

# **KARTERING EN MONITORING VAN** **BOOMWORTELS IN URBANE CONTEXT** EEN EVALUATIE VAN DE ALGEMENE INZETBAARHEID VAN GRONDRADAR

Feria Verschraegen

Stamnummer: 01707489

Promotoren: Prof. Dr. ir. Philippe De Smedt en Dr. Lieven Verdonck

Tutoren: Prof. Dr. ir. Hans Verbeeck en Prof. Dr. ir. Kim Calders

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad in Master of Science in de bio-ingenieurswetenschappen: land, water en klimaat

Academiejaar: 2021 - 2022





De auteur, tutoeren en promotoren geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit de masterproef.

Gent, 10 juni 2022

De promotoren,

De tutoeren,

De auteur,

Prof. Dr. ir. Philippe De Smedt

Prof. Dr. ir. Hans Verbeeck

Feria Verschraegen

Dr. Lieven Verdonck

Prof. Dr. ir. Kim Calders





## Woord Vooraf

Met het schrijven van dit dankwoord leg ik de laatste hand aan mijn masterproef, het sluitstuk van mijn opleiding Master in de bio-ingenieurswetenschappen: land, water en klimaat. Graag zou ik enkele mensen willen bedanken die mij tijdens deze intensieve en boeiende periode bijstonden.

Als eerste wil ik mijn promotoren Prof. Dr. ir. Philippe De Smedt en Dr. Lieven Verdonck bedanken voor de intensieve begeleiding afgelopen academiejaar. Bedankt om mij steeds met raad en daad bij te staan. Daarnaast wil ik mijn tutoren Prof. Dr. ir. Hans Verbeeck en Prof. Dr. ir. Kim Calders bedanken voor het grondig nalezen van de masterproef en de vele ondersteuning. Bedankt Mengxi Wang, MSc. Xi Peng en ir. Barbara D'hont voor het opmeten van de bovengrondse biomassa met de terrestrische laserscanners. Bedankt Louise Terryn voor de verwerking van de data van de terrestrische laserscans. In Bosland werd ik geholpen door Marjel Van den Boer en de boswachter Eddy Ulenaers, bedankt voor jullie enthousiasme en steun. Bedankt Philip Deman voor jouw raad en hulp bij het gebruik van de sensoren. De kalibratie was niet mogelijk geweest zonder de hulp van ir. Katrien Schaepdryver, Prof. Dr. ir. Kathy Steppe en boomchirurg Stijn Willen, bedankt hiervoor. Bedankt MSc. Gaston Mendoza Veirana voor jouw ondersteuning bij het opstellen van de theoretische modellen. Bij mijn masterproef kreeg ik spontaan hulp en info van Valentijn Van Parys, Dr. Jeroen Verhegge en Dr. Félicien Meunier, bedankt om bij te staan waar nodig.

Mijn bijzondere dank gaat uit naar de groendienst van Stad Gent. Bedankt Wim Moerdijk voor de hulp bij de coördinatie en Egbert Blancquaert voor jouw enthousiasme in mijn onderzoek. Egbert en collega, bedankt voor jullie hulp bij het blootleggen van de boomwortels aan de Coupure Rechts.

Als laatste wil ik mijn familie bedanken. Mijn twee zussen schreven dit jaar ook een masterproef. Bedankt voor de wederzijdse steun en inspiratie. Daarnaast wil ik mijn papa bedanken voor de hulp in Bosland. Tot slot wil ik mijn mama en pluspapa bedanken voor het nalezen van deze masterproef en hun ondersteuning tijdens deze drukke maanden.

Gent, 10 juni 2022

Feria Verschraegen



## Inhoudsopgave

Lijst van afkortingen.....	6
Samenvatting .....	7
1. Inleiding.....	9
2. Literatuurstudie.....	11
2.1. Boomwortelsysteem .....	11
2.1.1. Boomwortels .....	11
2.1.2. Wortelverspreiding .....	12
2.1.3. Worteldiepte .....	14
2.2. Stedelijke context.....	15
2.3. Onderzoeken van boomwortelsystemen .....	17
2.3.1. Destructieve technieken .....	17
2.3.2. Niet-destructieve technieken: GPR-detectie.....	17
2.4. Wortelbiomassa .....	21
2.5. Onderzoeksvragen .....	22
3. Methodologie.....	24
3.1. Locaties .....	24
3.1.1. Coupure Rechts .....	24
3.1.2. Coupure Links .....	26
3.1.3. Bosland.....	28
3.2. Meetinstrumenten.....	29
3.2.1. Radars.....	29
3.2.2. HydraProbe .....	31
3.2.3. Terrestrische laserscanning.....	32
3.3. Proefopstelling .....	33
3.3.1. Proefopstelling Coupure Rechts.....	33
3.3.2. Proefopstelling Coupure Links .....	34
3.3.3. Proefopstelling Bosland .....	35
3.4. Theoretische achtergrond GPR .....	37
3.4.1. Algemeen principe GPR.....	37
3.4.2. Elektromagnetische eigenschappen in diëlektrische materialen.....	37
3.4.3. Parameters .....	40
3.4.4. GPR-gegevens visualiseren.....	43
3.5. Verwerking GPR-profielen.....	45
3.5.1. Dewow .....	45
3.5.2. Time zero correctie .....	46
3.5.3. Verwijderen van achtergrondruis (of background removal).....	47

3.5.4. Gain control.....	47
3.5.5. Migratie .....	48
3.5.6. Procedure verwerking GPR-profielen .....	49
3.6. Theoretisch model .....	49
3.6.1. GprMax-software .....	50
3.6.2. Geometrisch model.....	50
3.6.3. Model .....	52
3.6.4. Inputvariabelen van het model .....	53
3.6.5. Beschrijving modellen .....	58
3.7. Terrestrische laserscanning.....	59
4. Resultaten .....	60
4.1. Coupure Rechts .....	60
4.1.1. Analyse GPR-profielen Coupure Rechts .....	60
4.1.2. GPR-profiel en opgegraven profielvergelijking .....	63
4.2. Coupure Links.....	65
4.2.1. Analyse GPR-profielen Coupure Links .....	65
4.3. Bosland.....	68
4.3.1. Analyse GPR-profielen Bosland .....	69
4.3.2. GPR-profiel en opgegraven profielvergelijking .....	77
4.4. Theoretisch model .....	80
4.5. Koppeling bovengrondse en ondergrondse biomassa .....	84
5. Discussie.....	85
5.1. GPR-metingen .....	85
5.1.1. Problemen GPS en verwerking profielen .....	85
5.1.2. GPR-profielen .....	85
5.1.3. Invloed frequentie en type radar .....	88
5.1.4. Grootte boomwortels Bosland.....	89
5.1.5. Invloed bodemprofiel en watergehalte .....	90
5.1.6. Diepte-inschatting van de boomwortels in Bosland .....	91
5.2. Modellen .....	92
5.2.1. Limieten van de kalibratie .....	92
5.2.2. Invloed watergehalte en bodemtype.....	92
5.2.3. Invloed stedelijke context .....	94
5.2.4. Limieten theoretisch model .....	95
5.3. Koppeling met bovengrondse biomassa .....	96
6. Conclusies.....	98
7. Verder onderzoek.....	99
8. Appendix .....	100

8.1. Appendix 1: A-scan Inputfile .....	100
8.2. Appendix 2: Modellen .....	102
9. Referenties .....	112

## Lijst van afkortingen

AGC	Automatische Gain Control
DOV	Databank Ondergrond Vlaanderen
EM	Elektromagnetisch
GPR	Ground-Penetrating Radar
PML	Perfect Matching Layer
QSMs	Quantitative Structure Models
TLS	Terrestrische Laserscanning

## Samenvatting

In onderzoek rond bomen blijven de boomwortels vaak onderbelicht. Nochtans spelen boomwortels een cruciale rol binnen ecosystemen. Daarnaast hebben verschillende condities in de complexe omgeving van de bodem een invloed op de detectie van boomwortels. De niet-destructieve techniek ground-penetrating radar (GPR) heeft veel potentieel in het kwantificeren van de boomwortels en het bepalen van de wortelbiomassa.

Het opzet van dit onderzoek was om na te gaan onder welke condities een optimaal detailinzicht van de wortelstructuur gevisualiseerd kan worden aan de hand van GPR, in een boscontext en stedelijke context. Via voorwaartse modellering werd de invloed van enkele condities op de detectie bestudeerd. Daarnaast werd de koppeling van de ondergrondse en bovengrondse biomassa verkend.

Aan de hand van GPR werden enkel de boomwortels in de boscontext (zandbodem) waargenomen, daar de bodem in de stedelijk context een te grote heterogeniteit kent. De boomwortels met een diameter groter dan 3 cm werden in kaart gebracht met een frequentie van 300, 500 en 800 MHz. De diepte van de boomwortels werden bij deze frequenties ingeschat met een maximale afwijking van 10 cm. Op basis van de theoretische modellen werd aangetoond dat de maximale amplitude van de boomwortel stijgt met een toenemend bodemvochtgehalte tot een optimum en daarna een dalend patroon kent. Verder werd geobserveerd dat een hoger watergehalte in de boomwortel zorgt voor lagere maximale amplitudes. De maximale amplitude vertoonde een lager bereik onder invloed van compactie en een betonlaag. Het was niet mogelijk om een inschatting van de ondergrondse biomassa te maken in de boscontext.

De resultaten van dit onderzoek vormen een belangrijke bijdrage bij de detectie van boomwortels. In een boscontext wordt een groot potentieel gezien voor de inschatting van de ondergrondse biomassa. Verder onderzoek kan diepgaander ingaan op de onderzochte (en eventueel andere) condities en de invloed van de stedelijke context verder bestuderen.





## 1. Inleiding

Wortels zijn bepalend voor de gezondheid en levensduur van bomen. Naast het verzekeren van stabiliteit en toevoer van voedingsstoffen, is de staat van wortels cruciaal voor het functioneren van bomen binnen hun bredere ecosysteem. Dit functioneren wordt bepaald door een samenspel van bodem, hydrologie en de soort-specifieke kenmerken van boomwortelarchitectuur (Gregory, 2006). Vooral in urbane omgevingen is deze interactie vaak complex. Onder invloed van boven- en ondergrondse verharding, vervuiling en complexe waterhuishouding worden de groei en levensduur van bomen vaak beknot (Alani & Lantini, 2020). Het conflict tussen bomen en stedelijke infrastructuur speelt ook in de andere richting, waarbij boomwortels schade aanrichten aan het wegdek of ondergrondse nutsleidingen (Sectie 2.2.).

Klimaatverandering en duurzame ontwikkelingen zorgen voor nood aan geïntegreerde en voorspellende methoden waarbij wortelsystemen een centrale rol zullen spelen in het interpreteren van wereldwijde biologische systemen (Tobin et al., 2007). Onderzoek heeft zich in het verleden voornamelijk gefocust op de ontwikkeling van bovengrondse groei modellen waardoor het studiegebied van de boomwortels achterop loopt en er onvoldoende inzicht en kennis is in de diverse structuren en processen van boomwortels (Tobin et al., 2007). Ook de kwantificering van de wortelbiomassa is onderbelicht in de wetenschappelijke literatuur (Alani & Lantini, 2020). Nochtans is de evaluatie van de wortelbiomassa van cruciaal belang om de totale opslag van koolstof in het ecosysteem te bepalen (Stover et al., 2007). Uit onderzoek van Guo et al. (2013) blijkt dat de niet-destructieve techniek grondradar of ground-penetrating radar (GPR) veel potentieel toont in het kwantificeren van boomwortels en het bepalen van grove wortelbiomassa (diameter > 2 mm, Sectie 2.1.1.). Het slagen van een wortel-detectie met GPR hangt af van verschillende factoren (Liang et al., 2021). Eén van de beslissende factoren is het contrast in diëlektrische eigenschappen tussen de boomwortel en de bodem. Verder hebben ook het watergehalte en kleigehalte van de bodem en de bodemheterogeniteit een invloed op de GPR-detectie (Liang et al., 2021). Een beter begrip van deze factoren is nodig om de effectiviteit van de GPR-detectie te vergroten en beperkingen ervan te onderzoeken (Giannakis et al., 2016).

Het hoofddoel van dit onderzoek is om na te gaan onder welke condities een optimaal detailinzicht van de wortelstructuur gevisualiseerd kan worden aan de hand van GPR. Enerzijds wordt dit onderzocht aan de hand van radarmetingen in een experimenteel onderzoek. Anderzijds wordt de invloed van verschillende condities op de detectie van boomwortels geanalyseerd aan de hand van modellen via een voorwaartse modellering. Verder wordt de invloed van een stedelijke context op de boomwortels in kaart gebracht. Tot slot wordt de data van deze masterproef gekoppeld aan reeds

gekende data van terrestrische laserscanning van bovengrondse biomassa om zo te komen tot een schatting van de totale biomassa van een boom.

## 2. Literatuurstudie

### 2.1. Boomwortelsysteem

Wortels vervullen cruciale functies in planten en ecosystemen. De architectuur van wortels is complex en varieert tussen en binnen plantensoorten (Gregory, 2006). Door deze complexiteit en het feit dat wortels moeilijk te bestuderen zijn aangezien ze onder het bodemoppervlak liggen, is de kennis van de boomwortels en hun interactie met de omgeving beperkt (Alani & Lantini, 2020).

#### 2.1.1. Boomwortels

Boomwortels zorgen voor verankering en ondersteuning in de grond. Daarnaast zijn ze verantwoordelijk voor de opname van water en mineralen en de opslag van koolhydraten. Ook beschikken ze over tal van synthetische functies, zoals de synthese van plantenhormonen, en zijn ze een sensor voor waterstress (Day et al., 2010; Gregory, 2006).

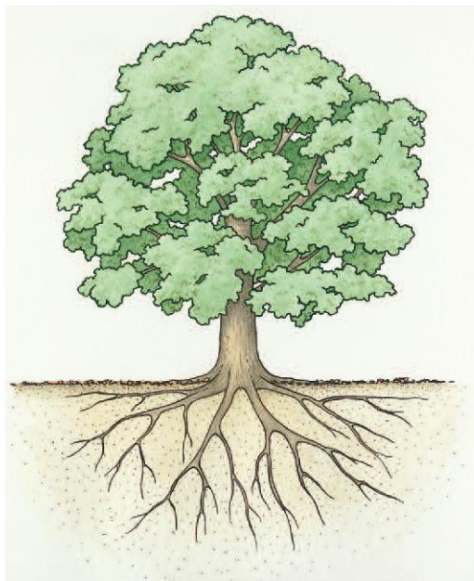
Door de complexe structuur worden boomwortels vaak ingedeeld in categorieën om de analyse van gegevens te vergemakkelijken tijdens modelleringen. Verschillende definities en methodes worden gehanteerd om de wortels in te delen in categorieën omdat het onmogelijk is om een gemeenschappelijke classificatie te vinden voor alle soorten (Danjon & Reubens, 2007).

De voornaamste indeling is op basis van de diameter in grove en fijne wortels (Tobin et al., 2007). Grove wortels hebben een stijve structuur doordat ze een secundaire groei hebben doorgemaakt (Alani & Lantini, 2020). De secundaire groei bestaat uit de vorming van secundaire vaatweefsels gedreven door het cambium en de vorming van periderm door het kurkcambium (Gregory, 2006; Pallardy, 2008). Deze wortels worden ook structurele wortels genoemd aangezien ze verantwoordelijk zijn voor het verankeren van de boom in de grond en ze een meerjarige levensduur hebben (Pallardy, 2008). In de zone binnen één tot twee meter van de stam vertonen de structurele wortels een aanzienlijke secundaire verdikking (Alani & Lantini, 2020). Buiten deze zone komen structurele wortels voor die zorgen voor extra verankering en als leidingen dienen voor transport over lange afstand van water, voedingstoffen en metabolieten (Day et al., 2010). De structurele wortels omvatten het grootste gedeelte van de wortelbiomassa maar vormen slechts een klein percentage van de totale wortellengte en het worteloppervlak (Day et al., 2010). Daarnaast wordt het worteloppervlak gedomineerd door een uitgebreid netwerk van fijne wortels (diameter < 2 mm) die geen secundaire groei ondergaan (Alani & Lantini, 2020). Fijne wortels hebben een levensduur van enkele dagen tot weken, afhankelijk van de bodemcondities en de temperatuur (Pallardy, 2008). Deze wortels worden ook zuigende wortels genoemd aangezien ze verantwoordelijk zijn voor de opname van water en voedingsstoffen, de synthese van wortelhormonen, het uitscheiden van wortellexudaten (dit zijn door

de plant gesecreteerde en ge-excreteerde organische stoffen (Van Bost, 2014)) en de symbiose met bodemmicro-organismen (Pallardy, 2008). De indeling in grove en fijne wortels kan nog worden opgedeeld in andere subcategorieën op basis van morfologische en fysiologische verschillen (Tobin et al., 2007).

### 2.1.2. Wortelverspreiding

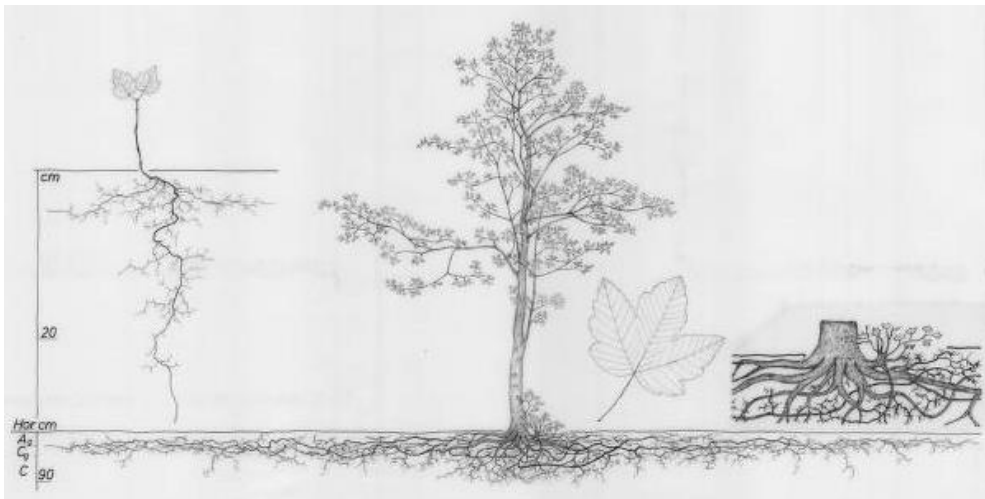
Een veel voorkomende misvatting is dat het wortelstelsel van een boom een weerspiegeling is van de stam en takken (Figuur 2.1, Crow, 2005; M. Dobson, 1995). In het algemeen is het wortelsysteem van een boom relatief ondiep en horizontaal breed verspreid. Het is ongebruikelijk voor wortels om tot een diepte van meer dan 2 m door te dringen en ongeveer 90% van de totale wortellengte van de boom bevindt zich doorgaans in de bovenste 1 m van het bodemprofiel (Figuur 2.2 en 2.3, Crow, 2005; M. Dobson, 1995). Dit blijkt ook uit een grote dataset van worteldistributies bij bomen die ontworteld werden in oktober 1987 na een storm in Engeland (Gasson & Cutler, 1990). Gasson & Cutler (1990) observeerde dat geen enkele boomwortel dieper dan 3 m was gelegen en dat slechts 5% van de bomen een worteldiepte van meer dan 2 m had.



Figuur 2.1: Het algemeen aanvaarde idee van het wortelstelsel van een boom (Crow, 2005).

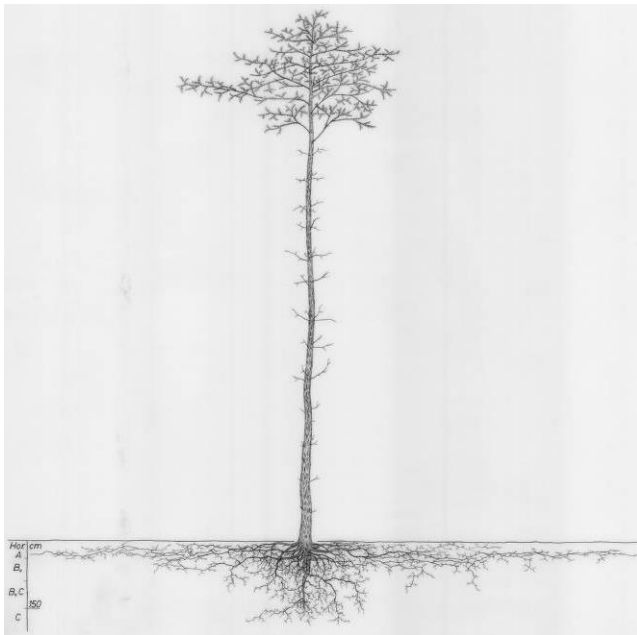
De ontwikkeling van de boomwortelarchitectuur wordt beïnvloed door zowel de boomsoort als de bodemkenmerken (Crow, 2005; Day et al., 2010). In Figuur 2.2 en 2.3 wordt een tekening van het wortelstelsel van een gewone esdoorn (Kutschera & Lichtenegger, 2002a) en een grove den (Kutschera & Lichtenegger, 2002b) weergegeven. De voedingstoffen en het vochtgehalte van de bodem beïnvloeden de behoefte van de wortels om af te dalen naar grotere diepten. Het vermogen om dieper te groeien wordt beperkt door verschillende fysieke eigenschappen, zoals te dichte bodems (Sectie 2.2.), slechte beluchting, lage bodemtemperaturen en de aanwezigheid van gesteentelagen (Alani &

Lantini, 2020). In het algemeen zijn boomwortels plastisch en opportunistisch, ze foerageren als het ware richting voedsel en water (Day et al., 2010). Naast bodemkenmerken hebben ook de leeftijd en gezondheid van de boom, omgevingsstress (Sectie 2.2.) en boomdichtheid (of stand density, het aantal bomen per hectare) een invloed op de worteldistributie. Uit onderzoek blijkt dat de wortelverspreiding voornamelijk afhankelijk is van de boomsoort, de boomdichtheid (Stone & Kalisz, 1991) en de concurrerende soorten (Shainsky & Radosevich, 1992). Verder blijkt dat de wortelverspreiding minder nauw samenhangt met de bodemtemperatuur en bodemkenmerken (Strong & Roi, 1983).



Figuur 2.2: Wortelstelsel gewone esdoorn (*Acer pseudoplatanus*) (Kutschera & Lichtenegger, 2002a).

Om de omvang van de wortelverspreiding in te schatten wordt er meestal gebruik gemaakt van vuistregels. De meest voorkomende is een relatie tussen worteluitbreiding en kruindiameter (Tubbs, 1977). Typische regels schatten de wortelverspreiding als drie keer de kruinverspreiding (Elmendorf et al., 2005) of drie keer de straal van de kruin (Eliades, 2019). Deze inschattingen gaan ervan uit dat er weinig significante fysieke belemmeringen zijn voor de groei van de wortel maar dit is zelden het geval in een stedelijke context (Day et al., 2010). De wortelverspreiding kan bijvoorbeeld worden gestopt na ongeveer 10 cm nadat ze is doorgedrongen onder wegen of trottoirs (Day et al., 2010). Bovendien is er ook weinig gekend over hoe verschillende bomen strijden om water en mineralenopname, wanneer wortels met elkaar in contact komen (Alani & Lantini, 2020). Zelfs wanneer de bodemkenmerken homogeen zijn is het mogelijk dat de wortels niet gelijkmatig verdeeld zijn onder de boom (Day et al., 2010). De wortelverspreidingsonderzoeken moeten dus met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd vanwege de mogelijke methodologische discrepanties (Day et al., 2010).



Figuur 2.3: Wortelstelsel grove den (*Pinus sylvestris*) (Kutschera & Lichtenegger, 2002b).

### 2.1.3. Worteldiepte

Boomwortels groeien waar de omgevingsomstandigheden het toelaten. Bij vergelijkbare omstandigheden varieert de worteldiepte tussen soorten (Day et al., 2010). De worteldiepte wordt niet alleen beïnvloed door de boomsoort maar ook door het type en de toestand van de bodem (Stone & Kalisz, 1991). Zoals beschreven in de vorige paragraaf kan de neerwaartse wortelpenetratie belemmerd worden door slecht beluchte of te dichte bodems, alsook door de aanwezigheid van gesteentelagen of door lage bodemtemperaturen (Alani & Lantini, 2020). In onderzoek van Jackson et al. (1996) wordt aangetoond dat toendra, boreale bossen en gematigd graslanden de ondiepste wortelprofielen hebben, met 80-90% van de wortels in de top 30 cm van de bodem. Woestijnen en gematigde naaldbossen toonden de diepste profielen en hadden slechts 50% van hun wortels in de bovenste 30 cm.

Stone & Kalisz (1991) voerden een uitgebreid onderzoek uit naar de maximale worteldiepte aan de hand van een literatuuroverzicht en rapportages van observaties. Deze samenvattende studie bestudeerde meer dan duizend bomen, afkomstig uit een bos of boomgaard. Er werden tientallen boomsoorten van verschillende leeftijden in honderden verschillende omgevingen geanalyseerd. Stone & Kalisz (1991) concludeerden dat de omvang van wortels strikt gerelateerd is aan de omstandigheden ter plaatse. Verder vonden ze dat de maximale worteldiepte sterk kan variëren van 1 m tot 61 m (Stone & Kalisz, 1991). Er dient opgemerkt te worden dat de data van deze samenvattende studie uitsluitend afkomstig is van bossen of boomgaarden. Bovendien variëren de methoden van de verzamelde onderzoeken dramatisch waarbij soms enkel gefocust wordt op slechts een gedeeltelijke bemonstering of opgravingen van de boomwortels. Dit is begrijpelijk aangezien het uitgraven van

boomwortels arbeidsintensief is. Ook bij stormen die bomen ontwortelen wordt meestal slecht een deel van het wortelstelsel bestudeerd (Day et al., 2010). Bijgevolg moeten de meeste onderzoeken naar de worteldiepte en wortelverdeling met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd omdat het onmogelijk is om elke boomwortel tot aan de punt te volgen (Day et al., 2010). Desondanks geven samenvattende analyses een idee van het bereik van de worteldieptes in verschillende omgevingen.

Volgens Jackson et al. (1996) kunnen er significante verschillen zijn in worteldiepte afhankelijk van de kenmerken van de omgeving. Wortelprofielen zijn het ondiepst in boreale bossen, gematigde graslanden en toendra (Jackson et al., 1996). Dit vanwege de eigenschappen van bodemvocht en beluchting maar ook door de aanwezigheid van fysieke barrières voor verticale wortelgroei, zoals permafrost in toendra's en enkele boreale bossen (Alani & Lantini, 2020). De boomwortels hebben ongetwijfeld een tendens om zich te concentreren in de bovenste bodemlaag. Die is meestal beter belucht en vochtig. Ook bevindt er zich in de bovenste bodemlaag een hogere concentratie aan mineralen dan in de diepere lagen (Alani & Lantini, 2020). Pallardy (2008) stelt dat de worteldichtheid vaak hoger is in de eerste 30 cm onder het grondoppervlak.

In stedelijke gebieden zorgt bodemverdichting (of compactie) voor ernstige belemmering van de wortelpenetratie (Day et al., 2010). De interactie van boomsoorten met de omgeving speelt ook een rol in deze context (Day et al., 2010). Er zijn verschillende voorbeelden van stadsbomen met diepe wortels omdat ze ertoe gedwongen worden om elders voedsel en water te halen. Uit onderzoek naar boomwortels op de campus van de Universiteit van Costa Rica bleken boomwortels enkele meters diep door te dringen (Day et al., 2010). Een mogelijke verklaring zou de stedelijke context van de campus kunnen zijn (Day et al., 2010). Dit werd ook geobserveerd in onderzoek van Jackson et al. (1999) bij twee bomen (*Celtis laevigata* of hackberry en *Ulmus americana* of American iep) in een stedelijke context in de Verenigde Staten. De boomwortels bevonden zich respectievelijk op een diepte van 6 m en 7 m (Jackson et al., 1999). Deze onderzoeken tonen aan dat een stedelijke omgeving bij sommige boomsoorten leidt tot een snelle ontwikkeling van een diep wortelstelsel.

## 2.2. Stedelijke context

Steden hebben steeds meer aandacht voor bomen en vergroening omdat dit noodzakelijk is om de steden duurzamer te maken en de leefbaarheid in deze urbane gebieden te vergroten (Staelens, 2020). In stedelijke gebieden zijn de omstandigheden voor een boom om ongehinderd te groeien meestal niet ideaal omdat ze in deze omgeving meer stress ervaren en zo vroeger sterven (Vlaams Centrum voor Agro- en Visserijmarketing (VLAM), 2019). In Vlaanderen staan straatbomen vaak onder stress in urbane omgeving en worden in deze context nauwelijks 20 à 30 jaar (Vlaams Centrum voor Agro- en

Visserijmarketing (VLAM), 2019). De continue verandering en dynamiek in de infrastructuur en leefomgeving zorgen voor verschillende stressfactoren op de stadsbomen. Deze stressfactoren worden bijvoorbeeld veroorzaakt door het aanleggen van wegen, paden, ondergrondse leidingen en funderingen. Ook werkzaamheden zorgen voor verstoring door bijvoorbeeld de zware machines die de bodem samendrukken (Staelens, 2020). Dit maakt dat het water moeilijker kan infiltreren en de wortels minder goed kunnen doordringen in de bodem. Daarnaast zal deze samendrukking er ook voor zorgen dat zuurstof in de bodem verdwijnt. Hierdoor wordt de ademhaling van de boomwortels afgesnoerd omdat het bacteriële bodemleven is afgestorven (Somerville et al., 2018). Stressfactoren kunnen dus zorgen voor desastreuze gevolgen voor bomen maar ook omgekeerd kunnen bomen zorgen voor problemen in hun omgeving.

Wortels kunnen schade aanrichten aan gebouwen en constructies doordat de boomwortels bij direct contact structuren kunnen optillen tijdens hun groei. Dit doet zich waarschijnlijk meer voor nabij de boomstam omdat de druk die door de wortels wordt uitgeoefend snel afneemt met de afstand (Alani & Lantini, 2020). Ook ondergrondse voorzieningen, zoals rioleringen, worden vaak belemmerd of beschadigd door de groei van wortels. Deze schade treedt meestal op in oude systemen omdat de materialen, zoals bakstenen of beton, na enige tijd verslijten (Randrup et al., 2001). Bovendien hebben wortels de neiging om rond leidingen te groeien aangezien ze aangetrokken worden door het vocht errond en de koelere omgeving (Brennan et al., 1997). Daarnaast kan wortelontwikkeling verstoringen, zoals scheuren of verheffing, veroorzaken op het wegdek (Alani & Lantini, 2020).

Eén van de belangrijkste oorzaken van conflicten tussen boomwortels en infrastructuren is de beperkte ruimte voor de ontwikkeling van bomen in stedelijke context. Bij de keuze welke boomsoort er geplant wordt, moet rekening worden gehouden met de grootte van de boom op volwassen leeftijd (Alani & Lantini, 2020). Wanneer grote bomen worden geplant in steden is er een aanzienlijk gevaar voor windworp wanneer door werkzaamheden de boomwortels zijn doorgesneden en daardoor onvoldoende weerstand bieden tegen de wind (Pokorny et al., 2003).

Een belangrijk probleem in stedelijke gebieden is bodemverdichting of compactie. Bodemverdichting beperkt de wortelontwikkeling omdat ze de beluchting van de bodem vermindert, de lucht- en waterbeweging en het waterhuishoudend vermogen beperkt en de wortelpenetratie belemmert (Boyer & Kramer, 1995). De toegang van de boom tot zuurstof, water en nutriënten wordt beperkt door compactie (Alani & Lantini, 2020).

Andere problemen die wortelgroei in stedelijke omgevingen kunnen verstoren en leiden tot schade aan de weginfrastructuur, is wateroverlast en ernstig watertekort (Boyer & Kramer, 1995; Pokorny et al., 2003). Bodemverzadiging verdringt de lucht in de bodem waardoor de beluchting beperkter wordt



naarmate de diepte toeneemt. Hierdoor worden de wortels gedwongen om in de bovenste delen van het grondoppervlak te groeien. Watertekort zorgt ervoor dat bomen hun bladgroei vertragen, wat resulteert in een overschot aan koolhydraten die beschikbaar worden voor de wortelgroei. De worteldimensies zullen dus bij waterarme planten hoger zijn dan gemiddeld (Alani & Lantini, 2020).

## 2.3. Onderzoeken van boomwortelsystemen

### 2.3.1. Destructieve technieken

De meeste onderzoeken om het wortelstelsel van planten te bestuderen worden uitgevoerd met behulp van destructieve technieken, zoals afgraven of ontwortelen. Deze methoden kunnen een directe meting van de boomwortels opleveren maar ze zijn omslachtig, tijdrovend en vooral destructief (Alani & Lantini, 2020). De schade die deze technieken kunnen toebrengen aan de boomwortels zorgt ervoor dat de boom meer vatbaar wordt voor schimmelinfectie en ziekten die kunnen leiden tot de dood van de boom (Alani & Lantini, 2020). Hierdoor wordt de tijd die onderzoekers aan de sampling van wortels besteden beperkt. In het algemeen wordt er een compromis tussen de praktische haalbaarheid en gewenste precisie gemaakt. Bij fijne wortels is voornamelijk de naverwerking een tijdrovende bezigheid: het wassen van de wortels, manueel verwijderen van vuil en het indelen in verschillende wortelklassen (De Sousa & Gehring, 2010). Bij grove wortels is dit ook een probleem aangezien de worteldiameters niet overal gelijk zijn. Er is dus een groot sample volume nodig om ook de relatief zeldzame wortels met een grote diameter te kunnen treffen. Dit samen met de grote ruimtelijke heterogeniteit maakt onderzoek naar wortels gevoelig voor fouten.

De meest arbeidsintensieve en tijdrovende methode is het opgraven of blootleggen van wortels met schoppen. Een stuk grond kan ook in zijn geheel worden opgegraven door het gebruik van monolieten, dit zijn blokvormige ongestoorde monsters van een bodemprofiel (bv. monster van 20 cm x 20 cm x 20 cm) (Taylor et al., 2013). Dit stuk grond wordt dan geschud of gewassen om zo de wortels los te maken van de aarde. Ook boringen worden gebruikt om onderzoek te voeren naar de structuur, productiviteit en biomassa van wortels. Hierbij kunnen zowel fijne als grove wortels worden bestudeerd (Resh et al., 2003). Naast het opgraven van wortels zijn er nog andere technieken om wortels bloot te leggen (Danjon & Reubens, 2007). De grond tussen de wortels kan aan de hand van water onder druk worden weggespoten of door lucht onder druk worden weggeblazen.

### 2.3.2. Niet-destructieve technieken: GPR-detectie

Niet-destructieve technieken, zoals elektrische weerstandsmetingen (electrical resistivity imaging, Alani & Lantini, 2020), kunnen een interessant alternatief vormen ten opzichte van destructieve technieken vanwege hun laag- of niet-invasieve karakter (Alani & Lantini, 2020). Ook het gebruik van water isotopen als niet-destructieve techniek kan toegepast worden. Deze techniek maakt het

mogelijk om ondergrondse vegetatieconcurrentie voor water te bestuderen (De Deurwaerder et al., 2018). De niet-destructieve techniek GPR wordt hier verder uitgediept omdat deze techniek veel potentieel heeft in het kwantificeren van boomwortels en het bepalen van grove wortelbiomassa (Guo, Chen, et al., 2013).

GPR is een niet-destructieve techniek die ondergrondse structuren kan detecteren als de structuren genoeg verschillen in diëlektrische permittiviteit met de omgeving (Jol, 2009). Deze techniek wint de laatste jaren aan populariteit in de detectie van boomwortels doordat de wortels niet beschadigd worden tijdens de metingen. Dit maakt lange termijn monitoring mogelijk zodat de biomassa of distributie van de wortel in verloop van tijd bestudeerd kunnen worden. Ook wordt deze techniek gekenmerkt door een hoge veelzijdigheid (breed scala aan toepassingen (Jol, 2009)), een snelle gegevensverzameling en het leveren van betrouwbare resultaten, tegen relatief beperkte kosten (Zou et al., 2020).

Hruska et al. (1999) was één van de eersten die deze techniek gebruikte om boomwortels in kaart te brengen. In dit onderzoek werd de distributie van de grove wortels van een aantal eiken (*quercus petraea*) nagegaan binnen een vierkant van 6 m bij 6 m met een antenne van 450 MHz. Hierbij werden op de verschillende radarprofielen eerst de reflecties gedetecteerd en daarna werden deze reflecties van de profielen subjectief met elkaar verbonden (Hruska et al., 1999).

Worteldetectie met GPR werd sindsdien al in verschillende studies uitgevoerd (Alani & Lantini, 2020). De belangrijkste belemmering bij het in kaart brengen van het complete wortelsysteem met GPR is dat clusters van wortels (m.a.w. overlappende, dicht bij elkaar liggende wortels) één grote hyperbolische reflectie geven (Butnor et al., 2001). Hierdoor kan er geen onderscheid worden gemaakt tussen individuele wortels (Butnor et al., 2001). Hirano et al. (2009) concludeerde dat overlappende wortels niet werden geïdentificeerd met GPR. Dit hangt sterk af van de frequentie die wordt toegepast, want deze bepaalt de (verticale) resolutie (Zhang et al., 2019). De verticale resolutie van een GPR wordt bepaald door het vermogen om twee signalen die met verschillende tijdsintervallen worden uitgezonden, te onderscheiden (Zhang et al., 2019). Het niet kunnen onderscheiden van overlappende wortels leidt tot een onderschatting van de verspreiding en biomassa van grove wortels (Hirano et al., 2009). Verder worden veel onderzoeken uitgevoerd onder gecontroleerde omstandigheden (Barton & Montagu, 2005). Deze onderzoeken geven dus afwijkingen bij ex-situ toepassingen voor het in kaart brengen van boomwortels.

De waarneming van ondergrondse structuren met GPR valt of staat met het contrast in diëlektrische permittiviteit van het object in de bodem en de omgeving. Dus hoe groter dit contrast, hoe beter het

signaal (Alani & Lantini, 2020). Verschillende factoren in het bodem-wortelsysteem hebben invloed op de grootte van dit contrast en dus het detectievermogen van de radar.

#### 2.3.2.1. Watergehalte

Over het algemeen is het watergehalte de meest dominante factor onder de diëlektrische eigenschappen in bodems (Hagrey, 2007). Hoe hoger het verschil in watergehalte tussen de wortels en de bodem, hoe beter het contrast kan waargenomen worden in het reflectiepatroon van de radar (Hirano et al., 2009). Water heeft een hoge relatieve diëlektrische permittiviteit (81) in vergelijking met droog hout (4,5) en lucht (1) (Guo, Lin, et al., 2013a; Hagrey, 2007). De relatieve diëlektrische permittiviteit van een boomwortel (dit is een combinatie van droog hout, lucht en water) is dus gedomineerd door het watergehalte (Hagrey, 2007). Verder is de elektrische geleidbaarheid van houtachtig materiaal sterk gecorreleerd met het watergehalte (Straube et al., 2002). Het watergehalte van de wortels en het contrast met de bodem is dus een cruciale factor die de detectie van de wortel door GPR beïnvloedt (Guo, Lin, et al., 2013a).

In de meeste geofysische en bodemkundige studies wordt een waarde tussen 4 en 30 gevonden voor de diëlektrische permittiviteit van de bodem (Hagrey, 2007). Studies naar de diëlektrische permittiviteit en het volumetrisch watergehalte van wortels zijn schaars (Butnor et al., 2001). Hagrey (2007) toonde aan dat de diëlektrische permittiviteit van houtcellulose varieert tussen 4,5 en 22 (10-1000 MHz). Een studie met pluggen van de *Cryptomeria japonica* (Japanse cipres) suggereerde dat verschillen in volumetrische waterinhoud tussen bodems en begraven monsters de worteldetectie met GPR beïnvloeden (Dannoura et al., 2008). In een andere studie werden de boomwortels van *Cryptomeria japonica* met verschillende waterinhouden bestudeerd (Hirano et al., 2009). Er werd geconcludeerd dat boomwortels met een volumetrisch watergehalte van minder dan 20% niet konden gedetecteerd worden door GPR (900 MHz). Boomwortels met een gehalte van ongeveer 50% konden wel duidelijk geïdentificeerd worden. Dit resultaat suggereert dat grof houtachtig afval, resterende wortelfragmenten en dode wortels met een lager watergehalte in de bodem niet gedetecteerd kunnen worden met behulp van GPR (Hirano et al., 2009). Verder concludeerde Hirano et al. (2009) dat wanneer het watergehalte van de bodem groter is dan die van de wortels, de wortels niet gedetecteerd kunnen worden door GPR. Verdere onderzoek is noodzakelijk om de relaties tussen het volumetrisch watergehalte, worteldetectie en bodems met verschillende frequenties van GPR, te verduidelijken (Hirano et al., 2009).

#### 2.3.2.2. Bodemtype

De invloed van het bodemtype op het contrast tussen de wortels en de omgeving hangt nauw samen met het watergehalte van de bodem (Hirano et al., 2009). Dit contrast zal het duidelijkst zijn in goed

gedraineerde zandgronden en minder duidelijk in kleibodems en bodems met een hoog watergehalte (Butnor et al., 2001). De aanwezigheid van andere objecten in de bodem heeft ook een invloed. Als deze objecten reflecties veroorzaken is het moeilijk deze te onderscheiden van wortelreflecties. Een homogene bodem, vrij van stenen, puin en andere zaken wordt geprefereerd (Alani & Lantini, 2020). Het spreekt voor zich dat bij het opmeten van wortelstelsel in stedelijke context men geen keuze heeft over desbetreffende factoren. Het voortbewegen van de radars kan ook verhinderd worden door nabijgelegen vegetatie of bij onregelmatige bodemoppervlakken in bebost terrein (Butnor et al., 2001). Een ander aspect dat de opmeting zal beïnvloeden is de aanwezigheid van organisch materiaal in de bodem. Dit organisch materiaal, afkomstig van bijvoorbeeld de restwortels na de vorige oogst, kan gedetecteerd worden met een GPR-scanner (Doolittle, 2009). Het gevolg is dat dode wortels voor levende kunnen worden aanzien en bijgevolg het wortelsysteem geassocieerd met de bomen groter wordt ingeschat dan het in werkelijkheid is.

#### *2.3.2.3. Worteldiameter*

Daarnaast is de detecteerbaarheid van wortels met GPR ook beperkt tot boomwortels met een bepaalde minimale detecteerbare grootte. De minimumdiameter van de boomwortels wordt bepaald aan de hand van de reflecties die worden opgevangen door de radar. Deze reflecties worden beïnvloed door het contrast in permittiviteit, de aangewende frequentie en de grootte van het object (Hirano et al., 2009).

In gecontroleerde omstandigheden is het mogelijk om fijne wortels met een diameter van 0,5 cm te detecteren met een antenne van 1,5 GHz (Butnor et al., 2001). Metingen in het veld hebben aangetoond dat alleen grove wortels met een diameter groter dan 5 cm geïdentificeerd werden met een antenne van 400 MHz (Ow & Sim, 2012). De detecteerbaarheid van wortels met een diameter van 1 tot 10 cm werd nagegaan door Barton & Montagu (2005) bij drie verschillende frequenties: 500, 800 en 1000 MHz. Hierbij werden de wortels ingegraven in een zandbank op 50 cm diepte. De wortels werden gedetecteerd bij alle drie de frequenties en de frequentie van 800 MHz gaf hierbij de duidelijkste resultaten. Cox et al. (2005) toonde aan dat het mogelijk was om wortels met een dikte van minstens 2,5 cm tot op een diepte van 111 cm te detecteren met een 900 MHz ground-coupled antenne. Gelijkaardige resultaten werden gevonden door Hirano et al. (2009) die wortels met een diameter van 1,9 cm kon detecteren op een diepte van 30 cm met een 900 MHz GPR.

#### *2.3.2.4. Hoek*

De hoek waaronder de wortels liggen is ook een belangrijk aandachtspunt bij het detecteren (Tanikawa et al., 2013). Als de scanrichting loodrecht is op de wortelrichting (m.a.w. de wortel wordt loodrecht gescand) wordt een puntreflectie verkregen in het ideale geval (Liang et al., 2020; Zhang et al., 2019).

Doordat de wortels in verschillende richtingen groeien doorheen de bodem, en dus een grillige verspreiding kennen, is dit niet het geval in de praktijk (Liang et al., 2020; Tanikawa et al., 2013). De invloed van de hoek op het bekomen radarsignaal werd onderzocht door Zhang et al. (2019). Ze concludeerden dat het moeilijk was om de hyperbolen te identificeren wanneer de hoek tussen de onderzoekslijn en de richting van de wortel minder was dan 45°. Tanikawa et al. (2013) concludeerde dat wanneer de invalshoek groter dan 45° afweek van de loodrechte op de wortel, er niet langer duidelijke hyperbolen werden ontvangen. Verder waren ongeveer de helft van de wortels moeilijk waar te nemen wanneer men scande in evenwijdige trajecten in één richting (Tanikawa et al., 2013). Een oplossing voor dit probleem is door in meer dan één richting te scannen door een grid systeem toe te passen (Tanikawa et al., 2013). Zhang et al. (2019) concludeerde dat het combineren van concentrische cirkels met orthogonale rasters de detectienauwkeurigheid van de GPR enorm zou verbeteren. Grasmueck et al. (2005) concludeerde dan weer dat een reeks parallelle meetlijnen met een zeer kleine tussenafstand die een vierde van de golflengte benadert een oplossing kan bieden. Boomwortels groeien niet puur willekeurig, ze groeien radicaal weg van de boomstam. De richting die ze daarna volgen wordt beïnvloed door verschillende factoren, zoals de bodemeigenschappen, aanwezigheid van nutriënten, water en eventueel compactie (Sectie 2.1.2.). Desondanks is het nooit zeker onder welke hoek de wortel gescand wordt.

#### *2.3.2.5. Stedelijke context*

Onderzoek heeft zich gefocust op het gebruik van GPR in een stedelijke context (Stokes et al., 2002). GPR is in staat om op betrouwbare wijze wortels te lokaliseren onder trottoirs, wegen, gebouwen of op onstabiele hellingen (Stokes et al., 2002). Ook kan het een nauwkeurige worteltelling geven in verdichte grond onder beton (Bassuk et al., 2011) en asfalt (Cermák et al., 2000). Dit is mogelijk omdat GPR het verschil in permittiviteit meet, m.a.w. het verschil in watergehalte tussen de boomwortels en de bodem (Alani & Lantini, 2020). Hierdoor kan ook het onderscheid tussen wortels en begraven nutsvoorzieningen worden gesignaleerd (Ow & Sim, 2012).

## 2.4. Wortelbiomassa

De kwantificering van de biomassa van boomwortels is naast het herkennen van boomwortels nog steeds een uitdaging (Alani & Lantini, 2020). In het algemeen is de schatting van de massadichtheid van boomwortels cruciaal in de evaluatie van de stabiliteit van de boom zelf en de stabiliteit van de bodem (Alani & Lantini, 2020). Daarnaast is de evaluatie van de wortelbiomassa essentieel voor het begrijpen van de opslag van koolstof in het ecosysteem (Stover et al., 2007).

De totale biomassa van een boom wordt vaak geschat aan de hand van indirecte relaties tussen de biomassa en gegevens van bomen zoals de diameter en de hoogte. De bovengrondse biomassa van

een boom wordt frequent onderzocht (Alani & Lantini, 2020). Dit onder andere aan de hand van de techniek van terrestrische laserscanning (TLS). TLS is een handig hulpmiddel om de biomassa en het volume van bomen te schatten (Liski et al., 2014). Het biedt een effectieve in-situ benadering om de boomstructuur te meten (Liski et al., 2014). Onderzoek naar ondergrondse biomassa loopt achterop ten opzichte van de bovengrondse (Alani & Lantini, 2020). De techniek GPR heeft potentieel getoond bij het schatten van grove wortelbiomassa (Guo, Chen, et al., 2013). Onzekerheid heeft echter nog steeds invloed op de nauwkeurigheid van de bestaande methodologieën. Een beperkende factor voor een juiste schatting van de worteldichtheid is het wortelwatergehalte dat, indien laag, kan leiden tot een onderschatting van de wortelbiomassa (Guo, Chen, et al., 2013).

Onderzoeken naar de koppeling van de bovengrondse en ondergrondse biomassa zijn schaars. Nochtans zijn deze onderzoeken essentieel voor het voorspellen van de totale biomassa en de bepaling van de totale koolstofopslag van een boom. Ook modellering van de ondergrondse structuren van bomen is bijzonder belangrijk voor de berekening van koolstofvoorraden en wijzigingen in deze voorraden (Brunner & Godbold, 2007).

## 2.5. Onderzoeksvragen

Bovenstaand theoretisch kader toont aan dat er nood is aan onderzoek naar boomwortels. Veeleer dan boomwortels te verdelen in categorieën is het de bedoeling om het volledige boomwortelsysteem en de detectie ervan met GPR centraal te stellen in dit onderzoek.

Een eerste opzet van dit onderzoek is om na te gaan onder welke condities een optimaal detailinzicht van de wortelstructuur gevisualiseerd kan worden aan de hand van GPR. Enerzijds wordt dit onderzocht aan de hand van radarmetingen en anderzijds aan de hand van modellen via voorwaartse modellering. Dit vertaalt zich in volgende concrete onderzoeksvragen:

1. *Welke condities hebben een invloed om een optimaal detailinzicht van de wortelstructuur te verkrijgen aan de hand van GPR?*
  - 1.1. *Hoe verschillen deze condities tussen een stedelijke context en boscontext?*
  - 1.2. *Op welke manier is de invloed van deze condities zichtbaar in een theoretisch model?*

Een tweede opzet van dit onderzoek is om de gebruikte data te koppelen aan reeds gekende data van terrestrische laserscanning van bovengrondse biomassa van een boom om zo de totale boombiomassa te bepalen.

2. *Hoe kan GPR-data van de wortelbiomassa en data van terrestrische laserscanning van de bovengrondse biomassa van een boom gekoppeld worden om de totale biomassa van een boom te bepalen?*

- 2.1. *Hoe kan dit bijdragen bij de bepaling van het totale koolstofgehalte van een boom?*
- 2.2. *Welke conclusies kunnen er getrokken worden m.b.t. de relatie tussen boven- en ondergrondse biomassa?*

## 3. Methodologie

### 3.1. Locaties

De mogelijkheden om boomwortels te detecteren op basis van GPR-metingen werden nagegaan door op drie verschillende locaties deze techniek toe te passen. Verschillende factoren hebben invloed op het succes van de GPR-metingen (Sectie 2.3.2.). De invloed van de stedelijke context werd ook meegenomen, hier werden twee bomen geselecteerd. De derde boom bevond zich in een bos.

De Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV, GDI Vlaanderen, z.d.) werd geraadpleegd om informatie over de bodem te verkrijgen (Tabel 3.1).

Tabel 3.1: Informatie over de nabijgelegen boringen en de bodemseries voor de drie locaties (GDI Vlaanderen, z.d.).

	Bodemserie	Type boring	Boornummer	Diepte boring (m)
Coupure Rechts	OB = bebouwde zone	Slagboring	1508-B2020- 01312-B3	8,40
Coupure Links	OB = bebouwde zone	Droge boring	kb22d55w-B1072	10
Bosland	t-Zcg = matig droge zandbodem met duidelijke ijzer en/of humus B horizont	Virtuele boring	-	-

#### 3.1.1. Coupure Rechts

De eerste boom, een Plataan (*Platanus occidentalis*), bevindt zich langs de Coupure Rechts in Gent, ter hoogte van de Theresianenstraat en de fietsersbrug (Figuur 3.1). De exacte coördinaten van de boom zijn: 51° 3' 11.6136" N 3° 42' 35.7084" E. Ten oosten van de boom is er een stuk bodem waarop auto's niet mogen parkeren. Daarnaast is er de fietsersbrug en wat verder is een tramhalte. Ten westen van de boom is een stuk bodem waar auto's mogen parkeren. Voor de boom is er een fietspad dat bestaat uit vierkante tegels en er is een haag tussen het water (Coupure) en het fietspad. Achter de boom ligt de straat, die bestaat uit tramsporen en kasseien (Figuur 3.2). Het DOV Boorrapport (GDI Vlaanderen, z.d.) van eerste locatie geeft aan dat de bovenste laag (0 – 0,5 m) bestaat uit zandige grond (Tabel 3.1). Daarna bevinden er zich tot 1,80 m brokken beton in de bodem.

De Coupure Rechts wordt in 2022 heraangelegd tussen de Rozemarijnbrug en de Contributiebrug (Project Coupure Rechts | Stad Gent, z.d.). De versleten kasseien worden betonstroken, de riolering wordt vernieuwd en er komt een nieuw fiets- en wandelpad langs het water (Figuur 3.3 en 3.4). Hierbij verdwijnen alle veertig parkeerplaatsen tussen de bomen. De eerste reden hiervoor is dat er te vaak slecht geparkeerd wordt waardoor het tramverkeer geblokkeerd wordt (Dedulle, z.d.). Een tweede belangrijke reden is dat de geparkeerde wagens te veel druk zetten op de boomwortels door



bodemverharding. Er komt ook een nieuw fietspad dat minder druk zal uitoefenen op de wortels door een zelfdragende, 'zwevende' constructie op palen (Dedulle, z.d.).

De linden en platanen langs de Coupure behoren tot de oudste bomen van Gent en zijn sinds 2013 beschermd als monument (Coupure en Leie, z.d.). Deze bomen werden oorspronkelijk geplant na de aanleg van de kanalen (ca. 1785) om promenades te creëren (Coupure en Leie, z.d.). De Coupure was toen een uitgestrekte promenade, met een open karakter naar het water (Figuur 3.5). Net als toen wordt de vernieuwde Coupure Rechts zo vlak mogelijk aangelegd en komt er een nieuwe, lagere haag tussen het fietspad en het water (Dedulle, z.d.).



Figuur 3.1: Locatie plataan Coupure Rechts (Gent) (Project Coupure Rechts | Stad Gent, z.d.).



Figuur 3.2: Plataan Coupure Rechts (Gent) (rode pijl duidt kijkrichting aan).



Figuur 3.3: Toekomstbeeld Coupure Rechts ter hoogte van de Theresianenstraat (Project Coupure Rechts | Stad Gent, z.d.).



Figuur 3.4: Toekomstbeeld Coupure Rechts ter hoogte van kruispunt met Rasphuisstraat (Project Coupure Rechts | Stad Gent, z.d.).



Figuur 3.5: Uitgestrekte promenade langs de Coupure (Dedulle, z.d.).

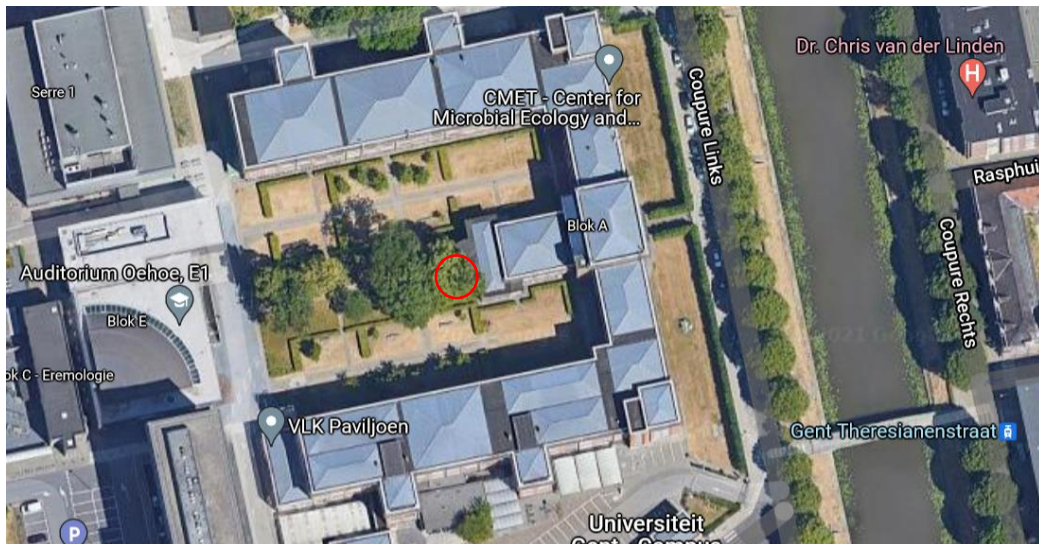
### 3.1.2. Coupure Links

De locatie van de tweede boom, een gewone esdoorn (*Acer pseudoplatanus L.*), bevindt zich in de binnentuin van de Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen in Gent (Coupure Links) (Figuur 3.6). De exacte coördinaten zijn: 51° 3' 12.0276" N 3° 42' 29.5848" E. De boom is onderaan omgeven door beschermplaat (met een beschermdoek of plantendoek) van klimop. Op een paar meter ten oosten van de boom bevindt zich een gebouw. Achter de boom is er een wandelpad (Figuur 3.7). Het DOV Boorrapport (GDI Vlaanderen, z.d.) van tweede locatie geeft aan dat de bodem tot 1,20 m bestaat uit kleihoudend zand daarna tot 2 m uit leem (Tabel 3.1).

Sinds oktober 2015 wordt de esdoorn gemonitord met een hoogte van ongeveer 18 m (Figuur 3.8) ('(BE) Faculty of Bioscience Engineering • TreeWatch.Net', z.d.). Informatie over de boom wordt verzameld met behulp van twee plantensensoren, een sapstroomsensor ontwikkeld in het Laboratorium voor Plantecologie (Laboratory of Plant Ecology, z.d.) en een dendrometer (Natkon Dendrometers, z.d.). De dendrometer detecteert de aan water gerelateerde zwellen en krimp van de stam met een temporele resolutie van minuten (Natkon Dendrometers, z.d.). Verder detecteert het



de groei van het hout en de schors gedurende de seizoenen (Natkon Dendrometers, z.d.). Een bodemvochtsensor wordt gebruikt om de watertoestand van de bodem te monitoren. Meteorologische gegevens zijn beschikbaar via een lokaal FBE-weerstation. Dit Europese project TreeWatch ('(BE) Faculty of Bioscience Engineering • TreeWatch.Net', z.d.) staat onder leiding van professor Kathy Stepe en de Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen van de Universiteit Gent.



Figuur 3.6: Locatie esdoorn Coupure Links (Gent) (Google Maps, z.d.).



Figuur 3.7: Esdoorn Coupure Links (rode pijl duidt kijkrichting aan) ('(BE) Faculty of Bioscience Engineering • TreeWatch.Net', z.d.).

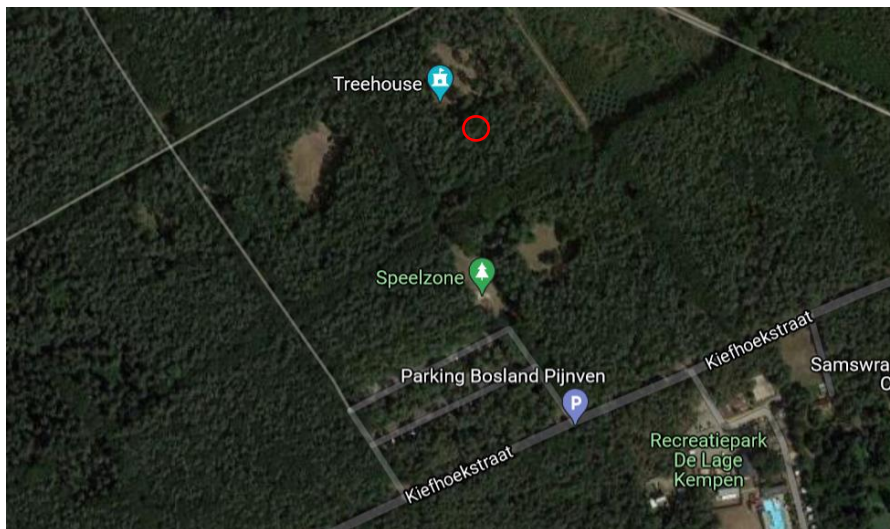


Figuur 3.8: Sensoren Treewatch ('(BE) Faculty of Bioscience Engineering • TreeWatch.Net', z.d.).



### 3.1.3. Bosland

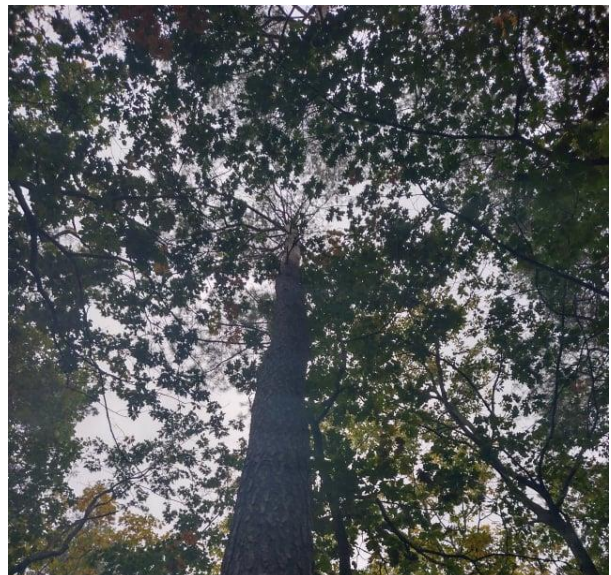
De locatie van de derde boom, een grove den (*Pinus sylvestris*), bevindt zich in Bosland Pijnven, te bereiken via de Kiefhoekstraat in de gemeente Hechtel-Eksel (Figuur 3.9). De exacte coördinaten van de boom zijn: 51° 9' 48.9996" N 5° 18' 38.9088" E. Het Pijnven is een Provinciaal Domein van 2000 ha (Pijnven, z.d.). Op ongeveer 6 km van de boom bevindt zich een militaire basis in Leopoldsburg, het Centrum Basisopleiding en Scholing Noord (CBOS NOORD). De boom bevindt zich in het bos dicht bij de Treehouse ('The Treehouse', z.d.) (Figuur 3.9, 3.10 en 3.11). De bodem in dit gebied is een zandbodem (GDI Vlaanderen, z.d.) (Tabel 3.1).



Figuur 3.9: Locatie grove den in Bosland Pijnven (Google Maps, z.d.).



Figuur 3.10: Grove den Bosland.



Figuur 3.11: Kruin den Bosland.

## 3.2. Meetinstrumenten

### 3.2.1. Radars

Voor de detectie van de boomwortels worden twee verschillende grondradar opstellingen toegepast op de drie locaties. De eerste grondradar is de GSSI UtilityScan DF (Geophysical Survey Systems, Inc., 2022). Dit is een 'impulse' radarsysteem die data verzamelt met behulp van een 'dubbele frequentie' antenne (Geophysical Survey Systems, Inc., 2022). Met andere woorden stuurt de radar een discrete pulse uit en registreert de gereflecteerde amplitude in functie van de tijd. Dit gebeurt gelijktijdig voor een frequentie van 300 en 800 MHz (Geophysical Survey Systems, Inc., 2022). De antenne van 800 MHz meet relatief ondiep (maximum 1-1,5 m) maar geeft een gedetailleerd profiel, gekenmerkt door een hogere (verticale en horizontale) resolutie. De antenne van 300 MHz meet dieper tot enkele meters (afhankelijk van de aard van het materiaal) maar geeft een ruwer profiel met een lagere (verticale en horizontale) resolutie (Geophysical Survey System Inc., 2016). In Figuur 3.12 wordt de opstelling van deze radar weergegeven. Het toestel wordt manueel over het terrein geduwd aan de hand van een driewielige buggy. Het systeem bevat een odometer waardoor er enkel data wordt verzameld wanneer het toestel in beweging is (Figuur 3.12). Hierdoor kunnen de gemeten data gekoppeld worden met de afgelegde afstand. Doordat de radar over de grond wordt geschoven, kunnen lage ruisniveaus verkregen worden (hoge signaal-ruisverhouding) (Geophysical Survey System Inc., 2016). Een nadeel van deze opstelling is dat bij elke lijn die wordt afgelopen met het toestel er slechts één radartransect wordt verzameld (Geophysical Survey System Inc., 2016). De opstelling bevat ook een GPS-ontvanger Leica GS15 Performance (Leica Geosystems AG, 2012). De GPS heeft de bijkomende opties voor ontvangst van Glonass en GPS L5 data en voor het streamen van NMEA-data. Deze laatste optie is belangrijk voor het samenvoegen van GPS- en GPR-data met oog op nauwkeurige positiebepaling van de GPR-metingen. Voor de verwerking en visualisering van de data wordt de software RADAN7 gebruikt (GSSI Geophysical Survey Systems, Inc., 2022). Via deze software is ook de invoer van de GPS-data mogelijk.



Figuur 3.12: Radaropstelling GSSI UtilityScan DF. Onderaan de driewielige buggy is de GPR bevestigd. Op de computer worden de instellingen bepaald en worden de profielen onmiddellijk weergegeven. Bovenaan is de GPS (Leica GS15 Performance) bevestigd en deze is geconnecteerd met de computer. De afgelegde afstand wordt bepaald door de odometer die bevestigd is aan het wiel van de buggy.

De tweede grondradar die wordt toegepast is van het merk Sensors & Software, type pulseEKKO PRO, met een 500 MHz antenne (Sensors & Software Inc., 2022a). Figuur 3.13 geeft de opstelling van deze radar weer. De eigenschappen van deze opstelling zijn gelijkaardig aan de GSSI-radar. Deze grondradar is ook een 'impulse' radarsysteem en functioneert door middel van een odometer. Verder is er een goed contact nodig tussen de antenne en de grond om lage ruisniveaus te verkrijgen. De GPR is niet verbonden met een digitale video logger, maar wordt toegepast in het Spidar-systeem om zo meerdere antennes te combineren (Sensors & Software Inc., 2022b). Dit systeem werkt door middel van een netwerk, met network interface controllers (Sensors & Software Inc., 2010) en een laptop die samen het netwerk vormen. De software SpiView wordt gebruikt om de data te verzamelen (Sensors & Software Inc., 2013). Om de coördinaten van de grondradar te bepalen werd een totaalstation Leica TS15 P gebruikt, met als nauwkeurigheid voor hoekmetingen 3'' (Leica Geosystems AG, 2010b) (Figuur 3.14). De controller is een Leica CS15 (Leica Geosystems AG, 2010a), met o.a. 3.5G voor ontvangst van GPS-correctiesignaal via GSM en radioverbinding voor contact met het totaalstation. De gebruikte GPS is een Leica GS15 Performance (Leica Geosystems AG, 2012). De GPS in deze opstelling werd enkel gebruikt om het totaalstation op te stellen. Op basis van 3 à 4 GPS-metingen kan het totaalstation zijn positie en oriëntatie bepalen in een geprojecteerd coördinatensysteem als UTM of Lambert 72.





Figuur 3.13: Radaropstelling pulseEKKO PRO (500 MHz). Bovenaan de radar wordt de GPS (Leica GS15 Performance) of een prisma (voor het totaalstation) bevestigd. De bekomen data wordt verzameld via de software SpiView via de computer.



Figuur 3.14: Opstelling totaalstation Leica TS15 P.

### 3.2.2. HydraProbe

Belangrijke parameters, zoals de temperatuur, diëlektrische permittiviteit en de conductiviteit, werden gemeten in de bodem en de boom aan de hand van de HydraProbe PROFESSIONAL (Stevens Water Monitoring Systems Inc., 2019b). De HydraGO Field Version sensor (Stevens Water Monitoring Systems Inc., 2019a) werd gebruikt met een frequentie van 50 MHz. De opstelling en de onderdelen van deze sensor worden weergegeven in Figuur 3.15. De sensor in de boom werd bevestigd door eerst vier gaten loodrecht in de boom te boren. Vervolgens werd de sensor ingesmeerd met DC4 electrical compound (DOW corning) (DuPont™, 2018) om de connectie met de boomstam te verbeteren en werd de sensor in de boom geplaatst. De sensor in de boom werd zo laag mogelijk geplaatst. De sensor in de bodem werd nabij een boomwortel geplaatst, waarbij een optimaal contact met de bodem werd verzekerd. De HydraProbe maakt gebruik van unieke ‘coaxiale impedantie diëlektrische reflectometrie’ om consistente langetermijnnauwkeurigheid van vochtgehalte, zoutgehalte en temperatuur in elk

bodemtype te verkrijgen (Stevens Water Monitoring Systems Inc., 2019b). Dit zorgt ook voor een lage variabiliteit tussen sensoren, zodat elke sensor hetzelfde meet zonder dat er per sensor gekalibreerd moet worden (Stevens Water Monitoring Systems Inc., 2019b).



Figuur 3.15: Opstelling en onderdelen van de HydraGO Field Version sensor. De eerste sensor werd loodrecht bevestigd in de boom en de tweede sensor werd verticaal in de bodem dicht bij de boom bevestigd. De logger en kabels van de sensor werden rond de boom bevestigd.

### 3.2.3. Terrestrische laserscanning

De bovengrondse biomassa werd in kaart gebracht aan de hand van terrestrische laserscanning. Voor de boom in Bosland en aan de Coupure Links werd dit gedaan aan de hand van de RIEGL vz-400 scanner (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017). De boom langs de Coupure Rechts werd gemeten met de RIEGL vz-400i scanner (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2022). De opstelling van deze terrestrische laserscanners wordt weergegeven in Figuur 3.16. Beide scanners sturen laserpulsen uit in het near-infrared en de output van de scanners is gelijkaardig.

Elke boom werd gescand vanuit minstens drie locaties, waarbij op elke locatie de scanner zowel in rechtopstaande als gekantelde positie gescand heeft om zo een volledige dekking van de hemisfeer te verkrijgen. De volgende instellingen werden gebruikt voor de riegvl vz-400 scanner: laser pulse repetition rate (herhalingssnelheid) van 300 kHz, met een efficient measurement rate (meetsnelheid in punten per seconde) tot 122 000 measurements/s, een range (bereik) van 1,5-350 m, beam divergence (divergentie) van 0,03 mrad en een angular resolution (hoekresolutie) van 0,04°. De instellingen van de riegvl vz-400i waren: laser pulse repetition rate van 600 kHz, met een efficient measurement rate tot 250 000 measurements/s, range tot 0,5-160 m, beam divergence van 0,03 mrad, en een angular resolution van 0,04°.





Figuur 3.16: Terrestrische laserscanner: (a) riegvlz-400 (b) en riegvlz-400i.

### 3.3. Proefopstelling

#### 3.3.1. Proefopstelling Coupure Rechts

Op 11 februari 2022 werd de bovengrondse biomassa van de boom in kaart gebracht aan de hand van de TLS riegvlz-400i. De eerste testmeting met de GSSI-radar (300 en 800 MHz) ging door op 26 november 2021. Na de analyse van de data bleek er een fout te zijn met de odometer en deze diende opnieuw gekalibreerd te worden. De tweede meting met de GSSI-radar ging door op 17 maart 2022. Bij de analyse van de data bleek dat de GPS-coördinaten van de eerste 10 GPR-profielen die verzameld werden, ontbraken in de output. Er werden veel problemen ervaren met de GPS verbonden aan de GSSI-radar bij de proefopstellingen. Zodra er onder de boom werd gemeten met de GSSI-radar was het GPS-sigitaal zwakker of viel het weg. Daarom wordt aangeraden om in zones met hoge vegetatie met een totaalstation te werken. Op 4 mei 2022 werd een radar-meting uitgevoerd met de grondradar van Sensors & Software (500 MHz) gebruik makend van het totaalstation (Figuur 3.17). Ten slotte werden op 18 mei 2022 een paar boomwortels aan beide kanten van de boom blootgelegd door Stad Gent, aan de hand van een air spade (Figuur 3.18, Sectie 4.1.2.). Een air spade is een lans uit kunststof die in combinatie met een compressor toelaat om onder zeer hoge luchtdruk de grond rondom boomwortels weg te blazen (BoomOntzorging.com, z.d.).



Figuur 3.17: Proefopstelling Coupure Rechts: GSSI-radar met GPS (links), grondradar van Sensors & Software (midden) dat gebruik maakt van een totaalstation (rechts).



Figuur 3.18: Opstelling air spade Coupure Rechts.

### 3.3.2. Proefopstelling Coupure Links

De eerste meting ging door op 10 maart 2022 met de grondradar van Sensors & Software (500 MHz), waarbij gebruik gemaakt werd van een totaalstation (Figuur 3.19). In Figuur 3.20 worden de twee richtingen waarin gemeten werd met de radar aangeduid. De tweede meting ging door op 11 maart 2022 met de GSSI-radar. De coördinaten van de radarmetingen met de GSSI werden niet goed ingelezen, waardoor de data niet bruikbaar was voor de verwerking en analyse. Op 25 mei 2022 werd een tak van de boom gezaagd voor de kalibratie van de HydraProbe (Sectie 3.6.4.4.).





Figuur 3.19: Proefopstelling Coupure Links: grondradar Sensors & Software (links), totaalstation (rechts).



Figuur 3.20: Proefopstelling Coupure Links met aanduiding van de twee richtingen (rode en blauwe pijl) waarin gemeten werd.

### 3.3.3. Proefopstelling Bosland

Op 11 februari 2022 werd de bovengrondse biomassa van de boom in kaart gebracht aan de hand van de TLS riegl vz-400. De HydraProbe werd op 20 maart 2022 geïnstalleerd, de ene sensor werd geplaatst onder aan de boom en de andere werd verticaal in de bodem geplaatst (Figuur 3.15). De sensor begon te loggen om 17u54. De bedoeling was dat de sensor om de 15 min logde tot de volgende dag maar de sensor is gestopt met loggen om 19u15. Dit werd pas opgemerkt op 21 maart 2022 om 14u. Hierdoor is er één meting genomen op 20 maart om 17u57 en een andere op 21 maart om 14u (Tabel 4.3 en 4.4).

De proefopstelling werd opgezet op 21 maart 2022. Eerst werd het bladerdek rondom de boom in een vierkant van 6 m op 6 m verwijderd om een optimaal contact te hebben tussen de radar en de bodem. Figuur 3.21 geeft een 3D-visualisatie van de proefopstelling weer. Met beide radartoestellen werd in verticale transecten (Figuur 3.22) gemeten met een afstand van 10 cm tussen elk transect. Een



totaalstation werd opgesteld om de coördinaten van de transecten bij beide radartoestellen te bepalen. Er werd een gevallen tak van een den meegenomen voor de kalibratie van de HydraProbe (Sectie 3.6.4.4.). Veder werd in elke bodemhorizont een Kopecky ring (roestvrijstalen ring met een volume van 100 cm<sup>3</sup> (5cm x 5cm)) van de bodem genomen om het bodemvochtgehalte te bepalen, nadat de Kopecky-ring 24 uur in een oven van 109° werd geplaatst (Tabel 4.5). Finaal werden op 7 mei 2022 een paar boomwortels uitgegraven ter controle van de GPR-meting (Sectie 4.3.2.).



Figuur 3.21: 3D-visualisatie van de proefopstelling in Bosland, met aanduiding van het startpunt (zwart pijl) en de richting (rode pijl) van de radartransecten.



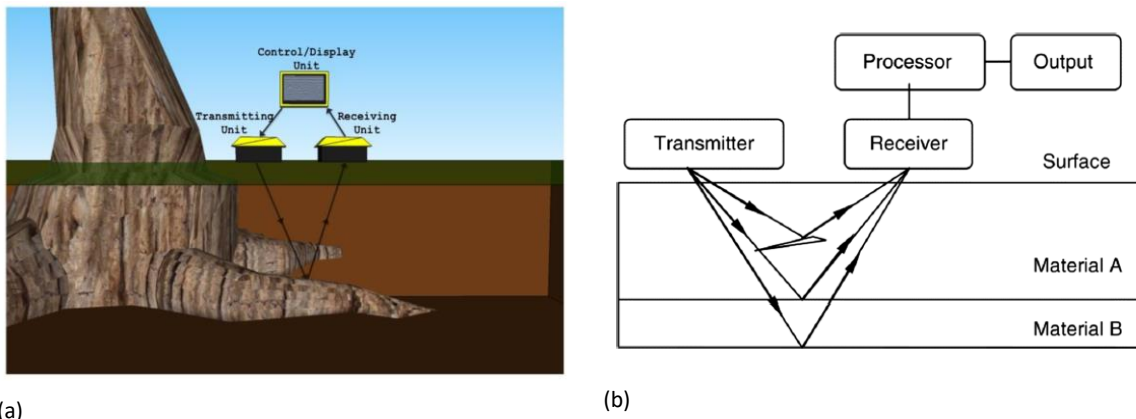
Figuur 3.22: Proefopstelling Bosland: grondradar Sensors & Software met aanduiding van de richting van de gemeten transecten (rode pijlen) (links), en de GSSI-grondradar (rechts).

## 3.4. Theoretische achtergrond GPR

### 3.4.1. Algemeen principe GPR

Een standaard GPR-systeem bestaat uit drie essentiële componenten: een controle eenheid (= control unit), gekoppelde uitzendende en ontvangende antennes (= transmitting en receiving unit) en een beeldscherm (= display unit) (Guo, Chen, et al., 2013) (Figuur 3.23).

Tijdens een GPR-onderzoek genereert de uitzendende antenne korte pulsen van elektromagnetische (EM) energie, die uitgestraald worden in het onderzochte medium. Deze pulsen planten zich voort als golven door de bodem (Daniels, 1996). Onder invloed van de diëlektrische eigenschappen van de bodem en objecten of structuren in de bodem zal de golf verstrooid worden (Guo, Chen, et al., 2013). Bij een sterk contrast tussen de bodem en de objecten kan deze golf gereflecteerd worden (Alani & Lantini, 2020). Deze reflecties worden vervolgens teruggebogen naar het oppervlak waar ze worden opgenomen door de ontvangende antenne. De ontvangende antenne registreert de tijd die de golf heeft afgelegd en zo kan er een link worden gemaakt tussen de plaats van het object in de bodem en de reflectie (Alani & Lantini, 2020). De resterende energie die niet wordt gereflecteerd blijft in het medium reizen totdat ze volledig verzwakt is (Daniels, 1996; Guo, Chen, et al., 2013).



Figuur 3.23: Werkingsprincipes GPR: (a) bij de detectie van een wortel (Ferrara et al., 2014), (b) bij de detectie van twee verschillende materialen (Alani & Lantini, 2020; Dong & Ansari, 2011).

### 3.4.2. Elektromagnetische eigenschappen in diëlektrische materialen

Het principe van een GPR-systeem is gebaseerd op de theorie van EM velden, die wordt beschreven door de Maxwellvergelijkingen (Cassidy, 2009a; Jol, 2009). De werking en effectiviteit van dit systeem is gebaseerd op de kenmerken van de voortplanting van een EM golf of puls, en van zijn reflectie wanneer hij botst op een object of laag die een verandering teweegbrengt in de EM-eigenschappen in de ondergrond (Jol, 2009). Deze veranderingen worden bepaald door drie parameters: de magnetische permeabiliteit ( $\mu$ ), de elektrische geleidbaarheid ( $\sigma$ ) en de diëlektrische permittiviteit ( $\epsilon$ ) (Daniels, 2004). Deze constitutieve vergelijkingen beschrijven de respons van een materiaal met bepaalde EM

eigenschappen wanneer er een EM veld op toegepast wordt (Annan, 2009; Cassidy, 2009a). De combinatie van de EM-theorie met de fysieke eigenschappen van het materiaal zijn essentieel voor een kwantitatieve beschrijving van GPR-signalen (Alani & Lantini, 2020). In deze sectie worden de parameters verder beschreven. Hierbij dient opgemerkt te worden dat niet al deze parameters nuttige informatie leveren voor GPR (Annan, 2009).

De geleidbaarheid beïnvloedt over het algemeen de penetratie van de GPR door attenuatie van de radarsignalen in het medium (Cassidy, 2009). Een medium met een hoog vochtgehalte verhoogt de elektrische geleidbaarheid en zal zorgen voor een afnemende penetratie (Douaa & Hussain, 2015). De invloed van de magnetische permeabiliteit op GPR-signalen (frequentiebereik van de radar) is verwaarloosbaar (Daniels, 2004). Daartegenover biedt de relatieve diëlektrische permittiviteit de hoogste mate van contrast in de gereflecteerde golf (Cassidy, 2009).

#### *3.4.2.1. Elektrische geleidbaarheid*

De elektrische geleidbaarheid (of conductiviteit,  $\sigma$ ) beschrijft het vermogen van een materiaal om het elektrische deel van de EM-golf te geleiden en wordt gemeten in Siemens per meter [S/m] (Annan, 2009). Materialen die meer elektrische geleidend zijn, zullen makkelijker het elektrisch deel van de EM-golf geleiden, waardoor de golf wordt gedempt of gedissipeerd wat resulteert in ondiepe ondergrondse beelden. Omgekeerd, materialen met een lage elektrische geleidbaarheid zullen een grotere diepte van de EM-golf permeatie mogelijk maken (Annan, 2009).

Aangezien GPR een EM-energie uitstuurt, is deze onderhevig aan attenuatie (natuurlijke absorptie) terwijl ze door een materiaal beweegt. Het signaal is in staat om door een materiaal te dringen als de energie door een materiaal met een lage geleidbaarheid beweegt, zoals droog zand, ijs of droog beton. Het signaal blijft dus langer intact en kan daardoor verder in het materiaal dringen. Als het materiaal geleidend is, zoals zout water en nat beton, zal de GPR-energie geabsorbeerd worden voordat ze de kans heeft gehad om diep door te dringen. Een vuistregel van de elektrische geleidbaarheid is: hoe groter het watergehalte van het materiaal, hoe groter de geleidbaarheid (Geophysical Survey Systems, Inc, 2001; Jol, 2009).

#### *3.4.2.2. Relatieve diëlektrische permittiviteit*

De diëlektrische permittiviteit ( $\epsilon$ ) beschrijft het vermogen van een materiaal om een elektrische lading geïnduceerd door een EM-veld, op te slaan en terug af te geven, en wordt gemeten in Farad per meter [F/m] (Annan, 2009; Cassidy, 2009). Het is een beschrijvend getal dat aangeeft hoe snel radar-energie door een materiaal reist (Geophysical Survey Systems, Inc, 2001). Radar-energie zal altijd zo snel mogelijk door een materiaal willen bewegen maar bepaalde materialen vertragen de energie meer dan andere. De snelheid waarmee de GPR-energie beweegt kan worden afgeleid als de waarde van de

permittiviteit gekend is. Met andere woorden, hoe hoger de permittiviteit, hoe langzamer de radargolf door het medium beweegt (Geophysical Survey Systems, Inc, 2001). Nat materiaal zal bijvoorbeeld het radarsignaal vertragen vanwege de aanwezigheid van water die een verhoging van de totale diëlektrische permittiviteit van het materiaal veroorzaakt (Geophysical Survey Systems, Inc, 2001).

Voor GPR is de diëlektrische permittiviteit ( $\epsilon$ ) een belangrijke grootte. Deze wordt vaak relatief ( $\epsilon_r$ ) uitgedrukt ten opzichte van de permittiviteit in vacuüm ( $\epsilon_0$ ) (Annan, 2009):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Met  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m.

In Tabel 3.2 worden typische waarden voor de geleidbaarheid en permittiviteit voor verschillende materialen bij een antennefrequentie van 100 MHz gegeven (Cassidy, 2009). In Tabel 3.3 wordt de permittiviteit en conductiviteit van houtcellulose gegeven bij een GPR-frequentie van 10-1000 MHz (Attia al Hagrey, 2007).

Tabel 3.2: Indicatieve waarden voor de relatieve diëlektrische permittiviteit en de statische (elektrische) conductiviteit voor ondergrondmaterialen bij een antennefrequentie van 100 MHz (Cassidy, 2009).

<b>Materiaal</b>	<b>Statische conductiviteit (mS/m)</b>	<b>Relatieve permittiviteit</b>
Lucht	0	1
Klei – droog	1-100	2-20
Klei – nat	100-1000	15-40
Beton – droog	1-10	4-10
Beton – nat	10-100	10-20
Zoetwater	0,1-10	78 (25°C)-88
Zoewater ijs	1-0,000001	3
Zeewater	4000	81-88
Zeewater ijs	10-100	4-8
Permafrost	0,1-10	2-8
Graniet – droog	0,001-0,00001	5-8
Graniet – gebroken en nat	1-10	5-15
Kalksteen – droog	0,001-0,0000001	4-8
Kalksteen – nat	10-100	6-15
Zandsteen – droog	0,001-0,0000001	4-7
Zandsteen – nat	0,01-0,001	5-15
Schalie – verzadigd	10-100	6-9
Zand – droog	0,0001-1	3-6
Zand – nat	0,1-10	10-30
Zand – kust, droog	0,01-1	5-10
Bodem – zandig, droog	0,1-100	4-6
Bodem – zandig, nat	10-100	15-30
Bodem – lemig, droog	0,1-1	4-6
Bodem – lemig, nat	10-100	10-20
Bodem – kleiig, droog	0,1-100	4-6
Bodem – kleiig, nat	100-1000	10-15
Bodem – gemiddeld	5	16

Tabel 3.3: Waarden voor de relatieve diëlektrische permittiviteit en de elektrische conductiviteit bij een GPR-frequentie van 10-1000 MHz (Attia al Hagrey, 2007).

Materiaal	Statische conductiviteit (mS/m)	Relatieve permittiviteit
Houtcellulose – droog	0.24	4.5
Houtcellulose – nat	4	22

### 3.4.3. Parameters

#### 3.4.3.1. Diepte van object

De diepte van een boomwortel (of object) kan afgeleid worden uit de voortplantingssnelheid of propagatiesnelheid ( $V$ ) door volgende formule (Daniels, 1996):

$$D = V \frac{t}{2} \quad (2)$$

Met  $D$  de diepte en  $t$  de reistijd tussen het uitzenden en ontvangen (two-way travel time).

#### 3.4.3.2. Golfsnelheid

De golfsnelheid kan worden berekend uit volgende vergelijking (Cimadevila et al., 2010; Guo, Lin, et al., 2013a):

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (3)$$

Met  $\mu$  de magnetische permeabiliteit,  $\sigma$  de elektrische geleidbaarheid,  $\varepsilon$  de diëlektrische permittiviteit en  $\omega$  de hoekfrequentie ( $\omega = 2\pi f$ , met  $f$  de frequentie) van de uitgezonden puls.

De voortplantingssnelheid voor laag-conductieve en niet-magnetische materialen ( $\sigma \ll \omega\varepsilon$ ,  $\mu = \mu_0\mu_r$ ,  $\mu_0$  is de magnetische permeabiliteit van de vrije ruimte,  $\mu_r$  is de relatieve magnetische permeabiliteit, en  $r \approx 1$ ) wordt als volgt voorgesteld (Daniels, 2004; Guo, Lin, et al., 2013a; Jol, 2009):

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4)$$

Met  $c$  de lichtsnelheid in vacuüm ( $= 0,2998$  m/ns) en  $\varepsilon_r$  de relatieve diëlektrische permittiviteit.

#### 3.4.3.3. Reflectiecoëfficiënt

De gereflecteerde energieamplitude op een grensvlak tussen twee materialen hangt af van de reflectiecoëfficiënt  $R$  (Figuur 3.23b) (Alani & Lantini, 2020; Attia al Hagrey, 2007):

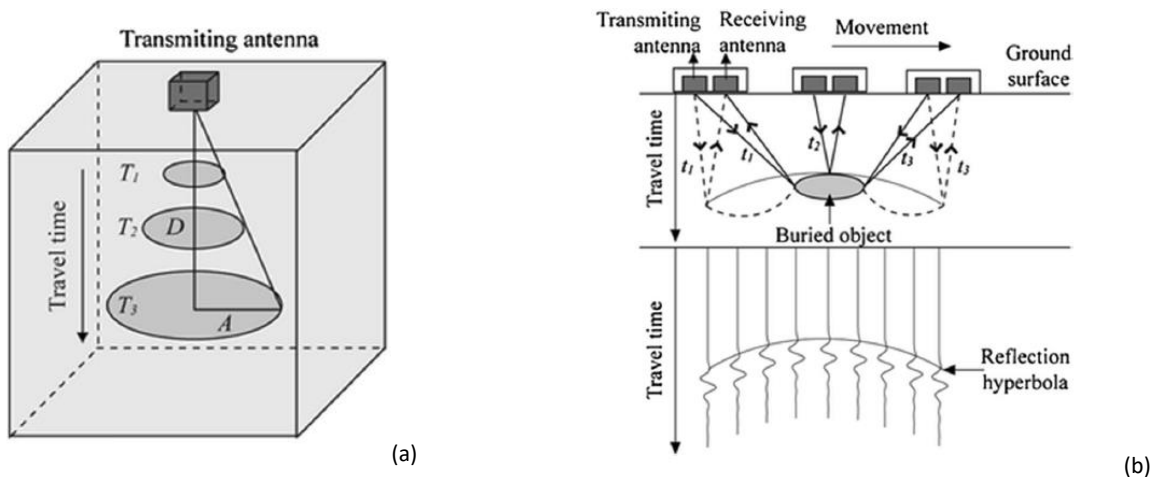


$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} = \frac{V_2 - V_1}{V_1 + V_2} \quad (5)$$

Met  $\varepsilon_{r1}$  de relatieve diëlektrische permittiviteit van het bovenliggende materiaal,  $\varepsilon_{r2}$  de relatieve diëlektrische permittiviteit van het onderliggende materiaal,  $V_1$  de voortplantingssnelheid in het bovenliggende materiaal en  $V_2$  de voortplantingssnelheid in het onderliggende materiaal.

#### 3.4.3.4. Stralingsoppervlak en reflectie-hyperbool

De GPR-zendantenne produceert energie in de vorm van een straal die doordringt in de grond in de vorm van een elliptische kegel (Alani & Lantini, 2020; Annan & Cosway, 1992). De straal van deze kegel wordt groter als de voortplantingsdiepte toeneemt (Annan & Cosway, 1992; Guo, Chen, et al., 2013) (Figuur 3.24a). Dit resulteert in een groter stralingsoppervlak dat onder de antenne wordt gescand (Guo, Chen, et al., 2013).



Figuur 3.24: Schematische voorstelling van het conisch stralingspatroon van GPR-golven en het genereren van een reflectie-hyperbool: (a) ontwikkeling van het stralingsoppervlak met toenemende reistijd; (b) detectie van een begraven object met de creatie van een reflectie-hyperbool (Guo, Chen, et al., 2013).

Het stralingsoppervlak kan worden benaderd door volgende formule (Annan & Cosway, 1992):

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \quad (6)$$

Met  $A$  de straal van de lange dimensie van het stralingsoppervlak,  $\lambda$  de golflengte die overeenkomt met de centrale frequentie van radar energie,  $D$  de diepte van het grondoppervlak tot het reflectieoppervlak,  $\varepsilon_r$  de gemiddelde relatieve diëlektrische permittiviteit van het gescande materiaal van het grondoppervlak naar de diepte van reflector ( $D$ ).

Op basis van deze eigenschap van propagerende (of voortplantende) golven zal daarom radarenergie worden gereflecteerd voor en nadat de antenne boven een begraven object (bv. een boomwortel) is

geplaatst. Terwijl de antenne dicht bij het object beweegt, neemt de opgenomen reistijd in twee richtingen af. Wanneer de antenne zich ervan verwijderd, wordt hetzelfde fenomeen omgekeerd herhaald, waardoor een reflectie-hyperbool ontstaat, waarvan de top de exacte locatie van het begraven object aangeeft (Alani & Lantini, 2020; Guo, Lin, et al., 2013a) (Figuur 3.24b).

#### *3.4.3.5. Relatie tussen frequentie en resolutie*

De resolutie van de GPR wordt gedefinieerd als het vermogen om onderscheid te maken tussen twee nauw uit elkaar geplaatste doelen, alsook de minimale detecteerbare grootte (Alani & Lantini, 2020). De antennefrequentie (antennegolflengte), de EM-eigenschappen van het medium en de diepte van het indringen beïnvloeden de resolutie (Hruska et al., 1999). Radars met hogere frequenties bieden een hogere resolutie dan radars met lagere frequenties. De resolutie correleert negatief met het stralingsoppervlak (Alani & Lantini, 2020). De kortere golflengten van hoge frequenties produceren een smallere transmissiekegel (Figuur 3.24a). Dit geeft de mogelijkheid om zich op kleinere gebieden te concentreren, waardoor kleinere kenmerken kunnen worden gedetecteerd. Radars met een lagere frequentie, hebben een meer gespreide transmissiekegels door de langere golflengten (Greal, 2006). Het is belangrijk om de juiste GPR-functies, inclusief de frequentieoperaties, het type antenne of de polarisatie (bewegingsrichting van EM-golf: verticaal, horizontaal of cirkelvormig) te selecteren, want deze bepalen samen met andere factoren hoe het target in beeld wordt gebracht. Deze factoren zijn onder andere de grootte en vorm van het object (bv. de worteldiameter, Sectie 2.3.2.3.), de transmissie-eigenschappen van het onderzochte medium (bv. het bodemtype of het bodemwatergehalte, Sectie 2.3.2.2. en 2.3.2.1.) en de kenmerken van het oppervlak (Daniels, 2004).

#### *3.4.3.6. Relatie tussen frequentie en diepte*

Het kiezen van de beste frequentie is kritisch in een GPR-onderzoek. De frequentie heeft ook een invloed op de penetratiediepte. Lagere frequenties (lange golflengten) zorgen voor de diepste penetratie, terwijl hoge frequenties (korte golflengten) enkel in staat zijn om ondiepe objecten in beeld te brengen (Greal, 2006). Bij het kiezen van een GPR-frequentie wordt er altijd een trade-off gemaakt tussen de resolutie en de penetratiediepte.

#### *3.4.3.7. Achtergrondruis*

Achtergrondruis wordt gedefinieerd als de signalen die geen verband houden met de kenmerken van het te bestuderen signaal, maar die in hetzelfde tijdvenster plaatsvinden en vergelijkbare spectrale kenmerken hebben als de doelgolflengte (Lombardi et al., 2020). Achtergrondruis door reflecties onder het oppervlak wordt 'clutter' (rommel) genoemd en verwijst naar de puntdoelen en kleine discontinuïteiten die energie reflecteren en de signalen van andere meer belangrijke gereflecteerde golven verbergen (Dojack, 2012). De ruis kan onder andere veroorzaakt worden door de reststromen

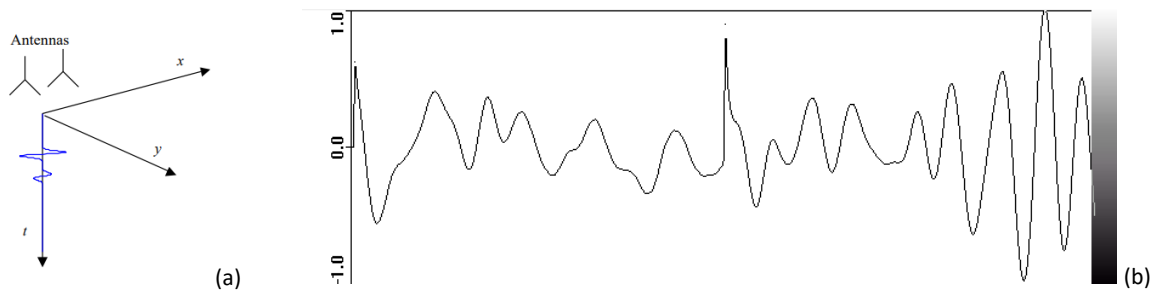
die binnenin de antenne weerkaatsen of door meerdere reflecties tussen de antenne en het grondoppervlak (Montiel-Zafra et al., 2017; Rashed, 2015). Achtergrondruis kan ook worden gegenereerd door andere nabijgelegen bronnen van EM-golven, waaronder televisies, mobiele telefoons en antennes voor radiotransmissie (Dojack, 2012). GPR-onderzoek kan ook worden aangetast door achtergrondsignalen in gebieden in de buurt van luchthavens of militaire basissen (Dojack, 2012). Tot slot is het GPR-systeem gevoelig aan 'ringing'. 'Ringing' wordt weergegeven als horizontale banden op de GPR-profielen, dit doordat de EM-energie heen en weer blijft kaatsen tussen lagen of objecten die contrasten veroorzaken in de permittiviteit (Daniels, 2000). De horizontale banden in de GPR-profielen maken het moeilijk om reflecties te kunnen onderscheiden (Kim et al., 2007).

#### 3.4.4. GPR-gegevens visualiseren

De interpretatie van de GPR-gegevens gebeurt aan de hand van een visuele weergave van de verwerkte gegevens. Het produceren van een goede weergave is een integraal onderdeel van de interpretatie van de gegevens. De GPR-gegevens worden over het algemeen onderverdeeld in drie types: een eendimensionaal spoor (A-scan of trace), een tweedimensionale dwarsdoorsnede (B-scan, radargram of profiel) en een driedimensionale weergave (C-scan of radar-volume). Deze sectie beschrijft deze drie types van weergave.

##### 3.4.4.1. A-scan

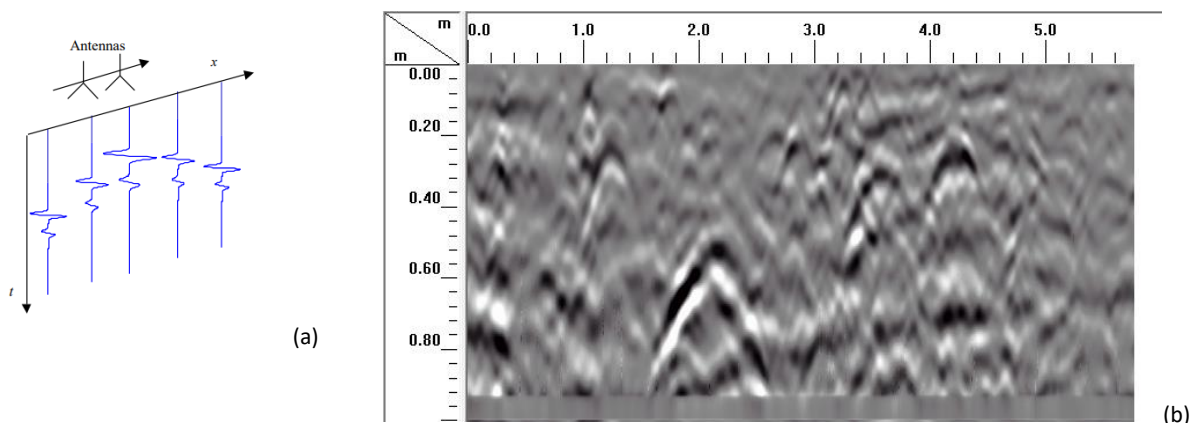
Een A-scan (of eendimensionaal spoor) wordt verkregen door een stationaire meting met de GPR-antenne (Duman & Gurbuz, 2015). De antenne wordt boven het doelloppervlak geplaatst en de gereflecteerde signalen worden verzameld (Duman & Gurbuz, 2015). Het verzamelde signaal kan worden weergegeven als de signaalsterkte ten opzichte van de vertraging in een tijd-amplitude plot (Figuur 3.25). De tijd tussen de emissie van het gereflecteerde signaal en de reflectie wordt weergegeven op de horizontale as en de amplitudes van de ontvangen signalen op de verticale as, dit wordt soms ook omgekeerd weergegeven (Daniels, 2004). Omdat het een individueel spoor is, biedt de A-scan informatie over de ondergrondconfiguratie op één enkele locatie. De enige variabele is de tijd, die gerelateerd is aan de diepte door de voortplantingsnelheid van de EM-golven in de bodem (Duman & Gurbuz, 2015).



Figuur 3.25: A-scan: (a) Configuratie (Duman & Gurbuz, 2015); (b) Weergave van een A-scan (800 MHz), gemeten in Bosland.

#### 3.4.4.2. B-scan

De meeste GPR-gegevensanalyses zijn gebaseerd op de interpretatie van een reeks van 1D GPR-signalen die worden voorgesteld in een B-scan. Tijdens een meting wordt de GPR langs een detectietransect bewogen en worden EM-pulsen gegenereerd op een bepaalde tijdsinterval of afstand. Een B-scan (of tweedimensionale dwarsdoorsnede) wordt verkregen door de horizontale verzameling van A-scans (Duman & Gurbuz, 2015). De horizontale as van het tweedimensionaal beeld is de oppervlaktepositie en de verticale as is de tijd tussen het uitzenden en opvangen van de EM-golf (Figuur 3.26a) (Duman & Gurbuz, 2015). Wanneer de amplitude van het ontvangen signaal wordt weergegeven door een grijschaal, wordt een 2D-beeld (of radargram) bekomen zoals Figuur 3.26b. Het 2D-beeld vertegenwoordigt een verticale snee in de bodem. De tijd-as of de gerelateerde diepte-as is meestal naar beneden gericht.

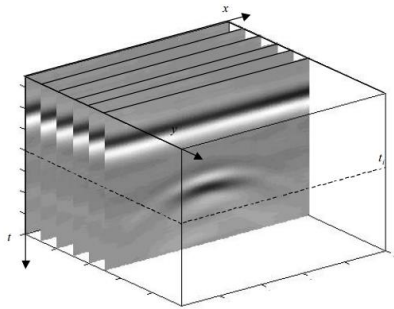


Figuur 3.26: Configuratie en weergave van een B-scan: (a) Meerdere A-scans vormen een B-scan (Duman & Gurbuz, 2015); (b) Weergave van een B-scan (800 MHz) op grijschaal, opgemeten in Bosland.

#### 3.4.4.3. C-scan

Een C-scan (of driedimensionale weergave) wordt bekomen door een verzameling van B-scans, gemeten door herhaaldelijke lijnscans, meestal parallel aan elkaar, langs het vlak (Duman & Gurbuz, 2015). Driedimensionale weergaven zijn in wezen blok-weergaven van GPR-sporen die opgenomen zijn op verschillende plaatsen op het oppervlak (Figuur 3.27) (Duman & Gurbuz, 2015). Het verkrijgen van

goede driedimensionale afbeeldingen is erg handig voor het identificeren en interpreteren van specifieke reflecties. Verschillende gebruikerssoftwarepakken bevatten een geïntegreerde functie om direct driedimensionale representaties van de opgenomen C-scans te plotten.



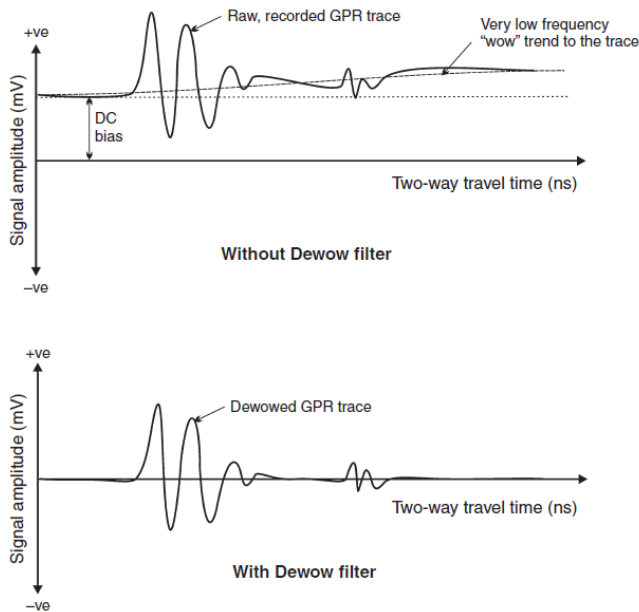
Figuur 3.27: Meerdere parallelle B-scans vormen een C-scan (Duman & Gurbuz, 2015).

### 3.5. Verwerking GPR-profielen

Voorafgaand aan de interpretatie van de radarprofielen worden verschillende bewerkingen toegepast op de ruwe data.

#### 3.5.1. Dewow

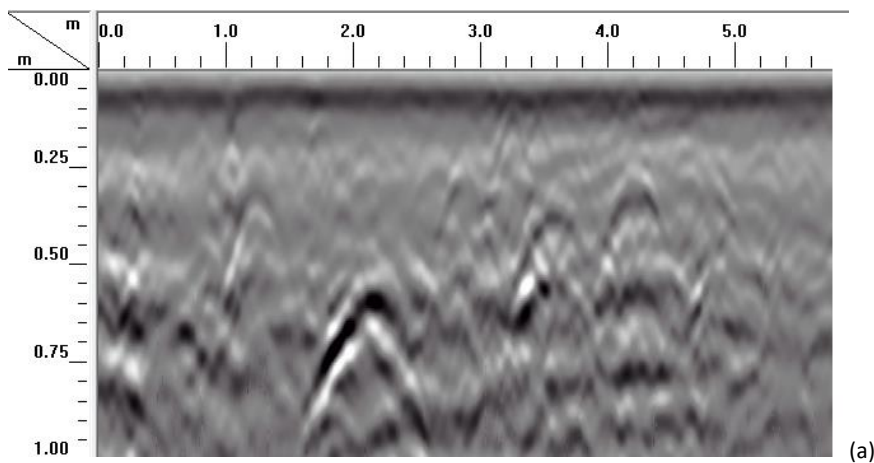
Dewow, het verwijderen van invloeden van lage frequenties en signaal-offsets uit individuele radartraces, verschuift de GPR-data tot een gemiddeld nulniveau. Het is een cruciale stap die toelaat om een positief-negatief kleurenbeeld mogelijk te maken in het GPR-profiel, om zo belangrijke informatie te visualiseren (Cassidy, 2009). Figuur 3.28 illustreert het concept van de dewow filter correctie. 'Wow' is een laag-frekwente variatie in de GPR-gegevens die veroorzaakt wordt door verzadiging van de GPR-ontvanger. Dewow bestaat uit het onderdrukken van zulke lage frequenties door middel van een high-pass filtering, waarbij de focus ligt op het behoud van de frequenties die binnen de verwachte bandbreedte liggen (bv. het verwijderen van frequenties onder de 10 MHz voor een 500 MHz antenne) (Cassidy, 2009).

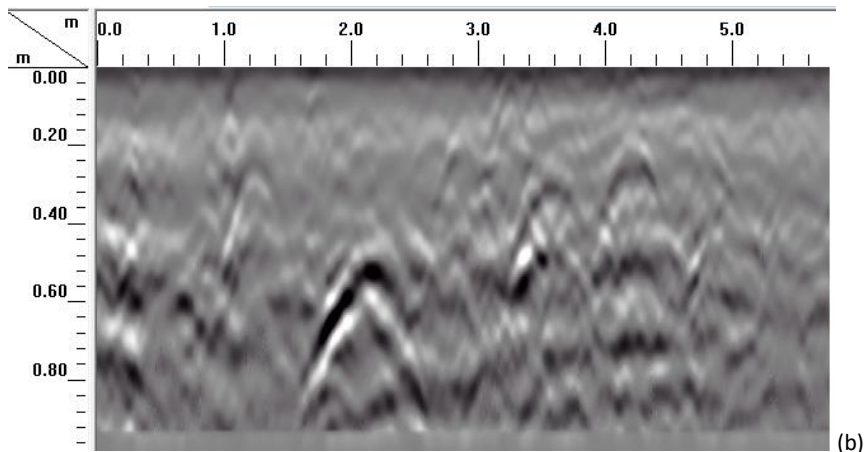


Figuur 3.28: Dewow filtercorrectie op een onbewerkt GPR-spoor (Cassidy, 2009).

### 3.5.2. Time zero correctie

Het time-zero punt wordt gedefinieerd als de eerste aankomsttijd van de EM-golf, de zogenaamde 'air-wave', die rechtstreeks van de zender naar ontvanger gaat. Dit punt kan van zijn werkelijke positie afwijken in de GPR-scan als gevolg van thermische drift, elektrische instabiliteit, verschillen in kabellengte en variaties in de luchtspleet tussen de antenne en de grond (Cassidy, 2009). Dit punt beïnvloedt de identificatie van de grondinterface en de tijdsvolgorde van latere gebeurtenissen. Daarom moeten GPR-scans worden aangepast aan een gemeenschappelijke time-zero positie voor verdere verwerking. Meestal wordt het time-zero punt naar de eerste negatieve piek van het spoor verplaatst (Cassidy, 2009). Figuur 3.29 geeft een voorbeeld van een time-zero correctie in een GPR-scan gemeten in Bosland met een frequentie van 800 MHz.





Figuur 3.29: GPR-scan van Bosland (800 MHz) voor (a) en na (b) time-zero correctie.

### 3.5.3. Verwijderen van achtergrondruis (of background removal)

Background removal filtert een GPR-profiel door het gemiddelde van alle sporen in een profiel te nemen en dit af te trekken van elk spoor. Deze filter verwijdert achtergrondruis in de vorm van horizontale strepen, en 'ringing' (Sectie 3.4.3.7.) in de profielen (Cassidy, 2009). Hierbij dient men op te letten dat er geen continue horizontale (platte) reflecties verwijderd worden die nuttig kunnen zijn.

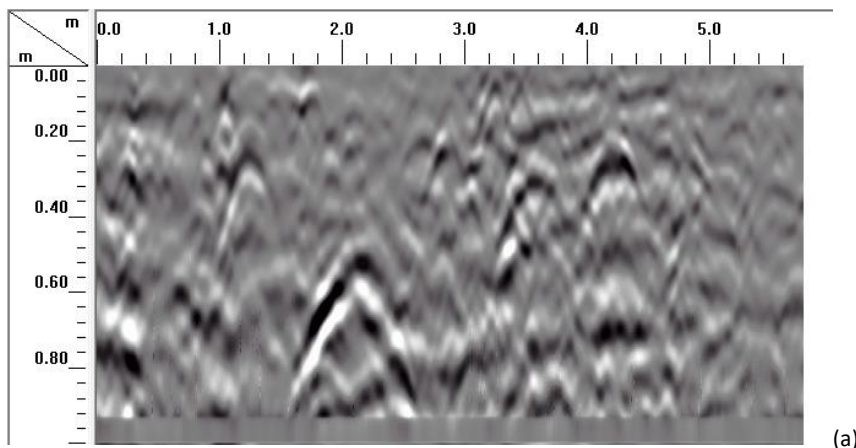
Background removal is een specifiek geval van ruisfiltering. Er bestaan nog tal van andere filters, zoals de low-pass frequency domain filters (Cassidy, 2009), die de visualisatie van de profielen kunnen verbeteren. De toepassing van deze filters kan ook tot gevolg hebben dat relevante informatie wordt gefilterd uit de data. Het gebruik van filters dient dus altijd met de nodige voorzichtigheid te worden toegepast (Cassidy, 2009).

### 3.5.4. Gain control

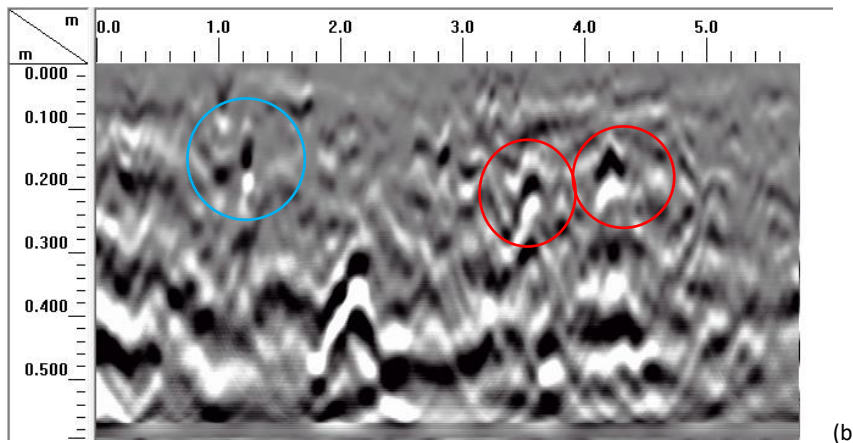
De amplitude van een radarreflectie hangt af van de diepte waarop dit signaal gereflecteerd wordt. Verder hangt dit ook af van de hoeveelheid energie die mogelijk reeds verloren is gegaan door reflecties en scattering boven deze reflectie. Hoe meer afstand het gereflecteerde signaal moet afleggen, hoe kleiner de amplitude zal zijn. Hierdoor kunnen signalen van dieper gelegen reflecties veel zwakker lijken in vergelijking met bovenliggende reflecties (Cassidy, 2009). Om dit probleem te verhelpen wordt de gain-functie toegepast. Toepassen van gain versterkt de reflecties met lage amplitude, zodat subtiele, maar relevante variaties in de geregistreeerde sporen zichtbaar worden (Cassidy, 2009). Deze gain-functie kan op verschillende manieren worden toegepast. Twee veelvoorkomende zijn de automatische gain control (AGC) en de door de gebruiker gedefinieerde gain (Cassidy, 2009). AGC schaaft de gemiddelde amplitude van reflecties binnen een tijdvenster naar de maximale amplitude van het hele spoor. Bij een door de gebruiker gedefinieerde gain wordt een specifieke functie (constante, lineaire of exponentiële gain) gedefinieerd op basis van de evaluatie van de verzamelde GPR-data.

### 3.5.5. Migratie

De reflecties van een klein of langwerpig object (zoals een buis), dat loodrecht doorsneden wordt door het GPR-transect, wordt in een GPR-profiel weergegeven als een hyperbool, waarvan de top de exacte locatie van het begraven object aangeeft (Sectie 3.4.3.4.). Hierdoor kunnen signalen van dieper gelegen objecten verborgen worden. Ook de diepte en hellingsgraad van hellende structuren kunnen verkeerd worden weergegeven in het GPR-profiel. Migratie heeft als doel om deze problemen te corrigeren en meer ruimtelijk realistische beelden van het profiel te creëren (Cassidy, 2009). Hierbij worden de hyperbolen gereduceerd tot een punt en de dieptes van hellende structuren worden aangepast (Cassidy, 2009). Om migratie te kunnen toepassen moet de propagatiesnelheid van de golven ingeschat worden. Hierbij wordt meestal aangenomen dat de propagatiesnelheid doorheen het profiel dezelfde is (Cassidy, 2009). Deze aanname is controversieel in de literatuur. Hoe complexer en minder homogeen de bodem, hoe lager de kans is dat migratie een meerwaarde zal betekenen bij het verwerken van de GPR-data (Cassidy, 2009). Soms wordt er gewerkt met in de diepte (en zelfs lateraal) variërende snelheidsmodellen om een beter resultaat te krijgen. Daarnaast zijn er tal van voorbeelden in de literatuur die het nut van migratie aantonen (Grasmueck et al., 2005; Leckebusch, 2003). Figuur 3.30 geeft een voorbeeld van een (Kirchhoff) migratie in een GPR-scan van Bosland met een frequentie van 800 MHz (zelfde radarprofiel als Figuur 3.29). De migratie werd correct uitgevoerd voor de hyperbool op 1,25 m, maar de hyperbolen op 3,5 m en 4,2 m zijn licht ondergemigreerd (i.e. met een iets te lage snelheid gemigreerd). Dit toont aan dat de snelheid doorheen het profiel varieert.







Figuur 3.30: GPR-scan van Bosland (800MHz): (a) Voor migratie, maar met toepassing van time zero correctie, background removal en gain control; (b) Na (Kirchhoff) migratie, de migratie is correct voor de hyperbool op 1,25 m (blauwe cirkel). De hyperbolen op 3,5 en 4,2 m zijn licht ondergemigreerd (i.e. met een iets te lage snelheid gemigreerd) (rode cirkels), dit toont aan dat de snelheid doorheen het profiel varieert.

### 3.5.6. Procedure verwerking GPR-profielen

#### 3.5.7.1. Procedure Radan

De radardata verzameld met de GSSI-radar met een frequentie van 300 en 800 MHz worden verwerkt en geëvalueerd met het RADAN7-software pakket (Geophysical Survey Systems, Inc., 2011; GSSI Geophysical Survey Systems, Inc., 2022). De RADAN7-software maakt het mogelijk om transversale profielen van de ondergrond te evalueren en te interpreteren. Alle ruwe GPR-reflectiegegevens werden verwerkt en aangepast voorafgaand aan de interpretatie. Volgende stappen werden achtereenvolgend doorlopen in RADAN7: time zero correctie, background removal, gain control en migratie.

#### 3.5.7.2. Procedure Reflexw

De radardata verzameld met de pulseEKKO PRO met een frequentie van 500 MHz worden verwerkt en geëvalueerd met het Reflexw versie 9.5 software pakket (Sandmeier geophysical research, 2022). In dit software pakket kan een reeks van verschillende gegevenstypen geïmporteerd worden. Alle ruwe GPR-reflectiegegevens werden verwerkt en aangepast voorafgaand aan de interpretatie. Volgende stappen werden achtereenvolgend doorlopen in Reflexw: dewow, time zero correctie, gain control, background removal en migratie.

### 3.6. Theoretisch model

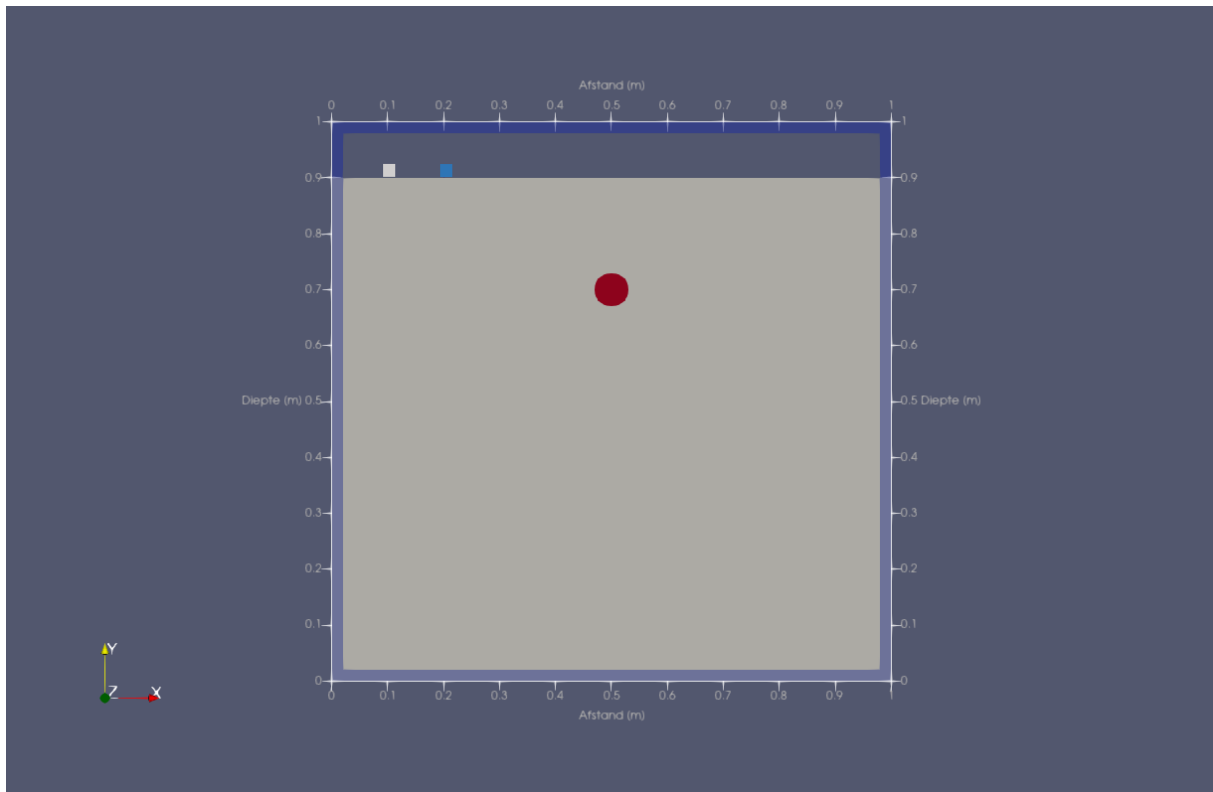
Finaal wordt een theoretisch model opgesteld om de detectie van wortelsystemen te simuleren. Dit om het theoretisch potentieel van de GPR-technologie te onderzoeken en de reflecties van de radarmetingen te vergelijken met de gesimuleerde reflecties.

### 3.6.1. GprMax-software

Het theoretisch model wordt opgesteld aan de hand van de gprMax-software. GprMax v.3.1.5 (<http://www.gprmax.com/>) (Warren & Giannopoulos, 2015) is een open source software die de voortplanting van elektromagnetische golven kan simuleren voor GPR (Warren et al., 2016). Een voorwaartse simulatie werd toegepast voor het modelleren van de corresponderende radarrespons van de boomwortels en de bodem. Dit onder de voorwaarde dat alle variabelen van het simulatiemodel gekend zijn, om zo de invloed van elke variabele op de detectie van de wortels door GPR te simuleren (Guo, Lin, et al., 2013b). Binnen gprMax wordt een geometrisch simulatiemodel geconstrueerd (Sectie 3.6.2.). Het visualisatieprogramma Paraview v5.9 (<https://www.paraview.org/>) (ParaView, z.d.) wordt vervolgens gebruikt om te controleren of het geconstrueerde geometrische model voldoet aan de verwachte eisen (Warren et al., 2016).

### 3.6.2. Geometrisch model

Het geometrisch model geconstrueerd door gprMax wordt weergegeven in Figuur 3.31. Het model is een verticale doorsnede van de gesimuleerde wortel (voorgesteld door een cilinder) met een begraven diepte van 0,20 m. De x-as in Figuur 3.31 stelt de horizontale afstand voor en de y-as stelt de diepte voor. De x- en y-as vormen samen een vierkant met een oppervlak van 1 m bij 1 m. De oorsprong van de coördinaten (0,0) bevindt zich in de linkerbenedenhoek. Het grijze gebied in de figuur vertegenwoordigt de bodem en het donkere blauwe gebied lucht. De uitzendende en ontvangende GPR-antennes worden voorgesteld door respectievelijk een grijze en blauwe rechthoek en bevinden zich aan het bodemoppervlak op 0,90 m. De afstand tussen de antennes is 0,10 m. De rode cirkel in Figuur 3.31 stelt een cilindrische boomwortel voor met een ingestelde straal van 3 cm. De blauwe rand rond het systeem is de perfect matching layer (PML), deze laag absorbeert de elektromagnetische golven die door de antenne naar de rechthoekige grenzen worden uitgezonden. De golven die inslaan op deze laag worden dus niet terug naar de antenne gereflecteerd.



Figuur 3.31: Geometrisch model gevisualiseerd in Paraview. Grijs geeft de bodem weer, de grijze en blauwe rechthoeken vertegenwoordigen respectievelijk de zendende en ontvangende antennes van radar, de rode cirkel staat voor de cilindrische boomwortel en de blauwe randen vertegenwoordigen een PML.

De input-file (A-scan) voor dit model in gprMax wordt weergegeven in Figuur 3.32. De analyse werd uitgevoerd via Python en geïmplementeerd in Jupiter Notebooks (Kluyver et al., 2016). In Appendix 1 wordt de betekenis van de verschillende onderdelen van deze input-file toegelicht.

```

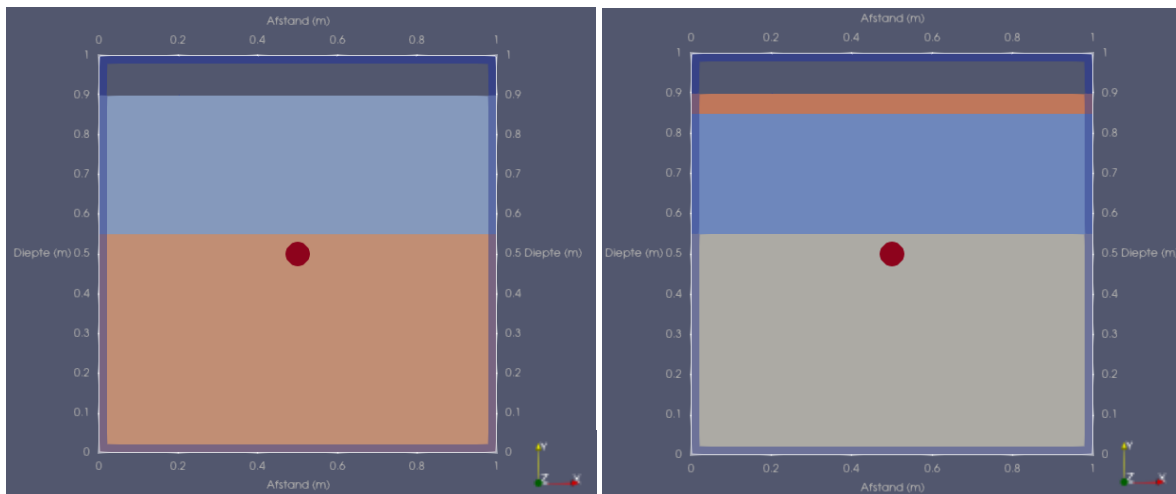
1 %%writefile ../../user_models/Masterproef/test_Ascan_wortel.in
2 #title: 1 bodemlaag met wortel
3 #domain: 1 1 0.002
4 #dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
5 #time_window: 20e-9
6
7 #material: 6.96 0.004 1 0 first_soil
8 #material: 14.01 0.005 1 0 my_root
9
10 #waveform: ricker 1 0.5e9 my_ricker
11 #hertzian_dipole: z 0.1 0.90 0 my_ricker
12 #rx: 0.2 0.90 0
13
14 #box: 0 0 0 1 0.90 0.002 first_soil
15 #cylinder: 0.50 0.70 0 0.50 0.70 0.002 0.03 my_root
16
17 #geometry_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 test_Ascan_wortel n

```

Figuur 3.32: Input-file A-scan met simulatie van een boomwortel (voorgesteld door een cilinder) begraven in een bodem.

### 3.6.3. Model

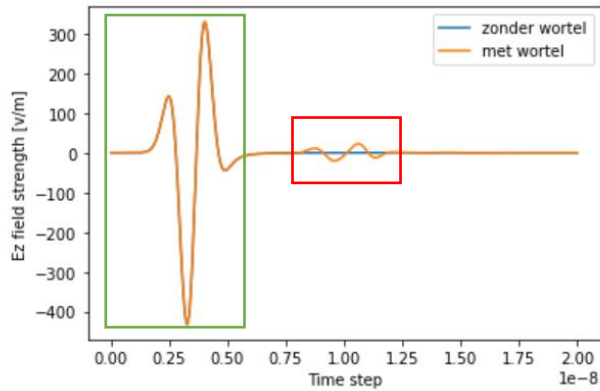
Om de invloed van het volumetrisch vochtgehalte van de bodem en de boomwortel en de invloed van een stedelijke context op het detectievermogen van de GPR te onderzoeken, werden drie scenario's opgesteld. Het eerste scenario is een bodem met één bodemlaag en één boomwortel (Figuur 3.31), het tweede scenario bestaat uit een bodem met twee bodemlagen en één boomwortel (Figuur 3.33 links) en het derde scenario bestaat uit twee bodemlagen met bovenaan de bodem een betonlaag en één boomwortel (Figuur 3.33 rechts).



Figuur 3.33: Modelscenario's: twee bodemlagen (blauw en oranje) en één boomwortel (rood) (links); twee bodemlagen (blauw en grijs) met bovenaan de bodem een betonlaag (oranje) en één boomwortel (rood) (rechts).

De invloed van verschillende parameters werd onderzocht door modellen op te stellen en een sensitiviteitsanalyse uit te voeren op basis van een Monte-Carlo simulatie.

Voor elk scenario werd een A-scan opgesteld zonder de aanwezigheid van de boomwortel en een A-scan met de aanwezigheid van een boomwortel in de bodem. Dit om de eerste air-wave die in beide gevallen hetzelfde is, te verwijderen, door het verschil tussen de twee A-scans te nemen (Figuur 3.34). Daarna werd een Hilbert transformatie (envelope filter) (Gold et al., 1969; The SciPy community, 2008) toegepast om de negatieve helft van de veldsterkte om te zetten naar een positief complex signaal. Door het berekenen van de magnitude van het complex signaal wordt er een reële waarde bekomen. Daarna wordt het maximum van het deel van de GPR-trace waar zich de reflectie die veroorzaakt wordt door de boomwortel bevindt (Figuur 3.34), bepaald. Deze maximale amplitude wordt uitgezet ten opzichte van de variërende parameter, om zo de invloed ervan te evalueren op de GPR-detectie.



Figuur 3.34: Verschil tussen de A-scan zonder en met een boomwortel in de bodem. De eerste air-wave is in beide A-scans dezelfde (groene kader). In de rode kader is de reflectie van de boomwortel te zien ten opzichte van het signaal van een bodem zonder boomwortel.

Finaal werd het ruisniveau van de grondradar van Sensors & Software (500 MHz) bij de radarmetingen in Bosland en aan de Coupure Rechts bepaald. De radarprofielen na de dewow stap (Sectie 3.5.1.) werden gebruikt om de ruisniveaus te bepalen. De amplitude van de ruis voor Bosland is  $\pm 10$  tegenover een amplitude van de direct wave (of air wave) van ongeveer -19000 tot +16000. Voor de Coupure Rechts is de amplitude van de ruis  $\pm 40$  tegenover een amplitude van de direct wave van  $\pm 10000$ . Op basis van deze gegevens wordt het percentage van de ruis ten opzichte van de direct wave bepaald voor beide locaties (Tabel 3.4).

Tabel 3.4: Ruisniveau GPR Sensors & Software (500 MHz) Bosland en Coupure Rechts.

Locatie	Ruisniveau [% van de amplitude van de direct wave]
Coupure Rechts	0,4
Bosland	0,06

Beide ruisniveaus werden gebruikt als inschatting voor de detecteerbaarheid van de boomwortel met GPR (Tabel 3.4). Als de maximale amplitude onder het ruisniveau ligt dan is boomwortel niet waar te nemen met de GPR.

### 3.6.4. Inputvariabelen van het model

#### 3.6.4.1. Vaste waarden

Het model wordt opgesteld voor een GPR met een frequentie van 500 MHz. De straal van de boomwortel wordt constant gehouden op 0,03 m (of 3 cm). De conductiviteit van de boomwortel wordt ook constant gehouden in de modellen op 0,005 S/m.

#### 3.6.4.2. Permittiviteit bodem

De relatieve bulk permittiviteit van de bodem ( $\epsilon_{bulk}$  of  $\epsilon_r$ ) wordt berekend volgens de complete refractive index methode of CRIM-vergelijking (Birchak et al., 1974).

$$\varepsilon_{bulk} = (\theta \times \varepsilon_w^\alpha + (1 - \Phi) \times \varepsilon_s^\alpha + (\Phi - \theta) \times \varepsilon_g^\alpha)^{1/\alpha} \quad (7)$$

Met  $\theta$  het volumetrisch vochtgehalte van de bodem,  $\varepsilon_w$  de permittiviteit van water (= 80, afhankelijk van de temperatuur),  $\varepsilon_s$  de permittiviteit van de vaste stof (= 4, gemiddelde van de standaard voor bodemmineralen (Roth et al., 1990)),  $\varepsilon_g$  de permittiviteit van de lucht (= 1). De porositeit ( $\Phi$ ) wordt berekend volgens:

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (8)$$

Met  $\rho_b$  de bulkdichtheid van de bodem en  $\rho_p$  de deeltjesdichtheid (= 2,65 g/cm<sup>3</sup>). De parameter  $\alpha$ , die normaalgezien als constant wordt beschouwd, werd aangepast volgens het empirisch lineair verband tussen  $\alpha$  en de bodemmassafractie van het kleigehalte ( $p_{klei}$ ):

$$\alpha = -0,46 p_{klei} + 0,71 \quad (9)$$

zoals vastgesteld door Wunderlich et al. (2013).

#### 3.6.4.3. Conductiviteit bodem

De conductiviteit van de bodem werd berekend aan de hand van een pedofysisch model dat bodemeigenschappen omzet in bulk elektrische geleidbaarheid ( $\sigma_{bulk}$ ) op basis van de formule van Waxman & Smits (1968). Deze formule werd aangepast naar de geleidbaarheid van het oppervlak in functie van het kleigehalte, zoals voorgesteld door Doussan & Ruy (2009).

$$\sigma_{bulk} = \frac{S^2}{F} \left( \frac{1}{\rho_w} + \frac{\sigma_s}{S} \right) \quad (10)$$

Met:

$$S = \frac{\theta}{\Phi} \quad (11)$$

$$F = \Phi^{-m} \quad (12)$$

Met  $m$  de cementeringsexponent (vaste referentiewaarde voor zand), gelijk aan 1,5.

$$\rho_w = \frac{1}{\sigma_w} \quad (13)$$

Met  $\sigma_w$  de conductiviteit [S/m] van de porieoplossing (Aref mediaan - zandgrond).

Als het kleigehalte groter is dan 6% wordt de conductiviteit van de bodem ( $\sigma_s$ ) berekend volgens:

$$\sigma_s = \left( \frac{0,654 p_{klei}}{p_{zand} + p_{silt}} \right) + 0,018 \quad (14)$$

Anders wordt de conductiviteit ( $\sigma_s$ ) bepaald volgens:

$$\sigma_s = 0,023 p_{klei} - 0,0209 \quad (15)$$

Met  $p_{klei}$  het kleigehalte,  $p_{zand}$  het zandgehalte en  $p_{silt}$  het gehalte aan silt in de bodem.

#### 3.6.4.4. Permittiviteit boomwortel: kalibratie HydraProbe

Om de relatie tussen het volumetrisch vochtgehalte en de permittiviteit van de boomwortel te kunnen inschatten werd een kalibratie opgesteld. Hiervoor werd een tak van de esdoorn (Coupure links) en een tak van de den (Bosland) verzameld. De takken werden eerst 24 uur ondergedompeld in gedestilleerd water, zodat de takken volledig verzadigd waren. Daarna werd het volume van beide takken bepaald aan de hand van de wet van Archimedes tot op 1 ml nauwkeurig. Tabel 3.5 geeft het volume van de takken en de gemeten gewichten voor en na de kalibratie weer.

Tabel 3.5: Volume en gewicht van de twee takken (esdoorn en den).

Metingen	Tak esdoorn	Tak den
Vers gewicht [g]	1291,31	144,66
Nat gewicht [g]	1338,12	169,34
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1585	310
Start gewicht (met sensoren) [g]	1362,52	329,92
Eind gewicht (met sensoren) [g]	1243,64	310,35
Water op weegschaal [g]	0,25	-
Eind gewicht (zonder sensoren) [g]	1099,16	126,17
Droog gewicht [g]	680,98	106,42

Daarna werd de HydraProbe in elke tak geïnstalleerd, door eerst gaten te boren en vervolgens de sensoren in de tak te plaatsen met een geleidende pasta DC4 electrical compound (DuPont™, 2018). Verder werd rond de HydraProbe nog een afdichtingspasta (TEROSON® RB IX, *Teroson Afdichting / Fabory, z.d.*) geplaatst om het contact te verbeteren. Beide takken (met de sensoren) werden op een weegschaal geplaatst en gedurende twee weken (van 26/04/2022 tot 13/5/2022) werd het gewicht continu gemeten. De permittiviteit werd ook continu gemeten aan de hand van de HydraProbe, die werkt bij een frequentie van 50 MHz. De proefopstelling van deze kalibratie wordt weergegeven in Figuur 3.35.

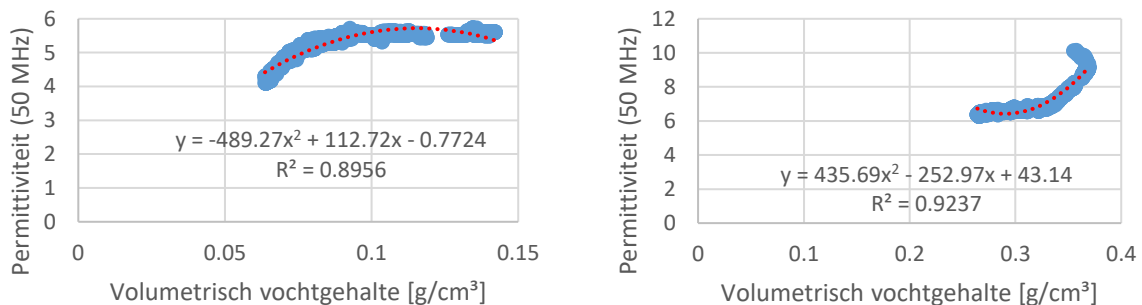


Figuur 3.35: Proefopstelling kalibratie voor een tak van de esdoorn (links) en den (rechts).

Na twee weken stopte de kalibratie en werden de sensoren terug verwijderd. Beide takken werden na de kalibratie in de oven (65 °C) geplaatst gedurende 2 weken (van 13/05/2022 tot 25/05/2022) om het droog gewicht te bepalen. Aan de hand van het nat gewicht ( $m_w$ ), het droog gewicht ( $m_d$ ) en het volume van de tak ( $V$ ) kan het volumetrisch vochtgehalte ( $\theta$ ) worden bepaald als volgt:

$$\theta = \frac{m_w - m_d}{V} \quad (16)$$

De relatie tussen het volumetrisch vochtgehalte en de permittiviteit doorheen de kalibratie wordt grafisch weergegeven in Figuur 3.36.



Figuur 3.36: Volumetrisch vochtgehalte in functie van de permittiviteit gemeten door de HydraProbe (50 MHz) voor een tak van een den (links) en esdoorn (rechts).

Op deze curve wordt het volgend verband gefit:

$$\varepsilon = a \times \theta^2 + b \times \theta + c \quad (17)$$

De parameters  $a$ ,  $b$  en  $c$ , zijn respectievelijk gelijk aan -489,27; 112,72 en -0,7724 voor de den en gelijk aan 435,69; -252,97 en 43,14 voor de esdoorn.

Dit verband tussen de permittiviteit en het volumetrisch vochtgehalte geldt bij een frequentie van 50 MHz ( $\varepsilon_{50MHz}$ ) omdat de sensor werkt met deze frequentie. Dit verband moet dus worden aangepast

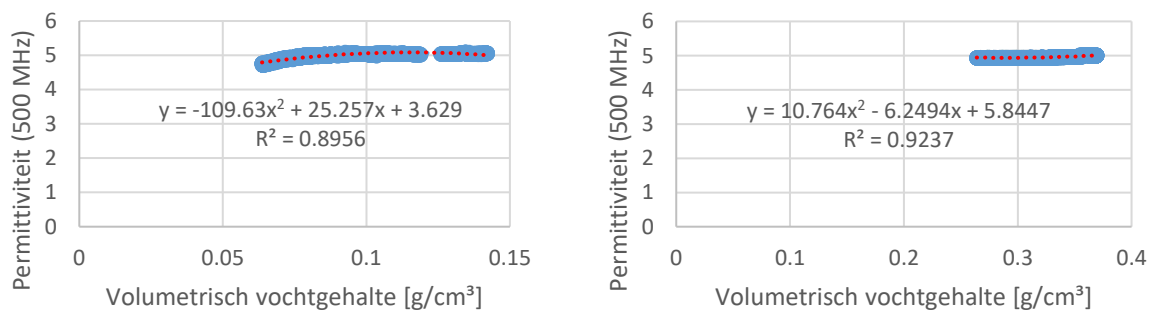


naar de frequentie waarbij de GPR werkt, 500 MHz in het model ( $\epsilon_{500MHz}$ ). Hiervoor wordt het gemodificeerd Debye-model door Cole & Cole (1941) voor de frequentie-afhankelijkheid van polarisatieprocessen toegepast zoals gedefinieerd in Glover (2015).

$$\epsilon_{500MHz} = \epsilon^{\infty} + \frac{\epsilon_{50MHz} - \epsilon^{\infty}}{1 + (\omega^2 * \tau^2)^{1-\alpha}} \quad (18)$$

Voor  $\epsilon^{\infty}$  wordt een vaste waarde van 4,9 toegepast. De hoekfrequentie  $\omega$  is gelijk aan  $2\pi f$  in rad/s, met  $f$  de frequentie in Hz. De relaxatietijd  $\tau$  wordt berekend als  $1/f$ . Voor  $\alpha$  werd een waarde van 0,7 toegepast (Li & Rao, 2019).

De relatie tussen het volumetrisch vochtgehalte en de gecorrigeerde permittiviteit voor 500 MHz doorheen de kalibratie wordt grafisch weergegeven in Figuur 3.37.



Figuur 3.37: Volumetrisch vochtgehalte in functie van de gecorrigeerde permittiviteit voor 500 MHz, de frequentie van de grondradar in het model, voor een tak van een den (links) en esdoorn (rechts).

De formule die bekomen wordt voor de den en de esdoorn is dan gelijk aan:

$$\epsilon_{den} = -109,63 \times \theta^2 + 25,257 \times \theta + 3,629 \quad (19)$$

$$\epsilon_{esdoorn} = 10,764 \times \theta^2 - 6,2494 \times \theta + 5,8447 \quad (20)$$

Finaal wordt de formule voor de esdoorn gebruikt in het theoretisch model. Deze formule werd gekozen omdat de kalibratie met de esdoorn gestart is op de dag dat de tak werd afgezaagd. De tak van de den was al uitgedroogd (dood) voor de start van het experiment, wat mogelijks een invloed kan hebben op de kalibratie. In Figuur 3.36 toont de esdoorn ook een grotere variatie in de permittiviteit met het volumetrisch vochtgehalte dan de den. Na de correctie voor de toegepaste frequentie gaat deze variatie verloren bij beide takken.

#### 3.6.4.5. Bodemtypes

De modellen werden onderzocht voor vijf verschillende bodemtypes, die varieerde tussen een meer zandige, siltige of kleiige bodem. Per bodemprofiel werd de bovenste en onderste laag geselecteerd.

Tabel 3.6 geeft de vijf bodemtypes weer met de waarden voor de bulkdensiteit, kleigehalte, siltgehalte en zandgehalte van de bodem.

Tabel 3.6: Bulkdensiteit, kleigehalte, siltgehalte en zandgehalte voor vijf bodemtypes. Aan elk bodemtype wordt een label (P, E, S, A of EH) gegeven om verder in de tekst naar te verwijzen.

Bodemtype	Profiel	Bulkdensiteit [g/cm <sup>3</sup> ]	Klei [%]	Silt [%]	Zand [%]
Leembodem (P-site)	Bovenaan	1,589	9,843	38,992	51,166
	Onderaan	1,52	11,258	46,533	42,210
Leembodem (E-site)	Bovenaan	1,6103	20,935	46,893	32,172
	Onderaan	1,5381	20,532	43,939	35,529
Zandbodern (S-site)	Bovenaan	1,5130	7,481	9,725	82,795
	Onderaan	1,6352	5,694	1,068	93,238
Siltige klei-leembodem (A-site)	Bovenaan	1,4558	8,772	76,156	15,072
	Onderaan	1,6264	12,616	75,304	12,080
Siltige kleibodem (EH-site)	Bovenaan	1,1959	52,891	37,465	9,644
	Onderaan	1,7754	9,971	25,311	64,719

### 3.6.5. Beschrijving modellen

Finaal worden vijf modellen opgesteld op basis van drie scenario's (Sectie 3.6.3.). In Appendix 2 wordt de implementatie van deze modellen weergegeven.

Voor het eerste scenario, bodem met één bodemlaag (Tabel 3.6: Profiel = Bovenaan) en één boomwortel (Figuur 3.31), worden twee modellen opgesteld. Het eerste model laat het bodemvochtgehalte variëren (tussen 0,1 en 0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) en houdt het watergehalte van de boomwortel constant op 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (gekozen op basis van de kalibratie van de esdoorn, Sectie 3.6.4.4.). Het tweede model laat zowel het bodemvochtgehalte als het vochtgehalte in de boomwortel (tussen 0,1 en 0,7 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) variëren.

Voor het tweede scenario (twee bodemlagen met één boomwortel in de onderste bodemlaag, Figuur 3.33 links) worden ook twee modellen opgesteld. In het derde model wordt het bodemvochtgehalte gevarieerd in beide bodemlagen. Bovenaan en onderaan het profiel varieert het bodemvochtgehalte dus op een gelijke manier tussen 0,1 en 0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Het vierde model laat de bulkdensiteit in de eerste bodemlaag variëren tussen 0,6 (bulkdensiteit A-horizont Bosland) en 2 g/cm<sup>3</sup>, hierbij wordt het bodemvochtgehalte constant gehouden op 0,2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Dit model laat toe om de invloed van compactie op de GPR-detectie te bestuderen. Wanneer de bulkdensiteit hoger is dan 1,6 g/cm<sup>3</sup> kan de wortelgroei beperkt worden (Watson et al., 2014).

Het laatste model wordt opgesteld op basis van het derde scenario (betonlaag boven twee bodemlagen en één boomwortel, Figuur 3.33 rechts). De permittiviteit van de betonlaag werd gelijkgesteld aan 6,25 zoals beschreven in Oikonomopoulou et al. (2022) en voor de conductiviteit werd een waarde van 0,01 S/m gebruikt (Tabel 3.2). Het bodemvochtgehalte varieerde in dit model in

beide bodemlagen. Dit model laat toe om de invloed van de betonlaag op de radardetectie te bepalen door deze te vergelijken met het derde model (twee bodemlagen en één boomwortel zonder betonlaag, Figuur 3.33 links).

### 3.7. Terrestrische laserscanning

Het volume van de bomen werd rechtstreeks afgeleid uit de TLS-gegevens via kwantitatieve structuurmodellen (Quantitative Structure Models of QSMs) (Calders et al., 2015). Deze QSMs zijn geconstrueerd volgens de methode die wordt gepresenteerd in Raumonen et al. (2013). Voor het construeren van deze QSMs werd de modelleringssoftware TreeQSM versie 2.4.0 (Raumonen & Åkerblom, 2017/2022) toegepast in Matlab.

Het principe van deze methode is dat cilinders worden gefit op de puntenwolk die geproduceerd wordt met behulp van een terrestrische laserscanner (Sectie 3.2.3.). Op basis van deze hiërarchische verzameling van cilinders kunnen topologische, geometrische en volumetrische eigenschappen van de houtachtige structuur van een boom worden ingeschat. Deze eigenschappen omvatten o.a. het aantal vertakkingen, de vertakkingsvolgorde en de lengte, volumes en hoeken van de takken (Calders et al., 2015; Raumonen et al., 2013; Raumonen & Åkerblom, 2017/2022).

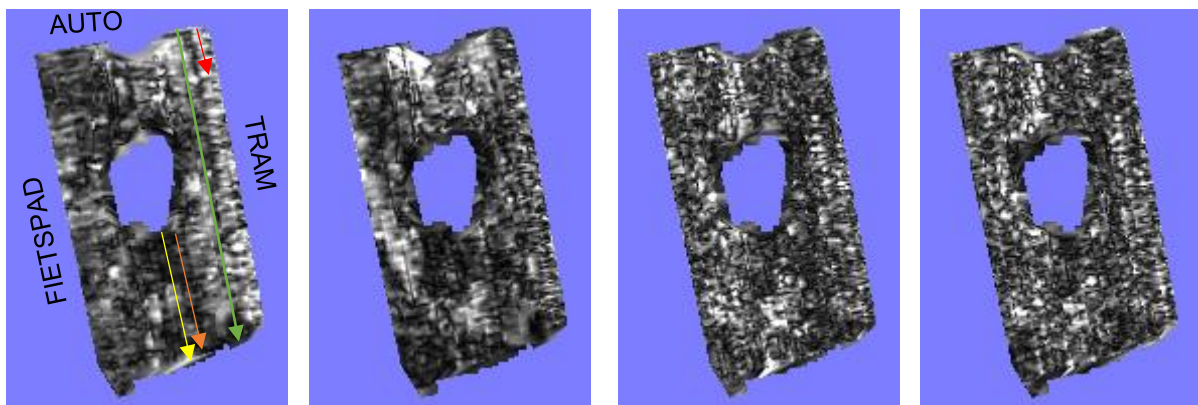
## 4. Resultaten

### 4.1. Coupure Rechts

De interpretatie van de radargegevens voor een frequentie van 800 en 300 MHz konden niet worden weergegeven doordat de coördinaten niet goed werden ingelezen, waardoor de data onbruikbaar waren. Hieronder worden enkel de radargegevens bij een frequentie van 500 MHz geïnterpreteerd. Bij deze frequentie was het niet mogelijk om diepteslices te maken in Reflexw doordat er problemen werden ondervonden bij het omzetten van de coördinaten in het juiste formaat. Er werd beslist om de diepteslices geanalyseerd door Lieven Verdonck in Matlab te gebruiken bij de interpretatie. De radarprofielen werden via Matlab op dezelfde manier verwerkt, als beschreven in Sectie 3.5. De grondradargegevens worden voorgesteld aan de hand van een grijschaal, met als conventie dat sterke reflecties als lichte tinten (wit) worden weergegeven, terwijl zones met lage reflectie-intensiteit als donkere tinten (zwart) worden voorgesteld. Bij de bespreking van de radargegevens worden zowel de niet-gemigreerde als de gemigreerde radarprofielen besproken (Sectie 3.5.5.).

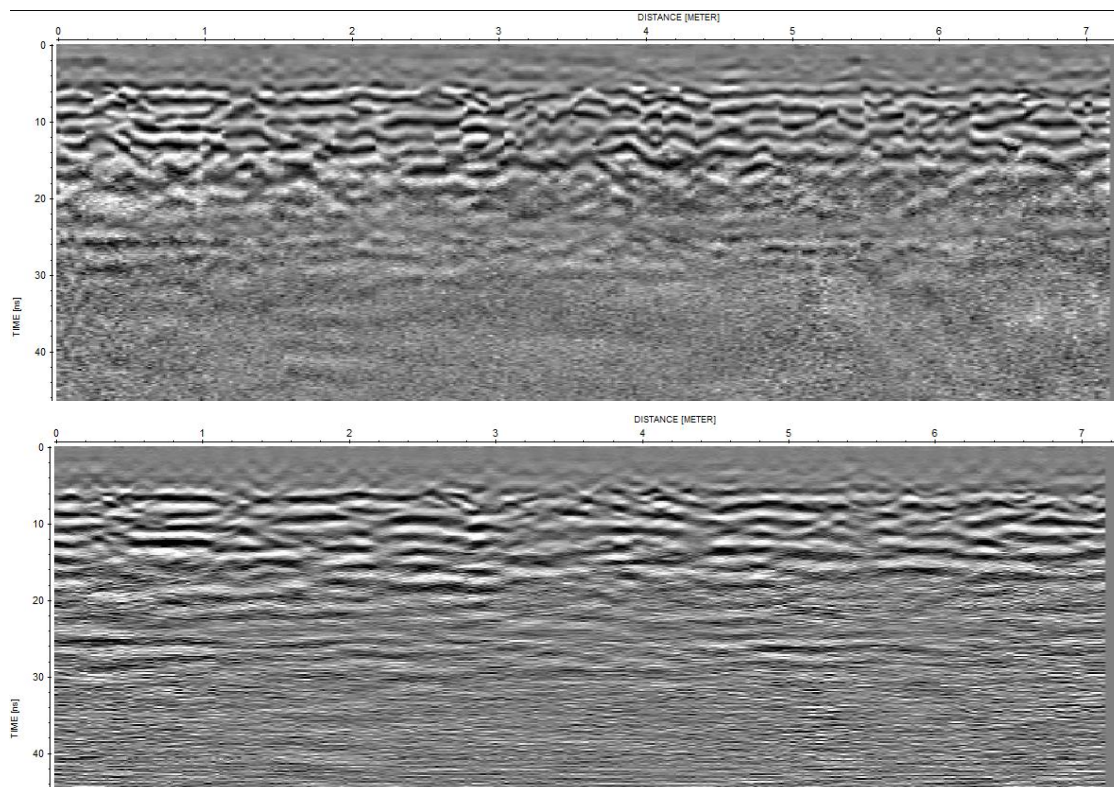
#### 4.1.1. Analyse GPR-profielen Coupure Rechts

Een overzicht van de waargenomen reflecties bij deze frequentie doorheen het studiegebied worden getoond in Figuur 4.1 bij een diepte van 20-25 cm, 30-35 cm, 70-75 cm en 75-80 cm onder het maaiveld. De rode pijl in Figuur 4.1 duidt de start en de richting van de prospectie aan. Aan de rechterkant van het studiegebied bevindt er zich een straat, waarin tramsporen ingebed zijn, en links bevindt zich het fietspad. Op de dag van de meting was er een auto geparkeerd aan de linker kant van de boom (ten aanzien van het fietspad).



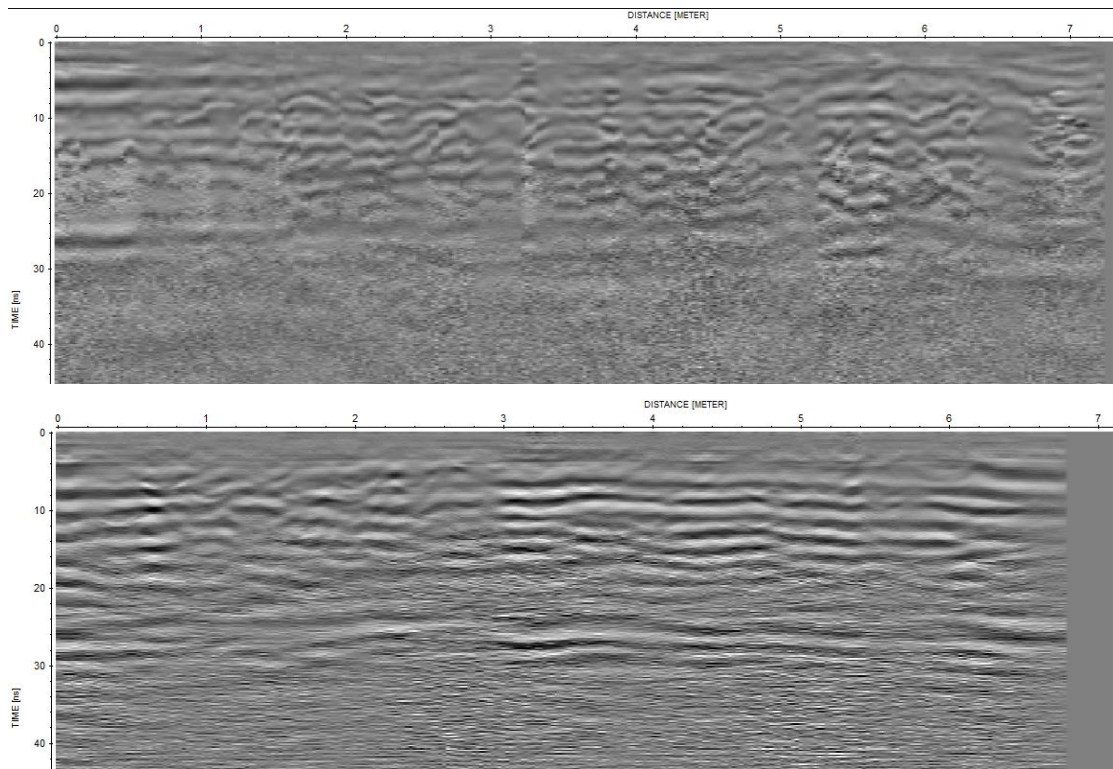
Figuur 4.1: Diepteslices op vier verschillende dieptes (van links naar rechts): 20-25 cm, 30-35 cm, 70-75 cm en 75-80 cm onder het maaiveld, van de radarsignalen opgemeten met een frequentie van 500 MHz. Lichte zones stellen sterke reflecties voor, terwijl donkere zones de afwezigheid van reflecties aangeven. Het coördinatensysteem van deze diepteslices is Belgian Lambert 72' (EPSG-code: 31370).

De eerste vier radarprofielen werden gemeten op het wegdek (kasseien) naast de tramsporen (rode pijl Figuur 4.1). Een niet-gemigreerd en gemigreerd radarprofiel op deze locatie worden weergegeven in Figuur 4.2. De snelheid werd ingeschat op 0,07 m/ns op basis van de migratie-tests (en deze snelheid werd ook toegepast in de migratie-stap), dus een tijdstap van 10 ns stelt een diepte van 0,35 m voor op de radarprofielen (Sectie 3.4.3., Formule 2). Er is een duidelijke sterke scattering te zien in de bovenste 30 cm van beide profielen (Figuur 4.2). Daaronder is er vooral veel verstoring (ruis) in beide profielen en is er weinig waar te nemen.



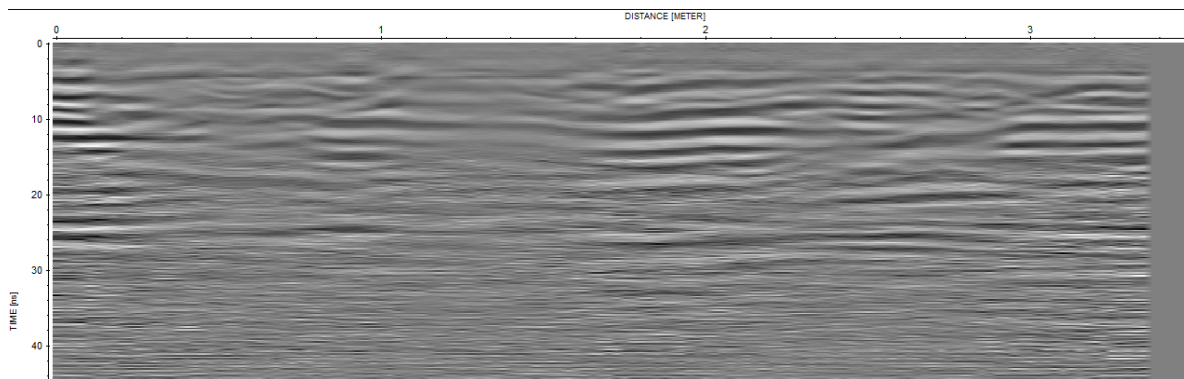
Figuur 4.2: Niet-gemigreerd (boven) en gemigreerd (onder) radarprofiel gemeten over de kasseien naast de tramsporen met een frequentie van 500 MHz.

Verder wordt een radarprofiel geselecteerd naast de boom aan de kant van de tramhalte (groene pijl Figuur 4.1). Het niet-gemigreerde en gemigreerde radarprofiel wordt getoond in Figuur 4.3. In het niet-gemigreerde radarprofiel zijn een paar duidelijke hyperbolen te zien. Ter hoogte van dit radarprofiel bevindt zich een pijpleiding in de bodem, tijdens de opgegraven profielvergelijking (Sectie 4.1.2.) werd dit mondeling toegelicht door Egbert Blancquaert van Stad Gent (groene pijl Figuur 4.1). Na de migratie-stap zijn de reflecties voornamelijk continu en horizontaal.



Figuur 4.3: Niet-gemigreerd (boven) en gemigreerd (onder) radarprofiel gemeten naast de boom aan de kant van de tramsporen met een frequentie van 500 MHz.

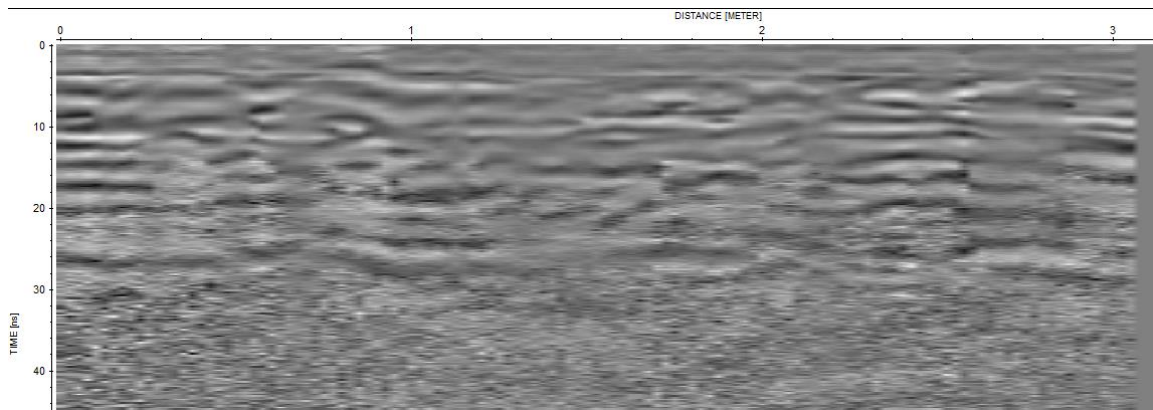
Rechts naast de boom wordt een laatste radarprofiel geselecteerd voor de interpretatie (oranje pijl Figuur 4.1). Op het gemigreerde radarprofiel is er op een afstand van 2 m in het profiel een anomalie te zien met een breedte van ca. 0,50 m en een diepte van ca. 35 cm (Figuur 4.4).



Figuur 4.4: Gemigreerd radarprofiel gemeten rechts naast de boom (ten aanzien van het fietspad) met een frequentie van 500 MHz.

Een niet-gemigreerd radarprofiel aan de rechterkant van de boom (gele pijl Figuur 4.1) wordt weergegeven in Figuur 4.5. Op dit profiel zijn er geen hyperbolen waarneembaar.





Figuur 4.5: Niet-gemigreerd radarprofiel gemeten rechts naast de boom (ten aanzien van het fietspad) met een frequentie van 500 MHz.

#### 4.1.2. GPR-profiel en opgegraven profielvergelijking

Na de interpretatie van de GPR-profielen werden de verkregen resultaten gevalideerd door een aantal boomwortels bloot te leggen aan de hand van een air spade (Figuur 3.18) aan de rechterkant van de boom (ten aanzien van het fietspad). Hierbij werd een visuele vergelijking gemaakt tussen de radarprofielen (Figuur 4.4 en 4.5) en het opgegraven profiel.



Figuur 4.6: De bodem bevat veel steengruis (bakstenen, glas, enz.) van verschillende formaten.

De bodem binnen het zoekvenster werd gekenmerkt door steengruis en bodemvreemde materialen van allerhande formaten met onder meer grovere (> 5 cm diameter) en fijnere baksteenfragmenten van enkele centimeters, grind, betonfragmenten en glasscherven (Figuur 4.6).



Figuur 4.7: Blootleggen van een paar boomwortels aan de rechterkant van de boom (ten aanzien van het fietspad).

Naast een grote boomwortel werden ook verschillende kleinere boomwortels blootgelegd (Figuur 4.7). Verder werd ook de omtrek en de diepte van deze wortels gemeten (Figuur 4.8 en Tabel 4.1).



Figuur 4.8: De boomwortel werd uitgegraven tot een afstand van ongeveer 1,10 m van de boom (links). De diepte van de dikke boomwortel werd geschat tussen de 75 en 80 cm (rechts).

Tabel 4.1: Omtrek en diepte inschatting van de opgegraven boomwortels.

Boom- wortel	Omtrek [cm]	Diepte [cm]
Grote	64	75-80
Kleinste	0,6	-

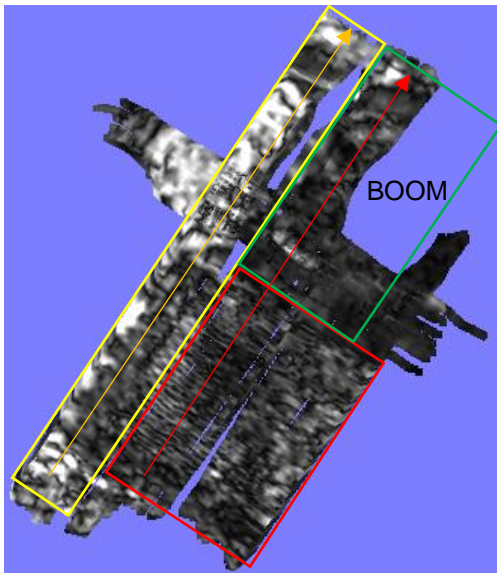


## 4.2. Coupure Links

Ook op deze locatie werden de coördinaten bij de meting met de GSSI-radar (800 MHz en 300 MHz) niet goed ingelezen waardoor de data onbruikbaar zijn. Dus enkel de radargegevens verzameld met de 500 MHz GPR antenne worden hieronder verder geanalyseerd. Bij de bespreking van de radargegevens worden de niet-gemigreerde radarprofielen als de gemigreerde radarprofielen besproken (Sectie 3.5.5.).

### 4.2.1. Analyse GPR-profielen Coupure Links

Een overzicht van de waargenomen reflecties bij een frequentie van 500 MHz doorheen het studiegebied worden getoond in Figuur 4.9 bij een diepte van 45-50 cm onder het maaiveld. In Figuur 4.10 worden de belangrijkste kenmerken van deze locatie getoond, zoals het plantendoek, het wandelpad, een pijpleiding en de verharde grasstrook.

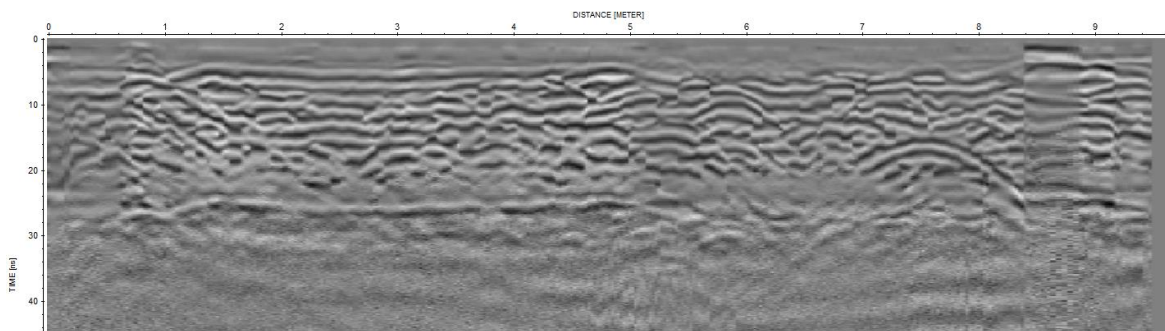


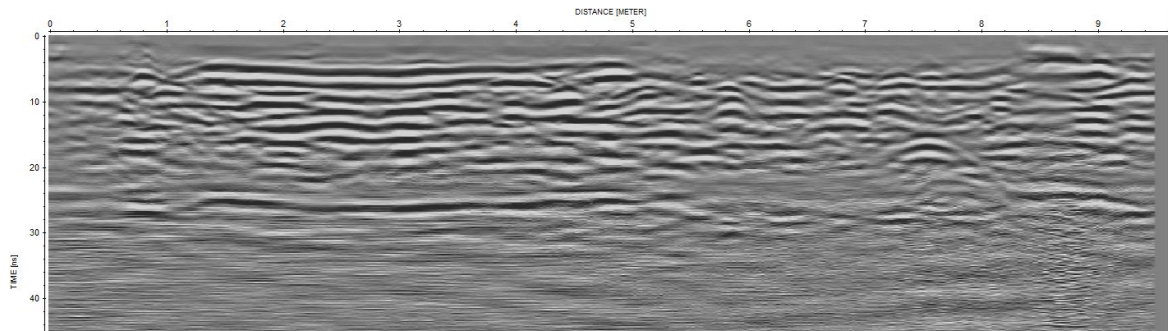
Figuur 4.9: Diepteslices op een diepte van 45-50 cm onder het maaiveld opgemeten met een frequentie van 500 MHz. Lichte zones stellen sterke reflecties voor, terwijl donkere zones de afwezigheid van reflecties aangeven. De rode, groene en gele kaders tonen de locatie van respectievelijk de verharde grasstrook, het plantendoek en het wandelpad in dit studiegebied. De figuur wordt weergegeven in een lokaal coördinatensysteem wegens moeilijkheden om de GPS-coördinaten in het totaalstation te brengen.



Figuur 4.10: Aanduiding van de verschillende onderdelen in het studiegebied.

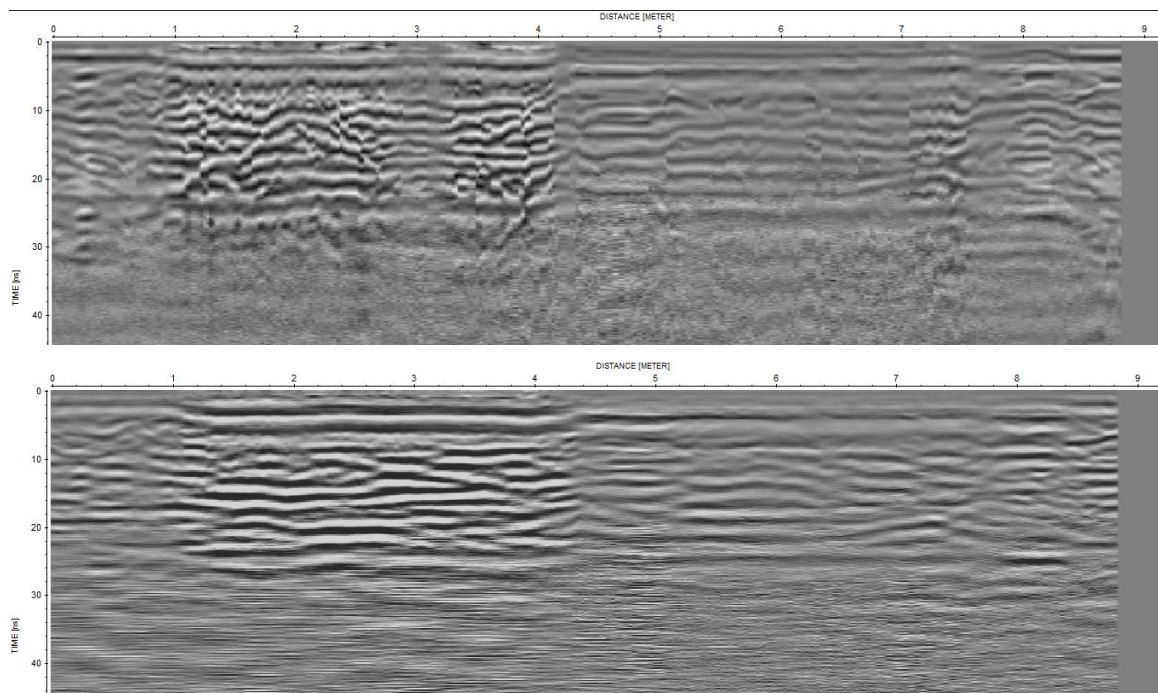
Eerst wordt een radarprofiel langsheen het wandelpad bestudeerd (oranje pijl Figuur 4.9). Een niet-gemigreerd en gemigreerd radarprofiel op deze locatie worden weergegeven in Figuur 4.11. De snelheid doorheen de radarprofielen werd ingeschat op 0,09 m/ns op basis van de migratie-tests (en deze snelheid werd ook toegepast in de migratie-stap), dus een tijdstap van 10 ns stelt een diepte van 0,45 m voor op de radarprofielen (Sectie 3.4.3., Formule 2). In zowel het niet-gemigreerde als het gemigreerde radarprofiel zijn er twee duidelijke hyperbolen te zien. Deze bevinden zich respectievelijk op een diepte van ca. 0,45 m en 0,80 m en op een afstand van ca. 5,80 m en 7,60 m van het begin van beide radarprofielen (Figuur 4.11, oranje pijl Figuur 4.9). Verder wordt geobserveerd dat het gemigreerde profiel in Figuur 4.11 ondergemigreerd is, dus dat de migratie-stap met een te lage snelheid (0,09 m/ns) is uitgevoerd.





Figuur 4.11: Niet-gemigreerd (boven) en gemigreerd (onder) radarprofiel gemeten langs het wandelpad met een frequentie van 500 MHz. Het gemigreerde radarprofiel is ondergemigreerd (i.e. met een te lage snelheid gemigreerd).

Verder wordt een radarprofiel geselecteerd dat over de verharde grasstrook en plantendoek loopt (rode pijl Figuur 4.9 en Figuur 4.10). Een niet-gemigreerd en gemigreerd radarprofiel op deze locatie worden getoond in Figuur 4.12. Op beide radarprofielen is duidelijk de overgang van de verharde grasstrook naar het plantendoek waarneembaar op een afstand van ongeveer 4,20 m van het begin van beide radarprofielen. De reflecties worden duidelijk minder sterk als er over het plantendoek wordt gemeten. Sterke reflecties zijn waar te nemen over de verharde grasstrook. Langs het begin van de verharde grasstrook loopt er een pijpleiding (Figuur 4.10).



Figuur 4.12: Niet-gemigreerd (boven) en gemigreerd (onder) radarprofiel gemeten langs de verharde grasstrook en plantendoek met een frequentie van 500 MHz.

### 4.3. Bosland

Het watergehalte en het bodemtype hebben een invloed op het detectievermogen van de grondradar (Sectie 2.3.2.). Om de invloed van deze factoren mee te nemen in de interpretatie van de radarprofielen wordt de permittiviteit van de boom en de bodem gemeten (HydraProbe) en wordt een analyse van het bodemprofiel gemaakt.

De permittiviteit in de boom (gemeten onderaan de stam) en de permittiviteit van de toplaag van de bodem worden weergegeven in Tabel 4.3 en 4.4 Ook de conductiviteit en temperatuur worden gemeten door de HydraProbe. De permittiviteit van de boom is bijna twee keer zo hoog als de permittiviteit van de toplaag van de bodem. De conductiviteit kent geen groot verschil tussen de boom en de toplaag van de bodem.

Tabel 4.3: Resultaten van de HydraProbe in de stam van de boom.

Datum	Tijd	Conductiviteit [S/m]	Temperatuur [°C]	Permittiviteit
3/20/2022	17:57	0,005	7,8	14,124
3/21/2022	14:19	0,005	13,4	13,984

Tabel 4.4: Resultaten van de HydraProbe in de toplaag van de bodem.

Datum	Tijd	Conductiviteit [S/m]	Temperatuur [°C]	Permittiviteit
3/20/2022	17:57	0,004	7,7	7,767
3/21/2022	14:19	0,004	9,1	7,951

Verder wordt het bodemprofiel geanalyseerd, dit om de bodemeigenschappen die invloed zouden kunnen hebben op het interpretatiepotentieel van de grondradar te evalueren (Figuur 4.13).



Figuur 4.13: Bodemprofiel in Bosland.

De bodem bestaat uit 4 horizonten: een A-horizont (op 4-9 cm onder het maaiveld), E- horizont (op 9-14 cm onder het maaiveld), B-horizont (op 14-19 cm onder het maaiveld) en een C-horizont (dieper gelegen). Doorheen het hele bodemprofiel werd een zandige textuur vastgesteld. Het volumetrisch vochtgehalte werd in elk horizont bepaald en wordt weergegeven in Tabel 4.5.



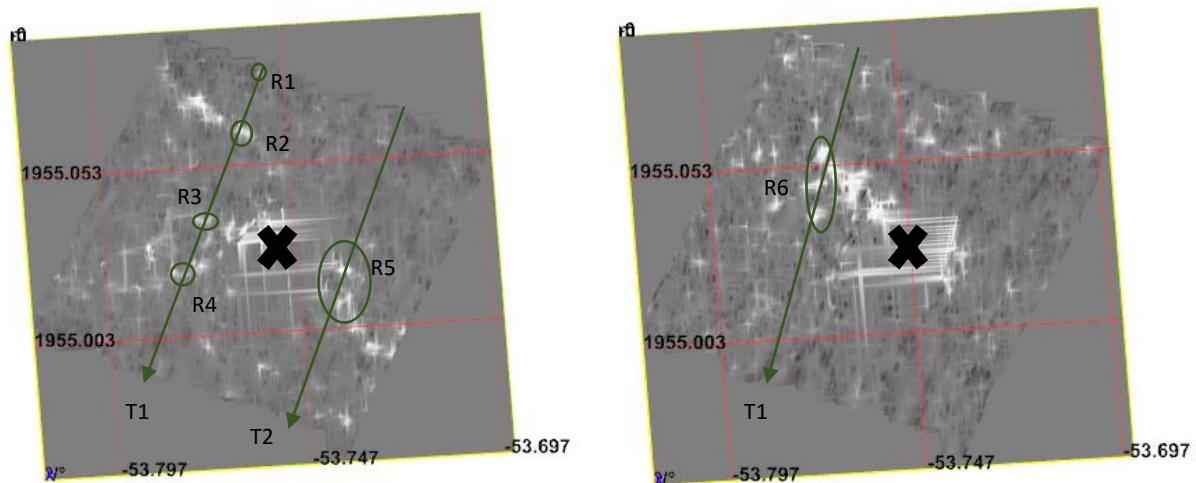
Tabel 4.5: Volumetrisch vochtgehalte in elke bodemhorizont, berekend aan de hand van Kopecky ringen.

Horizont	Diepte [cm]	Volumetrisch vochtgehalte [ $m^3/m^3$ ]
A	4-9	0,1782
E	9-14	0,1186
B	14-19	0,1147
C	60-65	0,1040

#### 4.3.1. Analyse GPR-profielen Bosland

Bij de bespreking van de radargegevens wordt bij elke frequentie eerst de niet-gemigreerde radarprofielen besproken en daarna de gemigreerde radarprofielen (Sectie 3.5.5.).

Eerst worden de radargegevens bij een frequentie van 800 MHz geanalyseerd. De diepte op de niet-gemigreerde radarprofielen en de diepteslices ervan wordt intern in RADAN7 bepaald tijdens de dataverzameling. Voor de frequentie van 800 MHz is het maximale dieptebereik gelijk aan 1,11 m. Dit wordt berekend op basis van het bereik (14,81 ns) dat tijdens de metingen bepaald wordt en de diëlektrische permittiviteit, die door de software gelijk wordt gezet aan 4. Een overzicht van de waargenomen reflecties bij deze frequentie doorheen het studiegebied worden getoond in Figuur 4.14 bij een diepte van 0,32 m en 0,72 m. De voornaamste reflecties doen zich voor op een diepte van 30-40 cm en 70-75 cm onder het maaiveld.

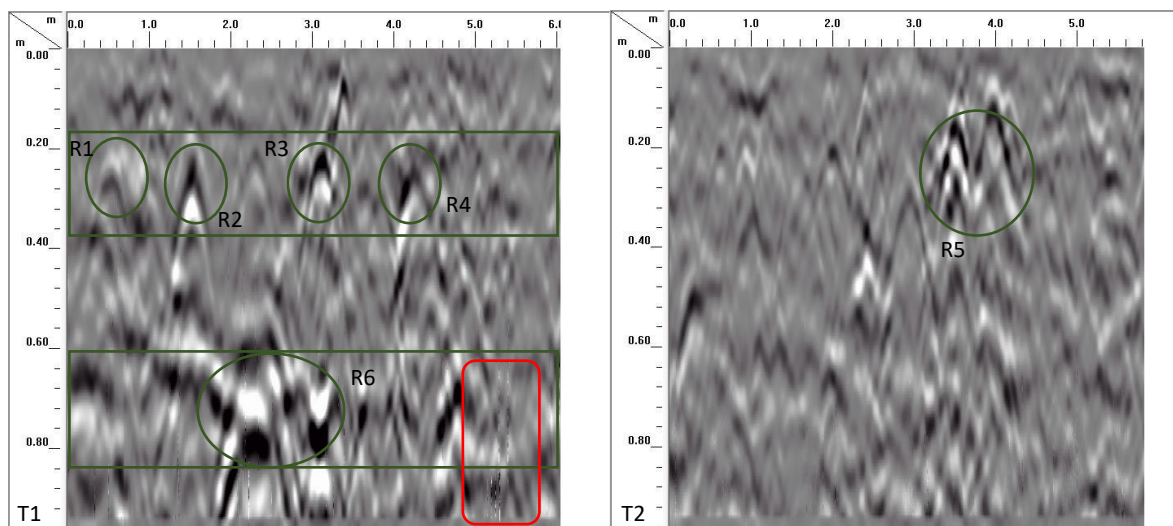


Figuur 4.14: Diepteslices op twee verschillende dieptes, op 0,32 m (links) en 0,72 m (rechts) onder het maaiveld, van de radarsignalen opgemeten met de GSSI-radar met een frequentie van 800 MHz, zonder migratie van de profielen. Lichte zones stellen sterke reflecties voor, terwijl donkere zones de afwezigheid van reflecties aangeven. De figuur wordt weergegeven in een lokaal coördinatensysteem wegens moeilijkheden bij het omzetten van de coördinaten. De getallen op de figuur stellen hierdoor geen bruikbare afstanden voor. De diepteslices van 800 en 300 MHz werden automatisch gegenereerd in de Radan7-software.

Reflecties die elkaar radiaal opvolgen vanuit de locatie van de boom (voorgesteld door een zwart kruis) kunnen worden geïnterpreteerd als mogelijke boomwortels. Deze reflecties worden verder

onderzocht door twee radarprofielen (T1 en T2) te interpreteren (Figuur 4.14). De locatie van deze radarprofielen zijn aangegeven in Figuur 4.14 als groene pijlen, deze geven ook de richting aan van het gemeten transect. Deze radarprofielen zijn respectievelijk transect T1 en T2.

Transect T1 bevat vier sterke reflecties (R1, R2, R3 en R4) op een diepte van ca. 0,30 m, deze worden aangeduid in Figuur 4.14 (links) als cirkels. De reflecties R2, R3 en R4 volgen een radiaal patroon vanuit de boom. Figuur 4.15 (links) toont de vier reflecties (R1, R2, R3 en R4) langsheen transect T1 over een afstand van ca. 5 m bij een diepte van ca. 0,30 m. In de groene zone worden vier duidelijke hyperbolen waargenomen. De hyperbolen van de reflecties R2, R3 en R4 worden gekenmerkt door een hogere amplitude dan de eerste reflectie R1 in het transect T1. Deze reflecties geven aan dat er zich mogelijk een boomwortel bevindt op deze drie locaties, respectievelijk op ca. 1,50 m, 3,20 m en 4,20 m van het begin van het transect (T1). De eerste reflectie R1 is minder intens en loopt ook niet radiaal vanuit de boom (Figuur 4.14) maar is eerder een puntreflectie op ca. 0,50 m van het begin van het transect (T1). Ook tussen R2 en R3 bevindt zich een minder intense hyperbool.

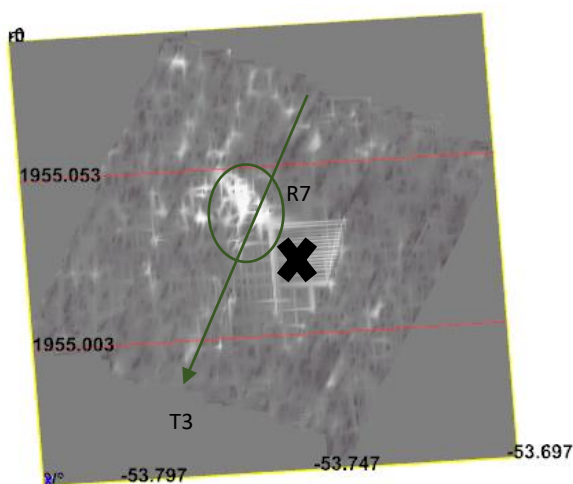


Figuur 4.15: Twee radarprofielen: Transect T1: op ca. 0,30 m zijn er vier duidelijke hyperbolen waar te nemen en op ca. 0,70 m is er een sterke reflectie waar te nemen (links). Dieper in het profiel worden ook verstoringen ('spikes') waargenomen (rode kader) (links); Transect T2: op ca. 0,30 m diepte is er een sterke reflectie aanwezig (rechts).

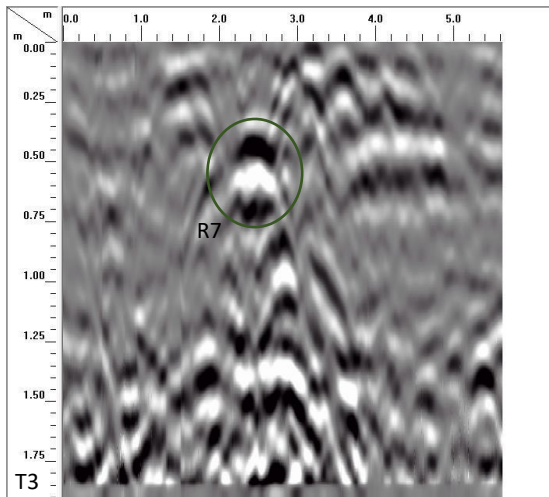
Transect T2 bevat een sterke reflectie (R5) op een diepte van ca. 0,30 m, deze wordt ook aangeduid als een cirkel in Figuur 4.14 (links). De reflectie R5 volgt samen met andere reflecties een radiaal patroon. Figuur 4.15 (rechts) toont deze reflectie R5 langsheen transect T2 over een afstand van ca. 0,20 m bij een diepte van ca. 0,30 m. De intense reflectie geeft een duidelijke hyperbool weer, die gelijkaardig wordt beschreven als de reflecties R2, R3 en R4. Hier kan ook geïnterpreteerd worden dat deze reflectie mogelijk de aanduiding is van een boomwortel op ca. 3,40 m van het begin van het transect T2.

Tot slot wordt een dieper gelegen reflectie R6 in Transect T1 bekeken. Op Figuur 4.14 (rechts) worden sterke reflecties waargenomen op een diepte van 0,72 m onder het maaiveld die een radiaal patroon volgen vanuit de boom (groene cirkel). De intense reflectie R6 wordt weergegeven in Transect T2 (Figuur 4.15 links) over een afstand van ca. 1 m op een diepte van ca. 0,70 m. In Figuur 4.15 (links, rode kader) worden ook verstoringen in het profiel geobserveerd die door een externe bron van EM-straling veroorzaakt worden.

Daarna worden de niet-gemigreerde radargegevens bij een frequentie van 300 MHz geanalyseerd. Een overzicht van de voornaamste waargenomen reflecties bij een diepte van 60 cm onder het maaiveld doorheen het studiegebied worden weergegeven in Figuur 4.16. Er wordt een sterke reflectiestrook (R7) waargenomen die radiaal vertrekt vanuit de locatie van de boom (Figuur 4.16), dit kan wijzen op een boomwortel. Om dit te onderzoeken wordt er verder gekeken naar transect T3 (Figuur 4.16). De reflectie R7 in transect T3 wordt weer gegeven in Figuur 4.17 over een afstand van ca. 0,40 m op een diepte van ca. 0,60 m. Deze sterk intense reflectie wordt weergegeven op een afstand van 2,40 m van het begin van het transect T3 (groene pijl in Figuur 4.16, de pijl geeft de richting van de meting weer).



Figuur 4.16: Diepteslice voor een diepte van 0,60 m onder het maaiveld van de radarsignalen opgemeten met de GSSI-radar met een frequentie van 300 MHz, zonder migratie van de profielen. Lichte zones stellen sterke reflecties voor, terwijl donkere zones de afwezigheid van reflecties aangeven.

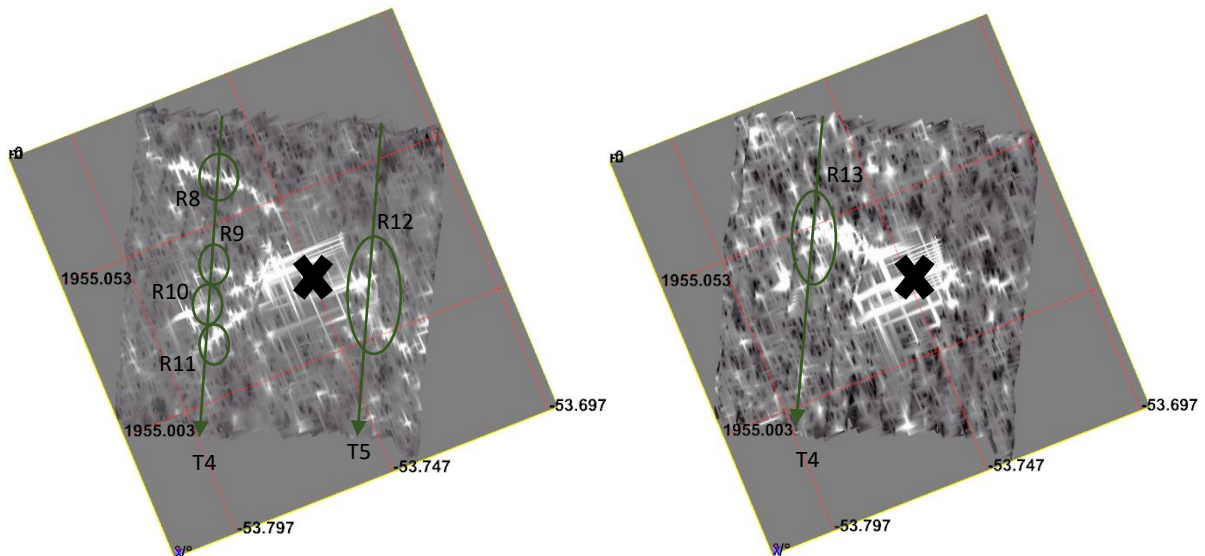


Figuur 4.17: Radarprofiel van transect T3: op ca. 0,60 m is er een sterke reflectie waar te nemen.

Vervolgens wordt gekeken naar de gemigreerde radargegevens. Hierbij worden eerst de radargegevens met een frequentie van 800 MHz geanalyseerd en daarna deze met een frequentie van 300 MHz. De diëlektrische permittiviteit die wordt toegepast voor de migratie verwerking is voor beide frequenties gelijk aan 11,32. Dit werd bepaald op basis van migratie-test en uit de gegevens van de HydraProbe (Tabel 4.3 en 4.4) dat de diëlektrische permittiviteit tussen 7,8 (bodem) en 14 (boom) ligt. Deze inschatting van de diëlektrische permittiviteit bepaalt de inschatting van de diepte in de gemigreerde radarprofielen, doordat de diepte werd ingeschat met een snelheid van 0,089 m/ns (Sectie 3.5.5. en Formule 2 in Sectie 3.4.3.).

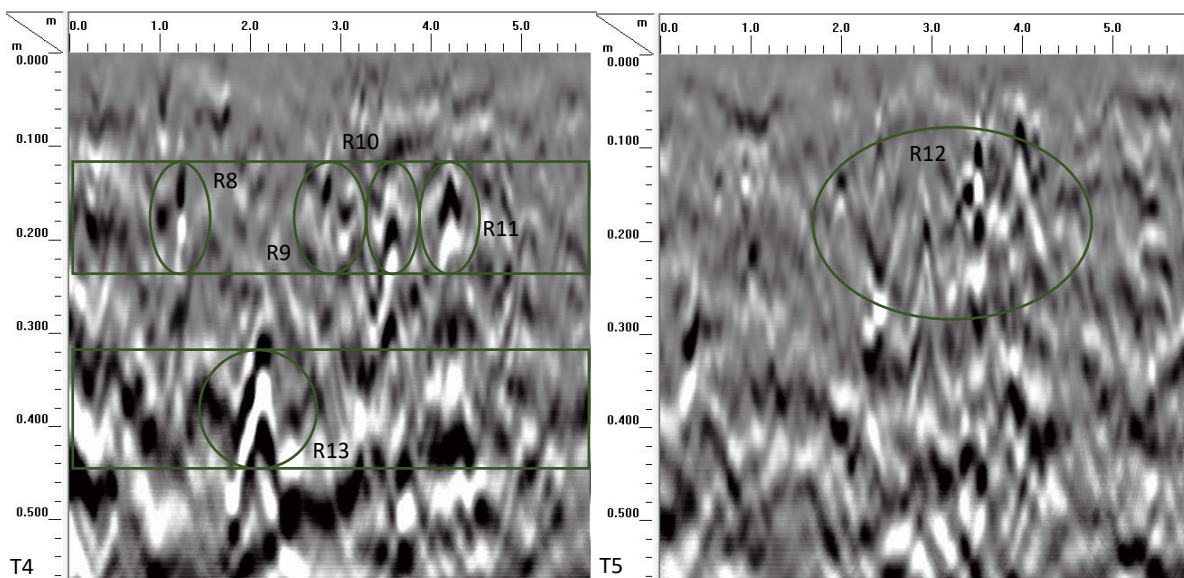
De inschatting van de diepte van de reflecties bij onderstaande gemigreerde-radarprofielen met een frequentie van 800 en 300 MHz, zijn te laag. Tijdens de time-zero correctie werd een te groot deel bovenaan de profielen weggelaten, waardoor de diepte-inschatting foutief is. De snelheidsbepaling doorheen de profielen aan de hand van de RADAN7-software was moeilijk te bepalen en heeft ook een invloed op de inschatting van deze dieptes.

Eerst worden de gemigreerde radargegevens bij een frequentie van 800 MHz geanalyseerd. Een overzicht van de waargenomen reflecties bij deze frequentie doorheen het studiegebied worden getoond in Figuur 4.18. De voornaamste reflecties doen zich voor op een diepte van 21 cm en 42 cm onder het maaiveld. Om de reflectie verder te analyseren wordt eerst dieper ingegaan op transect T4 waarlangs er vier sterke reflecties (R8, R9, R10 en R11) worden waargenomen op een diepte van 0,21 m (Figuur 4.18 links). Transect T4 wordt aangeduid in Figuur 4.18 (links) als een groene pijl, waarbij de richting van de pijl de richting van de meting weergeeft. De vier reflecties (groene cirkels op transect T4) volgen een duidelijk radiaal patroon vanuit de boom (zwart kruis).



Figuur 4.18: Diepteslices op twee verschillende dieptes (0,21 m links en 0,42 m rechts) onder het maaiveld van de radarsignalen opgemeten met de GSSI-radar met een frequentie van 800 MHz, met migratie van de profielen. Lichte zones stellen sterke reflecties voor, terwijl donkere zones de afwezigheid van reflecties aangeven.

Figuur 4.19 (links) toont deze vier reflecties langsheen transect T4 over een afstand van 4 m bij een diepte van ca. 0,20 m. R10 en R11 vertonen een sterke reflectie op respectievelijk een afstand van 3,60 m en 4,20 m van het begin van het transect T4. Deze reflecties werden ondergemigreerd, m.a.w. de snelheid (0,089 m/ns) die werd toegepast tijdens de migratie was te laag. Migratie met een gemiddelde snelheid geeft niet overal een perfect resultaat, aangezien de snelheid varieert doorheen het profiel. De reflecties R8 en R9 tonen een duidelijke sterke reflectie-verandering in het profiel op een afstand van respectievelijk 1,20 m en 2,90 m van het begin van het transect T4.



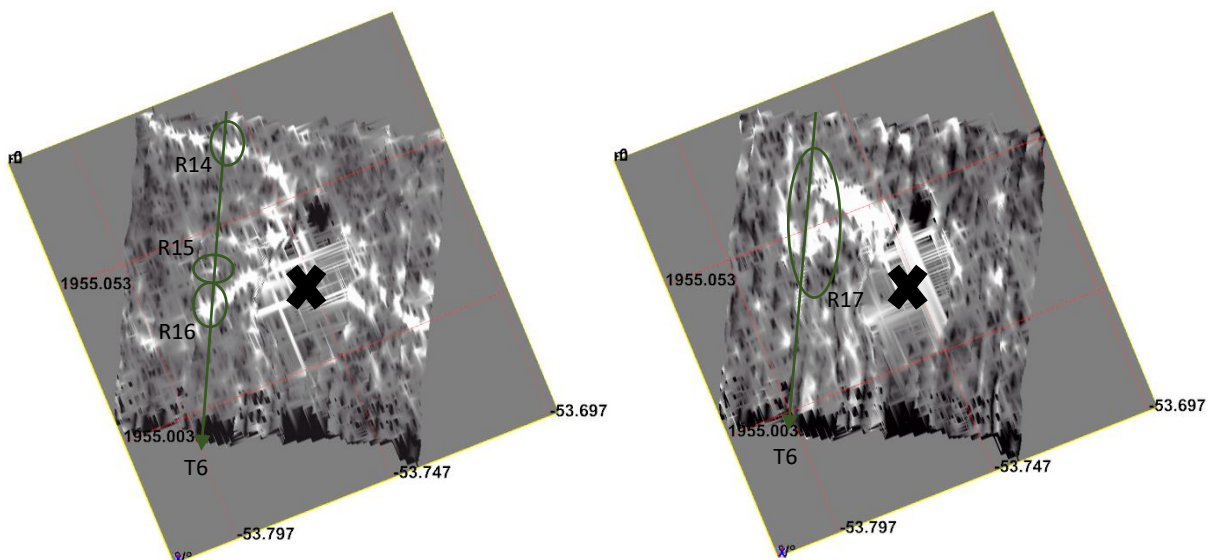
Figuur 4.19: Twee radarprofielen: Transect T4: op ca. 0,20 m zijn er vier sterke reflecties waar te nemen (R10 en R11 zijn ondergemigreerd, i.e. met een te lage snelheid gemigreerd) en op ca. 0,40 m is er een intense reflectie zichtbaar (links); Transect T5: op ca. 0,20 m zijn er verschillende reflecties waarneembaar (rechts).



Transect T5 bevat een sterke reflectie (R12) op een diepte van ca. 0,20 m, deze wordt ook aangeduid als een cirkel in Figuur 4.19 (rechts). De reflectie R12 volgt samen met andere reflecties een radiaal patroon. Figuur 4.19 (rechts) toont deze reflectie R12 langsheen transect T5 over een afstand van ca. 2 m bij een diepte van ca. 0,20 m. Naast de andere reflecties wordt een intense reflectie waargenomen op een afstand van 3,50 m van het begin van het transect T5.

Tot slot wordt een dieper gelegen reflectie R13 in transect T4 geanalyseerd. In Figuur 4.18 (rechts) worden intense reflecties waargenomen op een diepte van 0,42 m onder het maaiveld die samen een radiaal patroon volgen vertrekkende van de boom (groene cirkel). De intense reflectie R13 wordt weergegeven in Figuur 4.19 (links) over een afstand van ca. 0,40 m op een diepte van ca. 0,40 m.

Daarna worden de gemigreerde radargegevens bij een frequentie van 300 MHz geanalyseerd. Een overzicht van de voornaamste waargenomen reflecties bij een diepte van 12 cm en 41 cm (op basis van een snelheid van 0,089 m/ns, zie hierboven) onder het maaiveld doorheen het studiegebied worden weergegeven in Figuur 4.20. De inschatting van de diepte van de reflecties is te laag doordat de time-zero correctie foutief werd uitgevoerd (zie hierboven).

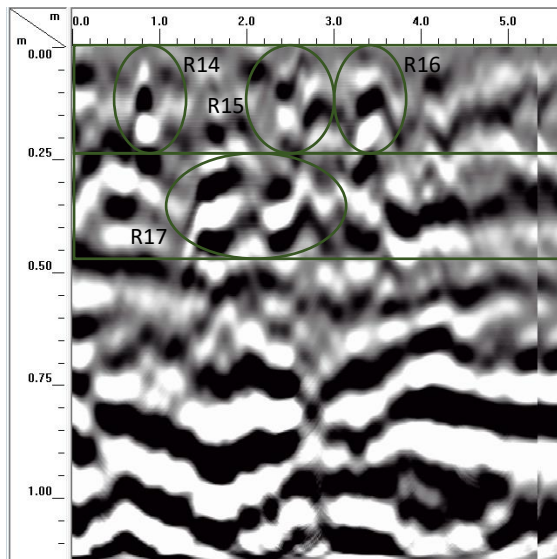


Figuur 4.20: Diepteslices op twee verschillende dieptes (0,12 m links en 0,41 m rechts) onder het maaiveld van de radarsignalen opgemeten met de GSSI-radar met een frequentie van 300 MHz, met migratie van de profielen. Lichte zones stellen sterke reflecties voor, terwijl donkere zones de afwezigheid van reflecties aangeven.

In Figuur 4.20 (links) zijn er langs transect T6 drie duidelijke reflecties (R14, R15 en R16) waar te nemen, die een radiaal patroon volgen vertrekkend van de boom. Deze drie reflecties worden ook weergegeven in Figuur 4.21 over een afstand van ca. 3 m op een diepte van ca. 0,12 m. De drie reflecties R14, R15 en R16 bevinden zich respectievelijk op een afstand van 0,80 m, 2,40 m en 3,40 m van het begin van het transect T6.

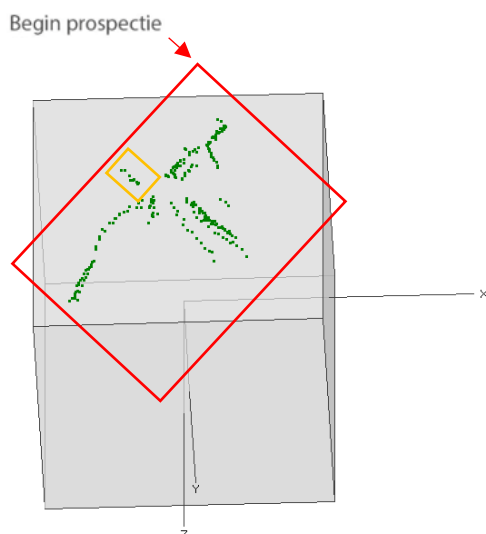


Er wordt een sterke reflectiestrook (R17) waargenomen die radiaal vertrekt vanuit de locatie van de boom (Figuur 4.20 rechts). Transect T6 wordt verder bestudeerd om deze reflecties te kunnen verklaren (Figuur 4.21). De reflectie R17 in transect T6 wordt weergegeven in Figuur 4.21 over een afstand van ca. 2 m op een diepte van ca. 0,41 m. Deze sterk intense reflectie bevindt zich op een afstand van 1,20 m van het begin van het transect T6 (groene pijl in Figuur 4.20 geeft richting van de meting weer).



Figuur 4.21: Radarprofiel van transect T6: op ca. 0,12 m zijn er drie reflecties waar te nemen en op ca. 0,40 m is er een intense reflectie zichtbaar.

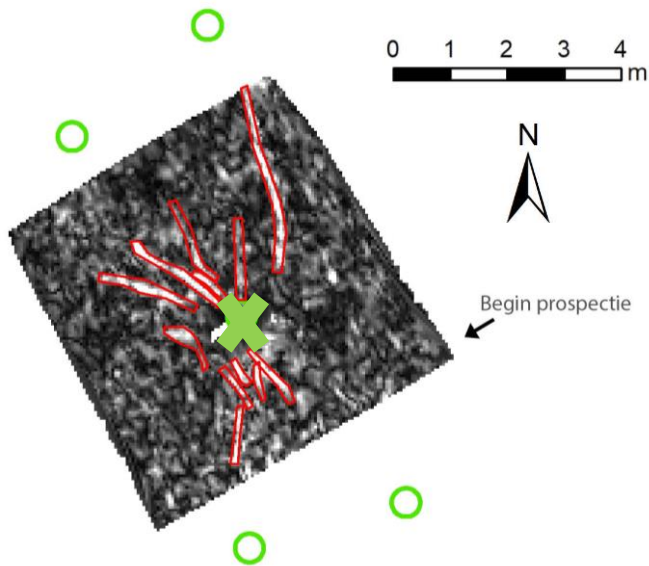
Verder worden ook radargegevens verzameld met een frequentie van 500 MHz. Doorheen de diepteslices van de radarprofielen worden de sterkste reflecties die radiaal vanuit de boom vertrekken aangeduid met kruisjes in Reflexw om zo een 3D-visualisatie van de positie van de mogelijke boomwortels te verkrijgen (Figuur 4.22).



Figuur 4.22: 3D-datavisualisatie van de sterkste reflecties (waarschijnlijk zijn dit boomwortels). Het studiegebied wordt aangeduid door een rode rechthoek en het begin van de prospectie wordt aangeduid met een rode pijl. De oranje rechthoek

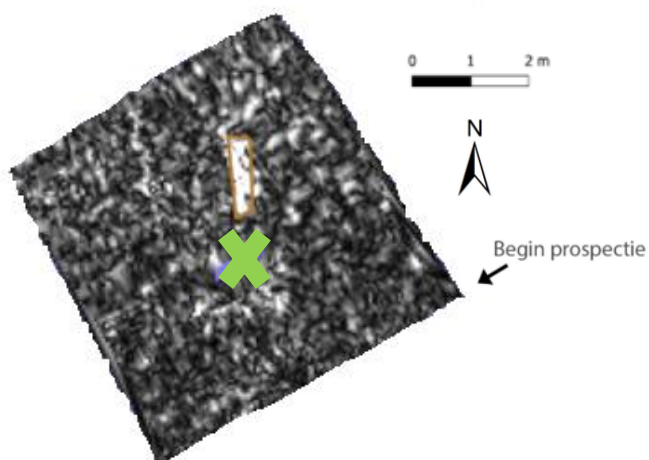
stelt een mogelijke boomwortel voor die niet werd gevonden in de radarprofielen, maar wel bij deze selectie van de sterkste reflecties.

Op een diepte van 30-40 cm (snelheid = 0,0775 m/ns, op basis van migratietests) worden duidelijke reflecties waargenomen (bij een frequentie van 500 MHz) die radiaal vanuit de boom vertrekken en dan ook kunnen geïnterpreteerd worden als mogelijke boomwortels (Figuur 4.23). De kaart van de mogelijke boomwortels in Figuur 4.23 werd ook gebruikt bij de opgegraven profielvergelijking (Sectie 4.3.2.).



Figuur 4.23: Kaart van de mogelijke boomwortels (rood) rondom de boom (groen kruis) op een diepte van 30-35 cm onder het maaiveld, met aanduiding van de vier omliggende bomen (groene cirkels). Het coördinatensysteem van deze diepteslice is Belgian Lambert 72' (EPSG-code: 31370).

Verder wordt er op een diepte van 45-50 cm een sterke reflectiestrook waargenomen, die kan geïnterpreteerd worden als een mogelijke boomwortel (Figuur 4.24).



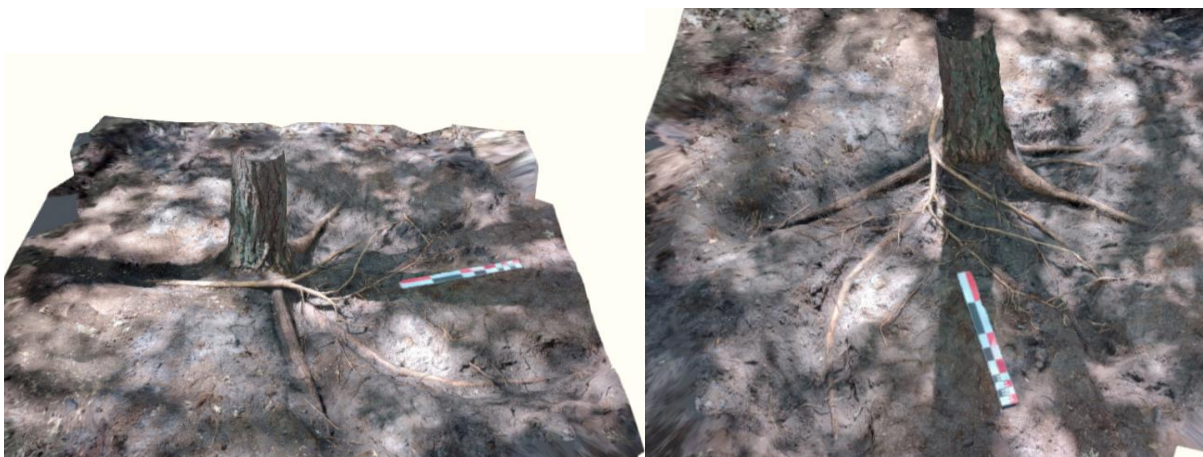
Figuur 4.24: Kaart van de mogelijke boomwortel (bruin) rondom de boom (groen kruis) op een diepte van 45-50 cm onder het maaiveld.

#### 4.3.2. GPR-profiel en opgegraven profielvergelijking

Na de interpretatie van de GPR-profielen werden de verkregen resultaten gevalideerd door een aantal boomwortels uit te graven (Figuur 4.25). Hierbij werd een visuele vergelijking gemaakt tussen de GPR-profielen en het opgegraven profiel. De boomwortels werden blootgelegd langs één kant van de boom en de bodem werd verwijderd tot een diepte van ongeveer 40 cm (Figuur 4.26 en 4.28). De diepte van verschillende boomwortels werd ingeschat en ook de diameter en omtrek werden gemeten (Figuur 4.27 en Tabel 4.6).



Figuur 4.25: Uitgraven van de boomwortels.



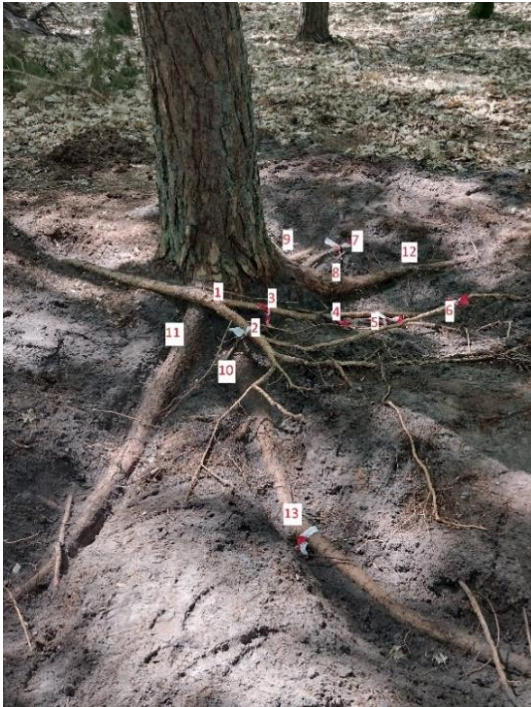
Figuur 4.26: 3D-visualisatie van de boomwortels.

Enkel de dikkere boomwortels werden waargenomen in het GPR-profiel (Figuur 4.29 en Tabel 4.6). De fijne en kleinere wortels konden niet worden waargenomen door de radar (omtrek < 5 cm of diameter < 2 cm). De boomwortel die langs de boom loopt is afkomstig van een andere boom (Figuur 4.29 blauwe rechthoek).

De diepte van de uitgegraven boomwortels werd ingeschat op een diepte tussen de 35 en 40 cm (Tabel 4.6). Ook de omtrek en de diameter van verschillende boomwortels werd gemeten (Tabel 4.6). Tabel



4.6 geeft aan of deze boomwortels zichtbaar waren op de GPR-profielen om zo een inschatting te kunnen maken van de minimale detecteerbare diameter.



Figuur 4.27: Bepaling van de omtrek en de diameter van verschillende boomwortels.

Tabel 4.6: Omtrek, diameter en diepte van verschillende boomwortels (Figuur 3) en de zichtbaarheid ervan op de GPR-profielen.

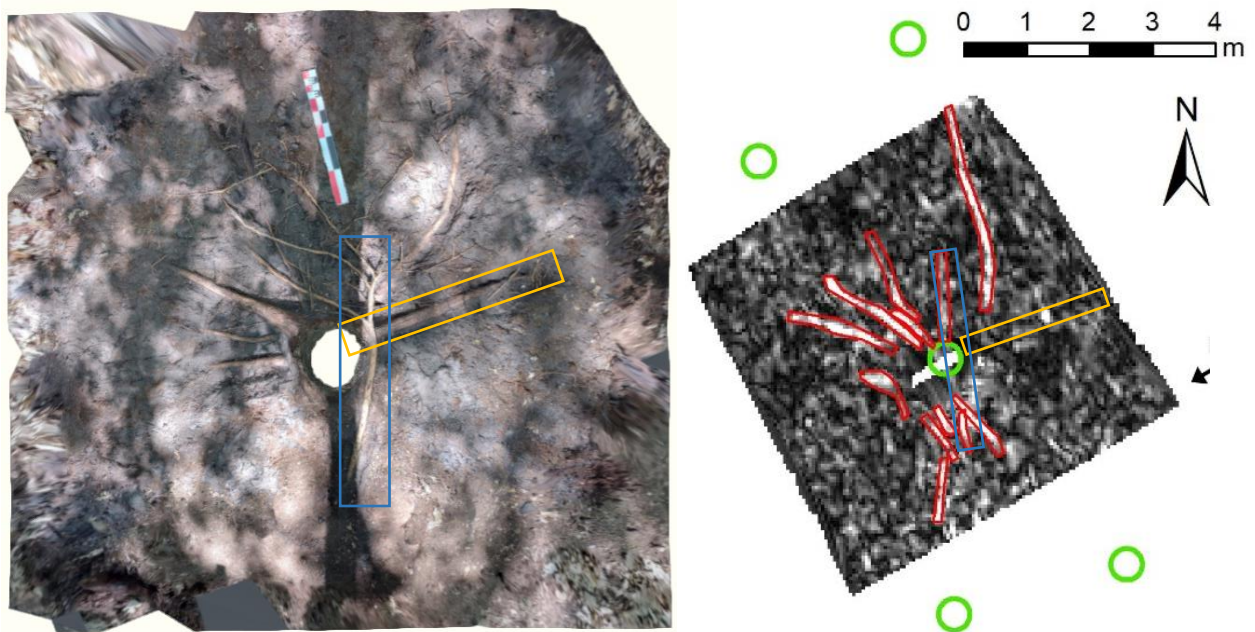
Boomwortel	Omtrek [cm]	Diameter [cm]	Diepte [cm]	Zichtbaar op GPR-profiel?
1	19,3	±6,4	±35	Ja
2	11,8	±4,1	-	Ja
3	9,4	±3,2	-	Ja
4	5,5	±1,4	-	Nee
5	8,3	±2,3	±36	Ja
6	6,7	±2,1	-	Nee
7	9,5	±3	-	Nee
8	-	±13	±37	Ja
9	-	±8	±35	Ja
10	-	±9	±36	Ja
11	-	±13	±34	Nee
12	31,4	±10	±37	Ja
13	43,2	±13,3	±35	Ja



Figuur 4.28: Diepte-inschatting van verschillende boomwortels.

Eén boomwortel werd niet gedetecteerd in het GPR-profiel ten opzichte van het opgegraven profiel (Figuur 4.29 rechts, oranje rechthoek). Wel wordt een sterke puntreflectie waargenomen op de plaats waar deze boomwortel ligt in het GPR-profiel (Figuur 4.29 links, oranje rechtshoek). Ook werd bij de 3D-visualisatie in Reflexw (Figuur 4.22 oranje rechthoek) een mogelijke boomwortel aangeduid op basis van de reflecties op deze locatie.

In de bodem waren er ook verschillende dode houtstronken, dennenappels en een steen aanwezig (Figuur 4.30).



Figuur 4.29: Vergelijking tussen opgegraven profiel en GPR-profiel met een frequentie van 500 MHz op een diepte van 30-35 cm. De pijl duidt het begin van de GPR-prospectie aan, de groene cirkels stellen bomen voor, de rode omlijnde gebieden zijn mogelijk gedetecteerde boomwortels en het gele gebied is een boomwortel in het opgegraven profiel die niet werd gedetecteerd in het GPR-profiel.

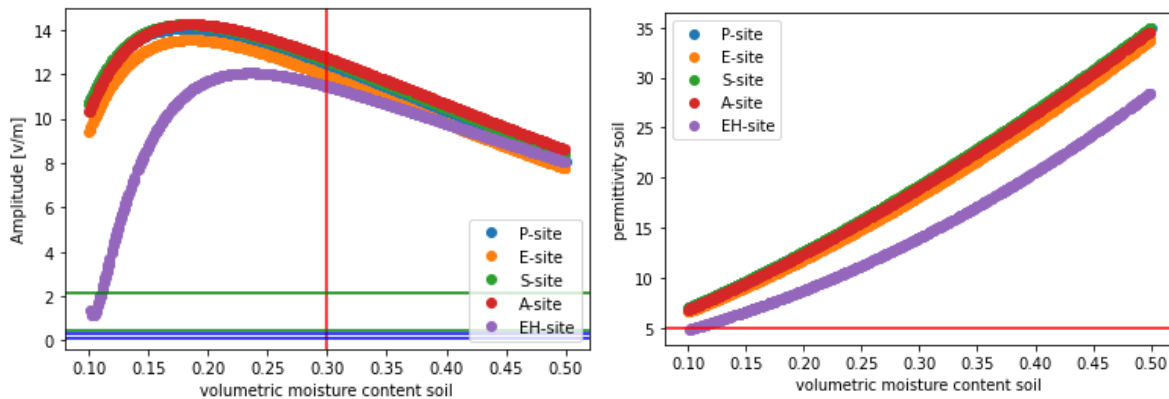


Figuur 4.30: Dode houtstronken, dennenappel en een steen gevonden in de bodem.



#### 4.4. Theoretisch model

Eerst wordt de invloed van de variatie in het bodemvochtgehalte op de detecteerbaarheid van een boomwortel met een grondradar van 500 MHz bestudeerd. Dit voor een boomwortel die zich bevindt op 20 cm onder het maaiveld, met een vochtgehalte van  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (dus een permittiviteit van 4,94, Formule 20). De invloed van het bodemvochtgehalte wordt geëvalueerd voor vijf verschillende bodemtypes (Tabel 3.6). Een grafiek van de maximale amplitude in functie van het bodemvochtgehalte en een grafiek van de permittiviteit van de bodem in functie van het bodemvochtgehalte worden getoond in Figuur 4.30. De ruisniveaus worden bepaald op basis van de maximale amplitude van de air wave bij een bodemvochtgehalte van 0,1 (minimum) en  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (maximum). Het ruisniveau wordt dan bepaald door 0,4% (Coupure Rechts) en 0,06% (Bosland) van deze maximale amplitude te nemen (Tabel 3.4). Het ruisniveau ligt dan respectievelijk tussen 0,48 en 2,18 (Coupure Rechts) en tussen 0,07 en 0,32 (Bosland).

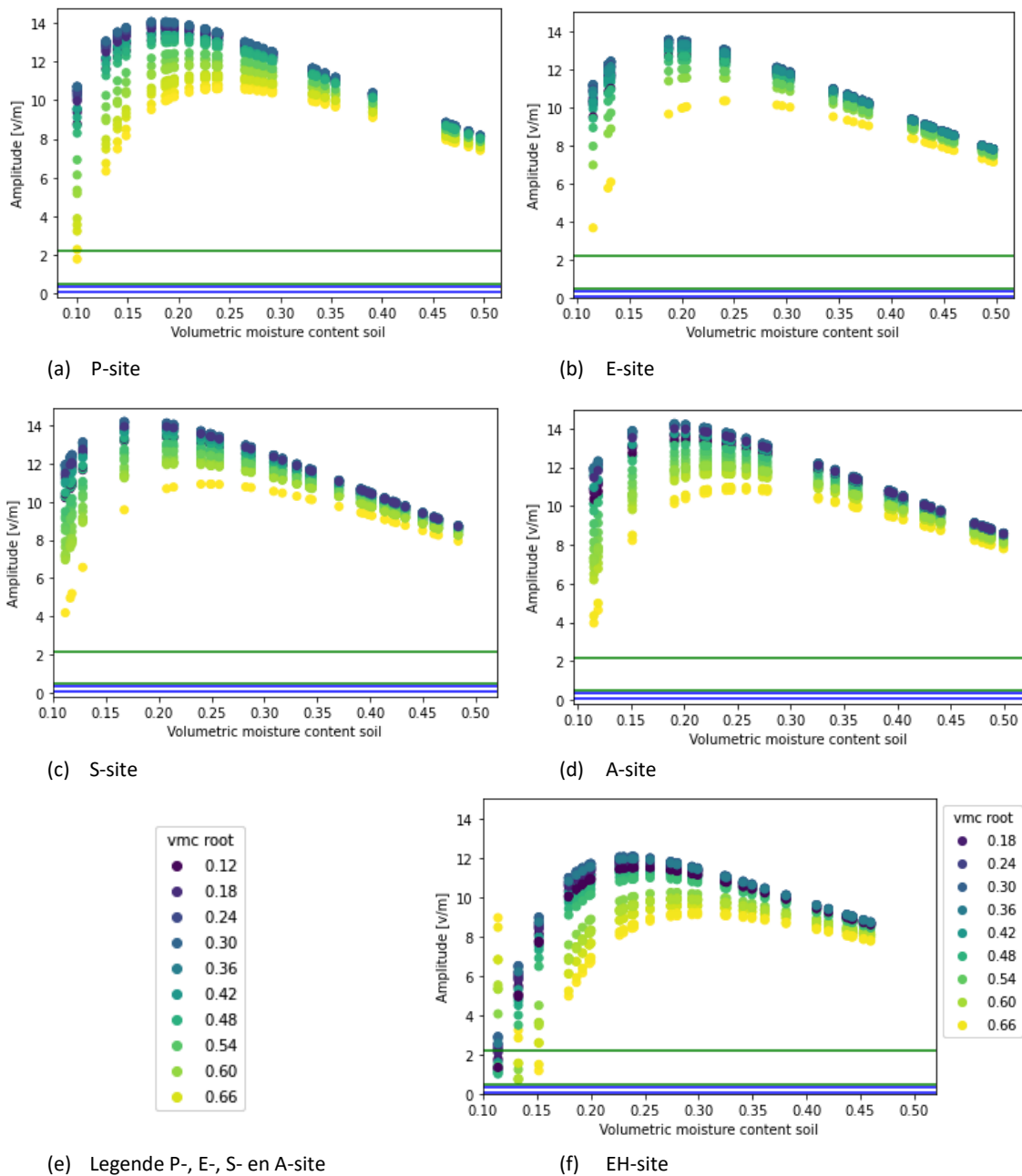


Figuur 4.30: Maximale amplitude in functie van het bodemvochtgehalte (links) en de permittiviteit van de bodem in functie van het bodemvochtgehalte (rechts) voor vijf verschillende bodemtypes: P = leembodem, E = leembodem, S = zandbodem, A = siltige klei-leembodem en EH = siltige kleibodem (Tabel 3.6). De groene en blauwe lijnen geven het minimale en maximale ruisniveau weer van de grondradar (500 MHz) bepaald op basis van respectievelijk de radarmeting in Bosland en aan de Coupure Rechts (Tabel 3.4). De rode lijn in de linker figuur duidt het vochtgehalte van de boomwortel aan en de rode lijn in de rechter figuur de permittiviteit van de boomwortel.

Daarna wordt de invloed van de variatie van zowel het bodemvochtgehalte (tussen de  $0,1$  en  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) als de variatie in het vochtgehalte van de wortel (tussen  $0,1$  en  $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) bestudeerd. Dit ook voor een bodem met één bodemlaag en één boomwortel op een diepte van 20 cm bij een frequentie van 500 MHz. Figuur 4.31 geeft de invloed hiervan weer voor de vijf verschillende bodemtypes (Tabel 3.6). De ruisniveaus worden bepaald op basis van de maximale amplitude van de air wave bij een vochtgehalte van de bodem en de boomwortel gelijk aan  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (minimum) en bij een bodemvochtgehalte van  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (maximum) en het vochtgehalte van de boomwortel gelijk aan  $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (maximum). Het ruisniveau wordt dan bepaald door 0,4% (Coupure Rechts) en 0,06% (Bosland)



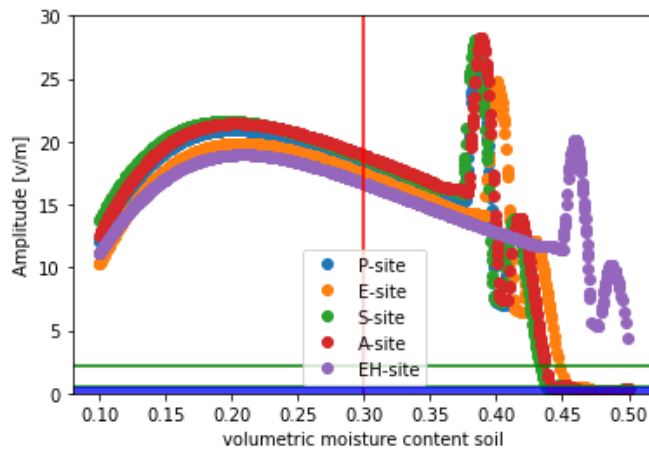
van deze maximale amplitude te nemen (Tabel 3.4). Het ruisniveau ligt dan respectievelijk tussen 0,49 en 2,18 (Coupure Rechts) en tussen 0,07 en 0,33 (Bosland).



Figuur 4.31: Maximale amplitude in functie van het bodemvochtgehalte en variatie in het vochtgehalte van de boomwortel (vmc root) voor vijf verschillende bodemtypes: (a) P = leembodem, (b) E = leembodem, (c) S = zandbodem, (d) A = siltige klei-leembodem en (f) EH = siltige kleibodem (Tabel 3.6). De groene en blauwe lijnen geven het minimale en maximale ruisniveau weer van de grondradar (500 MHz) bepaald op basis van respectievelijk de radarmeting in Bosland en aan de Coupure Rechts (Tabel 3.4). De legende van de grafieken (a), (b), (c) en (d) wordt weergegeven in (e).

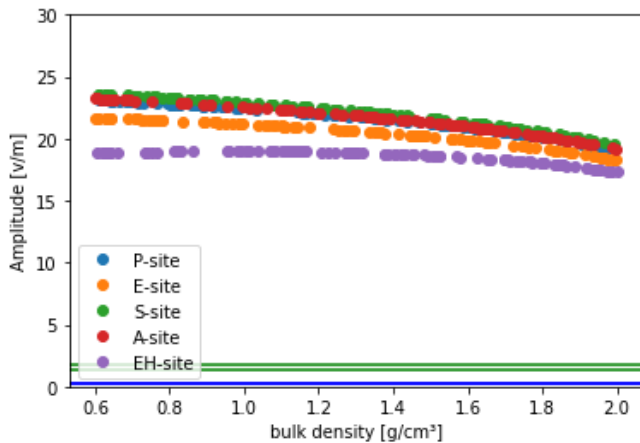
Daarnaast wordt de invloed van een bodem met twee bodemlagen bestudeerd. Eerst wordt de invloed van de variatie van het bodemvochtgehaltes (tussen de 0,1 en 0,5  $m^3/m^3$ ) in beide bodemlagen bestudeerd (Figuur 4.32). De boomwortel bevindt zich in de tweede bodemlaag op 40 cm onder het

maaiveld, met een vochtgehalte van  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (dus een permittiviteit van 4,94, Formule 20). De ruisniveaus worden bepaald op basis van de maximale amplitude van de air wave bij een bodemvochtgehalte van 0,1 (minimum) en  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (maximum). Het ruisniveau wordt dan bepaald door 0,4% (Coupure Rechts) en 0,06% (Bosland) van deze maximale amplitude te nemen (Tabel 3.4). Het ruisniveau ligt respectievelijk tussen 0,49 en 2,18 (Coupure Rechts) en tussen 0,07 en 0,33 (Bosland).



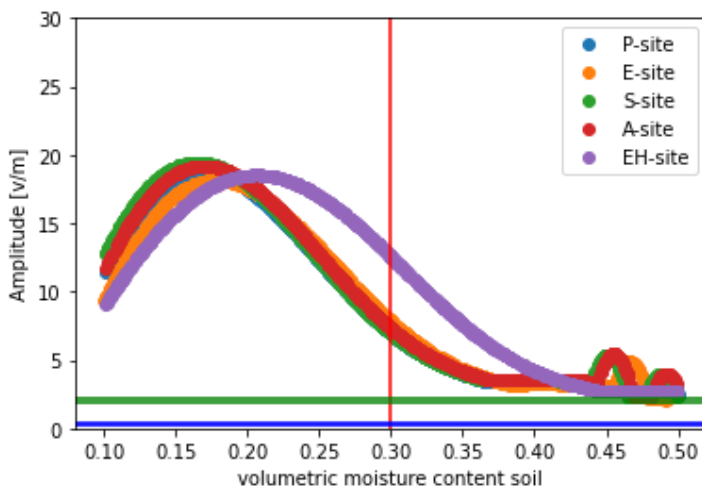
Figuur 4.32: Maximale amplitude in functie van het bodemvochtgehalte (twee bodemlagen) voor vijf verschillende bodemtypes: P = leembodem, E = leembodem, S = zandbodem, A = siltige klei-leembodem en EH = siltige kleibodem (Tabel 3.6). De groene en blauwe lijnen geven het minimale en maximale ruisniveau weer van de grondradar (500 MHz) bepaald op basis van respectievelijk de radarmeting in Bosland en aan de Coupure Rechts (Tabel 3.4). De rode lijn in de figuur duidt het vochtgehalte van de boomwortel aan.

Daarna wordt de invloed van compactie bestudeerd door de bulkdensiteit van de bovenste bodemlaag te laten variëren (tussen  $0,6$  en  $2 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) (Figuur 4.33). Het volumetrisch vochtgehalte van de bodem en de boomwortel wordt constant gehouden op respectievelijk  $0,2$  en  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . De ruisniveaus worden bepaald op basis van de maximale amplitude van de air wave bij een bulkdensiteit van  $0,6$  (minimum) en  $2 \text{ g}/\text{cm}^3$  (maximum). Het ruisniveau wordt dan bepaald door 0,4% (Coupure Rechts) en 0,06% (Bosland) van deze maximale amplitude te nemen (Tabel 3.4). Het ruisniveau ligt dan respectievelijk tussen 1,37 en 1,77 (Coupure Rechts) en tussen 0,20 en 0,26 (Bosland).



Figuur 4.33: Maximale amplitude in functie van de bulkdensiteit in de bovenste bodemlaag voor vijf verschillende bodemtypes: P = leembodem, E = leembodem, S = zandbodem, A = siltige klei-leembodem en EH = siltige kleibodem (Tabel 3.6). De groene en blauwe lijnen geven het minimale en maximale ruisniveau weer van de grondradar (500 MHz) bepaald op basis van respectievelijk de radarmeting in Bosland en aan de Coupure Rechts (Tabel 3.4).

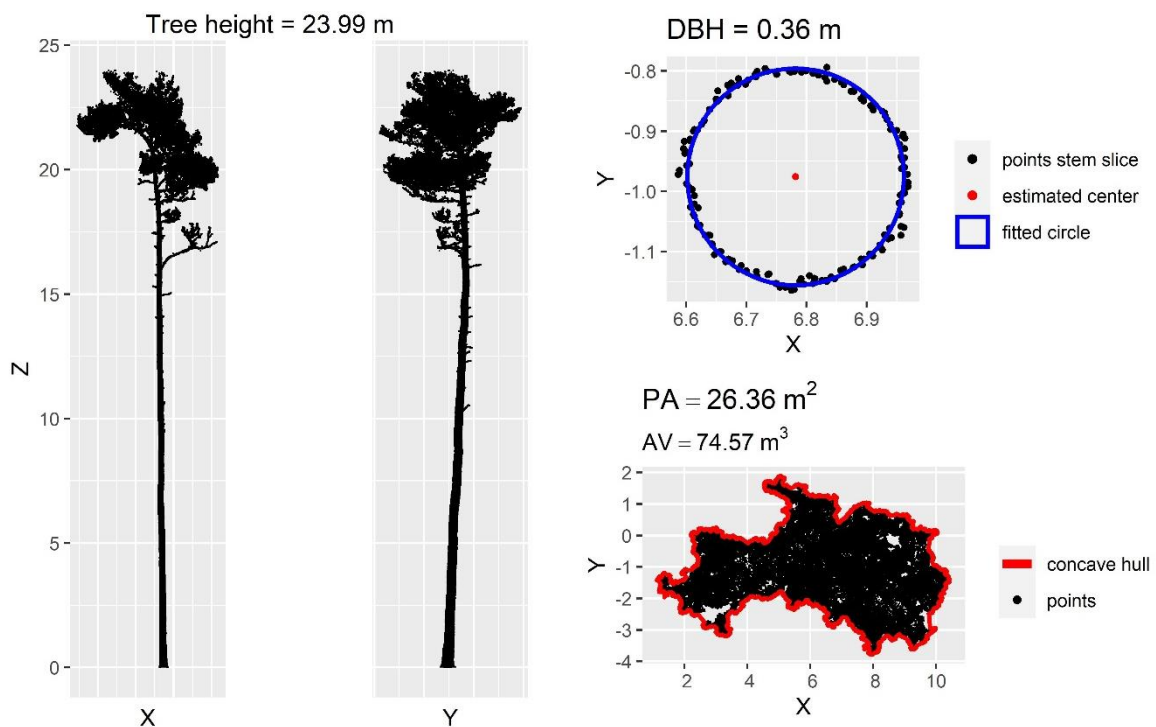
Tot slot wordt de invloed van een betonlaag in de bovenste bodemlaag op het detectievermogen van de grondradar geanalyseerd (Figuur 4.34), waarbij de bodemvochtgehalten in beide bodemlagen variëren tussen 0,1 en 0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. De ruisniveaus worden bepaald op basis van de maximale amplitude van de air wave bij een bodemvochtgehalte van 0,1 (minimum) en 0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (maximum). Het ruisniveau wordt dan bepaald door 0,4% (Coupure Rechts) en 0,06% (Bosland) van deze maximale amplitude te nemen (Tabel 3.4). Het ruisniveau ligt dan respectievelijk tussen 1,85 en 2,23 (Coupure Rechts) en tussen 0,28 en 0,33 (Bosland).



Figuur 4.34: Maximale amplitude in functie van het bodemvochtgehalte (betonlaag en twee bodemlagen) voor vijf verschillende bodemtypes: P = leembodem, E = leembodem, S = zandbodem, A = siltige klei-leembodem en EH = siltige kleibodem (Tabel 3.6). De groene en blauwe lijnen geven het minimale en maximale ruisniveau weer van de grondradar (500 MHz) bepaald op basis van respectievelijk de radarmeting in Bosland en aan de Coupure Rechts (Tabel 3.4). De rode lijn in de figuur duidt het vochtgehalte van de boomwortel aan.

#### 4.5. Koppeling bovengrondse en ondergrondse biomassa

De koppeling van de bovengrondse en de ondergrondse biomassa wordt enkel bestudeerd voor Bosland, aangezien hier duidelijke boomwortels waarneembaar waren met de grondradar. Voor de locatie aan de Coupure Rechts en de Coupure Links werden geen duidelijke boomwortels vastgesteld waardoor de koppeling met de bovengrondse biomassa hier niet van toepassing is. De resultaten van de TLS-meting in Bosland worden getoond in Figuur 4.35 De boom heeft een hoogte van 23,99 m en de diameter op borsthoogte is 0,36 m. Het volume van de cilinders die gefit worden aan de puntenwolk is 1594 l (met een standaarddeviatie van 18,38 l).



Figuur 4.35: Resultaten TLS-data van de boom in Bosland. De boomhoogte (tree height) is 23,99 m, de diameter op borsthoogte (DBH) is 0,36 m, het geprojecteerde oppervlak (PA) van de kruin is 26,36 m<sup>2</sup>, het alpha volume of kruinvolume (dit is het volume van de boom op basis van een 3D alpha shape, met alpha = 1) is 74,57 m<sup>3</sup>.

## 5. Discussie

### 5.1. GPR-metingen

#### 5.1.1. Problemen GPS en verwerking profielen

Tijdens de metingen met de GSSI-radar was het gebruik van de GPS niet altijd succesvol daar deze te veel werd afgeschermd door de boomkruin en de coördinaten van de transecten niet of niet juist bepaald werden. Een alternatief is het werken met een totaalstation om de coördinaten te bepalen. Hiervoor moet het totaalstation eerst gegeorefereerd worden met behulp van de GPS. Indien de GPS-ontvanger moeilijk het signaal van voldoende satellieten kan ontvangen, kan dit een ruime tijd in beslag nemen vooraleer het totaalstation juist is ingesteld. Daarnaast moet er tijdens de radarmeting telkens op gelet worden dat het totaalstation het prisma op de radar blijft volgen als er achter de boom wordt gemeten of nog andere bomen (of objecten) in de buurt van het totaalstation gepositioneerd zijn. In stedelijke omgeving moet er ook op gelet worden dat het totaalstation steeds waterpas en op dezelfde positie blijft staan. In de stadscontext werd ondervonden dat personen tegen het totaalstation kunnen botsen of dat door trillingen van bijvoorbeeld een voorbijrijdende tram of auto het totaalstation niet meer waterpas staat.

Verder was het niet mogelijk om de coördinaten van het totaalstation te verwerken in de softwareprogramma's RADAN7 en Reflexw. Hierdoor werden de coördinaten relatief weergegeven doorheen de radarprofielen. Door deze moeilijkheden in deze softwareprogramma's werden de radargegevens ook verwerkt in Matlab, waar de coördinaten wel juist werden ingelezen.

#### 5.1.2. GPR-profielen

##### 5.1.2.1. *Coupure Rechts*

Op de diepteslices (500 MHz) van de boom aan de Coupure Rechts zijn er geen duidelijke radiale patronen vertrekkende van de boom waarneembaar (Figuur 4.1), dus kan er moeilijk een voorspelling worden gedaan waar eventuele boomwortels zouden liggen. Wel zijn er sterke reflecties zichtbaar die mogelijke boomwortels zouden kunnen zijn maar gezien de stedelijke omgeving kan het hier ook gaan om reflecties afkomstig van andere objecten. Ook de geparkeerde auto alsook de tramsporen kunnen zorgen voor anomalieën op de radargegevens. Verder kan de bovenleiding van de tram ook zorgen voor interferentie. De sterke scattering in de bovenste 30 cm van de radarprofielen in Figuur 4.2 zijn te verklaren door de aanwezigheid van de kasseien naast de tramsporen. De reflecties daaronder worden veroorzaakt door kleine heterogeniteiten in de bodem. In het niet-gemigreerde radarprofiel naast de boom (Figuur 4.3) zijn een paar duidelijke hyperbolen te zien, maar het is moeilijk te interpreteren waardoor deze reflecties veroorzaakt worden. Een mogelijke verklaring voor deze reflecties kan gevonden worden door de locatie van een pijpleiding ter hoogte van dit radarprofiel

(groene pijl Figuur 4.1). Verder kunnen deze reflecties ook het gevolg zijn van steengruis of van boomwortels. De reflecties na de migratie-stap (Figuur 4.3) zijn redelijk continu en horizontaal. Dit zou kunnen wijzen op (kleine) verschillen tussen opeenvolgende bodemlagen. De anomalie in het gemigreerd radarprofiel rechts naast de boom (Figuur 4.4) kan wijzen op verharding in de bodem. Aan deze kant van de boom mag er niet geparkeerd worden maar in de praktijk gebeurt dit toch frequent. Op het niet-gemigreerde radarprofiel rechts naast de boom (Figuur 4.5) worden geen hyperbolen waargenomen. Een mogelijke verklaring wordt gezocht in het feit dat de bodem rondom de boom verhard is met steengruis (Sectie 4.1.2.) waardoor er veel scattering op de radargegevens wordt waargenomen.

De radarprofielen zijn in het algemeen enorm verstoord, wat de interpretatie ervan moeilijk maakt. Kennis van het bodemprofiel en een opgraving zijn nodig om de boomwortels te kunnen lokaliseren.

De boomwortels konden niet worden gevisualiseerd met de radarmetingen. Als verklaring hiervoor wordt gekeken naar het steengruis in de bodem (Figuur 4.6) dat zorgt voor veel scattering en verstoring op de radarprofielen, waardoor de reflecties van de boomwortels niet kunnen worden waargenomen door de radar. Verder heeft compactie ook een invloed op de visualisatie van de radarprofielen, waardoor de reflecties van de boomwortels ook mogelijks gemaskeerd worden. Ook kasseien geven veel reflecties op de radarmetingen waardoor mogelijke boomwortels niet kunnen worden waargenomen.

#### *5.1.2.2. Coupure Links*

Op de diepteslices (500 MHz) van de boom aan de Coupure Links zijn er geen duidelijke radiale patronen vertrekkende van de boom waarneembaar (Figuur 4.9), dus kan er moeilijk een voorspelling worden gedaan waar eventuele boomwortels zouden liggen. Wel zijn er sterke reflecties zichtbaar die mogelijke boomwortels zouden kunnen zijn maar gezien de stedelijke omgeving kan het hier ook gaan om reflecties afkomstig van andere objecten. Ook het plantendoek, het wandelpad en de pijpleiding in de bodem kunnen zorgen voor sterke reflecties, waardoor de reflecties van de boomwortels gemaskeerd kunnen worden (Figuur 4.10).

In zowel het niet-gemigreerde als het gemigreerde radarprofiel langsheen het wandelpad (Figuur 4.11) zijn er twee duidelijke hyperbolen te zien, maar het is moeilijk te interpreteren door wat deze reflecties veroorzaakt worden. Deze reflecties kunnen mogelijk veroorzaakt worden door de pijpleiding, maar hier is geen informatie over beschikbaar. In Figuur 4.12 is de overgang van de verharde grasstrook naar het plantendoek duidelijk zichtbaar door minder sterke reflecties over het plantendoek. Op het plantendoek groeit er klimop, deze klimoplaag zorgt voor een minder sterk contact met de bodem waardoor zwakkere signalen worden opgevangen door de grondradar. De grasstrook wordt



gekenmerkt door intense reflecties veroorzaakt door de tegels. Hierdoor wordt op het radarsignaal de reflectie van mogelijke boomwortels gemaskeerd of worden ze moeilijk onderscheiden van de reflecties van de tegels op de radarprofielen. Ook loopt er langs het begin van de verharde grasstrook een pijpleiding (Figuur 4.10) die kan zorgen voor intense reflecties.

#### *5.1.2.3. Bosland*

Tot slot worden de radarprofielen in Bosland bestudeerd. Op de diepteslices wordt telkens gekeken naar reflecties die elkaar radiaal opvolgen vanuit de locatie van de boom (voorgesteld door een kruis in de figuren), want deze kunnen worden geïnterpreteerd als mogelijke boomwortels.

Eerst worden de niet-gemigreerde radarprofielen bij een frequentie van 800 MHz geïnterpreteerd. De reflecties R2, R3 en R4 volgen een radiaal patroon en kunnen mogelijk geïnterpreteerd worden als boomwortels (Figuur 4.14). Drie boomwortels vertrekken mogelijk vanuit de boom op respectievelijk ca. 1,50 m, 3,20 m en 4,20 m van het begin van het transect T1 op een diepte van ca. 0,32 m (Figuur 4.15). Daarnaast wordt reflectie R1 waargenomen met een minder hoge amplitude dan de reflecties R2, R3 en R4. R1 vertrekt niet radiaal vanuit de boom, maar is eerder een puntreflectie (Figuur 4.14). Deze reflectie is dus waarschijnlijk veroorzaakt door andere materialen die zich in de bodem bevinden zoals een dode houtstronk. Ook de hyperbool met een lagere amplitude tussen R2 en R3 kan hierdoor verklaard worden (Figuur 4.15). De reflectie R5 kan mogelijk het gevolg zijn van verschillende boomwortel die vanuit de boom vertrekken (Figuur 4.14). Door het radiale patroon van deze reflectie en de gelijkaardige intensiteit (en hyperbool) als reflecties R2, R3 en R4, kan deze reflectie als een mogelijke boomwortel worden aangeduid op ca. 3,40 m van het begin van het transect T5 (Figuur 4.15). De dieper gelegen reflectie R6 (ca. 0,70 m) in Transect T1 vertoont een radiaal patroon (Figuur 4.14). Deze intense reflectie wordt veroorzaakt door een begraven fenomeen, mogelijk hier een boomwortel (Figuur 4.15).

In Figuur 4.15 (links) worden er ook verstoringen waargenomen in het radarprofiel. Deze verstoringen in het profiel komen er door de achtergrondsignalen van de militaire basis (Dojack, 2012) die zich op ongeveer 6 km van de boom bevindt.

Daarna worden de niet-gemigreerde radarprofielen met een frequentie van 300 MHz bestudeerd. De drie duidelijke reflecties R2, R3 en R4 die worden waargenomen met een frequentie van 800 MHz zijn ook waar te nemen met een frequentie van 300 MHz, maar met een lagere resolutie (Figuur 4.17) (Sectie 5.1.3.). In Figuur 4.17 zijn deze reflecties ook schijnbaar ondieper (ca. 0,10 m), door een verschil in de time-zero bepaling tussen Figuur 4.15 en 4.17. Op een diepte van ca. 0,60 m wordt een intense reflectie R7 in transect T3 geobserveerd. Uit het radiale patroon en de intensiteit van deze reflectie kan er geconcludeerd worden dat dit mogelijk een boomwortel is (Figuur 4.16 en 4.17).

Vervolgens worden de gemigreerde radarprofielen bij een frequentie van 800 en 300 MHz geanalyseerd. Bij het gemigreerde radarprofiel T4 (800 MHz) worden ook vier sterke reflecties (R8, R9, R10 en R11) waargenomen als bij het niet-gemigreerde radarprofiel T1. Deze reflecties volgen ook een radiaal patroon vanuit de boom en kunnen geïnterpreteerd worden als mogelijke boomwortels (Figuur 4.18 en 4.19). De reflectie R12 volgt samen met andere reflecties een radiaal patroon, dit zijn mogelijk verschillende boomwortels die vanuit de boom vertrekken (Figuur 4.18 en 4.19). De diepte-inschatting van deze reflecties bij een frequentie van 800 MHz (ca. 0,20 m) is beduidend verschillend van deze van de niet-gemigreerde radarprofielen (ca. 0,32 m) (Sectie 5.1.6.). Een verklaring hiervoor werd gevonden in het foutief bepalen van de time-zero-correctie waardoor bovenaan het profiel te veel werd weggelaten. Ook de snelheidsbepaling aan de hand van de RADAN7-software was moeilijk te bepalen. Verder zal de werkelijke permittiviteit eerder in de buurt van de bodem liggen (dus iets lager dan 11,32) aangezien het medium waar de EM-golf doorheen reist voornamelijk uit bodem, en minder uit wortels, bestaat. De dieper gelegen reflectie R13 in transect T4 (Figuur 4.18 en 4.19) volgt een radiaal patroon vertrekkende van de boom. Deze intense reflectie wordt veroorzaakt door een begraven fenomeen, mogelijk hier een boomwortel. Deze reflectie is de vergelijkbare reflectie van reflectie R6 (met een diepte ca. 0,72 m), maar de diepte-inschatting is terug verschillende na de migratie-verwerking (ca. 0,40 m) (Sectie 5.1.6.).

Daarna worden de gemigreerde radarprofielen bij een frequentie van 300 MHz bestudeerd. De drie sterk reflecties R14, R15 en R16 (op een diepte van ca. 0,12 m) volgen een radiaal patroon vertrekkend van de boom en kunnen dus geïnterpreteerd worden als mogelijke boomwortels (Figuur 4.20 en 4.21). Verder kan uit het radiale patroon van de intense reflectie R17 geconcludeerd worden dat deze reflecties mogelijk veroorzaakt worden door één of meerdere boomwortels (Figuur 4.20 en 4.21). De diepte van deze reflectie is ca. 41 m en dit is beduidend verschillend met de diepte van de reflectie R7 (ca. 0,60 m) in het niet-gemigreerde radarprofiel (Sectie 5.1.6.). Dezelfde verklaring als met de frequentie van 800 MHz kan hier gevonden worden, zie hierboven. Vooral de foutieve bepaling van de time-zero correctie speelt bij deze frequentie een grote rol.

Op de diepteslices met een frequentie van 500 MHz worden gelijkaardige mogelijke boomwortels gelokaliseerd. De diepte van de boomwortels wordt hier geschat op 30-40 cm (Figuur 4.23) en een diepere boomwortel wordt gelokaliseerd op een diepte van 45-50 cm (Figuur 4.24).

### 5.1.3. Invloed frequentie en type radar

In Bosland waren de boomwortels het best te observeren bij een frequentie van 800 en 500 MHz. Bij een frequentie van 300 MHz werd geen bruikbare informatie verkregen voor dieptes onder 1 m onder

het maaiveld. Verder is bij een lagere frequentie ook de resolutie lager (Alani & Lantini, 2020). Hierdoor gaf deze frequentie van 300 MHz geen extra informatie ten opzichte van de andere twee frequenties.

De GSSI-radar werkt bij een frequentie van 800 en 300 MHz. De transecten van deze radar worden genomen door middel van een buggy, waardoor er met dit toestel minder dicht bij de boom kan gemeten worden. Hierdoor kunnen de boomwortels dicht bij de boom niet bestudeerd worden en is het moeilijker om te interpreteren of de reflecties een radiaal patroon volgen vanuit de boom. De grondradar van Sensors & Software werkt met een frequentie van 500 MHz. Dit toestel kan dicht bij de boom meten aangezien het wordt geschoven over de grond. Doordat er twee radars naast elkaar kunnen bevestigd worden bij deze opstelling, kunnen er twee transecten simultaan gemeten worden. Bij de verwerking van deze data moet er op gelet worden dat de juiste volgorde van de transecten gevolgd wordt. Verder neemt de opstelling van deze radar meer tijd in beslag dan deze van de GSSI-radar.

#### 5.1.4. Grootte boomwortels Bosland

Na het uitgraven van de boomwortels in Bosland werd de omtrek en diameter van enkele boomwortels gemeten (Tabel 4.6). Daarna werd de vergelijking gemaakt met de GPR-profielen om vast te stellen welke boomwortels gezien werden op de radargegevens. In het algemeen kan er vastgesteld worden dat enkel de dikkere boomwortels worden waargenomen in het GPR-profiel (Figuur 4.29 en Tabel 4.6). De fijne en kleinere boomwortels kunnen niet worden waargenomen door de radar (omtrek < 10 cm of diameter < 3 cm). De minimale detecteerbare diameter bij deze opstelling is dus ongeveer 3 cm. Deze waarde is afhankelijk van de aangewende frequentie in de toepassing en het contrast in permittiviteit (Hirano et al., 2009) (Sectie 2.3.2.3.). Ow & Sim (2012) hebben ook aangetoond dat alleen grove wortels met een diameter groter dan 5 cm geïdentificeerd worden tijdens veldmetingen met een antenne van 400 MHz.

Als wordt gekeken naar de horizontale resolutie na de migratie-verwerking, dan kan Formule 6 (Sectie 3.4.3.) worden toegepast als de golflengte gedeeld door vier, aangezien migratie de resolutie verhoogt. De snelheid van de migratie-stap toegepast voor de radarprofielen met een frequentie van 500 MHz was gelijk aan 0,0775 m/ns (Sectie 4.3.1.). De golflengte is dan gelijk aan de snelheid (in m/ns) op de frequentie van de radar (in GHz). Hieruit volgt dat de horizontale resolutie gelijk is aan 0,0367 m of 3,7 cm. De resultaten van de dikte van de boomwortels die kunnen geobserveerd worden bij deze frequentie stemmen dus overeen met de theoretische horizontale resolutie van een toestel met deze frequentie na migratie.

Eén dikke boomwortel (diameter  $\pm 13$  cm) werd niet gedetecteerd in het GPR-profiel ten opzichte van het opgegraven profiel (Figuur 4.29 rechts, oranje rechthoek). Een mogelijke oorzaak is dat deze

boomwortel (verschillend van alle andere) bijna perfect in de richting loopt van de meetlijnen. Daardoor wordt de boomwortel minder goed gedetecteerd indien hij bv. tussen twee meetlijnen valt (afstand tussen meetlijnen was 10 cm). Ook de 2D-migratie werkt alleen langs de meetlijnen, niet tussen de meetlijnen, zodat de migratie (en de eruit volgende hogere resolutie) minder effect heeft voor wat betreft deze boomwortel. De hoek waaronder de boomwortels liggen en gemeten wordt heeft dus een invloed op het al dan niet detecteren van boomwortels (Sectie 2.3.2.4.). Tanikawa et al. (2013) concludeerde dat ongeveer de helft van de wortels moeilijk waar te nemen zijn wanneer men scande in evenwijdige trajecten in één richting. Een uitgebreidere meetcampagne en het meten in meerdere richtingen (grid-systeem) (Tanikawa et al., 2013) of in concentrische cirkels (Zhang et al, 2019) kan hier een oplossing voor bieden.

De boomwortel die langs de boom loopt is afkomstig van een andere boom (Figuur 4.29 blauwe rechthoek). Dit kon niet worden geconcludeerd uit het GPR-profiel, dus een opgraving van de boomwortels kan zorgen voor meer kennis en kan dienen als validatie van de interpretatie van de GPR-profielen. Verder werden ook verschillende dode houtstronken, dennenappels en een steen geobserveerd in de bodem (Figuur 4.30). Deze objecten kunnen zorgen voor reflecties in het radar-profiel, waardoor ze foutief als boomwortels kunnen worden aangeduid.

#### 5.1.5. Invloed bodemprofiel en watergehalte

Het bodemtype heeft een invloed op de detectie van de boomwortels (Sectie 2.3.2.2.). In Bosland is de bodem een zandbodem met weinig verstoring in de bodem. Bij deze eigenschappen werkt de GPR-detectie beter (Butnor et al., 2001; Alani & Lantini, 2020). Dit werd ook geobserveerd in vergelijking met de bomen in stedelijke context. In de stedelijke context waren de bodems meer verstoord door o.a. verharding, steengruis... Deze objecten zorgen voor sterke reflecties waardoor de reflecties van de boomwortels gemaskeerd worden.

Verder hangt de invloed van het bodemtype op het contrast tussen de boomwortels en de omgeving nauw samen met het watergehalte van de bodem (Hirano et al., 2009) (Sectie 2.3.2.1.). In Bosland was de permittiviteit onderaan de boomstam twee keer hoger dan deze van de bodem (Tabel 4.3 en 4.4). De conductiviteit verschilde niet zo veel tussen de boomstam en de bodem. Hoe hoger het verschil in watergehalte tussen de bodem en de boomwortels (en dus in de permittiviteit), hoe beter het contrast in reflecties kan worden waargenomen door de radar (Hirano et al., 2009). In stedelijke context was het moeilijker om het bodemvochtgehalte te bepalen aangezien het moeilijker of niet mogelijk was om de Kopecky-ringen of de HydraProbe in de bodem te plaatsen door de verharde ondergrond. Hierdoor kan er geen conclusie worden gemaakt over de invloed van het watergehalte in deze context.

### 5.1.6. Diepte-inschatting van de boomwortels in Bosland

De inschatting van de diepte van de boomwortels in Bosland was niet dezelfde bij de verwerking van de radarprofielen in RADAN7, Reflexw en Matlab. Het RADAN7 softwareprogramma dat gekoppeld is aan de GSSI-radar doet automatisch al een voorverwerking van de radardata, waardoor de verdere verwerking niet start met het origineel gemeten profiel. Verder zijn de verwerkingsstappen in RADAN7 eerder een 'black box', waarbij de methode van de verwerking niet altijd duidelijk is. In Reflexw kunnen meer parameters gemanipuleerd worden voor de verwerking van de profielen.

Bij de migratie-stap in de verwerking van de profielen was het ook moeilijk om een inschatting te maken van de propagatiesnelheid, aangezien de relatieve permittiviteit en de snelheid variëren doorheen het profiel. In RADAN7 werd één propagatiesnelheid doorheen de tijd geselecteerd en dus ook één constante diëlektrische permittiviteit doorheen het profiel. Deze gemiddelde snelheid geeft niet overal een perfect resultaat aangezien de snelheid varieert (bv. Figuur 4.19 links). De inschatting van de propagatiesnelheid bij de migratie-stap kan 'ringing' (Sectie 3.4.3.) veroorzaken in de gemigreerde radarprofielen of zorgen voor dubieuze visualisaties. Deze stap beïnvloedt ook de interpretatie van de diepte van de reflecties in de radarprofielen (Sectie 3.4.3. Formule 2). Verder speelt ook de time-zero correctie een belangrijke rol, een foutieve bepaling van de time-zero correctie heeft gevolgen voor de diepte-inschatting (zie gemigreerde profielen Bosland met een frequentie van 800 en 300 MHz, Sectie 4.3.1.). Ook de methode voor het bepalen van de snelheid in de softwareprogramma's kan een rol spelen bij de diepte-bepaling.

De diepte van de uitgegraven boomwortels in Bosland werd ingeschat op een diepte tussen de 35 en 40 cm (Tabel 4.6). Dit komt ongeveer overeen met de diepte-inschatting van de radarprofielen bij een frequentie van 800 MHz voor de migratie-stap (30-40 cm) en voor de radarprofielen bij een frequentie van 500 MHz (30-40 cm). De diepte van de radarprofielen na de migratie-stap bij een frequentie van 800 MHz en 300 MHz werden foutief ingeschat.

In het algemeen hangt het bepalen van de diepte van de boomwortels af van de verwerking van de profielen en de inschatting van de propagatiesnelheid. Ook de inschatting van de exacte locatie van de boomwortels is onderhevig aan hoe de coördinaten worden opgemeten of relatief bepaald worden (Sectie 5.1.1.). Deze factoren leiden ertoe dat er niet kan verwacht worden de boomwortels tot op de centimeter in de diepte en op de locatie terug te vinden. Hoe dan ook lijkt bij secuur werken een maximale afwijking van rond de 10 cm haalbaar voor de diepte-inschatting van de boomwortels in Bosland.



## 5.2. Modellen

### 5.2.1. Limieten van de kalibratie

De waarden voor de permittiviteit van de tak van de esdoorn (Sectie 3.6.4.4.) liggen binnen het bereik dat gevonden werd door Attia al Hagrey (2007) voor houtcellulose (Tabel 3.3). Na het omzetten van de permittiviteit voor een frequentie van 500 MHz blijkt de permittiviteit niet sterk te variëren doorheen de kalibratie (rechte lijn in Figuur 3.37 rechts, Sectie 3.6.4.4.). Hierdoor is het moeilijk in te schatten wat de permittiviteit zal zijn bij een veranderend vochtgehalte, aangezien deze altijd rond de 5 ligt. Dit zorgt ervoor dat de effectiviteit van deze kalibratiecurve laag is. Verder werd de relatie van deze curve tussen de permittiviteit en het volumetrisch vochtgehalte gebruikt in de modellen, waardoor de permittiviteit van de boomwortel in de modellen niet sterk varieert. Tot slot wordt de tak van de boom als representatief voor de boomwortel beschouwd, dit kan ook zorgen voor discrepanties.

### 5.2.2. Invloed watergehalte en bodemtype

In Figuur 4.30 (links) wordt de maximale amplitude van de boomwortel weergegeven in functie van het bodemvochtgehalte voor vijf verschillende bodemtypes (Tabel 3.6). Het vochtgehalte van de boomwortel wordt constant gehouden op  $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (Figuur 4.30 links), dus de permittiviteit van de boomwortel is 4,94 (Figuur 4.30 rechts). De leembodems (P- en E-site), zandbodem (S-site) en siltige klei-leembodem (A-site) vertonen een gelijkaardig verloop doorheen de variatie van het bodemvochtgehalte. Ook de permittiviteit (bepaald aan de hand van het bodemvochtgehalte, Sectie 3.6.4. Formule 7) kent een gelijkaardig verloop voor deze bodems. Bij een bodemvochtgehalte van  $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ligt de maximale amplitude rond de 10 V/m voor deze bodems. Op dit startpunt is het verschil in permittiviteit tussen de bodem (ongeveer 7) en de boomwortel klein. De maximale amplitude stijgt met een toenemend bodemvochtgehalte tot ongeveer  $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Het verschil in permittiviteit tussen de boomwortel en de bodem stijgt, waardoor de maximale reflectie-amplitude ook stijgt. Na dit optimum worden de curves gekenmerkt door een dalend patroon en geldt deze relatie niet meer. Vanaf een bodemvochtgehalte van  $0,23 \text{ m}^3/\text{m}^3$  is de conductiviteit van de bodem ook groter dan deze van de boomwortel (constant op  $0,005 \text{ S/m}$ ). Naarmate het bodemvochtgehalte stijgt, stijgt ook de conductiviteit van de bodem (Jol, 2009). Een hogere conductiviteit zorgt voor een sterkere attenuatie op het radarsignaal waardoor de reflectie-amplitude afneemt. Verder ligt vanaf  $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$  het vochtgehalte van de bodem hoger dan deze van de boomwortel. Hirano et al. (2009) concludeert dat wanneer het watergehalte van de bodem groter is dan die van de wortels, de wortels niet gedetecteerd kunnen worden door de GPR.

De curve van de siltige kleibodem (EH-site) wordt gekenmerkt door lagere maximale amplitudes (Figuur 4.30 links), en dus ook lagere waarden voor de permittiviteit van de bodem (Figuur 4.30 rechts) ten opzichte van de leembodems (P- en E-site), zandbodem (S-site) en siltige klei-leembodem (A-site). Theoretisch worden kleibodems ook gekenmerkt door een lagere permittiviteit doordat ze water in de bodem beter kunnen vasthouden, door het binden van watermoleculen met kleipartikels ('immobiliteit' van gebonden water) (Tabel 3.2). Door deze hoge absorptiecapaciteit voor water en uitwisselbare kationen zorgen kleibodems voor hogere attenuatie-verliezen op het radarsignaal (Daniels, 2004). De conductiviteit is in kleibodems ook hoger dan in zand- of leembodems (Tabel 3.2). Door de lagere permittiviteit in kleibodems, is het verschil in permittiviteit met de bodem en de boomwortel ook kleiner en bereikt de curve pas zijn optimum rond  $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Daarna heeft de curve ook een dalend patroon.

De ruisniveaus in Figuur 4.30 (links) worden bepaald op basis van de experimentele data in Bosland en de Coupure Rechts (Sectie 3.6.3.). De ruisniveaus liggen laag ten opzichte van de maximale amplitudes die gesimuleerd worden (Sectie 5.2.4.). Bij een waarde van  $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ligt de curve van de siltige kleibodem (EH-site) onder het ruisniveau van de Coupure Rechts, dit signaal kan dus niet worden geobserveerd door de GPR.

In Figuur 4.31 wordt de invloed van zowel de variatie van het bodemvochtgehalte als de variatie in het vochtgehalte van de boomwortel op de maximale amplitude van de boomwortel bestudeerd voor vijf verschillende bodem types (Tabel 3.6). De leembodems (P- en E-site), zandbodem (S-site) en siltige klei-leembodem (A-site) worden opnieuw gekenmerkt door een gelijkaardig patroon met een optimum rond  $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Een hoger watergehalte in de boomwortel zorgt voor een lagere maximale amplitude. Als het watergehalte in de boomwortel laag is, worden de sterkste maximale amplitudes waargenomen. Dit kan verklaard worden doordat de permittiviteit van de bodem bij deze grafieken (Figuur 4.31 a,b,c en d) altijd hoger ligt dan deze van de boomwortel. Verder is de permittiviteit lager bij kleinere watergehaltes van de boomwortel. Hierdoor is het verschil in permittiviteit dus het grootst als het vochtgehalte van de boomwortel laag is. Hoe groter dit contrast in diëlektrische permittiviteit tussen de boomwortel en de bodem, hoe sterker het signaal (Alani & Lantini, 2020).

Bij de siltige kleibodem (EH-site) in Figuur 4.31f ligt het bereik van de amplitudes lager. Dit komt doordat kleibodems zorgen voor meer attenuatie van het signaal, zoals hierboven beschreven. Dezelfde relatie zoals hierboven beschreven wordt ook gevonden in deze grafiek (Figuur 4.31f) vanaf  $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Bij een bodemvochtgehalte van  $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ligt de permittiviteit van de bodem lager dan deze van de boomwortel. Hierdoor is het verschil in permittiviteit groter bij een boomwortel met een

hoger vochtgehalte (want hogere permittiviteit) dan bij een boomwortel met een lager vochtgehalte (want lagere permittiviteit).

De experimenteel bepaalde ruisniveaus liggen opnieuw laag ten opzichte van de gesimuleerde maximale amplitudes (Sectie 5.2.4.). In het begin van de grafieken van de P- en EH-site (Figuur 4.31 a en f) ligt de curve onder het ruisniveau van de Coupure Rechts, deze signalen kunnen dus niet geobserveerd worden door de GPR.

### 5.2.3. Invloed stedelijke context

In Figuur 4.32 wordt de variatie in bodemvochtgehalte voor een bodem met twee bodemlagen weergegeven in functie van de maximale amplitude van de wortel die kan gedetecteerd worden door de GPR. In vergelijking met Figuur 4.30 liggen de curves voor de vijf bodemtypes (Tabel 3.6) dichter bij elkaar en is het bereik van de maximale amplitude groter, tussen 10 en 23 V/m (tegenover 10-14 V/m). Vanaf  $0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$  komen er twee pieken voor in de curves. Vanaf deze waarde is de bodem bijna volledig verzadigd. Het verhoogde bodemvochtgehalte zorgt ervoor dat de amplitude van de reflectie vergroot, maar van zodra de conductiviteit te sterk stijgt, verhoogt ook het risico op attenuatie waardoor de reflecties een sterk lagere amplitude hebben. Bij een bodemvochtgehalte van  $0,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$  is de attenuatie van de bodem zeer sterk waardoor de maximale amplitude daalt naar nul. De siltige kleibodem (EH-site) kent een trager verloop, zoals beschreven in Sectie 5.2.2.

Bij een bodemvochtgehalte van  $0,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$  liggen de curves in Figuur 4.32 onder de lage experimenteel bepaalde ruisniveaus (Sectie 5.2.4.). Hier is de amplitude ook bijna nul, dus deze signalen kunnen niet gedetecteerd worden door de GPR

Om de invloed van een betonlaag in de bovenste bodemlaag te analyseren wordt Figuur 4.34 vergeleken met Figuur 4.32. Het bereik van de maximale amplitudes ligt in Figuur 4.32 lager (tussen 10 en 20 V/m) dan Figuur 4.34. De betonlaag zorgt dus voor een afzwakking van het radarsignaal van de boomwortel. Verder worden de curves van de leembodems (P- en E-site), zandbodem (S-site) en siltige klei-leembodem (A-site) gekenmerkt door een snellere en steilere daling na het optimum ( $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). Ook de siltige kleibodem (EH-site) kent een snellere daling na zijn optimum rond  $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Vanaf een bodemvochtgehalte van  $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$  zijn de maximale amplitudes van de kleibodem zelfs groter dan deze van de andere vier bodems. De curves liggen op het einde net niet boven de ruisniveaus (Sectie 5.2.4.).

Tot slot wordt in Figuur 4.33 de invloed van compactie op de boomwortel bestudeerd door de bulkdensiteit in de bovenste laag te laten variëren. In het algemeen neemt de maximale amplitude af wanneer de bulkdensiteit stijgt. De maximale amplitude ligt voor de leembodems (P- en E-site),

zandbodem (S-site) en siltige klei-leembodem (A-site) tussen de 20 en 25 V/m. Voor de siltige kleibodem (EH-site) ligt deze lager, tussen 15 en 20 V/m. Een mogelijke verklaring hiervoor kan gevonden worden in de grotere attenuatie van de kleibodem, zoals hierboven beschreven. Verder stijgt de conductiviteit, alsook de permittiviteit, van de bodem met een verhoogde bulkdensiteit (Sectie 3.6.4., Formule 7 en 10). De maximale amplitudes liggen voor de vijf bodemtypes (Tabel 3.6) boven de ruisniveaus.

De aanwezigheid van een gecompacteerd laag kan ondoordringbaar zijn voor een wortelstelsel en kan bijgevolg zorgen voor oppervlakkigere wortels. Vanaf een bulkdensiteit hoger dan  $1,6 \text{ g/cm}^3$  kan de wortelgroei ook beperkt worden (Watson et al., 2014). Hiermee moet rekening worden gehouden in een stedelijke context: als de boomwortels onvoldoende weerstand bieden tegen de wind is er een grote kans voor windworp (Pokorny et al., 2003).

#### 5.2.4. Limieten theoretisch model

In het theoretisch model werden verschillende aannames gemaakt voor het inschatten van de parameters. De permittiviteit van de boomwortel werd ingeschat door een kalibratie (Sectie 3.6.4.4.), de limieten van deze kalibratie worden in Sectie 5.2.1 besproken. Verder werd de conductiviteit van de boomwortel constant gehouden (op  $0,005 \text{ S/m}$ ) doorheen de modellen. Deze aanname klopt niet want hoe groter het watergehalte van het materiaal, hoe groter de geleidbaarheid (Jol, 2009). In verder onderzoek zou deze variatie in conductiviteit ook kunnen bepaald worden aan de hand van een kalibratie.

Daarnaast werd de permittiviteit en de conductiviteit van de bodem ingeschat door pedofysische functies (Sectie 3.6.4.). In deze pedofysische functies worden ook verschillende aannames gedaan die kunnen zorgen voor discrepanties.

Tot slot werd de bodem versimpeld weergegeven in het model (Sectie 3.6.). In de realiteit kent de bodem een grotere heterogeniteit, zeker in stedelijke context, die kan zorgen voor interferentie en meerdere reflecties naar de grondradar. Verder onderzoek is nodig om de invloed van verschillende parameters verder uit te diepen (Sectie 7).

In de grafieken van de modellen (Sectie 4.4.) worden de experimenteel bepaalde ruisniveaus weergegeven. Deze ruisniveaus werden bepaald op basis van de grondradarmetingen in Bosland en aan de Coupure Rechts (Sectie 3.6.3., Tabel 3.4). Dit ruisniveau werd bepaald voor één specifiek moment om een inschatting te kunnen maken wanneer het signaal zeker niet door de radar kan gedetecteerd worden. Het ruisniveau is dus locatie-specifiek en kan variëren in de plaats en tijd (bv. door in de tijd variërende activiteit van nabijgelegen zenders). Deze experimenteel bepaalde

ruisniveaus liggen laag ten opzichte van de gesimuleerde maximale amplitude (Sectie 4.4.). Het toepassen van een andere methode, zoals een standardisation inschatting van het ruisniveau (Benedetto & Tosti, 2017), voor het bepalen van de ruisniveaus zou deze inschatting kunnen verbeteren.

Het model is gebaseerd op de amplitudes in één enkele A-scan (Sectie 3.6.2.). Deze A-scan stelt een stationaire meting voor met een GPR-antenne (Duman & Gurbuz, 2015), dus de antenne is gepositioneerd op één locatie recht boven de boomwortel. Verder wordt bij een veldonderzoek de GPR-antenne bewogen langs een detectietransect, hierbij vormen verschillende A-scans een B-scan of radargram (Sectie 3.4.4.). De detectie van een boomwortel langs een transect zal gevisualiseerd worden in een radargram als een reflectie-hyperbool (Sectie 3.4.3.4.). In gprMax kunnen ook B-scans gesimuleerd worden die een inschatting kunnen geven van de vorm en sterkte van de hyperbool, die veroorzaakt wordt door de reflectie van een boomwortel in de bodem. Verder onderzoek is nodig om dit uit te werken en de invloed van verschillende condities te testen.

### 5.3. Koppeling met bovengrondse biomassa

Met de huidige data van Bosland is het niet mogelijk om een inschatting te geven van de ondergrondse biomassa. De opstelling in Bosland toont wel potentieel om deze inschatting te maken mits er enkele aanpassingen gebeuren en dit verder onderzocht wordt. Een eerste aanpassing die zou moeten gebeuren is een uitgebreidere meetcampagne, waarbij er in verschillende meetrichtingen of concentrische cirkels gemeten wordt (Tanikawa et al., 2013; Zhang et al., 2019) om zo alle grote boomwortels in kaart te brengen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat bij het meten in meerdere meetlijnen of met meerdere radars de georeferentie van de transecten correct moeten worden bepaald (Sectie 5.1.1.). Ook de verwerking van deze radargegevens moet dan worden toegepast in een software die toelaat deze coördinaten correct in te lezen. De meetcampagne uitvoeren met een 3D-radar zou een andere aanpassing kunnen zijn aan deze opstelling. Deze stepped frequency radar (bv. GeoScope GS3F) heeft als voordeel dat er over een breed frequentiebereik kan gemeten worden (bv. tussen 100 en 3000 MHz). Een beperking bij het inschatten van het volume van de ondergrondse biomassa is dat de kleine en fijne boomwortels (diameter < 3 cm) niet in kaart kunnen worden gebracht (Sectie 5.1.6.). Nochtans nemen deze wortels een groot deel van het worteloppervlak in (Alani & Lantini, 2020). Hierdoor kan een onderschatting van de ondergrondse biomassa worden verwacht, als enkel de grote boomwortels gevisualiseerd worden met de GPR. De koppeling tussen de bovengrondse en ondergrondse biomassa toont ook het meeste potentieel in een boscontext tegenover een stedelijke context. Hierbij tonen ongestoorde zandige bodems het grootste potentieel (Butnor et al., 2001).



In het algemeen zou een inschatting van de ondergrondse biomassa een meerwaarde bieden in het onderzoek naar de totale koolstof opslag van een boom (Stover et al., 2007). Aan de hand van een terrestrische laserscanner kan de bovengrondse biomassa bepaald worden op basis van het volume van de gefitte cilinders (Sectie 4.5.) en de densiteit (wood density, afhankelijk van het boomspecies). Om het totale volume van de boom te kunnen bepalen zou de ondergrondse biomassa ook eerst moeten worden uitgedrukt in volume, waarna het kan omzet worden naar biomassa. Verder onderzoek is nodig om deze koppeling te bepalen en het totale koolstofgehalte van de boom in te schatten (Sectie 7).

## 6. Conclusies

Het hoofddoel van dit onderzoek was om na te gaan onder welke condities een optimaal detailinzicht van de wortelstructuur gevisualiseerd kan worden aan de hand van GPR. Enerzijds werd dit onderzocht aan de hand van radarmetingen in een experimenteel onderzoek. Anderzijds werd de invloed van verschillende condities op de detectie van boomwortels geanalyseerd aan de hand van modellen via een voorwaartse modellering. Verder werd ook de invloed van een stedelijke context op de boomwortels in kaart gebracht. Tot slot werd gekeken of de data van deze masterproef gekoppeld konden worden aan data van de bovengrondse biomassa (terrestrisch laserscanning).

In boscontext (Bosland), gekenmerkt door een zandige onverstoorde bodem, werden de grote boomwortels (diameter > 3 cm) in kaart gebracht. Boomwortels met een diameter kleiner dan 3 cm werden niet gedetecteerd met een frequentie van 300, 500 en 800 MHz. Verder gaf de frequentie van 300 MHz geen bijkomende informatie ten opzichte van de frequentie van 500 en 800 MHz. De diepte van deze boomwortels kon worden ingeschat tot een maximale afwijking van 10 cm met de drie frequenties.

Daarnaast werd de invloed van het bodemtype en het watergehalte ingeschat aan de hand van theoretische modellen. De maximale amplitude van de boomwortel die gedetecteerd wordt door de GPR stijgt met een toenemend bodemvochtgehalte tot een optimum. Voor de leembodems (P- en E-site), zandbodem (S-site) en siltige klei-leembodem (A-site) ligt het optimum rond  $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , en voor de siltige kleibodem (EH-site) rond de  $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Na dit optimum volgen de curves een dalend patroon met toenemend bodemvochtgehalte. De siltige kleibodem (EH-site) wordt gekenmerkt door lagere maximale amplitudes ten opzichte van de andere bodemtypes. Dit doordat de kleibodem in het algemeen lagere permittiviteiten kent en zorgt voor sterkere attenuatie-verliezen van het radarsignaal. Verder wordt geobserveerd dat een hoger watergehalte in de boomwortel zorgt voor lagere maximale amplitudes.

In stedelijke context (Coupure Links en Rechts) werden de boomwortels niet gedetecteerd daar deze bodems een grote heterogeniteit kennen en de reflecties van de boomwortels werden gemaskeerd door sterkere reflecties van onder andere verharding en steengruis. Ook in de theoretische modellen werd de invloed van een stedelijke context onderzocht door onder andere de invloed van compactie en een betonlaag op het radarsignaal te bestuderen. Beide factoren zorgen voor een lager bereik in maximale amplitude van de boomwortel die gedetecteerd kan worden door de radar.

Op basis van de data in boscontext (Bosland) was het niet mogelijk om een inschatting te maken van de ondergrondse biomassa. Wel toont deze opstelling potentieel om deze inschatting en koppeling met de bovengrondse biomassa verder te onderzoeken.

## 7. Verder onderzoek

Verder onderzoek kan enerzijds gerealiseerd worden in een uitbreiding van veldonderzoeken en anderzijds in theoretische modellen. Bij de veldonderzoeken zou de invloed van een hogere meetdensiteit (kleinere afstand tussen de transecten) en het meten in verschillende richtingen of concentrische cirkels rond de boom verder onderzocht kunnen worden. Ook het frequentiebereik kan verder onderzocht worden en de toepasbaarheid van de grondradar bij deze frequentie.

De kalibratie van de takken van de bomen zou in de toekomst kunnen uitgevoerd worden met boomwortels. Verder kan het theoretisch model gevalideerd worden door experimentele testen in een veldonderzoek. Daarnaast kan het model ook getest worden op meerdere bodemtypes. Ook de invloed van verschillende parameters, zoals het kleigehalte, radarfrequentie of de dikte van de boomwortels, kunnen nog onderzocht worden in de toekomst. Verder kan een nieuw model worden opgesteld op basis van B-scans om zo de radargrammen te kunnen vergelijken en voorspellen. Tot slot kan het theoretisch model ook uitgebreid worden naar een meer heterogene bodem om zo de invloed van een stedelijke context op het radarsignaal nog beter te kunnen voorspellen.

## 8. Appendix

### 8.1. Appendix 1: A-scan Inputfile

#### *Betekenis inputfile*

#title: titel

#domain: x, y, z richting in m

#dx\_dy\_dz: discretisatie van ruimte in de x-, y- en z-richtingen (delta x, y, z)

#time\_window: bepaalt de vereiste gesimuleerde tijd in seconden (vb. GPR-spoor van 20 nanoseconden = 20e-9)

#material: f1 f2 f3 f4 str1

- f1 = relatieve permittiviteit,  $\epsilon_r$
- f2 = conductiviteit (Siemens/meter),  $\sigma$
- f3 = relatieve permeabiliteit,  $\mu_r$
- f4 = magnetisch verlies (Ohm/meter),  $\sigma^*$
- str1 = identificatie voor materiaal

#waveform: str1 f1 f2 str2

- str1 = type van golfvorm
- f1 = schaal van de maximale amplitude van de golfvorm
- f2 = middenfrequentie van de golfvorm (Hertz)
- str2 = identificatie voor de golfvorm die wordt gebruikt om deze aan een bron toe te wijzen

#hertzian\_dipole: c1 f1 f2 f3 str1 [f4 f5]

- c1 = polarisatie van de bron en kan x, y of z zijn
- f1 f2 f3 = coördinaten (x,y,z) van de bron in het model
- f4 f5 = optionele parameters
- str1 = identificatie van de golfvorm die met de bron moet worden gebruikt

#rx: f1 f2 f3 [str1 str2]

- f1 f2 f3 = coördinaten (x,y,z) van de ontvanger in het model
- str1 = identificatie van de ontvanger
- str2 = lijst met uitgangen met deze receiver (Ex, Ey, Ez, Hx, Hy, Hz, Ix, Iy of Iz)

#box: f1 f2 f3 f4 f5 f6 str1 [c1]

- f1 f2 f3 = coördinaten linksonder (x,y,z) van het parallellepipedum
- f4 f5 f6 = coördinaten rechtsboven (x,y,z) van het parallellepipedum
- str1 = materiaalidentificatie die moet corresponderen met materiaal dat al is gedefinieerd in het invoerbestand, of is een van de ingebouwde materialen pec of free\_space
- c1 = optionele parameter die y of n kan zijn, die wordt gebruikt om diëlektrische afvlakking in en uit te schakelen

#cylinder: f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 str1 [c1]

- f1 f2 f3 = coördinaten (x,y,z) van het midden van één vlak van de cilinder
- f4 f5 f6 = coördinaten (x,y,z) van het midden van het andere vlak
- f7 = de straal van de cilinder
- str1 = materiaalidentificatie die moet corresponderen met materiaal dat al is gedefinieerd in het invoerbestand, of is een van de ingebouwde materialen pec of free\_space
- c1 = optionele parameter die y of n kan zijn, die wordt gebruikt om diëlektrische afvlakking in en uit te schakelen

#geometry\_view: f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 file1 c1

- f1 f2 f3 = coördinaten linksonder (x,y,z) van het volume van de geometrieweergave in meters
- f4 f5 f6 = coördinaten rechtsboven (x,y,z) van het volume van de geometrieweergave in meters
- f7 f8 f9 = de ruimtelijke discretisatie van de geometrieweergave in meters (meestal zullen deze hetzelfde zijn als de ruimtelijke discretisatie van het model, maar ze kunnen desgewenst grover zijn)
- file1 = bestandsnaam van het bestand waarin de geometrieweergave wordt opgeslagen in dezelfde map als het invoerbestand
- c1 = kan ofwel n (normaal) of f (fijn) zijn, wat aangeeft of de geometrie-informatie per cel (n) of per celrand (f) moet worden uitgevoerd (de fijne modus moet worden gereserveerd voor het bekijken van gedetailleerde delen van de geometrie die kleine volumes in beslag nemen, aangezien het gebruik van deze modus geometriebestanden met grote bestandsgroottes kan genereren)

### Run model A-scan

```

1 # Model
2 import os
3 from gprMax.gprMax import api
4 |
5 filename = os.path.join(os.pardir, os.pardir, 'user_models/Masterproef', 'test_Ascan_wortel.in')
6 api(filename, n=1, geometry_only=False)

```

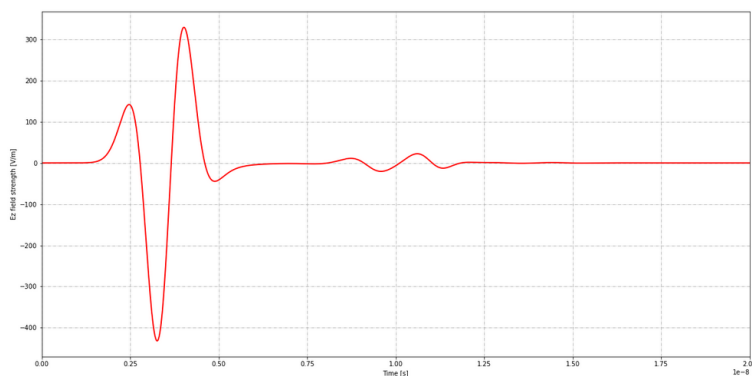
Het model genereert de outputfile 'test\_Ascan\_wortel.out'.

### Plot A-scan

```

1 # Plot
2 %matplotlib inline
3 import os
4 from gprMax.receivers import Rx
5 from tools.plot_Ascan import mpl_plot
6
7 filename_test_wortel = os.path.join(os.pardir, os.pardir, 'user_models/Masterproef', 'test_Ascan_wortel.out')
8 outputs_test_wortel = Rx.defaultoutputs
9 outputs_test_wortel = ['Ez']
10 plt = mpl_plot(filename_test_wortel, outputs_test_wortel, fft=False)

```





## 8.2. Appendix 2: Modellen

### *Inputvariabelen van het model*

#### **# Function permittivity root (r)**

```
def Hydraprobe(vol_moist_cont):  
    """Hydraprobe default equation for VMC (Manual appendix C, equation A2)"""  
    A = 10.764  
    B = -6.2494  
    C = 5.8447  
    return (A*(vol_moist_cont**2)+B*vol_moist_cont+C)
```

#### **# Function permittivity soil (s)**

```
def CRIMc(vmc, bulkdens, clay, partdens, air_perm, perm_solid, wp):  
    """CRIM Equation (Birchak et.al 1974)"""  
    por = 1 - bulkdens/partdens  
    alpha = -0.46*clay+0.71  
    return (( vmc*wp**alpha + (1-por)*perm_solid**alpha + (por-vmc)*air_perm**(alpha))**(1/alpha))
```

#### **# Function bulk electrical conductivity soil**

```
def doussan_ruy(vmc, b_dens, p_sand, p_silt, p_clay, rho_water, m, partdens):  
    """Doussan & Ruy 2009. Surface conductivity based on WS model obtained for clay contents higher than 6%.  
    Based on Rhoades model otherwise. As defined in Doussan & Ruy 2009"""  
    por = 1 - b_dens/partdens  
    F = por**m  
    S = vmc/por  
  
    if p_clay > 6:  
        scond = (0.654*p_clay/(p_sand+p_silt)) + 0.018  
    else:  
        scond = 0.023*p_clay - 0.0209  
  
    return ((S**2)/F)*(1/rho_water + scond/S) # bulk electrical conductivity
```

#### **# Fixed reference values**

```
partdens = 2.65 # particle density  
air_perm = 1 # permittivity of air  
perm_solid = 4 # solid permittivity phase  
wp = 80 # water permittivity phase (depends on temperature)  
m = 1.5 # cementation exponent (fixed reference value for sand)  
ec_water = 0.095 # conductivity [S/m] of the pore solution (Aref median - sandy soil)  
rho_water = 1/ec_water
```

#### **# Fixed variables**

```
wf = 0.5e9 # waveform in Hertz  
vmc_r_fix = 0.3 # fixed volumetric moisture content (vmc) of the root, calibration  
rad_r_fix = 0.03 # radius of root  
depth_r_fix = 0.7 # depth of root, so root 30cm deep in the soil  
vmc_s_fix = 0.2 # fixed volumetric moisture content of the soil, in between 0.1 and 0.5
```

#### **# Range variabelen**

```
min_vmc_r = 0.1 # volumetric moisture content root, calibration  
max_vmc_r = 0.7  
min_rad_r = 0.001 # radius of root in m  
max_rad_r = 0.05  
min_vmc_s = 0.1 # volumetric moisture content soil  
max_vmc_s = 0.5 # max
```

```
min_bden_s = 0.6 # bulk density soil
max_bden_s = 2
```

### # Changing variables

```
import numpy as np
vmc_r_range = np.random.uniform(min_vmc_r, max_vmc_r, size = (1, root_iter)) # range vmc root
vmc_s_range = np.random.uniform(min_vmc_s, max_vmc_s, size = (1, soil_iter)) # range vmc soil
bden_s_range = np.random.uniform(min_bden_s, max_bden_s, size = (1, soil_iter)) # range bulk density soil
```

### *Model 1: Scenario 1: Variatie in bodemvochtgehalte*

### # Iterations

```
itertype = 1 # determine iterating input variables: 1 = vmc_s = volumetric moisture content soil
root_iter = 1000 # number of iterations root
soil_iter = 1000 # number of iterations soil
```

### # Select varying variable

```
if itertype == 1:
    varprop = vmc_s_range
else:
    print("itertype not in range")
```

### # Select soil type

```
soiltype = 0 # soil type top: 0 = P-site, 1 = E-site, 2 = S-site, 3 = A-site, 4 = EH-site
if soiltype == 0: # P site (PRef): Loam: top: bdens = 1.589, clay = 9.843, silt = 38.992, sand = 51.166
    bden_s_fix = 1.589
    clay_s_fix = 9.843/100
    silt_s_fix = 38.992/100
    sand_s_fix = 51.166/100
elif soiltype == 1: # E site (ERef): Loam: top: bdens = 1.6103, clay = 20.935, silt = 46.893, sand = 32.172
    bden_s_fix = 1.6103
    clay_s_fix = 20.935/100
    silt_s_fix = 46.893/100
    sand_s_fix = 32.172/100
elif soiltype == 2: # S site (SRef): Sand: top: bdens = 1.5130, clay = 7.481, silt = 9.725, sand = 82.795
    bden_s_fix = 1.5130
    clay_s_fix = 7.481/100
    silt_s_fix = 9.725/100
    sand_s_fix = 82.795/100
elif soiltype == 3: # A site (ARef): Silty ClayLoam: top: bdens = 1.4558, clay = 8.772, silt = 76.156, sand = 15.072
    bden_s_fix = 1.4558
    clay_s_fix = 8.772/100
    silt_s_fix = 76.156/100
    sand_s_fix = 15.072/100
elif soiltype == 4: # EH site (EH2): Silty Clay: top: bdens = 1.1959, clay = 52.891, silt = 37.465, sand = 9.644
    bden_s_fix = 1.1959
    clay_s_fix = 52.891/100
    silt_s_fix = 37.465/100
    sand_s_fix = 9.644/100
```

### # Initialise

```
max_amplitude = []
n_input = 4 # varprop, perm_s, perm_r, cond_s
n_iter = root_iter
n_out = np.zeros(((n_input + 1), n_iter)) # +1 output = amplitude
n_out[0] = varprop
```

## # Loop

for i in varprop:

for index in range(root\_iter):

### # Permittivity root

perm\_r = Hydraprobe(vmc\_r\_fix)

### # Permittivity soil

perm\_s = CRIMc(i, bden\_s\_fix, clay\_s\_fix, partdens, air\_perm, perm\_solid, wp)

### # Conductivity soil

cond\_s = doussan\_ruy(i, bden\_s\_fix, sand\_s\_fix, silt\_s\_fix, clay\_s\_fix, rho\_water, m, partdens)

### # Save outputs

n\_out[1] = perm\_r

n\_out[2] = perm\_s

n\_out[3] = cond\_s

### ## Input A-scan ZONDER wortel

df = open('Ascan\_zonder\_wortel\_'+str(perm\_s[index])+'+'+str(wf)+'.in','w')

df.write("#title: Ascan\_zonder\_wortel\n#domain: 1 1 0.002\n#dx\_dy\_dz: 0.002 0.002

0.002\n#time\_window: 20e-9\n

#material: '"+str(perm\_s[index])+"' '"+str(cond\_s[index])+"' 1 0 soil\n

#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my\_ricker\n#hertzian\_dipole: z 0.1 0.90 0 my\_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n

#box: 0 0 0 1 0.90 0.002 soil\n

#geometry\_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan\_zonder\_wortel n''')

df.close()

### ## Run model A-scan: loop\_Ascan\_0.out

import os

from gprMax.gprMax import api

filename = 'Ascan\_zonder\_wortel\_'+str(perm\_s[index])+'+'+str(wf)+'.in'

api(filename, n=1, geometry\_only=False)

### ## Output data

filename\_loop\_Ascan = 'Ascan\_zonder\_wortel\_'+str(perm\_s[index])+'+'+str(wf)+'.out'

from tools.plot\_Bscan import get\_output\_data

rxnumber = 1

rxcomponent = 'Ez'

outputdata\_Ascan, dt = get\_output\_data(filename\_loop\_Ascan, rxnumber, rxcomponent)

### ## Input Ascan MET wortel

df = open('Ascan\_wortel\_'+str(perm\_s[index])+'+'+str(wf)+'.in','w')

df.write("#title: Ascan\_wortel\n#domain: 1 1 0.002\n#dx\_dy\_dz: 0.002 0.002 0.002\n#time\_window: 20e-

9\n

#material: '"+str(perm\_s[index])+"' '"+str(cond\_s[index])+"' 1 0 soil\n#material: '"+str(perm\_r)+"' 0.005 1 0 my\_root\n

#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my\_ricker\n#hertzian\_dipole: z 0.1 0.90 0 my\_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n

#box: 0 0 0 1 0.90 0.002 soil\n#cylinder: 0.50 '"+str(depth\_r\_fix)+"' 0 0.50 '"+str(depth\_r\_fix)+"' 0.002

'"+str(rad\_r\_fix)+"' my\_root\n

#geometry\_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan\_wortel n''')

df.close()

### ## Run model A-scan: loop\_Ascan\_wortel\_0.out

filename = 'Ascan\_wortel\_'+str(perm\_s[index])+'+'+str(wf)+'.in'

api(filename, n=1, geometry\_only=False)

### ## Output data

filename\_loop\_Ascan\_wortel = 'Ascan\_wortel\_'+str(perm\_s[index])+'+'+str(wf)+'.out'

outputdata\_Ascan\_wortel, dt = get\_output\_data(filename\_loop\_Ascan\_wortel, rxnumber, rxcomponent)

### ## Verschil tussen 2 A-scans om eerste signaal te verwijderen

outputverschil = outputdata\_Ascan\_wortel - outputdata\_Ascan

### ## Envelope filter: hilbert transformatie: signaal omzetten naar positieve waarden

```

import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import hilbert
analytic_signal = hilbert(output_verschil)
amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
# Maximum
max_ampl = np.max(amplitude_envelope)
max_amplitude.append(max_ampl)

```

#### **# Output amplitude**

```
n_out[4] = max_amplitude
```

*Model 2: Scenario 1: Variatie in het vochtgehalte van de bodem en de boomwortel*

#### **# Iterations**

```

itertype = 0 # determine iterating input variables: 0 = vmc_r and vmc_s
root_iter = 32 # number of iterations root
soil_iter = 32 # number of iterations soil # 32x32 = 1024

```

#### **# Select varying variable**

```

if itertype == 0:
    varprop = vmc_r_range
    var = vmc_s_range
else:
    print("itertype not in range")

```

#### **# Select soil type: same as 'Model 1: Scenario 1: Variatie in bodemvochtgehalte'**

#### **# Initialise**

```

max_amplitude = []
v = []
vv = []
permr = []
perms = []
conds = []

```

#### **# Loop**

```

for i in varprop:
    for index in range(root_iter):
        for j in var:
            for ind in range(soil_iter):
                # Permittivity root
                perm_r = Hydraprobe(i)
                # Permittivity soil
                perm_s = CRIMc(j, bden_s_fix, clay_s_fix, partdens, air_perm, perm_solid, wp)
                # Conductivity soil
                cond_s = doussan_ruy(j, bden_s_fix, sand_s_fix, silt_s_fix, clay_s_fix, rho_water, m, partdens)

```

#### **# Save outputs**

```

v.append(varprop[0,index])
vv.append(var[0,ind])
permr.append(perm_r[index])
perms.append(perm_s[ind])
conds.append(cond_s[ind])

```

#### **## Input Ascan ZONDER wortel**

```
df = open('Ascan_zonder_wortel_'+str(perm_r[index])+'_'+str(perm_s[ind])+'_'+str(wf)+'.in','w')
```

```

df.write("#title:  Ascan_zonder_wortel\n#domain:  1  1  0.002\n#dx_dy_dz:  0.002  0.002  0.002\n#time_window: 20e-9\n
#material: '"+str(perm_s[ind])+"'"+str(cond_s[ind])+"' 1 0 soil\n
#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my_ricker\n#hertzian_dipole: z 0.1 0.90 0 my_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n
#box: 0 0 0 1 0.90 0.002 soil\n
#geometry_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan_zonder_wortel n'')
df.close()
## Run model A-scan: loop_Ascan_0.out
import os
from gprMax.gprMax import api
filename = 'Ascan_zonder_wortel_'+str(perm_r[index])+'_'+str(perm_s[ind])+'_'+str(wf)+'.in'
api(filename, n=1, geometry_only=False)
## Output data
filename_loop_Ascan =
'Ascan_zonder_wortel_'+str(perm_r[index])+'_'+str(perm_s[ind])+'_'+str(wf)+'.out'
from tools.plot_Bscan import get_output_data
rxnumber = 1
rxcomponent = 'Ez'
outputdata_Ascan, dt = get_output_data(filename_loop_Ascan, rxnumber, rxcomponent)

## Input A-scan MET wortel
df = open('Ascan_wortel_'+str(perm_r[index])+'_'+str(perm_s[ind])+'_'+str(wf)+'.in','w')
df.write("#title: Ascan_wortel\n#domain: 1 1 0.002\n#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002\n#time_window:
20e-9\n
#material: '"+str(perm_s[ind])+"'"+str(cond_s[ind])+"' 1 0 soil\n#material: '"+str(perm_r[index])+"' 0.005 1 0
my_root\n
#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my_ricker\n#hertzian_dipole: z 0.1 0.90 0 my_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n
#box: 0 0 0 1 0.90 0.002 soil\n#cylinder: 0.50 '"+str(depth_r_fix)+"' 0 0.50 '"+str(depth_r_fix)+"' 0.002
 '"+str(rad_r_fix)+"' my_root\n
#geometry_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan_wortel n'')
df.close()
## Run model A-scan: loop_Ascan_wortel_0.out
filename = 'Ascan_wortel_'+str(perm_r[index])+'_'+str(perm_s[ind])+'_'+str(wf)+'.in'
api(filename, n=1, geometry_only=False)
## Output data
filename_loop_Ascan_wortel =
'Ascan_wortel_'+str(perm_r[index])+'_'+str(perm_s[ind])+'_'+str(wf)+'.out'
outputdata_Ascan_wortel, dt = get_output_data(filename_loop_Ascan_wortel, rxnumber,
rxcomponent)
## Verschil tussen 2 A-scans om eerste signaal te verwijderen
output_verschil = outputdata_Ascan_wortel - outputdata_Ascan
# Envelope filter: hilbert transformatie: signaal omzetten naar positieve waarden
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import hilbert
analytic_signal = hilbert(output_verschil)
amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
# Maximum
max_ampl = np.max(amplitude_envelope)
max_amplitude.append(max_ampl)

```

*Model 3 en 4: Scenario 2: Variatie in bodemvochtgehalte in beide bodemlagen of variatie in bulkdensiteit bovenste bodemlaag*

#### # Iterations

```

itertype = 1 # determine iterating input variables: 1 = vmc_s; 2 = bulkdens_s
root_iter = 1000 # number of iterations root
soil_iter = 1000 # number of iterations soil

```

### # Select varying variable

```
if itertype == 1:
    varprop = vmc_s_range
elif itertype == 2:
    varprop = bden_s_range
else:
    print("itertype not in range")
```

### # Select first soil type

```
firstsoiltype = 0 # soil type top: 1 = P-site, 2 = E-site, 3 = S-site, 4 = A-site, 5 = EH-site
if firstsoiltype == 0: # P site (PRef): Loam: top: bdens = 1.589, clay = 9.843, silt = 38.992, sand = 51.166
    bden_s_fix_f = 1.589
    clay_s_fix_f = 9.843/100
    silt_s_fix_f = 38.992/100
    sand_s_fix_f = 51.166/100
elif firstsoiltype == 1: # E site (ERef): Loam: top: bdens = 1.6103, clay = 20.935, silt = 46.893, sand = 32.172
    bden_s_fix_f = 1.6103
    clay_s_fix_f = 20.935/100
    silt_s_fix_f = 46.893/100
    sand_s_fix_f = 32.172/100
elif firstsoiltype == 2: # S site (SRef): Sand: top: bdens = 1.5130, clay = 7.481, silt = 9.725, sand = 82.795
    bden_s_fix_f = 1.5130
    clay_s_fix_f = 7.481/100
    silt_s_fix_f = 9.725/100
    sand_s_fix_f = 82.795/100
elif firstsoiltype == 3: # A site (ARef): Silty ClayLoam: top: bdens = 1.4558, clay = 8.772, silt = 76.156, sand = 15.072
    bden_s_fix_f = 1.4558
    clay_s_fix_f = 8.772/100
    silt_s_fix_f = 76.156/100
    sand_s_fix_f = 15.072/100
elif firstsoiltype == 4: # EH site (EH2): Silty Clay: top: bdens = 1.1959, clay = 52.891, silt = 37.465, sand = 9.644
    bden_s_fix_f = 1.1959
    clay_s_fix_f = 52.891/100
    silt_s_fix_f = 37.465/100
    sand_s_fix_f = 9.644/100
```

### # Select second soil type

```
secondsoiltype = 0 # soil type bottom: 1 = P, 2 = E, 3 = S, 4 = A, 5 = EH
if secondsoiltype == 0: # P site (PRef): Loam: bottom: bdens = 1.52, clay = 11.258, silt = 46.533, sand = 42.210
    bden_s_fix_s = 1.52
    clay_s_fix_s = 11.258/100
    silt_s_fix_s = 46.533/100
    sand_s_fix_s = 42.210/100
elif secondsoiltype == 1: # E site (ERef): Loam: bottom: bdens = 1.5381, clay = 20.532, silt = 43.939, sand = 35.529
    bden_s_fix_s = 1.5381
    clay_s_fix_s = 20.532/100
    silt_s_fix_s = 43.939/100
    sand_s_fix_s = 35.529/100
elif secondsoiltype == 2: # S site (SRef): Sand: bottom: bdens = 1.6352, clay = 5.694, silt = 1.068, sand = 93.238
```



```

bden_s_fix_s = 1.6352
clay_s_fix_s = 5.694/100
silt_s_fix_s = 1.068/100
sand_s_fix_s = 93.238/100
elif secondsoiltype == 3: # A site (ARef): Silty ClayLoam: bottom: bdens = 1.6264, clay = 12.616, silt = 75.304,
sand = 12.080
    bden_s_fix_s = 1.6264
    clay_s_fix_s = 12.616/100
    silt_s_fix_s = 75.304/100
    sand_s_fix_s = 12.080/100
elif secondsoiltype == 4: # EH site (EH2): Silty Clay: bottom: bdens = 1.7754, clay = 9.971, silt = 25.311, sand =
64.719
    bden_s_fix_s = 1.7754
    clay_s_fix_s = 9.971/100
    silt_s_fix_s = 25.311/100
    sand_s_fix_s = 64.719/100

```

### # Initialise

```

max_amplitude = []
n_input = 6 # varprop, perm_r, perm_s_f, perm_s_s, cond_s_f, cond_s_s
n_iter = root_iter
n_out = np.zeros(((n_input + 1), n_iter)) # +1 output = amplitude
n_out[0] = varprop

```

### # Loop

```

for i in varprop:
    for index in range(root_iter):

        # Permittivity root
        perm_r = Hydraprobe(vmc_r_fix)

        # Permittivity soil
        perm_s_f = CRIMc(i, bden_s_fix_f, clay_s_fix_f, partdens, air_perm, perm_solid, wp) # or bden_s_fix_f = i
        perm_s_s = CRIMc(i, bden_s_fix_s, clay_s_fix_s, partdens, air_perm, perm_solid, wp) # or vmc_s_fix = i

        # conductivity soil
        cond_s_f = doussan_ruy(i, bden_s_fix_f, sand_s_fix_f, silt_s_fix_f, clay_s_fix_f, rho_water, m, partdens)
        # or bden_s_fix_f = i or vmc_s_fix = i
        cond_s_s = doussan_ruy(i, bden_s_fix_s, sand_s_fix_s, silt_s_fix_s, clay_s_fix_s, rho_water, m, partdens)

        # Save outputs
        n_out[1] = perm_r
        n_out[2] = perm_s_f
        n_out[3] = perm_s_s
        n_out[4] = cond_s_f
        n_out[5] = cond_s_s

        ## Input Ascan ZONDER wortel
        df = open('Ascan_zw_'+str(perm_s_f[index])+'+'+str(wf)+'.in', 'w')
        df.write("#title: Ascan_zonder_wortel\n#domain: 1 1 0.002\n#dx_dy_dz: 0.002 0.002
0.002\n#time_window: 20e-9\n
#material: '"+str(perm_s_f[index])+"'"+str(cond_s_f[index])+"' 1 0 firstsoil\n#material:
 '"+str(perm_s_s[index])+"'"+str(cond_s_s[index])+"' 1 0 secondsoil\n
#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my_ricker\n#hertzian_dipole: z 0.1 0.90 0 my_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n

```

```

#box: 0 0.55 0 1 0.90 0.002 firstsoil\n#box: 0 0 1 0.55 0.002 secondsoil\n
#geometry_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan_zw n")
df.close()
## Run model A-scan: loop_Ascan_0.out
import os
from gprMax.gprMax import api
filename = 'Ascan_zw_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.in'
api(filename, n=1, geometry_only=False)
## Output data
filename_loop_Ascan = 'Ascan_zw_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.out'
from tools.plot_Bscan import get_output_data
rxnumber = 1
rxcomponent = 'Ez'
outputdata_Ascan, dt = get_output_data(filename_loop_Ascan, rxnumber, rxcomponent)

## Input Ascan MET wortel
df = open('Ascan_w_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.in','w')
df.write("#title: Ascan_wortel\n#domain: 1 1 0.002\n#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002\n#time_window: 20e-
9\n
#material: '"+str(perm_s_f[index])+"' '"+str(cond_s_f[index])+"' 1 0 firstsoil\n#material:
 '"+str(perm_s_s[index])+"' '"+str(cond_s_s[index])+"' 1 0 secondsoil\n#material: '"+str(perm_r)+"' 0.005 1 0
my_root\n
#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my_ricker\n#hertzian_dipole: z 0.1 0.90 0 my_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n
#box: 0 0.55 0 1 0.90 0.002 firstsoil\n#box: 0 0 1 0.55 0.002 secondsoil\n#cylinder: 0.50 '"+str(depth_r_fix)+"'
0 0.50 '"+str(depth_r_fix)+"' 0.002 '"+str(rad_r_fix)+"' my_root\n
#geometry_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan_w n")
df.close()
## Run model A-scan: loop_Ascan_wortel_0.out
filename = 'Ascan_w_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.in'
api(filename, n=1, geometry_only=False)
## Output data
filename_loop_Ascan_wortel = 'Ascan_w_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.out'
outputdata_Ascan_wortel, dt = get_output_data(filename_loop_Ascan_wortel, rxnumber, rxcomponent)

## Verschil tussen 2 Ascans om eerste signaal te verwijderen
output_verschil = outputdata_Ascan_wortel - outputdata_Ascan
# Envelope filter: hilbert transformatie: signaal omzetten naar positieve waarden
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import hilbert
analytic_signal = hilbert(output_verschil)
amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
# Maximum
max_ampl = np.max(amplitude_envelope)
max_amplitude.append(max_ampl)

# Output amplitude
n_out[6] = max_amplitude

```

*Model 5: Scenario 3: Variatie in bodemvochtgehalte in beide bodemlagen*

```

# Iterations
itertype = 1 # determine iterating input variables: 1 = vmc_s
root_iter = 100 # number of iterations root

```

```

soil_iter = 100 # number of iterations soil

# Select varying variable
if itertype == 1:
    varprop = vmc_s_range
else:
    print("itertype not in range")

# Select first soil type: same as 'Model 3 en 4: Scenario 2'
# Select second soil type: same as 'Model 3 en 4: Scenario 2'

# Initialise
max_amplitude = []
n_input = 6 # varprop, perm_r, perm_s_f, perm_s_s, cond_s_f, cond_s_s
n_iter = root_iter
n_out = np.zeros(((n_input + 1), n_iter)) # +1 output = amplitude
n_out[0] = varprop

# Loop
for i in varprop:
    for index in range(root_iter):

        # Permittivity root
        perm_r = Hydraprobe(vmc_r_fix)
        # Permittivity soil
        perm_s_f = CRIMc(vmc_s_fix, i, clay_s_fix_f, partdens, air_perm, perm_solid, wp)
        perm_s_s = CRIMc(vmc_s_fix, bden_s_fix_s, clay_s_fix_s, partdens, air_perm, perm_solid, wp)
        # Conductivity soil
        cond_s_f = doussan_ruy(vmc_s_fix, i, sand_s_fix_f, silt_s_fix_f, clay_s_fix_f, rho_water, m, partdens)
        cond_s_s = doussan_ruy(vmc_s_fix, bden_s_fix_s, sand_s_fix_s, silt_s_fix_s, clay_s_fix_s, rho_water, m,
partdens)

        # Save outputs
        n_out[1] = perm_r
        n_out[2] = perm_s_f
        n_out[3] = perm_s_s
        n_out[4] = cond_s_f
        n_out[5] = cond_s_s

        ## Input Ascan ZONDER wortel
        df = open('Ascan_zw_'+str(perm_s_f[index])+'+'+str(wf)+'.in','w')
        df.write("#title: Ascan_zonder_wortel\n#domain: 1 1 0.002\n#dx_dy_dz: 0.002 0.002
0.002\n#time_window: 20e-9\n
#material: '"+str(perm_s_f[index])+"'"+str(cond_s_f[index])+"' 1 0 firstsoil\n#material: '"+str(perm_s_s)+"'"+
str(cond_s_s)+"' 1 0 secondsoil\n#material: 6.25 0.01 1 0 concrete\n
#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my_ricker\n#hertzian_dipole: z 0.1 0.90 0 my_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n
#box: 0 0.85 0 1 0.90 0.002 concrete\n#box: 0 0.55 0 1 0.85 0.002 firstsoil\n#box: 0 0 0 1 0.55 0.002
secondsoil\n
#geometry_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan_zw n'")
        df.close()

        ## Run model A-scan: loop_Ascan_0.out
        import os

```

```

from gprMax.gprMax import api
filename = 'Ascan_zw_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.in'
api(filename, n=1, geometry_only=False)
## Output data
filename_loop_Ascan = 'Ascan_zw_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.out'
from tools.plot_Bscan import get_output_data
rxnumber = 1
rxcomponent = 'Ez'
outputdata_Ascan, dt = get_output_data(filename_loop_Ascan, rxnumber, rxcomponent)

## Input Ascan MET wortel
df = open('Ascan_w_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.in','w')
df.write("#title: Ascan_wortel\n#domain: 1 1 0.002\n#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002\n#time_window: 20e-
9\n
#material: '"+str(perm_s_f[index])+"' '"+str(cond_s_f[index])+"' 1 0 firstsoil\n#material: '"+str(perm_s_s)+"'
 '"+str(cond_s_s)+"' 1 0 secondsoil\n#material: 6.25 0.01 1 0 concrete\n#material: '"+str(perm_r)+"' 0.005 1 0
my_root\n
#waveform: ricker 1 '"+str(wf)+"' my_ricker\n#hertzian_dipole: z 0.1 0.90 0 my_ricker\n#rx: 0.2 0.90 0\n
#box: 0 0.85 0 1 0.90 0.002 concrete\n#box: 0 0.55 0 1 0.85 0.002 firstsoil\n#box: 0 0 0 1 0.55 0.002
secondsoil\n#cylinder: 0.50 '"+str(depth_r_fix)+"' 0 0.50 '"+str(depth_r_fix)+"' 0.002 '"+str(rad_r_fix)+"'
my_root\n
#geometry_view: 0 0 0 1 1 0.002 0.002 0.002 0.002 Ascan_w n")
df.close()
## Run model A-scan: loop_Ascan_wortel_0.out
filename = 'Ascan_w_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.in'
api(filename, n=1, geometry_only=False)
## Output data
filename_loop_Ascan_wortel = 'Ascan_w_'+str(perm_s_f[index])+'_'+str(wf)+'.out'
outputdata_Ascan_wortel, dt = get_output_data(filename_loop_Ascan_wortel, rxnumber, rxcomponent)

## Verschil tussen 2 Ascans om eerste signaal te verwijderen
output_verschil = outputdata_Ascan_wortel - outputdata_Ascan
# Envelope filter: hilbert transformatie: signaal omzetten naar positieve waarden
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import hilbert
analytic_signal = hilbert(output_verschil)
amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
# Maximum
max_ampl = np.max(amplitude_envelope)
max_amplitude.append(max_ampl)

# Output amplitude
n_out[6] = max_amplitude

```

## 9. Referenties

- Alani, A. M., & Lantini, L. (2020). Recent Advances in Tree Root Mapping and Assessment Using Non-destructive Testing Methods: A Focus on Ground Penetrating Radar. *Surveys in Geophysics*, 41(3), 605–646. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09548-6>
- Annan, A. P. (2009). Chapter 1—Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In H. M. Jol (Red.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (pp. 1–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6>
- Annan, A. P., & Cosway, S. W. (1992). Simplified GPR beam model for survey design. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992* (pp. 356–359). Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.1822088>
- Attia al Hagrey, S. (2007). Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 839–854. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl237>
- Barton, C., & Montagu, K. (2005). Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal condition. *Tree physiology*, 24, 1323–1331. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.12.1323>
- Bassuk, N., Grabosky, J., Mucciardi, A., & Raffel, G. (2011). Ground-penetrating Radar Accurately Locates Tree Roots in Two Soil Media Under Pavement. *Arboriculture and Urban Forestry*, 37, 160–166. <https://doi.org/10.48044/jauf.2011.021>
- (BE) Faculty of Bioscience Engineering • TreeWatch.net. (z.d.). *TreeWatch.Net*. Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://treewatch.net/faculty-of-bioscience-engineering/>
- Benedetto, F., & Tosti, F. (2017). A signal processing methodology for assessing the performance of ASTM standard test methods for GPR systems. *Signal Processing*, 132, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.06.030>
- Birchak, J. R., Gardner, C. G., Hipp, J. E., & Victor, J. M. (1974). High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proceedings of the IEEE*, 62(1), 93–98. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9388>
- BoomOntzorging.com. (z.d.). *Air-Spade voor verwijderen van grond rond de boomwortels*. BoomOntzorging.com. Geraadpleegd 8 juni 2022, van <https://boomontzorging.com/onderzoeksapparatuur/air-spade/>
- Boyer, J. S., & Kramer, P. J. (1995). *Water relations of plants and soils*. Academic Press, Inc. <https://udspace.udel.edu/handle/19716/2830>
- Brennan, G., Patch, D., & Stevens, F. R. W. (1997). Tree roots and underground pipes. *Arboriculture Research Note Department of the Environment*. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Tree+roots+and+underground+pipes+%5BUK%5D.&author=Brennan+G.&publication\\_year=1981](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Tree+roots+and+underground+pipes+%5BUK%5D.&author=Brennan+G.&publication_year=1981)
- Brunner, I., & Godbold, D. (2007). Tree roots in a changing world. *Journal of Forest Research*, 12, 78–82. <https://doi.org/10.1007/s10310-006-0261-4>
- Butnor, J., Doolittle, J., Kress, L., Cohen, S., & Johnsen, K. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree physiology*, 21, 1269–1278. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269>

Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., Culvenor, D., Avitabile, V., Disney, M., Armston, J., & Kaasalainen, M. (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 198–208. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12301>

Cassidy, N. (2009a). Chapter 2—Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In H. M. Jol (Red.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (pp. 41–72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00002-8>

Cassidy, N. (2009b). Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. In *Ground Penetrating Radar* (pp. 141–176). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00005-3>

Cermák, J., Hruška, J., Martinková, M., & Prax, A. (2000). Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant and Soil*, 219(1), 103–116. <https://doi.org/10.1023/A:1004736310417>

Cimadevila, H., Perez-Gracia, V., Novo, A., & Armesto, J. (2010). Forestry applications of ground-penetrating radar. *Forest Systems*, 19. <https://doi.org/10.5424/fs/2010191-01163>

Cole, K. S., & Cole, R. H. (1941). Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. *Journal of Chemical Physics*, 9, 341–351. <https://doi.org/10.1063/1.1750906>

Coupure en Leie. (z.d.). Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://inventaris.onroerendergoed.be/aanduidingsobjecten/10418>

Cox, K. D., Scherm, H., & Serman, N. (2005). Ground-penetrating Radar to Detect and Quantify Residual Root Fragments Following Peach Orchard Clearing. *HortTechnology*, 15(3), 600–607. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.15.3.0600>

Crow, P. (2005). *The Influence of Soils and Species on Tree Root Depth—Urban Forestry South*. <https://urbanforestrysouth.org/resources/library/ttresources/the-influence-of-soils-and-species-on-tree-root-depth/?searchterm=crow>

Daniels, D. J. (1996). Surface-penetrating radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 8(4), 165–182. <https://doi.org/10.1049/ecej:19960402>

Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar: Vol. 2nd ed.* IET Digital Library. <https://doi.org/10.1049/PBRA015E>

Daniels, J. (2000). *Ground Penetrating Radar Fundamentals*. <https://doi.org/10.4133/1.2921864>

Danjon, F., & Reubens, B. (2007). Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Plant and Soil*, 303, 1–34. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9470-7>

Dannoura, M., Hirano, Y., Igarashi, T., Ishii, M., Aono, K., Yamase, K., & Kanazawa, Y. (2008). Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 142(2), 375–380. <https://doi.org/10.1080/11263500802150951>

Day, S., Wiseman, P., Dickinson, S., & Harris, J. R. (2010). *Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Contemporary-Concepts-of-Root-System-Architecture-Day-Wiseman/ab1bfd53a5cec28cfddf6faf0b007870d5611260>



- De Deurwaerder, H., Hervé-Fernández, P., Stahl, C., Burban, B., Petronelli, P., Hoffman, B., Bonal, D., Boeckx, P., & Verbeeck, H. (2018). Liana and tree below-ground water competition: Evidence for water resource partitioning during the dry season. *TREE PHYSIOLOGY*, 38(7), 1071–1083. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy002>
- De Sousa, J. T., & Gehring, C. (2010). Adequacy of contrasting sampling methods for root mass quantification in a slash-and-burn agroecosystem in the eastern periphery of Amazonia. *Biology and Fertility of Soils*, 46, 851–859. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0490-8>
- Dedulle, M. (z.d.). *Parkeerplaatsen Coupure Rechts opgeofferd om bomen en uitzicht te beschermen*. De Standaard. Geraadpleegd 2 november 2021, van [https://www.standaard.be/cnt/dmf20210312\\_98154141](https://www.standaard.be/cnt/dmf20210312_98154141)
- Dobson, M. (1995). Tree root systems. *Arboriculture Research and Information Note - Department of the Environment (United Kingdom)*. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Tree+root+systems&author=Dobson%2C+M.&publication\\_year=1995](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Tree+root+systems&author=Dobson%2C+M.&publication_year=1995)
- Dobson, M. C., & Moffat, A. J. (1993). *The potential for woodland establishment on landfill sites*. HMSO. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=The+potential+for+woodland+establishment+on+landfill+sites&author=Dobson%2C+M.C.&publication\\_year=1993](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The+potential+for+woodland+establishment+on+landfill+sites&author=Dobson%2C+M.C.&publication_year=1993)
- Dojack, L. (2012). *Ground Penetrating Radar Theory, Data Collection, Processing, and Interpretation: A Guide for Archaeologists*. 94. <https://doi.org/doi:http://dx.doi.org/10.14288/1.0086065>
- Dong, Y., & Ansari, F. (2011). 7—Non-destructive testing and evaluation (NDT/NDE) of civil structures rehabilitated using fiber reinforced polymer (FRP) composites. In V. M. Karbhari & L. S. Lee (Red.), *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures* (pp. 193–222). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857090928.2.193>
- Doolittle, J. (2009). *Soils, peatlands, and biomonitoring | Treearch*. 179–202.
- Douaa, H. A.-T., & Hussain, M. A.-M. (2015). *Guess and Identify the Graves Site Located Under the Floor of the Golden Iwan of Emam Ali Holy Shrine Using Ground Penetrating Radar*. 4(6), 4.
- Doussan, C., & Ruy, S. (2009). Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity. *Water Resources Research*, 45, W10408. <https://doi.org/10.1029/2008WR007309>
- Duman, M., & Gurbuz, A. (2015). *3D imaging for ground-penetrating radars via dictionary dimension reduction*. 23, 1242–1256. <https://doi.org/10.3906/elk-1212-157>
- DuPont™. (2018). *MOLYKOTE® 4 Electrical Insulating Compound*.
- Eliades, A. (2019, juli 22). How Far Do Large Tree Roots Extend? *Deep Green Permaculture*. <https://deepgreenpermaculture.com/2019/07/22/how-far-do-large-tree-roots-extend/>
- Elmendorf, W., Gerhold, H. D., & Kuhns, L. (2005). *A Guide to Preserving Trees in Development Projects*. Penn State Extension. <https://extension.psu.edu/a-guide-to-preserving-trees-in-development-projects>
- Ferrara, C., Barone, P., Salvati, L., & Pettinelli, E. (2014). Ground Penetrating Radar as remote sensing technique to investigate the root system architecture. *Applied Ecology and Environmental Research*, 12, 695–702.
- Gasson, P. E., & Cutler, D. F. (1990). Tree root plate morphology. *Arboricultural Journal (United Kingdom)*. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Tree+root+plate+morphology&author=Gasson%2C+P.E.&publication\\_year=1990](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Tree+root+plate+morphology&author=Gasson%2C+P.E.&publication_year=1990)

GDI Vlaanderen. (z.d.). *Bodemverkenner*. Geraadpleegd 2 januari 2022, van <https://www.dov.vlaanderen.be/portaal/?module=public-bodemverkenner&pos=104119.395,193670.405&res=2.8000000000088185>

Geophysical Survey System Inc. (2016). *Utility Locating with GPR*.

Geophysical Survey Systems, Inc. (2001). *GSSI Handbook for RADAR Inspection of Concrete* (p. 40). [https://pure.port.ac.uk/ws/portalfiles/portal/5797100/Thesis\\_NurulJBostanudin.pdf](https://pure.port.ac.uk/ws/portalfiles/portal/5797100/Thesis_NurulJBostanudin.pdf)

Geophysical Survey Systems, Inc. (2011). *RADAN 7 manual*. Geophysical Survey Systems, Inc. <https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2017/10/GSSI-RADAN-7-Manual.pdf>

Geophysical Survey Systems, Inc. (2022). *UtilityScan® DF*. Geophysical Survey Systems, Inc. [www.geophysical.com](http://www.geophysical.com)

Giannakis, I., Giannopoulos, A., & Warren, C. (2016). A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 37–51. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2468597>

Glover, P. W. J. (2015). Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Electrical Properties. In *Treatise on Geophysics* (pp. 89–137). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00189-5>

Gold, B., Oppenheim, A. V., & Rader, C. M. (1969). *Theory and Implementation of the Discrete Hilbert Transform*. Proc. Symp. Computer Process. in Comm. <https://www.rle.mit.edu/dspg/documents/HilbertComplete.pdf>

Google Maps. (z.d.). Google Maps. Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://www.google.be/maps/@51.0534535,3.7081145,189m/data=!3m1!1e3>

Grasmueck, M., Weger, R., & Horstmeyer, H. (2005). Full-resolution 3D GPR imaging. *GEOPHYSICS*, 70(1), K12–K19. <https://doi.org/10.1190/1.1852780>

Grealy, M. (2006). Resolution of ground-penetrating radar reflections at differing frequencies. *Archaeological Prospection*, 13(2), 142–146. <https://doi.org/10.1002/arp.283>

Gregory, P. J. (2006). *Plant roots: Growth, activity, and interaction with soils*. Blackwell Pub.

GSSI Geophysical Survey Systems, Inc. (2022). *RADAN | GPR Software by GSSI | Underground Mapping Software*. GSSI Geophysical Survey Systems, Inc. <https://www.geophysical.com/software>

Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B., & Lin, H. (2013). Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review. *Plant and Soil*, 362(1), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5>

Guo, L., Lin, H., Fan, B., Cui, X., & Chen, J. (2013a). *Impact of root water content on root biomass estimation using ground penetrating radar: Evidence from forward simulations and field controlled experiments | SpringerLink*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-013-1710-4>

Guo, L., Lin, H., Fan, B., Cui, X., & Chen, J. (2013b). Forward simulation of root's ground penetrating radar signal: Simulator development and validation. *Plant and Soil*, 372(1), 487–505. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1751-8>

Hagrey, S. A. A. (2007). Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 839–854. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl237>

- Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N., & Kanazawa, Y. (2009). Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 319(1–2), 15–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9845-4>
- Hruska, J., Čermák, J., & Šustek, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*, 19(2), 125–130. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125>
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108(3), 389–411. <https://doi.org/10.1007/BF00333714>
- Jackson, R., Moore, L., Hoffmann, W., Pockman, W., & Linder, C. (1999). Ecosystem rooting depth determined with caves and DNA. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 11387–11392. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.20.11387>
- Jol, H. M. (Red.). (2009). Ground Penetrating Radar Theory and Applications. In *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (p. iv). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00016-8>
- Kim, J.-H., Cho, S.-J., & Yi, M.-J. (2007). Removal of ringing noise in GPR data by signal processing. *Geosciences Journal*, 11, 75–81. <https://doi.org/10.1007/BF02910382>
- Kluyver, T., Ragan-Kelley, B., Pérez, F., Granger, B., Bussonnier, M., Frederic, J., Kelley, K., Hamrick, J., Grout, J., Corlay, S., Ivanov, P., Avila, D., Abdalla, S., Willing, C., & Jupyter development team. (2016). *Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows* (F. Loizides & B. Schmidt, Red.; pp. 87–90). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-649-1-87>
- Kutschera, L., & Lichtenegger, E. (2002a). *Acer pseudoplatanus*. <https://images.wur.nl/digital/collection/coll13/id/1391/rec/174>
- Kutschera, L., & Lichtenegger, E. (2002b). *Pinus sylvestris*. <https://images.wur.nl/digital/collection/coll13/id/1270/rec/137>
- Laboratory of Plant Ecology. (z.d.). Laboratory of Plant Ecology. Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://www.plantecology.ugent.be/>
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection*, 10(4), 213–240. <https://doi.org/10.1002/arp.211>
- Leica Geosystems AG. (2010a). *Leica Viva Controller CS10 & CS15 Datasheet*. galledia. [https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica\\_viva\\_controller\\_cs10\\_cs15\\_ds.ashx?la=en-gb&hash=FAC16BBA5B0B653EC57123742803224A](https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_viva_controller_cs10_cs15_ds.ashx?la=en-gb&hash=FAC16BBA5B0B653EC57123742803224A)
- Leica Geosystems AG. (2010b). *Leica Viva TS15 Datasheet*. galledia. [http://kumonos.info/downloads/datasheet\\_ts15.pdf](http://kumonos.info/downloads/datasheet_ts15.pdf)
- Leica Geosystems AG. (2012). *Leica Viva GNSS GS15 ontvanger Datasheet*. galledia. [https://leica-geosystems.com/-/media/Files/LeicaGeosystems/Products/Datasheets/Leica\\_Viva\\_GS15\\_DS.ashx?la=nl-NL&hash=1006641352DC4140D561E805FBA1F235](https://leica-geosystems.com/-/media/Files/LeicaGeosystems/Products/Datasheets/Leica_Viva_GS15_DS.ashx?la=nl-NL&hash=1006641352DC4140D561E805FBA1F235)
- Li, Z.-X., & Rao, S.-W. (2019). Estimation of frequency domain soil parameters of horizontally multilayered earth by using Cole–Cole model based on the parallel genetic algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(9), 1746–1754. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6862>

- Liang, H., Fan, G., Li, Y., & Zhao, Y. (2021). Theoretical Development of Plant Root Diameter Estimation Based on GprMax Data and Neural Network Modelling. *Forests*, *12*(5). <https://doi.org/10.3390/f12050615>
- Liang, H., Xing, L., & Lin, J. (2020). Application and Algorithm of Ground-Penetrating Radar for Plant Root Detection: A Review. *Sensors*, *20*, 2836. <https://doi.org/10.3390/s20102836>
- Liski, J., Kaasalainen, S., Raumonen, P., Akujärvi, A., Krooks, A., Repo, A., & Kaasalainen, M. (2014). Indirect emissions of forest bioenergy: Detailed modeling of stump-root systems. *GCB Bioenergy*, *6*(6), 777–784. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12091>
- Lombardi, F., Lualdi, M., Picetti, F., Bestagini, P., Janszen, G., & Di Landro, L. A. (2020). Ballistic Ground Penetrating Radar Equipment for Blast-Exposed Security Applications. *Remote Sensing*, *12*(4), 717. <https://doi.org/10.3390/rs12040717>
- Montiel-Zafra, V., Canadas-Quesada, F. J., Vera-Candeas, P., Ruiz-Reyes, N., Rey, J., & Martinez, J. (2017). A novel method to remove GPR background noise based on the similarity of non-neighboring regions. *Journal of Applied Geophysics*, *144*, 188–203. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.010>
- Natkon Dendrometers. (z.d.). Natkon Dendrometers. Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://natkon.ch/products/>
- Oikonomopoulou, E. Ch., Palieraki, V. A., Sfikas, I. P., & Trezos, C. G. (2022). Reliability and limitations of GPR for identifying objects embedded in concrete – Experience from the lab. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00898. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00898>
- Ow, L. F., & Sim, E. K. (2012). Detection of urban tree roots with the ground penetrating radar. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, *146*(sup1), 288–297. <https://doi.org/10.1080/11263504.2012.731018>
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody Plants—3rd Edition*. <https://www.elsevier.com/books/physiology-of-woody-plants/pallardy/978-0-12-088765-1>
- ParaView. (z.d.). ParaView. Geraadpleegd 14 april 2022, van <https://www.paraview.org/>
- Pijnven. (z.d.). Bosland, het grootste avonturenbos van Vlaanderen. Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://www.bosland.be/ontdek-bosland/wandelen/pijnven/33/>
- Pokorny, J., O'Brien, J., Hauer, R., Johnson, G., Albers, J., Bedker, P., & Mielke, M. (2003). Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation. *NA-TP-03-03, TP-03-03*. <http://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/11070>
- Project Coupure Rechts | Stad Gent. (z.d.). Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://stad.gent/nl/plannen-en-projecten/project-coupure-rechts>
- Randrup, T. B., McPherson, E. G., & Costello, L. R. (2001). Tree root intrusion in sewer systems: A review of extent and costs. *Journal of Infrastructure Systems* *7*: 26–31, *7*, 26–31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2001\)7:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:1(26))
- Rashed, E. A. (2015). GPR background removal using a directional total variation minimisation approach. *Journal of Geophysics and Engineering*, *12*(6), 897–908. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/12/6/897>
- Raumonen, P., & Åkerblom, M. (2022). *TreeQSM* [MATLAB]. Inverse Tampere. <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM> (Original work published 2017)

- Raumonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M., & Lewis, P. (2013). Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 5, 491–520. <https://doi.org/10.3390/rs5020491>
- Resh, S., Battaglia, M., Worledge, D., & Ladiges, S. (2003). Coarse root biomass for eucalypt plantations in Tasmania, Australia. *Trees - Structure and Function*, 17, 389–399. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0250-6>
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. (2017). *RIEGL VZ-400*. [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxriegl/downloads/10\\_DataSheet\\_VZ-400\\_2017-06-14.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_VZ-400_2017-06-14.pdf)
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. (2022). *RIEGL VZ-400i*. <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/48/>
- Roth, K., Schulin, R., Flüher, H., & Attinger, W. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, 26(10), 2267–2273. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02267>
- Sandmeier geophysical research. (2022). *GPR and seismic data processing software—Sandmeier*. <https://www.sandmeier-geo.de/>
- Sensors & Software Inc. (2010). *Technical Note SPIDAR Network GPR*.
- Sensors & Software Inc. (2013). *SpiView for Spidar—User’s guide*. <https://www.sensoft.ca/wp-content/uploads/2015/11/SPIDAR.pdf>
- Sensors & Software Inc. (2022a). *PulseEKKO® | Deep Ground Penetrating Radar*. <https://www.sensoft.ca/products/pulseekkopro/overview-pulseekko/>
- Sensors & Software Inc. (2022b). *SPIDAR® Multi-channel GPR*. <https://www.sensoft.ca/products/spidar/overview/>
- Shainsky, L. J., & Radosevich, S. R. (1992). Mechanisms of Competition Between Douglas-Fir and Red Alder Seedlings. *Ecology*, 73(1), 30–45. <https://doi.org/10.2307/1938718>
- Somerville, P. D., May, P. B., & Livesley, S. J. (2018). Effects of deep tillage and municipal green waste compost amendments on soil properties and tree growth in compacted urban soils. *Journal of Environmental Management*, 227, 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.004>
- Staelens, R. (2020). *Het onbenutte potentieel van stadsbomen | Ecovator*. Ecovator. <https://ecovator.be/artikels/het-onbenutte-potentieel-van-stadsbomen/?fbclid=IwAR1GNzAHzQ6fuesoGWCeUVuyVi2BIMKggNQ-H4CW2Cu-l9NFg7qrmRxe7q4>
- Stevens Water Monitoring Systems Inc. (2019a). *HydraGO Field Version – Stevens Water*. <https://stevenswater.com/products/hydrago-c/>
- Stevens Water Monitoring Systems Inc. (2019b). *HydraProbe – Stevens Water*. <https://stevenswater.com/products/hydraprobe/>
- Stokes, A., Fourcaud, T., Hruska, J., Cermák, J., Nadyezhdina, N., Nadyezhdin, V., & Praus, L. (2002). An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. ground-penetrating radar. *Journal of Arboriculture*, 28, 2–10.

- Stone, E. L., & Kalisz, P. (1991). *On the maximum extent of tree roots*. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90245-Q](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90245-Q)
- Stover, D., Day, L., Butnor, J., & Drake, B. (2007). Effect of elevated CO<sub>2</sub> on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar. *Ecology*, *88*, 1328–1334. <https://doi.org/10.1890/06-0989>
- Straube, J., Onysko, D., & Schumacher, C. (2002). Methodology and Design of Field Experiments for Monitoring the Hygrothermal Performance of Wood Frame Enclosures. *Journal of Building Physics - J BUILD PHYS*, *26*, 123–151. <https://doi.org/10.1177/0075424202026002098>
- Strong, W. L., & Roi, G. H. L. (1983). Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, *13*(6), 1164–1173. <https://doi.org/10.1139/x83-155>
- Sutton, R. F., & Tinus, R. W. (1983). *Root and root system terminology*. Society of American Foresters.
- Tanikawa, T., Hirano, Y., Dannoura, M., Yamase, K., Aono, K., Ishii, M., Igarashi, T., Ikeno, H., & Kanazawa, Y. (2013). Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, *373*. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1798-6>
- Taylor, B. N., Beidler, K. V., Cooper, E. R., Strand, A. E., & Pritchard, S. G. (2013). Sampling volume in root studies: The pitfalls of under-sampling exposed using accumulation curves. *Ecology Letters*, *16*(7), 862–869. <https://doi.org/10.1111/ele.12119>
- Teroson Afdichting | Fabory*. (z.d.). Geraadpleegd 24 mei 2022, van <https://www.fabory.com/nl/teroson-afdichting/p/4L245761>
- The SciPy community. (2008, 2022). *scipy.signal.hilbert—SciPy v1.8.1 Manual*. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.hilbert.html>
- The Treehouse. (z.d.). *The Treehouse*. Geraadpleegd 2 november 2021, van <https://the-treehouse.be>
- Tobin, B., Čermák, J., Chiatante, D., Danjon, F., Di Iorio, A., Dupuy, L., Eshel, A., Jourdan, C., Kalliokoski, T., Laiho, R., Nadezhdina, N., Nicoll, B., Pagès, L., Silva, J., & Spanos, I. (2007). Towards developmental modelling of tree root systems. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, *141*(3), 481–501. <https://doi.org/10.1080/11263500701626283>
- Tubbs, C. H. (1977). Root-Crown Relations of Young Sugar Maple and Yellow Birch. *Research Note NC-225*. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 225. <http://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/11403>
- Van Bost, P. (2014). *Karakterisering en analyse van wortellexudaten in irrigatiewater van sla- en aardbeienteelten op hydrocultuur*. 71.
- Vlaams Centrum voor Agro- en Visserijmarketing (VLAM). (2019, april 25). *Het bomenplan | De juiste boom op de juiste plaats*. Openbaar groen. <https://www.openbaargroen.be/nieuws/het-bomenplan>
- Warren, C., & Giannopoulos, A. (2015, 2021). *gprMax: Electromagnetic simulation software*. <http://www.gprmax.com/>
- Warren, C., Giannopoulos, A., & Giannakis, I. (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, *209*, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>



Watson, G. W., Hewitt, A. M., Cusic, M., & Lo, M. (2014). The Management of Tree Root Systems in Urban and Suburban Settings: A Review of Soil Influence on Root Growth. *Arboriculture and Urban Forestry*, *40*, 193–217. <https://doi.org/10.48044/jauf.2014.021>

Waxman, M. H., & Smits, L. J. M. (1968). Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, *8*(02), 107–122. <https://doi.org/10.2118/1863-A>

Wunderlich, T., Petersen, H., Hagrey, S. A. al, & Rabbel, W. (2013). Pedophysical Models for Resistivity and Permittivity of Partially Water-Saturated Soils. *Vadose Zone Journal*, *12*(4), vjz2013.01.0023. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0023>

Zhang, Derival, Albrecht, U., & Ampatzidis, Y. (2019). Evaluation of a Ground Penetrating Radar to Map the Root Architecture of HLB-Infected Citrus Trees. *Agronomy*, *9*, 354. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070354>

Zou, L., Wang, Y., Giannakis, I., Tosti, F., Alani, A. M., & Sato, M. (2020). Mapping and Assessment of Tree Roots Using Ground Penetrating Radar with Low-Cost GPS. *Remote Sensing*, *12*(8), 1300. <https://doi.org/10.3390/rs12081300>