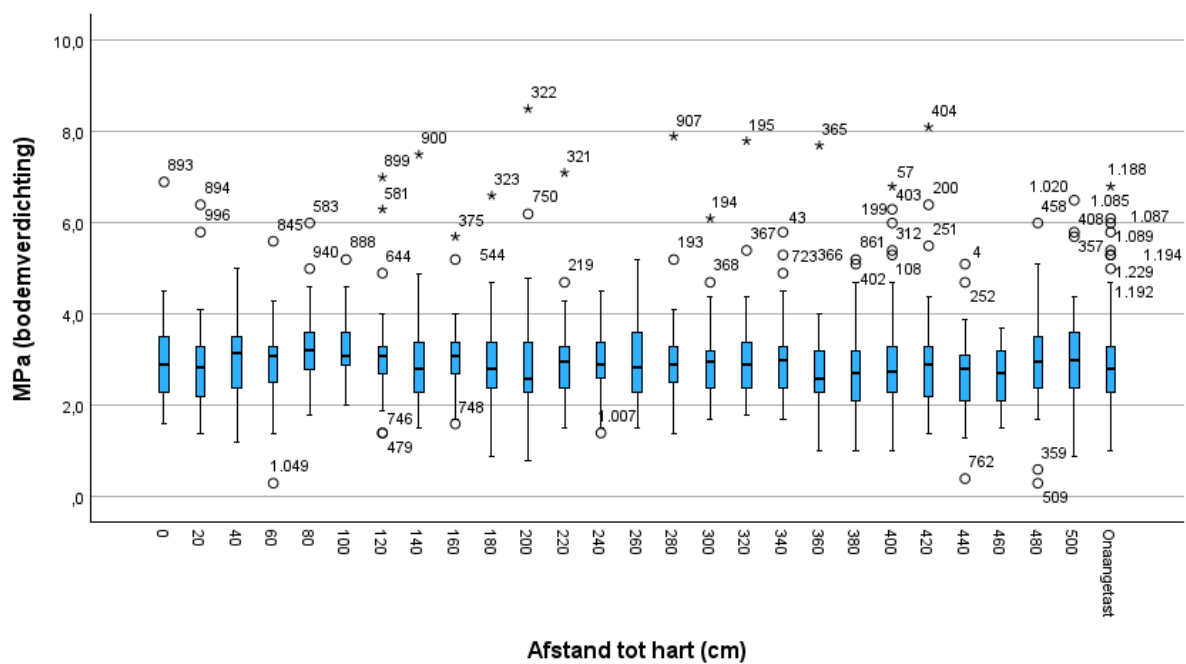
Boxplot 65, MPa per afstand voor diepte 64



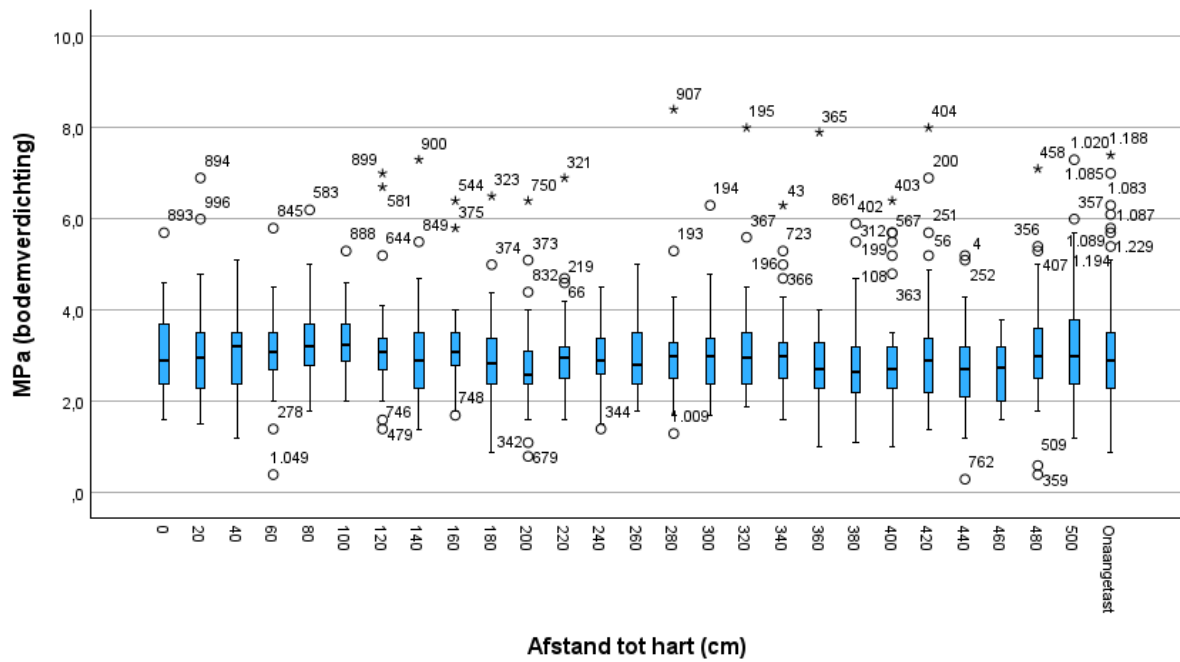




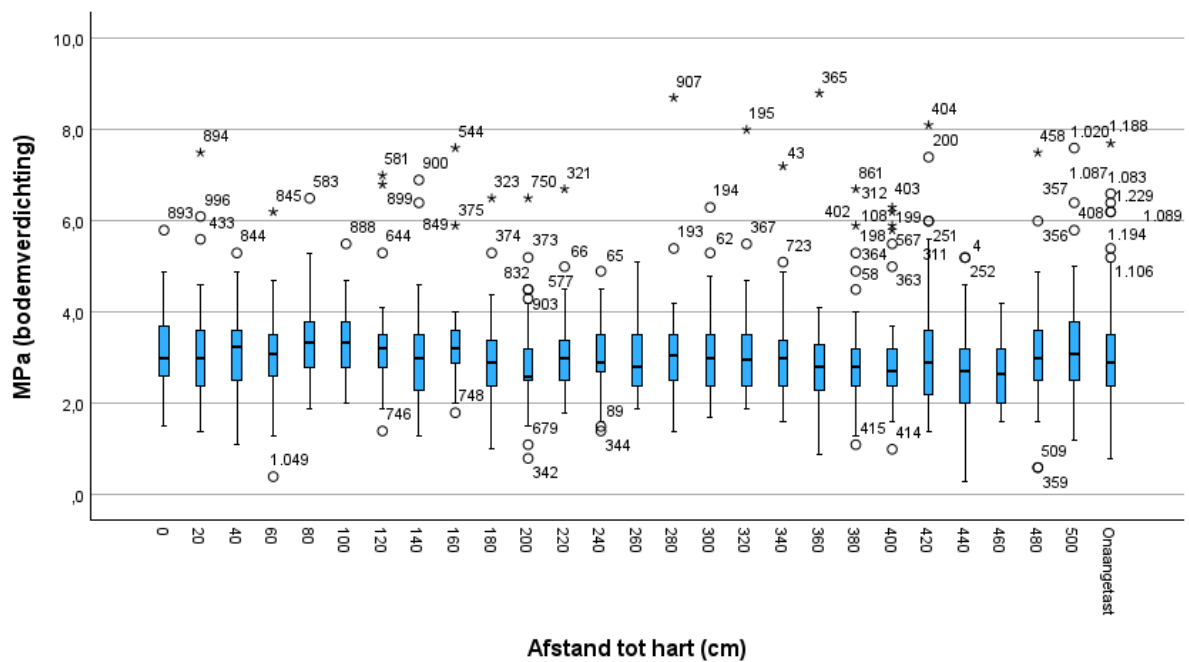
Boxplot 70, MPa per afstand voor diepte 69



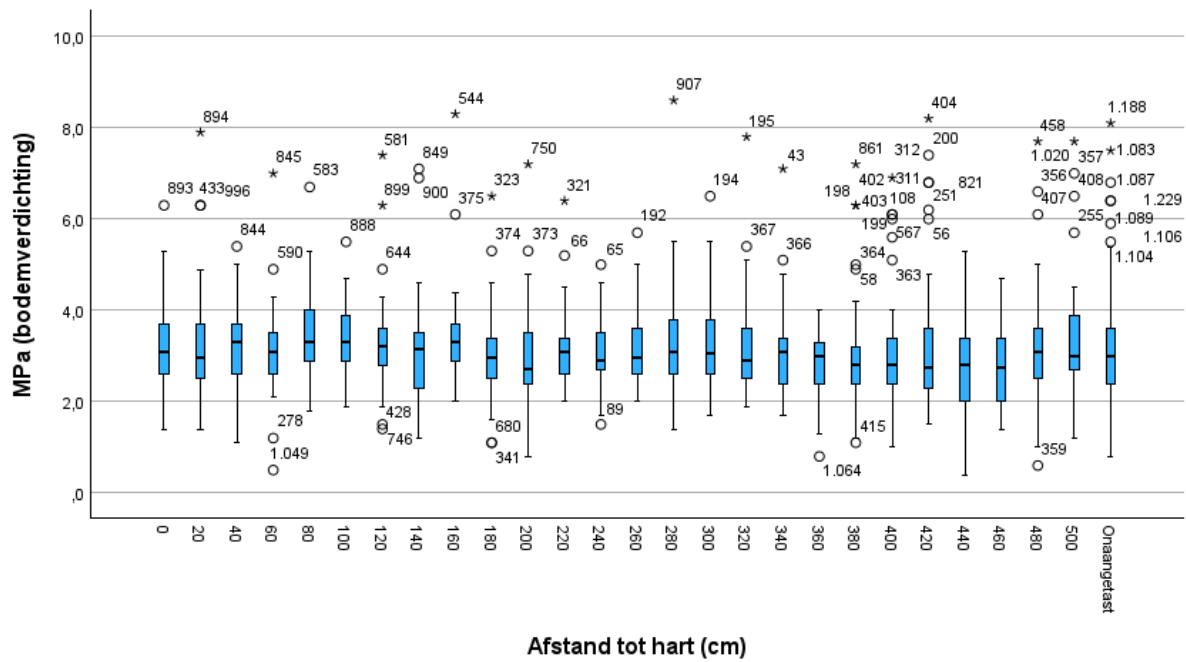
Boxplot 71, MPa per afstand voor diepte 70



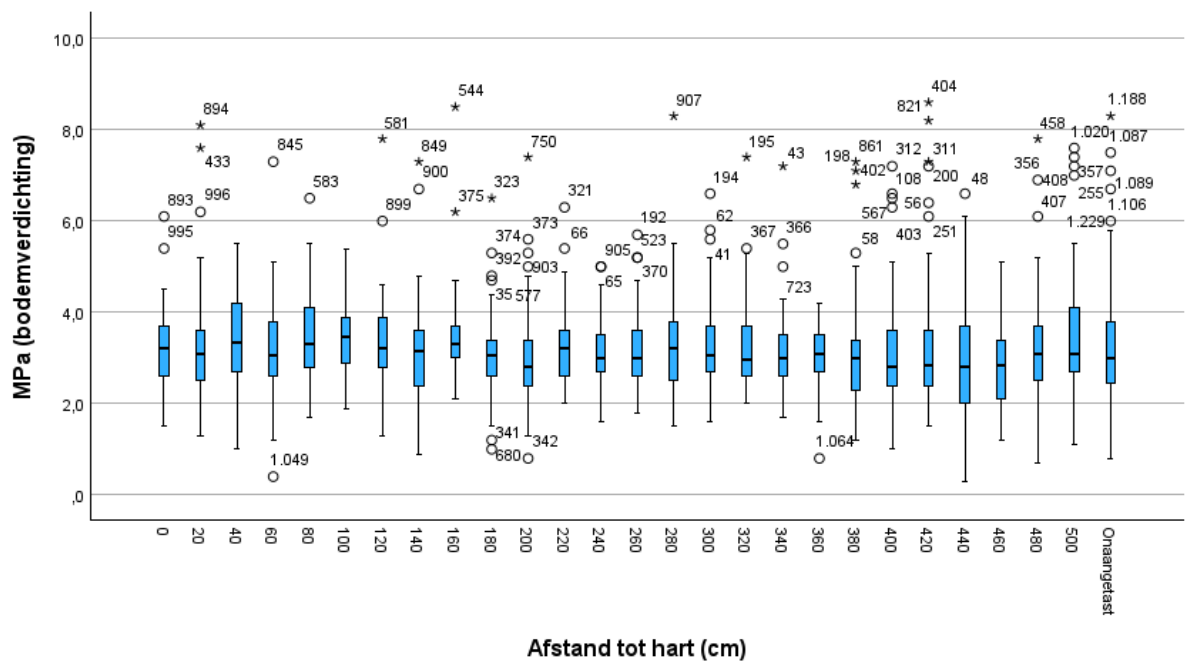
Boxplot 72, MPa per afstand voor diepte 71



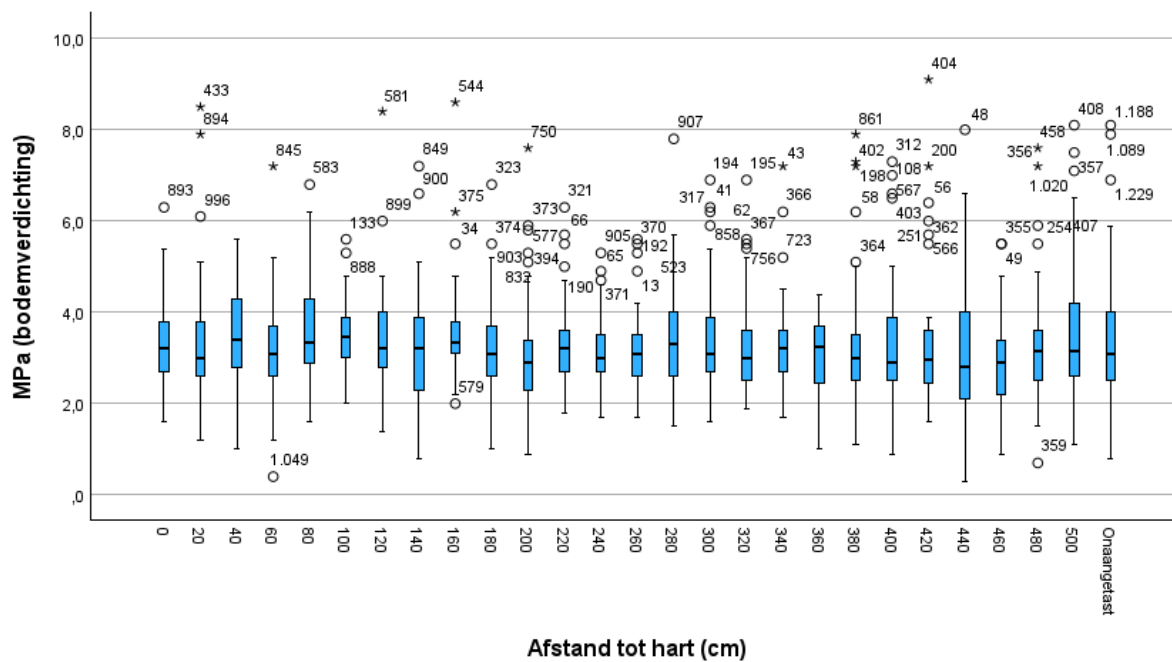
Boxplot 73, MPa per afstand voor diepte 72



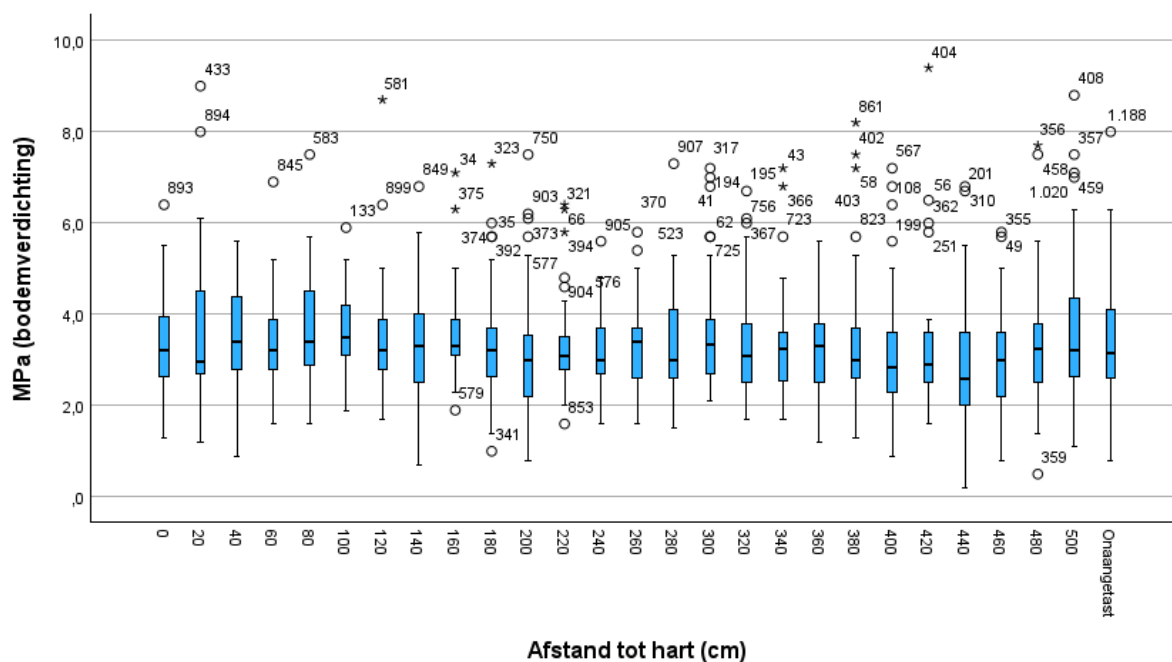
Boxplot 74, MPa per afstand voor diepte 73



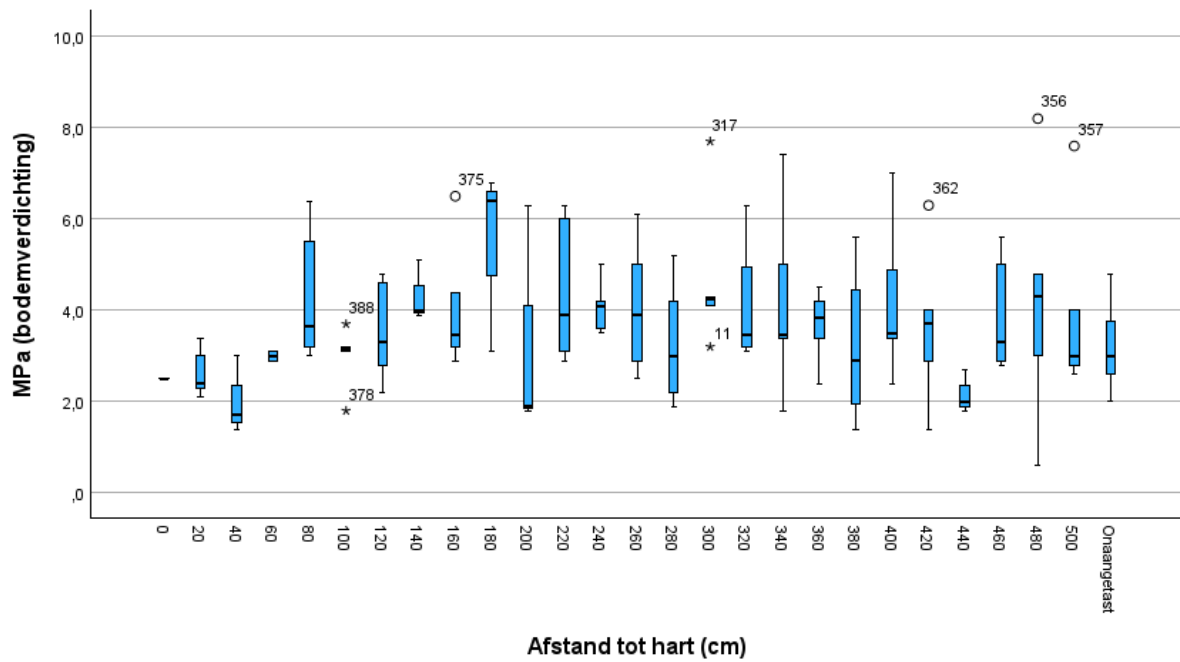
Boxplot 75, MPa per afstand voor diepte 74



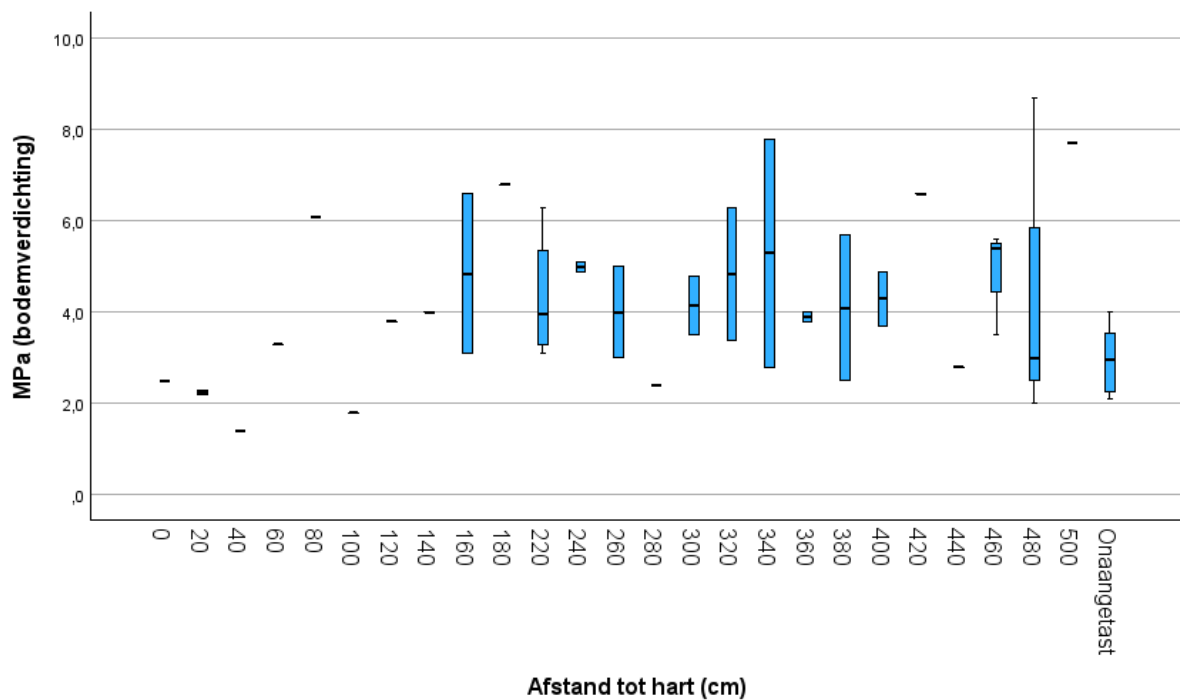
Boxplot 76, MPa per afstand voor diepte 75



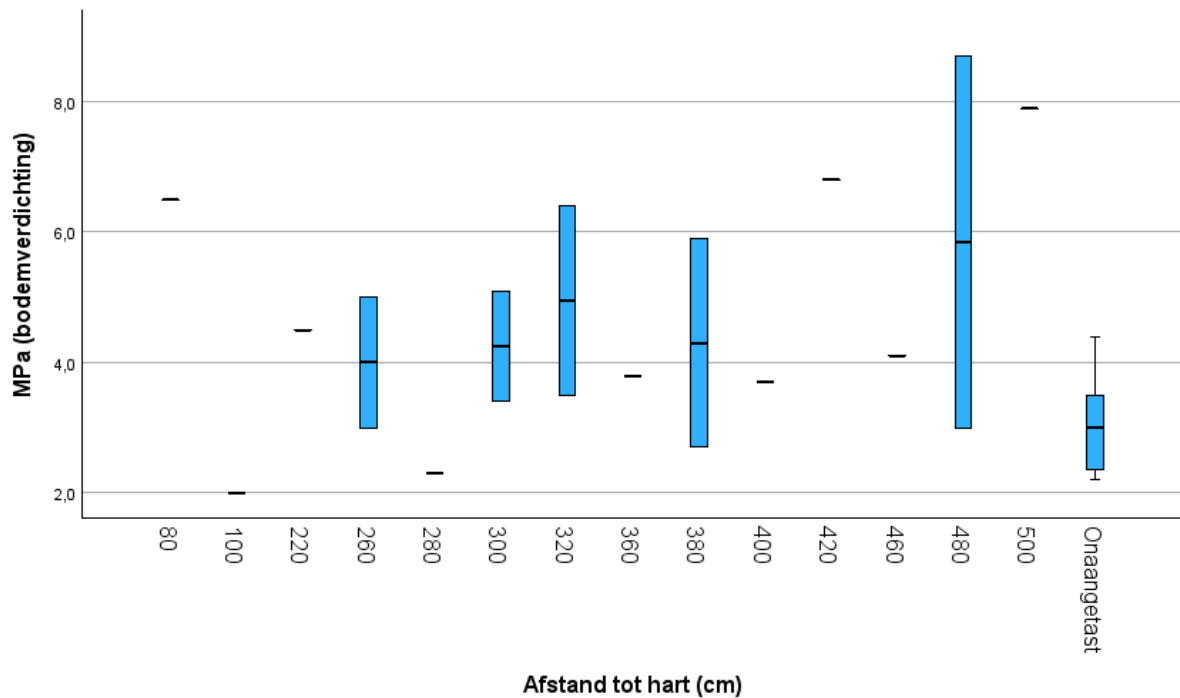
Boxplot 77, MPa per afstand voor diepte 76



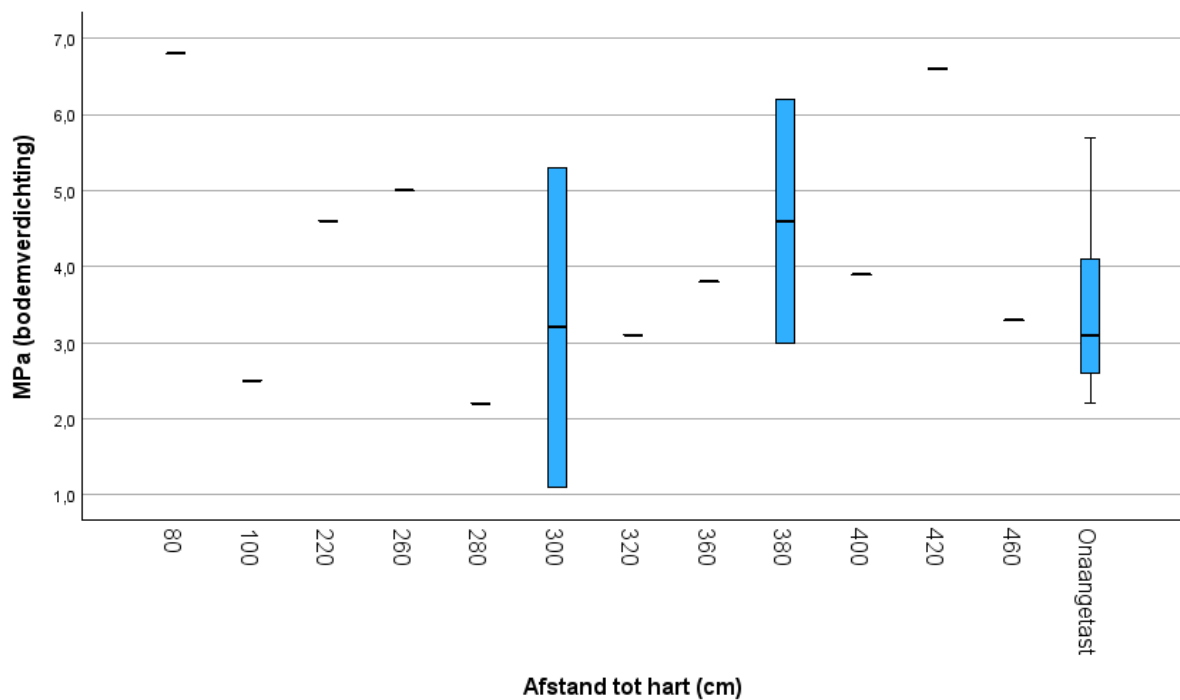
Boxplot 78, MPa per afstand voor diepte 77. Veel metingen ontbreken doordat de penetrologger op deze diepte vaak automatisch stopt. De boxplots zijn geen representatieve weergave van de daadwerkelijke MPa op deze diepte.



Boxplot 79, MPa per afstand voor diepte 78. Veel metingen ontbreken doordat de penetrologger op deze diepte vaak automatisch stopt. De boxplots zijn geen representatieve weergave van de daadwerkelijke MPa op deze diepte.



Boxplot 80, MPa per afstand voor diepte 79. Veel metingen ontbreken doordat de penetrologger op deze diepte vaak automatisch stopt. De boxplots zijn geen representatieve weergave van de daadwerkelijke MPa op deze diepte.



Boxplot 81, MPa per afstand voor diepte 80. Veel metingen ontbreken doordat de penetrologger op deze diepte vaak automatisch stopt. De boxplots zijn geen representatieve weergave van de daadwerkelijke MPa op deze diepte.

Het significant verschillen van de gemiddelden waarden op de locaties bij de dunningspaden vergeleken met de onaangetaste bodem is ook in dit onderzoek onderzocht met een ANOVA. Aan de hand van de post-hoc-Tukey-toets zijn p-waarden berekend die deze significantie weergeven. Deze p-waarden zijn weergegeven in bijlagetabel 1. Wanneer de p-waarden kleiner zijn dan 0,05 geven deze een significant verschil aan, deze waarden zijn in de figuur in het rood aangegeven.

Bijlagetabel 1. de p-waarden uit de post-hoc-Tukey-toets van het verschil tussen gemiddelde indringingsweerstand in onaangetaste bodem en aangetaste bodem per centimeter diepte.

[illegible]

Discussie

Het uitvoeren van analyses per centimeter onder maaiveld geeft een uiterst precieze weergave van de invloedssfeer van houtoogst op de bodemverdichting. Echter, doordat het aantal gegevens per ANOVA veel kleiner is dan bij het gebruik van dieptecategorieën zijn de resultaten minder betrouwbaar. Het is in dat geval mogelijk dat de p-waarden worden opgedreven. Bij een post-hoc-Tukey-toets accepteer je een 5% kans dat je het fout hebt (vandaar $p < 0,05$), maar door mogelijk opgedreven p-waarden is het risico op het trekken van de verkeerde conclusie veel hoger (L. Akhmetzyanov, e-mail, 21 december 2023).

Hierdoor is de focus van het onderzoek komen te liggen op de gegevensanalyse per dieptecategorieën.

Conclusie

In bijlagetabel 1 is te zien dat op de afstanden 0, 20 en vanaf 180 centimeter afstand van het dunningspad er geen significant verschil is tussen de indringingsweerstand daar en de indringingsweerstand van een onverstoorde bodem. Op de afstanden 60 tot en met 160 centimeter van het hart van het dunningspad is dit niet het geval:

- 60 centimeter van het hart: op 11, 12 en 14 tot en met 36 centimeter diepte is het verschil in indringingsweerstand significant hoger dan op een onverstoorde bodem.
- 80 centimeter van het hart: van 13 tot en met 36 is het verschil in indringingsweerstand significant hoger dan op een onverstoorde bodem.
- 100 centimeter van het hart: van 13 tot en met 46 en van 50 tot en met 58 centimeter diepte is het verschil in indringingsweerstand significant hoger dan op een onverstoorde bodem.
- 120 centimeter van het hart: van 12 tot en met 36 centimeter diepte is het verschil in indringingsweerstand significant hoger dan op een onverstoorde bodem.
- 140 centimeter van het hart: van 12 tot en met 40 centimeter diepte is het verschil in indringingsweerstand significant hoger dan op een onverstoorde bodem.
- 160 centimeter van het hart: van 15 tot en met 30, 32 en 33 centimeter diepte is het verschil in indringingsweerstand significant hoger dan op een onverstoorde bodem.

Bijlage 4 - Detailzaken methodiek

In deze bijlage worden de detailzaken van de methodiek uitgelegd. Het gaat hierbij om keuzes die worden gemaakt in de PenetroViewer, op de penetrologger, in Excel of in SPSS. De uitleg is beschreven per stap.

Vorbereidend werk

Het voorbereidend werk vindt plaats met gebruik van de PenetroViewer. In de PenetroViewer worden keuzes gemaakt waardoor voor metingen geprogrammeerd worden voor een dag waarop gegevens worden verzameld.

Nieuw plan aanmaken in de PenetroViewer

De onderzoeker een nieuw plan aan door te klikken op Plan > New/edit > New project. In het venster geeft de onderzoeker het project een naam en de onderzoeker selecteert ook het conustype en de snelheid van de indringingsweerstandmeting. Deze staan standaard al op de waarden die in het onderzoek zijn gebruikt.

Aantal plots en metingen per plot selecteren

De onderzoeker kan ervoor kiezen om alle plots van namen te voorzien. Hiervoor werd de projectnaam gebruikt, gevolgd door het nummer van het plot (bijvoorbeeld 16OKT1, 16OKT2, 16OKT3 enzovoorts).

Plan transporteren naar de penetrologger

De onderzoeker verbindt de PC waarop de PenetroViewer wordt gebruikt met een kabel met de penetrologger. In de PenetroViewer kiest de onderzoeker voor het tabblad "Data logger" en vervolgens "Send plan". Het verwerken hiervan duurt een paar seconden, waarna het gecreëerde plan op de penetrologger staat.

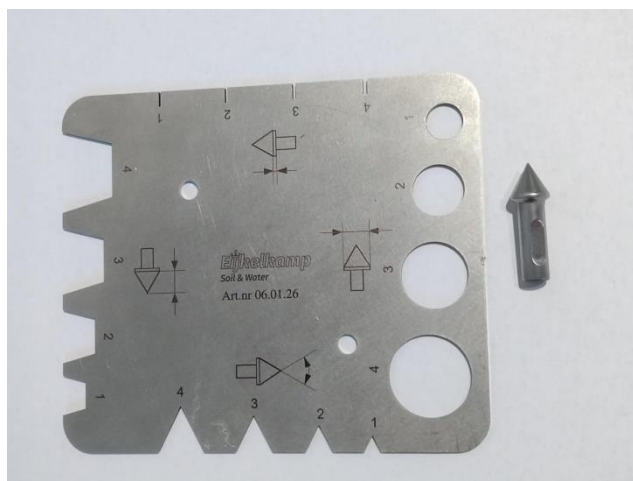
Gegevens verzamelen

Het verzamelen van de gegevens vindt in het bos plaats. Hieronder valt ook het monteren van de penetrologger en de SSNIP

Penetrologger en SSNIP monteren

De penetrologger en de SSNIP dienen voor het uitvoeren van de metingen stevig met elkaar gemonteerd te zijn. Het is daarom belangrijk dat de onderzoeker de tijd neemt om dit te doen. Allereerst wordt de penetrologger in elkaar gezet. Hierbij worden de conus en de stang aan elkaar gedraaid en vervolgens vastgezet op de penetrologger.

De onderzoeker moet hierbij elke dag de conus controleren. Bij het uitvoeren van metingen slijt de conus namelijk langzaam maar zeker. Bij de zogenoemde conecheck zijn er een viertal variabelen die aan de hand van de dieptereferentieplaat worden gecontroleerd: lengte, diameter, hoek en schachtlengte. Wanneer de conus niet voldoet aan minstens één van de variabelen wordt deze conus afgekeurd en dient er een nieuwe conus gebruikt te worden die wél aan alle variabelen voldoet (figuur 12).



Bijlagefiguur 1, links de dieptereferentieplaat om alle variabelen te controleren en rechts conus 1 (1 cm², 60°). De dieptereferentieplaat kan worden gebruikt bij de controle van 4 verschillende grootte conussen.

Zodra de penetrologger is gemonteerd, wordt deze vastgemaakt aan de SSNIP, de door Staro ontwikkelde armatuur om betrouwbaardere metingen te doen met de penetrologger. Ten slotte wordt de ThetaProbe (de vochtsensor) via de datapoort aan de penetrologger vastgemaakt.

Uitvoeren meting

Wanneer de SSNIP op de gewenste positie staat kan de meting worden uitgevoerd. Om de meting uit te voeren worden op de penetrologger enkele keuzes gemaakt. Om in het meetmenu te komen worden de volgende knoppen ingedrukt:

Aanzetten:	Aanknop
Beginscherm:	Menu
Keuzemenu:	Metten
Meetmenu:	OK

Vervolgens wordt de ThetaProbe in de grond gestoken. Hiervoor dient eerst de strooisellaag verwijderd te worden, omdat anders het vochtpercentage van het strooisel wordt gemeten en dus niet het vochtpercentage van de bodem. De ThetaProbe meet het vochtpercentage van enkel de bovenste 6 centimeter van de bodem gemeten. De ThetaProbe dient zo dicht mogelijk bij de meting in de bodem te worden geduwd. Door het gebruik van de SSNIP is dit echter niet mogelijk, omdat de SSNIP een aanzienlijk gedeelte van de bodem bedekt. Om toch een zo accuraat mogelijke vochtmeting te doen wordt deze direct naast de SSNIP in de bodem gestoken op dezelfde afstand van het hart van het dunningspad als waar de meting wordt uitgevoerd.

Na het aanzetten van de penetrologger en het in de grond steken van de ThetaProbe dienen de volgende knoppen ingedrukt te worden om te kunnen meten:

Meetmenu:	Start
ThetaProbe starten:	Start
ThetaProbe opslaan:	Ja
Meetmenu:	Start

Zodra de meting kan beginnen wordt met de draaiknop op de SSNIP de meetsnelheid bepaald. Tijdens het onderzoek is telkens een snelheid van 5,5 gebruikt. Bij deze stand wordt de conus met een snelheid van ongeveer 2 centimeter per seconde in de grond geduwd. Dit gebeurt door op de omlaag-knop van de SSNIP te drukken. Het is van belang om bij elke meting ongeveer dezelfde snelheid te gebruiken, zodat de metingen voor zover mogelijk op dezelfde wijze worden uitgevoerd waardoor de resultaten betrouwbaarder zijn.

De penetrologger slaat alle data op. Doorgaans stopt de meting vanzelf tussen een diepte van 75 en 80 centimeter, zo blijkt uit de praktijk. Deze laatste paar centimeter zijn zodoende bij de gegevensanalyse eruit gefilterd. Wanneer de meting is gestopt, kan de penetrologger weer omhoog worden gebracht met de omhoog-knop van de SSNIP. De volgende knoppen worden ingedrukt om de meting op te slaan:

Meetmenu:	Stop
Opslaan meting:	Ja

Plan uitlezen met de PenetroViewer

De penetrologger heeft alle gegevens van de dag opgeslagen. Om deze gegevens te kunnen gebruiken voor een gegevensanalyse dient de penetrologger uitgelezen te worden. Hiervoor wordt weer de PenetroViewer gebruikt. De penetrologger wordt weer met een datakabel verbonden aan de PC.

Onder het tabblad “Data logger” wordt de keuze gemaakt voor “Read data”. Het uitlezen van de data kan enkele seconden duren. Vervolgens krijgt de onderzoeker per plot de waarden te zien.

Gegevens opslaan als tekst

Het visuele plaatje van de indringingsweerstand per uitgevoerde meting dat in de PenetroViewer wordt gepresenteerd is voor gegevensanalyse niet zo interessant, de gegevens die zijn verworven bij de meting wel. Om deze te verkrijgen kiest de onderzoeker onder tabblad “Project” voor “Save as text”. Wanneer deze keuze wordt gemaakt opent het notitieblok van de PC en is een overzicht van de dag te zien met de projectnaam, de datum, het aantal indringingsweerstandsmetingen per plot, het totale aantal uitgevoerde metingen, conustype snelheid van de indringingsweerstandsmeting. Daaronder is per meting het metingnummer, coördinaten, vochtgehalte en voor elke centimeter (tot 80 centimeter!) een MPa waarde te zien.

Gegevens analyseren

Het analyseren van de gegevens is de laatste stap en deze vindt plaats met gebruik van Excel, SPSS en R (R enkel door L. Akhmezyanov).

Gegevens openen in Excel

Om de gegevens van tekstbestand naar Excel-bestand om te zetten wordt simpelweg gebruik gemaakt van kopiëren en plakken. In het Excel-bestand komen alle metingen zodoende onder elkaar te staan. Per meting zijn de volgende kolommen ingevuld:

- Metingnummer
- Coördinaten
- Vochtgehalte
- MPa per diepte (in totaal 81 waarden: 0 tot en met 80 centimeter onder maaiveld)

Gemiddelden berekenen

Om een inzicht te krijgen in het verloop van verloop van de indringingsweerstand tot 80 centimeter diepte respectievelijk in onverstoorde bodemprofielen en dienen alle gemaakte doorsneden gevisualiseerd te worden. Dit is gedaan met behulp van Excel. Vervolgens worden alle doorsneden gecombineerd in een gemiddelde doorsnede.

Met behulp van Excel wordt voor de 21 doorsneden over onaangetaste bodem één gemiddelde doorsnede gemaakt. Hetzelfde gebeurt met de 21 doorsneden over onaangetaste bodem.

Gegevens exporteren naar SPSS

Om die gesorteerde gegevens uit Excel te exporteren naar SPSS wordt in SPSS onder het tabblad “File” de keuze “Import Data” > “Excel” gemaakt. Vervolgens kiest de onderzoeker het Excel-bestand waarin de gesorteerde gegevens staan. Hierna staan deze gesorteerde gegevens in het SPSS-bestand op dezelfde wijze als deze in het Excel-bestand staan.

Gegevens opschonen en filteren per dieptecategorie

Voor de gegevensanalyse maakt het niets uit of een meting is gemeten op -500 centimeter of +500 centimeter van het hart van het dunningspad. Voor elke afstand van het hart van het dunningspad dienen deze waardes dus opgeschoond te worden. Onder het tabblad “Transform” wordt keuze “Recode into Same Variables” gekozen. Vervolgens maakt de onderzoeker de keuze om aanpassingen te doen in de variabele Afstand tot hart (cm). In het tabblad wordt de oude waarde (Old Value) en de gewenste nieuwe waarde (New Value) geselecteerd. Dit doet de onderzoeker voor elke afstand: -500 wordt 500, -480 wordt 480 enzovoorts tot -20 wordt 20.

Met dezelfde functie (Recode into Same Variables) worden de verkeerde MPa waarden opgeschoond. De -1-waarden die zijn veroorzaakt door het automatisch stoppen van de penetrologger worden vervangen door "System-missing"-waarden.

De dataset dient bovendien gesplitst te worden per dieptecategorie. Onder het tabblad "Data" wordt de keuze "Split into Files" gemaakt. Vervolgens wordt de keuze gemaakt op basis van welke variabele de dataset wordt verdeeld in verschillende datasets in het vakje "Split Cases by". Hiervoor wordt de variabele Dieptecategorie geselecteerd. SPSS creëert vervolgens voor elke verschillende waarde een nieuwe dataset. In dit geval ontstaan er 8 nieuwe datasets, één voor elke dieptecategorie. Het format van de dataset blijft vervolgens hetzelfde.

Gegevens per diepte analyseren

Alle boxplots worden gemaakt met behulp van SPSS. Onder het tabblad "Graph" kiest de onderzoeker "Boxplot" en vervolgens voor "Simple". In het nieuwe venster wordt MPa als "Variable" ingevuld en afstand tot hart van het dunningspad als "Category Axis".

Onder het tabblad "Analyze" kiest de onderzoeker voor de optie "Compare Means and Proportions" en vervolgens voor de "One-Way ANOVA".

In het One-Way ANOVA-scherm kiest de onderzoeker welke variabele de afhankelijk variabele (Dependent List) is en welke variabele de onafhankelijke of groepsvariabele (Factor) is. In dit onderzoek wordt getracht de mate van bodemverdichting te koppelen aan de invloed van zware machines. De afhankelijke variabele is dus de indringingsweerstand (MPa) en de onafhankelijke variabele is de afstand tot het hart van het dunningspad. In dit geval zijn er dus 27 onafhankelijke variabelen: 0, 20, 40 enzovoorts tot de 500 centimeter tot het hart van het dunningspad én "Onaangetast".

Wanneer de post-hoc-Tukey-toets ook is geselecteerd wordt de analyse gedraaid. Er opent zich vervolgens een nieuw SPSS-scherm met daarin de resultaten van de analyse. In het nieuwe scherm zijn er 3 verschillende figuren die belangrijk zijn voor de statistische gegevensanalyse: de ANOVA resultaten, de resultaten van de post-hoc-Tukey-toets (de p-waarden die de significantie tussen groepen weergeven) en de homogene subgroepen (homogeneous subsets) uit dezelfde post-hoc-Tukey-toets.