



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2015 – 2016

Gebruik van geofysische bodemsensoren voor de
karakterisering van stortplaatsen in het kader van *Enhanced
Landfill Mining*

Audenaert Elise

Promotor: Prof. dr. ir. Van Meirvenne M.

Tutor: ir. Van De Vijver E.

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van
Master in de bio-ingenieurswetenschappen: Milieutechnologie



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2015 – 2016

Gebruik van geofysische bodemsensoren voor de
karakterisering van stortplaatsen in het kader van *Enhanced
Landfill Mining*

Audenaert Elise

Promotor: Prof. dr. ir. Van Meirvenne M.

Tutor: ir. Van De Vijver E.

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van
Master in de bio-ingenieurswetenschappen: Milieutechnologie

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

The author and supervisor give the permission to use this thesis for consultation and to copy parts of it for personal use. Every other use is subject to the copyright laws, more specifically the source must be extensively specified when using from this thesis.

Gent, juni 2016

De promotor,

De tutor,

De auteur

Prof. dr.ir. Van Meirvenne M

ir. Van De Vijver E.

Audenaert Elise

Woord vooraf

Deze scriptie is het resultaat van een jaar intensief werken waarin ik bijzonder veel heb bijgeleerd. De verwezenlijking van dit resultaat is mede te danken aan de hulp van vele personen. Daarom druk ik in dit dankwoord graag mijn waardering uit voor hun bijstand in raad en daad.

Ik wil mijn promotor, prof dr. ir. Marc van Meirvenne, uitdrukkelijk bedanken voor het aanreiken van dit vernieuwende onderwerp. Ook wil ik hem in het bijzonder bedanken voor de kans die hij mij gaf om de voorlopige resultaten te presenteren op het Third International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining, aan de hand van een poster. Vervolgens wil ik ook mijn tutor, ir. Ellen Van De Vijver hartelijk bedanken voor alle tijd, advies en geduld. Ze was steeds bereid mij te helpen en met raad en daad bij te staan.

Ook het personeel in het laboratorium van de vakgroep verdient een gemeente dank je wel. In het bijzonder wil ik mijn dankbaarheid uiten voor de hulp van Annemie en Luc bij het uitvoeren van de verschillende laboanalyses van het stortmateriaal.

Verder wil ik graag de Openbare Vlaamse Afvalstoffen Maatschappij (OVAM) bedanken voor het beschikbaar stellen van de onderzoeksdoossiers. Hierbij wil ik ook de aannemers van Petillion bvba bedanken voor hun geduld en hun technische bijstand bij het graven van de sleuven. Er moet ook een woord van dank uitgaan naar de eigenaars van de onderzochte terreinen voor hun toestemming om op het terrein metingen uit te voeren.

Tot slot wil ik graag mijn dankbaarheid uitdrukken voor de betrokkenheid en motiverende woorden van mijn ouders, zus en vrienden. Ik kon steeds met mijn enthousiasme bij hen terecht.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	IX
Inhoudsopgave	XI
Lijst met afkortingen	XIII
Samenvatting.....	XIV
1 Inleiding.....	1
2 Literatuurstudie.....	2
2.1 Storten van afvalstoffen.....	2
2.1.1 Definitie en opdeling	2
2.1.2 Geschiedenis van afvalbeheer.....	2
2.1.3 Aantal stortplaatsen in Europa.....	3
2.1.4 Afval beheren als hulpbron is een van de Europese doelstelling voor 2020	4
2.1.5 Implementatie van een circulaire economie.....	5
2.2 Enhanced Landfill Mining.....	6
2.2.1 Definitie van het concept	6
2.2.2 Potentieel van ELFM.....	7
2.3 Stortplaatskarakterisering	8
2.3.1 Conventioneel versus geofysisch onderzoek	8
2.3.2 Geofysische bodemsensoren in eerder stortplaatsonderzoek	9
2.4 Toepassing surveytechnieken voor materiaalkarakterisatie	11
2.5 Onderzoeksvraag	12
3 Toegepaste geofysische technieken.....	14
3.1 Elektromagnetische inductie	14
3.1.1 Principe.....	14
3.1.2 Instrumentatie.....	14
3.1.3 Dataverwerking	15
3.2 Grondradar.....	15
3.2.1 Principe.....	15
3.2.2 Instrumentatie.....	16
3.2.3 Dataverwerking	18
4 Case 1: Geofysische survey van voormalige stortplaats voor industrieel bouwafval	19
4.1 Studiegebied	19
4.2 Materiaal en methode	20
4.2.1 EMI.....	20
4.2.1.1 Survey	20
4.2.1.2 Dataverwerking.....	20
4.2.2 GPR	20
4.2.2.1 Dataverwerking.....	20
4.3 Resultaten en discussie.....	21
4.3.1 EMI.....	21
4.3.2 GPR	26
5 Case 2: Pilootproef voor materiaalkarakterisatie	31

5.1	Studiegebied	31
5.2	Materiaal en methode	32
5.2.1	Oppervlakte metingen.....	32
	EMI	32
	GPR.....	32
5.2.2	Profielmetingen.....	32
	Profielbeschrijving.....	33
	EC _p en RDP.....	33
	MS _p	33
5.2.3	Laboanalyses	34
	Staalname en -voorbereiding.....	34
	Partikelgrootte-analyse.....	34
	pH.....	34
	CEC	34
	EC _e	34
	Zware metalen – ICP-OES.....	35
5.2.4	Dataverwerking	35
5.3	Resultaten en discussie.....	36
5.3.1	Oppervlaktemetingen.....	36
	EMI	36
	GPR.....	36
5.3.2	Profielmetingen.....	41
	Profielbeschrijving.....	41
	EC _p en RDP.....	41
	MS _p	42
5.3.3	Laboanalyses	43
	Partikelgrootte-analyse.....	43
	5.3.3.1 pH.....	48
	CEC	48
	5.3.3.2 EC _e	48
	Zware metalen – ICP-OES.....	51
6	Algemene discussie en besluit	57
	Referenties	59
	Appendix.....	64

Lijst met afkortingen

AGC	<i>Automatic gain control</i>
CaCO ₃	Calciumcarbonaat
CEC	<i>Cation exchange capacity</i>
Cd	Cadmium
Cu	Koper
Cr	Chroom
DOE	<i>Depth of exploration</i>
EC _a	Schijnbare elektrische conductiviteit
EC _e	Elektrische conductiviteit van het extract
EC _p	Elektrische conductiviteit in het profiel
EMI	Elektromagnetische inductie
ELFM	<i>Enhanced Landfill Mining</i>
ERT	Elektrische resistiviteit tomografie
FDR	Frequentie domein reflectometrie
Fe	Ijzer
GPR	<i>Ground penetrating radar</i> of grondradar
HNO ₃	Salpeterzuur
ICP - OES	Inductief gekoppeld plasma optische emissie spectrometrie
MAD	<i>Median absolute deviation</i>
MS _a	Schijnbare magnetische susceptibiliteit
MS _p	Magnetische susceptibiliteit in het profiel
NH ₄ ⁺	Ammonium-ion
K ⁺	Kalium
Ni	Nikkel
OVAM	Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij
Pb	Lood
RDP	Relatieve diëlektrische constante
TAW	Tweede algemene waterpassing
VES	<i>Vertical electrical sounding</i>
Zn	Zink

Samenvatting

De zorg om het milieu en de humane gezondheid heeft geleid tot een nieuw Europees milieubeleid. Hierbij wordt het storten van afval sterk beperkt. Ook het stijgend tekort aan grondstoffen zorgt voor een mentaliteitswijziging waarbij de implementatie van de circulaire economie als een oplossing lijkt te functioneren. Een sanering van de aanwezige verontreinigende stortplaatsen is noodzakelijk.

Vandaag gebeurt de karakterisatie van de stortplaatsen aan de hand van conventionele methoden als boringen en het graven van sleuven. Deze technieken zijn kostelijk en bieden slechts een beperkt potentieel om de stortplaatsen te inventariseren omdat er slechts op enkele puntlocaties bemonsterd wordt. Bijgevolg wordt gezocht naar een efficiënte, snelle en goedkope manier om de stortplaatsen te screenen en hieruit het verontreinigingspotentieel te bepalen.

Mobiele geofysische sensoren zijn innovatieve technieken in het onderzoek naar de geografische ligging van de stortplaats. Het gebruik van deze technieken voor de karakterisatie van de stortplaatsmaterialen is nog nieuw. In dit onderzoek werden twee cases behandeld. Als eerste werd een geofysische survey van een voormalige stortplaats voor industrieel bouwafval uitgevoerd. Hier werd de mobiele elektromagnetische inductie (EMI) sensor en de grondradar (GPR) aangewend om de geografische ligging van de stortplaats en de dimensies van de stortmassa te bepalen. In een tweede case werd een pilotsleuf gegraven waarbij een verkennend onderzoek uitgevoerd werd ter karakterisatie van het gestorte materiaal, waarbij het verband tussen elektrische conductiviteit (EC) en magnetische susceptibiliteit (MS) gemeten aan de hand van oppervlaktemetingen enerzijds en deze geofysische parameters gemeten via de gelokaliseerde profielmetingen anderzijds bestudeerd werd. Ook werd het verband tussen de EC en MS verkregen via profielmetingen en fysische en chemische parameters van de stortmaterialen geanalyseerd in laboratoriumonderzoeken nagegaan.

Uit eerder onderzoek blijkt dat de geofysische technieken mogelijkheden bieden bij het onderzoeken van de milieuproblemen gelinkt aan stortplaatsen. Het was een van de eerste keren dat een mobiele configuratie met een opmerkelijk fijne resolutie gebruikt werd in het kader van de valorisatie van de materialen. De technieken kunnen ook gebruikt worden voor materiaalkarakterisatie aangezien verschillende afvalmaterialen verschillende elektromagnetische eigenschappen bezitten. Geofysische eigenschappen werden snel en efficiënt opgemeten met geofysische bodemsensoren. Het was in de eerste case mogelijk zowel de geografische ligging als zones waarbinnen de stortmassa's verschillende eigenschappen hadden te bepalen, op basis van het verschil in heterogeniteit van de EMI signalen. Bij de proefsleuf werden resultaten geboekt in het onderscheiden van de materialen en een zekere gelaagdheid binnen de stortmaterialen te reproduceren op basis van de uitgevoerde EMI en GPR metingen alsook profielmetingen van de EC en MS en laboratoriumanalyses ter karakterisatie van het materiaal. Toch bemoeilijkt de heterogeniteit, die de stortplaatsen kenmerkt, de specifieke karakterisatie van de materialen.

De studie toont het potentieel van geofysische technieken aan om variaties in de bodem waar te nemen op een snelle en efficiënte manier. De nood aan eenvoudige betrouwbare technieken voor het onderzoek van stortplaatsen in het algemeen en ter bepaling van het ELFM-potentieel van stortplaatsen bewijst dat verder onderzoek naar de optimalisatie van deze technieken relevant is

1 Inleiding

Uit een zorg om de gevolgen van stortplaatsen werd in 1999 de Europese richtlijn in zake het storten van afvalstoffen opgesteld, die het storten van materialen aan banden legt, en in 2008 aangevuld met een kaderrichtlijn afval. Toch moeten ook de historisch verontreinigende stortplaatsen opgeruimd worden waarbij secundaire materialen herwonnen kunnen worden. Het proces van het ontginnen van stortplaatsen, waarbij gestreefd wordt naar een veilige maximale valorisatie van de afvalstromen als grondstoffen en energie waarbij strenge sociale en ecologische aspecten gerespecteerd worden, kreeg de naam *Enhanced Landfill Mining* (ELFM) mee.

In Europa zijn er naar schatting maximaal 500 000 stortplaatsen terug te vinden. Op een groot aantal van deze terreinen werd het afval niet of nauwelijks afgeschermd van het omringend milieu en bijgevolg een gevaar voor verontreiniging vormen. Een sanering lijkt hierbij opportuun. Echter bevatten deze stortplaatsen mogelijks materialen die een meer duurzame bestemming moeten krijgen in plaats van deze opnieuw te storten onder veilige condities. Echter blijkt de algemene kennis over de terreinen te beperkt wat een onderwerp voor onderzoek vormt.

Een stortplaats worden vandaag onderzocht gebruikmakend van de gangbare bodemonderzoekstechnieken waarbij de oorsprong van het materiaal wordt afgeleid uit historisch onderzoek.

Echter blijken de conventionele technieken vaak ontoereikend op het vlak van veiligheid en statistische betrouwbaarheid waardoor gezocht wordt naar alternatieve methodes die het onderzoek kunnen verbeteren in termen van tijdsefficiëntie en kosteneffectiviteit. Binnen het archeologisch onderzoek werd dezelfde evolutie waargenomen, waarbij nu meer gebruik gemaakt wordt van gemotoriseerde en gecombineerde inzet van meervoudige geofysische systemen. Deze technieken laten toe op een landschappelijke schaal efficiënt hoge-resolutie surveys uit te voeren. Het gebruik van bodemsensoren heeft algemeen een groot potentieel in verschillende onderzoekstaken, zo wordt het gebruik ervan in de precisielandbouw onderzocht om efficiënter en preciezer nutriënten toe te voegen aan de bodem.

De vraag dringt zich op of niet-invasieve bodemsensoren kunnen worden aangewend in de voorbereidende fase van een ELFM-project om de lokalisering van de bodemverontreiniging te verbeteren en tevens een bijdrage te leveren in het karakteriseren van stortmaterialen. In die lijn wordt binnen voorliggend onderzoek het potentieel van geofysische bodemsensoren voor de karakterisering van stortplaatsen in het kader van ELFM onderzocht.

2 Literatuurstudie

2.1 Storten van afvalstoffen

2.1.1 Definitie en opdeling

Volgens de Europese Richtlijn inzake het storten van afvalstoffen (1999/31/EG), “de Stortplaatsrichtlijn”, is een stortplaats een “afvalverwijderingsterrein voor het storten van afvalstoffen op of in de bodem, met inbegrip van:

- interne afvalstortplaatsen (d.w.z. stortplaatsen waar een afvalproducent zijn eigen afval op de plaats van de productie verwijdert), en
- een terrein dat permanent (d.w.z. meer dan een jaar lang) wordt gebruikt voor de tijdelijke opslag van afval,

maar met uitsluiting van:

- voorzieningen waar afvalstoffen worden uitgeladen ter voorbereiding van verder transport voor terugwinning, behandeling of verwijdering elders, en
- van opslag van afval voorafgaand aan terugwinning of behandeling voor een periode van in de regel minder dan drie jaar, of
- van opslag van afvalstoffen voorafgaand aan verwijdering, voor een periode van minder dan een jaar.”

Afvalstoffen worden onderverdeeld volgens gevaarlijkheid enerzijds en volgens afbreekbaarheid anderzijds namelijk in inerte, biologische afbreekbare en vloeibare afvalstoffen (1999/31/EG, 1999). Daarnaast kan ook de oorsprong van het afval als basis voor opdeling dienen en onderscheid men industrieel afval en huishoudelijk afval. Met deze laatste opdeling wordt verder gewerkt in voorliggende studie. In de literatuur wordt gebruik gemaakt van de vaktermen (*non-*) *sanitary landfills*, dewelke stortplaatsen onderscheiden op basis van de aan- of afwezigheid van milieutechnische beschermingstechnieken die een mogelijk risico voor toekomstige milieu- en gezondheidsproblemen beperken.

2.1.2 Geschiedenis van afvalbeheer

“Vervuiling is zo oud als de mensheid. Mensen hebben altijd de neiging gehad eerst afval te scheppen, het dan ergens te dumpen en pas later stil te staan bij de consequenties. Eeuwenlang werd afval fatalistisch aanvaard als een onontkoombaar gevolg van het menselijke handelen (Feys, 2011).” Ten tijde van de eerste grote bevolkingscentra als Rome en Peking werd het afval op straat gedumpt. Het waren echter ook de Romeinen die als eerste de waarde van het afval (keukenresten en fecale resten) konden inschatten en het als mest verhandelden. Als gevolg van de industriële revolutie begonnen de bevolkingsaantallen sterk te stijgen en veranderde de maatschappelijke structuur, waardoor de natuurlijke leefomgeving onder toenemende druk kwam te staan. Bodemverontreiniging en een onmetelijke afvalberg waren de erfenis die nagelaten werd.

Uit een voorbeeld van Van Nieuwenhuysse blijkt dat tussen 1850 en 1870 vochtige, moerassige gebieden de ideale plaatsen waren om stadsafval en vast bedrijfsafval te storten. Na 1870 tot en met 1930 ging men nieuwe buitenwijken ontwikkelen in de voorsteden. Hiervoor werden laaggelegen gebieden uit gekozen en als stortplaatsen gebruikt waardoor een uitweg voor het afval gevonden werd en deze terreinen zonder veel moeite opgehoogd werden (Van Nieuwenhuysse, 2008).

Met de invoering van kunstmest en de industrialisatie van de landbouw wereldwijd was de gebruikelijke afzetmarkt van het afval verdwenen. Dit lag aan de basis van het moderne afvalprobleem, samen met de doorbraak van aardolie als energiebron. Energie werd zo goedkoop dat dit aanleiding gaf tot de huidige consumptie en wegwerpmaatschappij (Feys, 2011). Storten moet beschouwd worden als de vroegste vorm van afvalmanagement en wordt vandaag veelal nog steeds als eenvoudigste, zowel praktische als qua kostprijs, manier beschouwd om zich van afval te ontdoen (Hermozilha et al., 2010; Krook et al., 2012).

2.1.3 Aantal stortplaatsen in Europa

EURELCO heeft in samenwerking met i-Cleantech Vlaanderen een kaart opgesteld van het huidig aantal stortplaatsen in de 28 Europese landen. Figuur 1 toont dat er in Europa meer dan 500 000 stortplaatsen terug te vinden zijn, waarbij echter gebruik gemaakt wordt van een aanvaardbaar veiligheidsniveau zoals ook Jones et al. (2013) aangeeft. Dit komt naar schatting overeen met 3 000 tot 11 000 miljoen ton (Jones et al., 2013). Ook blijkt uit deze figuur dat 90% van de stortplaatsen in Europa als '*non-sanitary landfills*' bestempeld moeten worden, waardoor ze niet onder de Stortplaatsrichtlijn vallen (1999/31/EG, 1999). De stortplaatsen binnen Europa bestaan voor ongeveer 80% uit stortplaatsen met huishoudelijk afval, terwijl de overige 20% industrieel afval bevat. Deze twee types verschillen vooral op gebied van uitbating; de huisvuilstorten worden publiek uitgebaat in tegenstelling tot de storten die vooral industrieel afval bevatten die meestal een privé-uitbater hebben (EURELCO, 2015).

Vandaag gebruikt iedere Europeaan gemiddeld 16 ton materiaal per jaar. Zes ton daarvan moet als afval worden afgevoerd wat een jaarlijks totaal van 2.7 miljard ton afval geeft, waarvan 40% gerecycleerd of hergebruikt wordt en de helft op een stortplaats beland (COM(2011) 571, 2011). Desondanks de Europese Richtlijn aangeeft dat storten tot een noodzakelijk minimum dient te worden beperkt, wordt dit in bepaalde landen nog voor een aanzienlijk deel van het afval gedaan, bv. in het Verenigd Koninkrijk werd in 2001 nog steeds 85% van het huishoudelijk afval gestort (Price, 2001). Toch zijn er landen binnen Europa die reeds 80% van hun afval kunnen recyclen, wat erop wijst dat afval een bijzonder belangrijke hulpbron betekent voor de Europese Unie (COM(2011) 571, 2011).

In België zijn er naar schatting iets meer dan 4000 stortplaatsen, waarvan de helft zich in Vlaanderen bevindt. In totaal worden er vandaag nog 45 stortplaatsen actief uitgebaat; gemiddeld wordt er jaarlijks nog 455 kg afval per Belg gestort (Wille et al., 2013). In België zijn 84% van de stortplaatsen te bestempelen als '*non-sanitary*' of '*niet-geïsoleerd*' en in 60% van de gevallen werd huishoudelijk afval gestort (EURELCO, 2015).

biedt geen oplossing voor het ruimtelijk probleem (Hogland et al., 2010). Om tot aanvaardbare resultaten te komen met de Europese wetgeving werd in 2008 een uitbreidende kaderrichtlijn afval uitgegeven, waarin de afvalhiërarchie gedefinieerd wordt (Bosmans et al., 2013). De afvalhiërarchie of zogenaamde 'Ladder van Lansink' dient als een maatstaf voor afvalbeheer (2008/98/EG, 2008; Feys, 2011). De verschillende afvalbeheersmaatregelen worden hierin geklasseerd volgens milieuvriendelijkheid.

2.1.5 Implementatie van een circulaire economie

Het streven naar een reductie van storten van afvalstoffen gaat gepaard met het streven naar een nieuw economisch model, de circulaire economie (Wille et al., 2013). Net zoals bij een ecosysteem waarbij het merendeel van de nutriënten gerecycled wordt, moet ook in het industrieel systeem gestreefd worden naar een optimale recyclage van de afvalstromen alsook een efficiënt brongebruik en een integratie van de milieufactoren, zoals het circulaire economisch model gedefinieerd wordt. Kenmerkend voor de circulaire economie zijn laag brongebruik, lage afvalproductie en hoge efficiëntie. Stortplaatsen vormen een dynamische deel van de materialenkringloop en mogen niet langer beschouwd worden als een finale of statische situatie (Wille et al., 2013). Figuur 2 geeft een schematische voorstelling van het model.



Figuur 2: De circulaire economie in diagram. (<https://www.milieuservicenederland.nl/nieuws/met-milieu-service-nederland-op-weg-naar-een-circulaire-economie/>)

Er zijn verschillende manieren om de materialenkringloop te sluiten, waarvan *Landfill Mining*, er een is. Stortplaatsen hebben meer waarden dan het herbergen van afval. Er kan een economische waarde uit gewonnen worden door het geproduceerde gas op te vangen en als biogas te valoriseren. Bovendien kunnen ook de aanwezige metalen als secundaire producten eruit gewonnen worden en terug in de materialenkringloop gebracht worden (Hermozilha et al., 2010; Souprios et al., 2007). Evengoed is het terugwinnen van landoppervlakte een bijkomend voordeel. Ook het onmiddellijk hergebruik van schroot en residu's alsook *urban mining* van *end-of-life* producten sluiten de materialen kringloop waardoor ongerepte zuivere bronnen behouden blijven (Jones et al., 2013; Wille et al., 2013). Toch is het op dit moment vaak voordeliger afvalmaterialen te verwijderen via verbranding niettegenstaande op die manier de mogelijkheden tot het hergebruik ervan verdwijnen (Jones et al., 2013).

Ook het nijpend tekort aan grondstoffen stimuleert het invoeren van de circulaire economie. Indien het huidige gebruik van hulpbronnen blijft doorgaan, wordt aangenomen dat tegen 2050 niet meer zal kunnen voorzien worden in alle menselijke noden. Toch moedigt het huidige economische systeem niet aan om efficiënt om te springen met hulpbronnen (COM(2011) 571, 2011). Waardevolle materialen verdwijnen uit onze economie, door het onverantwoord gebruik, terwijl Europa een grotere autonomie op het vlak van grondstoffen zou kunnen verwerven door het intensief hergebruik ervan (Jones et al., 2013; Xevgenos et al., 2015).

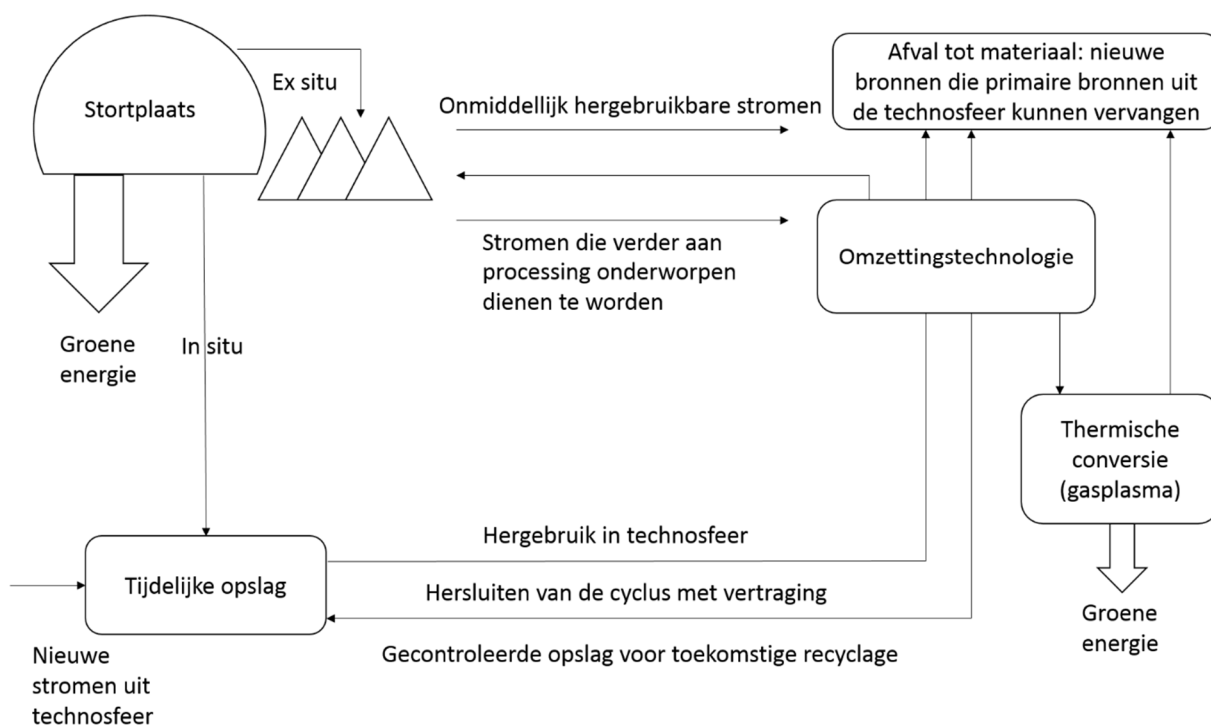
2.2 Enhanced Landfill Mining

2.2.1 Definitie van het concept

In 2012 werd Landfill mining gedefinieerd door Krook et al. (2012) als een proces om materialen of andere vaste natuurlijke bronnen afkomstig uit afvalmaterialen die vooraf werden afgezet door ze te begraven in de bodem, te extraheren. Niettegenstaande deze definitie pas in 2012 werd gegeven dateert het eerste experiment al van 1953. Voorgaande projecten, zonder economisch succes, beperkten zich daarentegen enkel tot het extraheren van methaan, gedeeltelijk herwinnen van waardevolle metalen en/of landherwinning. Landfill mining werd al die tijd gezien als een manier om de traditionele managementproblemen gerelateerd aan stortplaatsen op te lossen. (Jones et al., 2013; Krook et al., 2012)

Een uitbreiding van de definitie van Krook et al. (2012) op vlak van duurzaamheid van de extractie waarbij een maximalisatie van de materiaalrecyclage nagestreefd wordt, resulteert in de definiëring van het ELFM-concept, als “veilige conditionering, ontgraving en integrale valorisatie van afvalstromen uit stortplaatsen, als materialen en of als energie door gebruik te maken van innovatieve transformatietechnieken terwijl de strengste sociale en ecologische criteria gerespecteerd worden” (Jones et al., 2010; Wille et al., 2013). Bij de winning van materialen en energie uit de afvalstromen afkomstig uit stortplaatsen worden de stortplaatsen omgezet van een kost voor de omgeving in een kans tot het terugwinnen van grondstoffen. Het ELFM-concept is toepasbaar op stortplaatsen uit het verleden, het heden en de toekomst (Hogland et al., 2010). Op het eerste full-scale ELFM-project is het nog wachten terwijl erop gehamerd wordt dat hiervoor nog steeds strategische politieke beslissingen dienen genomen te worden die ondersteund worden door de OVAM (Jones et al., 2013).

Het saneringsproces, geïllustreerd in Figuur 3, bestaat uit verschillende stappen. De materiaalvalorisatie uit een stortplaats kan op verschillende manieren gebeuren. De materialen worden na het ontgraven gescheiden, waarna ze ofwel onmiddellijk inzetbaar zijn of verdere verwerking nodig hebben. Uit stortplaatsen worden echter niet alleen materialen gerecupereerd, ook groene energie kan eruit gewonnen worden. Het onmiddellijk hergebruik van gewonnen materialen uit stortplaatsen is niet altijd toepasbaar waardoor het opnieuw tijdelijk kan worden opgeslagen in afwachting van de ontwikkeling van de meest geschikte technieken. Het ELFM-concept vermindert of elimineert bijgevolg de sluitingskosten en vermindert de potentiële milieuproblemen (Hogland et al., 2010).



Figuur 3: Schets van het ELFM-concept waarbij de verschillende valorisatiewegen aangeduid zijn. Naar (Jones et al., 2013)

2.2.2 Potentieel van ELFM

ELFM heeft een groot potentieel binnen het breed kader van grondstofmanagement. In Europa wordt het aantal stortplaatsen geschat tussen de 150 000 en 500 000, waarvan vermoedelijk 90% als 'niet geïsoleerd' aangeduid moet worden. Bij deze stortplaatsen is hoe dan ook een risico-evaluatie vereist en lijkt het de moeite waard om na te gaan welke voor- en nadelen de toepassing van ELFM levert voor de evaluatie en de eventueel daaropvolgende sanering.

Indien de technologische vooruitgang met betrekking tot het meer rendabel maken van de scheidingstechnieken blijft doorgaan, zoals de technologieën om afval om te zetten in grondstoffen en energie, dan bestaat de mogelijkheid dat het concept uit economisch rendabel wordt.

In de onderzoeken uitgevoerd op de REMO-site in Houthalen-Helchteren wordt het potentieel van het project nagegaan. Indien de behaalde resultaten van dit project worden geëxtrapoleerd voor het Europese grondgebied bekomt men veelbelovende vooruitzichten. Ten eerste helpt het ontginnen van stortplaatsen de CO₂-uitstoot te verminderen met 15 tot 75 miljoen ton CO₂ per jaar gedurende 20 tot 30 jaar. Ten tweede wordt door toepassing van het concept een significante stroom aan materialen gerecupereerd. Ten derde draagt het ELFM-concept bij aan hernieuwbare en groene energieproductie. Ook wordt plasmagesteente gepuurd uit het afval via Gasplasma technologie zoals ook blijkt uit Figuur 3, waarbij in Europa het geschatte volume gelijk is aan 250 tot 840 miljoen ton. In het ideale geval kan plasmagesteente gebruikt worden om cement te vervangen waardoor opnieuw winst wordt geboekt op vlak van CO₂ uitstoot. Ten vierde levert het ontginnen van stortplaatsen bruikbare landoppervlakte op, wat in Vlaanderen neerkomt op 20 km² en voor Europa gelijk is aan 6000 km². Het concept zorgt

ook voor het creëren van jobs. Door de implementatie van ELFM kunnen tot 800 000 jobs verwacht worden voor een periode van 20 tot 30 jaar op het volledige Europese grondgebied (Jones et al., 2013).

Echter lijken deze voordelen nog niet onmiddellijk te leiden tot een snelle implementatie. Momenteel blijft de implementatie (economisch) onhaalbaar door de nog toereikende aanwezigheid van primaire bronnen (Jones et al., 2013). Toch lijkt het uit economisch standpunt mogelijk om in de toekomst te kiezen voor het ontginnen van de stortplaatsen aangezien dit voordeliger zal zijn dan de stortplaatsen reglementair af te sluiten van het milieu en deze blijvend te monitoren (Hogland et al., 2010).

Om in te schatten of het opzetten van een ELFM-project zinvol is, moet het ELFM-potentieel van een stortplaats bestudeerd worden. Uit eerder onderzoek bleek dat iedere stortplaats afzonderlijk moet geëvalueerd worden ter bepaling van het valorisatiepotentieel, door de grote heterogeniteit tussen de stortplaatsen onderling. Om het recyclagepotentieel te bepalen dient een kwantitatieve en kwalitatieve analyse van het opgeslagen afval uitgevoerd te worden (Prechthai et al., 2008). De types materialen opgeslagen in de stortplaatsen en het gekoppelde recyclagepotentieel zijn afhankelijk van de leeftijd van de stortplaats, het type stortplaats, meteorologische en hydrologische condities en het land of de regio waar de stortplaats gelegen is. Door de grote heterogeniteit binnen een stortplaats is de karakterisatie van de materialen een complexe opdracht (Quaghebeur et al., 2013). De economische haalbaarheid van de projecten moet gebaseerd zijn op zorgvuldig onderzoek van de lokale condities en een evaluatie van de bestaande informatie en de verzamelde data (Hogland et al., 2010).

2.3 Stortplaatskarakterisering

2.3.1 Conventioneel versus geofysisch onderzoek

Conventioneel worden stortplaatsen onderzocht op basis van lokale (punt)metingen zoals verkregen via boringen of testputten (Jansen et al., 1992). Hierbij wordt stortmateriaal verzameld, in detail beschreven en ter karakterisering geanalyseerd in het laboratorium (Quaghebeur et al., 2013). Aan de hand van puntmetingen worden er slechts op een beperkt aantal punten van de stortbodem, die vaak gekenmerkt wordt door zeer heterogene eigenschappen, onderzoek uitgevoerd waardoor de effectiviteit van deze methodes in stortplaatsen echter beperkt is en er niet in geslaagd wordt de volledige heterogeniteit te beschrijven. Elk staal heeft zijn kostprijs, waardoor een betrouwbare karakterisering, en dus het nemen van een groot aantal stalen, tot onrealistisch hoge kosten leidt. Een tekort aan data ter bepaling van de ruimtelijke variabiliteit van de bodemparameters is hiervan een logisch gevolg (Georgaki et al., 2008). Op die manier is het ook niet mogelijk de geometrie of de afvalinhoud van de stortplaats te bepalen (Wille et al., 2013). Daarbij komt ook dat de support van de stalen vaak klein is in vergelijking met het volume die ze moeten beschrijven. De invasieve aard van deze methodes houdt risico's in op het vlak van gezondheid en veiligheid (Jansen et al., 1992). Door het aanboren van de afdichtende laag wordt het mogelijk niet verontreinigde zones toch te verontreinigen.

Bodemsensoren worden ingezet op of net boven het aardoppervlak om bodeminformatie te verzamelen waarbij de bodemeigenschappen op een indirecte manier gemeten worden. Geofysische bodemsensoren omvatten de technieken die de fysische (elektrische, elektromagnetische en magnetische) kenmerken van de bodem bepalen en hierbij steunen op geofysische principes zoals

elektrische resistiviteit, magnetometrie, grondradar en elektromagnetische inductie. Deze maken het mogelijk om de variatie in bodemsamenstelling te karakteriseren en in kaart te brengen. Vroeger werden deze sensoren vooral manueel gebruikt, waar de nieuwste generaties het vandaag toelaten om mobiel en gecombineerd te werk te gaan. Dit maakt het mogelijk om grote oppervlakken in een beperkte tijdspanne en aan een hoge resolutie te karteren, wat resulteert in een belangrijke efficiëntiewinst (Vlaams Vestingbouwkundig Centrum, n.d.). In het vervolg van dit onderzoek worden enkel de laatste drie technieken beschouwd.

Om een oplossing te bieden voor de tekortkomingen van de conventionele technieken zoals het invasief en lokaal karakter van de metingen en de kostprijs, worden de stortplaatsen onderzocht met geofysische bodemsensoren. De bodemsensoren bieden de gebruiker de mogelijkheid quasi gebiedsdekkende metingen uit te voeren omwille van het feit dat ze niet invasief zijn (Wang et al., 2015), waardoor respectievelijk een betrouwbare algemene conclusie over het terrein geformuleerd kan worden en de gevaren van deze metingen beperkt blijven. Aangezien verschillende stortmateriaal vaak variaties in conductieve eigenschappen bezitten, is het mogelijk dit te onderzoeken aan de hand van geofysische technieken. Elke techniek heeft echter zijn beperkingen, waardoor het aangewezen is verschillende technieken samen te gebruiken om een volledig beeld van de bodem te krijgen (Wille et al., 2013). Toch blijven bij combinatie van technieken deze methoden competitief qua tijd en kosten in vergelijking met de conventionele methoden (Belmonte-jiménez et al., 2014; Porsani et al., 2004; Wang et al., 2015).

Bij het inschatten van het ELFM-potentieel mogen de voordelen van geofysische technieken niet ontkend worden temeer omdat de sensortechnologie steeds sneller evolueert. Ook het onderzoek naar de dataverwerking boekt veel vooruitgang waardoor het mogelijk wordt uit moeilijk te interpreteren data via filters een resultaat af te leiden. Daarbij komt ook dat de surveyconfiguraties blijven verbeteren waardoor de invloed van randobjecten minder bepalend wordt en bijgevolg de resultaten minder complex zijn en ook onder zeer moeilijke situaties toch toepasbaar blijven.

2.3.2 Geofysische bodemsensoren in eerder stortplaatsonderzoek

Sinds het midden van de jaren 90 worden stortplaatsen onderzocht aan de hand van geofysische technieken. De Carlo et al. geeft een opsomming van veelgebruikte technieken maar binnen dit onderzoek wordt gefocust op EMI en GPR (De Carlo et al., 2013).

De geofysische technieken worden aangewend om zowel de structurele of statische karakterisering als het transport van verontreinigende stoffen van een stortplaats te bepalen. Deze objectieven kunnen verder onderverdeeld worden in specifieke problemen zoals:

- Lokalisatie en interne structuur van de stortplaats (Bernstone et al., 2000),
- Integriteit van de *capping*lagen en lekdetectie (Cassiani et al., 2008),
- Monitoring van het percolaat (Soupios et al., 2007),
- Vochtgehalte distributie en leeftijd van het stortmateriaal (Cassiani et al., 2008),
- Preferentiële migratiewegen voor stortgas lokaliseren (Georgaki et al., 2008),

De geofysische technieken hebben reeds hun diensten bewezen bij het detecteren en in kaart brengen van stortplaatsen (Pomposiello et al., 2012; Van Giang et al., 2005). In de jaren 80 werden draagbare conductiviteitsmeters reeds gebruikt om contourkaarten te maken (Wang et al., 2015). Stortplaatsen

zijn veruit de meest heterogene onderzoeksterreinen, toch zijn hun fysische en chemische eigenschappen sterk verschillend van het omringende bodemmateriaal, waardoor de omtrek geografisch kan vastgelegd worden en het ook mogelijk is niet-geïnterpreteerbare stortplaatsen op te sporen (Hermozilha et al., 2010; Jansen et al., 1992). Aan de hand van elektrische methoden zoals GPR, *vertical electrical sounding* (VES) (Frangos, 1997; Orlando and Marchesi, 2001; Porsani et al., 2004) maar ook seismische technieken (Cardarelli and Bernabini, 1997; Green et al., 1999) evenals magnetische methodes (Gibson et al., 1996) kon in het verleden de ruimtelijke uitgebreidheid van de stortplaatsen vast gelegd worden.

Binnen die grenzen bevatten stortplaatsen een zekere gelaagde structuur waarvan de integriteit blijvend moet gemonitord worden. Dit kan door gebruik te maken van geofysische technieken (Abu-Zeid et al., 2004; Bernstone et al., 2000; Soupios et al., 2007; Splajt et al., 2003). Radartechnologie werd in eerder onderzoek gebruikt om de dikte van de afzettingen na te gaan (Pomposiello et al., 2012). Maar ook elektromagnetische inductie, resistiviteitsmetingen, seismische refractie, seismische reflectie en magnetometrie blijken met succes gebruikt te kunnen worden om de ondergrondse condities van afvalsites te bestuderen (Benson et al., 1982). Door gebruik te maken van VES en EMI kon de onderzijde van de stortplaats in beeld gebracht worden (Jansen et al., 1992; Porsani et al., 2004). Magnetische of elektromagnetische technieken maakten het reeds mogelijk ijzeren massa's, onder de vorm van fijne ijzeren materialen en ferro-metalen objecten als ook gewapend beton, te detecteren in de stortmassa's (Godio, 2000; Marchetti and Settini, 2011; Wang et al., 2015). Toch hangen de resultaten af van het omringende bodemmateriaal. EMI wordt door archeologen vaak gebruikt om een algemeen beeld te krijgen van de massieve ondergrond. Vervolgens wordt dan de radartechnologie gebruikt om metaal en niet-metaal objecten geografisch en in de diepte te lokaliseren als ook de vorm ervan te achterhalen, echter moet wel rekening gehouden worden met de conductieve aard van de objecten die de radargolven snel doen attenueren in de diepte (Orlando and Marchesi, 2001; Pomposiello et al., 2012; Wang et al., 2015). Godio concludeert dat de compositie van het materiaal af te leiden is uit de geofysische metingen. Echter blijft het nodig de metingen te toetsen aan laboratoriumanalyses die de aannames bevestigen (Godio, 2000). De technieken bewijzen evengoed hun nut om de afwezigheid van gestorte metalen voorwerpen, na een sanering, aan te tonen (Wang et al., 2015)

Om de effectiviteit van een overkapping na te gaan, wordt het vochtgehalte in het stortmateriaal gemonitord. Dit kan door toepassing van de GPR-technologie op verschillende tijdstippen (Cassiani et al., 2008). Dit is van cruciaal belang aangezien het de oorsprong vormt van het percolaat dat uit het stortmateriaal lekt en het grondwater verontreinigt. Het is daarom belangrijk de vochtinhoud op een snelle en eenvoudige manier te kunnen bepalen (Yochim et al., 2013). Ook de resistiviteit van het materiaal geeft een indicatie van het vochtgehalte in een stortplaats (Gawande et al., 2003; Hermozilha et al., 2010). Omwille van de algemeen hogere geleidbaarheid van percolaat komen voor het bestuderen van de aanwezigheid, vorming en migratie van percolaat vooral geo-elektrische technieken in aanmerking (De Carlo et al., 2013). Voor het percolaat worden conductiviteiten gemeten die waarneembaar zijn gebruikmakend van EMI-metingen, maar ook aan de hand van GPR en VES kan een inschatting van de contaminatiepluim gemaakt worden (Mack, 1993; Porsani et al., 2004). Om een meer gedetailleerde beschrijving te kunnen maken, worden door Senos Matias et al (1994). resistiviteitsmetingen gebruikt (Senos Matias et al., 1994).

Door het combineren van meerdere technieken, die elk beïnvloed worden door verschillende parameters, kan een volledig driedimensionaal beeld van de stortplaats geschetst worden (Dodds and Ivic, 1990; Nyquist and Doll, 1993; Seren and Blaumoser, 1994). Aangezien de resultaten van de metingen beïnvloed worden door meer dan één bodemeigenschap, is het aangewezen om verschillende sensoren te combineren om verschillende bodemeigenschappen te karakteriseren (Van De Vijver et al., 2015). Elke techniek heeft zijn beperkingen en zijn ideale omstandigheden om ingezet te worden (Wang et al., 2015). Zo zal de aanwezigheid van zware metalen die hoog conductief zijn van aard, de GPR-signalen sterk atteneren, bijgevolg kunnen de resultaten sterk verstoord zijn voor aanvang van de sanering. Echter bewijst GPR wel zijn nut om de effectiviteit van de sanering na te gaan. In eerder onderzoek werd de aanwezigheid van ondergrondse opslagtanks en slib aangetoond door gebruik te maken van elektrische resistiviteit tomografie (ERT) en kon in hetzelfde onderzoek de vorm van de opslagtanks nagegaan worden gebruikmakend van elektromagnetische technieken, waarmee de kracht van het combineren onderstreept wordt. Algemeen kan gesteld worden dat hoe duidelijker de informatie van een onderzoek is, hoe succesvoller de risico-evaluatie van een verontreiniging en de daaropvolgende sanering zal zijn (Wang et al., 2015).

Binnen dit onderzoek wordt enkel het gebruik van EMI en GPR voor de karakterisatie van het stortmateriaal verder in detail besproken. Bij GPR metingen worden hoogfrequente elektromagnetische golven uitgezonden. Deze golven worden gebruikt om veranderingen in elektromagnetische eigenschappen van de bodem in kaart te brengen. Ze reageren in hoofdzaak op de contrasten in relatieve diëlektrische permittiviteit (RDP) en elektrische conductiviteit, waardoor het gebruik van deze techniek voor de karakterisatie van het stortmateriaal verklaard wordt. Elektromagnetisch inductie daarentegen meet de elektrische conductiviteit (EC) en de magnetische susceptibiliteit (MS).

2.4 Toepassing surveytechnieken voor materiaalkarakterisatie

In eerder onderzoek werden reeds relaties gerapporteerd tussen elektromagnetische eigenschappen en fysische en chemische eigenschappen van de bodem dewelke het voorliggend onderzoek ondersteunen. Zo is de EC sterk gelinkt met verschillende fysische bodemeigenschappen zoals de bodemtextuur (korrelgroottedistributie), het vochtgehalte en het zoutgehalte van de bodem, i.e. de concentratie aan opgeloste zouten. Algemeen stijgt de EC naarmate het zoutgehalte en het gehalte aan fijne bodempartikels toeneemt. Een toenemend vochtgehalte zorgt eveneens voor een hogere EC waarde. Echter is deze invloed minder dominant. Ook de bodemdichtheid of -compactie en het gehalte aan organisch materiaal in de bodem hebben een beperktere invloed op het signaal. De gemeten EC waarden zijn representatief voor de integrale invloed van deze bodemeigenschappen (Guéguen and Palciauskas, 1994). Het MS signaal van de EMI sensor geeft een aanduiding van de aanwezigheid van ferromagnetische materialen en ijzeroxiden. De ijzeroxiden absorberen of incorporeren, tijdens verbrandingsprocessen, zware metalen zoals koper (Cu), ijzer (Fe), lood (Pb) en zink (Zn) (Hoffmann et al., 1999; Morton-Bermea et al., 2009). Microbiële activiteit en thermische transformaties van zwak magnetische bodempartikels initiëren de vorming van ferromagnetische mineralen in de bodem. Bijgevolg zal de magnetische gevoeligheid van de bodem verhogen. Variaties in MS geven een indicatie van de maat van verstoring van de bodem en de aanwezigheid van zware metalen (Cao et al., 2015; Morton-Bermea et al., 2009). Bij het meten van verhit bodemmateriaal zoals baksteen worden sterke signalen verkregen. EMI-signalen (zowel EC als MS) zijn uiterst gevoelig voor de aanwezigheid van

metalen objecten of structuren (zowel ferro-als non-ferrometalen), vooral wanneer ze voorkomen net onder het oppervlak.

Er wordt verwacht dat de geofysische eigenschappen van het stortmateriaal en hun ruimtelijke variabiliteit, verschillen van deze van een onverstoorde natuurlijk bodem (De Carlo et al., 2013). Algemeen kunnen afhankelijk van de aard van het stortmateriaal verschillende contrasten worden verwacht. Inert niet-metaalhoudend bouwafval zoals steenpuin, baksteen en beton (zonder wapening) wordt gekenmerkt door een zeer lage EC. De aanwezigheid van gips in het bouwafval beïnvloedt ook de EC, afhankelijk van het vochtgehalte en de aanwezige zouten (Sudduth et al., 2005). Bij een dominante aanwezigheid van baksteen in inert bouwafval wordt een verhoogde MS gemeten. De aanwezigheid van ijzer in stortmateriaal is niet abnormaal. Ze zullen aanleiding geven tot samenvallende lokale anomalieën in EC en MS.

In de literatuur zijn weinig data te vinden over de fysicochemische eigenschappen van stortmateriaal aangezien deze niet standaard op deze eigenschappen onderzocht worden. De waarden uit Tabel 1 worden aangenomen als referentiewaarden. Ook speelt het mengen van de materialen een rol, waarbij de gemeten waarden enkel representatief zijn voor de bemeten samenstelling. De toepasbaarheid van de standaard bodemonderzoekstechnieken op stortmaterialen werd nog niet onderzocht. De chemische eigenschappen kunnen rechtstreeks gemeten worden. Voor technische afzettingen werd vastgesteld dat ze veel poriën bevatten wat de hydraulische conductiviteit bevordert en de bulkdensiteit doet dalen (Meuser, 2010).

Tabel 1: Referentiewaarden voor pH (-), EC (mS m^{-1}), kationuitwisselingscapaciteit (CEC) ($\text{meq NH}_4^+ (100 \text{ g})^{-1}$) en bulkdensiteit ρ (g cm^{-3}) ter karakterisatie van verschillende stortmaterialen (Meuser, 2010).

Type materiaal	pH	EC	Gemiddelde EC	CEC	Gemiddelde CEC	ρ
Bouwpuin	7–8	10–230	78	2–25	9.1	1.1–1.7
Slakken	9–11	10–50	43	5–142	36.9	0.5–1.3
Assen	7–11	10–70	32	14–111	47.4	0.7–0.8
Huishoudelijk afval	-	-	-	3–67	20.6	0.5–1.2
Mijnbouw afval	4	20–90	76	7–32	16.4	1.2–1.4
Slib	-	30–50	40	30–76	47.6	-

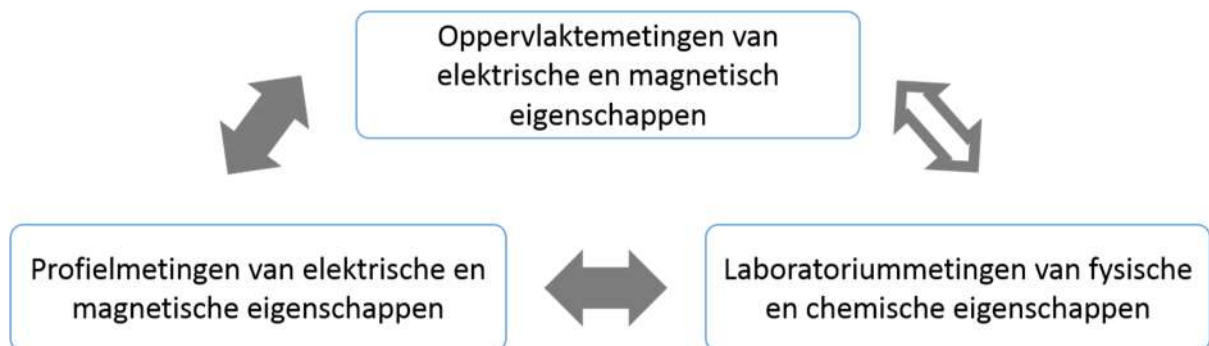
2.5 Onderzoeksvraag

De algemene onderzoeksvraag in voorliggend werk is het evalueren van het gebruik van geofysische bodemsensoren voor het karakteriseren van stortplaatsen in het kader van ELFM; waarbij gefocust wordt op elektromagnetische inductie (EMI) en grondradar (GPR). Hierbij komen verschillende deelaspecten van stortplaatskarakterisering aan bod. In een eerste casestudie wordt ingegaan op het lokaliseren en dimensioneren van een stortmassa. Hiertoe werd een geofysische survey (in de zin van een gebiedsdekkende opmeting van een oppervlak) uitgevoerd van een voormalige stortplaats voor industrieel bouwafval. Een tweede casestudie zoomt in op het aspect van materiaalkarakterisatie,

waarbij aan de hand van een kleinschalig pilootproject een verkennend antwoord wordt gezocht op de volgende onderzoeksvragen:

- Hoe verhouden oppervlaktemetingen van EC en MS verkregen via EMI en GPR zich tot meer gelokaliseerde profielmetingen van deze geofysische eigenschappen verkregen via handheld meettoestellen?
- Hoe verhouden gelokaliseerde profielmetingen van EC en MS zich tot de fysische en chemische eigenschappen van stortmaterialen zoals bepaald in laboratoriumomstandigheden?
- Hoe kunnen oppervlaktemetingen van EC en MS gebruikt worden voor het bepalen van fysische en chemische eigenschappen van stortmaterialen die relevant zijn voor het ELFM-potentieel van een stortplaats?

Deze vragen worden geschetst aan de hand van Figuur 4.



Figuur 4: Schets van de verschillende uitgevoerde metingen en de daaruit volgende onderzochte relaties.

3 Toegepaste geofysische technieken

Aangezien in de beide casestudies metingen met EMI en GPR werden uitgevoerd, wordt het principe, de gebruikte instrumentatie en de dataverwerking eerst toegelicht. Indien specifieke stappen in de toegepaste methodiek afwijken, wordt dit later aangeduid.

3.1 Elektromagnetische inductie

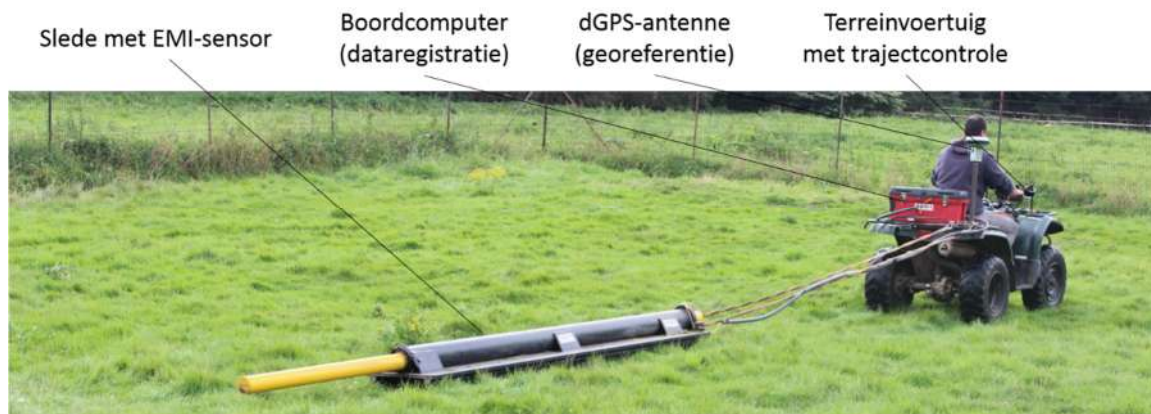
3.1.1 Principe

Deze technologie is gebaseerd op de respons van de bodem op een geïnduceerde elektromagnetisch veld erdoorheen. De sensor wekt een primair magnetisch veld op als gevolg van een stroom die door de zendspoel gestuurd wordt (McNeill, 1980). Het uitgezonden primair veld zorgt voor de ontwikkeling van wervelstromen of zogenaamde Eddy *currents* in het bodemmateriaal met een secundair magnetisch veld tot gevolg (Keller and Frischknecht, 1966). Het is het gecombineerde effect van een deel van het primaire en het secundaire veld die de algemene respons, een output-voltage, in de ontvangspoel veroorzaakt. De faseverschuiving tussen het primaire en het secundaire veld is een maat voor de conductiviteit van het bodemmateriaal. Van het secundaire magnetische veld worden twee componenten bemeaten, de in-fase of reële component en de kwadratuur of imaginaire fase. De kwadratuur component staat in verband met de elektrische conductiviteit (EC) van de bodem terwijl de in-fase component de variantie in de magnetische susceptibiliteit (MS) weergeeft. De EC is de eigenschap van een materiaal om een elektrische stroom te geleiden. De MS geeft weer in welke mate de bodem magnetisch kan gemaakt worden door het aanleggen van een magnetisch veld. Bij metingen van de EC en MS gebeurt een integratie over een bodemvolume onder het instrument, bijgevolg worden de gemeten waarden uitgedrukt in 'schijnbare' of '*apparent*' elektrische conductiviteit (EC_a) en magnetische susceptibiliteit (MS_a).

3.1.2 Instrumentatie

In dit onderzoek werd gebruik gemaakt van een meerspoelige frequentie-domein EMI-sensor, Figuur 5, DUALEM-421S, met een werkingsfrequentie van 9 kHz. De sensor bevat zes spoelconfiguraties: 1 zendspoel en 6 ontvangspoelen op 1 m, 1.1 m, 2 m, 2.1 m, 4 m en 4.1 m van de zendspoel. De 1 m, 2 m en 4 m zend-ontvangst spoelparen hebben een zogenaamde horizontaal coplanaire oriëntatie (1HCP, 2HCP en 4HCP), terwijl de 1.1 m, 2.1 m en 4.1 m paren een perpendiculaire oriëntatie bezitten (1PRP, 2PRP en 4PRP). Door de verschillende afstanden en oriëntatie tussen de spoelen, hebben de spoelconfiguraties een verschillende dieptegevoeligheid. Als richtwaarde voor de diepte van het bodemvolume waarvoor de verschillende EC_a signalen representatief zijn, wordt de exploratiediepte (DOE) arbitrair gedefinieerd als de diepte waarop 70% van de cumulatieve respons verkregen wordt van het bodem volume boven deze diepte (McNeill, 1980). De DOE voor de 1PRP, 2PRP, 1HCP, 4PRP, 2HCP en 4HCP is respectievelijk gelijk aan 0.5 m, 1.0 m, 1.6 m, 2.0 m, 3.2 m en 6.4 m. De diepte van de metingen is echter niet alleen afhankelijk van de afstand tussen de spoelen en de oriëntatie, maar ook van de bodemconductiviteit (Everett, 2013). Indien de bodem een extreem hoge EC waarde bezit, zal de arbitrair gedefinieerde meetdiepte een overschatting van de werkelijkheid zijn (McNeill, 1980). De sensor meet simultaan de EC_a voor zes verschillende bodemvolumes.

Om de metingen uit te voeren, werd de sensor in een slede geplaatst die parallel met de rijrichting voortgetrokken werd door een quad. Hierbij wordt een zo constante mogelijke snelheid aangehouden. Op de achterzijde van het voertuig wordt een differentiaal GPS gemonteerd die werd gebruikt om de sensormetingen in realtime te georefereren met een accuraatheid van 0.02 m. Een GPS-gestuurd sturingssysteem maakt het mogelijk op rechte lijnen te rijden. Gebruikmakend van een meetfrequentie van 8 Hz werden per seconde acht EC_a en MS_a metingen per spoelconfiguratie samen met één GPS-meting digitaal opgeslagen.



Figuur 5: Mobile EMI survey configuratie met de DUALEM-421S sensor in de slede gemonteerd achter een terreinvoertuig

3.1.3 Dataverwerking

Standaard vraagt het gebruik van de mobiele surveyconfiguratie specifieke verwerkingsstappen. Vooreerst worden GPS-data die afwijken van het vooropgestelde surveypatroon (parallele meetlijnen), als gevolg van een gebrek aan satelliet signaal om de positie van de GPS ten allen tijde goed te lokaliseren, manueel verwijderd. Hiertoe dient elke sensormeting georeferereerd te worden door lineaire interpolatie tussen de GPS-metingen en een correctie voor de ruimtelijke offset die bestaat tussen de GPS-antenne (gemonteerd op de achterzijde van de quad) en het midden van de zend-ontvangstspoelparen van de EMI-sensor. Indien metingen uitgevoerd worden over grote oppervlaktes bestaat de kans dat er instrumentdrift optreedt in de tijd door variabele omgevingsomstandigheden. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van een referentielijn die alle surveylijnen doorkruist (Delefortrie et al., 2014). Drift kan vastgesteld worden door de surveymetingen voor EC_a en MS_a te vergelijken met de naburige referentiemetingen, waarvoor dan gecorrigeerd kan worden. Deze berekeningen worden uitgevoerd in Matlab 8.5.0 R2015a (The MathWorks Inc., Natick, MA, Verenigde Staten van Amerika). Als laatste verwerkingsstap worden de metingen geïnterpoleerd gebruikmakend van de Surfer software versie 13 (Golden Software Inc., Golden, Colorado, Verenigde Staten van Amerika).

3.2 Grondradar

3.2.1 Principe

Bij grondradar (GPR) wordt een zendantenne gebruikt die elektromagnetische energie de bodem instuurt en een ontvangstantenne die de gereflecteerde of verspreide energie detecteert. Bij deze technologie worden hoge frequentie radiogolven uitgezonden (10 tot 2000 MHz) (Daniels, 2004).

Reflecties zijn het gevolg van een contrast in relatieve diëlektrische permittiviteit (RDP), die het gevolg kunnen zijn van een overgang naar een nieuwe bodemlaag of begraven objecten in de bodem. De sterkte van de reflectie is proportioneel met de grootte van het contrast in RDP en wordt voorgesteld door de magnitude van het GPR-signaal. Het tijdsverschil tussen het uitzenden van de elektromagnetische golf en de detectie van de terugkerende reflectie, de zogenaamde '*two-way travel time*', is proportioneel met de diepte waar het contrast zich bevindt. De snelheid van de golf is omgekeerd evenredig met de vierkantswortel van de permittiviteit van het medium waardoor de golf beweegt (Daniels, 2004). Gezien het GPR-signaal atteneert en er spreidingsverliezen optreden, zal het signaal in sterkte afnemen met de diepte. Indien de EC stijgt zal de signaal attenuatie toenemen. Hierdoor is de snelheid waarmee de magnitude van het GPR-signaal afneemt met de diepte indicatief voor de EC.

3.2.2 Instrumentatie

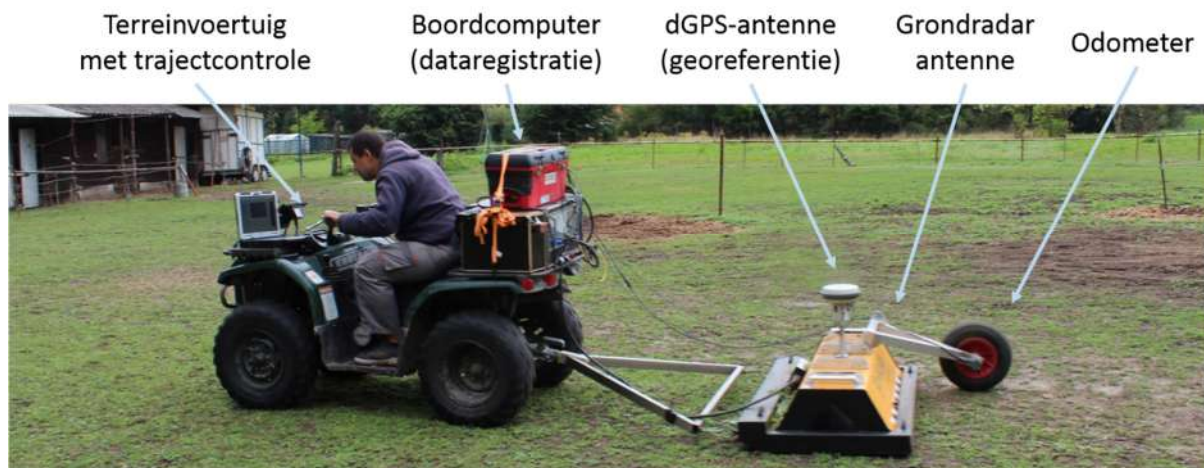
In dit onderzoek werd gebruik gemaakt van twee verschillende types grondradar: een conventionele tijdsdomein impuls GPR en een frequentiedomein *stepped frequency* GPR. Het eerste systeem stuurt een tijdsdomein puls, van één of slechts een beperkt aantal frequenties, uit en de gereflecteerde energie wordt ontvangen in functie van de tijd. Het tweede systeem slaat de gemeten data op in het frequentiedomein. Dit systeem heeft een breed bereik aan golffrequenties wat opgedeeld wordt in segmenten, waardoor alle energie per tijdseenheid geconcentreerd wordt op een klein frequentiebereik, wat een efficiënte manier is om energie in de grond te sturen. Door het groot frequentiebereik wordt een balans gevonden tussen de penetratiediepte en de resolutie, ze kunnen namelijk niet beide optimaal zijn (Persico, 2014). De fase en de amplitude wordt voor elke discrete frequentie van het gereflecteerd signaal opgeslagen.

Een GSSI UtilityScan DF GPR-systeem (GSSI, Geophysical Survey Systems, Nashua, New Hampshire) afgebeeld in Figuur 6, is een tijdsdomein impuls GPR systeem. Er worden metingen gemaakt voor twee golven met een verschillende centrale frequentie van 300 en 800 MHz, die het mogelijk maken respectievelijk diepere en oppervlakkige objecten in één scan te visualiseren. De GSSI-radar antenne is een *ground-coupled* antenne, die in een beschermende casing onderaan een driewielige cart gemonteerd wordt, waarbij het de bedoeling is dat deze tijdens de metingen continu het grondoppervlak raakt, in tegenstelling tot *air-coupled* antennes waarvoor dit niet geldt. Centraal boven deze antenne wordt een GPS antenne geïnstalleerd om de GPR data te georefereren. Er wordt ook een odometer geïnstalleerd in het voorwiel, die de afstand van de metingen binnen de rijlijn controleert.



Figuur 6: De mobiele GPR survey configuratie met de GSSI UtilityScan DF GPR-systeem.

Het GeoScope GS3F systeem (3d-Radar AS, Trondheim, Noorwegen), afgebeeld in Figuur 7, is een voorbeeld van een *air-coupled* frequentiedomein stepped frequentie GPR systeem. Deze technologie bezit een reeks lucht-gekoppelde antennes, hierdoor gemakkelijk mobiel te gebruiken echter wordt hierdoor meer signaalreflecties door het lucht-bodemoppervlak verkregen, waardoor quasi-simultaan metingen van verschillende lijnen (kanalen) bij hoge snelheid uitgevoerd kunnen worden. Het toestel heeft een scanwijdte van 97.5 cm gebruikmakend van 13 kanalen, met een uniforme verdeling van 7.5 cm tussen elke antenne. De antenne-array wordt gemonteerd in een slede die wordt voortgetrokken door een quad. Om de metingen te georefereren wordt een differentiaal GPS (Trimble Navigation Ltd, Sunnyvale, California) toestel geplaatst centraal boven het GPR-toestel. Bijgevolg is er dus geen ruimtelijke offset in de richting van de rijlijn. De metingen worden uitgevoerd met een overlap van ongeveer 0.1 m tussen de naburige scans, om een volledige bedekking van het terrein te kunnen garanderen. De metingen binnen de rijlijn worden uitgevoerd op een afstand van 0.05 m van elkaar, dit wordt gecontroleerd door gebruik te maken van een odometer, een extra gemonteerd wiel aan de slede. De gescande frequentie werd beperkt van 100 tot 1500 MHz met stappen van 2 MHz. Ieder interval werd gedurende 2 microseconde (μs) bemeaten.



Figuur 7: De mobile GPR survey configuratie met de GeoScope GS3F systeem gemonteerd in een slede die voortgetrokken worden door een terreinvoertuig.

3.2.3 Dataverwerking

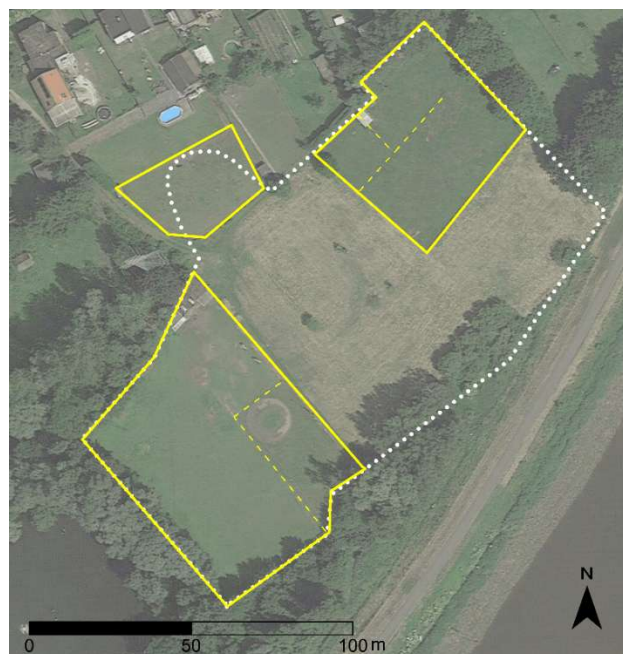
De GPR data worden verwerkt in Matlab. De metingen van de GeoScope antenne worden uitgevoerd in het frequentiedomein. Om deze te kunnen visualiseren en interpreteren dienen de data omgezet te worden naar het tijdsdomein aan de hand van een inverse Fourier transformatie. In een volgende verwerkingsstap wordt de *time-zero*, de *two-way travel time* die overeenkomt met het lucht-bodemoppervlak, gedetecteerd. Een verwijdering van het achtergrondsignaal, gebaseerd op een mediane filter, wordt uitgevoerd waarbij de mediaan van de data wordt afgetrokken. Bijgevolg worden de foutieve signalen weggefilterd zonder de doelobjecten in de horizontale lagen te verwijderen (Persico, 2014). De diepte in voorgaande verwerkingsstappen wordt uitgedrukt in *two-way travel time* aangezien in het tijdsdomein gewerkt wordt. Om de data ook te kunnen uitzetten tegenover de diepte in meter wordt gebruikgemaakt van de geschatte *time-zero* en de snelheid van de gemiddelde GPR-golf. De gemiddelde golf houdt verband met de RDP van de bodem. Er wordt voor de eenvoud een constante RDP verondersteld, berekend uit de profielmetingen van de RDP. Als compensatie voor het verlies aan signaalsterkte met de diepte wordt een automatische versterkingsregeling, automatic gain control (AGC) toegepast. Hoe meer de magnitude van het signaal afneemt, hoe groter de versterkingsfactor wordt, bijgevolg bestaat er een relatie tussen de versterkingsfactor en de EC. Er wordt een interpolatie uitgevoerd om de data te visualiseren.

4 Case 1: Geofysische survey van voormalige stortplaats voor industrieel bouwafval

In deze eerste case wordt ingegaan op het lokaliseren en dimensioneren van een stortmassa door het uitvoeren van een geofysische survey met mobile EMI en GPR technologie waardoor gebiedsdekkende opmetingen van het oppervlak werden gemaakt.

4.1 Studiegebied

Dit studiegebied met een oppervlakte van ongeveer 1.5 ha maakt deel uit van groter gebied van voormalige stortplaatsen. De stortactiviteiten werden waarschijnlijk uitgevoerd om de terreinen op te hogen om wateroverlast te voorkomen. Dit terrein was tussen eind 1970 en midden 1973 vergund als stortplaats voor industrieel afval waarbij er voornamelijk bouwafval werd aangevoerd. De stortactiviteiten gingen echter door tot het voorjaar van 1974, waarbij niet alleen bouwafval maar ook papier en karton werd aangeleverd. Daarna werd de stortplaats afgedekt. Vandaag is het terrein ingericht als weide (Figuur 8). Een klein afgebakend deel van de meest zuidelijke weide wordt gebruikt als paardenpiste en werd recentelijk opgehoogd met een zandlaag. In het noorden van het terrein zijn onderverdelingen aangebracht. Het grootste deel van het terrein wordt momenteel niet effectief als weide in gebruik genomen, maar wordt door de huurder regelmatig gemaaid. Het studiegebied wordt doorkruist door bovengrondse hoogspanningskabels, meer specifiek ter hoogte van het oostelijk deel van de zuidelijke weide.



Figuur 8: Luchtfoto van het studiegebied met afbakening van de stortplaats op basis van historisch onderzoek (witte stippenlijn) en met aanduiding van actief in gebruik zijnde weides (gele lijn)

In de geologische opbouw van de natuurlijke bodem in de omgeving worden twee lagen onderscheiden. Aan de oppervlakte, tot op een diepte van 3 m, wordt leem- of kleihoudend zand (gemiddeld 14.3% klei) van Quartaire oorsprong aangetroffen. Deze laag is doorlatend tot plaatselijk

slecht doorlatend. Onder deze laag komt tot op een diepte van 20.5 m een zeer slecht doorlatende kleilaag voor. De grondwatertafel bevond zich tijdens het eerder uitgevoerd bodemonderzoek op een gemiddelde diepte van 1.6 m.

In de periode 2010-2012 werd het studiegebied onderworpen aan een bodemonderzoek in het kader van een decretaal vrijwillig site-onderzoek van stortplaatsen waarvan de rapportering aangeeft dat een “homogeen” stortpakket aanwezig is op een diepte van 0.25 m tot 4.5 m onder het maaiveld. In het stortmateriaal werden steenpuin, baksteen, beton, ijzer, teer en brandresten aangetroffen. Daarnaast werd vastgesteld dat de stortactiviteiten aanleiding hebben gegeven tot een verontreiniging van zware metalen, PAK's en minerale olie in het vaste deel van de bodem en BTEX, minerale olie en PCB's in het grondwater.

4.2 Materiaal en methode

4.2.1 EMI

4.2.1.1 Survey

De metingen met de EMI-sensor werden uitgevoerd op 21 september 2015. Gezien de inrichting van het terrein werd de survey uitgevoerd in vier delen (Figuur 9). De gedefinieerde zoneopdeling in Figuur 9 wordt verder gebruikt in de beschrijving van de resultaten. Omwille van de beperkte manoeuvreerbaarheid voor de mobiele surveyconfiguratie was het niet mogelijk metingen uit te voeren binnen de meest noordelijke weide (Figuur 8). Het uiterste zuidoosten van het studiegebied kon eveneens niet worden opgemeten omwille van te drassige omstandigheden. Om de storende invloed van de bovengrondse metalen objecten te minimaliseren werd steeds 1 m afstand gehouden tussen de sensor en de aanwezige metalen omheiningen. Het totale gescande oppervalk bedraagt ongeveer 0.9 ha. Tijdens de metingen werd een gemiddelde snelheid van 6.4 km/u aangehouden waardoor het staalname-interval gelijk is aan 0.2 m in de rijlijn.

4.2.1.2 Dataverwerking

Er werd op de data een shiftcorrectie uitgevoerd. Omwille van de korte surveyduur voor de verschillende surveydelen (en de talrijke aanwezigheid van lokale anomalieën, zie verder) werd geen driftcorrectie uitgevoerd. De metingen werden geïnterpoleerd naar een grid van 0.1 bij 0.1 m via ‘*natural neighbor*’ interpolatie methode (Davis, 1986).

4.2.2 GPR

De metingen werden uitgevoerd op 17 augustus 2015. Gezien de terreininrichting werd slechts een deel van het volledige terrein bemeten. Zo was het niet mogelijk om op het deel dat als piste ingericht is te meten alsook daar waar in het noordelijke deel van het terrein onderverdelingen aangebracht werden. Opnieuw werd een minimale afstand van 1 m tussen de surveyconfiguratie en de omheining aangehouden.

4.2.2.1 Dataverwerking

De algemene verwerking van de data werd uitgevoerd aan de hand van 3d-Radar Examiner software (3d-Radar AS, Trondheim, Noorwegen). De data gemeten met 3D-radar werd in het frequentiedomein

opgeslagen waardoor eerst een inverse Fourier transformatie moet uitgevoerd worden. Er werd gebruik gemaakt van een Kaiser-window met een β gelijk aan 6, een minimale frequentie van 200 MHz en een maximale frequentie van 800 MHz. Voorafgaand werd ook de interferentie in de data verwijderd, waarbij werd de power limit, de verwijderingsgrenswaarde relatief tegenover de totale power, ingesteld op -20 dB. Er werd gekozen voor een maximaal percentage van 20 % wat verwijderd diende te worden en het window werd ingesteld op 50 MHz. Er werd een *time-zero* geschat om de data op gelijke basis te vergelijken. Om de horizontale lijnen in het profiel te verwijderen wordt het achtergrondsignaal verwijderd aan de hand van een filter met lengte 10.

Vervolgens werd in Matlab een AGC uitgevoerd op het reële en imaginaire deel van de golf. Hieruit werd de magnitude van de golf berekend. De visualisatie werd uitgevoerd in Surfer door het uitvoeren van een '*natural neighbor*' interpolatie naar een grid van 0.1 m bij 0.1 m.

4.3 Resultaten en discussie

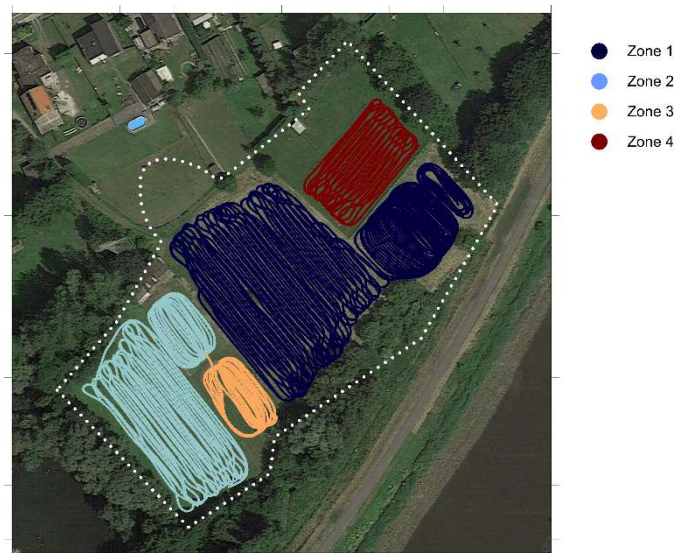
4.3.1 EMI

De metingen werden in een meettijd van 1.7 u uitgevoerd. De geïnterpoleerde EC_a waarden, weergegeven in mS/m, voor de zes verschillende spoelconfiguraties worden getoond in Figuur 10. De MS_a signalen werden gekenmerkt door een sterke drift in de tijd en voor de PRP spoelconfiguraties vertonen ze vaak instabiliteit (De Smedt et al., 2014). In deze studie leverden de metingen van de PRP spoelconfiguraties weinig additionele informatie ten opzichte van de HCP configuraties, bijgevolg werden enkel de MS_a data voor de 1 m en de 2 m HCP spoelconfiguraties opgenomen. Het groot aantal extreme waarden bemoeilijkte de correctie voor instrumentendrift en werd bijgevolg niet uitgevoerd, wat een mogelijke verklaring biedt voor eventuele negatieve achtergrondwaarden in MS_a . De resultaten worden getoond in Figuur 11.

Bij het uitvoeren van de metingen werd ook een meting uitgevoerd met een bodemvochtsensor, beschrijving volgt verder. De resultaten worden weergegeven in Tabel 2

Tabel 2: Resultaten van de meting uitgevoerd met een bodemvochtsensor op 21 september 2015

RDP	16.5
Volume water	29.9 %
Temperatuur	21.62 °C
Conductiviteit	4.4 mS m ⁻¹



Figuur 9: Aanduiding van de vier surveydeelzones op basis van de puntlocaties van de EMI metingen gemaakt op 21 september 2015.

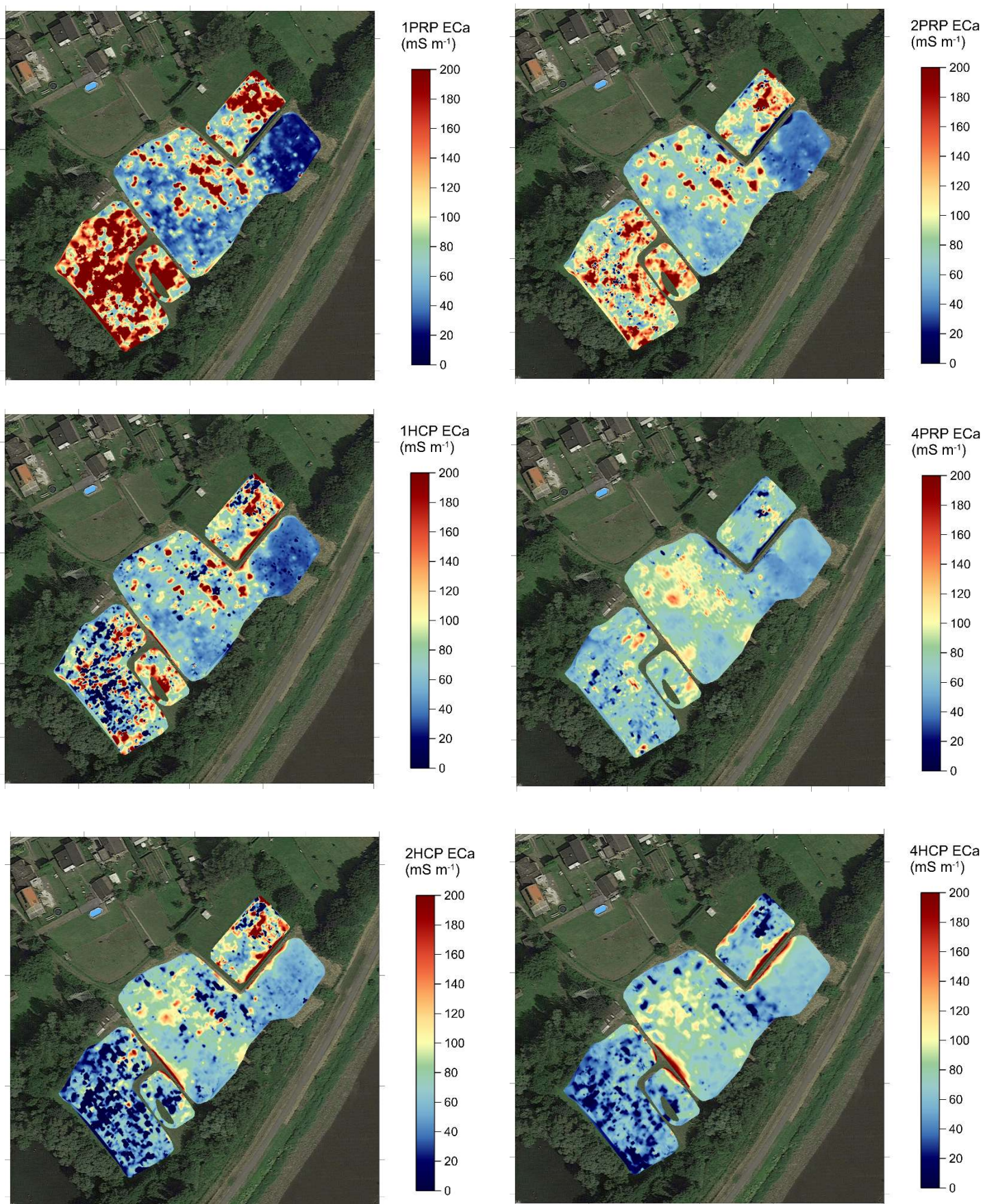
Grote zones met extreem positieve en negatieve waarden voor EC_a en MS_a komen duidelijk naar voor in de kaarten in Figuur 10 en Figuur 11. Locaties van oppervlakkige metalen objecten zullen in de verschillende EMI signalen samenvallende anomalieën vertonen. De invloed van dergelijke sterke oppervlakkige anomalieën worden geïntegreerd in elk van de diepere bodemvolumes waardoor ze meestal waargenomen worden in de outputsignalen van alle EMI signalen. De diepte en de oriëntatie van het metalen object ten opzichte van de zend- en ontvangstspoel van de EMI sensor bepalen het teken van de anomalie in de verschillende EMI signalen. In zone 2 en zone 4 kunnen amper nog individuele anomalieën onderscheiden worden wat het gevolg kan zijn van een zeer hoge dichtheid aan metalen objecten of structuren dicht bij het bodemoppervlak. In deze beide zones werden oppervlakkige stukken beton waargenomen tijdens de metingen. Bijgevolg zou het voorkomen van bouwafval met relatief grote hoeveelheden gewapend beton een verklaring kunnen bieden voor deze dichte opeenvolging van metaalanomalieën. Een alternatieve verklaring voor de metaalanomalieën waargenomen in zone 4 werd gegeven door een buurtbewoner die verklaarde dat er op die plaats olievaten begraven werden. Over een groot deel van zone 1 worden eveneens typische metaalanomalieën waargenomen, echter minder geconcentreerd dan in zone 2 en zone 4. In de zuidwestelijke hoek van zone 1 worden minder anomalieën waargenomen. Door de aanwezigheid van de metalen omheining van zone 1 en zone 2 en aangrenzende verlichtingspaal worden langs de westelijke grens van zone 1 verhoogde EC_a/MS_a signalen waargenomen. Naarmate de meetdiepte van de signalen vergroot, wordt ook het zijwaarts beïnvloed volume van deze bovengrondse metalen objecten groter. Een analoge anomalie wordt waargenomen aan de zuidelijke grens van zone 4. Uitgezonderd deze verstoring is de EC_a in dit deel van zone 4 meer homogeen dan in het noordelijk deel, toch worden enkele sterke MS_a anomalieën waargenomen. Er wordt vermoed dat in deze zone ook stortmateriaal aanwezig is maar van een andere aard dan in het noordelijke deel.

De EC_a als MS_a vertonen relatief weinig ruimtelijke variatie in het zuidoostelijk deel van zone 1 in vergelijking met de rest van het opgemeten gebied. Er worden enkele metaalanomalieën met beperkte omvang waargenomen, die vermoedelijk het gevolg zijn van de aanwezigheid van kleine stukjes oppervlakkig metaal. De achtergrondwaarden van EC_a en MS_a liggen binnen het bereik van wat

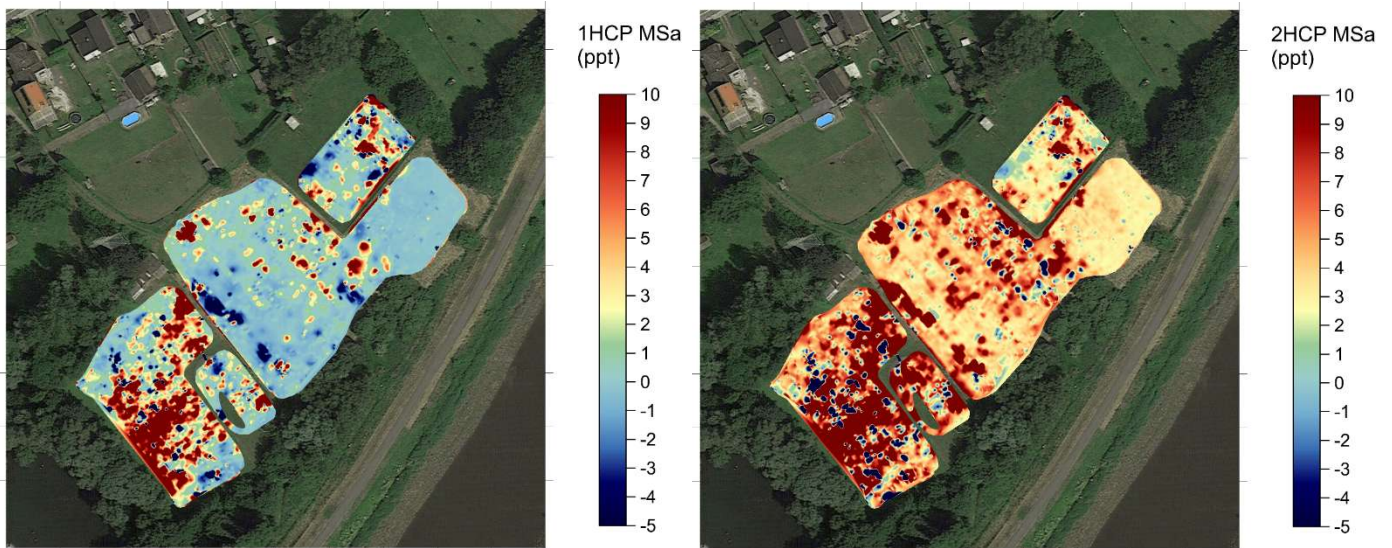
verwacht kan worden voor de lokale natuurlijke bodem, een natte kleiige zandbodem. Er wordt vermoed dat in deze zone geen of slechts beperkt stortmateriaal werd aangevoerd, wat ook ondersteund wordt door de drassige terreinomstandigheden en de lagere huidige hoogteligging van deze zone ten opzichte van de rest van het studiegebied.

In Figuur 12 wordt de algemene interpretatie van de EMI metingen weergegeven. Er vallen drie gebieden op die zich onderscheiden met verschillende (variëaties in) elektrische en magnetische eigenschappen. Gebied A in Figuur 12 wordt gekenmerkt door een hoge dichtheid aan metaalanomalieën. Er wordt aangenomen dat in deze zone sterk tot zeer sterk metaalhoudend bouwafval gestort werd, dat reeds zeer oppervlakkig aanwezig is, door de duidelijke aanwezigheid ervan in de meest oppervlakkige meetsignalen. Ook in gebied B in Figuur 12 wordt de aanwezigheid van oppervlakkig stortmateriaal echter van een andere aard verondersteld gezien de resultaten van de EMI metingen. Er wordt vermoed dat het om beperkt metaalhoudend bouwafval gaat met een groter aandeel baksteenpuin of met een bijmenging van huishoudelijk afval. Vermoed wordt dat in gebied C geen of slechts beperkte hoeveelheden afval gestort werd, de metingen zijn veel minder uitgesproken indicatief voor metaalhoudend stortmateriaal.

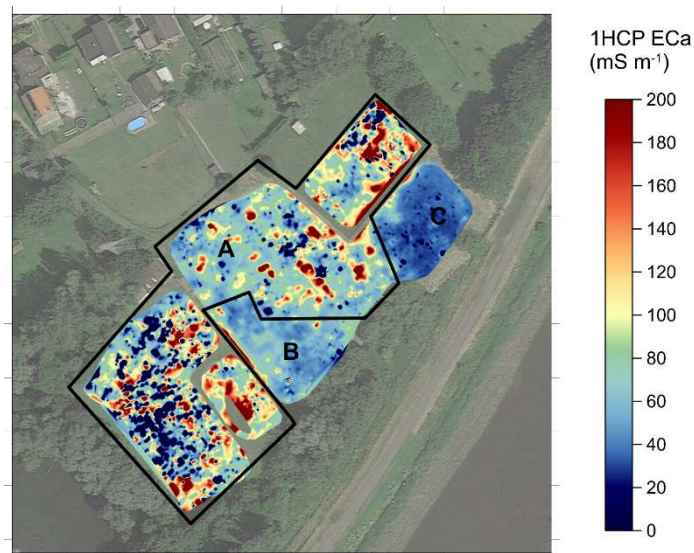
De talrijke aanwezigheid van metaalanomalieën bemoeilijkt het reconstrueren van de verticale varianties in EC en MS. Er wordt algemeen aangenomen dat bij zeer conductief materiaal de theoretische meetdiepte afneemt. De minder abrupte varianties in de EC_a metingen voor de 4 m HCP configuratie, met de grootste theoretische meetdiepte (6 m), kunnen mogelijk verklaard worden door het bereiken van de quasi homogene natuurlijke bodemlaag onder het stortpakket. Toch wordt algemeen vastgesteld dat de ruimtelijke EC_a variaties afvlakken met de theoretische meetdiepte van de signalen, aangezien de metingen geïntegreerd worden over een toenemend representatief bodemvolume.



Figuur 10: Geïnterpoleerde EC_a waarden (mS m⁻¹) voor de 1m PRP (0-0.5 m-mv), 2m PRP (0-1.0 m-mv), 1m HCP (0-1.5 m-mv), 4m PRP (0-2.0 m-mv), 2m HCP (0-3.2 m-mv) en 4m HCP (0-6.4 m-mv)



Figuur 11: Geïnterpoleerde MS_a waarden (ppt) voor de 1m HCP en 2m HCP spelconfiguratie



Figuur 12: Geïntegreerde ECa waarden ($mS\ m^{-1}$) voor de 1 m HCP spelconfiguratie met aanduiding van de drie te onderscheiden zones op basis van de EMI metingen

Om de identificaties van de zones, met vermoedelijke aanwezigheid van verschillende (bodem)materialen, te valideren werd geopteerd om bijkomend invasief onderzoek uit te voeren. Door de mogelijke aanwezigheid van stortmateriaal rijk aan metaalhoudend bouwafval, werd de geschiktheid van boringen om de gelaagdheid in het materiaal te reconstrueren in vraag gesteld. De activiteiten zouden immers belemmerd kunnen worden door stukken beton en steenpuin waardoor het vaak moeilijk is de grensdieptes tussen verschillende lagen af te leiden. Er werden vijf locaties voor het graven van proefsleuven voorgesteld: drie binnen gebied A (één in zone 1, één in zone 2 en één in het oostelijk deel van zone 4), één binnen gebied B en één binnen gebied C, zoals aangegeven in Figuur 13.



Figuur 13: Kaart van het studiegebied met aanduiding van de gegraven sleuven.

Het invasief onderzoek, zoals vooropgesteld, werd uitgevoerd op 30 november 2015 en 1 december 2015. Hierbij werden de veronderstellingen omtrent de vermoedelijke aanwezigheid van verschillende bodemmateriaal bevestigd. Zo werd geen metaalhoudend stortmateriaal teruggevonden in gebied C. In de sleuf in zone 2 werd naast oppervlakkige stukken beton gegraven en werd zowel bouwafval als huishoudelijk afval aangetroffen. In de sleuf binnen gebied 1 in zone 1 werd een gipshoudend materiaal aangetroffen dat zich als een laag in het profiel van de sleuf bevond. In zone 4 werden de metalen olievaten niet teruggevonden in de gegraven sleuf.

4.3.2 GPR

Figuur 15 toont horizontale sneden van het GPR signaal tot een diepte van 1.5 m. Er kan vastgesteld worden dat de ruis in de diepte toeneemt. Bij het bespreken van de figuur worden dezelfde zones en gebieden, als gedefinieerd voor de EMI data, gebruikt.

Tijdens de metingen werd ook een referentiewaarde voor de RDP gemeten, die gebruikt wordt tijdens de verwerking, aan de hand van een bodemvochtsensor. De resultaten worden weergegeven in Tabel 3.

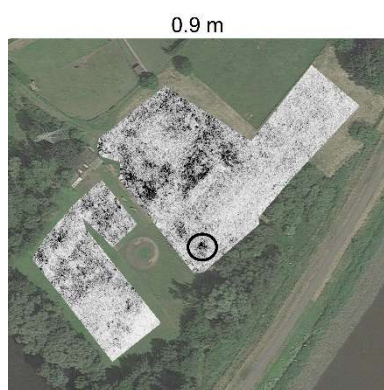
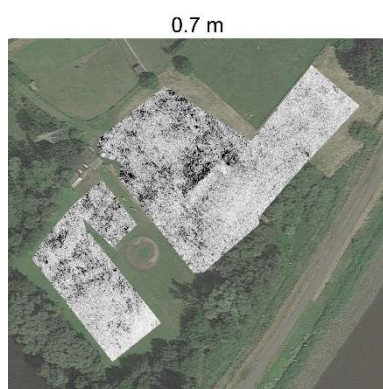
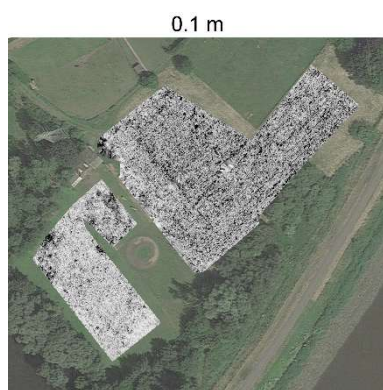
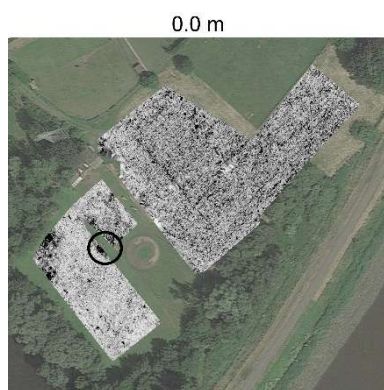
Tabel 3: Resultaten van de meting uitgevoerd met een bodemvochtsensor op 17 augustus 2015

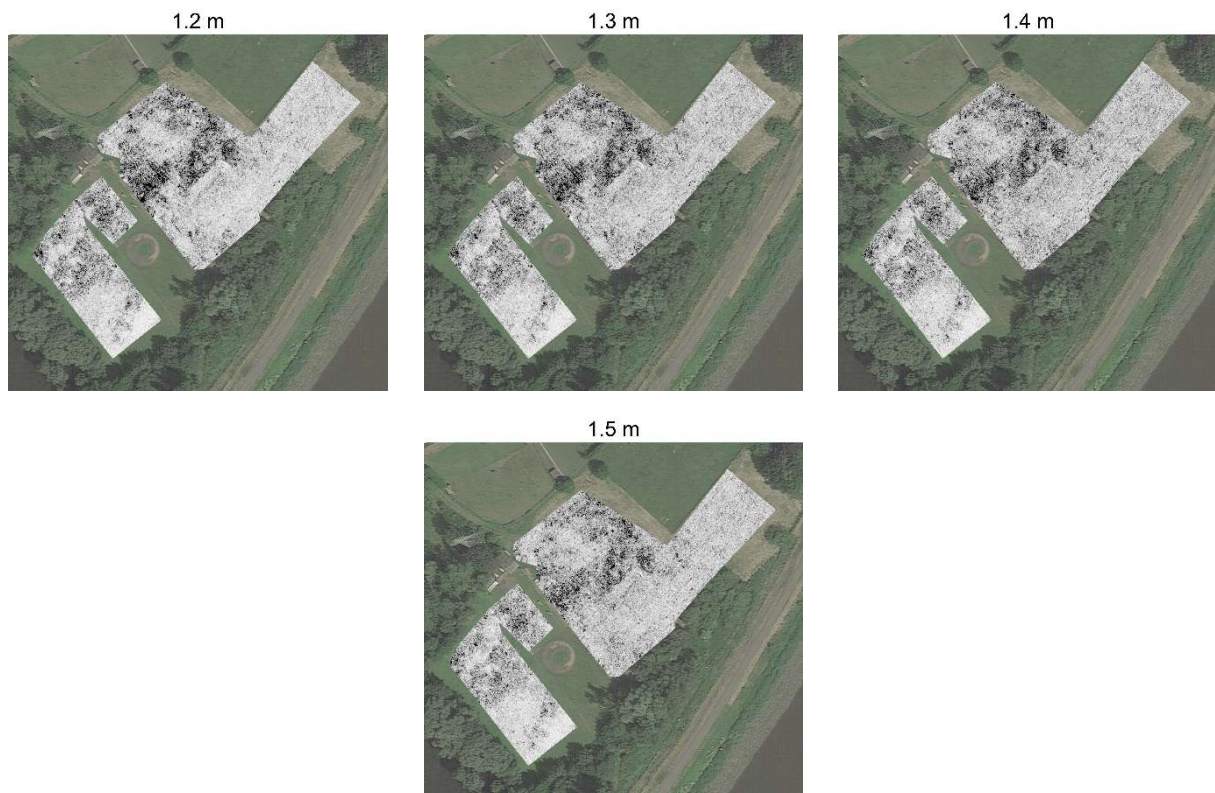
RDP	6.6
Volume water	11.7 %
Temperatuur	18.20 °C
Conductiviteit	2.7 mS m ⁻¹

In Figuur 14 wordt er vastgesteld dat doorheen de diepte zones met duidelijk contrasten in de reflectiesterkte waargenomen worden. In het ondiepe oppervlak valt vooral de zwarte vlek (aangeduid met een cirkel) op. Met kennis opgedaan tijdens het terreinbezoek zou dit kunnen verklaard worden door de aanwezigheid van oppervlakkig beton. Vanaf een diepte van 0.7 m tot 1.5 m vallen ook hogere magnitudes in het noorden van zone 1 en zone 2 op. In het zuiden en zuidoosten van zone 1 worden echter minder anomalieën waargenomen dan het geval was bij de EMI metingen. Toch tekent zich in het zuiden van zone 1 op een diepte van 0.9 m een anomalie af, aangeduid met een cirkel. Het betreft

naar alle waarschijnlijkheid een ondoordringbare laag die werd waargenomen tijdens het graven van de sleuven te zien in Figuur 16.

Er kan een gelijkaardige interpretatie gegeven worden aan de GPR data, aangeduid in Figuur 15, als vastgesteld voor EMI echter kan minder makkelijk dezelfde aftekening van de gebieden waargenomen worden. Opnieuw wordt in gebied 1 de grootste heterogeniteit waargenomen vanaf een diepte van 0.7 m tot een diepte van 1.4 m waarna het signaal in sterkte lijkt af te nemen. De beschreven heterogeniteit wordt ook waargenomen tijdens het graven van de sleuven. In gebied 2 wordt naar alle waarschijnlijkheid de ondoordringbare laag, zoals geobserveerd tijdens het graven van de sleuven, waargenomen vanaf een diepte van 0.8 m tot 1.0 m. Het verschil, zoals blijkt uit de EMI metingen, tussen gebieden 2 en 3 kan moeilijk afgeleid worden uit de GPR metingen terwijl dit wel vastgesteld werd op het terrein tijdens het invasief onderzoek.





Figuur 14: Horizontale sneden van de GPR data van 0 tot 1.5 m diepte, met een interval van 10-cm. De grijsschaal (van wit naar zwart) toont de magnitude van het GPR signaal. Deze werd geoptimaliseerd voor elk beeld afzonderlijk.



Figuur 15: Algemene interpretatie van de GPR data op basis van de horizontale snede op 1.4 m diepte.



Figuur 16: Inhoud van sleuf 1 (links) met opvallend metalen draad, plastic en bakstenen en de ondoordringbare laag op de bodem van sleuf 4 (rechts).

Zowel op basis van de mobiele EMI als de GPR metingen ter lokalisering en dimensionering van de stortplaats konden vermoedelijk zones met verschillende materiaalopbouw onderscheiden worden. De ervaring leert dat dezelfde gelokaliseerde verstoringen van zowel het EC_a als MS_a signaal de aanwezigheid van metalen bevestigen waardoor ook de dichtheid aan metaalhoudende materialen kon afgeleid worden. Zo was de waargenomen dichtheid aan anomalieën van metaalhoudende materialen in gebied 3 beduidend kleiner dan in de rest van het gemeten oppervlak. Ook kon een opsplitsing gemaakt worden tussen bijzonder sterk verstoorde en verstoorde gebieden, respectievelijk gebied 1 en gebied 2, op het terrein. Deze gebieden konden ook onderscheiden worden in de GPR metingen echter tekende ze zich minder duidelijk af.

5 Case 2: Pilootproef voor materiaalkarakterisatie

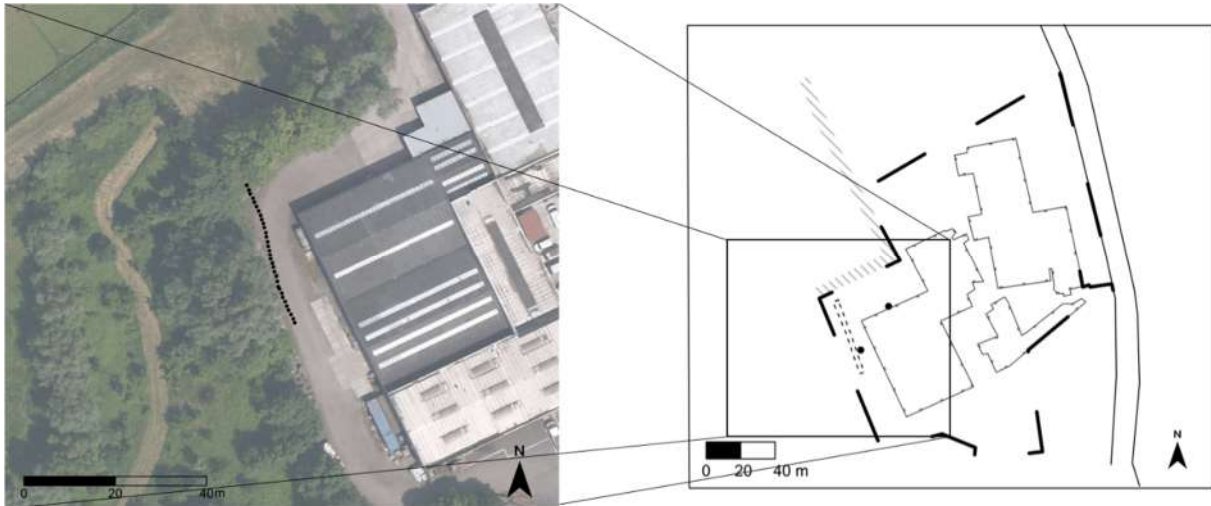
De tweede case bestudeert de bruikbaarheid van geofysische sensoren zoals EMI en GPR voor de materiaalkarakterisatie. Hierbij wordt de verhouding van de oppervlaktemetingen tot de gelokaliseerde profielmetingen onderzocht evenals de verhouding van de profielmetingen ten opzichte van de fysische en chemische eigenschappen van stortmaterialen bepaald aan de hand van laboanalyses en de relevantie van de EC en MS ter bepaling van de fysische en chemische eigenschappen van stortmaterialen in de bepaling van het ELFM-potentieel van een stortplaats. De data worden verzameld aan de hand van oppervlaktemetingen, profielmetingen en staalname gevolgd door laboanalyses van textuur, pH, kationuitwisselingscapaciteit (CEC), EC en zware metalen.

5.1 Studiegebied

Het studiegebied van deze pilootproef (Figuur 17) maakt deel uit van de site van een verffabriek met een totale oppervlakte van 2.5 ha en is gelegen in industriegebied.

In navolging van de resultaten van een oriënterend bodemonderzoek werd de site in 2013 ambtshalve door de OVAM onderworpen aan een beschrijvend bodemonderzoek. In de rapportering van deze onderzoeken werd de historie van de site kort beschreven. In het begin van de jaren 1900 zouden op het terrein afbraakmateriaal en gronden afkomstig van een verbrandingsoven gestort zijn. In die tijdsgeschiedenis was het ook gebruikelijk dat landbouwers moeilijk bewerkbare terreinen omvormden tot illegale stortplaatsen. Daarnaast werd bij het graven van een vaart in de omgeving van het terrein een bestemming gezocht voor de vrijgekomen uitgegraven grond. Beiden worden als verklaring aangehaald voor de tijdens het bodemonderzoek vastgestelde aanwezigheid van puinafval en opgespoten grond. Van 1941 tot ongeveer 1956 was er op het terrein een textielfabriek met ververij gevestigd en sinds 1958 werd er een verf- en vernisfabriek uitgebaat. Uit het bodemonderzoek werd afgeleid dat er op de site een verontreiniging met zware metalen en PAK's in het vaste deel van de aarde is ontstaan ten gevolge van de historische activiteiten en de aanwezigheid van de antropogene ophooglaag.

Omwille van de aanwezigheid van stortmateriaal werd de site door de OVAM in 2015 geselecteerd als testsite voor het evalueren van de integratie van de noodzakelijke bodemsanering met een ELFM-scenario. Hiertoe werd een studie van het ELFM-potentieel ingepland als eerste stap in het bodemsaneringsproject. Concreet werd de ELFM-studie uitgevoerd op basis van het graven van drie sleuven waarvan het uitgegraven materiaal afgevoerd werd en aan een scheiding onderworpen. Bij één van deze sleuven, waarvan de ligging is aangeduid in Figuur 17, werden tevens geofysische metingen uitgevoerd zodat de casestudie kon worden aangegrepen als verkennende pilootproef voor het gebruik van geofysische sensoren voor de materiaalkarakterisatie binnen een stortplaats.



Figuur 17: Luchtfoto en technische tekening van het studiegebied met aanduiding van de pilotsleuf (korte zwarte stippenlijn)

5.2 Materiaal en methode

5.2.1 Oppervlakte metingen

Voorafgaand aan het graven van de sleuf werden langs het vooropgestelde graaftraject enkele lijnen gescand met zowel EMI als GPR.

EMI

Om zo dens mogelijke metingen te bekomen binnen de meetlijn werd voor de mobiele EMI meting een zeer lage snelheid (ongeveer 2.6 km/u) aangehouden. Gegeven de meetfrequentie van 8 Hz, resulteerde dit in een gemiddeld meetinterval van 0.1 m tussen de metingen. Gezien er slechts enkele parallelle rijlijnen werden gereden, was het onmogelijk om de *time-lag* voor shiftcorrectie te bepalen op basis van een visuele evaluatie van het verdwijnen van het zigzagpatroon. De EMI-metingen werden afgerond door het rijden over een metalen staaf waarvan de locatie gekend was. Vervolgens werd de *time-lag* voor shiftcorrectie bepaald door het correct lokaliseren van de herkenbare anomalie van de metalen staaf in het 1HCP meetsignaal. Voor elk van de meetsignalen werd dezezelfde *time-lag* waarde gebruikt voor de shiftcorrectie. Omwille van de zeer korte meetduur was driftcorrectie niet noodzakelijk.

GPR

Met de beide voorgestelde GPR technologieën, een conventionele tijdsdomein impuls GPR en een frequentiedomein *stepped frequency* GPR, werden metingen uitgevoerd langsheen het vooropgestelde graaftraject. Echter worden enkel de tijdsdomein impuls GPR metingen in wat volgt besproken.

5.2.2 Profielmetingen

Figuur 17 geeft de exacte locatie van de gegraven sleuf weer (onder leiding van Petillon bvba). Deze sleuf had een lengte van ongeveer 32 m en een gemiddelde breedte en diepte van respectievelijk 1.2 m en 1 m. Er werd gekozen om voor de verdere studie te focussen op het profiel waargenomen voor de oostelijke zijde van de sleuf.

Profielbeschrijving

Over de volledige lengte van het profiel werd elke meter de zichtbare gelaagdheid beschreven. Tevens werd een eerste visuele karakterisatie van de materialen uitgevoerd, met bijzondere aandacht voor het herkennen van afvalmaterialen. Daarnaast werd het nodige fotomateriaal verzameld voor het creëren van een digitaal model van de sleuf via Agisoft Fotoscan.

EC_p en RDP

Om de geofysische eigenschappen EC en RDP te karakteriseren in de diepte werd gebruik gemaakt van een draadloze bodemvochtmeter die bij elke meting eveneens de EC, RDP en temperatuur van het bodemmateriaal kwantificeert (UMP-1 BT-sensor, Umwelt-Geräte-Technik, Müncheberg, Duitsland). Het werkingsprincipe van de sensor sluit aan bij frequentie-domein reflectometrie (FDR). De EC meting gebeurt onafhankelijk van de vochtmeting en wordt gebruikt voor interne correctie van de meetwaarden voor het vochtgehalte. De vochtmetingen hebben een accuraatheid van $\pm 2\%$. Het meetbereik voor RDP is 0 - 80 en voor EC 0.1 - 500 mS m⁻¹. Deze laatste worden gemeten met een accuraatheid van $\pm 1\%$. De temperatuur wordt geregistreerd met een accuraatheid van ± 0.2 °C.

Praktisch wordt een meting uitgevoerd door de sensor op het oppervlak te plaatsen en de twee staven in de bodem te drukken. In het blootgelegde profiel werd om de meter in de lengterichting één meting uitgevoerd per visueel te onderscheiden laag, op voorwaarde dat het aanwezige materiaal niet te veel weerstand bood bij het indrukken van de staven (om beschadiging van de sensor te voorkomen)

In wat volgt wordt naar profielmetingen van de EC verwezen als EC_p.

MS_p

Tevens werden in het profiel metingen van de MS uitgevoerd met een Bartington MS2 systeem gekoppeld aan een MS2D cirkel-sensor (Bartington Instruments, Oxfordshire, Verenigd Koninkrijk). Het werkingsprincipe van deze sensor is hetzelfde als bij de frequentiedomein EMI, echter heeft het toestel het voordeel nagenoeg ongevoelig te zijn voor de EC van het medium (De Smedt et al., 2014). De effectieve meetdiepte van de sensor, komt overeen met 90% van het ontvangen signaal, en is gelijk aan 0.06 m (Lecoanet et al., 1999). Volgens de beschrijvingen van het toestel wordt 50% van het signaal verkregen op 0.015 m onder de sensor. Omdat het echter gaat om een zeer klein volume, wordt ervoor gekozen om naar deze metingen niet te verwijzen als “MS_a”, maar worden ze beschouwd als discrete, gelokaliseerde (en bijgevolg niet-schijnbare-) metingen van de MS. In wat volgt wordt naar deze metingen verwezen als MS_p.

Net zoals voor de EC werden metingen uitgevoerd per visueel te onderscheiden laag, om de meter in de lengterichting, op voorwaarde dat het mogelijk was een betrouwbare meting uit te voeren. Indien het profieloppervlak te ruw was om goed contact tussen de sensor en het oppervlak te garanderen werd geen meting uitgevoerd.

5.2.3 Laboanalyses

Staalname en -voorbereiding

In de lengterichting van het profiel werd om de 5 meter en per visueel te onderscheiden laag een staal genomen met een gemiddeld inhoud van 1 l. In totaal werden 37 stalen verzameld.

Als voorbereidingsstap op de verschillende laboanalyses werden de stalen aan de lucht gedroogd. Vervolgens werden de originele stalen opgesplitst in 2 deelstalen zodat een deel als referentiemateriaal kon behouden worden. Dit werd gedaan op basis van de kwadrantmethode waarbij het materiaal wordt uitgespreid over een vlakke plaat in de vorm van een cirkel. Deze cirkel wordt vervolgens verdeeld in vier gelijke kwadranten, waarvan de overliggende telkens terug bij elkaar gevoegd worden. Ten slotte werd de fractie materiaal groter dan 2 mm afgezeefd.

Partikelgrootte-analyse

Op het resterend materiaal (kleiner dan 2 mm) werd een partikelgrootte-analyse uitgevoerd volgens de pipetmethode van Robinson-Köhn (*Compendium voor de monsterneming, meting en analyse in het kader van bodembescherming (BOC) Versie 1.2 (25 juli 2011)*, 2011). Om de partikelgrootte te bepalen in termen van de “natuurlijke” aggregaten zoals aanwezig op het terrein wordt geen volledige dispersie uitgevoerd, i.e. er wordt geen verwijdering van calciumcarbonaat (CaCO_3) en organisch materiaal uitgevoerd.

Het gehalte aan CaCO_3 is indicatief voor de aard van het materiaal en wordt daarom wel bepaald via titratie met H_2SO_4 (zoals gebruikelijk in de standaardprocedure voor textuuranalyse), maar wordt verder binnen dit onderzoek niet meer behandeld.

pH

De pH-KCl van de stalen werd bepaald met een pH-meter (Thermo Orion 3 star pH Benchtop, Model 1112000) in een 1:5 (V/V) suspensie van de bodem met een 1 mol/l kaliumchloride (KCl) oplossing. De pH werd gemeten met een afleesnauwkeurigheid van 0.01 pH-eenheid.

CEC

De CEC van bodem werd bepaald via een 2-stadium proces. Eerst wordt het colloïdaal bodemcomplex verzadigd met een kation, in dit geval ammonium (NH_4^+). Daarna worden de uitwisselbare kationen van het bodemcomplex uitgeloofd door vervanging met kation kalium (K^+). De concentratie hiervan wordt geanalyseerd in het bekomen percolaat en is representatief voor de CEC.

De CEC werd bepaald op zeven stalen elk representatief voor een verschillend type materiaal, wat verder besproken wordt.

EC_e

De EC-1/5 werd gemeten van een extract met een bodem-waterverhouding van 1/5. Voor het extract werd 20.00 g grond afgewogen. De EC-meting kan omgezet worden in het zoutgehalte van de bodem. De geleidbaarheid van het filtraat wordt gemeten aan de hand van de EC-meter (Orion-Conductiviteits meter, Model 150).

Deze EC_e verschilt van de EC_p dewelke gedefinieerd wordt als de EC van de bodem gemeten in het profiel en de EC_a gemeten met de geofysische sensoren aan het oppervlak, aangezien ze allen op een verschillende basis gemeten worden. De metingen van de EC_e of nog de geleidbaarheid van de vloeistof in dit geval het extract, zijn gebaseerd op het principe dat onder invloed van een stroom binnen een geleider, de vloeistof, de stroom zal geleiden door het verplaatsen van positieve en negatieve ionen. De geleidbaarheid van een vloeistof wordt berekend uit de verhoudingen van de stroom tegenover de spanning van twee willekeurige punten in de vloeistof. Hiervoor wordt een sensor, bestaande uit twee plaatjes op een vaste afstand van elkaar, in de vloeistof gebracht. Zoals eerder aangeduid zijn de EC_a metingen gebaseerd op het principe van EMI en de EC_p metingen op FDR.

Niettegenstaande ze op een verschillende basis gemeten worden, wordt de mogelijkheid onderzocht om ze aan elkaar te linken en de ene parameter te gebruiken om een andere te schatten, wat ook reeds beschreven werd in de literatuur (Akramkhanov et al., 2008; Rhoades et al., 1989). Er worden quasilineaire relaties gevonden tussen de verschillende parameters. Hierdoor kunnen EC_a en EC_p metingen uitgevoerd worden in plaats van EC_e metingen met als voordeel dat ze op een snellere en goedkopere manier resultaten geven.

Zware metalen – ICP-OES

Inductief gekoppeld plasma optische emissie spectrometrie (ICP-OES) wordt binnen studies rond vervuiling gebruikt om de aanwezige concentratie aan zware metalen als cadmium (Cd), koper (Cu), chroom (Cr), ijzer (Fe), mangaan (Mn), nikkel (Ni), lood (Pb) en zink (Zn) te bepalen (Cottenie et al., 1982). Vooraf werd een 0.5 M salpeterzuur (HNO_3) extract van 20.00 g grond gemaakt van de stalen. De extracten werden vervolgens geanalyseerd met een ICP-OES toestel.

Aangezien uit de literatuur blijkt dat echter Cu, Fe, Pb en Zn het meest verband houden met de MS van de bodem worden deze dan ook verder besproken en de relaties met de gemeten MS_p onderzocht.

5.2.4 Dataverwerking

Eerste werden beschrijvende statistieken zoals het minimum, het gemiddelde, de mediaan, het maximum, de standaardafwijking, de variatiecoëfficiënt en de *median absolute deviation* (MAD), van de data berekend. De data per eigenschap werden vervolgens gegroepeerd per type materiaal, wat de mogelijkheid biedt verschillen tussen de types materialen binnen één eigenschap vast te stellen.

Binnen dit onderzoek werden de relaties tussen de oppervlaktemetingen van EC en MS en de gelokaliseerde profielmetingen van de geofysische eigenschappen bestudeerd evenals de relaties tussen de geofysische eigenschappen verkregen via profielmetingen en de fysische en chemische eigenschappen van de stortmaterialen onderzocht onder laboratoriumomstandigheden. Deze werden respectievelijk onderzocht om de bruikbaarheid van de oppervlaktemetingen ter bepaling van de geofysische eigenschappen van de individuele materialen te bestuderen en om na te gaan of de mogelijkheid bestaat stortmaterialen te onderscheiden en karakteriseren op basis van deze geofysische eigenschappen. Bij de spreidingsdiagrammen, ter illustratie van de relaties, werden Pearson correlatiefactoren berekend.

5.3 Resultaten en discussie

5.3.1 Oppervlaktemetingen

EMI

Figuur 18 toont EC_a metingen voor de 1HCP, 2HCP en 4HCP surveyconfiguratie over de volledige lengte van de sleuf. De resultaten van de PRP surveyconfiguraties en de MS_a metingen werden niet besproken aangezien ze geen meerwaarde leverden binnen dit onderzoek. De negatieve waarden voor de 1HCP- EC_a vallen hierin op. De eerste negatieve anomalie, rond afstand 1, is waarschijnlijk het gevolg van de metalen omheining van het terrein. Karakteristiek worden voor metalen twee piekjes teruggevonden die zich respectievelijk bij de 1HCP, 2HCP en 4HCP op 1 m, 2 m en 4 m van elkaar bevinden. Dit patroon wordt bekomen door het uitvoeren van een voorwaarts model, gebaseerd op de vergelijkingen van Maxwell, die de elektromagnetische respons van een geleidend object berekend. Dit patroon wordt ook in de voorgestelde data teruggevonden voor de 1HCP en 2HCP echter is het minder indicatief aanwezig in de 4HCP. De tweede anomalie in het midden van de sleuf is waarschijnlijk het gevolg van één relatief groot metalen object dicht bij het oppervlak, wat echter niet kan bevestigd worden met de profielbeschrijving.

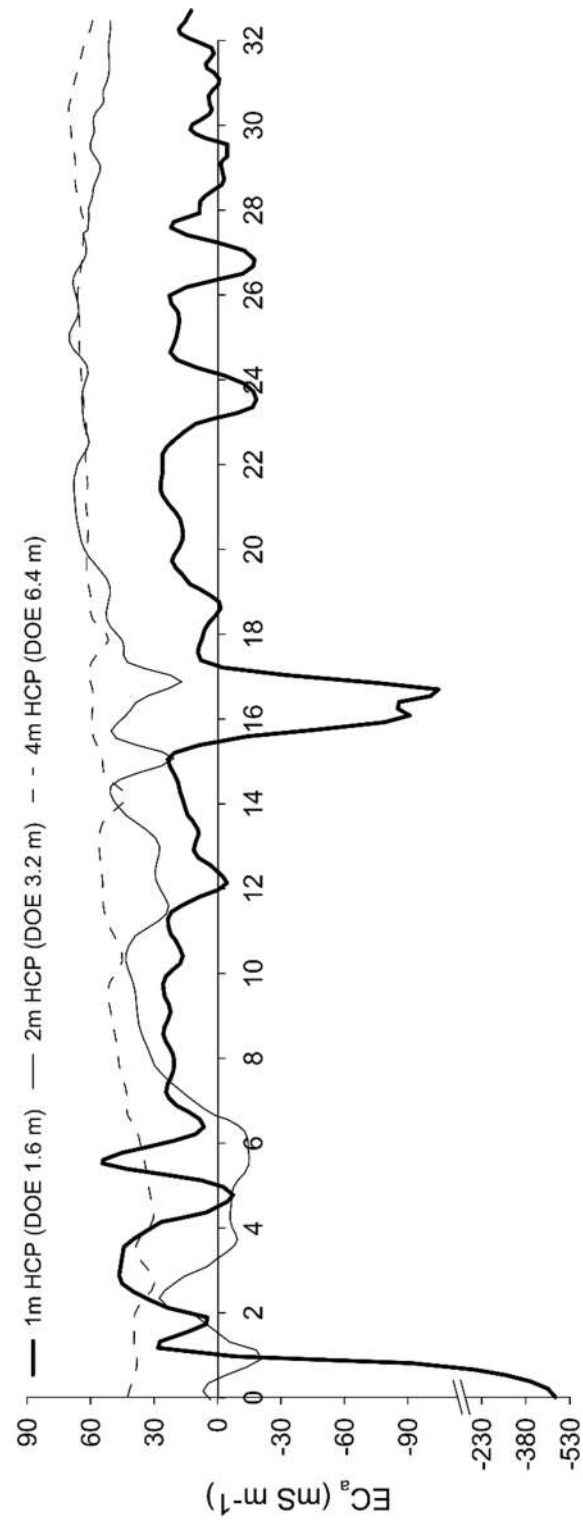
GPR

De amplitude van de GPR bij centrale frequenties van 300 en 800 MHz geplot in functie van de diepte, worden getoond in Figuur 19. De omzetting van de *two-way travel time*, in nanoseconden (ns), naar diepte, in meter, is gebaseerd op een time zero van 4.86 ns, gevonden tijdens de verwerking van de data in Matlab en een RDP van 13, de gemiddelde RDP gemeten tijdens de profielmetingen. De opvallend sterkere horizontale reflecties, waarvan de vorm doet vermoeden dat het gaat om reflecties veroorzaakt door een overgang tussen verschillende (bodem)lagen, aan de linker bovenzijde en beginnend bij 10 m onderaan en dan stijgend in de rechterraichting, worden aangeduid met rode lijnen in Figuur 19. Om de data in detail te bestuderen wordt ervoor gekozen de data op te splitsen in drie blokken met een scheiding op 10 en 20 m. Het is hierdoor mogelijk om de invloed van anomalie 1 en 2 te bestuderen uit respectievelijk blok 1 en 3. De gemeenschappelijke invloed vloeit voort uit blok 2.

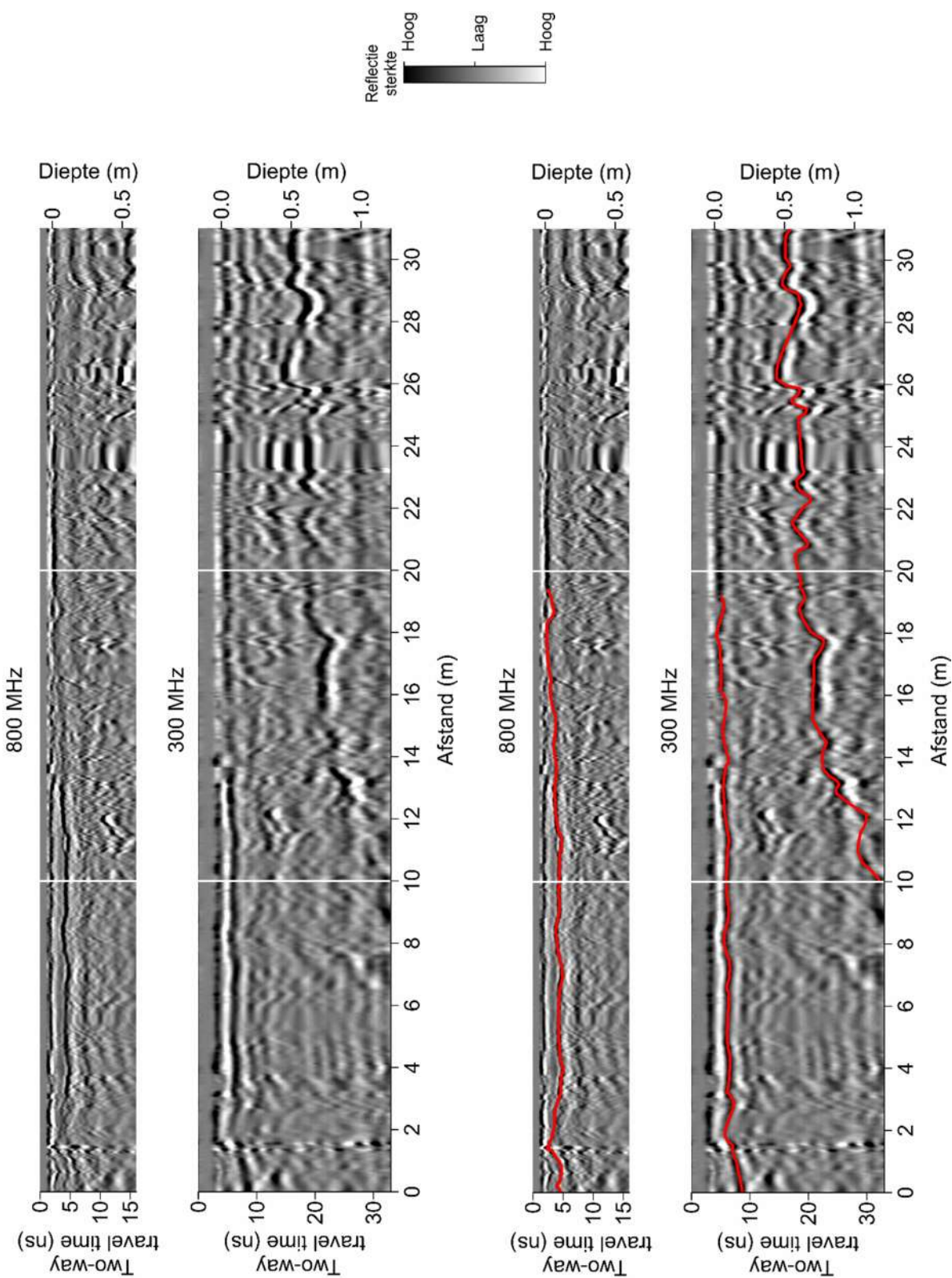
Figuur 20 geeft de amplitude van het GPR signaal in functie van de diepte, voor de verschillende gedefinieerde blokken en de beide bemeten centrale frequenties van 300 en 800 MHz. Hieruit blijkt dat de golven voor de drie blokken van elkaar verschillen qua vorm als qua uitwijking. Voor blok 1 gaat nijgt de amplitude sneller naar nul in vergelijking met blokken 2 en 3, wat aangeeft dat het signaal sneller in sterkte afneemt. De grootte van de amplitude voor blok 1 is groter dan die die voor blokken 2 en 3. Deze bevindingen kunnen gekoppeld worden aan de figuren van de relatieve versterkingsfactor voor respectievelijk 800 en 300 MHz tegenover de *two-way travel time* in ns, omdat de RDP waarschijnlijk niet constant is langs het profiel. Voor elk signaal wordt waargenomen dat aan het oppervlak een maximale versterkingsfactor aangelegd moet worden, dewelke vervolgens afneemt tot een minimum en nadien exponentieel terug toeneemt, tot een diepte van 16 ns bij een centrale frequentie van 800 MHz en ongeveer 32 ns bij een centrale frequentie van 300 MHz, waarna de ruis dominant wordt over het signaal. Uit het linkerdeel van Figuur 20 blijkt echter dat de relatieve versterkingsfactor voor blok 1 op een diepte van 16 ns opnieuw maximaal wordt, wat wijst op de sterkere attenuatie van het signaal, tegenover blokken 2 en 3. De kleinste attenuatie van het signaal

wordt waargenomen voor blok 3. Voor het signaal met een centrale frequentie van 300 MHz wordt eenzelfde maar minder uitgesproken patroon waargenomen. Opnieuw moet aan het signaal van blok 1 de grootste versterkingsfactor aangelegd worden op een diepte van 32 ns, al is het verschil minder groot met de ander versterkingsfactoren voor blokken 2 en 3. Op dezelfde diepte wordt voor blok 3 een grotere versterkingsfactor aangelegd dan voor blok 2, wat wijst op een sterkere attenuatie van het signaal op grotere diepte. Dit blijkt ook uit de curve die voor blok 3 teruggevonden wordt waarbij tot een diepte van ongeveer 20 ns de relatieve versterkingsfactor eerder beperkt blijft en vervolgens met toenemende diepte stijgt. Hieruit kan besloten worden dat het signaal sterk geattenuëerd wordt op een diepte van 20 ns.

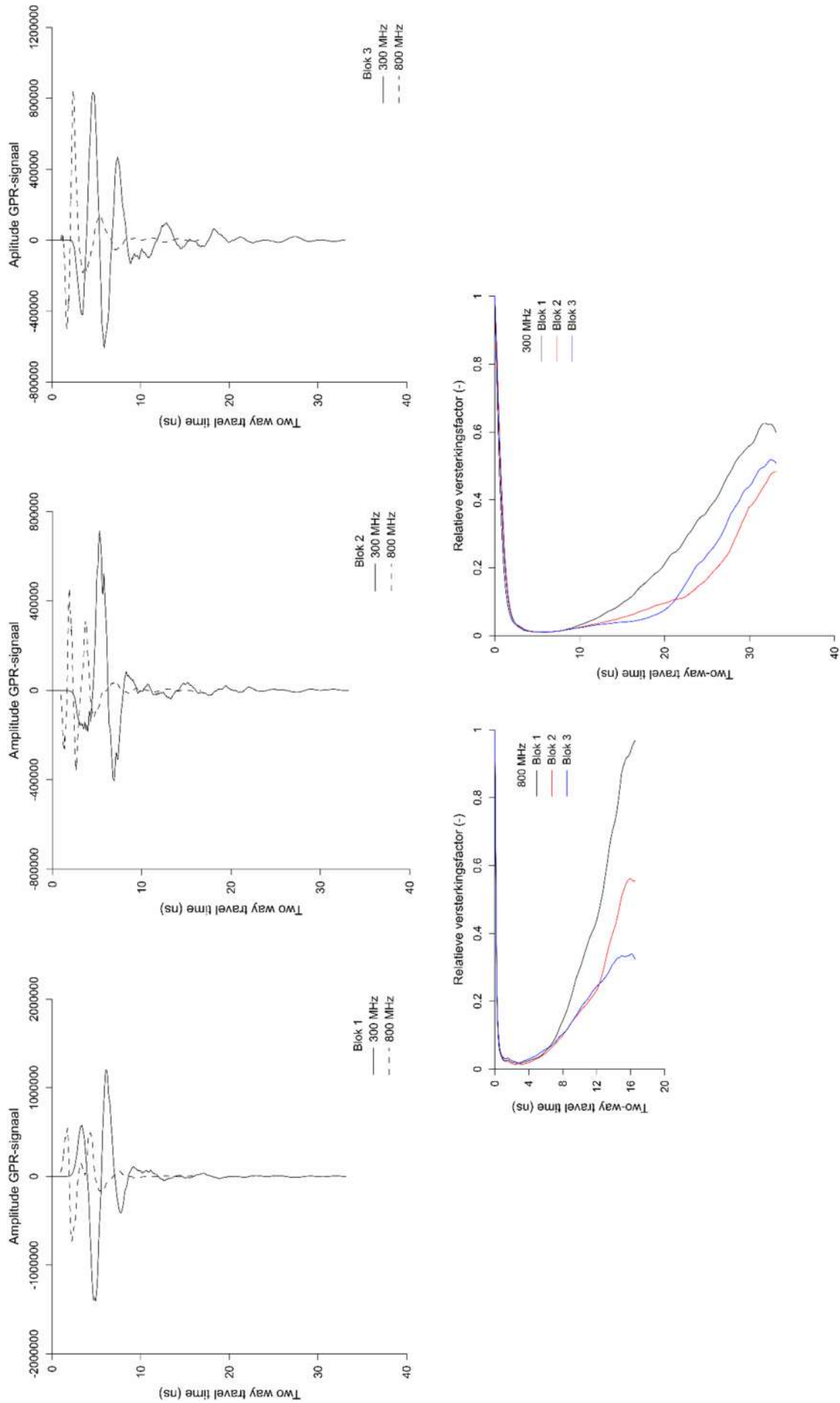
Deze bevindingen kunnen ook gekoppeld worden aan het radarprofiel gegeven in Figuur 19. De horizontale reflecties kunnen waarschijnlijk verklaard worden door een overgang van een lage naar een hoge permittiviteit aangezien het signaal sterk atteneert en vervolgens vermoedelijk enkel nog ruis wordt weergegeven.



Figuur 18: ECa (mS m⁻¹) voor 1HCP (DOE 1.6 m), 2HCP (DOE 3.2 m) en 4HCP (DOE 6.4 m) spoelconfiguraties van de DUALEM-421S EMI sensor.



Figuur 19: Radargrammen van de GSSI UtilityScan metingen met centrale frequenties van 300 en 800 MHz met aanduiding van horizontale reflecties (onderaan). De omzetting van *two-way travel time* naar diepte in meter is gebaseerd op een *time zero* van 4.86 ns en een RDP van 13.0.



Figuur 20: Gemiddelde amplitude van het GPR-sigitaal voor toepassing van AGC voor de verschillende gedefinieerde blokken (bovenaan). De relatieve versterkingsfactor, i.e. de absolute versterkingsfactor gedeeld door de maximale absolute versterkingsfactor, respectievelijk voor een centrale frequentie van 800 en 300 MHz, toegepast tijdens de AGC, uitgezet tegenover de *two-way travel time* (ns).

5.3.2 Profielmetingen

Profielbeschrijving

In de orthofoto, bovenaan Figuur 21, afgeleid uit een driedimensionaal model vallen onmiddellijk drie hoofdlagen op. Aan het oppervlak bedekt een grindlaag de stortmassa met daaronder een laag vooral bestaande uit zandig materiaal. Er is echter bijmenging van een wit korrelig materiaal dat bij toevoeging van water bovendrijft. Deze laag is opvallend aanwezig in het profiel vanaf een afstand van 10 m. Onder deze tweede laag wordt stortmateriaal teruggevonden, wat volgens het historisch onderzoek overeenkomt met de resten van verbrandingsprocessen. In deze laag worden bijgevolg verbrand plastic materiaal en verhitte glasresten teruggevonden. Verspreid door alle lagen heen worden mosselschelpen alsook glas- en porseleinscherven en plastic resten aangetroffen wat onderstreept dat het aangetroffen materiaal op die plaats een humane oorsprong kent. In het deel van het profiel van afstand 0 tot 10 m, bevinden zich tussen de grindlaag en laag met resten van verbrandingsprocessen echter verscheidene materialen die minder duidelijk van elkaar onderscheiden kunnen worden, toch vallen resten van baksteen en gips op. Ook kan net onder de grindlaag een laag opgetekend worden waarin assen aanwezig zijn. De natuurlijke kleilaag wordt op minimaal 0.6 m onder het grondoppervlak van de sleuf aangetroffen. Figuur 21 geeft de profielbeschrijving weer aan de hand van een tekening gemaakt in Surfer, op basis van een gedetailleerde beschrijving gemaakt bij de sleuf. De hoogteligging in meter wordt weergegeven ten opzichte van de tweede algemene waterpassing (TAW).

In het profiel worden algemeen zeven verschillende types materialen onderscheiden, deze worden opgelijst in Tabel 4, dit is echter een vermoedelijke karakterisatie van de waargenomen materialen.

Tabel 4: Vermoedelijke definiëring van de aangetroffen types materialen in het profiel.

Type	Materiaal
1	Afdekkende grindmateriaal
2	Witte zandig materiaal
3	Resten van verbrandingsprocessen
4	Klei uit onderliggende kleilaag
5	Assen uit aslaag van afstand 0 tot 10
6	Gipsresten
7	Baksteenresten

De eerste horizontale reflectie in het radargram is vermoedelijk toe te schrijven aan de overgang van de grindlaag naar de aslaag. De overgang van het zandig materiaal naar de resten van de verbrandingsprocessen geeft vermoedelijk aanleiding tot de tweede anomalie.

EC_p en RDP

De berekende statistieken voor deze variabelen worden samengevat in Tabel 6, de data worden teruggevonden in Tabel 10. Figuur 22 geeft de EC_p (bovenaan) en RDP waarden, gemeten in het profiel, waaruit blijkt dat het niet mogelijk was metingen uit te voeren in de bovenste grindlaag. Er wordt een zekere gelaagdheid waargenomen in de EC_p en RDP waarden, die ongeveer overeenkomt met de lagen opgetekend in de profielbeschrijving. Zo blijkt dat de zandige laag lagere EC_p en RDP waarden

weergeeft dan de stortlaag opgebouwd uit resten van verbrandingsprocessen. Voor de baksteenhoudende materialen worden ook hogere waarden voor deze variabelen teruggevonden. Voor de EC_p liggen alle geobserveerde waarden binnen het meetbereik van het toestel, wat echter niet het geval is voor de metingen van de RDP waarvoor het bereik loopt van 0 tot 80. Bijgevolg is omzichtigheid geboden bij de interpretatie van deze data.

Figuur 23 toont de metingen van de EC_p en de RDP geclassificeerd per type visueel te onderscheiden materiaal met een boxplot als achtergrond. Voor types 1, 4 en 5 konden geen metingen uitgevoerd worden in het profiel. De EC_p metingen van types 3 en 7 bezitten een grote spreiding in vergelijking met de metingen van types 2 en 6. Er kan ook vastgesteld worden dat nagenoeg alle metingen van types 3 en 7 hoger liggen dan voor types 2 en 6. Uit deze resultaten blijkt dat de materialen van types 3 en 7 een gemiddelde conductiviteit vergelijkbaar met de conductiviteit van assen bezitten. Daarentegen blijken types 2 en 6 weinig geleidend materiaal te bevatten, respectievelijk de types die gedomineerd worden door zandig materiaal en gips. De hoogste EC_p waarden zijn kleiner dan de absolute waarden van de hoogste EC_a waarden. Dit kan toegeschreven worden aan het verschil in hoeveelheid staal waarop de metingen uitgevoerd worden waardoor de EC_a metingen meer beïnvloed worden door de aanwezige metalen objecten.

Voor de RDP metingen wordt nagenoeg hetzelfde patroon waargenomen als beschreven voor de EC_p , als gevolg van de relatie die tussen deze beide variabelen bestaat (Robinson et al., 1999). Echter blijkt de spreiding op de metingen van type 7 eerder beperkt in vergelijking met de spreiding op de RDP metingen van type 3. De gevonden RDP waarden kunnen moeilijk worden gekoppeld aan referentiewaarden uit de literatuur aangezien deze parameter nagenoeg niet wordt gemeten voor afvalmaterialen. De RDP wordt onder andere beïnvloed door het vochtgehalte en de bulkdichtheid van het materiaal, waardoor verwacht kan worden dat het zandig materiaal met een lagere bulkdichtheid dan de verbrandingsresten een lagere RDP zal bezitten. De berekende RDP waarde van de zandige laag, 34.28, is hoog in vergelijking met de waarden die via de profielmetingen voor deze eigenschap bekomen werden.

MS_p

De berekende statistieken voor de MS_p metingen uitgevoerd met de Bartington MS 2 systeem worden gegeven in Tabel 6, alle data zijn verzameld in Tabel 10. Deze metingen worden afgebeeld in het profiel onderaan van Figuur 22, waaruit een gelaagdheid van de MS_p metingen opgemaakt wordt. Voor het zandige materiaal wordt nagenoeg altijd een lagere MS_p waarde gemeten in tegenstelling tot de stortlaag. Voor de baksteenhoudende materialen worden hoge MS_p waarden gemeten. Er konden geen metingen uitgevoerd worden van de grindlaag.

Figuur 24 toont de resultaten van de MS_p metingen in functie van het type materiaal. Er werden geen MS_p metingen uitgevoerd van het kleimateriaal, type 4. Voor types 1, 2, 3 en 7 met uitzondering van enkel metingen wordt een beperktere spreiding vastgesteld ten opzichte van types 5 en 6. De grote spreiding van types 5 en 6 kan mogelijk verklaard worden doordat voor deze lagen de metingen niet volledig representatief zijn omdat de lagen dunner waren dan het diepte-interval bijdragend tot de sensormetingen. Er moet ook opgemerkt worden dat voor types 2 en 3 beduidend meer metingen uitgevoerd werden in vergelijking met de overige types. Algemeen liggen de MS_p waarden voor types 1, 2, 3 en 7 lager dan voor types 5 en 6. Doorgaans worden voor de bodem MS_p waarden van 4 tot

$17.9 \cdot 10^{-5}$ msu SI gemeten, terwijl deze MS_p metingen enkele grootteordes groter zijn (De Smedt et al., 2014).

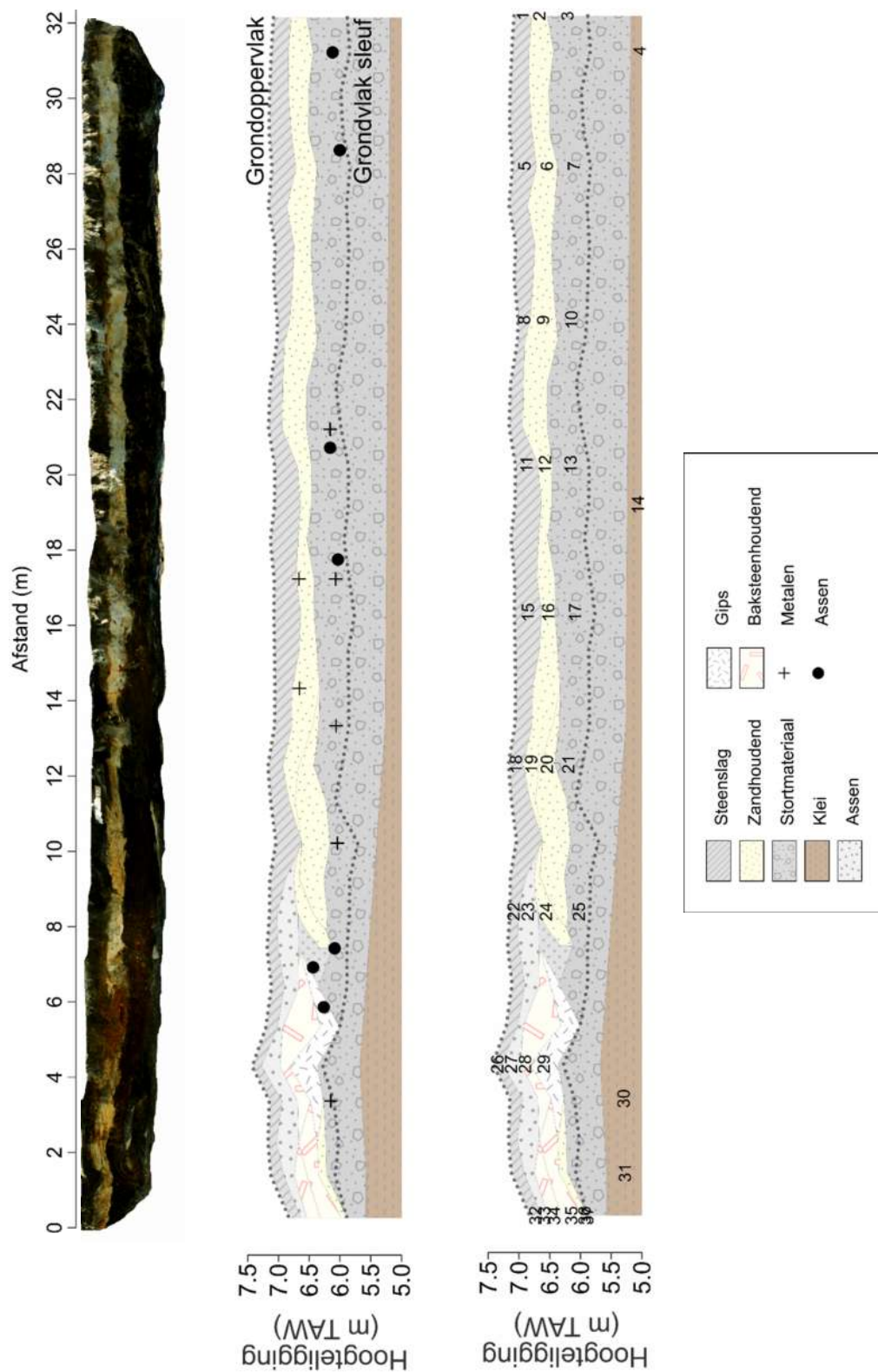
5.3.3 Laboanalyses

Alle data van de laboanalyses worden verzameld in Tabel 7, Tabel 8 en Tabel 9.

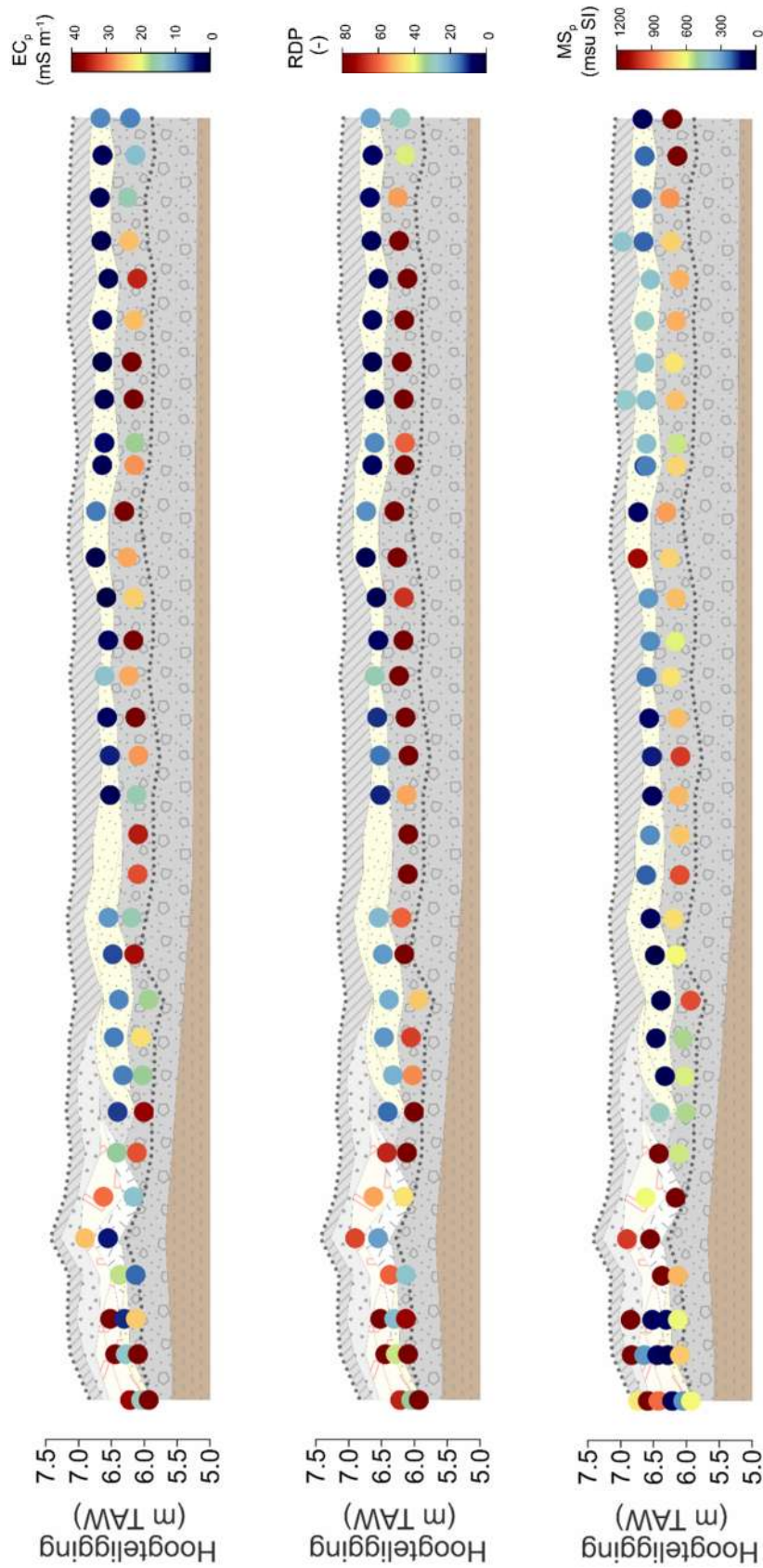
Partikelgrootte-analyse

Van de stalen werden de fracties $< 2 \mu\text{m}$, $2 - 50 \mu\text{m}$ en groter dan $50 \mu\text{m}$ bepaald. Echter wordt binnen deze paragraaf enkel ingegaan op de fijnste fractie. De berekende statistische parameters van deze variabele zijn terug te vinden in Tabel 6.

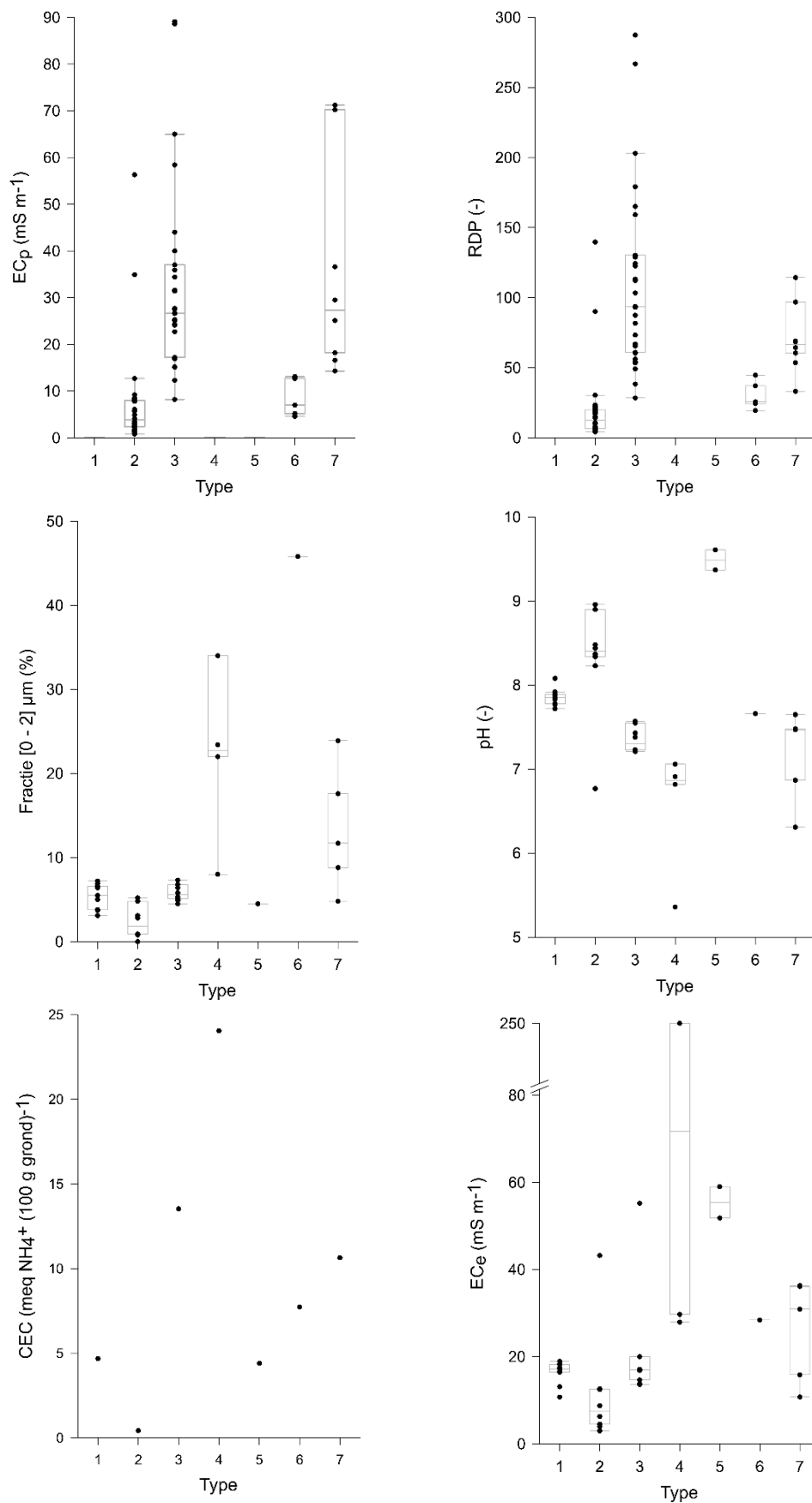
Figuur 23 geeft de analyseresultaten voor de fractie aan partikels $< 2 \mu\text{m}$. Hieruit blijkt dat de spreiding op de resultaten voor types 1, 2 en 3 klein is in vergelijking met types 4 en 7. Voor types 5 en 6 werd slechts één staal onderzocht. De fracties aan fijne materialen voor types 1, 2, 3 en 5, respectievelijk opgebouwd uit grind, zandig materiaal, resten van verbrandingsprocessen en assen, liggen beduidend lager in vergelijking met types 4, 6 en 7, die gekenmerkt worden door respectievelijk klei, gips en baksteenresten. De bekomen resultaten komen overeen met de verwachtingen gebaseerd op hun karakterisatie. Het staal gekenmerkt door baksteenresten bevat dus ook een karakteristieke fractie aan fijne partikels. In de literatuur wordt een positieve correlatie beschreven tussen het gehalte aan partikelgroottes $< 2 \mu\text{m}$ en de EC waarde (Sudduth et al., 2005). Deze relatie wordt bevestigd voor type 2, lage EC en concentratie aan fijne fractie, en type 7. Aangezien type 2 als zandig materiaal omschreven wordt, bevestigt dit het gevonden patroon. Type 7 wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van baksteenresten, waarvoor een hoge EC ook in de literatuur teruggevonden wordt. Deze relatie blijkt anderzijds niet te gelden voor type 6, waarvan slechts één staal op textuur geanalyseerd werd. Type 6 bevat gipsresten waarvoor de EC sterk afhankelijk is van het vochtgehalte. Aangezien voor type 4 geen EC_p metingen uitgevoerd werden kan voor dit type de positieve correlatie tussen de eigenschappen niet gecontroleerd worden.



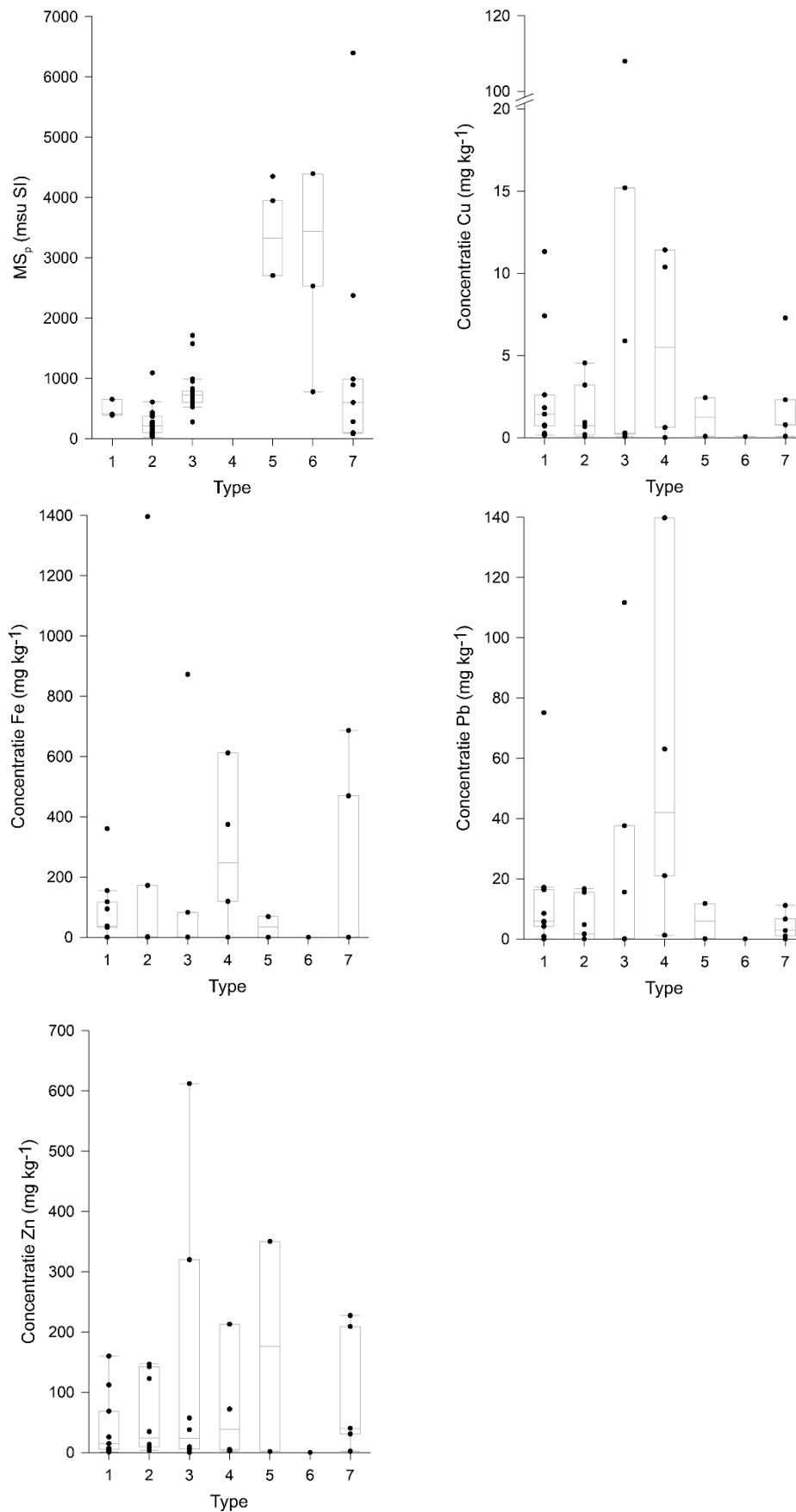
Figuur 21: Orthofoto (bovenaan). Profieltekening gemaakt in Surfer op basis van de metingen uitgevoerd op het profiel van de sleuf (centraal). Profieltekening met aanduiding van de ID van de staalnamepunten (onderaan).



Figuur 22: Profielmetingen van de EC_p (bovenaan), RDP (centraal) en MS_p uitgezet volgens de samplinglocatie.



Figuur 23: De resultaten van de profielmetingen van de EC_p ($mS\ m^{-1}$) en RDP (-) en de laboanalyses van fractie kleiner dan $2\ \mu m$ (%), pH (-), CEC ($meq\ NH_4^+$ ($100\ g\ grond$) $^{-1}$) en EC_e ($mS\ m^{-1}$) uitgezet voor elk type materiaal. Voor elk type werd een boxplot op basis van de mediaan toegevoegd.



Figuur 24: Resultaten van de profielmetingen voor MS_p (msu SI) en de laboanalyses van de concentratie aan Cu, Fe, Pb en Zn ($mg\ kg^{-1}$) uitgezet per type. Een boxplot op basis van de mediaan werd toegevoegd.

5.3.3.1 pH

Tabel 6 verzamelt de statistische parameters voor de pH metingen. Figuur 25 geeft de pH waarden weer voor de respectievelijke staalnameplaatsen in het profiel, waaruit een zekere gelaagdheid opgetekend wordt. Voor de grindlaag aan het oppervlak worden gemiddeld een waarde van pH 8 genoteerd, terwijl de hoogste waarden geobserveerd worden in de zandige laag en de gipsresten. De laagste pH waarden worden genoteerd voor de resten van de verbrandingsprocessen en de kleilaag.

Figuur 23 geeft de pH waarden per type weer, waaruit op te tekenen is dat types 1, 3, 4, 5 en 6 gekenmerkt worden door een beperkte spreiding van de pH metingen. Types 2 en 7 bezitten een grotere spreiding. De pH waarden van types 1, 2 en 5 liggen algemeen hoger dan de overige types en er is op basis van deze metingen een uniek bereik voor deze types af te lijnen. Voor types 4, 5, 6 en 7 overlappen de bereiken, waardoor ze moeilijk te onderscheiden zijn. Type 1 wordt gekarakteriseerd door grindmateriaal en valt hierdoor mogelijks binnen het verwachte bereik van bouwpuin opgemaakt uit de literatuur, wat bij deze metingen ook het geval is. Voor type 5, wat gedomineerd wordt door de aanwezigheid van assen, komen de resultaten overeen met de referentiewaarden Tabel 1.

Voor (semi-) natuurlijke bodems wordt in de literatuur een positieve correlatie teruggevonden tussen pH en EC (Corwin et al., 2003; Sudduth et al., 2005). Daar waar voor type 2 lage EC waarden worden waargenomen, worden voor hetzelfde type hoge pH waarden gemeten. Een gelijkaardig patroon wordt waargenomen voor type 6. Zoals voor de EC metingen geen onderscheid gemaakt kon worden tussen types 3 en 7, blijkt ook dit niet mogelijk op basis van de pH metingen. Voor types 1, 4 en 5 kunnen geen besluiten getrokken worden aangezien er geen metingen van de EC_p werden uitgevoerd.

CEC

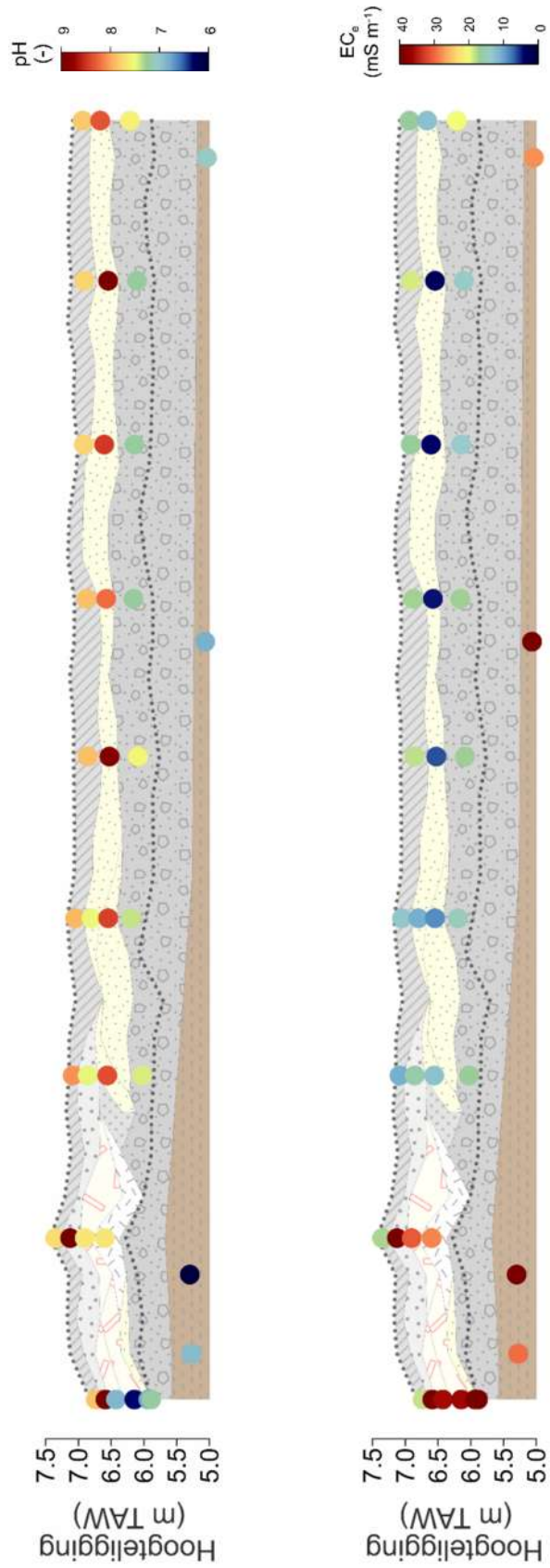
Figuur 23 geeft de analyseresultaten voor de CEC per type materiaal. Voor types 1 en 5 wordt ongeveer dezelfde CEC waarden gemeten. Voor types 2 en 4 worden respectievelijk de laagste en de hoogste CEC waarden gemeten. De resultaten voor types 1 en 4 komen overeen met de referentiewaarden voor respectievelijk bouwpuin en slib. Type 3, gedomineerd door resten van verbrandingsprocessen, heeft een waarde die binnen het bereik van referentiewaarden voor assen valt. Voor type 5 wordt een lagere waarde dan de verwachte waarde voor assen gevonden. Ook voor type 7 gedomineerd door baksteenresten wordt een waarde binnen de verwachte waarden voor bouwpuin gevonden. Uit de literatuur blijkt dat de CEC positief gecorreleerd is met de EC evenals met de fractie partikelgroottes $0 - 2 \mu m$ (Sudduth et al., 2005). Deze resultaten suggereren dat voor de bestudeerde stortmaterialen dezelfde verhoudingen bestaan tussen deze eigenschappen.

5.3.3.2 EC_e

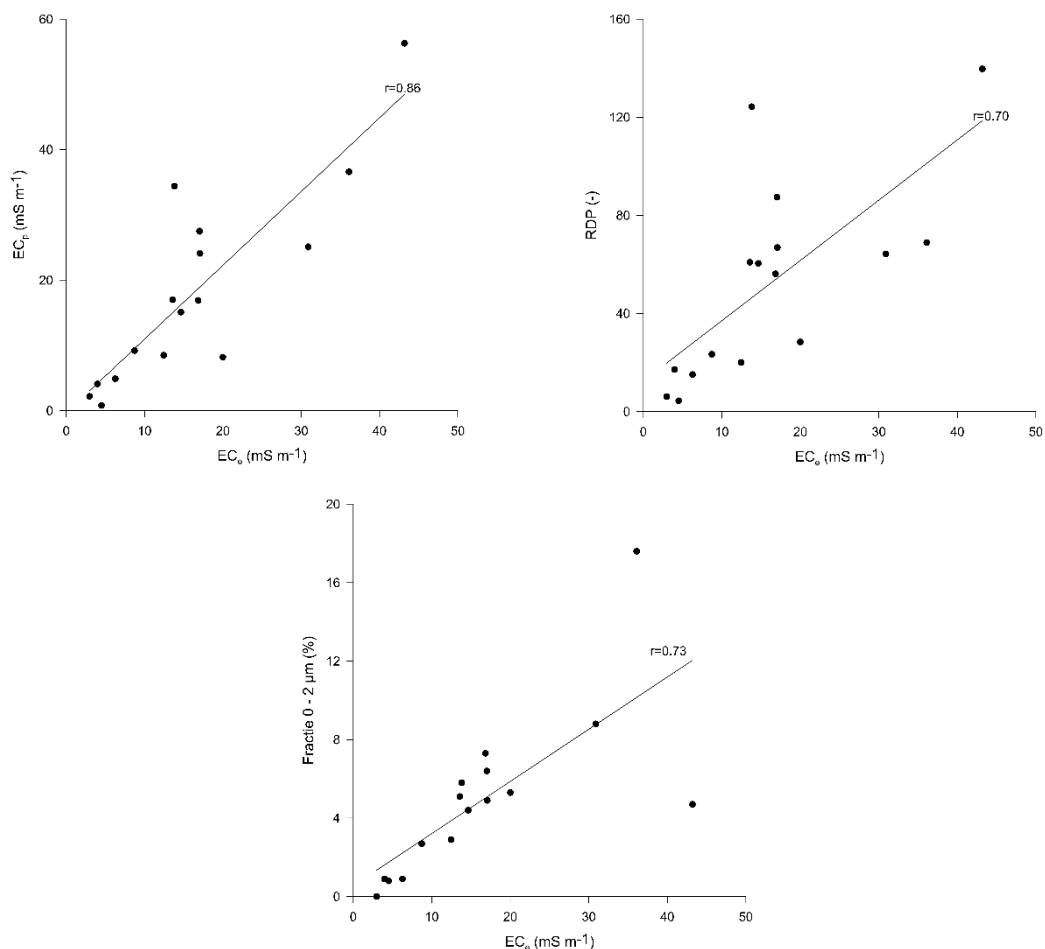
Tabel 6 geeft de berekende statistische parameters voor de EC_e analyses. Figuur 25 geeft de resultaten van de EC_e analyses voor de respectievelijke staalnameplaatsen in het profiel, waaruit een zeker gelaagdheid kan opgetekend worden. Voor de grindlaag en de resten van de verbrandingsprocessen worden waarden van 10 tot 20 $mS m^{-1}$ genoteerd, terwijl de analyses van de zandige laag de laagste waarden weergeven. Voor de kleilaag, de gipsresten en de baksteen-houdende materialen worden de hoogste waarden geobserveerd.

Uit Figuur 23, waarin de analyseresultaten voor EC_e per type materiaal worden gegroepeerd, blijkt dat de spreiding op de resultaten voor types 1, 2, 3, 5 en 6 beperkt is in vergelijking met deze waargenomen voor types 4 en 7. Voor types 1, 2, 3 en 7 worden lagere waarden gemeten tegenover types 4 en 5. Uit Figuur 23 kan een bereik afgelijnd worden voor types 1, 2, 3 en 5 waaruit types 1 en 3 te onderscheiden zijn van type 2 en type 5. Voor types 1, 3, 5 en 7 komen de resultaten overeen met de verwachte waarden voor bouwpuin, assen. Het vergelijken van deze resultaten met deze geobserveerd voor de EC_p wordt bemoeilijkt door het ontbreken van EC_p metingen voor types 1, 4 en 5. Echter blijkt wel dat voor type 2 nagenoeg hetzelfde bereik aan waarden wordt verkregen. Voor type 3 worden lagere waarden opgetekend dan deze waargenomen bij de EC_p metingen. De laagste EC_e waarden van type 7 komen overeen met deze gemeten bij de EC_p echter is het waargenomen bereik van de waarden minder groot voor de EC_e analyses.

Figuur 26 geeft de spreidingsdiagrammen voor de relaties tussen EC_e enerzijds en EC_p , RDP en fractie partikelgroottes $< 2 \mu m$ anderzijds. De correlatie, in dit geval met een correlatiefactor van 0.86, tussen de EC_e en de EC_p wordt ook in de literatuur beschreven (Akramkhanov et al., 2008; Rhoades et al., 1989). Zoals ook uit de radartheorie blijkt kan een verband teruggevonden worden voor de EC_e en de RDP, in dit geval met een correlatiefactor gelijk aan 0.76. Een zelfde verband tussen de fractie partikelgroottes tussen 0 en $2 \mu m$ en de EC_e werd in eerder onderzoek beschreven (Sudduth et al., 2005). Uit berekeningen blijkt voor de laatste relatie een correlatiefactor van 0.92 te bestaan.



Figuur 25: Metingen van de pH (bovenaan) en de EC_e uitgezet volgens de samplinglocatie.



Figuur 26: Spreidingsdiagrammen voor de waargenomen relaties tussen EC_e (mS m⁻¹) enerzijds en de EC_p (mS m⁻¹), de RDP (-) en de fractie [0 – 2] µm (%)

Zware metalen – ICP-OES

Figuur 28 geeft de concentraties aan Cu, Fe, Pb en Zn in mg kg⁻¹ in functie van de staalnamelocatie. Er valt voor alle profielen op te tekenen dat de grindlaag lage concentraties aan deze metalen bezit. Voor de Cu concentratie bezit de zandige laag iets hogere waarden dan de grindlaag en bezitten de resten van de verbrandingsprocessen eveneens lage waarden met uitzondering van een staal. De stalen met baksteenresten worden gekenmerkt door hoge waarden in vergelijking met de overige stalen. Voor de Fe concentratie worden in de grindlaag en de resten van verbrandingsprocessen lage waarden opgetekend in vergelijking met de stalen gekenmerkt door baksteenresten. Ook voor de zandige laag worden hogere waarden opgemeten waardoor in de figuur een gelaagdheid waar te nemen is. Voor de Pb concentratie kan geen duidelijke trend opgemaakt worden echter blijken opnieuw de stalen rijk aan baksteenresten hoge waarden weer te geven. Voor de Zn concentratie worden voor de grindlaag en zandige laag lagere waarden opgetekend in vergelijking met de onderliggende resten van verbrandingsprocessen. Opnieuw worden de stalen met baksteen resten gekenmerkt door relatief hoge waarden. Voor de onderliggende kleilaag worden hoge concentraties aan Cu en Fe gemeten.

Tabel 6 geeft de statistische parameters voor de concentratie aan Cu, Fe, Pb en Zn. Figuur 24 geeft de resultaten van de ICP-OES analyse. Hieruit kan opgetekend worden dat voor de Cu, Fe en Pb concentraties de spreiding op de analyseresultaten beperkt is voor de types 1, 2, 5 en 6, echter wordt

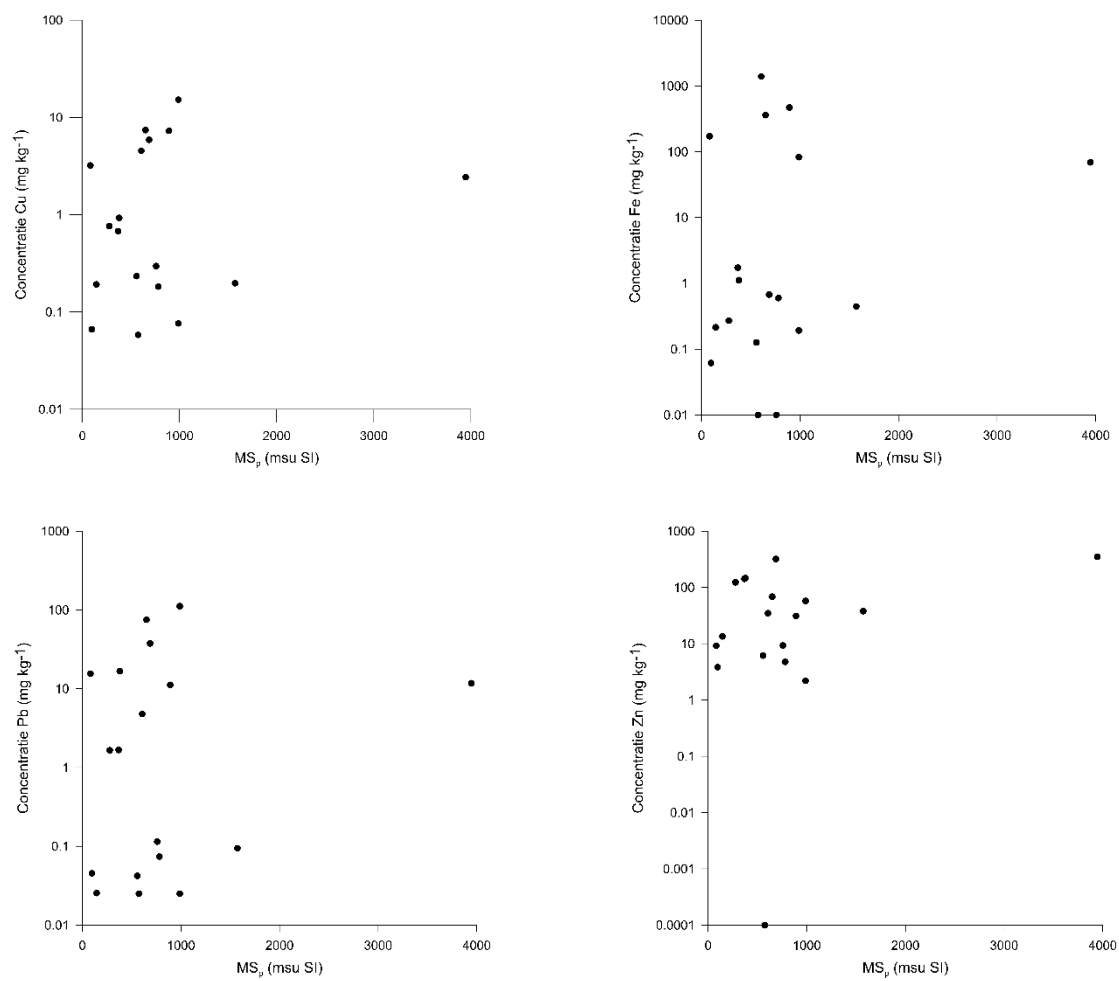
voor de Fe concentratie ook een beperkte spreiding waargenomen voor type 3 en voor type 7 blijft de spreiding beperkt voor de concentratie aan Cu en Pb. Voor de concentratie aan Zn wordt voor alle types een grotere spreiding waargenomen dan de andere zware metalen. Op basis van deze analyseresultaten voor de concentratie aan zware metalen lijkt het moeilijk de types materialen van elkaar te onderscheiden.

Uit de spreidingsdiagrammen van de MS_p met de zware metaalconcentraties, gegeven in Figuur 27, kan besloten worden dat slecht een positieve correlatie gevonden wordt voor de Cu en Fe concentratie in de bodem. Echter zijn deze waarden voor de correlatie beduidend kleiner dan de waarden die teruggevonden worden in de literatuur (Cao et al., 2015; Jordanova et al., 2003). Dit kan mogelijk verklaard worden door het verschil in gebruikte analysemethodes binnen dit onderzoek en de literatuur voor de concentratie aan zware metalen maar evengoed moet rekening gehouden worden met de heterogeniteit van de bestudeerde bodem die een sterke invloed kan hebben om de MS_p metingen. In de literatuur worden de totale zware metaalconcentraties geanalyseerd aan de hand van röntgenfluorescentie.

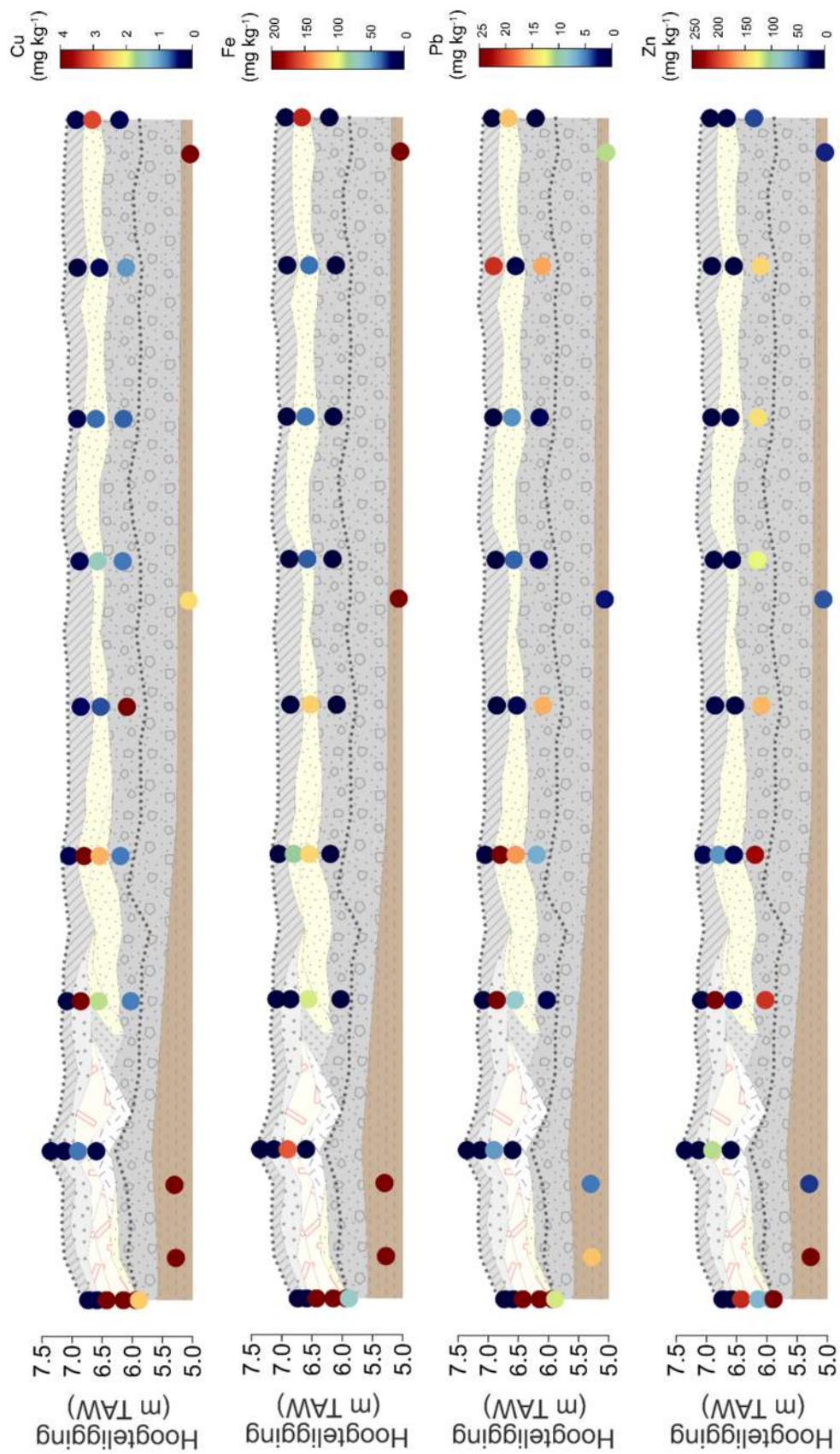
De gemeten concentraties aan Cu, Pb en Zn kunnen getoetst worden aan de geldende bodemsaneringsnormen voor het huidige, industrie, en toekomstige bestemmingstype, park en woonzone, van het terrein weergegeven in Tabel 5. Voor de Cu en Pb concentraties wordt vastgesteld dat alle gemeten waarden onder de bodemsaneringsnorm liggen, echter voor de Zn concentratie worden waarden gemeten die de bodemsaneringsnorm vastgelegd voor het bestemmingstype woonzone, overschrijden.

Tabel 5: Bodemsaneringsnormen voor Vlaanderen voor de concentraties aan Cu, Pb en Zn (mg kg^{-1}), afhankelijk van het bestemmingstype.

Bestemmingstype	Woonzone	Natuur- recreatiegebied	en Industrie
Cu	197	500	500
Pb	560	735	1250
Zn	333	1000	1250



Figuur 27: Spreidingsdiagrammen voor de waargenomen relaties tussen de MS_p (msu SI) en de concentratie Cu, Fe, Pb en Zn ($mg\ kg^{-1}$)



Figuur 28: Analyses van de concentratie aan Cu (mg kg^{-1}), Fe (mg kg^{-1}), Pb (mg kg^{-1}) en Zn (mg kg^{-1}) (van boven naar onder) uitgezet tegenover de staalnamelocatie.

Tabel 6: Resultaten van de statistische analyses voor de meetresultaten van EC_p (mS m⁻¹), RDP (-), MS_p (msu SI), fractie [0-2] µm (%), pH (-), EC_e (mS m⁻¹) en de concentraties aan Cu, Fe Pb en Zn (mg kg⁻¹) met aanduiding van de detectielimiet door middel van 'dl'

Statistische parameter	EC _p	RDP	MS _p	Fractie 0 – 2 µm	pH	EC _e	Cu	Fe	Pb	Zn
Aantal	67	67	78	36	37	37	37	37	37	37
Minimum	0.8	4.2	28	0	5.36	2.97	0.002 (dl)	0.01	0.05	0.005 (dl)
Gemiddelde	21.35	64.25	796.40	8.81	7.69	29.74	5.49	154.00	16.17	83.23
Mediaan	15.1	53.5	567	5.4	7.66	17.08	0.76	1.12	4.27	25.95
Maximum	89.1	287.4	6397	45.8	9.61	250	107.95	1396.75	139.77	612
Standaardafwijking	21.01	6173	1086.72	9.73	0.82	42.49	17.75	301.75	31.46	129.00
Variatiecoëfficiënt	0.98	0.96	1.36	1.10	0.11	1.43	3.23	1.96	1.95	1.55
MAD	11.5	36.6	298.5	1.8	0.43	6.33	0.692	1.11	4.22	23.75

De vergelijking van de EMI en GPR metingen en de metingen van EC_p en RDP uit het profiel van de pilootproef toont dat eenzelfde maar verstoort patroon voor de EC_a teruggevonden wordt als bepaald via gelokaliseerde handheld metingen voor het profiel. De verstoring, toe te schrijven aan omgevingsomstandigheden en metalen objecten in de ondergrond, bemoeilijkt de vergelijking van deze parameter. Echter moet gewezen worden op het feit dat de verschillende metingen op een verschillende basis gemeten worden.

De vergelijking van de EC_p , RDP en MS_p metingen van het profiel met de laboanalyses zoals partikelgrootte-analyse, pH, CEC, EC_e en zware metalen leert dat de EC_p en EC_e gecorreleerd zijn met elkaar met een correlatiefactor van 0.86, zoals in de literatuur beschreven werd. Een correlatiefactor van 0.76 wordt gevonden voor de relatie tussen RDP en EC_e , net als deze bestaat voor natuurlijk bodems. Aangezien EC_p en EC_e sterk gecorreleerd zijn kan ook het gevonden verband tussen EC_e en partikelgrootte fractie $[0 - 2] \mu m$ geëxtrapoleerd worden tot een relatie tussen EC_p en de fractie fijn materiaal. Ook het verband tussen de CEC en de EC_p wordt gevonden met een correlatiefactor van 0.69. De MS metingen die in de literatuur vaak aanduiding geven van de aanwezigheid van Cu, Fe, Pb en Zn, vallen nu moeilijker te correleren met de concentraties aan de respectievelijke zware metalen. Dit is vermoedelijk toe te schrijven aan de gebruikte analyseprocedure die de concentratie aan zware metalen meet en niet gelijk is als de in de literatuur beschreven methode waarbij de totale concentratie bepaald wordt. Evengoed heeft ook de heterogeniteit van het materiaal zijn invloed op de MS_p metingen, wat niet onderschat mag worden. De basis waarop de metingen worden uitgevoerd, speelt ook een rol. Via de MS_p metingen wordt een groter volume in rekening gebracht dan het volume waarvan de concentratie zware metalen wordt bepaald.

6 Algemene discussie en besluit

Het doel van dit onderzoek was het gebruik van geofysische bodemsensoren voor de karakterisering van stortplaatsen in het kader van ELFM te bestuderen. De toepasbaarheid van EMI en GPR voor de karakterisering van stortmateriaal aan de hand van EC en MS metingen werd onderzocht. De geofysische survey van een voormalige stortplaats toont aan dat in deze case de mobiele survey met EMI en GRP technologie geschikt is om de geografische ligging van de stortplaats te achterhalen en een dimensionering ervan vast te leggen met beperkte meettijden. Er werd echter slecht op één stortplaats een survey uitgevoerd, dewelke niet noodzakelijk algemeen representatief is. De mogelijkheid om verschillende zones met variërende dichtheden aan metaalhoudende materialen te kunnen optekenen biedt vooruitzichten voor het gebruik van deze geofysische technieken bij het bepalen van het ELFM-potentieel van een stortsite indien de interesse uitgaat naar metalen. Daarentegen kan de aanwezigheid van metaalhoudende materialen ook verstoorde werken wat de bruikbaarheid van de metingen ter karakterisatie van de materialen beperkt zoals blijkt uit de tweede case.

Dit onderzoek geeft een indicatie dat de verhouding tussen de oppervlaktemetingen van EC_a en MS_a verkregen via EMI en GPR en de gelokaliseerde profielmetingen van EC_p , RDP en MS_p bestaat en dat de oppervlaktemetingen representatieve resultaten kunnen voorzien om patronen voor de geofysische eigenschappen als EC_p , RDP en MS_p af te leiden. Echter zorgt de spatiale variatie voor problemen bij het omzetten van de oppervlaktemetingen naar profielmetingen. Er moet ook rekening gehouden worden met de aanwezigheid van metalen en hun invloed op de resultaten. Het verschillende volume van de metingen heeft ook zijn gevolgen op de vergelijkbaarheid van de resultaten. De oppervlaktemetingen worden op een andere basis gemeten dan de profielmetingen waardoor de invloed van metalen en omgevingsfactoren op de eerste metingen meer uitgesproken naar voor komen in de resultaten. Echter kan het verder op punt stellen van de verwerking van de oppervlaktemetingen, zoals bijvoorbeeld door het toepassen van filtering, mogelijkheden bieden om de variantie in de geofysische eigenschappen in het stortmateriaal te beschrijven.

Op basis van de profielmetingen van de EC_p , RDP en MS_p samen met de analyses van de fysische en chemische eigenschappen van het stortmateriaal in het laboratorium blijkt de mogelijkheid te bestaan de verschillende types stortmaterialen van elkaar te onderscheiden. Toch wordt het onderscheiden van sommige types bemoeilijkt door het gelijklopend gedrag van sommige types voor de onderzochte eigenschappen. De relaties tussen de geofysische eigenschappen en de fysicochemische eigenschappen zoals die bestaan voor een (semi-)natuurlijke bodem werden onderzocht. Zo werd vastgesteld dat de invloed van de fijne fractie, pH en CEC op de EC van het bodemmateriaal binnen stortbodems blijft bestaan. Echter kon de invloed van de aanwezige zware metalen gebonden aan magnetische ijzeroxiden op de MS metingen zoals die beschreven is in de literatuur met minder zekerheid afgeleid worden. Dit kan naar alle waarschijnlijkheid toegeschreven worden aan de gebruikte analysemethode van de zware metalen, dewelke niet dezelfde is als binnen de beschreven onderzoeken. Ook zou de sterke heterogeniteit van het materiaal een oorzaak kunnen zijn. Echter blijft de vraag welk staalnamevolume de meest representatieve resultaten zou geven en of de standaard

bodemonderzoekstechnieken de verschillen in elektrische en magnetische eigenschappen wel voldoende kunnen beschrijven?

De relaties zoals die bestaan voor de natuurlijk bodems worden ook gedeeltelijk bij de stortbodems teruggevonden. De geofysische metingen worden beïnvloed door een reeks factoren samen waardoor de rechtstreekse interpretatie in termen van specifieke eigenschappen, waarnaar de interesse uitgaat, bemoeilijkt wordt. Hier kan aan tegemoet gekomen worden door de metingen aan te vullen met een (beperkt aantal) conventionele observaties via boringen of testputten.

Bij het onderzoek werden een voormalige stortplaats van bouwafval en een site waar vooral assen van verbrandingsprocessen gestort werden onderzocht in termen van materiaal, interne structuur en dimensies. Bijgevolg zijn de bekomen resultaten voor de geofysische metingen vooral kenmerkend door deze types materialen. Er wordt hierdoor verwacht dat voor stortplaatsen met dezelfde types materialen resultaten met dezelfde patronen voor EC_p , RDP en MS_p zullen bekomen worden.

Het moet ook duidelijk zijn dat de uitgevoerde geofysische metingen slechts een momentopname zijn van de geofysische eigenschappen van de stortplaats, dewelke variabel zijn in de tijd.

Samengevat kan gesteld worden dat de onderzochte geofysische technieken de gebruiker in staat stellen een preciezere lokalisatie van de stortplaatsen uit te voeren. Ook wordt een inzicht in de materiaalopbouw verworven die het toelaat een doordachte monsternamercampagne op te stellen. Er wordt door toepassing van de technieken een uitgebreide kennis omtrent de volumes van het totale pakket of de afzonderlijk lagen aan stortmateriaal van de stortplaats en de variantie in materialen ervan verkregen wat ervoor zorgt dat met meer zekerheid en beperktere kosten het ELFM-potentieel van een stortplaats nagegaan kan worden. Bovendien is er in de literatuur weinig data beschikbaar en draagt dit onderzoek bij tot het verder aanvullen van “karakteristieke” data voor bepaalde types materialen wat ook in verder onderzoek moet gebeuren.

Referenties

- 1999/31/EG, 1999. Richtlijn 1999/31/EG van de raad van 26 april 1999 betreffende het storten van afvalstoffen.
- 2008/98/EG, 2008. Richtlijn 2008/98/EG van het Europees Parlement en de Raad van 19 november 2008 betreffende afvalstoffen en tot intrekking van een aantal richtlijnen.
- Abu-Zeid, N., Bianchini, G., Santarato, G., Vaccaro, C., 2004. Geochemical characterisation and geophysical mapping of Landfill leachates: The Marozzo canal case study (NE Italy). *Environmental Geology* 45, 439–447.
- Akramkhanov, A., Sommer, R., Martius, C., Hendrickx, J.M.H., Vlek, P.L.G., 2008. Comparison and sensitivity of measurement techniques for spatial distribution of soil salinity. *Irrigation and Drainage Systems* 22, 115–126.
- Belmonte-jiménez, S.I., Bortolotti-villalobos, A., Campos-enríquez, J.Ó., Pérez-flores, M.A., Delgado-rodríguez, O., Ensenada-tijuana, C., Playitas, Z., California, B., México, C.P., 2014. Electromagnetic Methods Application for Characterizing a Site. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 30, 317–329.
- Benson, R.C., Glaccum, R.A., Noel, M.R., 1982. Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration: An Application Review.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, H., 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology* 39, 360–371.
- Bosmans, A., Vanderreydt, I., Geysen, D., Helsen, L., 2013. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: A technology review. *Journal of Cleaner Production* 55, 10–23.
- Burnley, S., 2001. The impact of the European landfill Directive on waste management in the United Kingdom. *Resources, Conservation and Recycling* 32, 349–358.
- Cao, L., Appel, E., Hu, S., Yin, G., Lin, H., Rösler, W., 2015. Magnetic response to air pollution recorded by soil and dust-loaded leaves in a changing industrial environment. *Atmospheric Environment* 119, 304–313.
- Cardarelli, E., Bernabini, M., 1997. Two case studies of the determination of parameters of urban waste dumps. *Journal of Applied Geophysics* 36, 167–174.
- Cassiani, G., Fusi, N., Susanni, D., Deiana, R., 2008. Vertical radar profiling for the assessment of landfill capping effectiveness. *Near Surface Geophysics* 6, 133–142.
- Centrum, V. vestingbouwkundig, n.d. Geofysische bodemsensoren, een doorbraak in archeologische prospectie [WWW Document]. URL <http://www.simonstevin.org/bodemsensoren.html> (accessed 4.7.16).

Commissie, E., 2011. Stappenplan voor efficiënt hulpbronnengebruik in Europa.

Compendium voor de monsterneming, meting en analyse in het kader van bodembescherming (BOC) Versie 1.2 (25 juli 2011), 2011.

Corwin, D.L., Lesch, S.M., Shouse, P.J., Soppe, R., Ayars, J.E., 2003. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agronomy Journal* 352–364.

Cottenie, A., Verloo, M., Kiekens, L., Velghe, G., Camerlynck, R., 1982. Chemical analysis of plants and soils.

Daniels, D.J., 2004. Ground Penetrating Radar - 2nd Edition.

Davis, J.C., 1986. Statistics and Data Analysis in Geology.

De Carlo, L., Perri, M.T., Caputo, M.C., Deiana, R., Vurro, M., Cassiani, G., 2013. Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. *Journal of Applied Geophysics* 98, 1–10.

De Smedt, P., Saey, T., Meerschman, E., De Reu, J., De Clercq, W., Van Meirvenne, M., 2014. Comparing Apparent Magnetic Susceptibility Measurements of a Multi-receiver EMI Sensor with Topsoil and Profile Magnetic Susceptibility Data over Weak Magnetic Anomalies. *Archaeological Prospection* 21, 103–112.

Delefortrie, S., De Smedt, P., Saey, T., Van De Vijver, E., Van Meirvenne, M., 2014. An efficient calibration procedure for correction of drift in EMI survey data. *Journal of Applied Geophysics* 110, 115–125.

Dodds, S., Ivic, D., 1990. Integrated geophysical methods used for groundwater studies in the Poldas and Murray Basins. *Geotechnical and Environmental Geophysics* 311–320.

EURELCO, 2015. New data launched on the landfill situation in the EU-28 [WWW Document]. URL <http://www.eurelco.org/news/new-data-launched-landfill-situation-eu-28> (accessed 4.26.16).

Everett, M.E., 2013. Near-surface applied geophysics.

Feys, T., 2011. 30 jaar OVAM - De Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij in historisch perspectief.

Frangos, W., 1997. Electrical detection of leaks in lined waste disposal ponds. *Geophysics* 62, 1737–1744.

Gawande, N.A., Reinhart, D.R., Thomas, P.A., McCreanor, P.T., Townsend, T.G., 2003. Municipal solid waste in situ moisture content measurement using an electrical resistance sensor. *Waste Management* 23, 667–674.

Georgaki, I., Souplos, P., Sakkas, N., Ververidis, F., Trantas, E., Vallianatos, F., Manios, T., 2008. Evaluating the use of electrical resistivity imaging technique for improving CH₄ and CO₂ emission rate estimations in landfills. *Science of the Total Environment* 389, 522–531.

- Gibson, P.J., Lyle, P., George, D.M., 1996. Environmental applications of magnetometry profiling. *Environmental Geology* 27, 178–183.
- Godio, A., 2000. Magnetic data interpretation in an industrial waste landfill. *Annali di geofisica* 43, 297 – 307.
- Green, A., Lanz, E., Maurer, H., Boerner, D., 1999. A template for geophysical investigations of small landfills. *The Leading Edge* 18, 248–254.
- Guéguen, Y., Palciauskas, V., 1994. *VIII Electrical conductivity Introduction To the Physics of Rocks*, Princeton University Press.
- Hermozilha, H., Grangeia, C., Matias, M.S., 2010. An integrated 3D constant offset GPR and resistivity survey on a sealed landfill - Ilhavo, NW Portugal. *Journal of Applied Geophysics* 70, 58–71.
- Hoffmann, V., Knab, M., Appel, E., 1999. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *Journal of Geochemical Exploration* 66, 313–326.
- Hogland, W., Hogland, M., Marques, M., 2010. Enhanced landfill mining: material recovery, energy utilisation and economics in the EU (Directive) perspective. *ELFM symposium-enhanced landfill mining and the transition to sustainable materials management*.
- Jansen, J., Haddad, B., Fassbender, W., Jurcek, P., 1992. Frequency Domain Electromagnetic Induction Sounding Surveys for Landfill Site Characterization Studies. *Groundwater Monitoring & Remediation* 12, 103–109.
- Jones, P.T., Geysen, D., Rossy, A., Binge, K., 2010. Enhanced Landfill Mining (ELFM) and Enhanced Waste Management (EWM): essential components for the transition to Sustainable Materials Management (, in: *Enhanced Landfill Mining Symposium Houthalen-Helchteren*. p. 13.
- Jones, P.T., Geysen, D., Tielemans, Y., Van Passel, S., Pontikes, Y., Blanpain, B., Quaghebeur, M., Hoekstra, N., 2013. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production* 55, 45–55.
- Jordanova, N. V, Jordanova, D. V, Veneva, L., Yorova, K., Petrovsky, E., 2003. Magnetic response of soils and vegetation to heavy metal pollution--a case study. *Environmental science & technology* 37, 4417–4424.
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon Press. Oxford.
- Krook, J., Svensson, N., Eklund, M., 2012. Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management* 32, 513–520.
- Lecoanet, H., Lévêque, F., Segura, S., 1999. Magnetic susceptibility in environmental applications: Comparison of field probes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 115, 191–204.
- Mack, T.J., 1993. Detection of Contaminant Plumes by Borehole Geophysical Logging. *Groundwater Monitoring & Remediation* 13, 170–114.

- Marchetti, M., Settimi, A., 2011. Integrated geophysical measurements on a test site for detection of buried steel drums. *Annals of Geophysics* 54, 105–114.
- McNeill, J.D., 1980. Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Technical note TN.
- Meuser, H., 2010. *Contaminated Urban Soils*, Springer.
- Morton-Bermea, O., Hernandez, E., Martinez-Pichardo, E., Soler-Arechalde, A.M., Santa-Cruz, R.L., Gonzalez-Hernandez, G., Beramendi-Orosco, L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2009. Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma* 151, 121–125.
- Nyquist, J.E., Doll, W.E., 1993. Comparison of surface and aerial geophysics for characterizing a hazardous waste site: A case study. 63rd Ann. Internat. Mtg 26, 468–471.
- Orlando, L., Marchesi, E., 2001. Georadar as a tool to identify and characterise solid waste dump deposits. *Journal of Applied Geophysics* 48, 163–174.
- Persico, R., 2014. *Introduction to Ground Penetrating Radar, Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Favetto, A., Boujon, P., 2012. Application of Geophysical Methods to Waste Disposal Studies. *Municipal and Industrial Waste Disposal* 242.
- Porsani, J.L., Filho, W.M., Elis, V.R., Shimeles, F., Dourado, J.C., Moura, H.P., 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: A case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics* 55, 199–209.
- Prechthai, T., Padmasri, M., Visvanathan, C., 2008. Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential. *Resources, Conservation and Recycling* 53, 70–78.
- Price, J.L., 2001. The landfill directive and the challenge ahead: Demands and pressures on the UK householder. *Resources, Conservation and Recycling* 32, 333–348.
- Quaghebeur, M., Laenen, B., Geysen, D., Nielsen, P., Pontikes, Y., Van Gerven, T., Spooren, J., 2013. Characterization of landfilled materials: Screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production* 55, 72–83.
- Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., Alves, W.J., 1989. Estimating Soil Salinity from Saturated Soil-Paste Electrical Conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 53, 428–433.
- Robinson, D.A., Gardner, C.M.K., Cooper, J.D., 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: Comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology* 223, 198–211.
- Senos Matias, M., Marques da Silva, M., Ferreira, P., Ramalho, E., 1994. A geophysical and hydrogeological study of aquifers contamination by a landfill. *Journal of Applied Geophysics* 32, 155–162.
- Seren, S.S., Blaumoser, N.H., 1994. Combined implementation of geophysical methods for the

- investigation of old waste deposits in alpine area. 56th Meet. Eur. Assoc. Explor. Geophys.
- Soupios, P., Papadopoulos, I., Kouli, M., Georgaki, I., Vallianatos, F., Kokinou, E., 2007. Investigation of waste disposal areas using electrical methods: A case study from Chania, Crete, Greece. *Environmental Geology* 51, 1249–1261.
- Splajt, T., Ferrier, G., Frostick, L.E., 2003. Application of ground penetrating radar in mapping and monitoring landfill sites. *Environmental Geology* 44, 963–967.
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Wiebold, W.J., Batchelor, W.D., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Clay, D.E., Palm, H.L., Pierce, F.J., Schuler, R.T., Thelen, K.D., 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 263–283.
- Van De Vijver, E., Van Meirvenne, M., Saey, T., De Smedt, P., Delefortrie, S., 2015. Combining ground penetrating radar and electromagnetic induction for industrial site characterization 66, 688–689.
- Van Giang, N., Marquis, G., Minh, L.H., 2005. EM and GPR investigations of contaminant spread around the Hoc Mon waste site , Vietnam. *Acta Geophysica* 58, 1040–1055.
- Van Nieuwenhuysse, L., 2008. Potentiële historische bodemverontreiniging als gevolg van industriële activiteiten in de 19de - en de 20ste- eeuwse stad: Een bronnenkritische studie over Gent, 1795-1926 Band 1.
- Wang, T.-P., Chen, C.-C., Tong, L.-T., Chang, P.-Y., Chen, Y.-C., Dong, T.-H., Liu, H.-C., Lin, C.-P., Yang, K.-H., Ho, C.-J., Cheng, S.-N., 2015. Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study. *Journal of Applied Geophysics* 121, 21–30.
- Wille, E., Behets, T., Umans, L., 2013. Mining the anthropocene in Flanders: part 1 - landfill mining. p. 15.
- Xevgenos, D., Papadaskalopoulou, C., Panaretou, V., Moustakas, K., Malamis, D., 2015. Success Stories for Recycling of MSW at Municipal Level: A Review. *Waste and Biomass Valorization* 6, 657–684.
- Yochim, A., Zytner, R.G., McBean, E.A., Endres, A.L., 2013. Estimating water content in an active landfill with the aid of GPR. *Waste Management* 33, 2015–2028.

Appendix

Tabel 7: Alle data voor hoogteligging (m) pH (-), EC_e (mS m⁻¹) en fractie partikels < 2 µm (%).

ID staal	Type	Hoogteligging	pH	EC _e	Fractie < 2 µm
1	1	6.937	7.83	16.64	7.2
2	2	6.67	8.34	12.45	2.9
3	3	6.212	7.57	20	5.3
4	4	5.038	7.06	27.9	22
5	1	6.911	7.77	18.92	5.5
6	2	6.546	8.96	2.97	0
7	3	6.106	7.23	13.81	5.8
8	1	6.917	7.78	16.42	6.9
9	2	6.607	8.48	3.97	0.9
10	3	6.147	7.23	13.58	5.1
11	1	6.875	7.88	17.2	6.6
12	2	6.575	8.23	4.5	0.8
13	3	6.16	7.22	17.08	4.9
14	4	5.066	6.82	113.7	23.4
15	1	6.855	7.89	18.18	6.4
16	2	6.525	8.9	6.27	0.9
17	3	6.09	7.55	17.02	6.4
18	1	7.051	7.92	13.11	3.7
19	7	6.801	7.48	10.75	4.8
20	2	6.546	8.44	8.73	2.7
21	3	6.196	7.38	14.62	4.4
22	1	7.085	8.08	10.72	3
23	7	6.855	7.47	15.84	11.7
24	2	6.56	8.37	12.61	4.7
25	3	6.025	7.43	16.84	7.3
26	1	7.352	7.72	17.46	3.8
27	5	7.127	9.61	59	
28	7	6.902	7.65	30.9	8.8
29	6	6.597	7.66	28.4	45.7
30	4	5.299	5.36	250	8
31	4	5.277	6.91	29.7	34
32	1	6.733	7.85	18.31	5
33	5	6.588	9.37	51.8	4.5
34	7	6.428	6.87	36.1	17.6
35	7	6.148	6.31	36.3	23.9
36	2	5.933	6.77	43.2	4.7
37	3	5.888	7.21	55.2	6.8

Tabel 8: Alle data voor Cd (mg kg⁻¹), Cr (mg kg⁻¹), Cu (mg kg⁻¹), Fe (mg kg⁻¹) en Mg (mg kg⁻¹)

ID staal	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg
1	0.008	0.014	0.151	0.366	67.067
2	0.049	0.482	3.206	172.213	30.21
3	0.034	0.02	0.198	0.445	71.633
4	0.003	0.253	0.005	0.407	55.517
5	0.049	0.164	0.260	36.019	4.595
6	0.277	0.299	0.927	1.119	115.917
7	0.014	0.011	0.182	0.598	87.133
8	0.082	0.218	0.710	37.389	11.045
9	0.155	0.179	0.676	1.734	158.717
10	0.034	0.012	0.234	0.127	50.54
11	0.043	0.211	1.429	32.836	13.908
12	0.099	0.196	0.764	0.271	110.95
13	0.020	0.011	0.296	0.01	41.88
14	0.040	0.241	0.624	119.513	15.007
15	0.161	0.228	11.327	0.167	121.5
16	0.024	0.016	0.192	0.215	85.4
17	1.043	1.597	15.195	83.125	139.833
18	0.594	0.913	2.604	117.675	36.518
19	0.287	0.058	0.775	0.459	130.583
20	0.033	0.010	0.0663	0.062	135.867
21	3.982	0.487	5.883	0.674	122.867
22	0.144	0.491	1.811	94.525	28.573
23	0.185	0.032	0.788	0.220	112.517
24	0.017	0.012	0.072	0.303	167.367
25	0.003	0.392	0.058	0.01	605
26	1.007	0.13	0.759	155.5	125.067
27	0.143	0.001	0.072	0.037	128.95
28	0.016	0.013	0.076	0.192	148.017
29	0.003	0.417	0.066	0.187	603.333
30	5.106	0.779	11.427	612	171.1
31	0.507	0.506	10.385	374.525	75.433
32	0.472	2.572	7.407	360.688	30.553
33	0.480	0.070	2.428	68.963	89.167
34	0.128	0.330	7.278	469.85	158.717
35	0.12	0.218	2.309	686.375	292.817
36	0.090	0.493	4.538	1396.75	248.217
37	0.819	1.792	107.95	872.625	185.717

Tabel 9: Alle data voor Mn (mg kg⁻¹), Ni (mg kg⁻¹), Pb (mg kg⁻¹) en Zn (mg kg⁻¹)

ID staal	Mn	Ni	Pb	Zn
1	2.688	0.145	0.068	1.072
2	46.728	0.311	15.555	9.187
3	9.135	0.631	0.095	37.822
4	3.025	0.092	21.014	2.653
5	3.473	0.053	0.858	2.370
6	18.45	1.885	16.681	146.967
7	5.77	0.188	0.074	4.773
8	6.138	0.146	5.568	5.382
9	27.273	1.857	1.669	142.567
10	3.857	0.362	0.042	6.138
11	6.27	0.184	4.270	7.137
12	13.355	1.427	1.655	122.883
13	3.429	0.538	0.115	9.325
14	11	0.071	1.293	5.062
15	28.903	2.049	16.365	160.2
16	9.21	0.338	0.026	13.498
17	29.675	0.908	111.7	57.517
18	16.078	0.185	17.187	14.943
19	17.558	2.373	6.67	227.333
20	12.75	0.220	0.045	3.850
21	81.775	1.029	37.613	319.883
22	9.32	0.316	8.488	25.947
23	26.698	1.851	1.072	209.067
24	14.04	0.194	0.027	5.95
25	0.034	0.005	0.025	0.001
26	77.525	0.939	5.872	112.367
27	7.64	0.086	0.111	1.756
28	9.79	0.105	0.025	2.196
29	0.143	0.023	0.030	0.001
30	219.975	3.626	139.767	212.8
31	36.763	3.419	63.033	72.1
32	20.983	0.832	75.133	68.533
33	36.713	2.684	11.775	350.183
34	148.4	1.886	11.185	31.038
35	355.675	2.379	2.836	40.3
36	505	2.017	4.786	34.712
37	84.625	9.903	15.6	612

Tabel 10: Alle data voor hoogteligging (m), EC_p (mS m⁻¹), RDP (-) en MS_p (msu SI).

ID meetpunten	Hoogteligging	EC _p	RDP	MS _p
1	6.667	8.5	20	82
2	6.212	8.2	28.4	1572
3	6.638	2.9	7.867	210
4	6.138	12.3	38.3	1710
5	6.675	2.6	8.1	210
6	6.25	15.1	54.2	829
7	6.972			386
8	6.652	1.7	5.8	205
9	6.232	25.05	93.75	719
10	6.546	2.2	6.1	379
11	6.106	34.4	124.3	781
12	6.639	3.1	6.4	413
13	6.154	25.3	81.7	789
14	6.639	1.1	4.2	378
15	6.194	89.1	287.4	664
16	6.924			406
17	6.609	1.8	5.1	367
18	6.164	40	179.1	752
19	6.607	4.1	17.1	368
20	6.147	17	60.9	557
21	6.64	2.4	6.8	170
22	6.61			243
23	6.15	27.7	113.2	708
24	6.734	7.8	17.8	110
25	6.304	58.4	165.1	813
26	6.741	1.4	4.4	1089
27	6.261	26.7	93.2	713
28	6.575	0.8	4.4	278
29	6.16	24.1	66.9	759
30	6.551	3.4	7.6	262
31	6.166	65	202.9	582
32	6.608	12.7	30.4	230
33	6.233	26.6	130.2	675
34	6.565	3.5	10.7	119
35	6.135	88.6	266.8	759
36	6.525	4.9	15.1	145
37	6.09	27.5	87.4	988
38	6.52	2.6	10	90
39	6.12	15.2	53.5	767
40	6.554			261
41	6.094	34.9	90.1	740

42	6.614			203
43	6.099	31.6	112.2	950
44	6.546	9.2	23.4	97
45	6.196	15.1	60.4	687
46	6.479	6.1	18.8	28
47	6.154	35.9	128.8	610
48	6.385	8.3	21	47
49	5.935	17.2	49.2	952
50	6.462	7.9	18.5	73
51	6.052	22.7	65.5	524
52	6.325	8	22	66
53	6.025	16.9	56.2	574
54	6.407	5.7	14.2	433
55	6.007	37	122.6	528
56	6.419	16.6	68.5	6397
57	6.114	31.4	103.3	560
58	6.623	29.5	53.6	599
59	6.163	12.7	44.7	4393
60	6.902	25.1	64.3	988
61	6.552	4.6	19.4	2530
62	6.374	18.2	60.5	2373
63	6.134	7	25.7	775
64	6.85			4349
65	6.52	71.2	114.3	88
66	6.305	5.2	24.4	111
67	6.13	24.3	73.3	594
68	6.832			2705
69	6.642			280
70	6.442	70.2	96.8	96
71	6.282	13.1	37.1	51
72	6.097	44	159.2	731
73	6.733			650
74	6.588			3946
75	6.428	36.6	68.9	891
76	6.218			80
77	6.148	14.3	33.1	
78	6.048			275
79	5.933	56.3	139.7	607