

Impact van gemechaniseerde houtoogst op de bosbodem & effecten van het werken met dunningspaden



Auteur: Glenn Potvliet

Supervisor: Wouter Delforterie



Bosgroep Midden Nederland

Over Bosgroep Midden Nederland

Bosgroep Midden Nederland vormt samen met Bosgroep Zuid Nederland en Bosgroep Noord-Oost Nederland de Bosgroepen. De Bosgroepen is een coöperatie die hun leden adviseert over bos- en natuurbeheer. Ze hebben expertise op de gebieden van natuur & ecologie, bosbeheer & hout en subsidies & beleid. De Unie van Bosgroepen fungeert vervolgens als overkoepelende organisatie van de Bosgroepen.

Het werkgebied van Bosgroep Midden Nederland is de provincie Gelderland, Utrecht, Noord-Holland, Zuid-Holland en de Flevopolder. In deze regio's ondersteunt Bosgroep Midden Nederland haar leden bij hun terreinbeheer. Tot de leden behoren onder andere bos- en natuurbeheerders, particuliere bos- en landgoedeigenaren, gemeenten en organisaties als Natuurmonumenten en Geldersch Landschap.

De visie van de Bosgroep is om de kwaliteit van bos en natuur te waarborgen en tegelijkertijd op de groeiende economische en maatschappelijke waarde zoals recreatie, beleving, educatie, klimaat en energie in te spelen (Bosgroepen, 2015).

Inhoudsopgave

1. Introductie	1
1.1 Achtergrond.....	1
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Onderzoeksdoelen en onderzoeksvragen	2
1.4 Opzet rapport	3
2. Methode	4
2.1 Dataverzameling.....	4
2.1.1 Literatuurstudie.....	4
2.1.2 Interviews	4
2.2 Data-analyse	5
3. Ecologische effecten van bodemverdichting	6
3.1 Effecten van bodemverdichting op bodemstructuur en lucht- en waterhuishouding	6
3.2 Fysiologische reactie van planten op bodemverdichting.....	7
3.2.1 Hormonale groeiregulatoren.....	7
3.2.2 Waterrelaties.....	8
3.2.3 Mineralen	8
3.2.4 Fotosynthese	8
3.3 Effecten op verjonging en boomgroei.....	9
3.3.1 Verjonging	9
3.3.2 Boomgroei	10
3.4 Bodemherstel	11
3.5 Conclusie	12
4. Factoren bepalend voor de mate van bodemverdichting.....	14
4.1 Contactdruk & insporing	14
4.2 Bodemtextuur en bodemvochtgehalte	15
4.2.1 Medium en fijne bodemtypes	15
4.2.2 Grove bodemtypes	16
4.3 Intensiteit van berijden	16
4.4 Conclusie	17
5. Financieel inzicht in dunningspaden	18
5.1 Uitgangspunten rekenmodel.....	18
5.2 Eerste generatie	18
5.2.1 Controle-opstand	19

5.2.2 Opstand met dunningspaden	21
5.3 Generatie 2	22
5.3.1 Controle-opstand	22
5.3.2 Opstand met dunningspaden	23
5.4 Discussie	25
5.4.1 Aannames	25
5.4.2 Niet meegenomen factoren	26
5.5 Conclusie	26
6. Aanleggen van dunningspaden	28
6.1 Uitstippelen dunningspadenpatroon	28
6.2 Uitzetten van dunningspaden	30
6.3 Vastleggen en terugvinden van dunningspaden	31
6.4 Samenvatting	31
7. Interviews beheerders.....	33
7.1 Visie van beheerders op bodemschade en de effecten van bodemverdichting.....	33
7.1.1 Visie op bodemschade als gevolg van gemechaniseerde houtoogst	33
7.1.2 Visie op ecologische effecten van bodemverdichting	34
7.2 Visie van beheerders op het gebruik van vaste dunningspaden.....	36
7.2.1 Argumenten tegen het gebruik van een vast dunningspadensysteem.....	37
7.2.2 Redenen voor het gebruik van vaste dunningspaden	38
7.2.3 Methodes van uitzetten en vastleggen van dunningspaden	39
7.3 Discussie	40
7.4 Conclusie	42
8. Aanbevelingen.....	44
Bibliografie	46
Bijlagen	50
<i>Bijlage 2.1: Interview vragenlijst beheerders.</i>	50
<i>Bijlage 5.1: Opbrengsttabel grove den groeiklasse 10 (Jansen, Sevenster, & Faber, 1996).</i>	52
<i>Bijlage 5.2: Opbrengsttabel grove den groeiklasse 8 (Jansen, Sevenster, & Faber, 1996).</i>	52
<i>Bijlage 6.1: Uniforme blesmarkeringen (P. Kah, persoonlijke communicatie, 2015).</i>	53

1. Introductie

1.1 Achtergrond

Het Nederlands bosbeheer verandert. Tot de tweede helft van de 20^{ste} eeuw was houtproductie de voornaamste functie die aan de Nederlandse bossen werd toegeschreven. Sindsdien is het bosbeheer een breder begrip geworden dat zich niet enkel met houtproductie bezighoudt maar ook doelstellingen zoals natuurbehoud en recreatie omvat (Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010). Echter, ondanks de bredere doelstellingen blijft houtproductie een belangrijke functie van het hedendaagse bos. Ook de houtexploitatie methodes zijn in de afgelopen decennia sterk veranderd. Handmatige vellingen en uitslepen met behulp van paarden of klassieke landbouwtractoren heeft plaats gemaakt voor gespecialiseerde kap- (harvester) en uitrijdmachines (forwarder of skidder). Deze technologische ontwikkelingen hebben aan de ene kant het houtoogstproces geoptimaliseerd, maar brengen tegelijkertijd nieuwe problemen met zich mee.

Het gewicht van een gemiddelde harvester is zo'n 15 ton en het gewicht van een beladen forwarder kan oplopen tot 25 á 30 ton (Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010). Meerdere studies hebben aangetoond dat het gebruik van deze hedendaagse kap- en uitrijdmachines resulteert in schade aan de bodemstructuur (Kozłowski, 1999; Greacen & Sands, 1980; Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008; Virto, et al., 2014). Na het rijden met deze machines zijn insporingen in de bodem duidelijk visueel zichtbaar. Insporing is een combinatie van zowel het verplaatsing en opstuwen van bodemdeeltjes als het samendrukken van bodemdeeltjes, ook wel bodemverdichting genoemd (Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010). Bodemverdichting is soms moeilijk zichtbaar en wordt dan ook door veel exploitanten en beheerders over het hoofd gezien (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008).

Bodemverdichting is het proces waarbij de bodemporiën worden samengedrukt of kapotgemaakt en waarbij aggregaten afgebroken worden (Fisher & Binkley, 2000). Bodemverdichting heeft negatieve ecologische effecten voor de bodemstructuur en de lucht- en waterhuishouding, zoals een verhoogde bulkdensiteit, verminderde waterdoorlaatbaarheid en verminderde gasuitwisseling. Deze effecten hebben op de lange termijn verhoogde bodemerosie en het remmen van planten- en wortelgroei tot gevolg (Kozłowski, 1999; Ampoorter, van Nevel, de Vos, Hermy, & Verheyen, 2010). De kwetsbaarheid van een bosbodem voor bodemverdichting is afhankelijk van factoren zoals de bodemtextuur, het bodemvochtgehalte, het machinegewicht en de initiële bulkdensiteit (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008). Het natuurlijk herstel van verdichte bodems is een langzaam proces. Meerdere studies hebben aangetoond dat de herstelperiode enkele decennia in beslag neemt (Mitchell, Hassan, Davey, & Gregory, 1982; Greacen & Sands, 1980; Ampoorter, 2011). Daarmee overschrijdt de herstelperiode de duur tussen twee dunningen van zo'n vijf tot tien jaar (Froehlich, Miles, & Robbins, 1985; Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010). Als gevolg accumuleren de effecten van het machineverkeer op de bodems en wordt bodemverdichting (met alle ecologische gevolgen van dien) een steeds groter probleem. Volgens het Agentschap voor Natuur en Bos (2014) is bodemverdichting in sommige gevallen zelfs onomkeerbaar. Het gebruik van kap- en uitrijdmachines heeft dus grote invloed op het boscysteem en algehele vitaliteit van het bos. Het

is daarom van belang om duurzame houtoogstmethodes te gaan gebruiken die bodemschade minimaliseren.

1.2 Probleemstelling

Volgens Ampoorter et al. (2008) is het merendeel van de Belgische bosbodems reeds verdicht. In Nederland zijn hier geen gegevens van bekend. Echter, ongeacht de huidige staat van de Nederlandse bosbodems vragen de negatieve effecten van bodemverdichting om voorzichtigheid betreffende het werken met zware machines in het bos. Het is van belang om duurzame houtoogstmethodes te gaan gebruiken die bodemschade minimaliseren.

Eén exploitatiehulpmiddel dat in het buitenland al veel gebruikt wordt om de bodemschade door machineverkeer te minimaliseren is om te werken met vaste dunningspaden, ook wel ruimingspistes genoemd (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008; Kohn, Gaertig, & Fründ, 2013). Dunningspaden vormen een wegennetwerk door een opstand waar het machineverkeer niet van af mag wijken. Het machineverkeer wordt dus geconcentreerd op deze paden met als gevolg dat bodemschade op de overige grond voorkomen wordt, of reeds beschadigde bodems de kans krijgt zich te herstellen. Aangezien gemiddeld 62% van de verdichting in de bovenste 10cm al bij de eerste passage van een exploitatiemachine optreedt (Williamson & Neilsen, 2000) en reeds verdichte bodems moeilijk nog verder te verdichten zijn, kan door het concentreren van het machineverkeer op vaste dunningspaden de bodemschade op opstandsniveau worden geminimaliseerd. Dunningspaden zijn ongeveer vier meter breed en liggen vaak om de 18-20 meter parallel naast elkaar zodat een harvester met een tien meter lange kraan precies het midden van de opstand kan bereiken. Met behulp van vaste dunningspaden kan het machineverkeer dus beperkt worden tot ongeveer 20-30% van het bodemoppervlak in plaats van 70-80% bij ongestructureerde houtoogsten (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008).

Dit onderzoek richt zich op de vraag of dunningspaden in Nederland kunnen bijdragen aan een duurzaam bosbeheer waarbij de effecten van rijden met zware machines op de bodem geminimaliseerd worden. Momenteel worden dunningspaden in Nederland nog weinig gebruikt, terwijl ze mogelijk een grote rol kunnen spelen bij het voorkomen en herstellen van bodemverdichting. Het is daarom belangrijk meer inzicht te krijgen in hoe het gebruik van dunningspaden de bodemecologie kan bevorderen. Echter, het is ook belangrijk om uit te zoeken wat de kosten van aanleg en gebruik van dunningspaden zijn en waar bosbeheerders rekening mee moeten houden bij het aanleggen en gebruiken van dunningspaden. Tot slot is het nodig inzicht te verwerven in de motieven van bosbeheerders om wel of niet met vaste dunningspaden te werken.

1.3 Onderzoeksdoelen en onderzoeksvragen

Dit onderzoek heeft als doelen om 1) inzicht te verwerven in de ecologische effecten van bodemverdichting 2) inzicht te verwerven in welke factoren de mate van verdichting beïnvloeden 3) inzicht te verwerven in de economische aspecten van het werken met vaste dunningspaden 4) inzicht te verwerven omtrent de praktische beheeraspecten van het aanleggen en gebruiken van dunningspaden, 5) inzicht te werven in de opinie van Nederlandse bosbeheerders over het gebruik van dunningspaden en 6) te komen tot praktische aanbevelingen over de inzet van dunningspaden in het Nederlands bosbeheer.

Om deze doelen te behalen zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. *Wat zijn de ecologische effecten van bodemverdichting?*
2. *Welke factoren beïnvloeden de mate van bodemverdichting bij gemechaniseerde houtoogst?*
3. *Wat zijn de economische effecten van het werken met vaste dunningspaden?*
4. *Met behulp van welke methodes kunnen dunningspaden worden aangelegd?*
5. *Wat is de opinie van Nederlandse bosbeheerders over bodemschade als gevolg van gemechaniseerde houtoogst en wat is hun visie op het werken met een vast dunningspadensysteem?*

1.4 Opzet rapport

De structuur van het rapport is als volgt: Hoofdstuk 2 beschrijft de methodes die gebruikt zijn voor de gegevensverzameling en gegevensverwerking van dit onderzoek. Daarna presenteert hoofdstuk 3 de resultaten over de ecologische effecten van bodemverdichting. Dan worden de factoren die de mate van bodemverdichting beïnvloeden toegelicht in hoofdstuk 4. Vervolgens worden in hoofdstuk 5 de resultaten omtrent de economische aspecten van het werken met dunningspaden behandeld. In hoofdstuk 6 wordt toegelicht hoe dunningspaden kunnen worden aangelegd. Daarna geeft hoofdstuk 7 een overzicht van de opinies van Nederlandse bosbeheerders omtrent bodemschade als gevolg van gemechaniseerde houtoogst en hun visie op het werken met dunningspaden. Tot slot worden in hoofdstuk 8 aanbevelingen gegeven.

2. Methode

Dit hoofdstuk is toegewijd aan alle methoden die zijn gebruikt gedurende dit onderzoek om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Paragraaf 2.1 behandelt de gebruikte dataverzameling methodes voor dit onderzoek. Vervolgens worden de data-analyse methoden toegelicht in paragraaf 2.2. De totale duur van het onderzoek bedroeg vier maanden.

2.1 Dataverzameling

De dataverzameling methodes die gebruikt zijn voor dit onderzoek omvatten literatuurstudie en diepte-interviews.

2.1.1 Literatuurstudie

Literatuurstudie vormt een belangrijk onderdeel van dit onderzoek. Literatuurstudie heeft als voordeel dat een onderzoeker relatief snel veel kennis kan opdoen over een bepaald onderwerp. Gezien het feit dat er geen tijd is voor een eigen experimentele opzet en de al reeds grote hoeveelheid beschikbare literatuur over de effecten van dunningspaden is er hier voor een literatuurstudie gekozen. Literatuurstudie is gebruikt om de eerste drie onderzoeksvragen te beantwoorden. Hiervoor is een combinatie van wetenschappelijke artikelen, vakbladen en andere internetbronnen gebruikt. De wetenschappelijke artikelen zijn voornamelijk gevonden met behulp van de online bibliotheek van de Wageningen University.

2.1.2 Interviews

Interviewen is een veel gebruikte onderzoeksmethode in kwalitatief onderzoek en bestaat uit een interviewer die de vragen stelt aan de geïnterviewde die ze beantwoordt (Kumar, 1999, p177; Boeije, 2010). Interviews worden voornamelijk gebruikt voor het verzamelen van diepgaande informatie over perspectieven op en ervaringen met een specifiek onderwerp (Boeije, 2010). Om deze reden is er gekozen voor het gebruik van interviews om de laatste onderzoeksvraag *“Wat is de opinie van Nederlandse bosbeheerders over bodemschade als gevolg van gemechaniseerde houtoogst en wat is hun visie op het werken met een vast dunningspadensysteem?”* te beantwoorden.

In totaal zijn er negen één op één semi-gestructureerde interviews gehouden met Nederlandse bosbeheerders. Een semi-gestructureerd interview houdt in dat inhoud van het interview en de volgorde en verwoording van de vragen niet helemaal vaststaat van tevoren (Kumar, 1999). De selectie van bosbeheerders is in overleg gegaan met Wouter Delforterie van Bosgroep Midden Nederland. De duur van de interviews bedroeg tussen de 20 en 50 minuten. Alle interviews zijn opgenomen omdat dit een hogere kwaliteit aan data oplevert vergeleken met het maken van aantekeningen tijdens het interview (Boeije, 2010).

De inhoud van de interviews was op te splitsen in de volgende twee hoofdonderwerpen:

1. Visie van beheerders op de bodemschade door machineverkeer bij houtoogst.
2. Visie van beheerders op het werken met een vast dunningspadensysteem.

De gebruikte vragenlijst is te vinden in bijlage 2.1.

2.2 Data-analyse

De data-analyse beperkt zich tot de gehouden interviews. Allereerst zijn de opgenomen interviews getranscribeerd. Vervolgens is de analyse uitgevoerd met Excel. Met behulp van Excel zijn de getranscribeerde interviews gecodeerd. Coderen is het proces van segmenteren en opnieuw samenvoegen van de data (Boeije, 2010). Door middel van coderen kunnen de antwoorden van verschillende geïnterviewden onderling vergeleken worden om er vervolgens conclusies uit trekken en de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden.

3. Ecologische effecten van bodemverdichting

De bodemtextuur is bepalend voor de belangrijkste fysische eigenschappen van een bodem, zoals waterhuishouding, zuurgraad en aanwezigheid van voedingsstoffen (ANB, 2014). Wanneer een zware machine over een bodem rijdt, wordt door de uitgeoefende druk van de machine de bodemtextuur veranderd en wordt de bodem verdicht. Dit hoofdstuk behandelt de ecologische effecten van bodemverdichting. Paragraaf 3.1 gaat in op de effecten van bodemverdichting op de bodemstructuur en op de lucht- en waterhuishouding. Daarna zullen de effecten van bodemverdichting op het fysiologisch functioneren van een plant worden uitgelegd in paragraaf 3.2. Vervolgens behandelt paragraaf 3.3 de langetermijneffecten van bodemverdichting op verjonging en boomgroei. Het bodemherstelproces wordt uitgelegd in paragraaf 3.4. Tot slot geeft paragraaf 3.5 een conclusie waarin antwoord wordt gegeven op de vraag: Wat zijn de ecologische effecten van bodemverdichting?

3.1 Effecten van bodemverdichting op bodemstructuur en lucht- en waterhuishouding

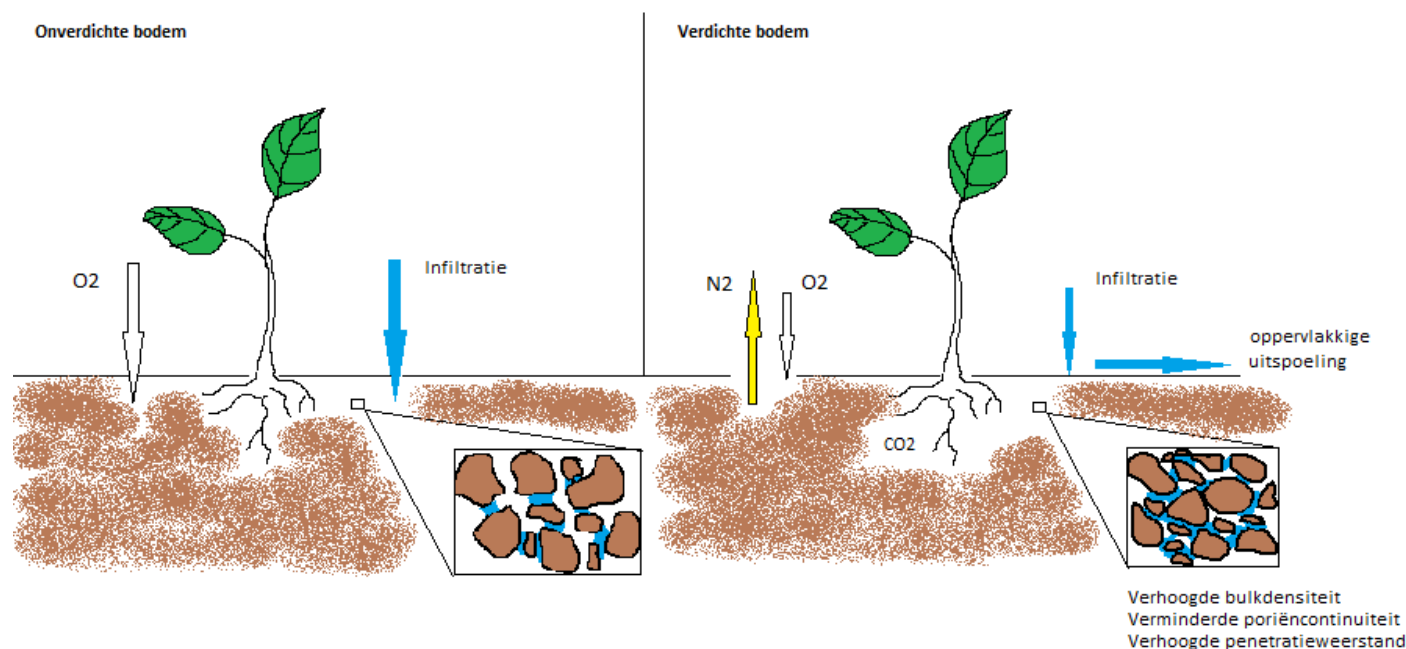
Een gezonde bodem bestaat voor ongeveer 5% uit organisch materiaal, 45% uit mineralen, 25% uit lucht en 25% uit water (ANB, Bodems en machines 3- bodemverdichting heeft een belangrijke impact, 2014). De lucht bevindt zich vooral in de macroporiën (diameter $d > 50\mu\text{m}$) en water voornamelijk in de microporiën ($d < 0.2\mu\text{m}$). Wanneer bodemverdichting optreedt wordt deze bodemtextuur veranderd. De bodemporiën worden samengedrukt en aggregaten worden afgebroken (Fisher & Binkley, 2000). Macroporiën worden door dit proces omgevormd tot meso- ($0.2\mu\text{m} < d < 50\mu\text{m}$) en microporiën. Het aantal macroporiën kan hierdoor 50 á 60% verminderd worden (Herbauds, Bayad, & Gruber, 1996). Tijdens bodemverdichting wordt de bulkdensiteit (proportie droge bodemmassa van het totale volume) verhoogd en neemt de bodemporositeit af (Herbauds et al., 1996; Kozłowski, 1999; Ampoorter, van Nevel, de Vos, Hermy, & Verheyen, 2010). Deze veranderingen in de bodemstructuur hebben een aantal negatieve gevolgen voor de lucht- en waterhuishouding van de bodem (zie figuur 1).

Wanneer de bodembulkdensiteit toeneemt (en ruimte tussen bodemporiën afneemt) vermindert de snelheid van waterinfiltratie. Dit komt door de afname van macroporiën die het water helpen infiltreren. Infiltratiesnelheden kunnen met 90% afnemen van 11.4 cm per uur bij onverstoorde bodems tot 1.1 cm per uur in wielsporen (Dickerson, 1976). Een belangrijke consequentie van de verlaagde waterinfiltratiesnelheid is een verhoogde hoeveelheid water die wegspoelt waardoor de bodem uitdroogt. Dit leidt vaak tot bodemerosie en het uitspoelen van nutriënten (Kang & Lal, 1981).

Ook de waterdoorlaatbaarheid neemt tot 80% af in verdichte bodems (Benthaus & Matthies 1993 in Ampoorter 2011). In gezonde bodems stroomt het merendeel van het geïnfilterde water via kanalen van macroporiën naar diepere bodemlagen tot het water het grondwaterniveau bereikt. Een klein deel van het water blijft achter in de microporiën en blijft beschikbaar voor absorptie door plantenwortels. De macroporiën zijn daarna weer met gevuld met lucht waar gasuitwisseling plaatsvindt met de atmosfeer. De consequentie van een verlaagde waterdoorlaatbaarheid is dat de

bodem langer verzadigd blijft met water waardoor gaswisseling tussen de bodem en atmosfeer gehinderd wordt (Kozłowski, 1999). Ondanks dat er dus minder water infiltreert in verdichte bodems zijn verdichte bodems dus langer verzadigd met water. Normaal gesproken wordt de zuurstof die wordt opgenomen tijdens wortelrespiratie aangevuld vanuit de bovengrondse atmosfeer door middel van diffusie. Deze gasuitwisseling wordt verhinderd wanneer er bodemverdichting heeft plaatsgevonden en de bodem verzadigd is met water. Zuurstof kan hierdoor minder goed de bodem binnendringen terwijl het gehalte CO₂ juist opbouwt door bacteriële activiteiten. Dit kan leiden tot een zuurstoftekort voor de wortels (Kozłowski, 1999). De kritische grens voor wortelademhaling is zo'n 10% luchtgevulde poriën (de Vos, 2005).

Bodemverdichting resulteert ook in een verhoogde penetratieweerstand. Penetratieweerstand is een maatstaf voor de weerstand die de bodem uitoefent op groeiende wortels. De penetratieweerstand neemt toe wanneer de bodemporositeit afneemt (Ampoorter, 2011). Volgens Aust et. al., (1998) kan de penetratieweerstand met 30 tot 50% toenemen als gevolg van machineverkeer.



Figuur 1. Effecten van bodemverdichting op bodemstructuur en lucht- en waterhuishouding.

3.2 Fysiologische reactie van planten op bodemverdichting

Planten zijn afhankelijk van voldoende water, minerale nutriënten, groeihormonen en koolhydraten om goed te kunnen functioneren. In deze paragraaf bekijken we de effecten van de veranderde bodemstructuur en veranderde lucht- en waterhuishouding als gevolg van bodemverdichting op het fysiologisch functioneren van een plant.

3.2.1 Hormonale groeiregulatoren

Bodemverdichting gaat onder andere samen met veranderingen in hormonale groeiregulatoren. Wanneer de wortels tijdens het groeien een hoge penetratieweerstand ondervinden worden de hormonen ABA en etheen aangemaakt (Tardieu, et al., 1992; Tardieu, 1994). Xyleem ABA is een wortel-naar-stam signaleringshormoon dat de stomata-activiteit beïnvloedt. Tardieu, et al. (1992) laten zien dat ABA de gasuitwisseling in planten controleert. Etheen beïnvloedt de wortelgroei. Etheen is een stresshormoon dat wordt aangemaakt wanneer een plant hoge penetratieweerstand

ondervindt. Verhoogde concentraties etheen verhinderen de celverlenging en leidt tot meer breedtegroei van de wortels (Ruzicka, et al., 2007). Deze verminderde celverlenging zorgt ervoor dat de wortels minder ver de bodem in groeien en als gevolg minder water en nutriënten kunnen opnemen.

3.2.2 Waterrelaties

Waterabsorptie van planten is vaak verminderd met verhoogde intensiteit van bodemverdichting (Sheriff & Nambiar, 1995). Eén oorzaak hiervan is de verminderde wortelgroei als gevolg van hoge penetratieweerstanden waardoor een plant minder water kan opnemen. Ook de verminderde waterinfiltratie en waterstromen zorgen ervoor dat er minder water beschikbaar is voor absorptie van plantenwortels. Wanneer de hoeveelheid water die in de wortels geabsorbeerd wordt lager is dan de hoeveelheid water die verdampt wordt door de bladeren, leidt dit op de lange termijn tot watertekorten in de plant.

3.2.3 Mineralen

Bodemverdichting heeft een negatieve invloed op de absorptie van mineralen in het wortelstelsel van de plant. Uitspoeling van nutriënten, verminderde wortelgroei door de verhoogde penetratieweerstand en verlaagde opnamecapaciteit door gebrek aan zuurstof leiden allemaal tot verminderde opname van belangrijke mineralen zoals stikstof (N), fosfaat (P) en kalium (K) (Wolkowski, 1990; Torbert & Wood, 1992).

De verlaagde hoeveelheid zuurstof in de bodem als gevolg van bodemverdichting leidt tot verminderde beschikbaarheid van nutriënten. Het lage zuurstofgehalte remt de hoeveelheid aerobe microbiologische activiteit en verhoogt denitrificatie. Tijdens denitrificatie worden nitraat (NO_3) en nitriet (NO_2) omgezet naar distikstofmonoxide (N_2O) en stikstof (N_2). De stikstof gaat als gas verloren in de atmosfeer waardoor deze niet beschikbaar is voor de plant (Torbert & Wood, 1992). Bovendien leidt de verlaagde hoeveelheid zuurstof in de bodem tot verminderde opname van nutriënten. De absorptie van minerale nutriënten door een plant vergt actief transport. Actief transport kost energie waar verbranding van zuurstof voor nodig is. Met minder beschikbare zuurstof in de bodem kunnen planten dus minder nutriënten opnemen uit de bodem (Kozlowski, 1999).

Tot slot wordt de opname van nutriënten verminderd door de geremde wortelgroei als gevolg van de verhoogde penetratieweerstand. Doordat de wortels zijn geremd tijdens hun groei hebben ze een minder groot oppervlak waarmee nutriënten kunnen worden opgenomen in vergelijking met wortels die in onverstoorde bodems hebben kunnen groeien (Wolkowski, 1990).

3.2.4 Fotosynthese

Watertekorten en beschikbare mineralen zijn beide van invloed op de fotosynthetische activiteit van een plant (Kozlowski 1999). Wanneer een plant vanwege watertekort zijn stomata sluit heeft dit een remmend effect op de fotosynthese activiteit. Door het sluiten van de stomata kan namelijk de CO_2 die nodig is voor fotosynthese minder goed worden opgenomen in het mesophyll waar de fotosynthese plaatsvindt. Tijdens fotosynthese worden koolstofdioxide (CO_2) en water (H_2O) omgezet in suiker ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) en zuurstof (O_2). Verminderde fotosynthese leidt dus tot minder aanmaak van suikers die nodig zijn als energiebron voor de groei van een plant.

Bovendien is fotosynthese in planten die groeien in verdichte bodems vaak gerelateerd aan de beschikbare minerale nutriënten. Verschillende nutriënten hebben verschillende remmende effecten op de fotosynthese. Hiervoor verwijs ik naar (Kozłowski & Pallardy 1997a, in Kozłowski 1999).

3.3 Effecten op verjonging en boomgroei

Bodemverdichting heeft een negatief effect op de groei van planten door een combinatie van bovengenoemde veranderingen in de lucht- en waterhuishouding en de fysiologische processen in de plant. Deze paragraaf gaat dieper in op de langetermijngevolgen van deze factoren op bosverjonging en boomgroei.

3.3.1 Verjonging

Verschillende studies zijn uitgevoerd naar de effecten van bodemverdichting op verjonging (onder andere Youngberg, 1959; Froehlich H. A., 1979; Heninger, et al., 2002; Bassett, Simcock, & Mitchell, 2005). Hierbij is onder andere gekeken naar het kiemsucces op verdichte bodems in vergelijking met het kiemsucces op niet bereden of verdichte bodems.

Kiemsucces

Het kiemsucces van verjonging is gelijk of beter op verdichte bodems dan op onbereden bodems (Foil & Ralston 1957; Pomeroy, 1949). Foil & Ralston (1957) vonden dat het bodemtype (zand, leem of klei) en de mate van verdichting geen invloed had op het aantal ontkiemde zaden. Pomeroy (1949) vond dat het kiemsucces significant beter was op bereden grond dan op een onverstoorde humus laag. Volgens Pomeroy (1949) wordt het kiemsucces vooral bepaald door de capaciteit van het zaad om water op te nemen van de bodem waarmee deze in contact staat. De bereden bodem bleek beter voor het ontkiemen dan de onverstoorde humuslaag doordat de zaden in direct contact stonden met de bodem.

Overlevingspercentage

Voor wat betreft het overlevingspercentage van zaailingen op verdichte bodems in vergelijking met onverdichte bodems komen tegenstrijdige bevindingen naar voren. Youngberg (1959) en Heninger, et al., (2002) toonden aan dat het overlevingspercentage zaailingen op door tractor bereden bodems gelijk of beter was op dan op aangrenzend bos. Daarentegen vonden Foil & Ralston (1957), Wert & Thomas (1981) en Lockaby & Vidrine (1984) een negatieve correlatie tussen zaailing-overlevingspercentage en toenemende bodemverdichting.

Deze tegenstrijdigheid is mogelijk te verklaren door het verschil tussen aangeplante zaailingen en natuurlijk verjongde zaailingen. Zowel (Youngberg, 1959) als (Heninger, et al., 2002) die een hoger overlevingspercentage aantreffen op verdichte bodems hebben gekeken naar aangeplante zaailingen. Daarentegen keken Foil & Ralston (1957), Wert & Thomas (1981) en Lockaby & Vidrine (1984) naar natuurlijk verjongde zaailingen. Zij toonden een vermindering in overlevingssucces van 40 tot 90% aan voor zaailingen op verdichte bodems vergeleken met zaailingen op onverdichte bodems. De onderzoeksperiodes varieerden van 30 dagen tot vier jaar. Foil & Ralston (1957) constateerden dat de meeste sterfte plaatsvond binnen 30 dagen doordat de kiemplantjes niet in staat waren om met hun wortels de verdichte bodems te penetreren. Wanneer zaailingen worden aangeplant speelt deze initiële wortelpenetratie geen rol.

Bovendien speelt bodemtype mogelijk een rol voor het overlevingspercentage van zaailingen. Pomeroy (1949) vond dat op bereden kleibodems het overlevingspercentage lager lag dan op zand-

en leembodems. Alleen op kleibodems stierven de zaailingen significant meer in vergelijking met onverstoorde bodems. Ook hier was de verklaring dat de zaailingen de bodem niet konden penetreren. Foil & Ralston (1957) kwamen tot een gelijke conclusie dat er meer sterfte van zaailingen plaatsvond op kleibodems dan op leem- en leemzandbodems. Echter, zij vonden ook op de leem- en leemzandbodems significant hogere sterfte van zaailingen op verdichte bodems vergeleken met onbereden bodems.

Tot slot suggereren de bevindingen van Bassett, Simcock, & Mitchell (2005) dat het overlevingspercentage van zaailingen soortafhankelijk is. Zij vonden dat het overlevingspercentage van *C. australis* zaailingen met 70% afnam op verdichte bodems (1.24MPa) in vergelijking met niet verdichte bodems, terwijl *L. scoparium* zaailingen een 60% hoger overlevingspercentage hadden op verdichte bodems dan op onverdichte bodems. De verklaring voor het onderlinge verschil was het verschil in worteldikte. Dikkere wortels zouden meer moeite hebben zich te vestigen en te groeien in verdichte bodems dan dunne wortels die makkelijker in kleine poriën kunnen groeien.

Zaailinggroei

Bodemverdichting heeft ongeacht het type zaailing (natuurlijk verjongd of aangeplant) een remmend effect op zaailinggroei (Foil & Ralston, 1957; Youngberg, 1959; Lockaby & Vidrine, 1984; Heninger, et al., 2002; Bassett, Simcock, & Mitchell, 2005). Zo vonden Lockaby & Vidrine (1984) dat na vijf jaar de hoogtegroe van Loblolly Pine zaailingen 39 tot 59% lager was op dunningspaden vergeleken met zaailinggroei op onverstoorde bodems. Hoogtegroe van Douglas-fir was na twee jaar 40% minder op met tractor bereden paden dan op onverstoorde bodems (Youngberg, 1959). Bovendien is aangetoond dat er significant verschil zit in de groei van zaailingen op dunningspaden, overgangszones en onverstoorde bodems (Youngberg, 1959; Lockaby & Vidrine, 1984). Youngberg (1959) vond een hoogtegroei toename van 35% van zaailingen in de berm van met tractor bereden paden in vergelijking met de groei van zaailingen op het dunningspad zelf. Echter, de groei in de berm was nog steeds 12% minder dan de groei van zaailingen op onverstoorde bodem. Wert & Thomas (1981) hadden gelijke bevindingen. Zij vonden 32 jaar na eindkap dat het aantal bomen en het volume van de bomen groeiend op dunningspaden significant minder was dan die van bomen groeiend in een overgangszone (tot 3m naast het dunningspad) of op onverstoorde bodems.

In verdichte bodems zijn er meerdere factoren aanwezig die zaailinggroei remmen. Welke factor de grootste invloed heeft op de groeiremming is afhankelijk van de omstandigheden. Tackett & Pearson (1964) vonden dat bij matig verdichte bodems zuurstofgebrek vaak de beperkende factor is voor wortelgroei. Bij sterkere mate van verdichting is de bodemweerstand de voornaamste belemmerde factor. Carmi et al. (1983) voegen daar aan toe dat wortelgroei in droge bodems vooral gehinderd wordt door de hoge penetratieweerstand, terwijl in natte bodems zuurstoftekorten een grotere rol spelen.

3.3.2 Boomgroei

De effecten van bodemverdichting zijn ook op de lange termijn aan het volume van jonge en volwassen bomen te meten. Zo zagen Wert & Thomas (1981) 32 jaar na een kaalkap dat de hoeveelheid bomen die groeide op de dunningspaden 33% minder was vergeleken met die van het aangrenzende bos. Heninger, et al. (2002) vonden dat de hoogtegroe van planten op dunningspaden vergeleken met die op enkel gekapte bodems na 10 jaar gemiddeld 10% minder was. Het gemiddelde volume van bomen op dunningspaden was 29% minder dan van bomen op onbereden bodems. Ook

Froehlich (1979) stelde vast dat bomen die waren opgegroeid op dunningspaden een lager volume hadden, tussen de 6 en 12%. Bij een vervolgstudie naar de groei van jonge *Pinus Ponderosa* en *Pinus Contorta* op verdichte bodems werden hoogte, diameter en volume gemeten. Hieruit bleek dat deze respectievelijk 5%, 8% en 20% waren minder waren dan die van bomen op onbereden bodems (Froehlich, Miles, & Robbins, 1986).

Wert & Thomas (1981) vonden echter ook dat bomen die het 32 jaar overleefd hadden op de dunningspaden een gelijke groeisnelheid hadden als bomen die groeiden op onverstoorde bodems. Heninger, et al. (2002) kwamen tot soortgelijke bevindingen. Dit suggereert dat zaailingen het meest worden geremd door de fysische bodemeigenschappen van verdichte bodems en dat bomen hier in latere levensstadia minder last van ondervinden.

3.4 Bodemherstel

De natuurlijke herstelperiode van verdichte bodems kan sterk variëren. Echter, over het algemeen is dit vastgesteld als een proces dat minstens enkele decennia duurt (ANB, 2014; Froehlich, Miles, & Robbins, 1985; Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008). Wert & Thomas (1981) vonden 32 jaar na een kaalkap nog op 25% van de opstand een zware verdichte bodem ($> 1.2 \text{ g/cm}^3$). Mitchell et al (1982) concludeerden dat bodemherstel, afhankelijk van het bodemtype, tot 60 jaar kan duren. Volgens het Agentschap voor Natuur en Bos (ANB) (2014) is bodemverdichting in sommige gevallen zelfs onomkeerbaar. Factoren die van invloed zijn op de natuurlijke herstelperiode van verdichte bodems zijn: aanwezige bodemfauna, klimaatsomstandigheden, bodemtype en bodemlaag (ANB, 2014).

De aanwezigheid van bodemfauna is belangrijk voor het natuurlijk herstelproces van verdichte bodems. Voornamelijk regenwormen kunnen het herstelproces versnellen door het graven van gangenstelsels waardoor het gehalte macroporiën van de bodem toeneemt (Kozłowski, 1999). Ook vriezen en dooien werkt de bodem los. Water dat bevriest zet zich uit en oefent daarbij een grote kracht uit op alles wat in de weg zit waardoor de bodem uitzet. Echter, het moet wel lange tijd achter elkaar vriezen, zodat de grond tot op grote diepte bevriest. In Nederland komt dit niet of nauwelijks voor (ANB, 2014).

Verder is het bodemtype van invloed op de duur van natuurlijk herstel. Klei- en leembodems worden over het algemeen kwetsbaarder geacht voor bodemverdichting dan zandbodems (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008). Echter, door het rijke bodemleven en het zwel-/krimpproces dat optreedt in deze bodemtypes herstellen deze ook relatief snel. Daarentegen is dit proces bij zandbodems praktisch afwezig waardoor herstel trager verloopt (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008).

Tot slot is gebleken dat bodemherstel voor verschillende bodemlagen met verschillende snelheden plaatsvindt. Wert & Thomas (1981) vonden dat de bodemlaag tot 15 cm diep goed herstel vertoonde binnen 32 jaar, maar dat de lager gelegen bodemlagen nog steeds verdicht waren. Froehlich, Miles, & Robbins (1985) kwamen tot een soortgelijke conclusie dat de bovenste bodemlaag herstel vertoonde binnen een tijdsperiode van 25 jaar, maar dat de dieper gelegen bodemlagen (15-30cm) weinig herstel hadden doorgemaakt. Greacen & Sands (1980) beweren dat bodemverdichting in diep gelegen bodemlagen 50 tot 100 jaar kan voortbestaan.

3.5 Conclusie

Dit hoofdstuk was gewijd aan de onderzoeksvraag: Wat zijn de ecologische effecten van bodemverdichting? Zoals gebleken is, is er een reeks aan effecten die over de tijd verspreid zijn. Hieronder worden deze effecten samengevat.

Effecten van bodemverdichting op bodemstructuur en lucht- en waterhuishouding:

- Het gehalte luchtbehoudende macroporiën is lager in verdichte bodems (50-60%).
- Het gehalte waterbevattende microporiën is hoger in verdichte bodems.
- Bodemverdichting resulteert in verhoogde bulkdensiteit, afname van bodemporositeit, een verhoogde penetratieweerstand en afbraak van aggregaten.
- Verdichte bodems hebben een vertraagde waterinfiltratie, verminderde waterdoorlaatbaarheid, verhoogde wegspoeling van water en nutriënten.
- Gasuitwisseling in verdichte bodems wordt verhinderd wat leidt tot een afname van het O₂-gehalte en toename van het CO₂-gehalte in de bodem.

Effecten van bodemverdichting op het fysiologisch functioneren van een plant:

- Planten die groeien op verdichte bodems hebben vaak last van watertekorten, geremde wortelgroei, verminderde absorptie van mineralen en verminderde fotosynthese-activiteit.

Effecten van bodemverdichting op verjonging:

- Het kiemsucces van zaailingen wordt niet beïnvloed door bodemtype of verdichtingsgraad.
- Het overlevingspercentage van natuurlijk verjongde zaailingen op verdichte bodems is aanzienlijk lager (40-90%) dan op onverdichte bodems doordat veel zaailingen niet in staat zijn de bodem te penetreren.
- Het overlevingspercentage van geplante zaailingen op verdichte bodems is gelijk of hoger op bereiden bodems.
- Groei wordt zowel voor natuurlijke als geplante zaailingen geremd door een verhoogde penetratieweerstand en watertekorten. Dit leidt tot hoogtegroeiverminderingen van 30 tot 50% in de eerste vier jaar.
- Effecten van bodemverdichting op verjonging zijn moeilijk te generaliseren. De effecten verschillen namelijk per bodemtype, plantensoort en andere klimaatsomstandigheden.

Effecten van bodemverdichting op boomgroei:

- Bomen op dunningspaden hebben gemiddeld 20 tot 30% minder volume dan bomen op onverstoorde bodems.
- Zowel voor bomen- als voor zaailingengroei geldt: groei op dunningspaden < groei op overgangszones < groei op onverstoorde bodems.
- Bodemverdichting heeft vooral invloed op zaailingen en jonge bomen. Bij een bepaalde leeftijd-hoogte combinatie groeien bomen op dunningspaden net zo snel als op onverstoorde bodems.

Natuurlijke herstelperiode van verdichte bodems:

- Duurt minimaal enkele decennia, maar in sommige gevallen is natuurlijk herstel afwezig.

- Aanwezigheid van bodemfauna bevordert het natuurlijk herstel.
- Langdurig vriezen kan een bodem loswerken. Dit komt in Nederland niet of nauwelijks voor.
- Klei- en leembodems zijn meestal rijker aan bodemfauna en gevoeliger voor zwel-/krimpprocessen dan zandbodems waardoor herstel op deze bodemtypes sneller verloopt.
- Ondiepe bodemlagen (0-15cm) herstellen binnen enkele decennia. Voor dieper gelegen bodemlagen duurt dit meestal langer 50-100 jaar.

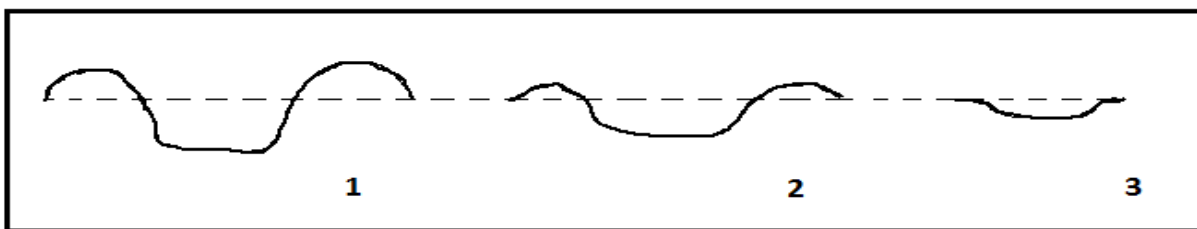
4. Factoren bepalend voor de mate van bodemverdichting

Dit hoofdstuk heeft als doel om inzicht te verwerven in de factoren die van invloed zijn op de mate van bodemverdichting bij gemechaniseerde houtoogst. Eerst wordt het effect van uitgeoefende druk op de mate van insporing behandeld in paragraaf 3.1. Daarna worden in paragraaf 3.2 de invloeden van het bodemtype en bodemvochtgehalte op de mate van verdichting besproken. Vervolgens gaat paragraaf 3.3 in op de relatie tussen mate van bodemverdichting en intensiteit van het berijden van de bodem. Tot slot worden de gevonden resultaten samengevat in paragraaf 3.5, de conclusie.

4.1 Contactdruk & insporing

Wanneer zware machines door het bos rijden worden er grote krachten uitgeoefend op de bosbodem wat leidt tot insporing. Met toenemende contactdruk neemt insporing toe (Ampoorter, 2011). De uitgeoefende druk wordt uitgedrukt in kg per cm². Dit is een ratio tussen gewicht van de machine en het contactoppervlak van de wielen. Contactdruk is negatief gecorreleerd aan het aantal wielen en de bandbreedte, en is positief gecorreleerd aan de bandendruk (McDonald, Way, Löfgren, & Seixas, 1996). Een lichte machine met kleine dunne banden kan dus een gelijke contactdruk hebben als een zware machine op grote brede banden.

De uitgeoefende druk op de bodem bestaat uit een verticale druk en een horizontale druk (ANB, 2014; Ampoorter, 2011). De verticale druk zorgt ervoor dat de bodemdeeltjes dichter op elkaar worden gedrukt met bodemverdichting als gevolg. De horizontale druk resulteert in bodemvervorming, opstuwing van de bodem. Dit is zichtbaar als heuveltjes aan de randen van de sporen. Insporing is dus een combinatie van bodemverdichting en opstuwing van de bodem.



Figuur 2: Drie types insporing. Insporing type 1 is het gevolg van bodemvervorming, type 2 is een combinatie van bodemverdichting en bodemvervorming, type 3 is enkel het gevolg van bodemverdichting. Dit figuur is gebaseerd op de figuur van Abeels (1989) in Ampoorter (2011).

Williamson & Neilsen (2000) en Abeels (1989) maken onderscheid tussen 3 typen sporen (zie figuur 2). Bij type 1 wordt alle bodemdruk omgezet in horizontale druk met als resultaat opstuwing van de bodem. Het gevolg is diepe sporen met grote zijheuvels. De inhoud van de zijheuvels is in dit geval gelijk aan inhoud van het spoor. Er vindt bij dit type geen bodemverdichting plaats. Ondanks dat er geen bodemverdichting plaatsvindt onder deze omstandigheden wordt de bodem wel beschadigd doordat bodemporiën worden afgesloten en de poriëncontinuïteit wordt verstoord. Bij type 2 wordt een deel van de druk van de machine omgezet in verdichting van de bodem en een deel wordt zijwaartse druk waardoor er opstuwing plaatsvindt. In deze situatie zijn er kleine zijheuvels waarvan de inhoud niet gelijk is aan de inhoud van het spoor. De sporen zijn minder diep dan bij type 1, maar

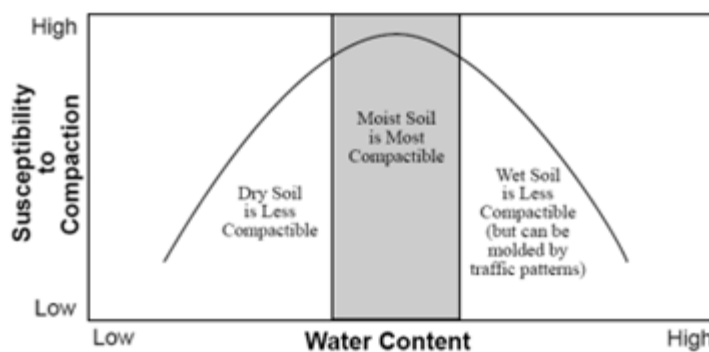
er vindt wel maximale verdichting plaats. Bij type 3 wordt alle druk van de machine omgezet in verdichting en vindt er geen opstuwing plaats. In deze situatie zijn er geen zijheuvels, enkel indeuking van de bodem. De sporen zijn echter ondiep en er vindt minimale bodemverdichting plaats. De mate van bodemverdichting is dus afhankelijk van de contactdruk en het type insporing dat er optreedt.

4.2 Bodemtextuur en bodemvochtgehalte

Het type insporing dat optreedt wanneer er een machine over de bodem rijdt is voornamelijk afhankelijk van de bodemtextuur in combinatie met het vochtgehalte van de bodem (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Hermy, & Verheyen, 2010). Hierbij wordt er onderscheid gemaakt tussen medium- tot fijne bodemtypes (leem en klei) en grove bodemtypes (zand).

4.2.1 Medium en fijne bodemtypes

De figuur van Kok et al. (1996) geeft de relatie tussen vochtgehalte en gevoeligheid voor bodemverdichting weer voor medium en fijne bodemtypes. Hierin is te zien dat onder droge omstandigheden medium en fijne bodemtypes nauwelijks kwetsbaar zijn voor bodemverdichting. Dit komt doordat onder droge omstandigheden de gevoeligheid van bodems voor verdichting enkel bepaald wordt door de bodemtextuur. Leem- en kleibodems zijn voornamelijk opgebouwd uit dunne plaatjes en blokjes (ANB, 2014). Deze textuur van klei- en leembodems zorgt ervoor dat deze onder droge omstandigheden nauwelijks samen te drukken zijn en ze zijn daarom nauwelijks kwetsbaar voor verdichting. In droge omstandigheden geldt: hoe fijner de textuur van de bodem, des te meer kracht een bodem kan weerstaan zonder in te geven en des te minder gevoelig een bodem is voor bodemverdichting (Ampoorter, 2011; ANB, 2014). Berijden van droge klei- en leembodems resulteert in insporing type 3 waarbij minimale verdichting optreedt.



Figuur 3: Kwalitatief verband tussen het bodemvochtgehalte en de gevoeligheid van medium en fijne bodemtexturen voor verdichting (Kok et al., 1996).

Vochtige leem- en kleibodems zijn daarentegen zeer kwetsbaar voor verdichting. Wanneer water zich tussen de fijne structuur van klei- en leembodems bevindt wordt de cohesie tussen de bodemdeeltjes zwak, wat de bodem gevoelig maakt voor een combinatie van verdichting en bodemvervorming (Ampoorter, 2011; ANB, 2014). Berijden van vochtige klei- en leembodems resulteert in insporing type 2 waarbij maximale verdichting plaatsvindt.

Natte leem- en kleibodems zijn niet of nauwelijks te verdichten. Dit komt doordat het poriënvolume van medium en fijne bodemtypes makkelijk water vasthoudt. Water is niet samen te drukken, dus wanneer alle poriën gevuld zijn met water is bodemverdichting niet mogelijk. De contactdruk van machines wordt op natte medium- en fijne bodemtypes omgezet in zijwaartse druk waardoor er

bodemverplaatsing optreedt (Ampoorter, 2011; ANB, 2014). Berijden van natte klei- en leembodems resulteert in insporing type 1 waarbij geen verdichting optreedt maar de bodem wel wordt beschadigd.

4.2.2 Grove bodemtypes

Grove bodemtypes zoals zandbodems hebben een ander verband met het vochtgehalte en gevoeligheid voor bodemverdichting. De textuur van zandbodems is grof met veel ruimte tussen de korrels. Onder droge omstandigheden zijn zandbodems gevoelig voor verdichting en verplaatsing. Dit komt doordat zandbodems onder deze omstandigheden enkel bij elkaar gehouden worden door de wrijvingskracht tussen de zandkorrels. Het berijden van droge zandbodems resulteert in insporing type 1 en soms type 2 (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Hermy, & Verheyen, 2010).

Vochtige zandbodems daarentegen kunnen juist veel druk weerstaan. Bij vochtige zandbodems zijn de zandkorrels omringd met een dun laagje water. Watermoleculen trekken elkaar onderling aan door middel van cohesie (WeeBee, 2015). Het optimale vochtgehalte van zandbodems om bodemdruk te weerstaan is 12% (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Hermy, & Verheyen, 2010). Bodemverdichting bij zandbodems onder deze omstandigheden is minimaal en berijden van dit type zandbodems resulteert in insporing type 3 met minimale bodemverdichting.

Wanneer het vochtgehalte van zandbodems hoger wordt dan 12% dan wordt de onderlinge aantrekkingskracht van de bodemdeeltjes minder en worden zandbodems gevoeliger voor verdichting en verplaatsing (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Hermy, & Verheyen, 2010). In tegenstelling tot de fijne bodemtypes is zand nog wel kwetsbaar voor verdichting bij natte omstandigheden. Dit komt doordat er veel grote poriën zitten tussen zandkorrels waar water niet in kan worden vastgehouden. Zandbodems raken dus niet verzadigd met water, maar blijven voor een deel gevuld met lucht (Fisher & Binkley, 2000). Deze met lucht gevulde poriën zijn kwetsbaar voor verdichting. Berijden van natte zandbodems resulteert in insporing type 2 met maximale verdichting.

Tabel 1. Verband tussen bodemtype en bodemvochtgehalte in relatie tot het type insporing.

	Droog	Vochtig	Nat
Klei- & leembodems	Type 3	Type 2	Type 1
Zandbodems	Type 1 & (2)	Type 3	Type 2

4.3 Intensiteit van berijden

Tijdens de eerste passage van een machine over de bosbodem treedt gemiddeld al 62% van de verdichting in de bovenste 10cm op (Williamson & Neilsen, 2000). Echter, reeds verdichte bodems zijn moeilijk nog verder samen te drukken. Een reeds verdichte bodem heeft dus een verhoogde weerstand voor verdere verdichting. De intensiteit van het berijden van de bosbodem is dus logaritmisch gecorreleerd met de mate van bodemverdichting (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Hermy, & Verheyen, 2010).

4.4 Conclusie

Dit hoofdstuk richtte zich op de factoren die de mate van bodemverdichting beïnvloeden. Zoals is gebleken zijn er een aantal factoren die hierop van invloed zijn. Deze factoren zullen hieronder worden samengevat.

Invloed van uitgeoefende druk op insporing:

- Contactdruk (kg/ cm²) is negatief gecorreleerd met aantal wielen en bandbreedte, en is positief gecorreleerd met bandenspanning.
- Hoe hoger de uitgeoefende contactdruk (kg/ cm²) des te dieper de insporing.
- Er bestaan 3 typen van insporing: type 1 is het gevolg van enkel bodemverplaatsing, type 2 is het gevolg van een combinatie van bodemverdichting en bodemverplaatsing en type 3 is enkel het effect van bodemverdichting.

Invloed van type insporing op mate van bodemverdichting:

- De meeste bodemverdichting vindt plaats bij insporingstype 2 en 3.
- Insporing type 2 komt voor op vochtige klei- en leembodems en zandbodems met een vochtgehalte groter dan 12%
- Insporing type 3 komt voor op droge klei- en leembodems en vochtige zandbodems rond een vochtgehalte van 12%.

Invloed van intensiteit van berijden van de bodem op bodemverdichting:

- Intensiteit van berijden van de bodem is logaritmisches gecorreleerd aan de mate van bodemverdichting. De meeste verdichting treedt reeds op bij de eerste passage, daarna wordt het steeds lastiger om de bodem verder te verdichten.

5. Financieel inzicht in dunningspaden

Dit hoofdstuk heeft als doel om inzicht te verwerven in de financiële effecten van het gebruik van dunningspaden. Om hier een uitspraak over te kunnen doen worden er twee fictieve opstanden met elkaar vergeleken: één opstand zonder dunningspaden en één opstand met dunningspaden. De opbrengsten van beide scenario's worden vervolgens voor twee opeenvolgende generaties berekend en met elkaar vergeleken. De berekeningen zijn gemaakt op basis van een versimpeld model. De aannames die van invloed zijn geweest op de uitkomsten worden besproken in paragraaf 5.4, evenals factoren die niet zijn meegenomen in de berekeningen. Tot slot worden de conclusies gepresenteerd in paragraaf 5.5.

5.1 Uitgangspunten rekenmodel

De uitgangspunten van het rekenmodel dat wordt gebruikt in dit hoofdstuk staan hieronder weergegeven in tabel 1. In de tekst zullen deze uitgangspunten nader worden toegelicht.

Tabel 2. Modeluitgangspunten

Rekenmodeluitgangspunten
Oppervlakte opstand: 1 hectare
Doeldiameter: 45cm
Generatie 1 percentage verdichte bodem: 0%
Generatie 2 percentage verdichte bodem controlescenario: 80%
Generatie 2 percentage verdichte bodem dunningspadenscenario: 20%
Boomgroei op onverdichte bodem: groeiklasse 10
Boomgroei op verdichte bodem: groeiklasse 8
Overlevingspercentage zaailingen op verdichte bodem: 35%
Hoogte-leeftijd grens waarna bomen geen groeihinder meer ondervinden van verdichte bodems: jaar 25
Klepelen resulteert in natuurlijke verjongingsaantallen gelijk aan de stamtallen van generatie 1
Rente: 1,5%
Alle opbrengsten zijn exclusief kosten bleswerk, aanbesteding, controle en begeleiding van de werkzaamheden

5.2 Eerste generatie

Het doel van het werken met twee generaties is om de langetermijneffecten van het wel of niet werken met dunningspaden in kaart te brengen. In de eerste generatie is er vanuit gegaan dat er in jaar nul nog geen verdichting heeft plaatsgevonden. Echter, gedurende de eerste generatie zal een deel van de bodem bereden worden en als gevolg verdicht raken. In paragraaf 5.2.1 wordt de controle-opstand zonder gebruik van dunningspaden beschreven en worden de opbrengsten voor dit scenario berekend. Paragraaf 5.5.2 beschrijft vervolgens de opstand met het gebruik van dunningspaden en ook hier worden de opbrengsten van berekend.

5.2.1 Controle-opstand

De controle-opstand is een fictive opstand waarvan de dunningsvolumes met bijbehorende diameter door de tijd bekend zijn. In de controle-opstand is geen gebruik gemaakt van dunningspaden en dient daarmee als referentiepunt om een uitspraak te kunnen doen over de kosten en opbrengsten van een opstand die wel gebruik maakt van dunningspaden.

Voor dit onderzoek is er als controle-opstand gekozen voor een grove den opstand van één hectare. Grove den is gekozen als modelboomsoort, omdat dit de meest voorkomende soort is in Nederland (Dirkse, Daamen, Schoonderwoerd, & Paasman, 2003). De controle-opstand is gebaseerd op de opbrengsttabellen van Jansen, Sevenster, & Faber (1996) (zie bijlage 5.1). Uit de opbrengsttabel grove den (groeiklasse 10) zijn de dunningvolumes (V_d) en de bijbehorende dunningdiameter (D_d) overgenomen (zie tabel 3). Als doeldiameter is er gekozen voor een diameter van 45cm. Met deze doeldiameter vindt de eindkap plaats rond jaar 100.

Tijdens opeenvolgende houtoogsten vindt er door het machineverkeer bodemverdichting plaats. Zonder gebruik van dunningspaden wordt het machineverkeer niet gecontroleerd en is na afloop van de eerste generatie circa 80% van de bodem bereiden en verdicht (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008). Bodemverdichting is negatief gecorreleerd aan het overlevingspercentage zaailingen en de groei van jonge bomen (zie onder andere Youngberg, 1959; Froehlich H. A., 1979; Heninger, et al., 2002; Bassett, Simcock, & Mitchell, 2005; Wert & Thomas 1981). Wanneer er een bepaalde hoogte-leeftijd combinatie is bereikt heeft bodemverdichting geen effect meer op de groeisnelheid (Wert & Thomas, 1981). De eerste dunning vindt plaats in jaar 25. Er wordt aangenomen dat met 25 jaar de hoogte-leeftijd combinatie is bereikt waarop bodemverdichting geen effect meer heeft op groeisnelheid. De bomen die opgroeien in de eerste generatie ondervinden dus geen groeiremming.

Met behulp van de bekende dunningvolumes uit de opbrengsttabellen en de bijbehorende diameters zijn de opbrengsten van elke dunning geschat. Om de opbrengten van een dunning te berekenen is er gebruik gemaakt van vijf diameterklassen met voor elke klasse een vaste houtwaarde per kubieke meter (zie tabel 2) (M. Bruggemans, persoonlijke communicatie, 24 oktober 2015). De vijf diameterklassen zijn: 0-10cm (klasse 0), 10-20cm (klasse 1), 20-30cm (klasse 2), 30-40cm (klasse 3) en 40-50cm (klasse 4).

Tabel 3. Houtwaardes op stam per m3 per diameterklasse (M. Bruggemans, persoonlijke communicatie, 24 oktober 2015)

Diameterklasse	Waarde op stam (m ³)
0 (0-10 cm)	€ 2,00
1 (10-20 cm)	€ 15,00
2 (20-30 cm)	€ 30,00
3 (30-40 cm)	€ 35,00
4 (40-50 cm)	€ 40,00

De opbrengst van een dunning op tijdstip t (O_t) is berekend door het volume van de dunning te vermenigvuldigen met de bijbehorende waarde op stam voor de gegeven diameterklasse (zie formule 1).

$$1) O_t = V_d * \text{Waarde op stam (m}^3\text{)}$$

Echter, het berekenen van de totale opbrengst kunnen de opbrengsten van de afzonderlijke dunningen niet zomaar bij elkaar opgeteld worden. Dit komt doordat deze opbrengsten op verschillende tijdstippen worden behaald en hier rente over berekend moet worden. Om de opbrengsten bij elkaar op te mogen tellen is het dus nodig om alle opbrengsten naar één tijdstip om te rekenen. In dit geval is er gekozen om alle opbrengsten door te rekenen naar hun eindwaarde op het tijdstip van de eindkap (jaar 100). De opbrengst van een dunning in jaar 20 heeft in dit geval dus nog 80 jaar de tijd om rente te ontvangen. Het berekenen van de huidige waarde naar de waarde op een moment in de toekomst wordt rente- of eindwaardeberekening genoemd (Renaud & de Keijzer, 2013). De eindwaarde kan als volgt worden berekend (Renaud & de Keijzer, 2013) (formule 2):

$$2) V_n = (1+i)^n * V_0$$

V_n = eindwaarde

i = rente

n = aantal jaren

V_0 = huidige waarde

Bij het berekenen van de eindwaarde is de gekozen rente van belang. Voor de berekeningen in dit onderzoek is er gewerkt met een rente van 1,5% wat valt binnen de marges van de huidige rentestanden (Actuelerentestanden, 2015). Met alle opbrengsten omgerekend naar één tijdstip kunnen deze worden opgeteld en kan de totale opbrengst op het moment van de eindkap worden berekend. In tabel 3 is te zien dat bij de controle-opstand er een totale opbrengst van € 31.938 wordt behaald.

Tabel 4. Opbrengsten houtoogst van de controle-opstand bij de eerste generatie

G1. Controle Scenario						
t	D_d	V_d	O_t		O_{t100}	
25	8,5	34	€	68	€	208
30	10,7	38	€	570	€	1.616
35	13,1	40	€	600	€	1.579
40	15,6	40	€	600	€	1.466
45	18	39	€	585	€	1.327
50	20,4	36	€	1.080	€	2.274
55	22,7	33	€	990	€	1.935
60	24,9	30	€	900	€	1.633
65	26,8	27	€	810	€	1.364
70	28,7	23	€	690	€	1.079
75	30,3	20	€	700	€	1.016
80	31,7	18	€	630	€	849
85	33	15	€	525	€	656
90	34,2	13	€	455	€	528
95	35,3	13	€	455	€	490
100	45,6	348	€	13.920	€	13.920
					Totaal	€ 31.938

5.2.2 Opstand met dunningspaden

Voor de opstand met dunningspaden zijn alle factoren gelijk gehouden met die van de controle-opstand behalve dat er dunningspaden worden gebruikt. Het aanleggen van dunningspaden is de eerste ingreep die beheerders doen en is daarmee gelijk de eerste dunning. De dunningspaden in deze fictieve opstand worden in jaar 25 aangelegd. De afstand waarop de paden van elkaar worden gelegd bedraagt 20 meter van hart tot hart en de paden zijn 4 meter breed. Met deze onderlinge afstand en breedte nemen de dunningspaden 20% van het oppervlak van de opstand in beslag. Het doel van het gebruik van dunningspaden is om het machineverkeer tijdens houtoogst te concentreren, zodat bodemverdichting tot de paden beperkt blijft. Als gevolg is na afloop van de eerste generatie in dit scenario 20% van de bodem verdicht. Ook hier geldt dat bodemverdichting die optreedt tijdens deze generatie nog geen effect heeft op de boomgroei.

Wanneer er vanuit gegaan wordt dat de bomen gelijk verdeeld staan wordt met het aanleggen van de dunningspaden 20% van het huidige volume gedund. In de controle-opstand werd bij de eerste dunning 23% van het totale volume gedund (zie bijlage 5.1). Het volume dat in dit scenario in jaar 25 minder wordt gedund, wordt in jaar 30 extra gedund (zie tabel 4). Aangezien de opstand een gelijkjarig monocultuurbos is, is er vanuit gegaan dat het bessen van de dunningspaden geen extra tijd in beslag neemt vergeleken met het bessen van de reguliere dunning in de controle-opstand. Er zijn daarom geen extra kosten verbonden aan het aanleggen van de dunningspaden. De totale opbrengst voor het dunningspadenscenario bedraagt € 32.048 en is daarmee praktisch gelijk aan de opbrengsten van de controle-opstand. Het verschil in opbrengsten tussen de controle-opstand en deze opstand is <1%.

Tabel 5. Opbrengsten houtoogst van de opstand met dunningspaden bij de eerste generatie

G1. Dunningspaden Scenario							
t	D_d	V_d	O_t		O_{t100}		
25	8,5	30	€	60	€	183	
30	10,7	42	€	630	€	1.786	
35	13,1	40	€	600	€	1.579	
40	15,6	40	€	600	€	1.466	
45	18	39	€	585	€	1.327	
50	20,4	36	€	1.080	€	2.274	
55	22,7	33	€	990	€	1.935	
60	24,9	30	€	900	€	1.633	
65	26,8	27	€	810	€	1.364	
70	28,7	23	€	690	€	1.079	
75	30,3	20	€	700	€	1.016	
80	31,7	18	€	630	€	849	
85	33	15	€	525	€	656	
90	34,2	13	€	455	€	528	
95	35,3	13	€	455	€	490	
100	45,6	348	€	13.920	€	13.920	
Totaal						€	32.084

5.3 Generatie 2

In de eerste generatie was er in jaar nul nog geen sprake van verdichting en had de verdichting die gedurende die generatie ontstond nog geen effect op de boomgroei. Echter, na afloop van de eerste generatie is in de controle-opstand 80% van de bodem verdicht en in de opstand met dunningspaden is 20% van de bodem verdicht. De gevolgen voor de boomgroei van het wel of niet werken met dunningspaden zal daarom in deze tweede generatie tot uiting komen. In paragraaf 5.3.1 worden de opbrengsten voor de controle-opstand berekend en in paragraaf 5.3.2 de opbrengsten van de opstand met dunningspaden.

5.3.1 Controle-opstand

In de controle-opstand is 80% van de bodem verdicht en 20% van de bodem is niet verdicht. Verdichte bodems zijn lastig te penetreren door de wortels van zaailingen waardoor het overlevingspercentage zaailingen op verdichte bodems 40 tot 90% lager ligt dan op niet verdichte bodems (Foil & Ralston, 1957; Youngberg, 1959; Lockaby & Vidrine, 1984; Heninger, et al., 2002; Bassett, Simcock, & Mitchell, 2005). Wanneer er vanuit gegaan wordt dat op niet verdichte bodems via natuurlijke verjonging 100% van het oorspronkelijke stamtal verjongt dan is dit op verdichte bodems slechts 10 tot 60%. Deze stamtallen worden te laag geacht voor een nieuwe stabiele opstand. Daarom is er vanuit gegaan dat bodembewerking nodig is om de gelijke stamtallen te behalen als in de eerste generatie.

Als bodembewerking is er gekozen om te klepelen. Klepelen zorgt ervoor dat de humuslaag en de bovenste paar centimeter van de bodem worden omgewoeld waardoor kiemplantjes makkelijk met hun wortel de grond kunnen penetreren. Er wordt aangenomen dat na het klepelen 100% van het oorspronkelijke stamtal verjongt. De kosten van het klepelen in jaar nul van één hectare wordt op €1000 euro geschat (W. Delforterie, persoonlijke communicatie, 1 november 2015). Omgerekend naar de eindwaarde in jaar 105 is dat € 4.775.

Bodemverdichting heeft echter ook negatieve gevolgen voor de groei van jonge bomen (Froelich, Miles, & Robbins, 1986; Wert & Thomas, 1981). Aangezien bij het klepelen slechts de bovenste paar centimeter van de bodem wordt omgewoeld en de rest van de bodem verdicht blijft, wordt er vanuit gegaan dat de zaailingen/jonge bomen nog steeds groeiremming ondervinden. Volumegroei van bomen op verdichte bodems is 20 tot 30% minder dan die van bomen op onverdichte bodems (Froelich, Miles, & Robbins, 1986; Wert & Thomas, 1981). De groeiplaats is dus belangrijk voor de volumegroei. In generatie één werd gerekend met de getallen uit de opbrengsttabel van groeiklasse 10. Een volumegroei-vermindering van 20% is ongeveer gelijk aan de volumegroei van groeiklasse 8 Jansen, Sevenster, & Faber (1996)(zie bijlage 5.2). Daarom wordt tot een leeftijd van 25 jaar, waarvan was aangenomen dat bodemverdichting daarna geen invloed meer heeft op de groeisnelheden, de dunningsvolumes en bijbehorende diameters gebruikt van groeiklasse 8.

Na jaar 25 zijn de groeisnelheden weer gelijk aan die van onverdichte bodems en kan er dus verder gerekend worden met de groeisnelheden van groeiklasse 10. Echter, op jaar 25 is de gemiddelde diameter van een boom in groeiklasse 8 lager dan de gemiddelde diameter van een boom uit groeiklasse 10. Diameter op borsthoogte is een algemeen gebruikte voorspeller voor boomgroei en voorspelt groei beter dan leeftijd (Wyckoff & Clark, 2005). Daarom wordt gedaan alsof de 25-jarige opstand, opgegroeid in groeiklasse 8, vijf jaar jonger is dan die daadwerkelijk is, zodat de diameter beter overeenkomt met de diameter van een boom uit groeiklasse 10 bij een leeftijd van 20 jaar.

Omdat de bomen die opgegroeid zijn op verdichte bodems een 'leeftijdsachterstand' hebben vindt de eindkap plaats in jaar 105 in plaats van jaar 100. De totale opbrengsten in dit scenario zijn € 32.573 in jaar 105 (zie tabel 5). Wanneer de kosten van het klepelen van de totale opbrengst worden afgetrokken komt er een winst uit van: € 32.573 - € 4.775 = € 27.798.

Tabel 6. Opbrengsten houtoogst van de controle-opstand bij de tweede generatie

G2. Controle Scenario									
t	Dd vB	Vd vB	Dd oVB	Vd oVB	Ot	Ot105			
25	7,5	20,8	8,5	6,8	€	55	€	182	
30	8,5	0	10,7	7,6	€	114	€	348	
35	10,7	34,4	13,1	8	€	636	€	1.803	
40	13,1	32	15,6	8	€	600	€	1.579	
45	15,6	32	18	7,8	€	597	€	1.459	
50	18,0	31,2	20,4	7,2	€	684	€	1.551	
55	20,4	28,8	22,7	6,6	€	1.062	€	2.236	
60	22,7	26,4	24,9	6	€	972	€	1.899	
65	24,9	24	26,8	5,4	€	882	€	1.600	
70	26,8	21,6	28,7	4,6	€	786	€	1.324	
75	28,7	18,4	30,3	4	€	692	€	1.082	
80	30,3	16	31,7	3,6	€	686	€	995	
85	31,7	14,4	33	3	€	609	€	820	
90	33,0	12	34,2	2,6	€	511	€	639	
95	34,2	10,4	35,3	2,6	€	455	€	528	
100	35,3	10,4	45,6	69,6	€	3.148	€	3.391	
105	45,6	278,4			€	11.136	€	11.136	
						Totaal	€	32.573	
	Kt0	Kt105							
Klepelen	€ 1.000	€ 4.775							
						Totaal	€	27.798	

5.3.2 Opstand met dunningspaden

In de opstand met dunningspaden is 20% van de bodem verdicht en 80% van de bodem niet verdicht. Op de dunningspaden wordt niet geklepeld omdat de bomen die hierop opgroeien bij het opnieuw aanleggen van het dunningspad direct weer worden geoogst. Echter, zonder bodembewerking trad er een zaailingsterfte op tussen de 40 en 90% (Foil & Ralston, 1957; Lockaby & Vidrine, 1984). Er wordt gerekend met het gemiddelde hiervan waardoor het overlevingspercentage zaailingen op de dunningspaden 35% bedraagt. Verder is er voor de verdichte bodem nogmaals gerekend met groeiklasse 8 tot het moment van de eerste dunning. Het verschil met de controle-opstand is echter dat alle bomen die op verdichte bodems zijn opgegroeid er bij het aanleggen van de dunningspaden direct worden geoogst. Als gevolg blijft er een opstand over die enkel op onverdichte bodem is

opgegroeid. De overblijvende opstand is dus gelijk aan de opstanden van de eerste generatie (groeiklasse 10). In tegenstelling tot de eindkap bij de controle-opstand vindt de eindkap in dit scenario "gewoon" plaats in jaar 100. De totale opbrengst bedraagt € 31.782 (zie tabel 6).

Tabel 7. Opbrengsten houtoogst van de opstand met dunningspaden bij de tweede generatie

G2. Dunningspaden Scenario							
t	Dd VB	Vd VB	Dd OVb	Vd OVb	O _t	O _{t105}	
25	7,5	8,54	8,5	0	€	17	€ 52
30			10,7	38	€	570	€ 1.616
35			13,1	40	€	600	€ 1.579
40			15,6	40	€	600	€ 1.466
45			18	39	€	585	€ 1.327
50			20,4	36	€	1.080	€ 2.274
55			22,7	33	€	990	€ 1.935
60			24,9	30	€	900	€ 1.633
65			26,8	27	€	810	€ 1.364
70			28,7	23	€	690	€ 1.079
75			30,3	20	€	700	€ 1.016
80			31,7	18	€	630	€ 849
85			33	15	€	525	€ 656
90			34,2	13	€	455	€ 528
95			35,3	13	€	455	€ 490
100			45,6	348	€	13.920	€ 13.920
Totaal						€	31.782

Als de opbrengsten van beide scenario's van de tweede generatie met elkaar vergeleken worden, blijkt dat de opstand met dunningspaden 14.3% meer opbrengst oplevert in een vijf jaar kortere rotatietijd.

Met behulp van formule 3 kan de huidige waarde van de opstand voor oneindige rotaties worden berekend (Straka & Bullard, z.j.). Hierin wordt gecorrigeerd voor de verschillende rotatietijden.

$$3) V_0 = R / (1+i)^t - 1$$

V_0 = huidige waarde

R = opbrengt per rotatie

i = rente

t = aantal jaar in een periode

De huidige waarde van de controle-opstand voor oneindige rotaties wordt dan:

$$€ 27.798 / (1+0.015)^{105} - 1 = € 7.364$$

De huidige waarde van het scenario met dunningspaden voor oneindige rotaties wordt vervolgens:

$$€ 31.782 / (1+0.015)^{100} - 1 = € 9.260$$

Wanneer de opbrengsten van beide scenario's nu opnieuw met elkaar vergeleken worden blijkt dat het werken met dunningspaden 25.8% meer opbrengst oplevert dan het werken zonder dunningspaden.

5.4 Discussie

Deze paragraaf is gewijd aan het reflecteren op de methodes die zijn gebruikt. In paragraaf 5.4.1 wordt er gereflecteerd op de aannames waarop de berekeningen zijn gebaseerd en hoe deze aannames de resultaten mogelijk hebben beïnvloed. Vervolgens worden factoren die mogelijk van invloed zijn op de opbrengsten maar in de berekeningen niet zijn meegenomen besproken in paragraaf 5.4.2. De gevonden resultaten kunnen helaas niet vergeleken worden met bestaande literatuur vanwege het gebrek hieraan.

5.4.1 Aannames

De eerste aanname die van invloed is geweest op de berekende opbrengsten is dat er in de eerste generatie in jaar nul nog geen bodemverdichting had plaatsgevonden. Deze aanname heeft namelijk tot gevolg dat de opbrengsten van de eerste generatie hoger liggen dan de opbrengsten van de tweede generatie. Wanneer er vanuit gegaan was dat de bodem in generatie één reeds verdicht was dan zouden de groeiomstandigheden en opbrengsten van de controle-opstand in de tweede generatie gelijk blijven. De opbrengsten van de opstand met dunningspaden in de tweede generatie zouden daarentegen toenemen. De verdichte bodem van de eerste generatie zou op de delen waar geen dunningspaden liggen een complete generatie de tijd krijgen om te herstellen met als gevolg een betere groeiplaats en hogere opbrengsten. Het is daarom belangrijk niet te focussen op de absolute waardes, maar om te kijken naar de procentuele verschillen tussen de controle-opstand en de opstand met dunningspaden.

Vervolgens is de gekozen groeiremming op verdichte bodems belangrijk. Ondanks dat de gekozen groeiremming van 20% is gebaseerd op meerdere studies (Wert & Thomas, 1981; Froelich, Miles, & Robbins, 1986; Heninger, et al. 2002) is het onzeker of dezelfde groeiremming zou optreden voor grove den op Nederlandse bodem. Bassett, Simcock, & Mitchell (2005) toonden namelijk ook aan dat remmende effecten van bodemverdichting soortafhankelijk is. Wanneer de daadwerkelijke groeiremming hoger of lager zou liggen dan zouden de opbrengsten tussen de controle-opstand en opstand met gebruik van dunningspaden respectievelijk verder van elkaar af en dichterbij elkaar liggen. Met andere woorden des te groter de groeiremming hoe voordeliger het wordt vanuit een financieel oogpunt om te werken met dunningspaden.

Een andere aanname die van invloed is geweest op de resultaten is de aanname dat vanaf jaar 25 een hoogte-leeftijd combinatie wordt behaald waarbij de bomen geen last meer ondervinden van de verdichting. Wanneer deze leeftijdsgrens hoger had gelegen zouden de bomen in de eerste generatie nog groeiremming ondervinden na de het berijden van de bodem bij de eerste dunning waardoor de opbrengsten in generatie één lager zouden liggen. Bovendien zou gelden dat hoe hoger de leeftijdsgrens ligt des te langer de groeiremming plaatsvindt. Dit zou inhouden dat de opbrengsten van de controle-opstand in generatie twee lager zouden liggen dan nu berekend en dat het werken met dunningspaden relatief nog voordeliger is.

Tot slot is de aanname dat door te klepelen het originele stamtal verjongt van invloed geweest op de resultaten. Natuurlijke verjonging is een onzeker proces waarbij meer factoren dan enkel de invloed van verdichting een rol in spelen. Wanneer na klepelen de stamtallen niet gelijk zouden zijn aan de referentiewaardes uit de opbrengsttabellen van Jansen, Sevenster, & Faber (1996) dan zouden de dunningsvolumes van de tweede generatie niet te voorspellen zijn. Zonder bekende dunningsvolumes zijn de opbrengsten met dit model niet te berekenen. Dit is een tekortkoming aan het rekenmodel waar nog geen oplossing voor is gevonden.

5.4.2 Niet meegenomen factoren

Uit de literatuur kwam naar voren dat zowel het aantal bomen als de volumegroei van bomen die groeien op overgangszones (bodems tot 3m naast bereiden bodems) lager lagen dan bomen die groeiden op onverstoorde bodems (Wert & Thomas, 1981). Vanwege de complexiteit om overgangszones mee te nemen in het rekenmodel is er voor gekozen om ze niet mee te nemen in de berekening. Het niet meenemen van overgangszones zorgt ervoor dat de opbrengsten van de tweede generatie in beide scenario's wellicht hoger zijn dan dat deze in werkelijkheid zouden zijn.

Een andere factor die mogelijk gerelateerd is aan de opbrengsten van het wel of niet werken met dunningspaden is de efficiëntie waarmee de exploitatie verloopt. Wanneer zou blijken dat het werken met dunningspaden langzamer of sneller zou zijn dan het werken zonder dunningspaden, dan zouden aannemers in de praktijk respectievelijk minder of meer bereid zijn te betalen per kubieke meter hout. Efficiëntie van het werken met dunningspaden is echter nog onvoldoende onderzocht om daar een uitspraak over te kunnen doen en waar vervolgonderzoek voor nodig is. Hetzelfde geldt voor bleswerkzaamheden.

Wat tot slot mogelijk ook van belang is voor de opbrengsten, is of er verschil zit in de bovengrondse schade aan overblijvende bomen tussen het wel of niet werken met dunningspaden. Zowel voor meer als minder bovengrondse schade door het werken met dunningspaden zijn argumenten te bedenken. Aan de ene kant zou het werken met dunningspaden meer bovengrondse schade kunnen geven, omdat de harvestermachinist in een opstand met dunningspaden de bomen op een grotere afstand van z'n machine moet vellen. Hierdoor heeft de machinist minder controle over de valrichting van de bomen waardoor er meer schade aan omringende bomen zou kunnen ontstaan. Aan de andere kan een machinist veel bomen in de lengterichting van het dunningspad laten vallen waardoor er wellicht minder overblijvende bomen geraakt worden. Om hier een uitspraak over te kunnen doen zou vervolgonderzoek nodig zijn.

5.5 Conclusie

Het doel van dit hoofdstuk was om inzicht te verwerven in de financiële aspecten van het werken met vaste dunningspaden. De gevonden resultaten zijn op te delen in korte termijn effecten voor één generatie of lange termijn effecten voor twee tot een oneindig aantal generaties. Op basis van onze modelberekeningen zijn dit de conclusies:

Economische effecten van het werken met dunningspaden voor de eerste generatie:

- In de eerste generatie is het effect van bodemverdichting niet zichtbaar aan de boomgroei.
- De totale opbrengsten van de controle-opstand zonder dunningspaden was nauwelijks gelijk aan de totale opbrengsten van de opstand met dunningspaden (<1%).

Economische effecten van het werken met dunningspaden voor de lange termijn:

- De negatieve effecten van bodemverdichting op overlevingspercentage zaailingen en boomgroei komen tot uiting vanaf de tweede generatie.
- Bodembewerking bij de controle-opstand is nodig om hoge stamtallen te laten verjongen. Hier zitten kosten aan verbonden die doorgerekend naar het moment van eindkap hoog kunnen oplopen (€ 4.775 met een rente van 1,5%).
- Werken met dunningspaden levert in generatie twee 14.3% meer opbrengsten dan werken zonder dunningspaden.
- De opbrengsten van het werken met dunningspaden voor oneindige generaties zijn 25.8% hoger dan wanneer er zonder dunningspaden wordt gewerkt.
- Vanuit financieel oogpunt is het aan te raden met dunningspaden te werken.

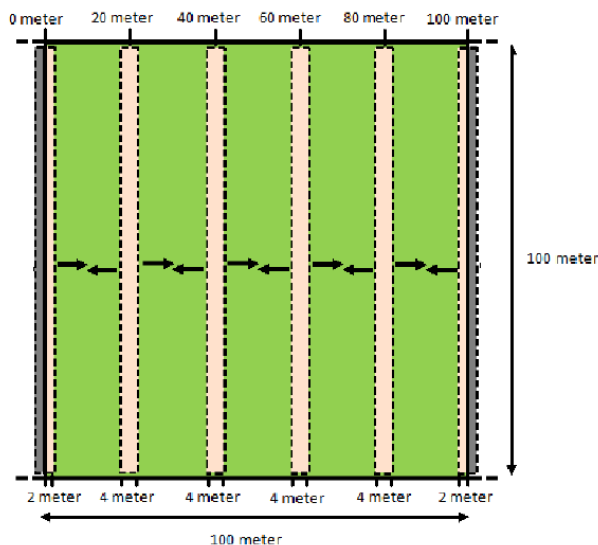
Houd er rekening mee dat er enige onzekerheid zit in de gevonden opbrengsten. De berekeningen dienen daarom het best gezien te worden als een ruwe indicatie van de economische effecten van het werken met dunningspaden. Om nauwkeurigere uitspraken te kunnen doen is vervolgonderzoek nodig. Hierbij zouden bijvoorbeeld efficiëntie van het werken met dunningspaden, efficiëntie van het bleswerk van dunningspaden en overgangszones meegenomen kunnen worden.

6. Aanleggen van dunningspaden

Zoals is gebleken uit voorgaande hoofdstukken is het zowel ecologisch als economisch aantrekkelijk om te werken met vaste dunningspaden. Het doel van dit hoofdstuk is daarom beheermethodes aan te reiken voor het aanleggen van dunningspaden. Paragraaf 6.1 gaat in op het uitstippelen van een dunningspadenpatroon. Daarna worden in paragraaf 6.2 enkele manieren voor het uitzetten van dunningspaden in het veld besproken. Paragraaf 6.3 richt zich op hoe dunningspaden kunnen worden vastgelegd en teruggevonden. Tot slot geeft paragraaf 6.4 een samenvatting van de methodes voor het aanleggen van dunningspaden.

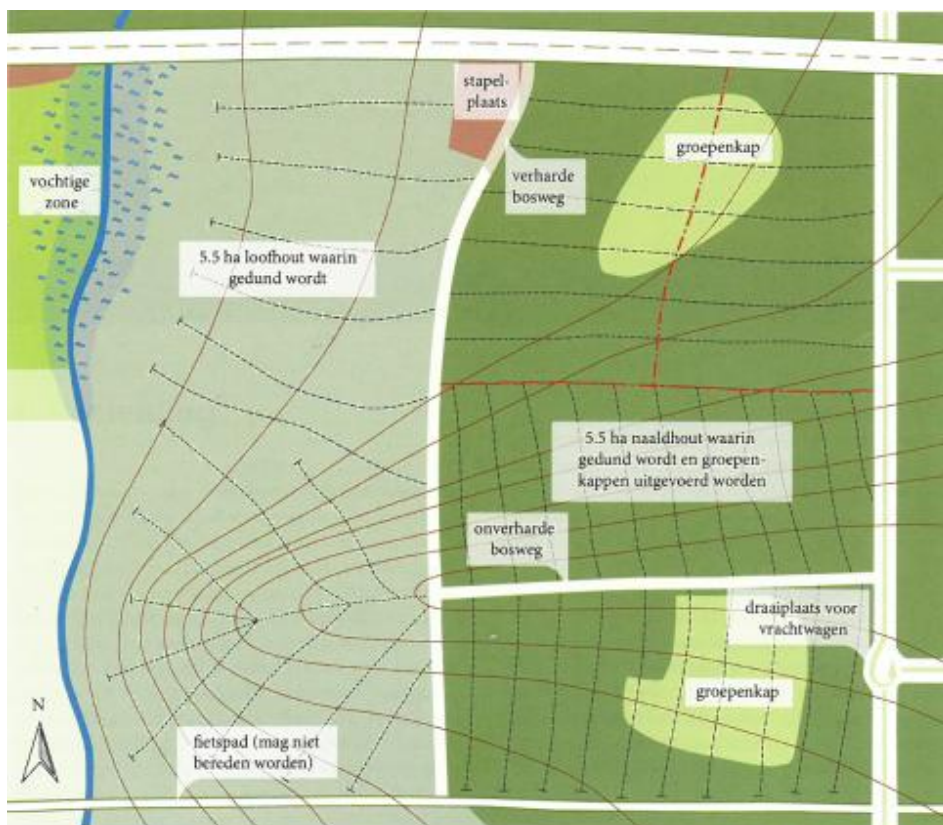
6.1 Uitstippelen dunningspadenpatroon

Dunningspaden vormen een wegenetwerk door een opstand, zodat de machines enkel over deze paden hoeven te rijden tijdens de houtexploitatie. In Vlaanderen bedraagt de algemeen geadviseerde afstand tussen dunningspaden 20 meter van hart tot hart (ANB, 2014; ANB, 2015; Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010). Met deze afstand kan een harvestermachine met een reikwijdte van 10 meter precies het midden van een opstandstrook bereiken (zie figuur 1). Er kan ook een grotere afstand worden gehanteerd, maar dan moeten de bomen die buiten bereik staan van de harvester met de hand worden omgezaagd en met behulp van een lier tot in het bereik van de harvester worden gesleept. Vooral bij loofhout is het gebruikelijk om grotere onderlinge afstanden aan te houden van circa 40 meter (Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010; Wald-Prinz, 2015). De algemeen gehanteerde breedte van de dunningspaden bedraagt 3,5 tot 4 meter (ANB, 2015; ANB I. K., 2014). Een breedte van 3,5 tot 4 meter is genoeg voor een forwarder om over het dunningspad te kunnen rijden. Wanneer een onderlinge afstand van 20 meter en een breedte van 4 meter wordt aangehouden nemen de dunningspaden 20% van de opstand in beslag.



Figuur 1: Weergave van dunningspaden in een basisopstand van 1 hectare. De dunningspaden zijn weergegeven met lichtbruin en het overige bos is weergegeven in groen. De zwarte pijlen geven de reikwijdte van 10m van de harvester aan (Nooijens, 2014).

Dunningspaden worden aangelegd met het idee dat dezelfde paden telkens opnieuw worden gebruikt. Het is daarom belangrijk zorgvuldig na te denken over hoe de dunningspaden in eerste instantie het beste in het bos kunnen worden aangelegd. Hiervoor bestaat echter geen vast ontwerp. Wel zijn er bij het uitstippelen van het dunningspadenpatroon een aantal factoren van belang om rekening mee te houden, waaronder: het bestaande wegennetwerk, hoogteverschillen, het aantal recreanten, beschermde flora en fauna en cultuurhistorische monumenten. Met behulp van kaarten kunnen de meeste van deze factoren op voorhand worden geanalyseerd en kan er een theoretisch dunningspadenpatroon worden uitgestippeld (zie figuur 2). Echter, in het veld moet altijd gecontroleerd worden of er nog aanpassing aan het dunningspadenpatroon moeten worden aangebracht.



Figuur 2: Voorbeeld van een dunningspadenpatroon voor een virtueel bos. Dunningspaden zijn aangegeven met zwarte stippellijnen. Hoogtelijnen zijn in het bruin aangegeven (Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010).

Voor het plannen en uitvoeren van een bosexploitatie is het bestaande wegennetwerk van groot belang. Het is handig eerst te bepalen via welke bosweg het hout het eenvoudigst uit het bos kan worden afgevoerd. Leg vervolgens indien mogelijk de dunningspaden dwars op deze bosweg waar het hout verzameld moet worden voor transport (Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010; Sitech, 2015). Door de dunningspaden dwars op de hoofdexploitatieroute te leggen worden de rijafstanden van de forwarder die het hout uit de opstanden naar de weg rijdt geminimaliseerd. Hierdoor worden ook de bodemschade en de exploitatiekosten geminimaliseerd.

Wanneer er sprake is van een heuvelachtig terrein moet hier rekening mee worden gehouden bij het uitstippelen van de dunningspaden. Met behulp van een hoogtekaart kunnen heuvels in acht worden genomen. Bij hellingen groter dan 5% moeten dunningspaden altijd recht tegen de heuvel op liggen

vanwege verhoogde bodemdruk op schuine paden en kiepgevaar van de machines (Wald-Prinz, 2015).

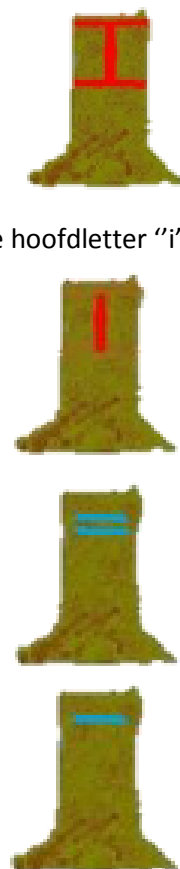
In bossen waar veel recreanten komen is het soms wenselijk om de dunningspaden te camoufleren. Het camoufleren van de dunningspaden helpt te voorkomen dat recreanten ze als wandelpaden gaan gebruiken (Ampoorter, Goris, & Verheyen, 2010). Indien mogelijk kunnen dunningspaden parallel aan wandel- en fietsroutes worden gelegd. Dit zorgt ervoor dat recreanten tegen een muur van bos aan kijken en dat de dunningspaden uit het zicht blijven. Indien dit niet mogelijk is en de dunningspaden wel dwars op de wandel- of fietsroute liggen is het mogelijk om aan het begin van het dunningspad een bocht aan te leggen. Dit voorkomt dat recreanten het eind van het dunningspad kunnen zien waardoor het pad minder opvalt. Om dezelfde reden is het ook mogelijk om halverwege het dunningspad een paar meter op te schuiven. Het nadeel van werken met kronkels of bochten is dat er een groter oppervlakte van de opstand verloren gaat aan de dunningspaden en het verhoogt de kans op schade aan stamvoeten bij het slepen van bomen. Bovendien is de bodemdruk hoger in bochten dan op rechte stukken (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008).

Tot slot dienen plekken waar waardevolle of beschermde flora en fauna voorkomen, zoals dassenburchten, mierenhopen, vogelnesten, verjongingsplekken en waardevol dood hout vermeden te worden (Bosschap, 2010). Dit geldt eveneens voor cultuurhistorische monumenten.

6.2 Uitzetten van dunningspaden

Wanneer het dunningspadenpatroon is uitgedacht en gecontroleerd in het veld kunnen de paden worden uitgezet. Dunningspaden worden meestal met verfbussen gemarkeerd zodat de harvestermachinist duidelijk kan zien waar hij moet rijden. Hierbij worden een aantal uniforme markeertekens gebruikt (zie figuur 3). De ingang van een dunningspad wordt aangegeven met een oranje of rode hoofdletter "I". Verder wordt het dunningspad aangeduid met een rode of oranje verticale streep op de voor- en achterkant van de bomen. Het dunningspad kan voor de komende dunningen ook nog vastgelegd worden door de randbomen te markeren. De randbomen aan de ingang van het dunningspad kunnen worden gemarkeerd met twee horizontale blauwe of witte strepen. De volgrichting van het dunningspad wordt op de randbomen aangegeven met een enkele blauwe of witte streep. Alle uniforme markeertekens zijn opgenomen in bijlage 6.1 (P. Kah, persoonlijke communicatie, 2015; ANB, 2015).

Het afmeten van de tussenafstand van 20 meter kan bij de ingang van een pad gedaan worden door het zetten van 20 stappen van een meter of met behulp van een meetlint (ANB, Het aanduiden van vaste ruimingspistes, 2015). In een overzichtelijk bos kan een blesser op het oog het voorgaande dunningspad als referentiepunt aanhouden. Echter, wanneer het gaat om een structureel gevarieerder bos dan kan het lastig zijn om het overzicht te behouden. Wanneer dit het geval is zijn er een aantal technieken die kunnen helpen het overzicht te bewaren.



Figuur 3: Uniforme markeertekens voor het aanduiden van dunningspaden. Betekenis van tekens van boven naar beneden: ingang van dunningspad, te vellen boom op het pad, ingang van het pad op de randboom, volgrichting van het dunningspad op randboom (P. Kah, persoonlijke communicatie, 2015).

In een redelijk overzichtelijk bos kan het zetten van verfstippen op de zijkant van de bomen op het dunningspad helpen met navigeren. Wanneer dan het volgende pad wordt uitzet kan met behulp van de stippen het verloop van het vorige pad gevolgd worden. Wanneer er geen navigatiepunten in een opstand aanwezig zijn en de opstand te dicht begroeid is om stippen van een ander pad te kunnen volgen kan een kompas gebruikt worden om te helpen navigeren (ANB, Het aanduiden van vaste ruimingspistes, 2015).

Een andere mogelijkheid is om samen met een collega de dunningspaden uit te zetten. Wanneer beide opvallende kleding dragen die vanaf de andere kant van de opstand zichtbaar is, kan één blesser aan de ene kant van het dunningspad beginnen en de andere aan de andere kant en kun je simpelweg naar elkaar toe lopen in het midden (ANB, Het aanduiden van vaste ruimingspistes, 2015).

Tot slot is het ook mogelijk om dunningspaden uit te zetten zonder verfmarkering maar met behulp van lasertechnologie (Sitech, 2015). Hierbij wordt met een laser een lijn uitgezet die het hart van het dunningspad vormt. Op de harvester zit een prisma gemonteerd waardoor de bewegingen van de machine worden waargenomen. De machinist ziet vervolgens de uitgezette lijn op een scherm in zijn cabine van de uitgezette route evenals zijn eigen positie. De machinist hoeft enkel deze lijn te volgen en alle bomen te vellen die hij onderweg tegenkomt.

6.3 Vastleggen en terugvinden van dunningspaden

Hoe doel van het werken met vaste dunningspaden is dat dezelfde paden worden gebruikt voor elke dunning. Daarom is het belangrijk dunningspaden bij aanleg duidelijk vast te leggen, zodat deze makkelijk teruggevonden kunnen worden bij een volgende dunning. Hiervoor bestaan verschillende manieren. De simpelste manier om dunningspaden terug te vinden is, zoals aangegeven in paragraaf 6.2, door de randbomen met blauwe horizontale strepen te markeren. Echter, wanneer ook de randbomen weg zijn na een eindkap is het economisch en ecologisch voordelig om dezelfde paden opnieuw te gebruiken bij een volgende generatie bos. Daarom is het handig om het dunningspadenpatroon in te tekenen op een kaart zoals aangegeven in paragraaf 6.1. Ook kunnen de coördinaten van een dunningspad worden vastgelegd met behulp van GPS. Een combinatie van deze methodes is handig zodat de dunningspaden voor de huidige en volgende generaties makkelijk zijn terug te vinden.

Wanneer er in het verleden dunningspaden zijn gebruikt maar deze niet zijn aangegeven is er een aantal trucjes om deze terug te vinden. In een jonge opstand is het stamtal nog zo hoog dat de dunningspaden duidelijk opvallen als lege strook door een opstand. In oudere opstanden waar minder bomen staan is het terugvinden van je dunningspaden soms lastiger. In dat geval kunnen dunningspaden vaak herkend worden door een afwijkende vegetatie of een andere leeftijd van dezelfde vegetatie (ANB, Het aanduiden van vaste ruimingspistes, 2015).

6.4 Samenvatting

Dit hoofdstuk was gewijd aan het beantwoorden van de onderzoeksvraag: Met behulp van welke methodes kunnen dunningspaden worden aangelegd? In deze paragraaf worden de gevonden methodes nog een keer kort samengevat.

Uitstippelen dunningspadenpatroon:

- Afstand: 20 meter (mogelijk grotere afstand, maar dan handmatig en slepen naar het pad met lier noodzakelijk).
- Breedte: 3,5 - 4 meter.
- Bepaal de transportroute en leg indien mogelijk de dunningspaden daar dwars op aan.
- Houd rekening met hoogteverschillen. Op hellingen van 5% of meer dienen dunningspaden recht tegen de heuvel op aangelegd te worden.
- Desgewenst kan rekening gehouden worden met recreanten. Leg in dat geval de dunningspaden parallel aan drukke wandelpaden of verberg de ingang met een bocht aan het begin van het pad.
- Vermijd beschermde flora en fauna en cultuurhistorisch waardevolle locaties.

Uitzetten dunningspaden in het veld:

- Uitzetten van dunningspaden kan worden gedaan met uniforme verfmarkering of met lasertechnologie.
- Voor het uitzetten van dunningspaden met verfmarkering kan in onoverzichtelijk bos een kompas, een tweede collega, of het gebruik van stippen op de zijanten van bomen van het voorgaande dunningspad helpen met navigeren.

Vastleggen en terugvinden:

- Vastleggen van dunningspaden kan met behulp van verfmarkering, intekenen op kaart, of gebruik van GPS.
- Dunningspaden zijn eventueel ook zonder markeringen terug te vinden doordat ze een afwijkende vegetatie of leeftijd hebben waar ze aan herkend kunnen worden.

7. Interviews beheerders

Dit hoofdstuk richt zich op de resultaten van de interviews die zijn gehouden met beheerders van verschillende organisaties. De inhoud van de interviews was op te splitsen in twee delen. Het eerste deel van het interview richtte zich op vragen over bodemschade van gemechaniseerde houtoogst en de ecologische effecten van bodemverdichting. Het tweede deel ging specifiek in op de ervaringen van beheerders betreffende het werken met dunningspaden. Het hoofdstuk houdt deze structuur aan. Paragraaf 7.1 behandelt de visie van beheerders op de bodemschade als gevolg van gemechaniseerde houtoogst en hun visie op de effecten van bodemverdichting. Vervolgens richt paragraaf 7.2 zich op de visie van beheerders voor wat betreft het gebruik van een vast dunningspadensysteem. Vervolgens wordt er gereflecteerd op de methode en gevonden resultaten in paragraaf 7.3. Tot slot worden in paragraaf 7.4 de conclusies van dit hoofdstuk opgesomd.

7.1 Visie van beheerders op bodemschade en de effecten van bodemverdichting

7.1.1 Visie op bodemschade als gevolg van gemechaniseerde houtoogst

Op de vraag "hoe zou u in uw eigen woorden de bosbodem beschrijven na afloop van een gemechaniseerde houtoogst?" antwoordden alle beheerders dat er sporen in de bodem zichtbaar zijn. Een aantal beheerders noemde ook dat de bodem in deze sporen verdicht is door de uitgeoefende bodemdruk van de machines. De meerderheid van de beheerders gaf aan de ernst van de bodemschade visueel te beoordelen aan de hand van de diepte van de insporing. Een enkeling gaf aan ook wel eens de penetratieweerstand van de bodem te meten met een penetrometer als maatstaf voor de bodemschade. Beheerders gaven aan dat de mate van bodemverdichting gecorreleerd was aan de diepte van de insporing. Met andere woorden, bij diepe sporen treedt er veel verdichting op en visa versa.

"Hier kan ik nauwelijks die insporing zien. Dan ga ik er ook vanuit dat de verdichting beperkt is." 12

De meerderheid van de beheerders gaf aan dat ze diepe sporen, sporen die door de minerale grond heen gaan, een onacceptabele vorm van schade vonden. In contrast zei een andere beheerder dat het geen probleem was wanneer de minerale grond bloot kwam te liggen, omdat dit de dynamiek van de bodem en verjonging zou stimuleren.

"Humus indrukken is acceptabel wat mij betreft, maar als ze door de bodem heen gaan dan wordt het vervelend. En dat mag best eens een klein spoortje zijn, maar als ze er 20-30cm doorheen gaan dan ga je naar huis." 19

"Dat de bodem aan de bovenkant kapot gaat dat maakt me niet zo veel uit, sterker nog dat is hartstikke goed dat zorgt voor extra dynamiek en extra ontkieming omdat dat de humus laag er hier en daar af ligt en de minerale laag blootligt." 14

De beheerders waren het erover eens dat diepe sporen (en verdichting) voornamelijk voorkomen wanneer er gewerkt wordt met natte weersomstandigheden en met name op de fijnere bodemtypes zoals klei. De meeste beheerders gaven aan dat ze zelf vooral te maken hadden met zandgronden en dat de insporing daar over het algemeen wel meeviel.

“ Je hebt hier in elk geval veel droge zandgronden en stuifzandkoppen. Daar kun je na 3 weken regen over gaan en heb je nog geen insporing. En op een andere plek kan je als het een middag regent er eigenlijk al niet meer met een machine in.” 17

Tijdens de interviews werd bovendien gevraagd naar die visie van beheerders op de herstelperiode van bereden bodems. De antwoorden op deze vraag stemden redelijk overeen. De beheerders dachten dat de herstelperiode minstens enkele decennia zou duren maar dat de bodem mogelijk onherstelbaar was zonder bodembewerking.

“ Ik denk als het echte insporing is waarbij er hoogteverschillen ontstaan en de minerale grond zeg maar verplaatst is, dat krijg je waarschijnlijk nooit meer weg. Althans, ik zie die sporen van de bosaanleg van 50 of van 80 jaar daarvoor. Dat ze geploegd hebben ofzo. Dus dat soort profielen die blijven wel heel lang, ook op de zandgronden.” 18

7.1.2 Visie op ecologische effecten van bodemverdichting

In deze paragraaf wordt de visie van de beheerders op de ecologische effecten van bodemverdichting besproken. De effecten van bodemverdichting zullen in dezelfde volgorde als in hoofdstuk 3 worden behandeld, namelijk: effect op bodemstructuur en lucht- en waterhuishouding, effect op verjonging, effect op boomgroei en overige effecten.

Effect op bodemstructuur en lucht- en waterhuishouding

Voor wat betreft de effecten van bodemverdichting op de bodemstructuur was er één beheerder die specifiek noemde dat het poriënvolume afneemt bij toenemende verdichting. Verder vertelden vijf van de negen beheerders dat ze in het veld kleine poeltjes zagen in de sporen en concludeerden daaruit dat bodemverdichting leidde tot stagnatie van water. Of stagnatie van water een positief of een negatief gevolg was van bodemverdichting daar waren de meningen over verdeeld. Sommige beheerders gaven aan dat de poeltjes die ontstaan wellicht positief zijn voor het verhogen van de biodiversiteit. Andere beheerders noemden dat de poeltjes in het bos leiden tot een afname van de gasuitwisseling tussen de bodem en atmosfeer met als gevolg een afname van de zuurstof in de bodem.

“ Een beetje bodemverdichting kan voor de ecologie ook wel weer eens prettig zijn, want dan blijft het water stagneren en dat is dan wel weer goed voor de één of andere kikker. ” 12

“ Sterke bodemverdichting dat leidt uiteindelijk tot verminderde zuurstof in de bodem, stagnatie van water...” 14

De overige vier beheerders vertelden dat ze te weinig kennis hadden van verdichting op de bodemstructuur en de lucht- en waterhuishouding van de bodem en/of meldden dat ze geen opmerkelijkheden zagen aan de lucht- en waterhuishouding in het veld.

“ Na een jaar zie je er ook weinig van. Maar ja, hoe dat dan in je grond werkt dat weet ik dan niet. ” 15

Effect op verjonging

Voor wat betreft de gevolgen van bodemverdichting op verjonging waren de observaties en visies van beheerders verdeeld. Sommige beheerders zeggen betere verjonging te zien op bereden bodems en beweren dat dit komt doordat er meer licht valt op de bereden paden. In tegenstelling hiermee

beweren andere beheerders juist dat verjonging het minder goed doet op verdichte bodems. Verjonging zou worden geremd doordat de wortels van zaailingen lastig kunnen groeien in verdichte bodems en doordat ontkieming in plassen niet mogelijk is.

“ Het is goed voor je natuurlijke verjonging natuurlijk. Maar ja, natuurlijke verjonging is dan wel leuk op zo'n streepje maar de volgende dunning gaan ze weer over dat pad heen. Dus ja, voor tijdelijk is het niet erg, je krijgt verjonging een beetje variatie in je bos.” 15

“ ...wat je vaak ziet is dat daar waar uitgereden is de verjonging daar bijvoorbeeld veel minder goed van de grond komt dan daarbuiten. Dus dat het een nadelig effect heeft op de groeiomstandigheden van bomen is wel duidelijk... Wat je ziet is toch dat er duidelijk minder individuen zijn per oppervlakte eenheid en dat die individuen dus ook minder hard groeien of een achterstand hebben ten opzichte van de verjonging ernaast ” 11

Meerdere beheerders gaven aan dat er verschil zit tussen de soorten die groeien op verdichte bodems vergeleken met de rest van de opstand. Het merendeel van de beheerders zei dat op dunningspaden voornamelijk verjonging van grassen optreedt en struikachtige soorten opkomen en weinig boomsoorten. Daarentegen was er ook een beheerder die op dunningspaden massaal verjonging van berk en eik zag opkomen.

“ Wat je wel ziet, en wat je ook met natuurlijk bosbeheer wil, de verjonging die krijgt natuurlijk wel veel meer kans in een uitrijpad. ...En dan niet eens zozeer bomenverjonging maar wel de kruidenvegetatie. ” 16

“ Ik heb zelfs nu bij natuurmonumenten waar we vijf jaar geleden gedund hebben en nu weer dunnen dat die dunningspaden waar dus al die rijbeweging is geweest bomvol staat met verjonging van eik en van berk. ” 17

Één beheerder maakte duidelijk onderscheid in het verjongingssucces voor verschillende bodemtypes. Op bereden kleibodems zag hij nauwelijks verjongingen, terwijl hij op zandbodems 'normale' verjonging zag opkomen.

“ In de sporen zie je nauwelijks verjonging, zeker op de wat nattere gronden. ...En op de wat meer zandige gronden staat wel gewoon verjonging in dezelfde hoeveelheden.” 19

Tot slot gaven twee beheerders aan geen uitspraak te kunnen doen over de effecten van bodemverdichting op verjonging.

Effect op boomgroei

Over de effecten van bodemverdichting op boomgroei waren de meningen nogmaals verdeeld. Sommige beheerders gaven aan gelezen te hebben dat bodemverdichting een remmend effect heeft op de groei van bomen doordat wortels geremd worden in hun groei en door verlaagde zuurstofgehalten in de bodem. Echter, de meeste beheerders waren van mening dat groeiremming van bomen in het veld moeilijk te beoordelen was, of gaven aan geen groeiremming in het veld te zien.

“ Sterke bodemverdichting dat leidt uiteindelijk tot verminderende zuurstof in de bodem, stagnatie van water, verminderde wortelgroei... en zou in principe negatieve effecten op boomgroei kunnen hebben. ” 12

“ Sommige mensen zeggen ook dat bomen er minder goed door groeien omdat bodemverdichting negatieve gevolgen heeft voor die wortels, maar dat zijn effecten die ik niet of nauwelijks zie. ” 18

Verder kwam uit de interviews naar voren dat beheerders een verschillende kijk hebben op de effecten van het rijden met machines op de boomgroei van randbomen (bomen langs een spoor). Hierover bestonden tegenstrijdige visies. Sommige beheerders zeiden dat de randbomen harder groeien doordat ze meer licht en ruimte krijgen, terwijl twee andere beheerders zeiden dat groei van randbomen minder was vanwege schade aan het wortelstelsel.

“ Maar langs elk dunningspad waar dan sprake is van verdichting daar groeien de bomen nog altijd harder dan de bomen midden in het bos. Dat komt natuurlijk omdat deze meer ruimte hebben.” 12

“ Het enige wat je snel kunt concluderen is als er veel schade aan wortels is gemaakt dat je dat in de kronen ziet. Dat ze aan die kant in de kronen helemaal niet zijn uitgebreid na de laatste dunning. ” 13

Overige genoemde effecten

Tot slot werden er nog twee effecten benoemd die uit het literatuuronderzoek van hoofdstuk 3 niet naar voren zijn gekomen, namelijk effect van bodemverdichting op bodemfauna en effect op biodiversiteit. Twee beheerders gaven aan dat ze in rapporten hadden gelezen dat bodemverdichting negatieve effecten zou hebben voor de bodemfauna. Echter, zelf waren ze hier nog niet helemaal van overtuigd.

“ Er wordt dus gezegd dat een bosbodem voor allerlei organismen niet meer toegankelijk is. Dat zou kunnen, ik weet het niet. ” 18

Drie beheerders zeiden dat de sporen van de machines een microklimaat creëren waar verschillende flora en fauna soorten van zouden profiteren. Als gevolg zou een positief effect van het rijden met machines zijn dat de biodiversiteit bevordert wordt.

“ Waar de machine overheen gereden is daar zit dan een klein kuiltje naast en ja je ziet daar toch vogeltjes op afkomen en mossen dus je hebt binnen een vierkante meter een microklimaat gecreëerd. Varens komen soms weer terug, mosjes, vogeltjes maken er gebruik van, soms kom je kikkers tegen die in zo'n wagenwiel hun eieren leggen die daarvoor er niet waren. Dus je biodiversiteit wordt wel groter.” 16

7.2 Visie van beheerders op het gebruik van vaste dunningspaden

Het tweede deel van de interviews richtte zich op de visie van de beheerders op het werken met een vast dunningspadensysteem. Met een vast dunningspadensysteem wordt bedoeld dat de beheerders de rijroutes van de harvester/forwarder in het veld op voorhand uitstippelen en markeren, met de intentie om deze routes in de toekomst opnieuw te gebruiken en dat erop wordt toegezien dat de machines niet van deze paden afwijken. Wanneer een beheerder aan één of meerdere van deze voorwaarden niet voldoet wordt dit voor dit onderzoek bestempeld als dat deze beheerder geen gebruik maakt van vaste dunningspaden.

Met deze definitie bleek dat drie van de negen beheerders geen gebruik maakten van vaste dunningspaden in hun beheer. Twee beheerders werkten soms met een vast dunningspadensysteem

en vier beheerders werkten altijd met vaste dunningspaden. In de komende paragrafen zullen de visies en argumenten van de beheerders voor en tegen het gebruik van vaste dunningspaden besproken worden.

7.2.1 Argumenten tegen het gebruik van een vast dunningspadensysteem

Een belangrijke reden voor beheerders die er voor kiezen niet te werken met vaste dunningspaden is dat ze vinden dat de harvestermachinist het beste zijn eigen route kan bepalen. De beheerders gaven aan vertrouwen te hebben in de kunsten en expertise van de machinist. Daarbij komt dat de beheerders ervan uitgaan dat de harvestermachinist zo efficiënt mogelijk te werk gaat en daarom niet meer rijdt dan nodig is. Ze gaan ervan uit dat de machinist zo min mogelijk meters wilt maken met als gevolg dat de paden vanzelf zo ver mogelijk uit elkaar komen te liggen.

“Mijn idee is dat die mensen die daar rijden, die rijden niet meer dan nodig is, want het is natuurlijk ook niet handig. En sterker nog als er een tweede of derde dunning plaatsvindt, dan vinden die mannen vrijwel altijd dezelfde route terug. ...Het aantal van die dunningspaden beperken dat gaat ook vanzelf. Dat laat ik graag aan die mannen over.” 18

Een ander argument wat vaak genoemd werd tegen het markeren en vastleggen van vaste dunningspaden is dat de beheerders vinden dat dunningspaden een inbreuk doen op de esthetische waarde van het bos. Alle beheerders die geen gebruik maken van vaste paden gaven aan zich te storen aan het beeld van met name rechte dunningspaden. Dit geldt overigens ook voor een aantal van de beheerders dat wel werkt met vaste paden. Eén beheerder gaf aan dat het onderdeel van hun doelstelling is om het bos zo natuurlijk mogelijk te doen ogen en dat recht aangelegde dunningspaden niet passen binnen deze doelstelling. De beheerders die een hoge prioriteit toekenden aan de esthetische waarde van het bos gaven aan dat ze de machinist bewust de opdracht meegeven om een beetje slingerend door de opstand heen te rijden om rechtlijnigheid te voorkomen. Bovendien gaven twee beheerders aan dat ze zich stoorden aan permanente verfmarteringen om dunningspaden aan te duiden in het bos.

“Wij streven toch naar een bos wat toch een soort van esthetische waarde heeft, dus hoe minder kunstmatig dat eruit ziet hoe liever we dat hebben. ... als je met allerlei verf en toestanden gaat markeren dan wordt het wel een beetje een kermis en dat is wat wij eigenlijk niet willen.” 11

Verder werd het gebruik van dunningspaden als wandelpaden door recreanten meerdere malen als argument tegen het gebruik van vaste dunningspaden genoemd. Beheerders gaven aan dat wanneer er rechte dunningspaden worden aangelegd waar recreanten ver of helemaal doorheen kunnen kijken dat zij deze paden als wandelpaden gaan gebruiken. Het afwijken van de wandelpaden is ongewenst zeggen de beheerders en daarom een reden tegen het gebruiken van vaste dunningspaden.

“Dus je probeert in het begin goed duidelijk te maken: van ga er schuin in of een beetje wirwar er doorheen, want dan zie je ook die rechte banen niet en dan valt het ook niet zo op, want dat zien mensen dan ook als pad en die gaan het dan als pad gebruiken.” 15

Bovendien zijn sommige beheerders van mening dat het werken met vaste dunningspaden niet praktisch en niet efficiënt is. Volgens deze beheerders kost het uitzetten van de dunningspaden veel tijd en zou een machinist die zich enkel op vaste paden mag bevinden te veel moeite moeten doen om

bomen die ver van hem af staan te vellen. Als gevolg zou het werken met een vast dunningspadensysteem leiden tot extra kosten.

Tot slot waren er twee beheerders die soms werkten met vaste dunningspaden. Zij gaven aan dat ze meestal niet met vaste dunningspaden werkten in oude bossen of bij kaalkappen. In plaats van het markeren van de rijroutes lieten ze dan de machinist zelf zijn eigen route bepalen. De reden voor het niet werken met vaste dunningspaden in ouder bos was dat het aanleggen van dunningspaden in oud bos weinig hout en geld zou opleveren. Bij een kaalkap lieten ze het aan de machinist over hoe hij dit het makkelijkst kon doen.

7.2.2 Redenen voor het gebruik van vaste dunningspaden

De beheerders die wel met een vast dunningspadensysteem werken doen dit voornamelijk om de bodemschade van de houtoogst te beperken. Het idee dat werken met vaste dunningspaden de bodemschade beperkt is sterk verbonden aan de visie van de beheerders op wat er gebeurt als je een harvestermachinist zelf zijn gang zou gaan. Deze kijk is compleet tegenovergesteld aan de kijk van beheerders die geen gebruik maken van vaste dunningspaden. Beheerders die wel gebruik maken van vaste dunningspaden waren namelijk van mening dat als je een harvestermachinist zelf zijn gang zou laten gaan dat de paden veel dichter op elkaar zouden komen te liggen dan wanneer zij de paden zouden markeren. Hun redenering is dat een machinist bomen het liefst zo dicht mogelijk bij zijn machine velt, omdat de machinist dan meer controle heeft over de te vellen boom. Bovendien zeggen de beheerders dat een machinist (met name in oudere opstanden) zonder gemarkeerde routes kris kras door de opstand zou rijden van bles naar bles. Kris kras rijden zou als gevolg hebben dat een groter deel van de opstand bereden wordt dan nodig is en er dus meer bodemschade optreedt.

“ En je kan je ook afvragen van waarom geef je dat aan, die paden? Want er zijn ook mensen die zeggen dat die machinist die heeft er zelf ook belang bij heeft om in zo min mogelijk slagen het bos door te gaan. Dus je hoeft die dunningspaden helemaal niet aan te geven want hij heeft helemaal geen zin om zo veel mogelijk door dat bos heen en weer te crossen. Maar die redenatie die kopt in mijn ogen niet, omdat die capaciteit van die machine is het grootst dicht bij de machine... Dus hij rijdt liever een paar keer extra op en neer en dat hij sneller kan dan dat hij er minder vaak door rijdt maar met minder vermogen. Dus hij legt ze liever dichter bij elkaar, soms wel op 12m of 15m. Dus je kunt wel uitrekenen wat je dat aan extra bosoppervlak kost. ” 14

Een ander argument dat veel werd genoemd was dat beheerders het werken met vaste dunningspaden duidelijk vonden werken in de communicatie met de aannemer. Doordat er precies op papier staat vastgelegd waar een machinist zich wel en niet mag bevinden kunnen afspraken makkelijk worden gecontroleerd. Verder gaven de beheerders aan het fijn te vinden om controle te hebben over waar er wel en niet gereden wordt in het bos. Zo kunnen bijvoorbeeld beschermde flora en fauna en cultuurhistorische monumenten vermeden worden, wat anders lastiger te organiseren is.

“ Volgens mij ziet een machinist niet wat ik zie in een bos. En dat kan van alles zijn. Dat kan een cultuurhistorische wal zijn die door je opstand heen loopt.. of flora en fauna aspecten waar je niet wil dat hij overheen rijdt. Dus die machinist heeft gewoon een andere blik die wil gewoon efficiënt werken, dus dat moet je voor volgens mij gewoon zelf in de hand hebben. ” 13

Tot slot noemde een aantal beheerders dat ze het idee hadden dat de exploitatie met vaste dunningspaden efficiënter verloopt en daarom meer opbrengsten oplevert. Twee beheerders hebben daadwerkelijk ervaringen dat aannemers hogere houtprijzen boden voor een opstand waar een dunningspadensysteem was aangelegd en waarvan de infrastructuur dus op voorhand duidelijk was naar de aannemer.

“...we hebben dat nu een paar keer gehoord van beheerders van “hé, er komt daar een aannemer en die ziet het is geblest door ons met paden en dan willen ze gewoon een hogere houtprijs geven omdat ze weten waar ze aan toe zijn “ ze hebben in principe de hele infrastructuur en alles staat op kaart. Dus ze weten we kunnen efficiënt doorwerken en dat is voor aannemers ook wat waard. “ 13

Eén beheerder noemde ook nog dat door het werken met vaste dunningspaden de kwaliteit van de bomen beter is vergeleken met een opstand waarin kris kras gereden is, met als gevolg hogere opbrengsten.

7.2.3 Methodes van uitzetten en vastleggen van dunningspaden

Aan de beheerders die aangaven met een vast dunningspadensysteem te werken werd vervolgens gevraagd hoe ze precies te werk gingen. Hieruit bleek dat er veel verschil zit in hoe beheerders dunningspaden uitzetten en vastleggen. Hieronder zullen de verschillende methodes die uit de interviews naar voren zijn gekomen worden beschreven.

Methodes van uitzetten

Uit de interviews bleek dat er veel verschil zat in de afstanden die verschillende beheerders aanhouden bij het uitzetten van de dunningspaden. Sommige beheerders gaven aan te streven naar een tussenafstand van 20 meter, maar gaven toe dat de paden in de praktijk vaak wat dichterbij elkaar liggen, soms op 15 of 18 meter van elkaar. Eén beheerder zei, dat indien er bij de eerste dunning met een kleine machine gewerkt werd, er een tussenafstand van 16 meter werd aangehouden. Deze afstand hield hij aan omdat zo'n kleinere machine een maximale reikwijdte heeft van 8 meter. Een andere beheerder gaf aan te werken met een systeem waarbij in eerste instantie de dunningspaden op 12,5 meter van elkaar worden gelegd en een aantal dunningen later over werd gegaan op een 25 meter systeem.

Vijf van de zes beheerders die (meestal) te werken met vaste dunningspaden gaven aan dat de breedte van de paden ongeveer 3,5 a 4 meter bedraagt. Eén beheerder gaf aan dat hij het liefst tijdens de eerste dunning met een kleine machine werkt en dan één rij bomen weghaalt wat neerkomt op een breedte van ongeveer 2,6 meter. Pas in een latere dunningen, wanneer een kleine machine niet meer voldoet en overgegaan wordt op een grotere machine, wordt het pad verbreed tot 3,5 a 4 meter.

Twee beheerders gaven aan het liefst de paden zo recht mogelijk aan leggen, omdat daarmee de minste hoeveelheid oppervlak aan dunningspaden verloren gaat. Drie beheerders gaven aan (soms) te werken met kronkellende paden, of paden met een bochtje aan het begin- of in het midden van het pad. Hiervoor hadden ze verschillende redenen. Sommige beheerders gaven aan dat ze dit puur deden uit persoonlijke voorkeur. Zoals al eerder werd gezegd vinden ook een aantal van de beheerders die wel werken met dunningspaden het idee van rechte 'windtunnels' niet mooi en kiezen er daarom voor om de paden te camoufleren. Andere beheerders kiezen soms voor het gebruik van bochten om de dunningspaden te camoufleren voor recreanten in druk bezochte bossen.

Dit doen ze dan om te voorkomen dat recreanten de dunningspaden als wandelpaden gaan gebruiken.

Methodes van vastleggen

Vier van de zes beheerders die (meestal) met vaste dunningspaden werken leggen deze vast met behulp van kaart en of GPS. Één van deze vier zei ook de dunningspaden in het veld permanent te markeren met blauwe strepen. Verder gaf één beheerder aan dat hij geen van bovenstaande methodes gebruikte om de dunningspaden te markeren, maar dat hij in plaats daarvan wachtte totdat de paden op Google Earth zichtbaar waren om ze op die manier op kaart te hebben. Tot slot was er één beheerder die zei dat hun organisatie nog in de kinderschoenen stond voor wat betreft het werken met dunningspaden en dat ze nog niet zo goed hadden nagedacht over hoe ze deze het beste konden vastleggen. Momenteel gebruiken ze geen van de bovengenoemde methodes en worden de dunningspaden aan de hand van afwijkende vegetatie in het bos terug gevonden.

7.3 Discussie

In deze paragraaf wordt gereflecteerd op de gebruikte methode en de gevonden resultaten. Voor wat betreft de methode zijn er voor dit onderzoek in totaal negen interviews gehouden met beheerders van verschillende organisaties. De geïnterviewden waren bewust geselecteerd, zodat er ongeveer gelijke aantallen wel-, niet- en soms gebruikers van dunningspaden werden geïnterviewd. De resultaten kunnen niet worden gegeneraliseerd voor de populatie beheerders van Nederland, maar geven wel inzicht in verschillende visies op bodemschade en het gebruik van dunningspaden.

Uit de resultaten bleek dat beheerders regelmatig te maken hebben met diepe spoorvorming. Ampoorter et al. (2008) vonden in een veldexperiment dat het rijden met een zware machine nauwelijks tot spoorvorming leidde en in tegenstelling soms de bodem wat loswoelde. Ampoorter et al. (2008) verklaarden deze onverwachte resultaten door een hoge initiële bulkdensiteit. Hoe hoger de bulkdensiteit des te moeilijker is het om een bodem verder te verdichten. Een mogelijke verklaring voor de observaties van de beheerders zou zijn dat de Nederlandse bodems nog niet sterk verdicht zijn en daardoor nog wel makkelijk te verdichten vallen. Een andere verklaring zou zijn dat de sporen het gevolg zijn van het vochtgehalte. Wanneer een bodem verzadigd is met water wordt de bodemdruk namelijk vooral omgezet in opstuwung in plaats van verdichting met als gevolg insporing met nauwelijks verdichting (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008; van de Vreken, van Holm, Diels, & van Orshoven, 2009).

Verder gaven de beheerders aan dat de diepte van de insporing vaak sterk afhankelijk is van het vochtgehalte en het bodemtype. Diepe insporing kwam vooral voor bij natte omstandigheden en op kleibodems. Dit is in overeenstemming de bevindingen van Ampoorter et al. (2008). Die vonden namelijk bij vochtige bereiden kleibodems diepe spoorvorming. Op microreliëf figuren is te zien dat de sporen voornamelijk gevormd waren door opstuwung van de bodem. Daarentegen zijn vochtige zandbodems juist minder gevoelig voor verdichting en spoorvorming dan droge zandbodems.

Uit de resultaten bleek ook dat bijna alle beheerders de schade van gemechaniseerde houtoogst visueel beoordelen aan de hand van de diepte van de insporing. Hierbij werd ook de conclusie getrokken dat de mate van bodemverdichting gecorreleerd is aan de diepte van de insporing. Echter, de diepte van de insporing is niet direct gerelateerd aan de mate van verdichting (Ampoorter, van Nevel, de Vos, Goris, & Verheyen, 2008). Diepe sporen kunnen namelijk het gevolg zijn van erg natte

bodems waarbij de bodemdruk vooral wordt omgezet in opstuwing in plaats van verdichting. Vice versa geldt dat in ondiepere sporen mogelijk meer verdichting is opgetreden. Bovendien vonden Ampoorter et al. (2008) überhaupt nauwelijks insporing na het berijden van de bodem en verklaarden dit aan de hand van de initiële bulkdensiteit. Weinig insporing kan dus ook betekenen dat de bodem al in sterke mate verdicht is zodat verdere verdichting niet of nauwelijks optreedt. Volgens Ampoorter et al. (2008) is het CO₂ gehalte een nauwkeurigere manier om bodemverdichting te meten. Hoge concentraties CO₂ wijzen op verdichte bodems waar gasuitwisseling tussen bodem en atmosfeer gehinderd is.

Het literatuuronderzoek van hoofdstuk drie toonde aan dat bodemverdichting negatief is gecorreleerd aan het kiem- en overlevingssucces van zaailingen en dat bodemverdichting een remmende werking heeft op boomgroei van jonge bomen. Uit de interviews bleek dat sommige beheerders hier een tegenstrijdige visie en/of ervaringen mee hadden. Een mogelijke verklaring hiervoor zou nogmaals zijn dat de sporen waar de beheerders verjonging op zagen mogelijk nauwelijks verdicht konden zijn maar dat er in plaats daarvan vooral opstuwing heeft plaatsgevonden. Echter, deze beheerders gaven ook toe dat ze eigenlijk te weinig kennis hadden van dit thema en dat deze uitspraken puur op hun ervaringen in het veld waren gebaseerd.

Een andere interessante bevinding was dat voor- en tegenstanders van het gebruik van vaste dunningspaden een compleet tegenstrijdig beeld hebben van wat er gebeurt als je enkel de te vellen bomen blest en een machinist verder zijn eigen route laat bepalen. Beheerders die het markeren van dunningspaden overbodig vinden hadden meer vertrouwen in de expertise van de machinist en vertrouwden erop dat die zelf zijn eigen paden zou aanleggen op een zo klein mogelijk oppervlak. Voorstanders van vaste dunningspaden gaven aan dat een beheerder anders naar het bos kijkt dan een harvestermachinist en dat het belangrijk is zelf de controle te hebben waar hij wel en niet mag rijden. Bovendien redeneerden zij dat een machinist er voordeel bij heeft om bomen zo dicht mogelijk bij de machine te vellen en dat die daarom een veel groter oppervlak zou berijden. Volgens Ampoorter et al. (2008) wordt zonder vaste dunningspaden gedurende een generatie ongeveer 70 tot 80% van de bodem bereden.

Beheerders die soms werkten met vaste dunningspaden deden dit meestal niet in oudere bossen of bij kaalkappen. Daarbij werd het aan de machinist gelaten om zijn eigen weg te zoeken. Uit het literatuuronderzoek naar de ecologische effecten van bodemverdichting bleek dat bodemverdichting voornamelijk negatieve gevolgen heeft voor zaailingen en jonge bomen. Het is daarom juist belangrijk in oude opstanden en bij kaalkappen te werken met vaste dunningspaden zodat de volgende generatie kan groeien op zo min mogelijk verdichte bodems.

Tot slot bleek dat er ook een groot verschil zat tussen de visies van beheerders ten aanzien van de kosten en opbrengsten van het werken met dunningspaden. Sommige beheerders dachten dat het aanleggen veel extra kosten met zich mee zou brengen, terwijl andere beheerders zeiden dat werken met paden juist efficiënter is en betere kwaliteit bomen oplevert. De conclusie van hoofdstuk 5 was, dat het werken met dunningspaden geen extra kosten met zich meebrengt en dat op lange termijn werken met dunningspaden 25,8% meer opbrengsten oplevert. Efficiëntie van het werken met dunningspaden is in deze berekening echter niet meegenomen.

7.4 Conclusie

Dit hoofdstuk richtte zich op de opinie van Nederlandse bosbeheerders voor wat betreft de bodemschade die optreedt als gevolg van gemechaniseerde houtoogst en hun visie op het werken met een vast dunningspadensysteem. Deze paragraaf geeft een samenvatting van de gevonden resultaten.

Visie van beheerders op bodemverdichting:

- Beheerders beoordelen bodemschade aan de hand van de diepte van de sporen. Dit is geen nauwkeurige methode voor het meten van bodemverdichting. Nauwkeuriger is het meten van de penetratieweerstand of het meten van het CO₂-gehalte in de bodem.
- Beheerders denken dat de mate van bodemverdichting direct gecorreleerd is aan de diepte van de sporen. Dit is onjuist.
- Alle beheerders schatten de herstelperiode van verdichte bodems op enkele decennia en mogelijk onherstelbaar.
- Veel beheerders zeggen een gebrek aan kennis te hebben over de (langetermijn)effecten van bodemverdichting op verjonging en boomgroei.

Visie van beheerders op het gebruik van dunningspaden:

- Beheerders die aangaven zonder vaste dunningspaden te werken deden dit voor één of meerdere van deze redenen:
 - Visie dat een harvestermachinist het beste zijn eigen route kan bepalen en niet meer rijdt dan nodig is.
 - Visie dat dunningspaden de esthetische waarde van het bos verlagen.
 - Visie dat het aanleggen van dunningspaden veel tijd en geld kost.
 - Voorkomen dat recreanten de dunningspaden als wandelroutes gaan gebruiken.
- Beheerders die er wel voor kiezen om te werken met dunningspaden deden dit voor één of meerdere van deze redenen:
 - Visie dat het gebruik van dunningspaden de bodemschade op opstandniveau beperkt.
 - Visie dat een harvestermachinist zonder aangegeven dunningspaden meer oppervlak berijdt dan nodig is.
 - Het werken met vaste dunningspaden creëert duidelijkheid doordat een aannemer en harvestermachinist precies weet waar hij wel en niet mag rijden.
 - Visie dat werken met dunningspaden efficiënter is en daarom meer opbrengsten oplevert.
- Beheerders gebruiken verschillende methodes voor het uitzetten van dunningspaden.
 - Gebruikte tussenafstanden zijn: ± 20 meter, 16 meter en 12,5 meter die later worden verlegd tot 25 meter.
 - Gehanteerde breedtes zijn: 3,5 tot 4 meter of 2,6 meter bij de eerste dunning die later wordt verbreed tot 3,5 a 4 meter.
 - Sommige beheerders leggen de paden het liefst zo recht mogelijk aan, andere liever kronkelend of met een bocht ergens in het pad.

- Beheerders die dunningspaden vastleggen deden dat met één of meerdere van onderstaande methodes:
 - Intekenen op kaart, vastleggen met GPS, permanent markeren van randbomen met blauwe verf of gebruik van Google Earth.

8. Aanbevelingen

Herstel van verdichte bodems kan in het bos enkel via natuurlijke processen. Dit proces duurt enkele decennia en is in het geval van afwezige bodemfauna soms afwezig. Het voorkomen van bodemverdichting is daarom sterk aan te raden.

Allereerst wordt aangeraden om altijd te werken met vaste dunningspaden. Uit de resultaten is gebleken dat bodemverdichting logaritmisch is gecorreleerd aan de intensiteit van het berijden van de bodem. Om bodemverdichting te beperken is het daarom beter het machineverkeer te concentreren op vaste paden dan het machineverkeer te spreiden. Door te werken met vaste dunningspaden blijft de rest van de bodem gezond of krijgt deze een kans om zich te herstellen wanneer deze reeds verdicht is. Bovendien bleek het werken met vaste dunningspaden op de lange termijn economisch voordelig.

Ten tweede wordt aangeraden houtoogst activiteiten op zandbodems uit te voeren onder vochtige omstandigheden en werkzaamheden op leem- en kleibodems onder droge omstandigheden. Uit de resultaten is gebleken dat bodemverdichting optreedt bij alle bodemtypes, maar dat er verschil zit in kwetsbaarheid afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Zandbodems kunnen de meeste kracht weerstaan onder vochtige omstandigheden ($\pm 12\%$), terwijl leem- en kleibodems het minst gevoelig zijn voor insporing onder droge condities. Het werken onder droge condities wordt momenteel gehinderd door de flora- en faunawet die zegt dat er in het broedseizoen in de zomer geen bomen gekapt mogen worden. Hiervoor is geen directe oplossing aan te dragen. Mogelijk zou de flora- en faunawet herzien moeten worden waarbij afwegingen gemaakt worden wat belangrijker is, het beschermen van de bosbodem of het beschermen van de broedvogels. Houd er echter rekening mee dat zelfs onder optimale omstandigheden het rijden met machines impact heeft op de bodem. Onder natte omstandigheden treedt er bij leem- en kleibodems ook geen verdichting op maar wordt alle bodemdruk omgezet in bodemvervorming. Dit resulteert in diepe sporen met grote zijheuvels. Over de precieze effecten hiervan kan geen uitspraak worden gedaan en is vervolgonderzoek nodig.

Ten derde wordt aangeraden bij houtoogstactiviteiten machines te gebruiken met een lage contactdruk om insporing te minimaliseren. Uit de resultaten is gebleken dat de impact van het rijden met een machine over de bodem afhankelijk is van de contactdruk (kg/cm^2): hoe hoger de contactdruk des te dieper de insporing. Contactdruk kan worden geminimaliseerd door te werken met lichte machines, machines met veel banden, lage bandenspanning en brede banden. Beheerders zouden in de randvoorwaarden een maximum toegestane contactdruk kunnen opnemen.

Ten vierde wordt aangeraden om op de dunningspaden takkenmatten aan te leggen. Het gebruik van takkenmatten verlaagt de contactdruk van de machines op de bodem en vermindert daarmee de insporing. Het gebruik van takkenmatten zou in de randvoorwaarden opgenomen kunnen worden.

Ten vijfde wordt aangeraden om bij het markeren van dunningspaden uniforme blesmarkeringen te gebruiken zoals weergegeven in bijlage 6.1. Het werken met uniforme blesmarkeringen schept duidelijkheid voor de beheerders en de aannemers.

Tot zesde wordt aangeraden om de dunningspaden voor komende generaties vast te leggen met behulp van GPS en/of kaart. Aangezien het ecologisch en economisch voordelig is om dezelfde paden meerdere generaties te gebruiken, is het handig om deze paden vast te leggen op kaart en of GPS zodat deze na een kaalkap opnieuw gebruikt kunnen worden.

Tot slot wordt aangeraden om vervolgonderzoek te doen naar: de effecten van insporing type 1, de efficiëntie van het werken met dunningspaden, de visie van harvestermachinisten op het werken met vaste dunningspaden en wat er gebeurt indien harvestermachinisten 'de vrij hand' krijgen.

Bibliografie

- Actuelerentestanden*. (2015, december 17). Opgehaald van [actuelerentestanden.nl](http://www.actuelerentestanden.nl): <http://www.actuelerentestanden.nl/sparen/hogste-spaarrente.asp>
- Ampoorter, E. (2011). *Soil compaction due to mechanized forest harvesting: quantification of ecosystem effects and exploration of recovery potential*. Ghent: Ghent University .
- Ampoorter, E., Goris, R., & Verheyen, K. (2010). Maatregelen bij houtoogst. In J. den Ouden, B. Muys, F. Mohren, & K. Verheyen, *Bosecologie en Bosbeheer* (pp. 477-482). Leuven: Acco.
- Ampoorter, E., Goris, R., & Verheyen, K. (2010). Maatregelen bij houtoogst. In J. den Ouden, B. Muys, F. Mohren, & K. Verheyen, *Bosecologie en Bosbeheer* (pp. 477-484). Leuven: Acco.
- Ampoorter, E., van Nevel, L., de Vos, B., Goris, R., & Verheyen, K. (2008). *Validatie en optimalisatie bosvriendelijke houtexploitatie in Vlaanderen*.
- Ampoorter, E., van Nevel, L., de Vos, B., Hermy, M., & Verheyen, K. (2010). Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, 1-27.
- ANB (Regisseur). (2014). *Bodems en machines 2- shade is onomkeerbaar* [Film].
- ANB (Regisseur). (2014). *Bodems en machines 3- bodemverdichting heeft een belangrijke impact* [Film].
- ANB (Regisseur). (2014). *Bodems en machines 4 - sommige bodems zijn gevoeliger* [Film].
- ANB. (2015, november 19). *Het aanduiden van vaste ruimingspistes*. Opgehaald van Ecopedia bouwen aan groenexpertise: <http://www.ecopedia.be/bossen/ruimingspistes>
- ANB, I. K. (Regisseur). (2014). *Bodems en machines 6 - hoe bodemschade voorkomen* [Film].
- Ansorge, D., & Godwin, R. J. (2007). The Effect of Tyres and a Rubber Track at High Axle Loads on Soil Compaction, Part 1: Single Axle Studies. *Biosystems Engineering*, 115-126.
- Aust, W. M., Burger, J. A., Carter, E. A., Preston, D. P., & Patterson, S. C. (1998). Visually determined soil disturbance classes used as indices of forest harvesting disturbance. *Southern Journal of Applied Forestry* , 245-250.
- Bassett, I. E., Simcock, R. C., & Mitchell, N. D. (2005). Consequences of soil compaction for seedling establishment: implication for natural regeneration and restoration. *Austral Ecology*, 827-833.
- Boeije, H. (2010). *Analysis in Qualitative Research*. Londen: Sage.
- Bosgroepen. (2015, September 28). *Home Bosgroepen*. Opgeroepen op September 28, 2015, van Bosgroepen: bosgroepen.nl

- Bosschap. (2010). *Gedragscode bosbeheer 2010-2015 inclusief aanvullingen naar aanleiding van de tussenuitspraak DD. 23 augustus 2012*. Bosschap.
- de Vos, B. (2005). *Bodemcompactie en de invloed op de natuurlijke verjonging van Beuk in het Zoniënwoud*. Geraardsbergen: Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Dickerson, B. P. (1976). Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. *Soil Science Society of America Journal* , 965-966.
- Dirkse, G. M., Daamen, W. P., Schoonderwoerd, H., & Paasman, J. M. (2003). *Meetnet Functievervulling bos Het Nederlandse bos 2001-2002*. Ede: Ministerie van LNV.
- Fisher, R. F., & Binkley, D. (2000). *Ecology and management of forest soils*. New York: Wiley.
- Foil, R. R., & Ralston, C. W. (1957). The establishment and growth of Loblolly Pine seedlings on compacted soils. *Soil Science Society of America Journal*, 565-568.
- Froehlich, H. A. (1979). Soil compaction from logging equipment: Effects on growth of young ponderosa pine. *Journal of soil and water conservation*, 276-278.
- Froehlich, H. A., Miles, D. W., & Robbins, R. W. (1985). Soil Bulk Density Recovery on Compacted Skid Trails in Central Idaho. *Soil Science Society of America journal*, 1015-1017.
- Froelich, H. A., Miles, D. W., & Robbins, R. W. (1986). Growth of young pinus ponderosa and pinus contorta on compacted soil in central Washington. *Forest Ecology and Management*, 285-294.
- Greacen, E. L., & Sands, R. (1980). Compaction of Forest Soils. A review. *Australian Journal of Soil Research*, 163-189.
- Heninger, R., Scott, W., Dobkowski, A., Miller, R., Anderson, H., & Duke, S. (2002). Soil disturbance and 10-year growth response of coast Douglas-fir on nontilled and tilled skid trails in the Oregon Cascades. *Canadian Journal of Forest Research* , 233-246.
- Herbauts, J., Bayad, J. E., & Gruber, W. (1996). Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in middle Belgium. *Forest Ecology and Management*, 193-207.
- Hutchings, T. R., Moffat, A. J., & French, C. J. (2002). Soil compaction under timber harvesting machinery: a preliminary report on the role of brash mats in its prevention. *Soil Use and Management* , 34-38.
- Jansen, S. S., Sevenster, J., & Faber, P. J. (1996). *Opbrengsttabellen voor belangrijke boomsoorten in Nederland*. Wageningen: Landbouwniversiteit Wageningen.
- Kang, B. T., & Lal, R. (1981). Nutrient losses in water runoff from agricultural catchments. In R. Lal, & E. W. Russel, *Tropical agricultural hydrology: watershed management and land use* (pp. 153-161). New York: Wiley.

- Kennisdeling, A. I. (Regisseur). (2014). *Bodems en machines 4 - sommige bodems zijn gevoeliger* [Film].
- Kohn, C., Gaertig, T., & Fründ, H.-C. (2013). Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung. *DBG*.
- Kozłowski, T. T. (1999). Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 596-619.
- Kumar, R. (1999). *Research Methodology: a step-by-step guide for beginners*. Londen: Sage.
- Lockaby, B. G., & Vidrine, C. G. (1984). Effect of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young Loblolly Pine. *Southern Journal of Applied Forestry*, 109-112.
- McDonald, T., Way, T., Löfgren, B., & Seixas, F. (1996). Load and inflation pressure effects on soil compaction of forwarder tires. *Canadian Pulp & Paper Association*, 67-70.
- Mitchell, M., Hassan, A. E., Davey, C. B., & Gregory, J. D. (1982). Loblolly pine growth in compacted greenhouse soils. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 304-307.
- Nooijens, F. (2014). *Rapport Rentabiliteit QD-beheer*. Wageningen.
- Renaud, J., & de Keijzer, P. (2013). De beginselen van financiële rekenkunde. In J. Renaud, & P. de Keijzer, *Investeringsanalyse: Waardering Financiering en risicobeheersing*. Noordhoff Uitgevers bv.
- Ruzicka, K., Ljung, K., Vanneste, S., Podhorska, R., Beeckman, T., Frimi, J., & Benkova, E. (2007). Ethylene regulates root growth through effects on Auxin biosynthesis and transport-dependent Auxin distribution. *The Plant Cell*, 2197-2212.
- Sheriff, D. W., & Nambiar, E. K. (1995). Effect of subsoil compaction and three densities of simulated root channels in the subsoil on growth, carbon gains and water uptake of *Pinus radiata*. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1001-1013.
- Sitech (Regisseur). (2015). *Perfekte Rückegassen anlegen auch ohne Markierungen* [Film].
- Straka, T. J., & Bullard, S. H. (z.j.). *Land Expectation Value Calculation in Timberland Valuation*.
- Tackett, J. L., & Pearson, R. W. (1964). Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil cores. *Soil Science Society Proceedings*, 600-605.
- Tardieu, F. (1994). Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signalling? *Soil & Tillage Research*, 217-243.
- Tardieu, F., Zhang, J., Katherji, N., Bethenod, O., Palmer, S., & Davies, W. J. (1992). Xylem ABA controls the stomatal conductance of field-grown maize subjected to soil compaction or soil drying. *Plant, Cell and Environment*, 193-197.
- Torbert, H. A., & Wood, C. W. (1992). Effects of soil compaction and water-filled pore space on soil microbial activity and N losses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1321-1331.

- van de Vreken, P., van Holm, L., Diels, J., & van Orshoven, J. (2009). *Bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting*. Leuven.
- Virto, I., Imaz, M. J., Fernández-Ugalde, O., Gartzia-Bengoetxea, N., Enrique, A., & Bescansa, P. (2014). Soil Degradation and Soil Quality in Western Europe: Current Situation and Future Perspectives. *Sustainability*, 313-365.
- Wald-Prinz. (2015, november 20). *Rückegassen anlegen: Feinerschließung sichert bodenschonende Holzernte*. Opgehaald van Wald-Prinz.de wald kaufen & verkaufen: <http://www.wald-prinz.de/ruckegassen-anlegen-feinerschliessung-sichert-bodenschonende-holzernte/3436>
- WeeBee, p. (2015, 12 18). *De polariteit van watermoleculen zorgt voor waterstofbindingen*. Opgehaald van Biologie-kennis.nl: <http://www.biologie-kennis.nl/chemie-van-het-leven-deel-2/17-de-polariteit-van-water-moleculen-zorgt-voor-waterstof-bindingen.html>
- Wert, S., & Thomas, B. R. (1981). Effects of skid roads on diameter, height and volume growth in Douglas-fir. *Soil Science Society of America*, 629-632.
- Williamson, J. R., & Neilsen, W. A. (2000). The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, 1196-1205.
- Wolkowski, R. P. (1990). Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth: a review. *Journal of Production Agriculture*, 460-469.
- Wyckoff, P. H., & Clark, J. S. (2005). Tree growth prediction using size and exposed crown area. *Canadian Journal for Forest Research*, 13-20.
- Youngberg, C. T. (1959). The influence of soil conditions, following tractor logging, on the growth of planted Douglas-Fir seedlings. *Soil Science Society Proceedings*, 76-78.

Bijlagen

Bijlage 2.1: Interview vragenlijst beheerders.

Goede dag! Ik ben hier omdat ik graag meer inzicht zou krijgen in de visie van bosbeheerders op de schade als gevolg van gemechaniseerde houtexploitatie en hoe bosbeheerders hiermee omgaan. Daarom zou ik u hier graag wat vragen over willen stellen.

Heeft u bezwaar als ik dit interview opneem? Dit helpt mij doordat ik het gesprek later nog eens kan terug kan luisteren en zodat ik geen aantekeningen hoeft te maken. Zodra ik klaar ben met dit onderzoek zullen de opnames worden verwijderd en u blijft anoniem.

1. Hoe zou u de bosbodem beschrijven na afloop van een gemechaniseerde houtoogst?
 - a. Sporen
 - b. Verdichting → ik heb u bodemverdichting niet horen noemen, waarom niet?
 - c. Overig

Ik zou het graag specifiek met u hebben over het onderwerp bodemverdichting...

2. Vindt u bodemverdichting van gemechaniseerde houtoogst een probleem?
 - a. Waarom wel?
 - b. Waarom niet?
3. Wat zijn naar uw idee de grootste effecten van bodemverdichting op het bosecosysteem?
 - a. Bodemstructuur
 - b. Lucht- & waterhuishouding
 - c. Fysiologisch functioneren van planten
 - d. Verjonging
 - e. Boomgroei → (voorbeeld follow up) en hoe zou u de gevolgen beschrijven voor de boomgroei?
 - f. Overig
4. Zit er volgens u verschil in kwetsbaarheid voor bodemverdichting bij verschillende bodemtypes (klei, leem, zand) en wat zijn deze verschillen?
5. Heeft u het idee dat de bodemschade die bij exploitaties in het verleden is ontstaan inmiddels is hersteld?
 - a. Zo ja → Hoe lang heeft dit geduurd?
 - b. Zo nee → Wat is naar uw idee de herstelperiode van verdichte bodems ?
 - i. Verschil per bodemtype?
6. Zouden er volgens u houtoogstmethodes gebruikt moeten worden die bodemschade minimaliseren?

7. Neemt u maatregelen in uw bosbeheer om bodemschade te voorkomen?
- Nee
 - Machineverkeer spreiden
 - Machineverkeer concentreren (dunningspaden)
 - Werkwijze (bandbreedte, bandenspanning, takken, weersomstandigheden)

Ik zou het graag specifiek hebben over de door u (nog niet) genoemde dunningspaden...

8. Maakt u zelf gebruik van dunningspaden?
- Nee → 9
 - Soms → 10, 11, 12, 13
 - Ja → 11, 12, 13
9. Wat zijn uw redenen om geen gebruik te maken van dunningspaden?
- Kosten
 - Niet nodig, nooit gebruikt...
 - Gebrek aan kennis
 - Lelijk
 - Opdrachtgever
 - Overig
10. Hoe gaat u te werk als u dunningspaden gaat aanleggen?
- Afstand paden
 - Breedte
 - Gebruik kompas?
 - Gebruik kaart
11. Wat zijn uw beweegredenen voor het wel gebruiken van dunningspaden?
- Beperking bodemschade
 - Bovengrondse schade
 - Efficiëntie
 - Overzichtelijk
 - Overig
12. Wat is er volgens u nodig om meer collega bosbeheerders over de streep te krijgen om ook gebruik te gaan maken van dunningspaden?
13. Is er volgens u nog iets belangrijk betreffende bodemverdichting en het gebruik van dunningspaden wat we nog niet besproken hebben?

Hartelijk dank voor uw medewerking!


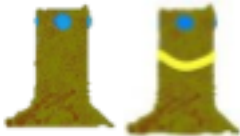








Bijlage 5.1: Opbrengsttabel grove den groeiklasse 10 (Jansen, Sevenster, & Faber, 1996).

GROVEDEN							Groeiklasse 10							
t	BLIJVENDE OPSTAND						DUNNING				BIJGROEI			t
	h_{dom}	N	G	d_g	h_g	V	N_d	G_d	d_d	V_d	Ic_G	Ic_V	Im_V	
15	6,5	5000	15,45	6,3	5,3	48					1,80	9,5	3,2	15
20	9,1	3194	18,48	8,6	7,7	80	1806	5,96	6,5	26	1,75	12,7	5,3	20
25	11,6	2099	20,69	11,2	10,0	113	1094	6,21	8,5	34	1,61	13,9	6,9	25
30	13,8	1444	22,37	14,0	12,1	145	655	5,93	10,7	38	1,44	14,2	8,1	30
35	15,7	1038	23,67	17,0	14,1	175	406	5,48	13,1	40	1,27	13,8	9,0	35
40	17,4	778	24,66	20,1	15,9	201	260	4,95	15,6	40	1,11	13,0	9,5	40
45	18,9	605	25,42	23,1	17,6	225	173	4,40	18,0	39	0,96	11,9	9,8	45
50	20,2	487	26,02	26,1	19,0	245	118	3,86	20,4	36	0,83	10,7	10,0	50
55	21,3	404	26,49	28,9	20,3	262	83	3,36	22,7	33	0,71	9,5	10,0	55
60	22,3	345	26,86	31,5	21,3	277	60	2,90	24,9	30	0,60	8,3	9,9	60
65	23,1	301	27,16	33,9	22,3	289	44	2,49	26,8	27	0,51	7,2	9,7	65
70	23,7	268	27,40	36,1	23,1	300	33	2,13	28,7	23	0,44	6,2	9,5	70
75	24,3	242	27,59	38,1	23,7	308	25	1,81	30,3	20	0,37	5,4	9,3	75
80	24,8	223	27,75	39,8	24,3	316	19	1,54	31,7	18	0,31	4,6	9,0	80
85	25,2	208	27,87	41,3	24,8	321	15	1,31	33,0	15	0,26	3,9	8,7	85
90	25,6	195	27,98	42,7	25,2	326	13	1,15	34,2	13	0,25	3,6	8,4	90
95	25,9	183	28,09	44,2	25,6	331	12	1,15	35,3	13	0,25	3,5	8,2	95
100	26,1	172	28,19	45,6	25,9	334	11	1,15	36,5	14	0,25	3,4	7,9	100

Bijlage 5.2: Opbrengsttabel grove den groeiklasse 8 (Jansen, Sevenster, & Faber, 1996).

GROVEDEN							Groeiklasse 8							
t	BLIJVENDE OPSTAND						DUNNING				BIJGROEI			t
	h_{dom}	N	G	d_g	h_g	V	N_d	G_d	d_d	V_d	Ic_G	Ic_V	Im_V	
15	5,8	5000	13,02	5,8	4,7	36					1,54	7,2	2,4	15
20	8,1	3776	17,51	7,7	6,8	68	1224	3,41	6,0	13	1,56	10,1	4,0	20
25	10,3	2576	19,65	9,9	8,7	96	1200	5,33	7,5	26	1,43	11,3	5,4	25
30	12,2	1834	21,33	12,2	10,6	123	743	5,10	9,3	29	1,28	11,5	6,4	30
35	14,0	1359	22,63	14,6	12,4	149	474	4,72	11,3	31	1,13	11,2	7,1	35
40	15,5	1046	23,64	17,0	13,9	172	313	4,27	13,2	31	0,99	10,5	7,6	40
45	16,8	834	24,43	19,3	15,3	193	212	3,80	15,1	30	0,85	9,7	7,8	45
50	18,0	686	25,05	21,6	16,6	210	148	3,34	16,9	28	0,73	8,7	8,0	50
55	18,9	580	25,55	23,7	17,6	226	106	2,90	18,7	26	0,63	7,7	8,0	55
60	19,8	502	25,94	25,7	18,6	239	78	2,51	20,3	23	0,54	6,8	7,9	60
65	20,5	444	26,26	27,4	19,4	250	58	2,16	21,8	21	0,46	5,9	7,8	65
70	21,1	400	26,52	29,1	20,0	259	44	1,85	23,1	18	0,39	5,1	7,6	70
75	21,6	366	26,73	30,5	20,6	267	34	1,57	24,3	16	0,33	4,4	7,4	75
80	22,0	339	26,90	31,8	21,1	273	27	1,34	25,4	14	0,28	3,7	7,2	80
85	22,4	318	27,04	32,9	21,5	279	21	1,15	26,3	12	0,25	3,3	7,0	85
90	22,7	299	27,17	34,0	21,9	283	19	1,12	27,2	12	0,25	3,2	6,8	90
95	23,0	281	27,30	35,2	22,2	288	18	1,12	28,1	12	0,25	3,1	6,6	95
100	23,2	264	27,42	36,4	22,5	291	17	1,12	29,1	12	0,25	3,1	6,4	100

Bijlage 6.1: Uniforme blesmarkeringen (P. Kah, persoonlijke communicatie, 2015).

TE HANDHAVEN:		
<i>T-elementen</i> Blauwe stip	Te sparen toekomstboom, twee stippen tegenoverstaand	
<i>FF-elementen</i> Blauwe stip Geel lint	Te sparen FF boom/locatie Vier blauwe stippen rondom Geel lint	
<i>Permanent harvesterpad</i> Blauwe strepen	Ingang harvesterpad Twee blauwe strepen binnenzijde boom beide zijden pad	
<i>Permanent harvesterpad</i> Blauwe streep	Volgrichting harvesterpad Eén blauwe streep binnenzijde boom beide zijden pad harvesterpad	
<i>QD-boom</i>	Te sparen QD-boom, Witte band rondom	
TE OOGSTEN:		
<i>Vellen</i> Rode verf	Te vellen boom 3 rode stippen rondom	
<i>Vellen</i> Rode streep	Hoekpunten groepenkap Brede rode band aan binnenzijde groep	
<i>Velali</i> Rood kruis	Vellen en laten liggen Twee rode kruizen tegenoverstaand	
<i>Harvesterpad</i> Rode I	Ingang harvesterpad Voor en achterkant boom	
<i>Harvesterpad</i> Rode I	Volgstreep harvesterpad Voor en achterkant boom	
<i>Harvesterpad</i> Rode pijl	Rijrichting harvesterpad	