



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2014 – 2015

Massa- en dieptebepaling van metalen restanten van WO I met  
niet-invasieve bodemsensoren

**Marthe Smetryns**

Promotor: Prof. dr. ir. Marc Van Meirvenne

Tutor: dr. ir. Timothy Saey

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van  
Master in de bio-ingenieurswetenschappen: land- en waterbeheer



De auteur en de promotor geven de toelating deze masterproef 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 masterproef.

Gent, juni 2015

De promotor,

De auteur,

Marc Van Meirvenne

Marthe Smetryns



## Woord vooraf

Deze thesis zou er niet geweest zijn zonder de hulp die ik van velen heb gekregen. Ik neem hier dan ook graag de ruimte om iedereen te bedanken die mij heeft geholpen of bijgestaan.

Eerst en vooral zou ik professor Marc Van Meirvenne willen bedanken om mij de kans te geven een thesis over dit boeiende onderwerp te schrijven. Het in beeld brengen van historische sporen die in de bodem zitten is een onderwerp dat voor mij tot de verbeelding spreekt. Zijn interesse in deze materie, zijn vertrouwen, geduld en aanmoedigingen waren een sterke motivatie om dit werk te volbrengen.

Bedankt aan Timothy om mij een jaar lang bij te staan en mijn werkzaamheden in goede banen te leiden. Het was niet altijd even eenvoudig om een overzicht op de zaken te behouden maar hij heeft mij steeds in de juiste richting geholpen. Bedankt aan Nicolas om mijn werk telkens kritisch te benaderen en veel goeie tips te geven. Aan Ellen, voor haar hulp bij het werken met de softwareprogramma's. Voor de technische ondersteuning en het vele veldwerk wil ik Timothy, Nicolas en Valentijn bedanken. Zij hebben mij ook ingeleid in de wondere wereld van elektronische opstellingen, GPS-systemen en het bestaan van de koppelingspedaal op een quad.

Buiten de ORBit-groep ben ik veel dank verschuldigd aan de volgende mensen:

Maarten Bracke, om met zijn brede kennis over de Eerste Wereldoorlog mijn vele vragen te beantwoorden en mij in te leiden in het militair jargon. Ook voor zijn enthousiasme op het veld waardoor elke scherf of vlek in de bodem meteen een andere dimensie kreeg.

Al de medewerkers van REASeuro wil ik bedanken voor het delen van hun informatie. Wilfried De Ryck voor zijn boeiende uitleg over de vele types wapens en hun rol in de oorlog.

Ook bedankt aan al de eigenaars van de velden voor het beschikbaar stellen van hun gebied voor het uitvoeren van de metingen, in het bijzonder aan Luc Persyn.

Tot slot wil ik ook graag mijn ouders en mijn vriend Thomas bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun en vertrouwen.



# Inhoudstafel

Woord vooraf .....	iii
Lijst van figuren .....	vii
Lijst van tabellen.....	ix
Lijst van afkortingen .....	xi
Samenvatting.....	xiii
1 Inleiding.....	1
1.1 Probleemstelling.....	1
1.2 Doelstelling en methodiek.....	3
2 Literatuur .....	5
2.1 Technieken voor metaaldetectie.....	5
2.1.1 Magnetometrie .....	5
2.1.2 Elektromagnetische inductie (EMI) survey .....	6
3 Materialen en methoden.....	13
3.1 Studiegebieden en opstellen dataset.....	13
3.2 Magnetometrie.....	14
3.2.1 Instrument.....	14
3.2.2 Invloedsfactoren.....	15
3.2.3 Dataverwerking .....	15
3.3 Elektromagnetische inductie survey .....	16
3.3.1 Invloedsfactoren.....	17
3.3.2 Dataverwerking: interpolatie en filteren van de data .....	18
4 Resultaten .....	19
4.1 Zillebeke: proefveld 1 .....	19
4.1.1 Inleiding en historiek.....	19
4.1.2 Interpretatie en validatie van het bodemonderzoek.....	20
4.2 Wijtschate: proefveld 2 .....	24
4.2.1 Inleiding en historiek.....	24
4.2.2 Interpretatie en validatie van het bodemonderzoek.....	26

4.3	Wijtschate: proefveld 3 .....	31
4.3.1	Inleiding en historiek .....	31
4.3.2	Interpretatie en validatie van het bodemonderzoek .....	31
4.4	Ploegsteert: proefveld 4 .....	34
4.4.1	Inleiding en historiek .....	34
4.5	Zware objecten in een extra dataset .....	34
4.6	Diepte-inschatting met magnetometrie .....	35
4.7	Diepte-inschatting met MSa-metingen .....	36
4.8	Diepte-inschatting met ECa-metingen .....	37
4.8.1	Opstellen van diepte-intervallen .....	41
4.8.2	$\Delta$ ECa-1HCP signalen ten opzichte van de diepte .....	43
4.8.3	$\Delta$ ECa-2HCP signalen ten opzichte van de diepte .....	45
4.8.4	$\Delta$ ECa-11PRP signalen ten opzichte van de diepte .....	45
4.8.5	Combinatie ten opzichte van de diepte .....	46
4.8.6	Dieptebepaling met FEMP en $\Delta$ ECa-1HCP signalen .....	46
4.9	Massa-inschatting met ECa-metingen .....	47
4.9.1	Massa bepalen per diepte-interval .....	50
4.9.2	Massa op basis van FEMP .....	54
4.9.3	Conclusie: methodologie voor massabepaling .....	55
5	Diepte- en massa-inschatting in de praktijk .....	59
5.1	De centrale frontzone .....	59
5.2	De rand van de frontzone .....	59
5.3	Discussie: massa- en diepte-inschatting .....	60
6	Discussie .....	63
7	Conclusie .....	67
8	Literatuurlijst .....	69



## Lijst van figuren

Figuur 1. De frontzone in West-Vlaanderen (1919).....	2
Figuur 2. Overzicht van het aantal tussen 2004 en 2014 door DOVO uitgevoerde ophalingen.....	3
Figuur 3. Schematische voorstelling van het principe van een magnetometer .....	6
Figuur 4. Schematische voorstelling van het werkingsprincipe van EMI sensoren .....	7
Figuur 5. Verloop van elektrische stroom in de zendspoel van een TDEM sensor.....	8
Figuur 6. Primaire en secundaire golven in de ontvangspoel van een EMI sensor .....	9
Figuur 7. De verschillende spoelconfiguraties schematisch .....	10
Figuur 8. Overzicht van de locatie van de drie proefvelden in Vlaanderen.....	13
Figuur 9. Voorbeeld van de magnetometer met de vijf gradiometers, GPS antenne en PDA .....	15
Figuur 10. Schematisch voorbeeld van de halfwaardebreedte (FWHM).....	16
Figuur 11. De zendspoel (T) en 4 ontvangspoelen (R) van de DUALEM-21S sensor.....	17
Figuur 12. Opstelling voor de survey met de DUALEM-21S sensor .....	17
Figuur 13. Bodemkaart met contouren van proefgebied 1 .....	19
Figuur 14. Luchtfoto op 16 juli 1918 (beeld 9386) van proefveld 1.....	20
Figuur 15. De ECa-metingen van proefveld 1.....	22
Figuur 16. Kaarten van de MSa-metingen van proefveld 1 .....	23
Figuur 17. Koperen elektriciteitskabels.....	23
Figuur 18. Gevonden munitie op proefveld 1 .....	24
Figuur 19. Bodemkaart met contouren van proefveld 2 .....	25
Figuur 20. Luchtfoto van proefveld 2 (24 maart 1917) .....	26
Figuur 21. de MSa-metingen van proefveld 2.....	27
Figuur 22. Kaarten van de ECa- metingen van proefveld 2.....	28
Figuur 23. Gevonden munitie op proefveld 2 .....	29
Figuur 24. Schema van de opstelling van een Livens projector .....	30
Figuur 25. Luchtfoto van proefveld 3 (3 januari 1918) .....	32
Figuur 26. Kaarten van de ECa-metinge van proefveld 3.....	33
Figuur 27. Luchtfoto van proefveld 4 (19382, Imperial War Museum) .....	34
Figuur 28. De gemodelleerde en geobserveerde diepte van de objecten in proefveld 2 .....	36
Figuur 29. De $\Delta$ MSa-respons van de 2HCP-spoelconfiguratie ten opzichte van de diepte .....	37
Figuur 30. Het verloop van de waarde van de anomalie boven drie verschillende objecten .....	37
Figuur 31. ECa-respons van de verschillende spoelconfiguraties op een transect.....	39
Figuur 32. Het verband tussen de ECa-respons en de diepte.....	40
Figuur 33. de $\Delta$ ECa-11PRP en $\Delta$ ECa-1HCP respons t.o.v. de diepte.....	41
Figuur 34. Stroomdiagram om de diepte van een metalen object te bepalen .....	42
Figuur 35. Detailbeeld van de indeling in diepte-intervallen op proefveld 2 .....	43
Figuur 36. Regressievergelijking voor de diepte ten opzichte van de positieve $\Delta$ ECa-1HCP.....	45
Figuur 37. het verband tussen de $\Delta$ ECa-2HCP-metingen en de diepte .....	46

Figuur 38. Kaarten met aanduiding van de locaties waar een metalen object aanwezig is.....	48
Figuur 39. De exponentiele relatie tussen de FEMP en de diepte van de objecten .....	49
Figuur 40. De waarde van de drie spoelconfiguraties op het transect .....	49
Figuur 41. De waarde van elke spoelconfiguratie ten opzichte van de massa .....	51
Figuur 42. de verschillende modellen met hun 90% betrouwbaarheidsintervallen .....	57
Figuur 43. Overzicht van de locatie en het diepte interval van de objecten op de vier velden. ...	62
Figuur 44. Overzicht van de respons die verkregen wordt bij twee verschillende objecten. ....	66

## Lijst van tabellen

Tabel 1. Dataset met omschrijving, massa en diepte van de objecten uit proefveld 1.....	21
Tabel 2. Dataset met omschrijving, massa en diepte van de objecten uit proefveld 2.....	30
Tabel 3. Dataset met omschrijving, massa en diepte van de objecten uit proefveld 3.....	32
Tabel 4. Objecten met een massa hoger dan 30 kg .....	35
Tabel 5. De objecten waarop de FWHM methode werd toegepast .....	35
Tabel 6. Vier objecten met dezelfde massa op een verschillende diepte .....	38
Tabel 7. De objecten met een positieve $\Delta 1HCP$ , via aflopende $\Delta 1HCP$ waarden gesorteerd .....	44
Tabel 8. Objecten uit proefveld 2 op dezelfde diepte met verschillende massa.....	47
Tabel 9. Per diepte-interval de Pearson correlatiecoëfficiënt van de modellen .....	52
Tabel 10. Per diepte-interval de RMSE (kg) van de modellen .....	53
Tabel 11. De gemiddelde gekwadrateerde fout van de modellen .....	54
Tabel 12. ANOVA van het massamodel voor objecten in de bouwvoor.....	56
Tabel 13. ANOVA van het massamodel voor objecten net onder de bouwvoor.....	56
Tabel 14. ANOVA van het massamodel voor objecten diep in de bodem.....	56
Tabel 15. Het aantal objecten per diepte interval en hun massa van proefveld 2.....	59
Tabel 16. Het aantal objecten per diepte interval en hun massa van proefveld 4.....	60



## Lijst van afkortingen

DOE	Depth of exploration
ECa	Schijnbare elektrische geleidbaarheid (Eng: apparent electrical conductivity)
EMI	Elektromagnetische inductie
FDEM	Frequentie-domein EMI-sensor
FEMP	Fused electromagnetic metal predictor
FWMH	Full width at half maximum
HCP	Horizontal coplanar
Hp	Primair magnetisch veld
Hs	Secundair magnetisch veld
IP	In-fase amplitude
LIN	Low Induction Number
MSa	Schijnbare magnetische gevoeligheid (Eng: apparent magnetic susceptibility)
PRP	Perpendicular
QP	Kwadratuur-fase amplitude
TDEM	Tijds-domein EMI-sensor
VCP	Vertical coplanar
WO I	De Eerste Wereldoorlog



## Samenvatting

100 jaar na het uitbreken van de Eerste Wereldoorlog is de West-Vlaamse bodem nog altijd niet gevrijwaard van gevaarlijke restanten van de oorlog. Er zijn sinds het einde van de oorlog ontelbare aantallen ongelukken gebeurd waarbij minstens 358 mensen het leven lieten. Tot vandaag mag er volgens de wet in België door particulieren niet actief gezocht worden naar deze gevaarlijke munitie.

In deze thesis werd onderzocht welke rol niet-invasieve bodemsensoren, zoals magnetometers en multi-sigitaal elektromagnetische inductie-sensoren (EMI), kunnen spelen in het opstellen van een methodologie voor het inschatten van de diepte en massa van metalen objecten in de ondergrond. Enkele velden in de voormalige frontzone werden met de verschillende bodemsensoren opgemeten. Tijdens een archeologisch vooronderzoek en een benadering door een ontmijningsfirma werden meerdere metalen voorwerpen geselecteerd voor het onderzoek.

De magnetometer heeft een grote gevoeligheid voor metaal waardoor er vaak een onoverzichtelijk beeld van de aanwezige metalen verkregen wordt. Daarom werd deze sensor als minder geschikt voor het opstellen van de methodologie gezien. De elektrische geleidbaarheidsmetingen van de EMI-sensor vertonen een eenduidiger beeld van de bodem. De anomalieën werden geclassificeerd als mogelijk veroorzaakt door objecten in de bouwvoor (0 tot 0.45 m), net onder de bouwvoor (0.45 tot 0.70 m) of dieper ( $> 0.70$  m) in de bodem. Na deze onderverdeling kon per diepte-interval een model opgesteld worden om de massa van de metalen voorwerpen in te schatten op basis van één of een combinatie van verschillende EMI-signalen. Voornamelijk voor de objecten in de bouwvoor en daar net onder geven de voorspellingsmodellen een bruikbare predictie van de massa van de metalen objecten.

De opgestelde methodologie werd vervolgens toegepast op enkele velden in of nabij de voormalige frontzone in de Westhoek. Daaruit volgde dat een veld dat in het centrum van de frontzone gelegen was naar schatting tot 2.8 ton metaal per hectare of zo'n 420 stukken metaal van verschillende grootte per hectare bevat. Bij velden aan de rand van de frontzone was dat naar schatting 0.5 tot 1 ton/ha, of 85 tot 175 stukken metaal per hectare. Veel van deze objecten zijn zwaarder dan 5 kg en kunnen mogelijk niet-ontplofte granaten zijn. Als er vanuit gegaan wordt dat alle objecten afgevuurde granaten zijn, en naar schatting 10 tot 15 % daarvan niet ontploft is, dan komt dat neer op 40 tot 60 niet-ontplofte granaten per hectare op het veld in het centrum van de frontzone. Of, geëxtrapoleerd naar de volledige frontzone, leidt dit tot een ruwe schatting van enkele honderduizenden niet-ontplofte projectielen die nog steeds aanwezig zijn, meestal net onder de bouwvoor.

Via de opgestelde methodologie kan op een niet-invasieve wijze de ondergrond van het voormalige frontgebied van WO I in kaart gebracht worden. Deze kennis kan als ondersteuning worden gebruikt voor de evaluatie, inrichting en dagelijks beheer van de voormalige frontzone, waarvoor een eenduidige regelgeving zich opdringt.





# 1 Inleiding

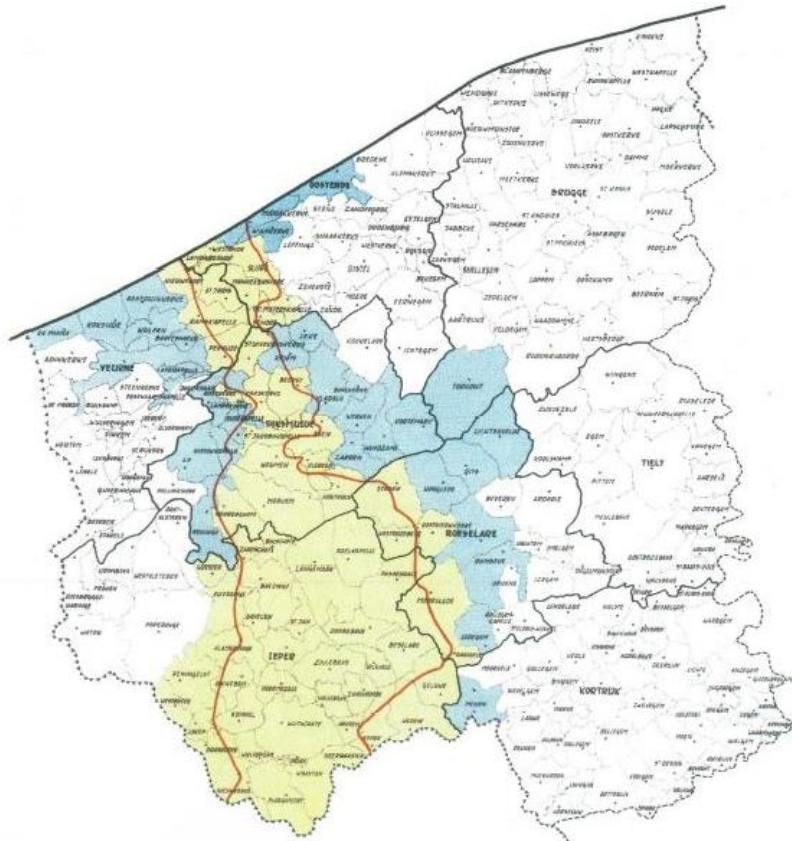
## 1.1 Probleemstelling

Een dag na het einde van de Eerste Wereldoorlog (WO I) viel het eerste slachtoffer in de Vlaamse velden van de frontzone door een gasgranaat die tijdens de oorlog niet was ontploft. Nadien zijn er in de Westhoek naar schatting 893 slachtoffers gevallen, waarvan 358 dodelijke, door ongelukken ten gevolge van onontpofte munitie die achterbleef in de ondergrond (Desreumaux, 2011).

De moord op de Oostenrijks-Hongaarse kroonprins Frans Ferdinand en zijn vrouw op 28 juni 1914 ontaarde in een ongezien dramatisch conflict. Vele landen, gebonden door allianties en onderlinge verdragen, werden meegesleurd in een oorlog die aan meer dan 8 miljoen soldaten het leven kostte. Het westfront van de oorlog werd gevormd in België en Frankrijk met aan de ene kant het leger van het Duitse Keizerrijk en aan de andere kant de geallieerden waaronder voornamelijk Britten en Fransen (Figuur 1). In de Westhoek geraakte de strijd in een impasse waarbij kilometerslange loopgravenstelsels in de bodem werden uitgebouwd.

Het exacte aantal granaten dat aan het westfront werd afgevuurd is onbekend, maar het moeten er vele miljoenen geweest zijn. Zo vuurden enkel de Britten al tot 4 miljoen granaten af in de dagen vóór de Derde Slag om Ieper (juli-november 1917) (Keegan, 2000). Vaak was het terrein zo modderig dat de projectielen zich in de bodem boorden zonder te ontploffen. In andere gevallen faalde het ontstekingsmechanisme. In totaal wordt geschat dat zo een 10 tot 15 % van het aantal afgevuurde projectielen bij inslag niet ontplofte (Karg, 2005).

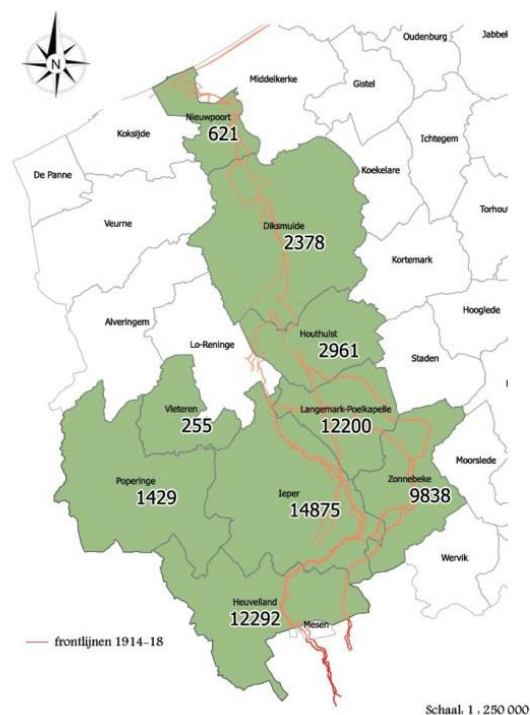
Op het einde van de oorlog in november 1918 was de Westhoek in België veranderd in een niemandsland. Volledige steden waren van de kaart geveegd en overal lag niet afgeschoten of niet-ontpofte munitie over het landschap verspreid. Hoewel er af en toe ontruimingsacties zijn geweest werd het gebied nooit volledig vrijgesteld van explosieven. Tot op vandaag is het verboden om zonder vergunning met metaaldetectoren, of op een andere wijze munitie in de bodem op te sporen. Wanneer door toeval op een gevaarlijk projectiel wordt gestoten moet de politie meteen worden ingelicht (artikels 5.1.1 t.e.m. 5.1.4 van het Decreet van 12 juli 2013 betreffende het onroerend erfgoed).



**Figuur 1. De frontzone in West-Vlaanderen (1919). Blauw: deels vernielde gemeenten . Geel: volledig vernielde gemeenten. De zone tussen de rode lijnen: volledig vernielde landbouwgronden (naar Viaene et al., 1958).**

Zo werd DOVO, de Belgische Dienst voor Opruiming en Vernietiging van Ontploffingstuigen, de voorbije tien jaar in totaal 56 849 keren door de politie opgeroepen om explosieven uit de Eerste Wereldoorlog in 9 frontgemeenten op te halen (Figuur 2). Bij vele van deze oproepen gaat het om meerdere explosieven waar landbouwers tijdens het ploegen op stootten en verzamelden aan de rand van hun veld. Elk jaar blijft men restanten van de Grote Oorlog bij landbouw- en infrastructuurwerken uit de bodem halen. Er wordt jaarlijks nog gemiddeld 250 ton niet-ontploffte munitie door DOVO geborgen. En dan zijn er ook nog de ongekende aantallen die door verzamelaars, koperzoekers, e.a. worden opgegraven en op de illegale handel belanden.

Het is duidelijk dat de sporen die WO I in het West-Vlaamse landschap achterliet nog niet helemaal verdwenen zijn. Dat is niet zonder risico: sinds 2000 werden opnieuw meerdere ongelukken geteld waarbij 6 mensen om het leven kwamen. Het kunnen detecteren en identificeren van metalen projectielen in de bodem is dus van belang om veilig invasieve werkzaamheden te kunnen uitvoeren voor allerlei toepassingen.



**Figuur 2. Overzicht van het aantal tussen 2004 en 2014 door DOVO uitgevoerde ophalingen van explosieven voor een aantal WO I frontgemeenten uit de Westhoek. Gemeenten zonder cijfers werden niet bevraagd.**

## 1.2 Doelstelling en methodiek

De doelstelling van deze thesis is het opstellen van een methodiek om op basis van metingen met niet-invasieve bodemsensoren een inschatting te maken van de diepte en massa van een metalen object in de bodem van de voormalige frontzone van WO I. Om hiertoe te komen zal gebruik gemaakt worden van de resultaten van een geofysische prospectie van enkele velden, uitgevoerd met een magnetometer en een EMI-sensor.

In de archeologie wordt een niet-invasieve geofysische prospectie vaak uitgevoerd met een magnetometer. Hoewel magnetometers zeer goed ferrometalen zoals ijzer tot op grote diepte in de bodem kunnen detecteren, is deze kracht vaak ook een zwakte. Naast de massieve niet-ontpofte explosieven zitten er namelijk ook ongevaarlijke metalen scherven in de bodem, die met een magnetometer moeilijk te onderscheiden zijn van massieve metalen objecten.

Elektromagnetische (EMI) methoden vertonen een groter potentieel om metalen objecten te karakteriseren en te categoriseren in vergelijking met magnetometrie. Elektromagnetische sensoren kunnen, door het meten van de reactie van de bodem en objecten op elektromagnetische velden, een uitspraak doen over de schijnbare elektrische geleidbaarheid (apparent electrical conductivity of ECa) en de schijnbare magnetische gevoeligheid (apparent magnetic susceptibility of MSa) van een bodemvolume. Zij reageren zowel op ferro- als non-

ferrometalen en hebben reeds bewezen zeer geschikt te zijn voor het lokaliseren van metalen objecten in de bodem (Casey en Baertlein, 1999; Saey et al., 2011).

Meestal worden tijds-domein EMI-sensoren (zoals de meeste metaaldetectoren) gebruikt voor het opsporen van explosieven. Een nadeel van deze sensoren is dat er maar tot een diepte van ongeveer 20 cm metalen objecten kunnen opgespoord worden (Guelle et al., 2003). Landbouwers ploegen met de tijd steeds dieper in de bodem. Waar de bodem vroeger tot 1 spadesteek (20 cm) diep omgeploegd werd gebeurt dat nu met zware machines die de bodem omwoelen tot 40 cm diepte. Een detectie met een conventionele metaaldetector is dus niet in staat om alle objecten te detecteren die in de ploeg terecht zullen komen waardoor het veilig uitvoeren van landbouwactiviteiten niet gegarandeerd kan worden.

Frequentie-domein EMI-sensoren met meerdere ontvangspoelen, zoals de DUALEM sensoren (DUALEM Inc., Milton, Ontario, Canada), worden minder gebruikt voor het detecteren en karakteriseren van munitie. Momenteel worden deze EMI-sensoren ingezet bij de uitvoering van een GOA (Geconcentreerde Onderzoeksacties) project rond 'niet-invasieve landschapsarcheologie van de Grote Oorlog'. Dit project integreert drie verschillende disciplines (archeologische teledetectie, geofysisch bodemonderzoek en historische en visuele landschapsanalyse) om op een niet-invasieve wijze het ondergrondse erfgoed van de voormalige oorlogszone te karakteriseren binnenin het huidige landschap. Verschillende frequentie-domein EMI-sensoren worden ingezet bij het geofysisch onderzoek aangezien deze hun nut voor het detecteren van archeologische restanten in de bodem reeds bewezen hebben (Saey et al., 2012; Saey et al., 2013; Simpson et al., 2009).

Maar ook bij deze EMI-methoden kan een grote dichtheid aan kleine metalen scherven de metingen verstoren. Zo kunnen onderliggende structuren, zoals loopgraven, door het vele metaal gemaskeerd worden wat het interpreteren van de onderliggende of subtielere sporen moeilijker maakt. Saey et al. (2011) ontwikkelden reeds een parameter die de aan- of afwezigheid van metaal in de metingen van de EMI-sensor met meerdere ontvangspoelen bepaalt en paste dit toe op verschillende velden binnenin de WO I-frontzone in de Westhoek. In deze thesis zal daarop verder gewerkt worden. Er zal immers gepoogd worden om, na het aanduiden van metalen objecten, een diepte-inschatting te maken van deze metalen objecten op basis van hun specifieke signatuur in de verschillende EMI-signalen. Daarna zal aan de hand van een opgestelde relatie met de massa, de massa van elk object gemodelleerd worden. Deze techniek zal vervolgens op verschillende velden in de frontzone toegepast worden. Op die manier kan ook een grove inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid achtergebleven metaal in de bodem van de Westhoek.

## 2 Literatuur

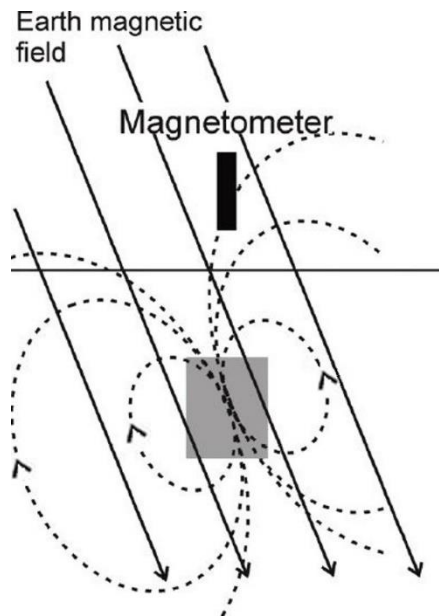
### 2.1 Technieken voor metaaldetectie

#### 2.1.1 Magnetometrie

Metalen objecten die uit ijzer bestaan, kunnen gedetecteerd worden met magnetometer systemen. Magnetometers zijn geofysische sensoren die de sterkte van het totale magnetisch veld (in tesla, T) op een bepaalde plaats meten. Het zijn passieve sensoren omdat ze enkel registreren en zelf geen signaal uitzenden, of een magnetisch veld opwekken. Op elke plaats op aarde heeft het aardmagnetisch veld een homogene richting en sterkte. In België bedraagt die sterkte ongeveer 48000 nT. Als er zich op die plaats een medium bevindt met een hoge magnetische gevoeligheid, dan zal dat medium polariseren en zelf een magnetisch veld creëren. Dit fenomeen heet geïnduceerd magnetisme en resulteert in een afwijking in het aardmagnetisch veld dat wordt gemeten door de magnetometer (Figuur 3). Metalen objecten die uit ferrometaal bestaan zullen een eigen magnetisch veld uitzenden, non-ferrometalen (bv koper of brons) doen dit niet. Daarom kunnen met behulp van een magnetometer enkel ferrometalen zoals ijzer opgespoord worden. Afwijkingen in de metingen van het totaal magnetisch veld kunnen ook afkomstig zijn van remanent magnetisme. Dat laatste komt voor wanneer er, ook zonder een extern magnetisch veld, een magnetisch veld door het medium wordt uitgestuurd. Dit soort magnetisme kan tot 10 maal groter zijn dan het geïnduceerd magnetisme. Thermo-remanent magnetisme ontstaat wanneer een object dat zich boven de Curie-temperatuur (ongeveer 600°C (Johnson, 2006)) bevindt afkoelt tot onder die temperatuur. Boven de Curie-temperatuur kunnen al de magnetiseerbare mineralen in het object polariseren en zich richten volgens het aardmagnetisch veld. Onder de Curie-temperatuur kan dit niet meer en het object kan een afwijking op het omringende aardmagnetisch veld creëren. Dit gebeurt bijvoorbeeld wanneer bakstenen worden gemaakt. De afwijkingen die de restanten van een bakstenen muur in de bodem creëren kunnen door een magnetometer opgevangen worden. Ook magnetiet en ijzeroxiden zijn gevoelig voor thermo-remanent magnetisme. Aangezien zij veel in de bovenste bodemlaag voorkomen zullen antropogene verstoringen van de bodem ook gemeten kunnen worden. Daarom wordt deze sensor vaak gebruikt bij archeologische prospectie.

Bij het interpreteren van de metingen moet er rekening gehouden worden met het feit dat de grootte van het aardmagnetisch veld niet altijd constant blijft in de tijd. Het optreden van magnetische zonnewinden kan leiden tot variaties over seconden tot uren (Johnson, 2006). Om dit te normaliseren worden magnetometers vaak in gradiometer-opstelling gebruikt. Dit wil zeggen dat twee magnetometers boven elkaar worden geplaatst. Door de magnetische gevoeligheid van beiden van elkaar af te trekken wordt voor de dagelijkse variatie in het aardmagnetisch veld gecompenseerd in de metingen. Er bestaan verschillende soorten

magnetometers, in deze thesis wordt gebruik gemaakt van een fluxgate type magnetometer. Die meet de verticale component van het magnetisch veld en is gevoelig tot 0.1 nT.



**Figuur 3. Schematische voorstelling van het principe van een magnetometer die de variatie op het totale magnetisch veld meet (naar Simpson et al., 2009)**

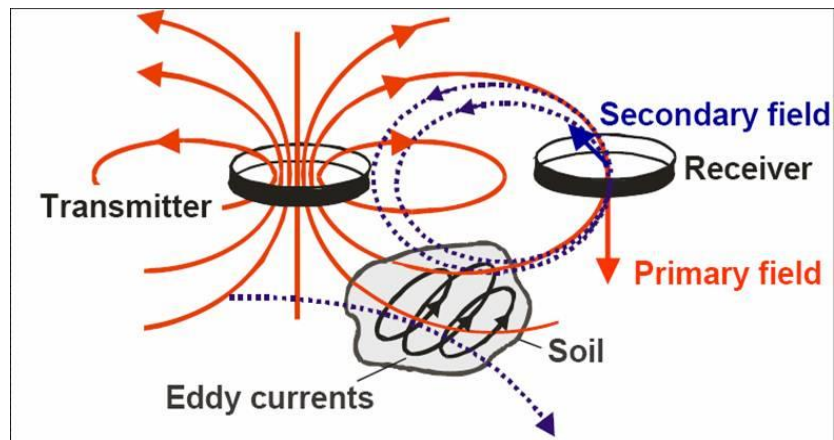
Het grootste nadeel van magnetometers met betrekking tot metaaldetectie is dat deze heel gevoelig zijn voor ferrometaal, waardoor de anomalie alles wat zich vlakbij het metalen object bevindt maskeert.

### **2.1.2 Elektromagnetische inductie (EMI) survey**

EMI-sensoren meten de respons van een medium op alternerende elektromagnetische velden. Elektromagnetische velden bestaan uit een elektrische en een magnetische vectorcomponent die loodrecht op elkaar staan. Het gedrag van elektromagnetische velden wordt beschreven door de wetten van Maxwell, waarvan hier voornamelijk de wet van Faraday en de wet van Ampère van belang zijn. De wet van Faraday beschrijft hoe een tijdsvariabel magnetisch veld een elektrisch veld induceert terwijl de wet van Ampère het ontstaan van magnetische velden als gevolg van een elektrische stroom verklaart. Magnetische velden kunnen opgewekt worden door een elektrische stroom of door een veranderend elektrisch veld.

EMI-sensoren zenden en ontvangen elektromagnetische velden via spoeldraden met een geleidende kern. Bij deze methode, ook wel de Slingram methode genoemd, zal aan de hand van een aangelegde elektrische wisselstroom door de zendspoel een veranderend magnetisch veld opgewekt worden (conform de wet van Ampère). Dit primair magnetisch veld  $H_p$  plant zich voort

in alle richtingen rondom de zendspool en zal in de ontvangstspool een elektrische stroom opwekken (wet van Faraday). Naast de elektrische stroom afkomstig van het primair magnetisch veld zal ook een elektrische stroom afkomstig van een secundair magnetisch veld door de ontvangstspool gemeten worden. Dat secundair magnetisch veld  $H_s$ , wordt in de bodem geïnduceerd door kleine wervelstroompjes ('*eddy currents*') die opgewekt worden door het alternerend primair magnetisch veld doorheen de bodem (Figuur 3). De uiteindelijke stroom in de ontvangstspool, het resultante effect van  $H_p$  en  $H_s$ , wordt door de sensor gemeten en opgeslagen.



**Figuur 4. Schematische voorstelling van het werkingsprincipe van EMI sensoren**

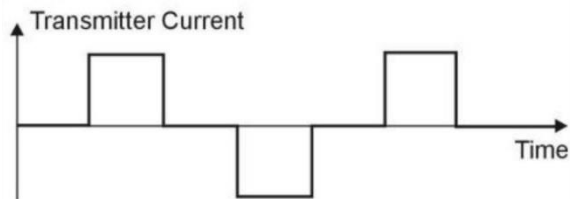
Zowel de elektrische geleidbaarheid als de magnetische gevoeligheid van de bodem, of van een object in de bodem, dragen bij tot de grootte van de wervelstroompjes. Deze wervelstromen kunnen opgewekt worden door een plaatselijke conductor die zich in een minder geleidende omgeving bevindt, zoals een metalen object in de bodem, waardoor er een discrete anomalie geproduceerd wordt. Ze kunnen ook het resultaat zijn van het geladen bodemvolume zelf. Uiteindelijk is het een combinatie van beide, discrete conductors en de bodem, die de wervelstroompjes opwekken (Milsom, 2003).

EMI-sensoren kunnen opgedeeld worden in tijds-domein EMI-sensoren (TDEM) en frequentie-domein EMI-sensoren (FDEM). De meeste metaaldetectors zijn TDEM-sensoren.

#### **2.1.2.1 Tijds-domein EMI-sensoren**

TDEM-sensoren sturen in tijdsintervallen bij vaste frequentie het primair magnetisch veld uit. De sensor meet het secundair magnetisch veld enkel in afwezigheid van het primair magnetisch veld, dus wanneer er geen signaal wordt uitgezonden. In tegenstelling tot in FDEM-sensoren kan in TDEM-sensoren de zendspool ook als ontvangstspool fungeren. Door het produceren van een sterke elektrische stroom (1 tot 20 A) in korte pulsen (20-40 ms) zendt de zendspool van een

tijds-domein EMI-sensor een primair magnetisch veld uit. De stroom die in pulsen wordt geproduceerd wordt zo gemodificeerd dat ze symmetrische vierkante golven vormt (Figuur 4).



**Figuur 5. Verloop van elektrische stroom in de zendspool van een TDEM sensor**

Na het uitzenden van een puls verplaatst het primair magnetisch veld zich door de bodem waar het in sterkte afneemt. Het voltage dat op verschillende tijdstippen in de ontvangstspool gemeten wordt is afkomstig van het secundair magnetisch veld en is evenredig met de snelheid van afname van de wervelstromen, opgewekt door het primair magnetisch veld. De snelheid van afname kan gekoppeld worden aan de elektrische geleidbaarheid, magnetische gevoeligheid en vorm en grootte van een object in de bodem (Pasion, 1996). Op die manier kunnen bepaalde metalen objecten in de bodem gekarakteriseerd of onderscheiden worden. Elk type object produceert een eigen karakteristieke curve. Door het koppelen van een bepaalde curve aan een granaat met een gekende vorm, meestal een lange smalle cilinder, kan een onderscheid gemaakt worden tussen granaten en ongevaarlijke metalen scherven van diverse afmetingen in de bodem (Khadr et al., 1998).

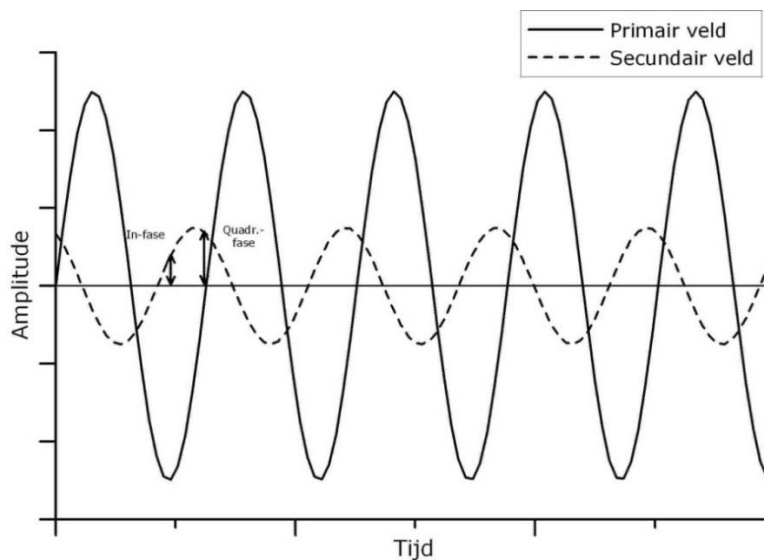
De EM61, ontwikkeld door Geonics, is een voorbeeld van een TDEM-sensor. De EM61 kan zowel ferro- als non-ferrometaal detecteren. Om een object te kunnen detecteren moet de elektrische geleidbaarheid van het object voldoende verschillend zijn van de elektrische geleidbaarheid van de omringende materie. In zeer geleidende bodems is de EM61 dus niet geschikt voor het detecteren van metaal. Ook is het niet altijd mogelijk kleine objecten te detecteren, omdat hun secundair magnetisch veld te snel afzwakt om opgevangen te kunnen worden (McNeill en Bosnar, 2000).

### **2.1.2.2 Frequentie-domein EMI-sensoren**

In tegenstelling tot een TDEM-sensor zendt een FDEM-sensor continu een magnetisch veld ( $H_p$ ) uit. Het secundaire magnetische veld wordt telkens slechts op één tijdstip gemeten. De elektrische stroom die beide velden ( $H_p$  en  $H_s$ ) in de ontvangstspool genereren is evenredig met de veranderende magnetische velden. De FDEM-sensor is in staat om het primair en secundair magnetisch veld van elkaar gescheiden te houden. Het primair magnetisch veld heeft een sinusoidale vorm, het secundair heeft dezelfde frequentie maar een verschillende amplitude. Doordat het secundair magnetisch veld een bepaalde tijd nodig heeft om te ontstaan en de ontvangstspool te bereiken is er ook een faseverschil tussen beide velden. De sensor meet de



verhoudingen van het secundair magnetisch veld t.o.v. de amplitude van het primair magnetisch veld op de in-fase amplitude (IP) en de kwadratuur-fase amplitude (QP). Deze verhoudingen,  $(H_s/H_p)_{QP}$  en  $(H_s/H_p)_{IP}$ , worden gegeven in ppt ('parts per thousand'). De IP amplitude komt voor wanneer het primair veld zijn maximale amplitude heeft en de QP amplitude wanneer het primair veld gelijk is aan nul (Figuur 6). Onder bepaalde voorwaarden, de LIN ('Low Induction Number') condities, kunnen de QP en IP respons aan resp. de elektrische geleidbaarheid en de magnetische gevoeligheid van het medium gekoppeld worden (McNeill, 1980a). Aangezien de output gelinkt is aan een bepaald bodemvolume wordt er in de LIN condities gesproken van de schijnbare elektrische geleidbaarheid (ECa, 'apparent electrical conductivity') en de schijnbare magnetische gevoeligheid (MSa, 'apparent magnetic susceptibility').



**Figuur 6. Primaire en secundaire golven in de ontvangstspool van een EMI-sensor met indicatie van de IP en QP**

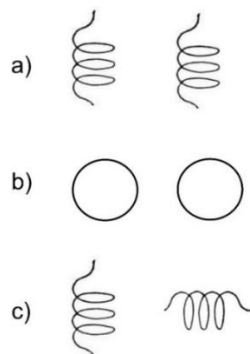
De elektrische geleidbaarheid is een maat voor de beschikbaarheid en mobiliteit van elektrische ladingen in een materiaal. Elektrische geleidbaarheid wordt in siemens per meter uitgedrukt, maar door zijn lage waarde in de bodem wordt meestal millisiemens per meter gebruikt (mS/m). In de bodem stroomt elektriciteit voornamelijk door de vloeistoffen in de poriën (McNeill, 1980a). Hoe hoger de bodemtemperatuur of hoe meer zout, klei, vocht of humus een bodem bevat, hoe minder weerstand de elektrische ladingen ondervinden waardoor de elektrische geleidbaarheid toeneemt. Ook compactie, waarbij de ionen zich preferentieel in de kleine poriën verzamelen zorgt voor een toename van de elektrische geleidbaarheid. De elektrische geleidbaarheid daalt bij de aanwezigheid van niet-poreus materiaal zoals bij bijvoorbeeld een begraven muur of een grindlaag. Zowel ferro- als non-ferrometalen zijn zeer goede geleiders. De elektrische geleidbaarheid beïnvloedt de grootte van de wervelstromen die in de bodem worden opgewekt. Hoe hoger de elektrische geleidbaarheid van de bodem hoe groter de wervelstromen en hoe sterker het secundair magnetisch veld wordt.

De magnetische gevoeligheid geeft de mate weer waarop een materiaal een aanwezig magnetisch veld kan versterken door zelf te magnetiseren. Materialen met een hoge magnetische gevoeligheid zijn ferrometalen waaronder vooral magnetiet. Non-ferrometalen (zoals koper en aluminium) hebben geen verhoogde magnetische gevoeligheid waaruit volgt dat plaatsen met zowel een hoge EC als een hoge MS wijzen op de aanwezigheid van ferrometaal. Bodemdeeltjes zullen door het primair magnetisch veld van de EMI-sensor gepolariseerd worden (Milsom, 2003) en op die manier ook een bijdrage leveren aan de eigenschappen van het secundair magnetisch veld.

De dieptegevoeligheid van een FDEM-sensor is afhankelijk van de afstand tussen de zend- en ontvangspoel, de oriëntatie van beide spoelen en de frequentie van de aangelegde elektrische stroom in de zendspoel (Thiesson et al., 2009). Om verschillende bodemvolumes te kunnen opmeten kan de frequentie gevarieerd worden (multi-frequentie FDEM), maar deze methode blijkt in de praktijk niet probleemloos te verlopen (Brosten et al., 2011). Een andere manier is het aantal ontvangspoelen en hun oriëntatie en afstand ten opzichte van de zendspoel (multi-signaal FDEM) te variëren. Van deze laatste mogelijkheid werd in deze thesis gebruik gemaakt.

#### 2.1.2.2.1 Multi-signaal FDEM

Een multi-signaal FDEM bestaat uit een zendspoel met meerdere ontvangspoelen die op een verschillende afstand tot de zendspoel staan. Ook de oriëntatie van de spoelen kan verschillen (Figuur 6). Als beide spoelen parallel t.o.v. elkaar staan (beide verticaal of horizontaal gelegen) zijn ze maximaal gekoppeld. Daaruit volgt dat die configuratie zeer gevoelig is aan verschillen in afstand tussen de twee spoelen (Milsom, 2003). De meest gebruikte maximaal gekoppelde opstellingen zijn de HCP (*'horizontal co-planar'*) en VCP (*'vertical co-planar'*) configuraties. In minimaal gekoppelde systemen wordt het primair veld niet gemeten door de ontvangspoel omdat deze daarvoor verkeerd georiënteerd is t.o.v. de zendspoel. Daardoor zijn deze opstellingen gevoelig voor kleine kantelingen van de spoelen waardoor ze niet meer orthogonaal t.o.v. elkaar staan (Milsom, 2003). Een voorbeeld is de PRP (*'perpendicular'*) configuratie.



Figuur 7. a) de horizontal coplanar (HCP), b) de vertical coplanar (VCP) en c) de perpendicular (PRP) configuraties schematisch

Elke configuratie vertoont een andere diepte-respons in de bodem. Door een asymptotische benadering van de wetten van Maxwell stelde McNeill (1980b) relatieve diepte-respons curves op van de QP-respons voor de VCP-, HCP- en PRP-configuratie van FDEM-sensoren in een homogene bodem:

$$ECa_v = \sum_{i=1}^N EC_i (R_v(x_i) - R_v(x_{i-1})) \quad (1)$$

$$ECa_h = \sum_{i=1}^N EC_i (R_h(x_i) - R_h(x_{i-1})) \quad (2)$$

$$ECa_p = \sum_{i=1}^N EC_i (R_p(x_i) - R_p(x_{i-1})) \quad (3)$$

Waarbij  $EC_i$  de elektrische geleidbaarheid in de laag  $i$  is.  $x_i$  is de genormaliseerde diepte, bepaald door de verhouding van de werkelijke diepte ( $z_i$ ) en de afstand tussen de twee spoelen. De cumulatieve diepte-respons curves werden door McNeill (1980b) en Wait (1962) berekend (vergelijking 4 t.e.m. 6).

Door de afstand tussen beide spoelen ( $s$ ) te vergroten kan het magnetisch veld dieper in de bodem dringen. Om een respons op verschillende dieptes te verkrijgen kan dus de oriëntatie en/of de afstand tussen de zend- en ontvangspoel gevarieerd worden.

$$R_v(x_i) = 1 - \left(4 * \frac{z_i^2}{s^2} + 1\right)^{-0.5} \quad (4)$$

$$R_h(x_i) = 1 - \left(4 * \frac{z_i^2}{s^2} + 1\right)^{0.5} + 2 * \frac{z_i}{s} \quad (5)$$

$$R_p(x_i) = 2 * \frac{z_i^2}{s^2} \left(4 * \frac{z_i^2}{s^2} + 1\right)^{-0.5} \quad (6)$$

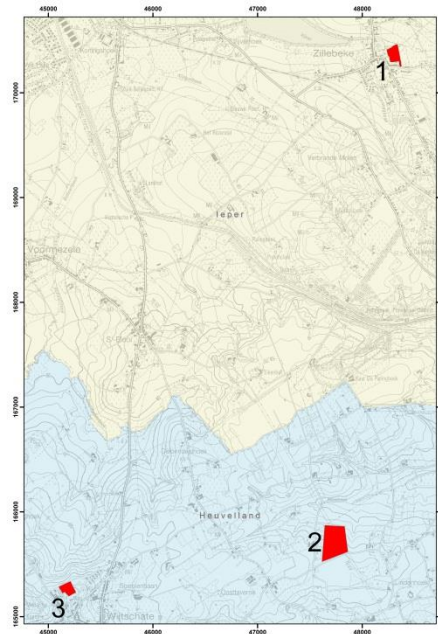
Bovenstaande vergelijkingen gelden enkel binnen de LIN voorwaarden die onder FDEM reeds werden aangehaald. Deze voorwaarden gelden enkel bij een lage waarde van het inductienummer. Het inductienummer wordt bepaald door de verhouding van de afstand tussen de spoelen ten opzichte van de indringdiepte ('*skin depth*'). De indringdiepte is de diepte waarop de elektromagnetische golven zijn verzwakt tot  $1/e$  van hun oorspronkelijke amplitude. De grenswaarden waarbinnen aan de LIN condities voldaan is verschillen van bron tot bron (Wait, 1962; McNeill, 1980). Callegary et al. (2007) vonden dat wanneer er niet aan de LIN condities

voldaan is de DOE (*'depth of exploration'*) van de sensor afhankelijk is van de ECa van het materiaal waarover gemeten wordt. De DOE wordt arbitrair vastgelegd op de diepte waarop de cumulatieve respons 70 % bedraagt (Saey et al., 2009). Deze diepte kan bij een HCP configuratie tot 25 % in gebieden verzadigd met zout water (Delefortrie et al., 2014a) of zelfs 50 % afnemen bij een verhoogde ECa (Callegary et al. 2007). IJzer heeft een EC van ongeveer 10000 mS/m waardoor het inductienummer hoog wordt en buiten de grenzen van de LIN condities valt. Daardoor kan er voor de diepte bepaling van metalen objecten geen gebruik gemaakt worden van bovenstaande vergelijkingen.

### 3 Materialen en methoden

#### 3.1 Studiegebieden en opstellen dataset

Voor het verzamelen van data werden in totaal drie velden in de voormalige WO I-frontzone opgemeten met een magnetometer en EMI-sensor (Figuur 8). Op twee van de proefvelden (proefveld 1 en 3) werden achteraf tijdens een archeologische prospectie proefsleuven doorheen het veld getrokken. Alle metalen objecten met relevante massa en diepte die daarbij werden aangetroffen werden aan de dataset toegevoegd. Om deze dataset van metalen objecten uit te breiden en voldoende spreiding van massa en diepte te verzekeren werden op het overige proefveld (proefveld 2) clusters van metalen scherven uit WO I op verschillende dieptes in de bodem ingegraven. Door een eerdere meting van het veld konden hiervoor geschikte locaties geselecteerd worden die geen sporen van metaal bevatten. Op die manier konden op de meting, die na het ingraven van het metaal uitgevoerd werd, de afwijkingen duidelijk gelinkt worden aan de begraven scherven. Voorgaande metingen gebeurden in een tijdspanne van juli 2014 tot februari 2015. Enkele weken na de laatste meting werd proefveld 2 deels benaderd door de Nederlandse ontmijningsfirma REASeuro. Ook de metalen objecten die hierbij werden blootgelegd, werden als data gebruikt voor het opstellen van een methodologie voor de diepte- en massabepaling.



**Figuur 8. Overzicht van de locatie van de drie proefvelden in Vlaanderen. 1 is proefveld 1 in Zillebeke, 2 en 3 zijn proefveld 2 en 3 in Wijtschate**

Een toepassing van de methodologie gebeurde op een vierde locatie in de gemeente Ploegsteert waar zich drie velden bevonden met elk een verschillende graad van opruiming door

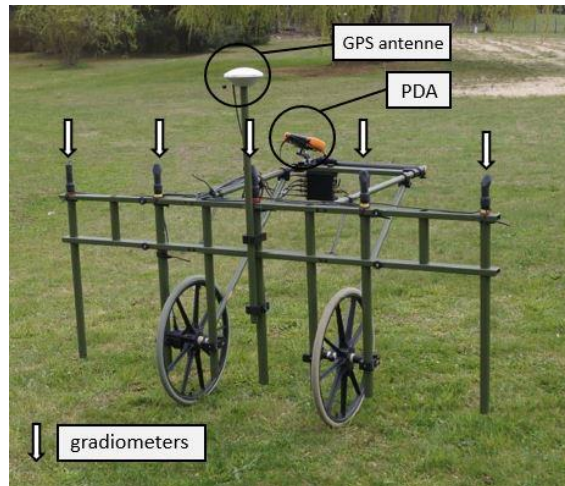
landbouwkundige activiteiten. Ook op proefveld 2 in Wijtschate dat tijdens de oorlog zwaar beschoten is geweest werd het model toegepast.

Voor het opstellen van de dataset werden in totaal 27 objecten geselecteerd uit de eerste drie proefvelden. Alle 27 objecten hebben een massa kleiner dan of gelijk aan 32 kg en bevonden zich tussen 30 cm en 130 cm diep onder het bodemoppervlak. De diepte van de objecten werd met een vouwmeter op het veld bepaald, achteraf met behulp van georeferentie orthofoto's berekend of aan de hand van metingen met een RTK DGPS bepaald. De genoteerde diepte is telkens de diepte van het midden van het object tot aan het bodemoppervlak. De orthofoto's werden gecreëerd door het combineren van een groot aantal foto's, getrokken uit verschillende hoeken van het object. Voor het georefereren werd de software van PhotoModeler gebruikt. De massa van de objecten werd met een standaard weegschaal bepaald. Voor de bepaling van de locatie van de objecten werd gebruik gemaakt van een RTK DGPS met FLEPOS (Flemish Positioning Service) correcties (Agiv). De geselecteerde EMI en magnetometerrespons op de locaties van de objecten werd al dan niet verschoven naar de locatie met de meest extreme afwijking van de corresponderende anomalie, er werden dus geen geïnterpoleerde waarden gebruikt (zie verder).

## **3.2 Magnetometrie**

### **3.2.1 Instrument**

Voor de magnetometrische detectie van de proefvelden werd een fluxgate type magnetometer in gradiometer-modus (Sensys GmbH) gebruikt. Deze magnetometer bevat een waterdichte 'Personal Digital Assistant' (PDA) en een RTK DGPS om de coördinaten van de metingen op te slaan met een accuraatheid van ongeveer 1 cm. De PDA toont op een scherm de positie van de magnetometer en slaat de data in combinatie met de overeenkomstige locatie op. De metingen werden uitgevoerd met 5 fluxgate gradiometers van 1 meter lang die op een afstand van 0.5 m van elkaar op een kar geplaatst werden en vervolgens over het veld getrokken (Figuur 9). De gradiometers werden loodrecht op de bodem geplaatst en kunnen tot +/- 10000 nT registreren. Op proefveld 1 gebeurde dit voortbewegen manueel, op proefveld 2 werd de kar aan een quad gebonden, van vering voorzien en zo voortgetrokken. Enkel de meetdata van proefveld 1 en 3 werden voor analyse gebruikt.



**Figuur 9. Voorbeeld van de magnetometer met de vijf gradiometers, GPS antenne en PDA**

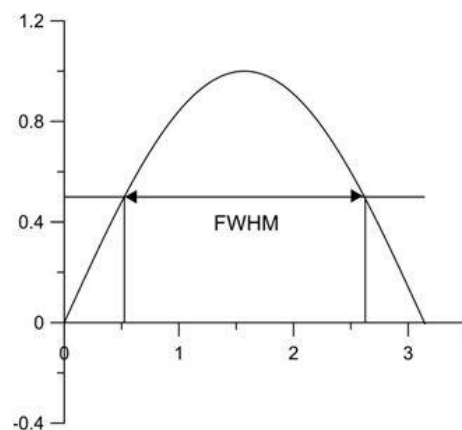
### **3.2.2 Invloedsfactoren**

Naast ferrometalen hebben nog veel andere factoren een invloed op de metingen van een fluxgate magnetometer. Zo kan instrumentele ruis, de inherente ruis geproduceerd in het toestel zelf, de metingen verstoren. Verder is er culturele ruis, afkomstig van bijvoorbeeld verkeer in de omgeving, en operatorruis, gecreëerd door de operator die het toestel bijvoorbeeld niet altijd perfect recht houdt tijdens de metingen. Er is ook de ruis die gedurende de dag in veranderende mate wordt geproduceerd, bijvoorbeeld door temperatuurwisselingen en dagelijks variërende magnetische zonnwinden en bodemruis. Bodemruis is afkomstig van alle andere magnetische materialen in de bodem (bv. magnetiet). Er kan ook ruis op de metingen komen door bijvoorbeeld elektriciteitsmasten in de omgeving, of metalen objecten die op de operator zelf aanwezig kunnen zijn (Aspinall et al, 2008).

### **3.2.3 Dataverwerking**

De dieptebepaling aan de hand van de metingen van de magnetometer werd gedaan volgens de FWHM methode (*'full width at half maximum'*). Deze stelt dat de diepte van een object een invloed uitoefent op de breedte van de anomalie van een dipool (Aspinall et al, 2008). Wanneer een begraven object een dipool genereert is de diepte van het object gecorreleerd met de halve breedte (*'half-width'*) van het signaal gemeten door 1 enkele gradiometer. Meer bepaald wordt de diepte, vanaf de onderzijde van de gradiometer tot aan het object in de bodem, gelijkgesteld aan de afstand tussen de twee snijpunten van de positieve anomalie met de halve hoogte van de positieve amplitude (Figuur 10). Dit principe werd toegepast op de objecten uit proefveld 2. Om de diepte van het object zelf te bekomen moet de afstand van de onderzijde van de gradiometer tot het bodemoppervlak van de totale diepte afgetrokken worden. Op proefveld 2 was deze

afstand ongeveer 0.3 m. Deze afstand was niet constant gedurende het hele onderzoek door bijvoorbeeld onregelmatigheden op het bodemoppervlak. Er moet op gewezen worden dat de vergelijking werd opgesteld voor de meting met 1 gradiometer. De metingen op proefveld 2 gebeurden met 5 gradiometers die op 0.5 m van elkaar geplaatst. Aspinall et al. (2008) deden een gelijkaardig experiment en men kwam uit dat de berekende diepte van de gradiometers op 0.5 m afstand van elkaar weinig verschilden met deze van 1 gradiometer, tot een diepte van ongeveer 0.5 m. Voor diepere objecten werd de diepte met de meerdere gradiometers onderschat. Op proefveld 1 gaf de magnetometer veel anomalieën weer waardoor de dipool verbonden aan een bepaald object niet of moeilijk kon worden geïdentificeerd. Om die reden werd enkel met de magnetometrie data uit proefveld 2 gewerkt.



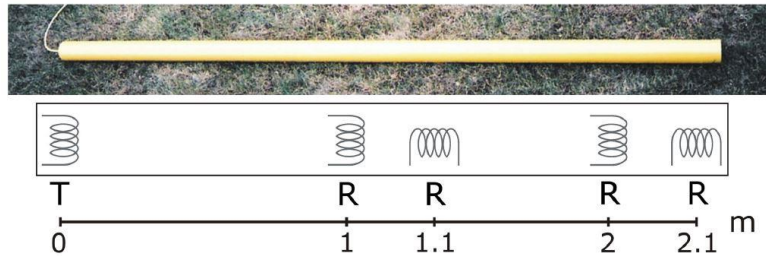
Figuur 10. Schematisch voorbeeld van de halfwaardebreedte (FWHM)

### 3.3 Elektromagnetische inductie survey

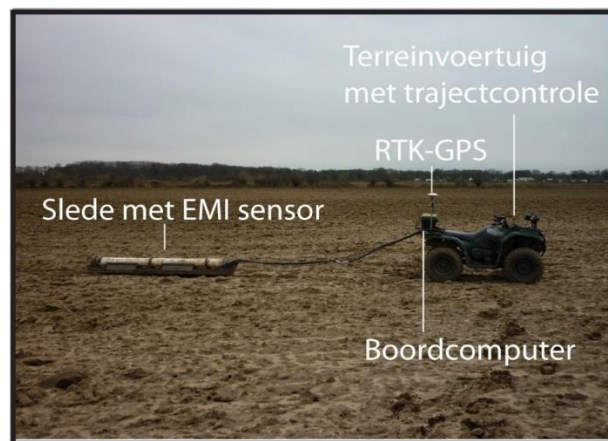
De elektromagnetische inductie survey werd uitgevoerd met een DUALEM-21S sensor (DuaLEM Inc. 2006). Deze uitvoering bestaat uit een zendspoel die opereert op een frequentie van 9 kHz, en 4 ontvangspoelen in de HCP- en PERP-configuratie opgesteld (Figuur 11). In totaal zijn er dus 4 spoelconfiguraties: 1 m HCP, 1.1 m PERP, 2 m HCP en 2.1 m PERP.

De sensor werd op een slede uit polyethyleen geplaatst en door een quad over het onderzoeksgebied getrokken aan 6-10 km/h (Figuur 12). Elke 8<sup>ste</sup> van een seconde werden de 4 metingen van de spoelen door een veldcomputer geregistreerd en opgeslagen. Om de metingen te georefereren werd net als bij de magnetometrie een RTK DGPS gebruikt met correctie via het FLEPOS netwerk. Deze GPS sloeg elke seconde een meting op. De accuraatheid van dit systeem is ongeveer 0.01 m. De metingen werden op elk terrein genomen op parallelle lijnen op een afstand van 1 m van elkaar.





**Figuur 11.** De zendspoel (T) en 4 ontvangtspoelen (R) van de DUALEM-21S sensor, telkens op resp. HCP- en PRP-configuratie met de zendspoel



**Figuur 12.** Opstelling voor de survey met de DUALEM-21S sensor

### 3.3.1 Invloedsfactoren

Er zijn verschillende factoren, bijvoorbeeld omgevingsfactoren of factoren eigen aan de sensor, die een invloed kunnen hebben op de metingen van de EMI-sensor. Een voorbeeld is de aanwezigheid van hoogspanningsmasten of andere elektrische draden in de buurt van het proefveld. Ook de weersomstandigheden tijdens de meting kunnen een invloed op het eindresultaat uitoefenen. De DUALEM-21S werd reeds in de fabriek gekalibreerd waardoor kalibratie op het veld niet meer nodig is. Toch kan de sensor door temperatuurswijzigingen gedurende de meetperiode een afwijking of drift vertonen. Door het vergelijken van de metingen met een referentielijn, getrokken dwars over de parallelle rijlijnen op het einde van de metingen kan het effect van de drift geëlimineerd worden (Delefortrie et al., 2014b). Zoals elke sensor heeft ook de DUALEM-21S te maken met ruis op de metingen. Deze hebben, afhankelijk van spoelconfiguratie en proefveld, een grootte in de orde van 0.5 tot 1 mS/m. Aangezien de metingen naast van de ruis ook nog van veel andere factoren afhangen werd er verder in de thesis geen rekening gehouden met deze ruis.

### 3.3.2 Dataverwerking: interpolatie en filteren van de data

De ruwe data, opgeslagen door de veldcomputer, werd gesorteerd en per spoelconfiguratie werd een shift-correctie doorgevoerd die corrigeert voor de afstand van het middelpunt van de sensor tot de GPS antenne. Omdat er niet op elk punt een meting voorhanden is moet er geïnterpoleerd worden op plaatsen waar dit niet het geval is. Er werd gekozen voor het interpolatie-algoritme 'ordinary point kriging' (Goovaerts, 1997). Daarvoor werd het experimenteel variogram van elk van de ECa- of MSa-metingen per spoelconfiguratie berekend. Aan de hand van dit experimenteel variogram kan een variogrammodel opgesteld worden dat gebruikt wordt in de interpolatie van de data. Al de variogrammodellen die werden opgesteld hadden geen nugget variantie. Verder bestonden de modellen allemaal uit een lineaire en een sferische component. Er werd op grid geïnterpoleerd van 0.1 x 0.1 m.

Om de metingen die op verschillende velden tijdens verschillende weersomstandigheden plaatsvonden met elkaar te vergelijken moet de bodemvariabiliteit uit de data gefilterd worden. Er werd gekozen voor een mediaanfilter die aan elke pixel de mediaan van de waarde van de omliggende pixels toekent. Het zoekvenster was hier 4.1 op 4.1 m groot. De gefilterde data werd vervolgens van de oorspronkelijke geïnterpoleerde data afgetrokken (vergelijking (7)) waardoor een kaart werd bekomen waarop enkel op de anomalieën wordt gefocust. Dit werd voor zowel de ECa- als de MSa-metingen gedaan voor elke configuratie.

$$\Delta ECa = ECa - ECa_{filter} \quad (7)$$

De FEMP, opgesteld door Saey et al. (2011), is een combinatie van de ECa-responsen van 1HCP, 2HCP, 11PERP en 21PERP die aangeeft of er een metalen object aanwezig is in de bodem. Aangezien de 21PERP respons hier niet werd gebruikt wegens te veel storing op de metingen, werd de FEMP berekend zonder 21PERP. Volgende formule werd hier voor gebruikt:

$$FEMP = 2.05 * \Delta ECa_{11PRP} - 0.82 * \Delta ECa_{1HCP} - 1.89 * \Delta ECa_{2HCP} \quad (8)$$

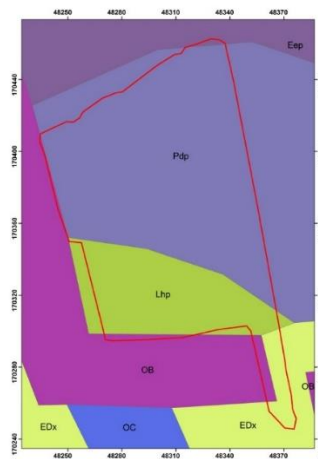
De FEMP werd zo ontwikkeld dat er bij negatieve waarden geen metalen object aanwezig is. Een positieve waarde is een indicatie van de aanwezigheid van een metalen object tot 1 m diep in de bodem (Saey et al., 2011).

## 4 Resultaten

### 4.1 Zillebeke: proefveld 1

#### 4.1.1 Inleiding en historiek

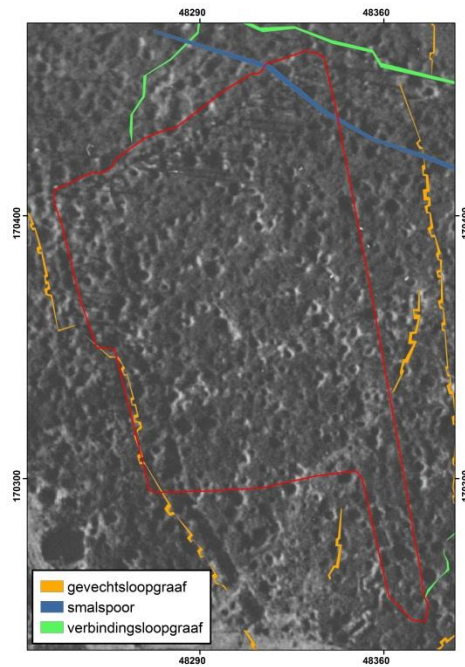
Het eerste deel van de data werd verzameld tijdens een archeologische prospectie in de Zandvoordestraat te Zillebeke met als centrale coördinaten: 50° 50' 4"N, 2° 55' 29"E. De oppervlakte van het veld beslaat 1.5 ha. In het centrale deel van het onderzoeksgebied varieert de bodem, volgens de Belgische bodemkaart, van vochtig tot nat zandleem, bodemtypes Pdp en Lhp. In het noorden en uiterste zuiden bestaat de bodem uit een matig tot natte kleibodem van de types EDx en Eep (Figuur 13).



**Figuur 13. Bodemkaart met contouren van proefgebied 1**

Historisch vooronderzoek op basis van 38 georeferencierde luchtfoto's wees uit dat het geviseerde gebied tijdens de Eerste Wereldoorlog tot tweemaal toe vlakbij het front gelegen was (Stichelbaut, 2014). Een eerste keer was in de periode tussen de Tweede (april-mei 1915) en Derde (juli-november 1917) Slag om Ieper. Bij de Tweede Slag om Ieper werd voor het eerst chloorgas in de strijd ingezet (22 april 1915) waardoor de Duitsers ongeveer 4 tot 5 km wonnen en de frontlinie zich in een nauwere boog rond Ieper bevond. Het veld bevond zich dan op 1200 m van het front. Duitse luchtfoto's uit maart 1916 tonen een Britse loopgraaf in de zuidwestelijke hoek van het veld (Figuur 14). Na de Derde Slag om Ieper schoof het front opnieuw verder weg van het proefveld in oostelijke richting. In de periode tussen 1916 en 1917 werd een verbindingloopgraaf aangelegd ten noorden van het veld. De tweede keer dat het proefgebied in de buurt van het front kwam te liggen was na het Duitse voorjaarsoffensief in 1918 waarbij het gebied in Duitse handen viel. Luchtfoto's tonen een volledig vernield landschap (Figuur 14). In die

periode werd op de luchtfoto's nog een kleine gevechtloopgraaf in het oosten van het veld opgemerkt (Stichelbaut, 2014).



**Figuur 14. Luchtfoto op 16 juli 1918 (beeld 9386) van het volledig vernielde proefveld 1 met aanduiding sporen (Imperial War Museum Box Collection Box 144 7b series 68)**

#### **4.1.2 Interpretatie en validatie van het bodemonderzoek**

De geïnterpoleerde ECa-metingen van de 1HCP-, 2HCP- en 11PERP-configuratie zijn te zien op Figuur 15 a, b en c. Figuur 16 toont de MSa-metingen van 1HCP en 2HCP. Op zowel de ECa- als MSa-metingen is een lineaire structuur waar te nemen die van west naar oost loopt (1) (Figuur 15). Tijdens de prospectie werd deze structuur aangesneden en bleek het om koperen elektriciteitskabels te gaan (Figuur 17). Gezien de oriëntatie van de kabels lijkt de kabel richting Maple Copse en Sanctuary Wood (en verder naar de voorste frontlijnes) te voeren waar het een of meerdere onbekende structuren van elektriciteit voorzag (Bracke, 2015). De hogere waarden in het noordoosten van het gebied en in het meest zuidelijke deel kunnen verklaard worden door de nattere kleibodem die zich daar bevindt. Op de ECa-1HCP en ECa- en MSa-2HCPmetingen wordt ook een plaatselijke verhoging van het signaal waargenomen in het westen van het veld. Op de ECa-2HCPmeting is deze het duidelijkst.

De loopgraaf in het zuidwesten van het veld is te zien op de metingen (2) (Figuur 16). Tijdens de prospectie werden in de loopgraaf verschillende objecten aangetroffen waaronder een put met 31 Britse Mills n5 handgranaten. Er werden op het veld meerdere exemplaren niet-ontploffte munitie gevonden (Figuur 18). Naast de handgranaten ging het hierbij om een Britse 6 inch

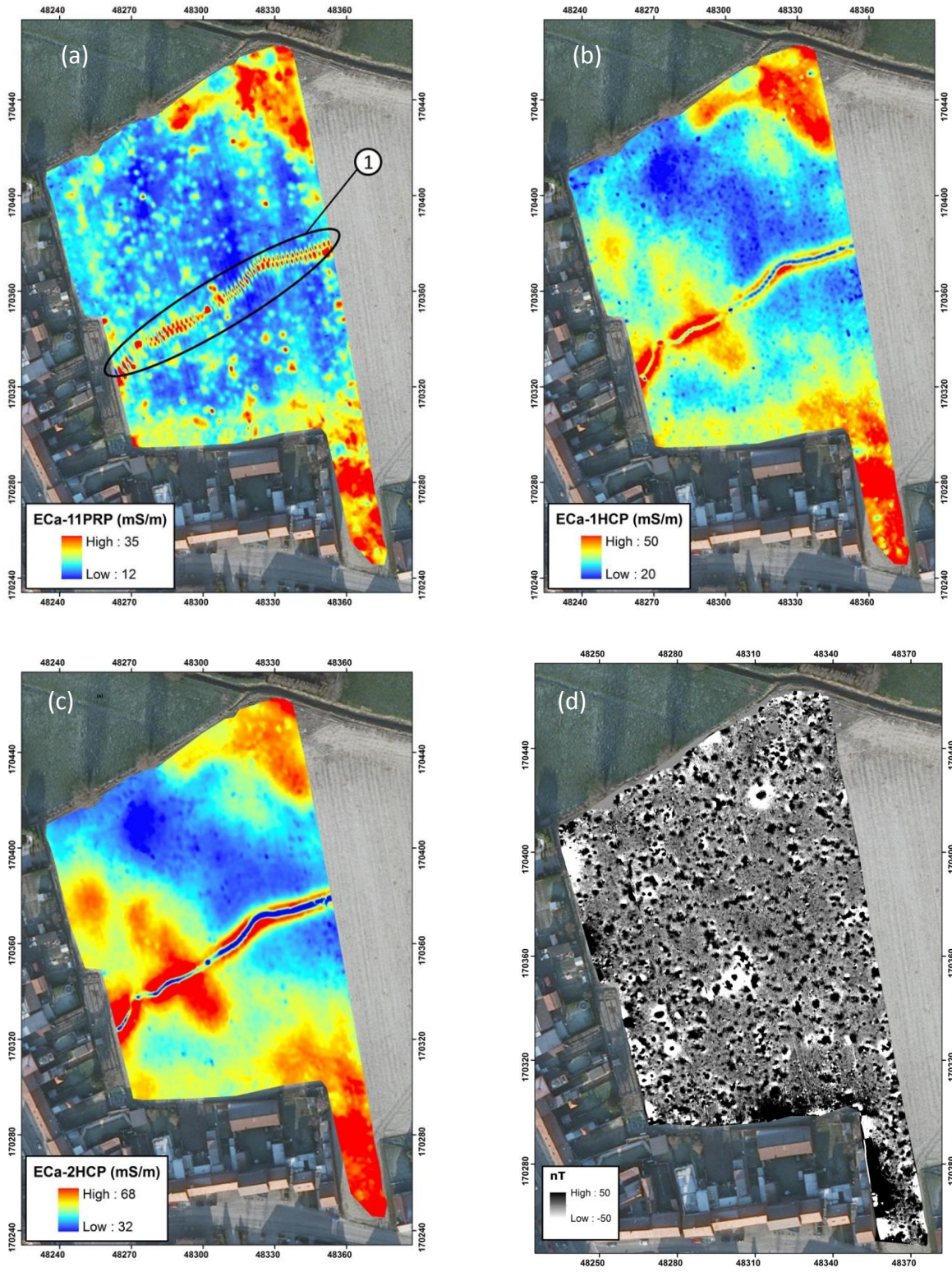
granaat (lengte 51 cm), een Britse 4.5 inch granaat (lengte 34 cm) die vaak met loden bolletjes gevuld waren (shrapnel). Zij werden meestal met een tijdsmechanisme in volle vlucht tot ontploffing gebracht. Daarop werd de inhoud met hoge snelheid uit het projectiel geschoten waardoor elk loden bolletjes als een kogel fungeerde. Ook een Duitse 10.5 cm (lengte 34.6 cm) werd tijdens de opgravingen blootgelegd. Dit zijn de tegenhangers van de Britse 4.5 inch projectielen. Deze granaten kunnen ook zowel met shrapnel als met zuiver explosief gevuld zijn. Er werden verder ook Britse 6 inch projectielen gevonden (lengte 51 cm). Deze projectielen zijn gevuld met explosief.

Op de metingen met de magnetometer (Figuur 15d), valt onmiddellijk de afwezigheid van de elektriciteitskabel op die in de EMI-metingen zeer duidelijk te zien is. De elektriciteitskabel bestond uit koperen bedrading, non-ferrometaal, wat verklaart waarom de magnetometer dit object niet kon detecteren. De ‘spikkels’ of kleine puntanomalieën op de metingen, worden vaak veroorzaakt door kleinere metalen objecten in de bodem.

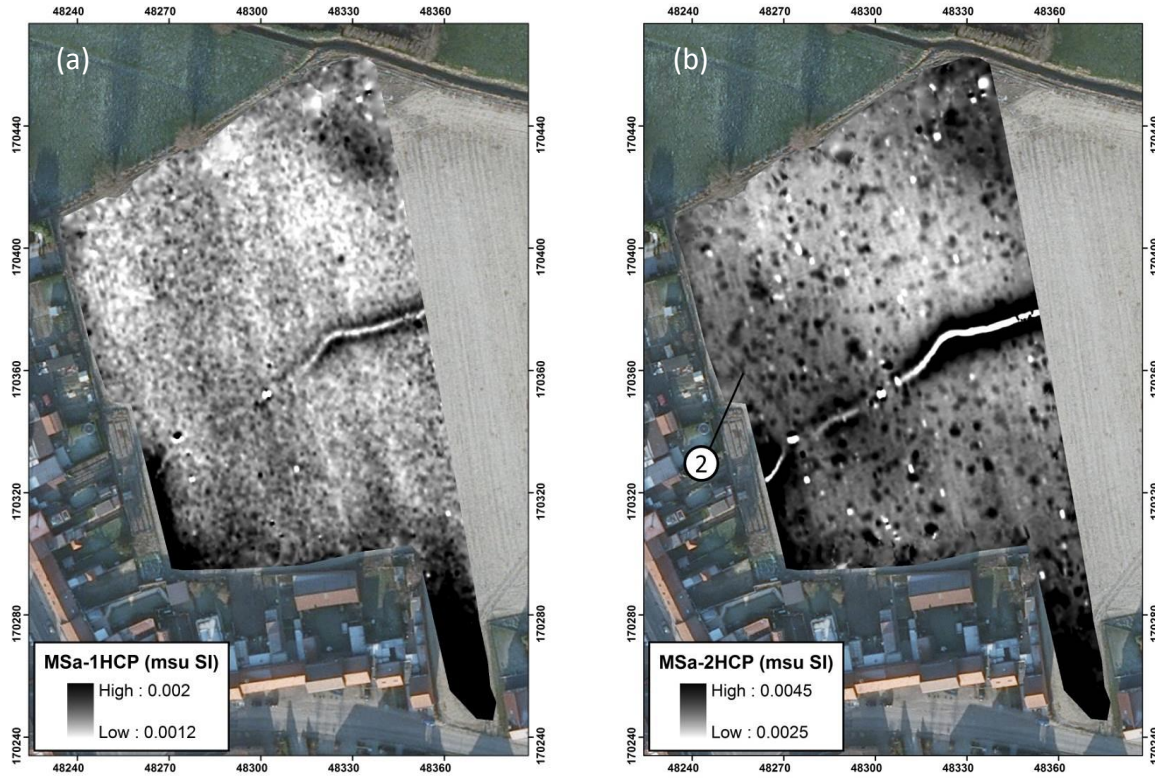
Er werden in totaal 11 opgegraven metalen objecten bij de verwerking gebruikt (Tabel 1). Acht van deze objecten zijn niet-ontplofte munitie. Object 3 en 7 zijn scherven van ontplofte granaten. Object 9 is een onderdeel van een smalspoor. Er liep tijdens WO I dan ook een smalspoor door de noordoostelijke hoek van het veld (Figuur 14).

**Tabel 1. Dataset met omschrijving, massa en diepte van de objecten uit proefveld 1. Wanneer de omschrijving cursief staat gaat het om niet-ontplofte munitie**

<b>Id</b>	<b>Omschrijving</b>	<b>m (kg)</b>	<b>z (m)</b>
1	<i>Duitse 10.5 cm</i>	15.7	0.75
2	<i>Britse 4.5'</i>	15.8	0.80
3	scherf	0.4	0.50
4	<i>Britse 4.5'</i>	15.8	0.55
5	<i>Britse 4.5'</i>	15.8	0.65
6	<i>Britse 4.5'</i>	15.8	0.50
7	scherf 10x3 cm	0.3	0.55
8	<i>31 Britse handgranaten</i>	5.3	0.80
9	smalspoor	9.0	0.75
10	<i>Britse 4.5'</i>	15.8	0.45
11	<i>Duitse 10.5 cm</i>	15.7	0.75



Figuur 15. De ECa-metingen van de (a) 11PRP-, (b) 1HCP- en (c) 2HCP-spoelconfiguratie en (d) magnetometrie van proefveld 1



Figuur 16. Kaarten van de MSA-metingen van de (a) 1HCP- en (b) 2HCP-spoelconfiguratie in proefveld 1



Figuur 17. Koperen elektriciteitskabels



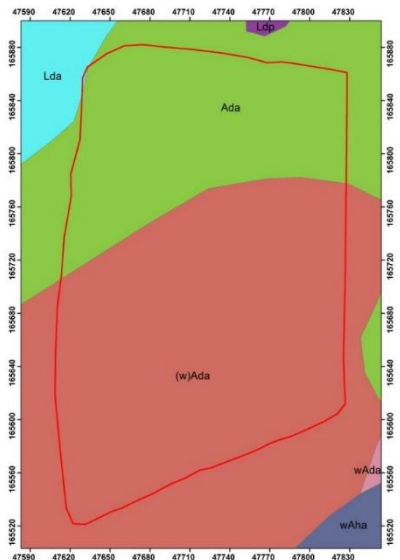
Figuur 18. (a) Britse 6 inch granaat (b) Britse 4.5 inch granaat, (c) Duitse 10.5 cm granaat, (d) Britse Mills handgranaten

## 4.2 Wijtschate: proefveld 2

### 4.2.1 Inleiding en historiek

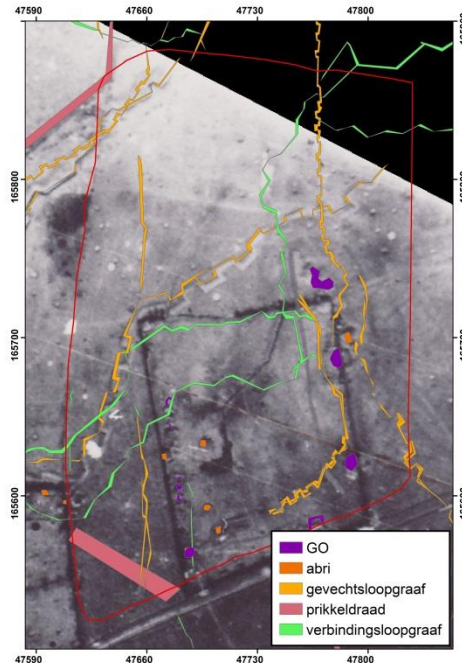
Het tweede proefveld is gesitueerd aan de Houthemstraat, ten oosten van Wijtschate. Dit is het onderzoeksgebied waar metalen scherven werden ingegraven en de Nederlandse ontmijningsfirma een deel van het veld benaderde en vrijstelde van explosieven. Deze handelingen situeerden zich in het oostelijke deel van het veld. Voor de toepassing van het diepte- en massamodel werd het volledige veld onderzocht. Het gebied is 6.5 ha groot en heeft als centrale coördinaten 50° 47' 33"N, 2° 55' 2"E. De bodem wordt volgens de Belgische bodemkaart geclassificeerd als een matig natte leembodem met een textuur B horizont (Ada). In het zuiden van het gebied komt daar nog een klei-zand substraat op een diepte tussen 75 en 125 cm bij ((w)Ada).





**Figuur 19. Bodemkaart, met aanduiding van de substraten, van het proefveld in Wijtschate, Houthemstraat**

Tussen 23 mei 1915 en 16 augustus 1918 werd het gebied op 36 luchtfoto's vastgelegd. Na de Eerste Slag om Ieper waarna de oorlog in een patstelling uitmondde, bevond het proefgebied zich op 2 km ten zuiden van de frontlinie in Sint-Elooi. Het veld was in Duitse handen en maakte deel uit van de Wijtschateboog, een uitstulping van de Duitse frontlinie in de frontlinie van de Geallieerden. Het veld bevindt zich op een helling op het oosten van de heuvelrug tussen Mesen en Wijtschate. Door deze positie was het een strategische plaats tijdens het verloop van de oorlog, het lag namelijk uit het zicht van de Britten. In 1916 gebruikten de Duitsers het veld voor de opslag van ammunitie en grote artilleriewapens in een bunkerachtige structuur. In de lente van 1917 creëerden de Duitsers de 'Sehnenstellung', een tweede verdedigingslinie. Op het onderzoeksgebied werden 2 loopgraven, parallel aan elkaar, uitgegraven (Figuur 20). Luchtfoto's laten uitschijnen dat het slechts oppervlakkige loopgraven betrof. Eind 1915, tijdens de Slag om Mesen brachten de Britten verschillende ondergrondse mijnen tot ontploffing, waardoor de Duitsers achteruit weken. Het front schoof op tot pal op het veld. In juni 1917 verplaatste het front zich nog verder oostwaarts. De twee aanwezige loopgraven werden verbindingsloopgraven die rechtstreeks naar het front toeliepen. Begin 1918, tijdens het Duitse voorjaarsoffensief, kwam het veld opnieuw in Duitse handen terecht. In totaal was het 10 maanden in Britse handen geweest. Er werden geen nieuwe structuren op de luchtfoto's aangetroffen.

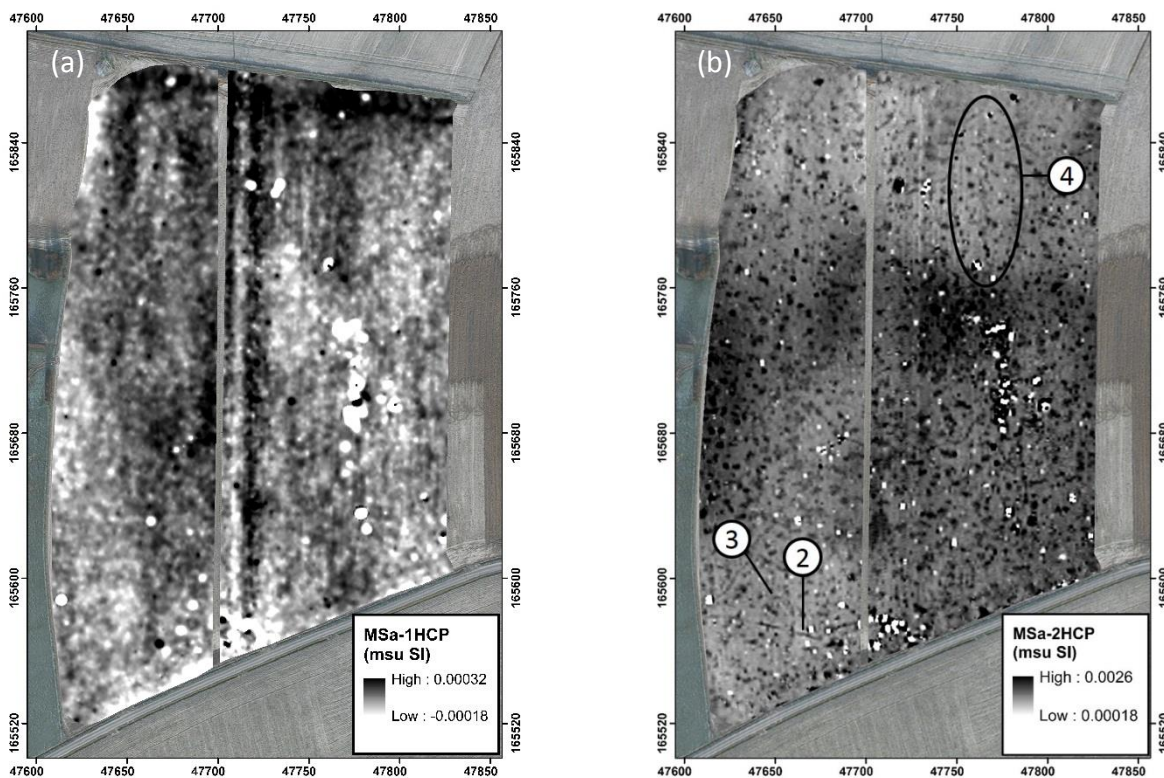


**Figuur 20. Luchtfoto van proefveld 2 (24 maart 1917) met aanduiding van enkele sporen. GO = geschutsopstelling (Bayerisches Hauptstaatsarchiv Karton 13)**

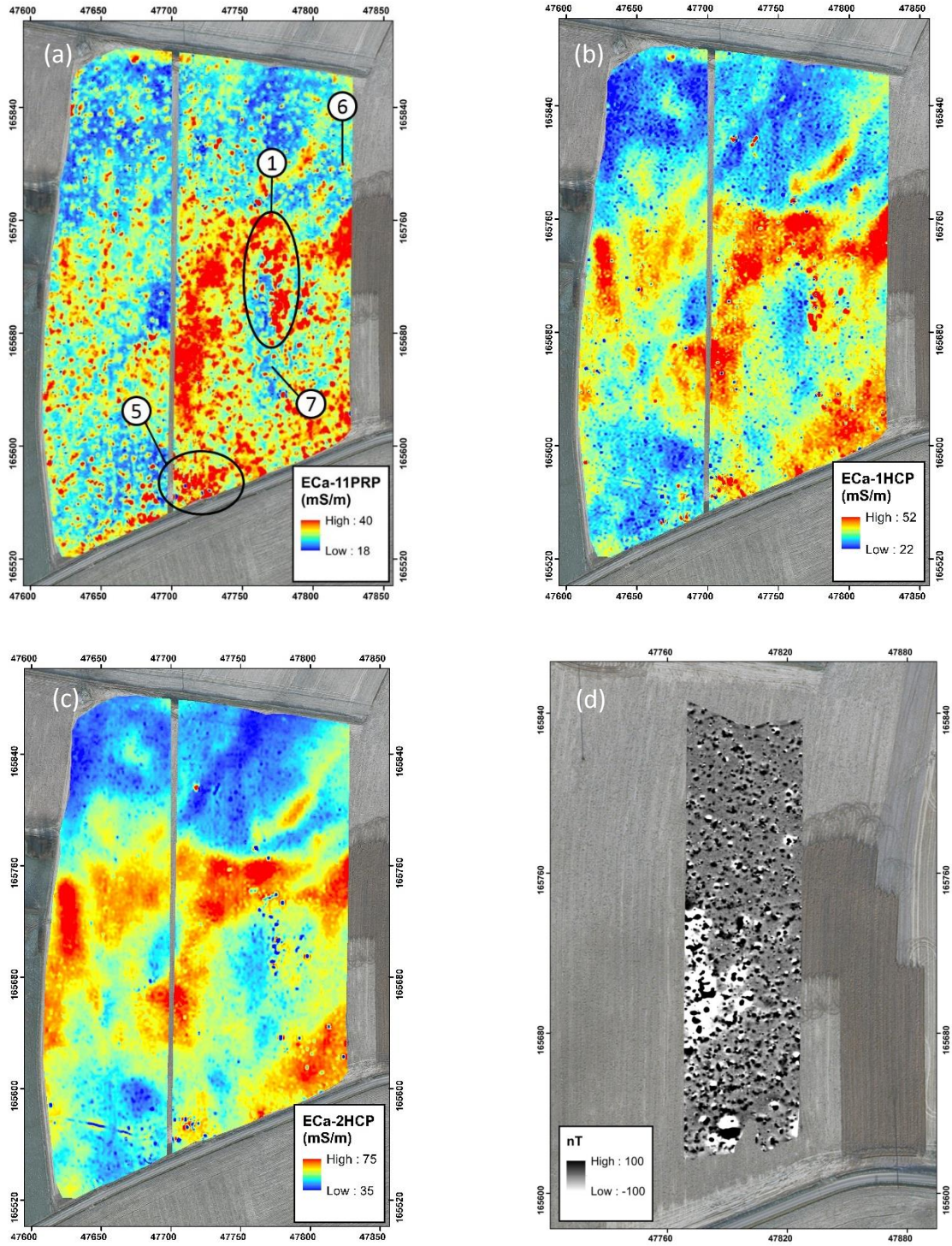
#### **4.2.2 Interpretatie en validatie van het bodemonderzoek**

De MSA-metingen van de 1HCP- en 2HCP-configuraties zijn te zien in Figuur 21. Ook de ECa-metingen van de 1HCP-, 2HCP- en 11PRP-spoelconfiguraties en de magnetometer metingen worden weergegeven (Figuur 22). Enkel de oostelijke helft van het veld werd met een magnetometer onderzocht. De sterk positieve anomalieën centraal in het veld zijn waarschijnlijk afkomstig van bunkers met bewapend beton (1) (Figuur 22a). Zulke structuren werden ook op de luchtfoto's waargenomen (Figuur 20). Tijdens de benadering door de Nederlandse firma werden in die zone veel anomalieën gekoppeld aan resten van golfplaten die tijdens de oorlog als versteviging dienden voor loopgraven. De donkere zones centraal in het gebied (Figuur 22) zijn te wijten aan de textuurvariaties in de ondergrond. Onderaan in het westen van het veld zijn sporen te zien van de prikkeldraad of kabels die op basis van de luchtfoto's werd aangeduid. De prikkeldraad is het duidelijkst te zien in de ECa-metingen van de 1HCP-spoelconfiguratie en de ECa- en MSA-metingen van de 2HCP-configuratie (2) (Figuur 21b, 22b en 22c). De verschillende loopgraven zijn niet heel duidelijk in de metingen te zien. Op de MSA-metingen van de 2HCP-configuratie (Figuur 21b) zijn duidelijk sporen te zien van zowel gevechtloopgraven als verbindingsloopgraven die ook op de luchtfoto's werden aangeduid. Een voorbeeld is de gevechtloopgraaf die over bijna de hele lengte van het veld loopt in het westen in noord-zuid oriëntatie (3) (Figuur 21b) en een gevechtloopgraaf in het noorden van het veld, men kan zelf de gekartelde vorm in de metingen herkennen (4). Veel sterke anomalieën in het zuiden van het

veld bleken afkomstig te zijn van Livens projectoren (5) (Figuur 22a). Dit zijn tot 50 kg zware metalen buizen die door de Britten ontwikkeld waren om cilindervormige tanken gevuld met ontvlambare of giftige gassen naar de vijand af te schieten (Figuur 24). Er werden verschillende types niet-ontplofte munitie gevonden waaronder kisten met 96 Britse Mills handgranaten, een Duitse chemische granaat, een 21 cm Duits artilleriegeschut en een 24 cm Duitse spoorweggranaat (Figuur 23). De twee laatste worden aangeduid met resp. (6) en (7) op Figuur 19a. De chemische granaat kan mogelijk mosterdgas, of Yperiet, bevatten. Dit is een toxisch gas dat sterk blaartrekkend werkt en kan leiden tot blindheid en doofheid. De andere mogelijke chemische ladingen van de granaat zijn stikgasen, zoals fosgeen of gassen op basis van arseen.

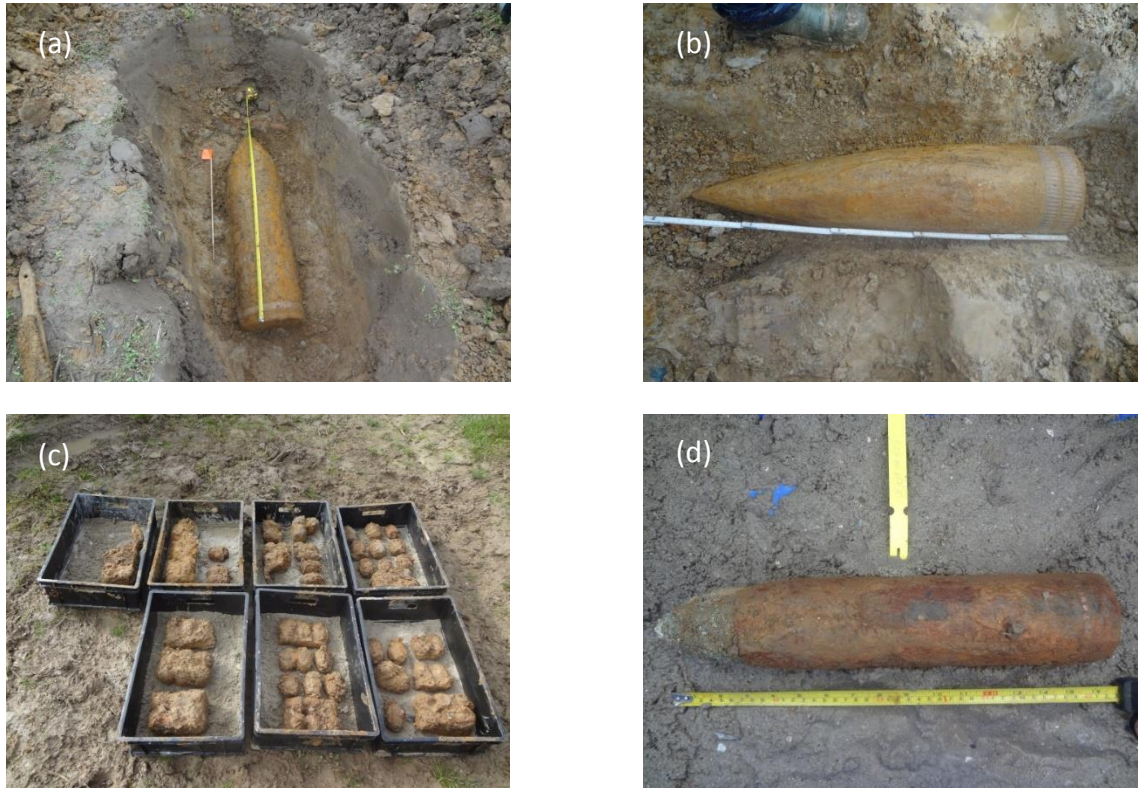


Figuur 21. de MSa-metingen van de (a) 1HCP- en (b) 2HCP-spoelconfiguratie op proefveld 2

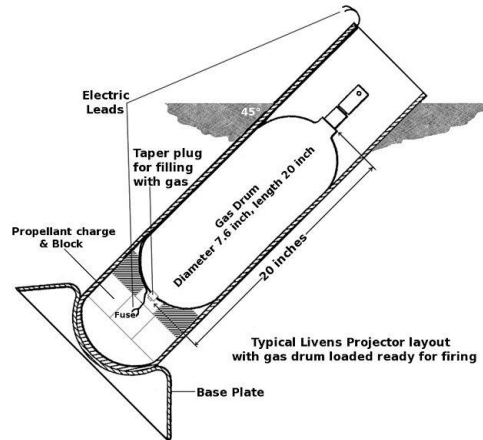


**Figuur 22. Kaarten van de ECa- metingen van de (a) 11PRP-, (b) 1HCP- en (c) 2HCP-spoelconfiguratie en magnetometer (d) metingen in proefveld 2**

Er werden in totaal 13 objecten toegevoegd aan de dataset. Acht daarvan zijn clusters van scherven die werden ingegraven op locaties waar voordien geen metaal aanwezig was. Onder de overige vijf objecten zijn de 96 Britse handgranaten, zij zaten op een diepte verspreid van 0.80 m tot 1.40 m. De andere objecten waren ongevaarlijke scherven van granaten, onbekende metalen structuren of schroefpiketten. Schroefpiketten werden gebruikt om prikkeldraad aan te bevestigen.



**Figuur 23. (a) 21cm Duits artilleriegranaat, (b) 24cm Duits spoorweggeschut, (c) kisten met Britse Mills handgranaten, (d) 7.7 cm Duitse chemische granaat**



Figuur 24. Schema van de opstelling van een Livens projector met daarin een met gas gevulde cilinder (naar Jones S., 2007)

Tabel 2. Dataset met omschrijving, massa en diepte van de objecten uit proefveld 2. Wanneer de omschrijving cursief staat gaat het om niet-ontplofte munitie

Id	Omschrijving	m (kg)	z (m)
12	scherven	16	0.61
13	scherven	16	0.37
14	scherven	32	0.32
15	scherven	20	0.39
16	scherven	25	0.43
17	scherven	25	0.43
18	scherven	10	0.52
19	scherven	5	0.47
20	halve obus	9	0.44
21	2 schroefpiketten	1	0.73
22	<i>96 Britse handgranaten</i>	16	1.10
23	scherf Britse 4.5'	6	0.60
24	langwerpig object	5	0.93

## **4.3 Wijtschate: proefveld 3**

### **4.3.1 Inleiding en historiek**

Het derde proefveld (1 ha) bevindt zich vlak naast de dorpskern van Wijtschate. De centrale coördinaten zijn 50° 47' 15"N, 2° 52' 54"E. De bodem bestaat uit matige natte kleigrond, type EDx. Tijdens de archeologische prospectie werd duidelijk dat het bodemprofiel op vele plaatsen verstoord was en varieerde over het veld. Hier en daar was de bodem ten gevolge van veel voorkomende verzakkingen door de landbouwer kunstmatig opgehoogd. De ondergrond varieerde van klei tot leem. De aangetroffen loopgraven, opgevuld met materiaal uit de bouwvoor, vertoonden daardoor zowel een lagere of hogere conductiviteit in vergelijking met de omringende bodem.

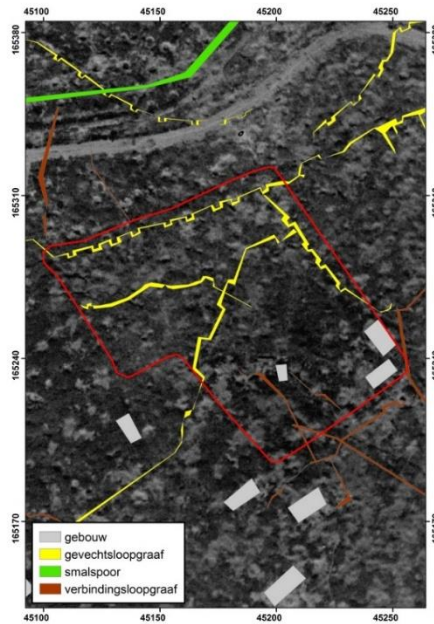
Op basis van loopgravenkaarten en luchtfoto's uit WO I werd een historisch vooronderzoek uitgevoerd door dr. Stichelbaut van de vakgroep Archeologie aan de UGent. De eerste luchtfoto van het proefveld dateert van 3 juli 1915 (Stichelbaut, 2015). Het gebied was sinds de Eerste Slag om Ieper in Duitse handen geweest. Op de luchtfoto zijn meerdere structuren waar te nemen. In het zuiden van het veld, waar voordien een molen stond, zijn op de luchtfoto vermoedelijke schuilplaatsen of bunkers te zien (Figuur 25). In het noorden van het veld zijn twee loopgraven loodrecht op elkaar te zien. Een oude loopgraaf die op dat moment niet meer in gebruik is loopt dwars door het gebied. Op latere foto's worden nog kleine verbindingsloopgraven opgemerkt. Tussen januari en maart 1917 wijzigde het loopgravennetwerk en op luchtfoto's uit die periode is duidelijk een sterk uitgebouwde gevechtssloopgraaf te zien. Na de Mesenslag in juni 1917 kwam het gebied gedurende 10 maanden, tot aan het Duitse voorjaarsoffensief, in Britse handen terecht. Er worden geen nieuwe structuren opgemerkt. Het veld en zijn omgeving waren volledig vernield (Stichelbaut, 2015).

### **4.3.2 Interpretatie en validatie van het bodemonderzoek**

De ECa-metingen van de 1HCP-, 2HCP- en 11PRP-spoelconfiguratie en de magnetometer metingen worden in Figuur 26 weergegeven. Hier zijn de meeste sporen terug te vinden in de metingen van de magnetometer. De grote verstoringen in het zuiden van het veld, vooral te zien op de ECa-11PRP meting en de magnetometer meting zijn afkomstig van verschillende structuren die in die zone gesitueerd zijn (1) (Figuur 26a). Het gaat om een molen uit de 19<sup>de</sup> eeuw met verschillende bijgebouwtjes. In die zone zijn op de magnetometer metingen verschillende ronde, gelijkvormige anomalieën waar te nemen die op gelijke afstand van elkaar staan en zo een soort omheining lijken te vormen. Tijdens de archeologische prospectie doormiddel van proefsleuven werd duidelijk dat het hierbij om betonnen palen met enkele ijzeren staven in ging. De loopgraven aangeduid op de luchtfoto's kwamen niet duidelijk naar voor op de metingen. Er

werden slechts enkele niet-ontplofte projectielen teruggevonden. Het veld vertoonde veel sporen van recente vergravingen, vermoedelijk werden oppervlakkige metalen objecten reeds verwijderd in de periode tussen de metingen en het archeologische proefsleuvenonderzoek.

Drie objecten werden aan de dataset toegevoegd (Tabel 3). Het gaat hierbij om een Britse Mills handgranaat, een ijzeren staaf en een scherf van onbekende origine.

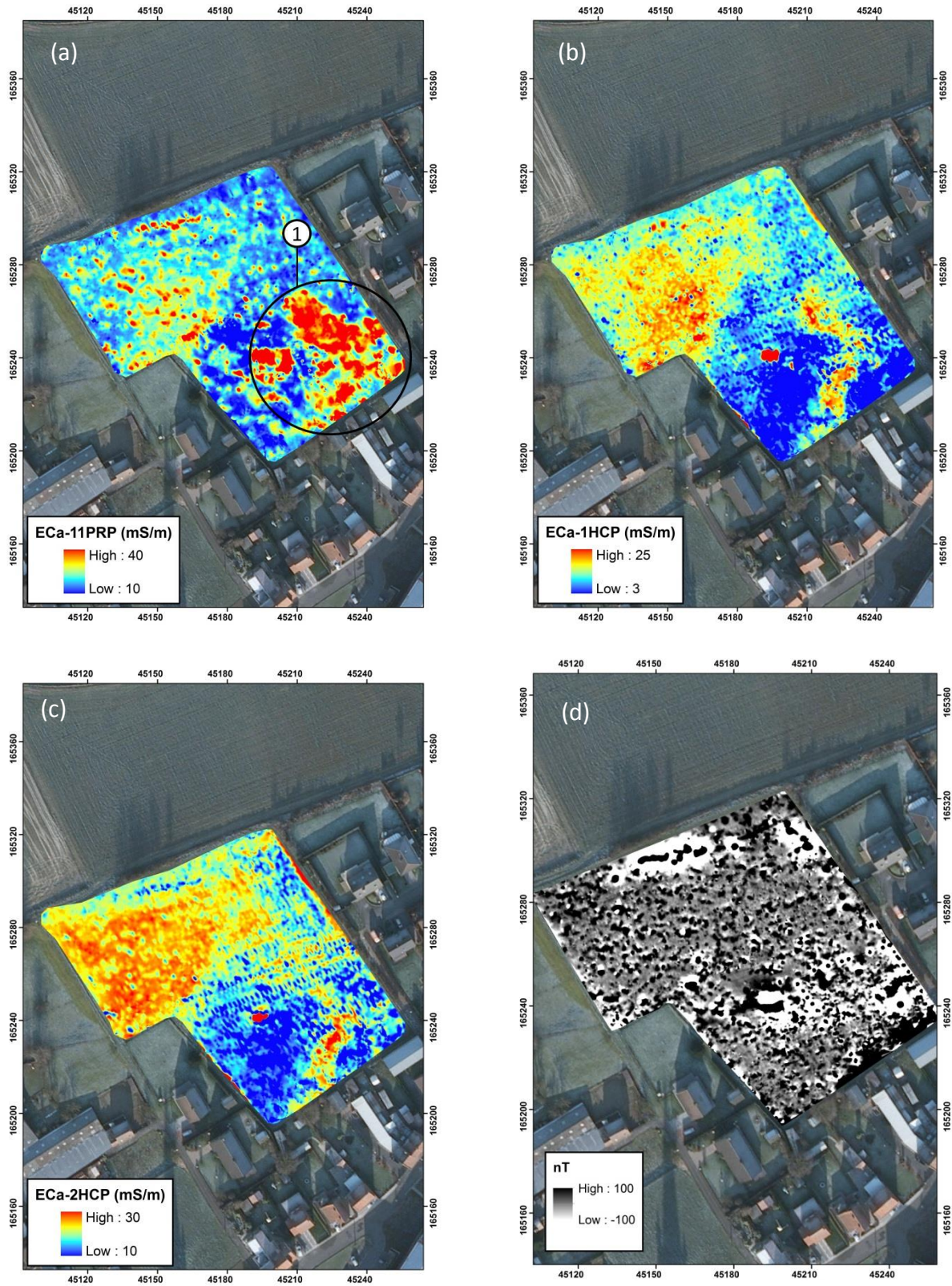


**Figuur 25. Luchtfoto van proefveld 3 (3 januari 1918), met aanduiding van enkele structuren (IWM Box Collection Box179 291 10B)**

**Tabel 3. Dataset met omschrijving, massa en diepte van de objecten uit proefveld 3. Wanneer de omschrijving cursief staat gaat het om niet-ontplofte munitie**

<b>Id</b>	<b>Omschrijving</b>	<b>m (kg)</b>	<b>z (m)</b>
25	staaf	4.0	0.42
26	<i>Britse handgranaat</i>	0.2	0.52
27	scherf	2.0	0.66



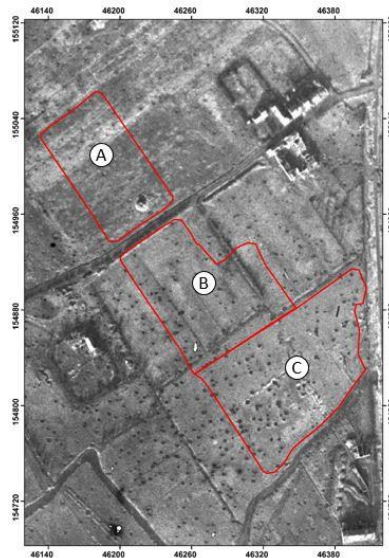


Figuur 26. Kaarten van de ECa-metinge van de (a) 11PRP-, (b) 1HCP- en (c) 2HCP-spoelconfiguratie en (d) magnetometer metingen in proefveld 3

## 4.4 Ploegsteert: proefveld 4

### 4.4.1 Inleiding en historiek

Het vierde proefveld lag in Komen-Waasten met als centrale coördinaten 50° 41' 43"N, 2° 54' 1"E. Dit gebied bestond uit 3 aanpalende velden. Doordat elk veld andere eigenschappen bleek te hebben werden de metingen afzonderlijk geanalyseerd. Het meest noordelijke veld (veld a) wordt door de landbouwer sinds de oorlog regelmatig beploegd. Het naburige veld (veld b) wordt veel minder beploegd. Veld c tenslotte, is een weideland dat sinds de oorlog niet beploegd is geweest. Er zijn sporen van een recente overstroming op het veld. Deze verschillende gradatie van bodembewerking is een interessant gegeven voor vergelijkingen. Er werd geen historisch onderzoek over het veld uitgevoerd. Er is wel een luchtfoto beschikbaar uit het Imperial War Museum (Figuur 27). Vooral op het meest zuidelijke veld zijn daar bomkraters op te zien.



Figuur 27. Luchtfoto van proefveld 4 (19382, Imperial War Museum)

## 4.5 Zware objecten in een extra dataset

Tijdens het verzamelen van de data werden nog objecten verzameld met een grotere massa (Tabel 4. Objecten met een massa hoger dan 30 kg, omschrijvingen in cursief duiden op niet-ontplofte bommen). Hoewel zij niet aan de algemene dataset werden toegevoegd worden ze toch eenmalig gebruikt bij de analyse. De eerste drie extra objecten werden op proefveld 2 terug gevonden (Figuur 23a en b), de overige twee op proefveld 1 (Figuur 18a).

**Tabel 4. Objecten met een massa hoger dan 30 kg, omschrijvingen in cursief duiden op niet-ontploffte bommen**

Extra object	Omschrijving	m (kg)	z (m)
1	<i>21cm Gr</i>	102	0.30
2	<i>24cm Spgr</i>	136	0.24
3	scherven	35	0.50
4	<i>Britse 6'</i>	45	0.60
5	<i>Britse 6'</i>	45	0.60

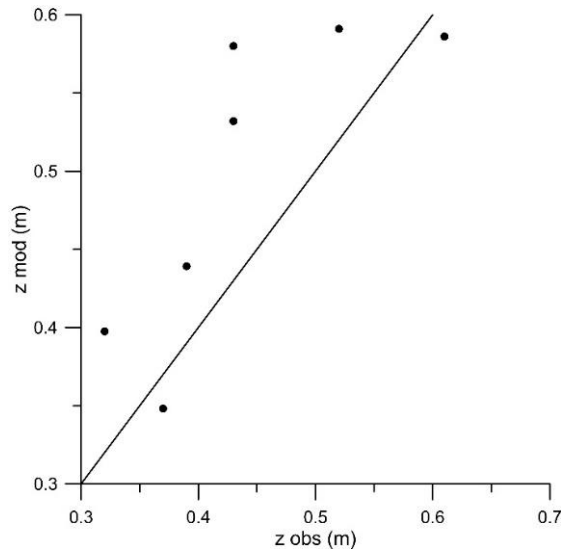
#### 4.6 Diepte-inschatting met magnetometrie

Enkele objecten uit proefveld 2 gaven duidelijk dipolen weer in de metingen met de magnetometer (Tabel 5). Aan de hand van de formule van de halfwaardebreedte, kon de diepte van het voorwerp ingeschat worden.

**Tabel 5. De objecten waarop de FWHM methode werd toegepast, met hun massa en geobserveerde diepte**

Object	m (kg)	z (m)
12	16	0.61
13	16	0.37
14	32	0.32
15	20	0.39
16	25	0.43
17	25	0.43
18	10	0.52

De gemodelleerde dieptes worden in Figuur 28 weergegeven ten opzichte van de geobserveerde dieptes. Een 1:1-as wordt getoond om de afwijking van de gemodelleerde met de werkelijke waarde visueel voor te stellen. De RMSE van de gemodelleerde diepte op de geobserveerde diepte is 0.08 m.



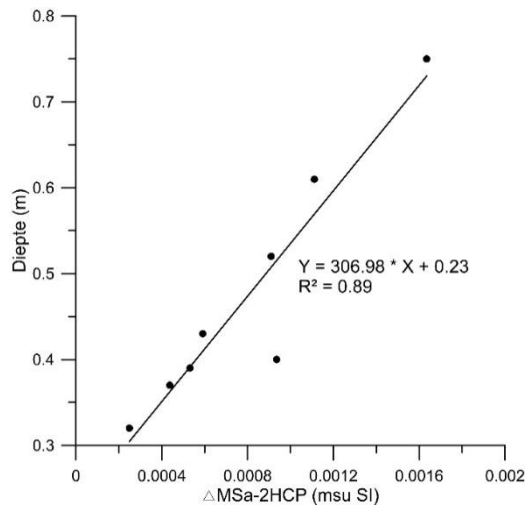
**Figuur 28.** De gemodelleerde en geobserveerde diepte van de objecten in proefveld 2

#### **4.7 Diepte-inschatting met MSa-metingen**

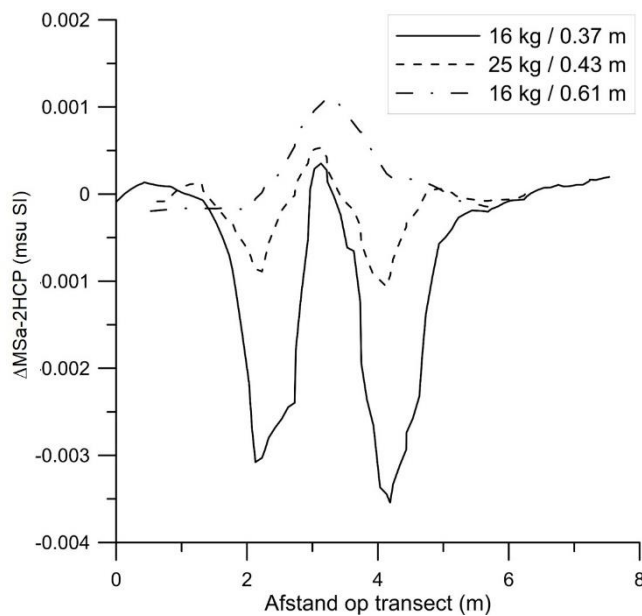
Wegens een hoog ruisniveau van de MSa-11PRP metingen waren enkel de resultaten van de 1HCP- en 2HCP-spoelconfiguraties bruikbaar voor interpretatie.

Zowel de 1HCP- als de 2HCP-configuraties geven soms een positieve anomalie, soms een negatieve. De objecten met een positieve anomalie bij de 2HCP-spoelconfiguratie vertonen een goede correlatie met de diepte (Figuur 29). Hoe dieper het object, hoe groter de positieve anomalie wordt. Deze trend is in al de MSa-data van de 2HCP-spoelconfiguratie terug te vinden. In vergelijking met de MSa-responsen van de andere spoelconfiguraties vertoont 2HCP de grootste MSa-respons.

Als er gekeken wordt naar de vorm die de respons aanneemt boven de verschillende objecten, dan verklaart dit de trend in Figuur 29. De respons van ondiepe objecten zal variëren van een negatieve piek gevolgd door een positieve piek naar opnieuw een negatieve piek (Figuur 30). Hoe dieper het object zich bevindt hoe kleiner de negatieve pieken worden en hoe groter de positieve piek. Enkel een positieve afwijking zal dus kunnen wijzen op een diep object terwijl een duidelijke ‘mexican hat’ op een ondiep metalen object wijst.



**Figuur 29.** De  $\Delta$ MSa-respons van de 2HCP-spoelconfiguratie ten opzichte van de diepte van de objecten



**Figuur 30.** Het verloop van de waarde van de anomalie boven drie verschillende objecten

#### 4.8 Diepte-inschatting met ECa-metingen

Enkel de 11PRP, 1HCP en 2HCP metingen werden in deze verwerking gebruikt. De andere signalen vertoonden te veel ruis. De dataset wordt eerst per spoelconfiguratie afzonderlijk en daarna gecombineerd bestudeerd. Op die manier kunnen de beste spoelconfiguraties geselecteerd worden voor het schatten van de diepte van een metalen object in de bodem.

Het effect van een verschil in diepte op de metingen kan bestudeerd worden door enkele objecten met een vergelijkbare massa tezamen te bekijken. In de volledige dataset zijn er in totaal 9 objecten met een massa van ongeveer 16 kg. Deze objecten zaten in de bodem op een diepte verspreid tussen 0.37 m en 0.80 m. Vijf van deze objecten zijn Britse 4.5 inch granaten, twee zijn Duitse 105 mm granaten en de overige twee zijn verzamelingen van scherven uit WO I.

Om een beter beeld te krijgen van de vorm die de respons aanneemt werd bij enkele van de objecten van 16 kg (Tabel 6) een doorsnede gemaakt op de meetlijn (Figuur 31). Deze objecten werden gekozen omdat ze allemaal hetzelfde voorwerp betreffen (een Britse 4.5 inch granaat) waardoor er enkele variabelen die een verschil in de metingen kunnen veroorzaken, zoals de samenstelling van het metaal en de vorm van het object, werden geëlimineerd. De vijf geselecteerde objecten zitten verspreid over een diepte tussen 0.45 m en 0.65 m.

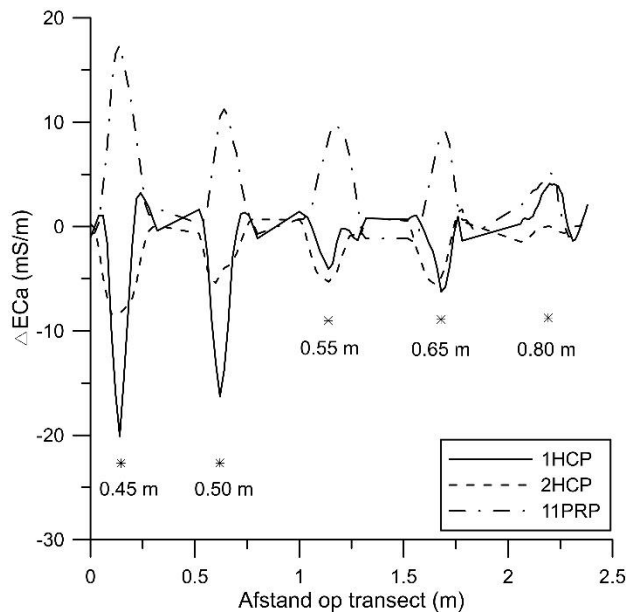
**Tabel 6. Vier objecten met dezelfde massa op een verschillende diepte, met hun corresponderende  $\Delta\text{ECa-1HCP}$ ,  $\Delta\text{ECa-2HCP}$  en  $\Delta\text{ECa-11PRP}$  respons**

Id	Omschrijving	m (kg)	z (m)	$\Delta\text{1HCP}$ (mS m <sup>-1</sup> )	$\Delta\text{2HCP}$ (mS m <sup>-1</sup> )	$\Delta\text{11PRP}$ (mS m <sup>-1</sup> )
10	Britse 4.5' obus	15.8	0.45	-20.57	-8.33	17.98
4	Britse 4.5' obus	15.8	0.50	-16.83	-5.52	11.55
6	Britse 4.5' obus	15.8	0.55	-4.08	-5.28	9.94
5	Britse 4.5' obus	15.8	0.65	-6.59	-5.53	9.13
2	Britse 4.5' obus	15.8	0.80	1.51	-1.61	2.70

Uit de tabel kan reeds afgeleid worden dat de  $\Delta\text{ECa-1HCP}$  respons met ongeveer 12 mS/m afneemt tussen 0.50 en 0.55 m diepte terwijl de verschillen in respons tussen de overige opeenvolgende dieptes nooit groter dan 4 mS/m waren. Het verschil tussen de diepere objecten is minder groot dan dat tussen de ondiepe objecten onderling. Dit geldt voor de drie spoelconfiguraties, maar is het meest uitgesproken bij de 11PRP-configuratie waar een verschil van 5 cm zorgt voor een verschil van bijna 7 mS/m terwijl dieper in de bodem een verschil van 10 cm slechts tot een daling van ongeveer 0.8 mS/m leidt. Opvallend is dat het object op 0.80 m diepte een positief  $\Delta\text{ECa-1HCP}$  signaal vertoont, voor de overige spoelconfiguraties verandert de trend niet.

Op Figuur 31 is te zien hoe de objecten voor elk signaal een parabool vormen. Hoe dieper het object in de bodem zit, hoe lager de top van de parabool. Het meest opvallende hier is het verschil in waarde van  $\Delta\text{ECa-1HCP}$  op 0.50 en 0.55 m diepte.  $\Delta\text{ECa-2HCP}$  genereert voor elk object de kleinste afwijking in vergelijking met de andere spoelconfiguraties. Tot 0.50 m diepte is de respons van  $\Delta\text{ECa-1HCP}$  groter dan van  $\Delta\text{ECa-11PRP}$ . Op de diepte van 0.55 m is de  $\Delta\text{ECa-}$

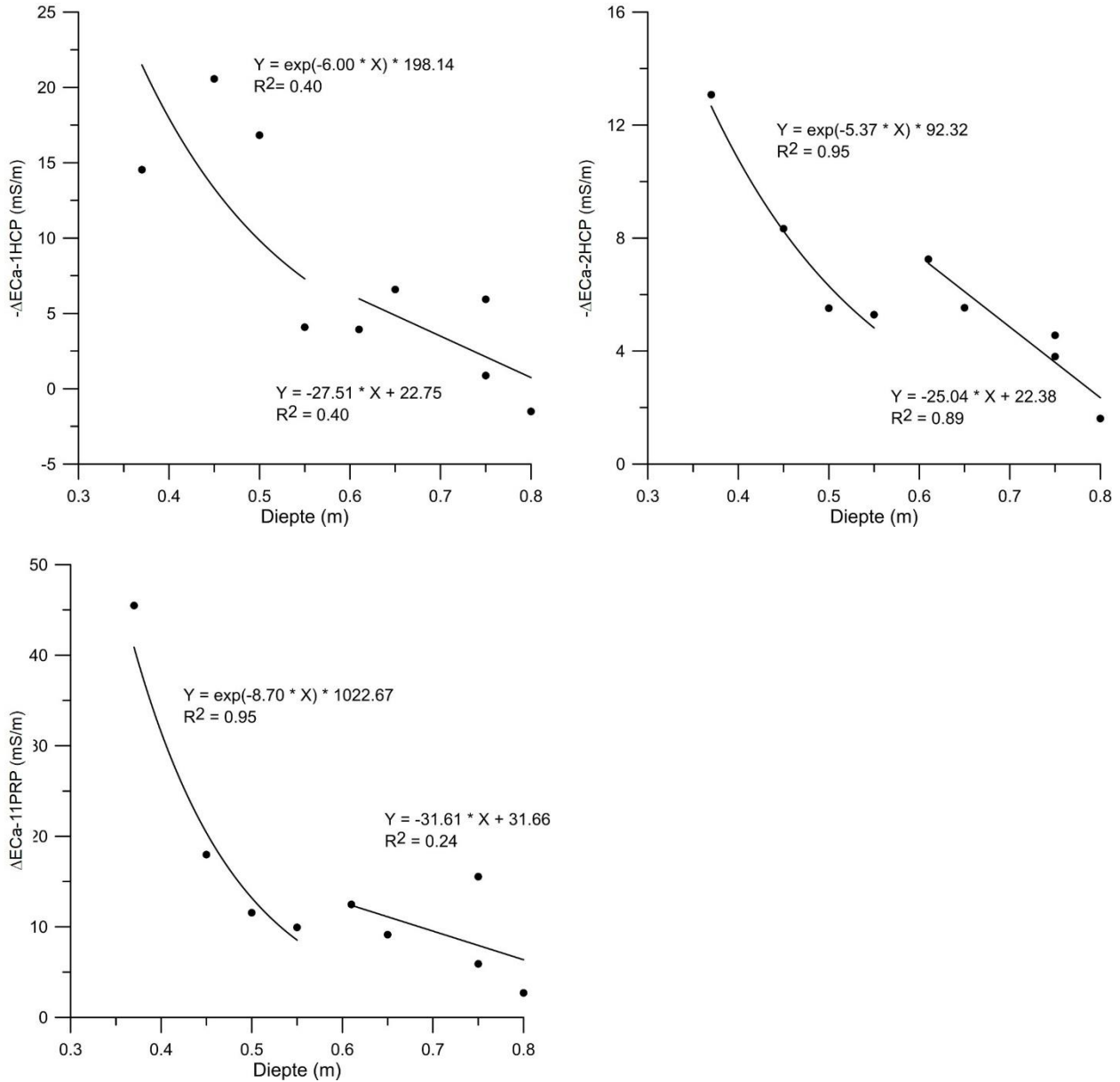
2HCP-respons net iets groter dan de  $\Delta\text{ECa}$ -1HCP-respons. Wanneer terug naar de volledige dataset gekeken wordt en al de objecten met een  $\Delta\text{ECa}$ -2HCP respons kleiner dan hun overeenkomstige  $\Delta\text{ECa}$ -1HCP respons geselecteerd worden valt op dat al deze objecten zich oppervlakkiger dan 0.50 m bevinden. Gekeken naar het verloop van de anomaliewaarden boven het object dat zich op 0.80 m diepte bevond valt op dat de waarde nu van negatief naar positief naar negatief evolueert.



**Figuur 31. ECa-respons van de verschillende speelconfiguraties op een transect, voor enkele objecten van 16 kg op verschillende dieptes**

Het verband tussen de  $\Delta\text{ECa}$ -metingen van de 9 objecten met massa van 16 kg ten opzichte van de diepte wordt weergegeven in Figuur 32. Hierbij valt op dat de relatie die de signalen vertonen tegenover de diepte op ongeveer 0.55 m diepte in twee gesplitst kan worden. Ondiepe objecten lijken een exponentieel verband met de diepte te vertonen terwijl diepere objecten zich eerder lineair tot de diepte verhouden. Vooral voor de 11PRP-speelconfiguratie is dit duidelijk het geval. Om voor al de configuraties een exponentiele relatie te kunnen berekenen werden de negatieve metingen van  $\Delta\text{ECa}$ -1HCP en  $\Delta\text{ECa}$ -2HCP van teken gewisseld zodat hun signaal positief wordt. De hellingen van de berekende relaties geven aan hoe sterk het opgevangen signaal varieert bij een verandering in diepte van het object. Bij de exponentiele relatie volgt de grootte van de helling deze sequentie:  $\Delta\text{ECa}$ -11PRP >  $\Delta\text{ECa}$ -1HCP >  $\Delta\text{ECa}$ -2HCP. Dit toont aan dat de 11PRP-speelconfiguratie veel extremer reageert op ondiep gelegen metaal dan de andere configuraties. Ook voor de lineaire regressie volgt de grootte van de helling de voorgaande sequentie. De 2HCP-speelconfiguratie reageert dus telkens het minst sterk op een verandering van diepte. Nochtans is de correlatie van de diepte met de 2HCP-speelconfiguratie is zeer duidelijk: voor de lineaire correlatie is de determinatiecoëfficiënt 0.89 en het niet-lineaire model heeft een

determinatiecoëfficiënt van 0.95. Indien op zoek gegaan wordt naar Britse 4.5 inch granaten zou aan de hand van de 2HCP-spoelconfiguratie een model opgesteld kunnen worden dat de diepte van elk object, veronderstellende dat het een Britse 4.5 inch obus is, inschat.



**Figuur 32. Het verband tussen de ECa-respons van de verschillende spoelconfiguraties en de diepte van het object. De best passende krommes werden aangeduid met hun determinatiecoëfficiënt  $R^2$**

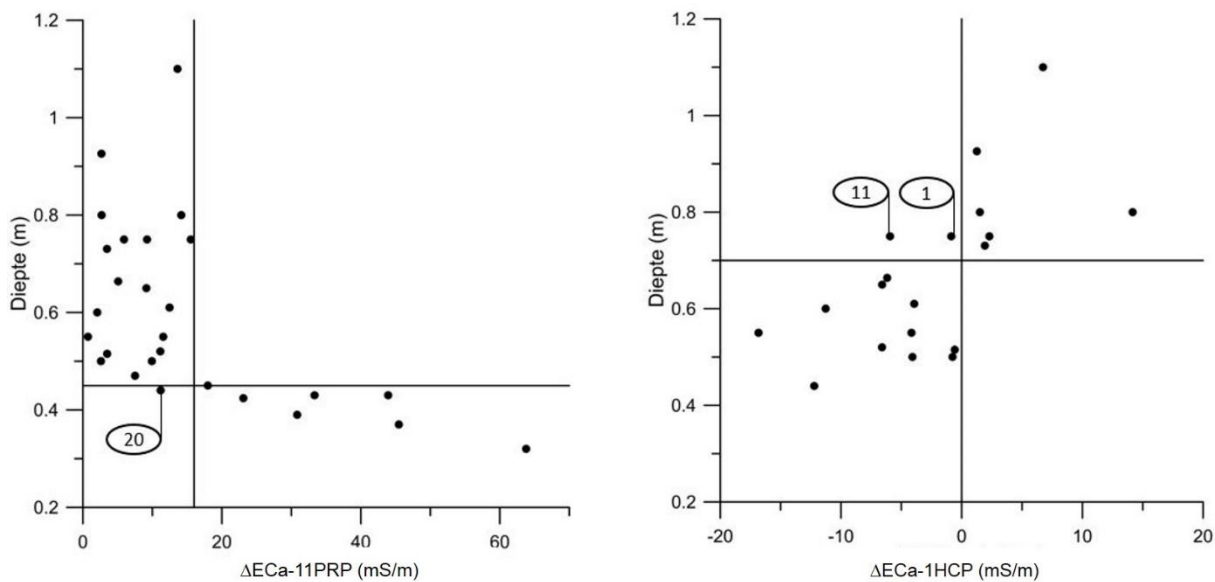
Bij de 1HCP-spoelconfiguratie valt naast het voorgaande ook op dat niet al de anomalieën negatief zijn. Van de 9 geselecteerde objecten in de dataset is er één, het object op 0.80 m, dat een positieve anomalie genereerde. Wanneer opnieuw gekeken wordt naar de volledige dataset



dan blijkt dat meerdere objecten positieve anomalieën leverden. Hier zal later nog op terug gekomen worden.

#### 4.8.1 Opstellen van diepte-intervallen

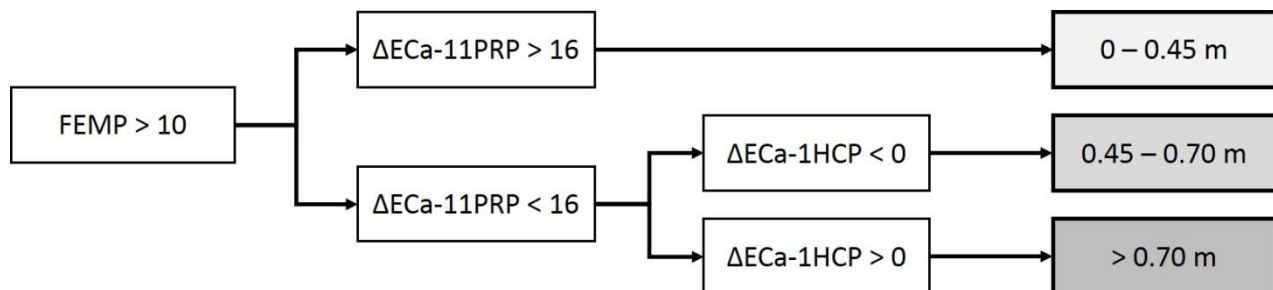
Als alle data in een grafiek wordt uitgezet ten opzichte van de diepte is er bij de  $\Delta\text{ECa-11PRP}$  waarden een duidelijke grens te zien rond een waarde van 16 mS/m (Figuur 33a). Alle objecten met een hogere  $\Delta\text{ECa-11PRP}$  waarde zijn gesitueerd op een diepte tussen 0 en 0.45 m. Alle andere objecten zitten dieper in de bodem. Het enige object dat hier niet aan voldoet is object 20. Object 20 is een scherp van een obus die een gemiddelde diepte van 0.44 m had. Dit wijkt slechts 1 cm af van de vooropgestelde grensdiepte dus dit verschil is minimaal. Aangezien amper 1 van de 27 objecten niet voldoet aan het opdelen in twee diepte intervallen door de grenswaarde van 16 mS m<sup>-1</sup> voor de 11PRP-spoelconfiguratie wordt deze waarde als betrouwbaar aangenomen en verder in de berekeningen gebruikt.



**Figuur 33. de  $\Delta\text{ECa-11PRP}$  en  $\Delta\text{ECa-1HCP}$  respons t.o.v. de diepte met aanduiding van de grenswaarden: (a) 16 mS/m voor  $\Delta\text{ECa-11PRP}$  en (b) 0 mS/m voor  $\Delta\text{ECa-1HCP}$**

De data kan nu dus in twee subgroepen onderverdeeld worden: een groep op een diepte van 0 tot 0.45 m, en een groep op een diepte vanaf 0.45 m. De eerste groep bevat 7 objecten die allemaal op een gelijkaardige diepte gelokaliseerd zijn, op basis van deze data kan dus geen verdere onderverdeling gemaakt worden met betrekking tot de diepte. De tweede groep bevat echter nog 19 objecten op verscheidene dieptes. Van deze 19 objecten wordt de  $\Delta\text{ECa-1HCP}$  waarde ten opzichte van de diepte bekeken (Figuur 33b). Bij deze 19 objecten zaten ook objecten met een positieve  $\Delta\text{ECa-1HCP}$  waarde. Op Figuur 33b kan gezien worden dat vanaf een diepte

van ongeveer 0.70 m al de objecten een positieve  $\Delta E_{Ca-1HCP}$  respons genereren. Er zijn twee uitzonderingen, object 1 en 11, tweemaal een Duitse 105 mm granaat. Zij lagen op een diepte van 0.75 m en genereerden toch een, hetzij lage, negatieve  $\Delta E_{Ca-1HCP}$  respons. Een tweede grenswaarde wordt dus bepaald op 0 mS/m voor de 1HCP-spoelconfiguratie. Deze nieuwe grenswaarde begrenst een diepte van 0.45 tot 0.70 m en dieper dan 0.70 m. Dat leidt tot een totaal van 3 van de 27 objecten die niet in het voorgestelde schema volgens de grenswaarden passen, dat is net iets meer dan 10 %. Er kan dus vanuit gegaan worden dat een opdeling op basis van deze 2 grenswaarden tot een vrij betrouwbare ruwe schatting van de dieptes leidt. De diepte intervallen waartoe deze grenswaarden leiden worden in onderstaande figuur schematisch voorgesteld.

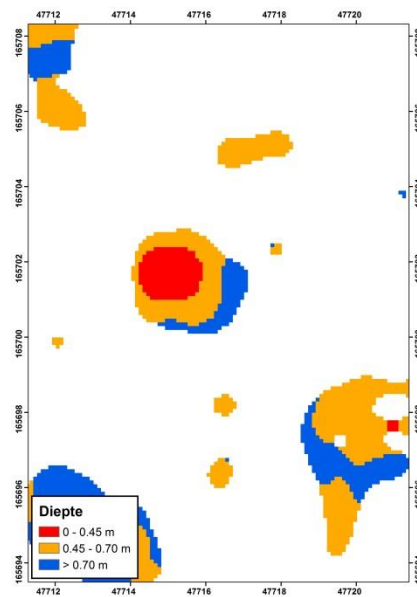


**Figuur 34. Stroomdiagram om volgens de FEMP en de grenswaarden van  $\Delta 11PRP$  en  $\Delta 1HCP$  de diepte te bepalen**

Hierbij moet nog vermeld worden dat de data ook op basis van een grenswaarde voor de waarden van de 2HCP-spoelconfiguratie in twee subgroepen verdeeld kan worden. Deze groepen zijn eveneens aan elkaar begrenst op 0.45 m diepte met een bepalende grenswaarde van -8 mS/m. Deze informatie gaf echter geen meerwaarde aan bovenstaand schema.

Het opdelen van de metingen in diepte-intervallen op basis van het stroomdiagram wordt zowel op proefveld 2 als op proefveld 4 toegepast. Eerst wordt de FEMP, de parameter die de aan- of afwezigheid van metaal aangeeft, van de velden berekend. Enkel de waarden met een FEMP groter dan 10 mS/m blijven behouden, dit zijn de plaatsen waar een metalen voorwerp in de bodem zit. Al deze waarden worden op basis van het stroomdiagram in een diepte-interval geplaatst. Typisch bestaat een afgezonderde anomalie uit een opeenvolging van diepte intervallen in min of meer concentrische cirkels (Figuur 35). De diepte neemt af van buiten naar binnen waardoor in het centrum van de anomalie zich het oppervlakkigste gemodelleerde diepte interval bevindt. Dit centrum is het enige wat van belang is voor de bepaling van de diepte van het object. Op Figuur 31 is te zien dat het verloop van de metingen niet sprongsgewijs, maar gradueel verloopt. In de buurt van het object zal er al een reactie van het object op de sensor waargenomen kunnen worden. Deze reactie wordt dan geclassificeerd in een dieper interval dan dat hetgeen waarin het object zich werkelijk bevindt. Opvallend is dat er enkele anomalieën zijn die het diepste interval in hun centrum toegewezen kregen en het ondiepere aan de randen.

Ofwel ligt dit aan de oriëntatie van het object in de bodem, ofwel is er nog een vierde diepte interval dat niet uit de beschouwde kalibratiedata naar voor kwam.



Figuur 35. Detailbeeld van de indeling in diepte-intervallen van een anomalie op proefveld 2

#### 4.8.2 $\Delta$ ECa-1HCP signalen ten opzichte van de diepte

Algemeen valt op dat de  $\Delta$ ECa-1HCP waarde in de eerste plaats de diepte van een object weerspiegelt, en minder de massa. Dit valt af te leiden uit het feit dat de oppervlakkigste objecten de grootste anomalieën opleveren terwijl zware objecten die zich dieper bevinden een lager signaal opleveren. Een voorbeeld hiervan is het verschil tussen object 18 en object 25 waarbij de  $\Delta$ ECa-1HCP respons bijna driemaal groter is bij het object dat op 0.42 m ligt dan bij het object op 0.52 m hoewel het object op 0.52 m toch meer dan tweemaal zoveel weegt als het oppervlakkigere object. Dit is geen afgezonderd voorbeeld maar volgt de algemene trend van de  $\Delta$ ECa-1HCP waarden. Daardoor blijkt de 1HCP-spoelconfiguratie meer geschikt om de diepte van een metalen voorwerp in de bodem te bepalen dan de massa. Zoals hierboven reeds werd aangehaald wordt de dataset nu opgesplitst in een set met positieve en een set met negatieve  $\Delta$ ECa-1HCP responsen.

##### 4.8.2.1 Positieve waarden van $\Delta$ ECa-1HCP

De objecten met een positieve  $\Delta$ ECa-1HCP respons vertonen een opvallend goed verband met de diepte (Figuur 36). Om de relatie met de diepte beter aan te tonen werden enkele zwaardere objecten mee in rekening genomen. Zij werden op proefveld 2 gevonden maar zullen voor de verdere bespreking opnieuw uit de dataset gelaten worden. De relatie met de diepte is exponentieel over de volledige diepte. Hoe dieper het object zich bevindt hoe kleiner de

positieve waarde wordt, met een Spearman rang correlatie van -0.96. De determinatiecoëfficiënt  $R^2$  is 0.89. Over het algemeen zullen het objecten op een grote diepte zijn die positieve  $\Delta ECa-1HCP$  responsen opwekken, ofwel zwaardere objecten op een oppervlakkigere diepte. Deze oppervlakkige objecten zullen echter een  $\Delta ECa-11PRP$  waarde groter dan 16 mS/m hebben waardoor bovenstaand stroomdiagram nog steeds steek houdt.

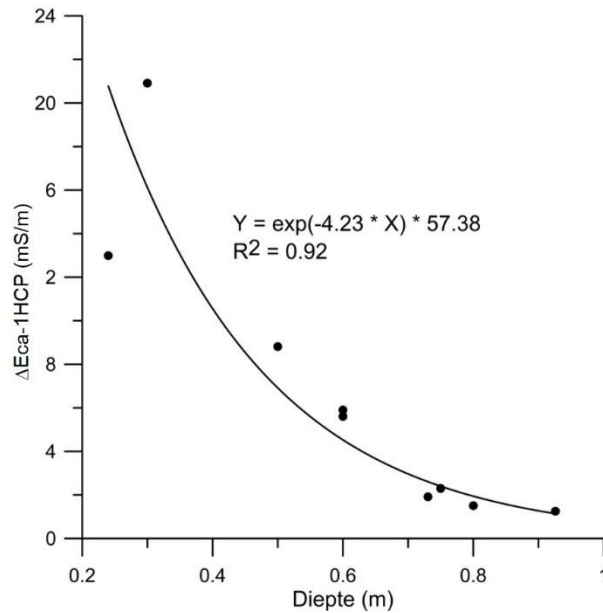
**Tabel 7. De objecten met een positieve  $\Delta 1HCP$ , via aflopende  $\Delta 1HCP$  waarden gesorteerd, niet ontplofte munitie staat cursief. 'extra' zijn de objecten die niet tot de standaard dataset behoren**

<b>Id</b>	<b>Omschrijving</b>	<b>m (kg)</b>	<b>z (m)</b>
extra 1	<i>21cm Gr</i>	102.0	0.30
extra 2	<i>24cm Spgr</i>	136.0	0.24
extra 3	scherven	35.0	0.50
extra 4	<i>Britse 6'</i>	44.7	0.60
extra 5	<i>Britse 6'</i>	44.7	0.60
9	smalspoor	9.0	0.75
21	2 schroefpiketten	1.0	0.73
2	<i>Britse 4.5'</i>	15.8	0.80
24	langwerpig object	5.0	0.93

Deze goede relatie tussen de diepte en de waarde van het positief  $\Delta ECa-1HCP$  signaal is een stap in de goede richting om de diepte meer exact te schatten. Maar niet al de objecten genereren een positief  $\Delta ECa-1HCP$  signaal, dus er zal nog verder gezocht worden naar goede relaties tussen de diepte en de grootte van signalen.

#### **4.8.2.2 Negatieve waarden van $\Delta ECa-1HCP$**

De negatieve  $\Delta ECa-1HCP$  waarden vertonen een veel minder goed verband met de diepte. Hoe dieper de objecten zich bevinden hoe slechter het verband wordt. Ook bij objecten met een massa kleiner dan 10 kg is er geen verband met de diepte waarneembaar. De beste relatie wordt gevonden bij objecten zwaarder dan 10 kg, de Spearman correlatiecoëfficiënt van de correlatie tussen de diepte en het negatief  $\Delta ECa-1HCP$ -signaal is dan 0.79, de determinatiecoëfficiënt van de best passende exponentiele relatie er tussen is 0.62. Hier zal niet verder op ingegaan worden.



**Figuur 36. Regressievergelijking voor de diepte ten opzichte van de positieve ΔEca-1HCP**

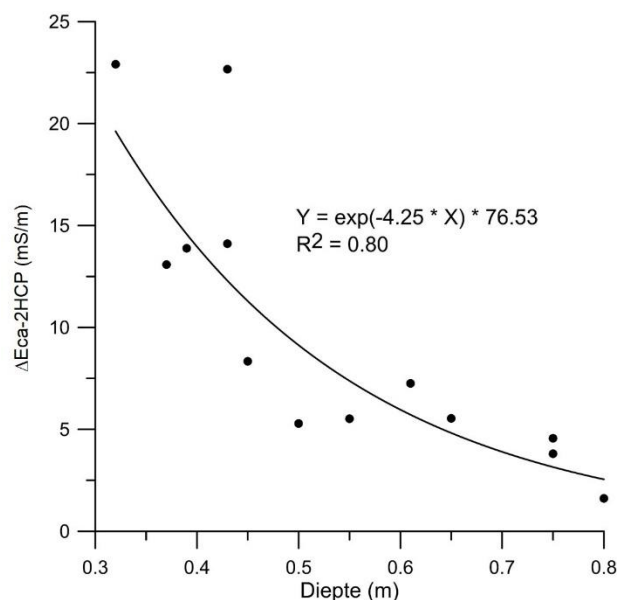
#### 4.8.3 ΔEca-2HCP signalen ten opzichte van de diepte

Ondanks zijn kleine anomalieën genereert de 2HCP-configuratie toch een goede relatie met de diepte. ΔEca-2HCP vertoont voor de metalen objecten enkel negatieve anomalieën. Er kan een logaritmisch verband gevonden worden tussen de diepte en de grootte van het ΔEca-2HCP-signaal, maar zoals hierboven reeds beschreven is een exponentiele relatie de betere optie. Hiervoor moeten de negatieve signalen van teken gewisseld worden. Aangezien er enkel negatieve signalen zijn veranderd dit niets aan de distributie van de signalen. Vanaf een massa van 15 kg wordt de Spearman correlatiecoëfficiënt 0.87 en de determinatiecoëfficiënt van de relatie 0.80, dit komt al dicht in de buurt van de beste correlatie- en determinatiecoëfficiënt die reeds gevonden werd, namelijk bij de positieve ΔEca-1HCP-signalen.

De twee hoogste anomalieën in Figuur 37 zijn gekoppeld aan de twee zwaarste objecten (25 kg en 32 kg) in de dataset.

#### 4.8.4 ΔEca-11PRP signalen ten opzichte van de diepte

Ook de anomalieën van de 11PRP-configuratie werden ten opzichte van de diepte bekeken. De beste Spearman correlatiecoëfficiënt is -0.86 en wordt gevonden bij objecten vanaf 15 kg. Omdat object 22, een cluster van 96 handgranaten die verspreid zaten over een diepte van 0.80 m tot 1.40 m, telkens afwijkt van de algemene trend werd dit object uit de data verwijderd.



**Figuur 37.** het verband tussen de  $\Delta E_{Ca-2HCP}$ -metingen en de diepte

#### 4.8.5 Combinatie ten opzichte van de diepte

De FEMP werd voor elk proefveld berekend (Figuur 38). Vanaf een waarde van 10 mS/m wordt metaal verondersteld aanwezig te zijn op die locatie. De gevonden objecten worden ook op de figuur aangeduid. Een beschrijving van deze objecten is terug te vinden in Tabellen 1 t.e.m. 3. Slechts vijf objecten hebben een FEMP lager dan 10. Vier van deze vijf hebben een massa kleiner of gelijk aan 1 kg, het vijfde object lag op een diepte van 0.80 m. Er kan dus besloten worden dat een FEMP groter dan 10 mS/m verwacht wordt bij objecten zwaarder dan 1 kg, of oppervlakkiger dan 0.80 m. Vanaf een massa van 15 kg is de Spearman correlatiecoëfficiënt tussen de FEMP en de diepte -0.89, de determinatiecoëfficiënt voor de best passende exponentiele relatie er tussen is dan 0.79 (Figuur 39).

#### 4.8.6 Dieptebeoordeling met FEMP en $\Delta E_{Ca-1HCP}$ signalen

Om de diepte van een metalen object in te schatten kan er nu op de volgende manier te werk worden gegaan: na berekening van de FEMP waarde en selectie van de FEMP waarden groter dan 10 mS/m worden de objecten opgedeeld op basis van hun  $\Delta E_{Ca-1HCP}$  waarde. De diepte van objecten met een positief  $\Delta E_{Ca-1HCP}$  signaal wordt berekend aan de hand van de relatie die de  $\Delta E_{Ca-1HCP}$  signalen van deze objecten vertonen met de diepte:

$$z = -0.21 * \ln(\Delta E_{Ca_{1HCP}}) + 0.93 \quad (9)$$

Om de diepte van objecten met een negatief 1HCP signaal te berekenen wordt vertrouwd op de relatie tussen de FEMP en de diepte:

$$z = -0.15 * \ln(FEMP) + 1.16 \quad (10)$$

Bovenstaande vergelijkingen werden toegepast op volledig proefveld 2. Om een vergelijking met de diepte intervallen, opgesteld d.m.v. het schema, te bekomen werden de gemodelleerde dieptes vergeleken met het diepte interval waarin die locatie werd geplaatst. Slechts 36 % van de locaties werd door de vergelijking met de positieve  $\Delta ECa$ -1HCP waarde in het overeenkomstige diepte interval geplaatst. Door de vergelijking van de FEMP kwam 41 % van de diepte van de objecten overeen met het corresponderende diepte interval. Er werd verder niet met deze vergelijkingen gewerkt.

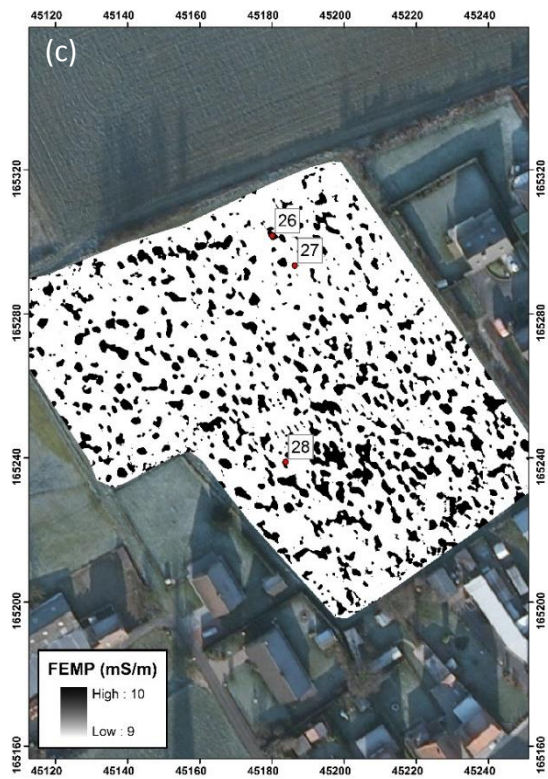
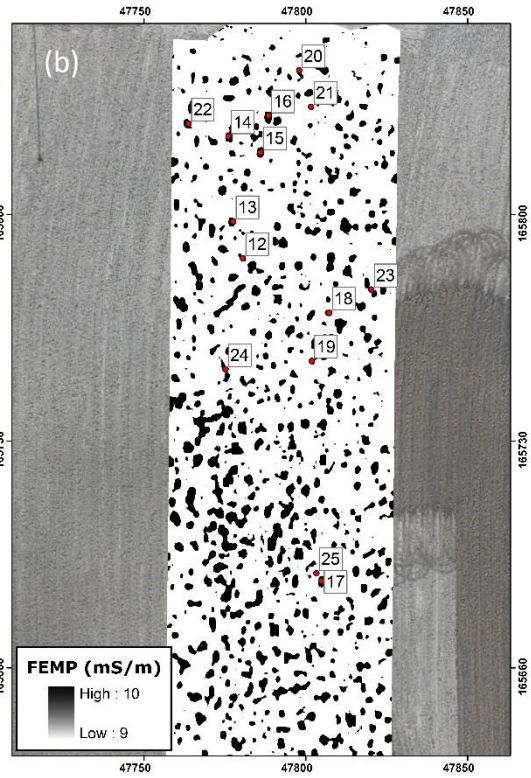
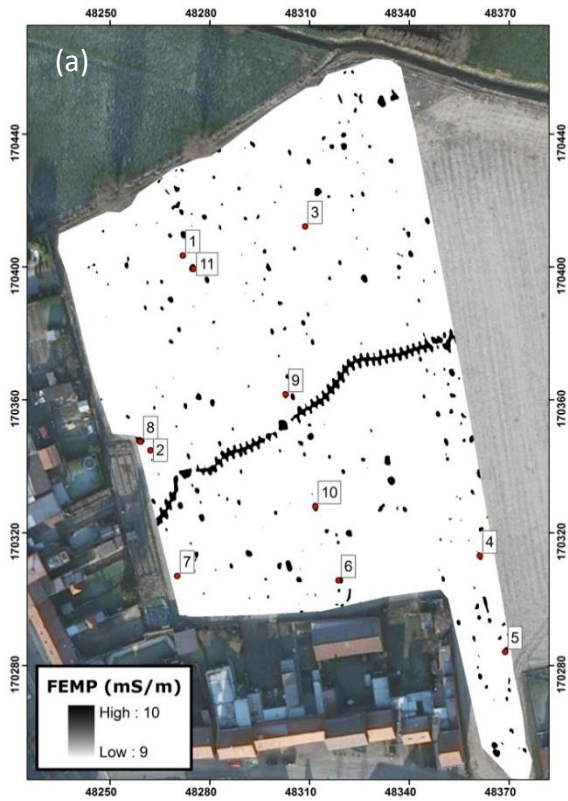
#### 4.9 Massa-inschatting met ECa-metingen

Naast de diepte werd ook de massa van de objecten genoteerd. Er kan dus ook een analyse gemaakt worden van de invloed van de massa op de door de sensor gegenereerde signalen. Eerst wordt de vorm die de anomalie aanneemt geanalyseerd om vervolgens lineaire relaties tussen de massa van de objecten en het signaal te zoeken.

Gelijkaardig aan de bespreking van de invloed van de diepte werden enkele objecten uit de dataset geselecteerd die zich op ongeveer dezelfde diepte bevonden (Tabel 8). Het betreft hier telkens een verzameling van scherven uit WO I. De massa varieert van 16 tot 32 kg, en het grootste diepteverschil tussen de objecten is 9 cm. Op de meetlijnen die boven de objecten gesitueerd waren werden de waarden genomen vanaf net voor het object tot net erna. Zo kan het verloop van het signaal beter bestudeerd worden (Figuur 40).

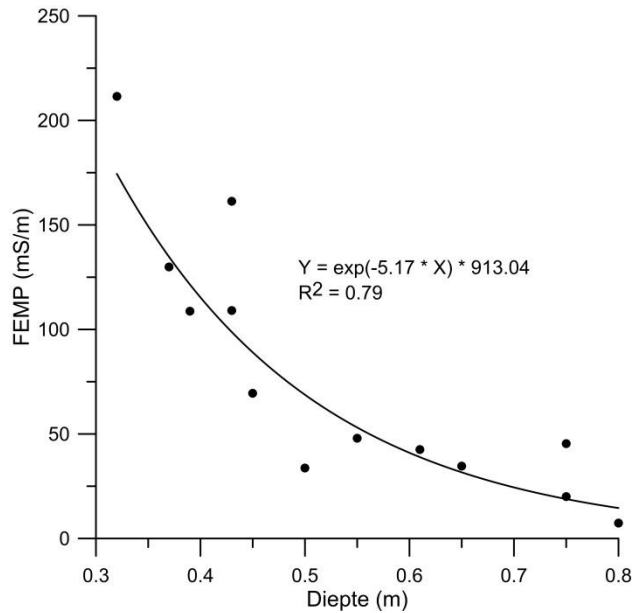
**Tabel 8. Objecten uit proefveld 2 die ongeveer op dezelfde diepte liggen maar met een verschillende massa**

Id	m (kg)	z (m)
13	16	0.37
15	20	0.39
16	25	0.43
14	32	0.32

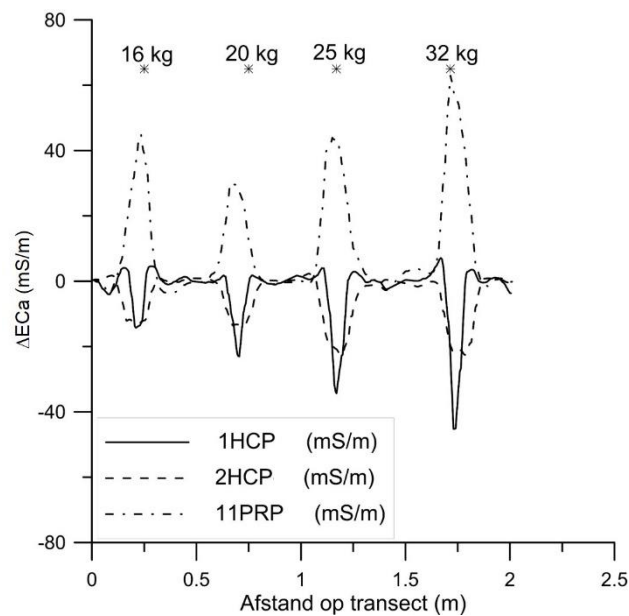


Figuur 38. Kaarten met aanduiding van de locaties waar een metalen object aanwezig is in de bodem (bij een FEMP groter dan 10) van (a) proefveld 1, (b) proefveld 2 en (c) proefveld 3.





**Figuur 39.** De exponentiele relatie tussen de FEMP en de diepte van de objecten zwaarder dan 15 kg



**Figuur 40.** De waarde van de drie speelconfiguraties op het transect door de objecten uit Tabel 8

Net zoals bij de diepte vertoont elk signaal een parabolische vorm. ΔECa-2HCP genereert de kleinste respons, ΔECa-11PRP de grootste. Hoe zwaarder de massa van het object hoe sterker de respons wordt. Het object van 16 kg vertoont een afwijkende respons voor de 11PRP-configuratie: in de plaats van een lagere respons dan het zwaardere object vertoont dit object een respons groter dan dat van een object van 25 kg. Dit zou als volgt verklaard kunnen worden: het object met een massa van 16 kg bestaat uit scherven terwijl de andere massieve objecten

voorstellen. In een massief object zijn de magnetische dipolen ten gevolge van thermo-remanent magnetisme in dezelfde richting georiënteerd. Wanneer deze vervolgens in een magnetisch veld worden gebracht zullen alle dipolen van het object in dezelfde richting en zin reageren. Bij een hoop scherven zijn magnetische dipolen dikwijls tegengesteld georiënteerd, waardoor deze in een magnetisch veld elkaar kunnen compenseren. De 11PRP-spoelconfiguratie is, zoals reeds gebleken is, het gevoeligst voor metaal en zal dus sterker reageren op kleine verschillen in de samenstelling of massa van verschillende objecten.

De responsen van alle data werden geplot t.o.v. hun massa (Figuur 41). Er blijken twee lineaire verbanden in de data waarneembaar. Er is een lineair verband tussen de responsen en de massa van de objecten in het interval van 0 tot 15 kg, en een ander, ook lineair, verband van tussen de responsen en de massa van de objecten in het interval van 15 tot 32 kg. De objecten kunnen dus onderverdeeld worden in twee groepen. De grootte van de hellingen van de relaties is telkens het grootst bij de 11PRP-spoelconfiguratie.

Gekeken naar het verband tussen elk signaal afzonderlijk en de massa valt opnieuw op dat de 2HCP-spoelconfiguratie voor de objecten vanaf 15 kg de beste correlatiecoëfficiënt heeft terwijl die van de 1HCP-configuratie het laagst is. Concreet gaat het om een  $R^2$  van 0.77 voor de  $\Delta E_{Ca}$ -2HCP-waarden en 0.67 voor de  $\Delta E_{Ca}$ -1HCP-waarden. De 2HCP-spoelconfiguratie blijkt dus de beste spoelconfiguratie voor het inschatten van de massa. Ook de FEMP blijkt minder goed om een massa-inschatting te maken van begraven metalen objecten.

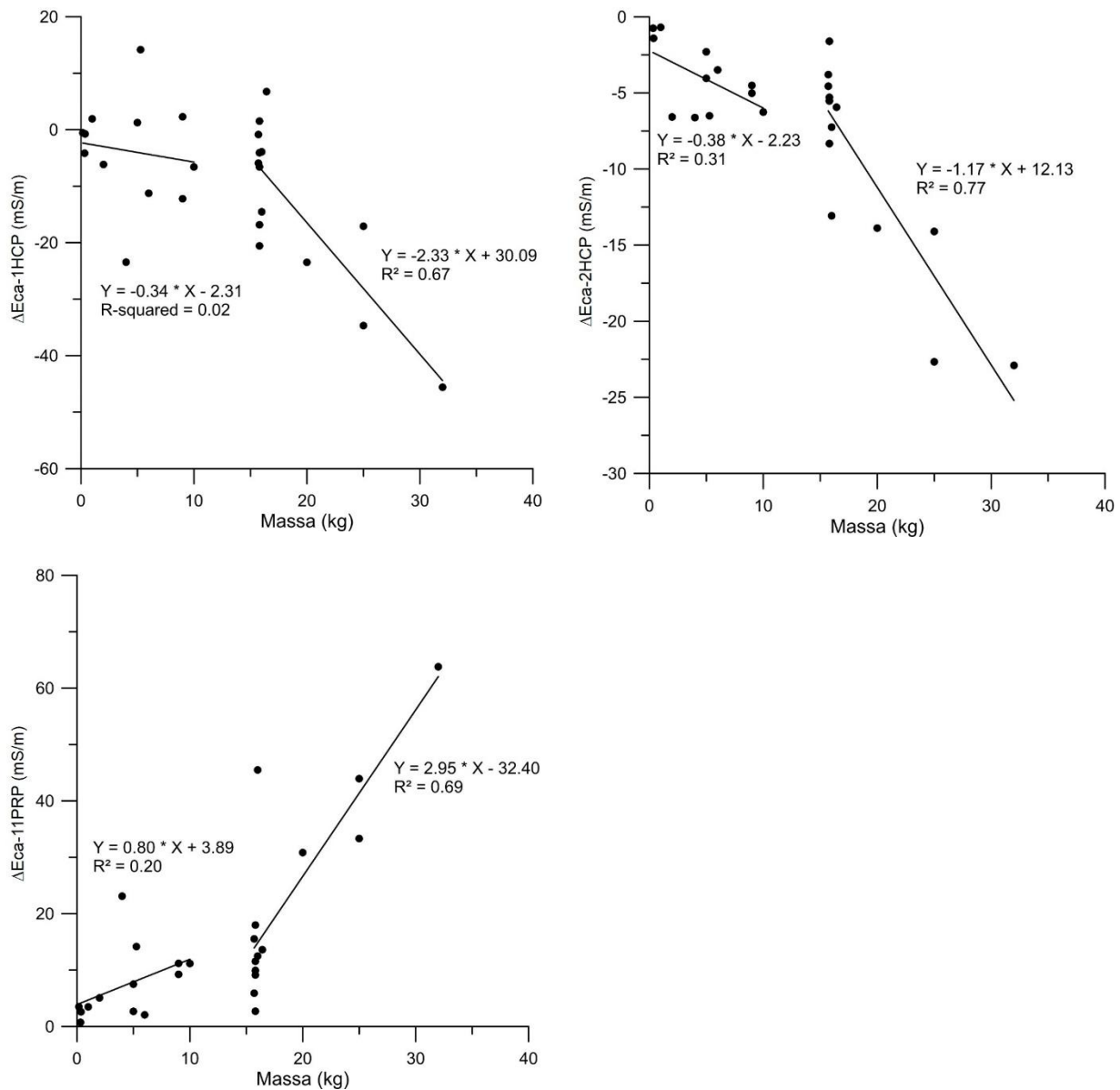
Interessanter is natuurlijk om de vergelijking met de massa te maken tussen objecten die reeds in een zelfde diepte interval zitten.

#### **4.9.1 Massa bepalen per diepte-interval**

De objecten werden onderverdeeld in de diepte intervallen die hierboven werden opgesteld. Nu zal per diepte interval gezocht worden naar het beste model om de massa van de objecten te schatten. Enkel de objecten die in het juiste diepte interval werden ondergebracht werden bij het opstellen van de modellen gebruikt.

Eerst werd aan de hand van een stapsgewijze regressie uitgemaakt of elke spoelconfiguratie een significante bijdrage levert aan het finale model. Hiervoor wordt vertrokken van de spoelconfiguratie die de hoogste Pearson correlatie met de massa vertoont. Onder de aanname van de nulhypothese dat de spoelconfiguratie géén significante bijdrage levert wordt de overeenkomstige p-waarde berekend. De p-waarde is de overschrijdingskans van de toetsingsgrootte als toevallige variabele in de veronderstelling dat de nulhypothese geldt. Als deze kans kleiner is dan het vooropgestelde significantieniveau voor opname in het model wordt de nulhypothese verworpen en levert de spoelconfiguratie een significante verbetering tot het

model. Hierna wordt hetzelfde gedaan met de spelconfiguratie met de tweede hoogste Pearson correlatiecoëfficiënt, tot de berekende p-waarde groter wordt dan het significantieniveau voor opname in het model. Vervolgens wordt nagegaan of het verwijderen van een spelconfiguratie uit het model tot een significante verbetering leidt. Dit kan door opnieuw de p-waarde te berekenen, als deze groter is dan het vooropgestelde significantieniveau voor eliminatie wordt de spelconfiguratie uit het model verwijderd. Zo wordt uiteindelijk een model bekomen voor het voorspellen van de massa van de objecten.



**Figuur 41. De waarde van elke spelconfiguratie ten opzichte van de massa**

Er werd gekozen voor een significantieniveau van 5 % voor het toevoegen van de extra spelconfiguratie, en een significantieniveau van 20 % voor het verwijderen van de betreffende spelconfiguratie uit het model. Voor de objecten in de bouwvoor werd bekomen dat enkel de respons van de 2HCP-spelconfiguratie volstaat om de massa te berekenen. De massa van objecten net onder de bouwvoor werden het best gemodelleerd door enkel gebruik te maken van de meting van de 11PRP-spelconfiguratie. Dieper dan 0.70 m was geen enkel van de drie metingen van de spelconfiguraties in staat om het significantieniveau van het model te overschrijden.

Omdat een combinatie van metingen van verschillende spelconfiguraties tot een robuuster model zou leiden, bij een foutieve meting van een van de spelconfiguraties kan dan namelijk nog terug gevallen worden op de andere twee, werd nagegaan wat de kwaliteit van het model zou zijn bij gebruik van de drie spelconfiguraties tezamen (vergelijking 11). Deze modellen werden opgesteld door minimalisatie van de gemiddelde kwadratische fout tussen de gemodelleerde en de gemeten massa (vergelijking 12). Als minimalisatie algoritme werd het Nelder-Mead simplex algoritme (Lagarias et al., 1998) gebruikt, toegepast in Matlab.

$$x = a * \Delta E C a_{11PRP} + b * \Delta E C a_{1HCP} + c * \Delta E C a_{2HCP} \quad (11)$$

$$\min = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m_{obs})^2}{N}} \quad (12)$$

Hierbij stelt  $N$  het aantal datapunten voor dat zich in het scenario bevindt,  $m_{obs}$  is de geobserveerde massa van het object en  $x$  is de combinatie van signalen berekend in vergelijking 11.

Zowel de determinatiecoëfficiënt als de RMSE werd voor elk model berekend en is in onderstaande tabellen weergegeven (Tabel 9 en Tabel 10).

**Tabel 9. Per diepte-interval de Pearson correlatiecoëfficiënt van de spelconfiguratie die tot het beste model leidt (kolom 3) tegenover de Pearson correlatiecoëfficiënt van het model met alle spelconfiguraties (kolom 4)**

Diepte interval	Spelconfiguratie	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (alle)
0 - 0.45 m	2HCP	0.76	0.78
0.45 - 0.70 m	11PRP	0.79	0.82
> 0.70 m	-	-	0.42

**Tabel 10. Per diepte-interval de RMSE (kg) van de spoelconfiguratie die tot het beste model leidt (kolom 3) tegenover de RMSE (kg) van het model met alle spoelconfiguraties (kolom 4)**

Diepte interval	Spoelconfiguratie	RMSE	RMSE (alle)
0 - 0.45 m	2HCP	4.04	4.25
0.45 - 0.70 m	11PRP	3.07	3.32
> 0.70 m	-	-	5.78

Op het eerste zicht leken de modellen met inbegrip van de drie spoelconfiguraties een hogere kwaliteit te bevatten door hun hogere  $R^2$  is dan die van de modellen met slechts 1 configuratie. Hun gemiddelde fout tussen geobserveerde en gemodelleerde massa was echter ook hoger wat dan weer op een minder goede kwaliteit wijst. Er werd geopteerd voor de modellen die de RMSE in kg minimaliseerden omdat het verschil in gemiddelde fout belangrijker wordt geacht dan het verschil in  $R^2$ .

Voor de objecten dieper dan 0.70 m vormt dit natuurlijk een probleem, geen enkele spoelconfiguratie kon genoeg variatie in de data verklaren om in een model gebruikt te worden. Om toch een, zij het een ruwe, schatting te kunnen doen van de massa werd alsnog een model opgesteld met de metingen van drie spoelconfiguraties gecombineerd. De uiteindelijk bekomen modellen voor elk interval worden hieronder verder toegelicht.

#### **4.9.1.1 Objecten in de bouwvoor: 0 tot 0.45 m**

Voor objecten in de bouwvoor werd na minimalisatie onderstaande vergelijking voor het schatten van de massa bekomen:

$$m = 1.7 - 1.239 * \Delta EC a_{2HCP} \quad (13)$$

Een scatterplot van de massa van de objecten in dit diepte interval worden op Figuur 42 weergegeven samen met de 90%-betrouwbaarheidscurves van het model. De massa van deze objecten varieerde van 4 kg tot 32 kg. Het model is dan ook enkel geldig binnen dit bereik. Zo kan er bijvoorbeeld gesteld worden dat, met een betrouwbaarheid van 90 %, een  $\Delta EC a_{2HCP}$  anomalie van -10 mS/m overeenkomt met een object in de bouwvoor van 5 tot 24 kg. Uit de ANOVA tabel (Tabel 12) kan afgeleid worden dat de berekende p-waarde 0.01 kleiner is dan het vooropgestelde significantieniveau van 5 %, de nulhypothese wordt dus verworpen en de  $\Delta EC a_{2HCP}$  waarde wordt aanvaard als schatter van de massa.

#### 4.9.1.2 Objecten net onder de bouwvoor: 0.45 tot 0.70 m

Voor objecten net onder de bouwvoor leidt een massa voorspelling met de 11PRP-spoelconfiguratie tot de laagste RMSE (vergelijking 14). De meeste restanten van WO I bevinden zich op deze diepte.

$$m = 1.36 * \Delta E C a_{11PRP} - 0.67 \quad (14)$$

Figuur 42 toont opnieuw een scatterplot van de massa van de objecten en de 90% betrouwbaarheidscurves van het model. Er waren 12 objecten in dit interval met massa's die varieerden tussen 0 en 16 kg. Er werd een p-waarde van 0.001 berekend waardoor de nulhypothese verworpen werd (Tabel 13).

#### 4.9.1.3 Objecten diep in de bodem: 0.70 m

Bij de opstelling van dit model werd de coëfficiënt voor de 1HCP-spoelconfiguratie op 1 gehouden omdat de 1HCP-spoelconfiguratie de beste Pearson correlatie met de massa vertoonde in vergelijking met de 2HCP- en 11PRP-spoelconfiguratie. Door de coëfficiënt te fixeren op 1 bleven de andere coëfficiënten tussen 0 en 1 en leverden zij dus een kleinere bijdrage vergeleken met de 1HCP-spoelconfiguratie.

$$m = 0.25 * \Delta E C a_{11PRP} + \Delta E C a_{1HCP} - 0.37 * \Delta E C a_{2HCP} \quad (15)$$

Dit model leverde een RMSE van 8.34 kg, dit is de grootste gemiddelde kwadratische fout tot nu toe verkregen in de massamodellen. Dit model levert dus geen aanvaardbaar resultaat en werd verder dan ook niet meer gebruikt.

#### 4.9.2 Massa op basis van FEMP

Aangezien de FEMP een goede correlatie met de massa vertoont kan de massa van het object ook ingeschat worden door gebruik te maken van de FEMP. Onderstaande tabel (Tabel 11) toont de minimale RMSE van de modellen opgesteld per diepte interval.

**Tabel 11. De gemiddelde gekwadrateerde fout tussen de vergelijkingen opgesteld door de FEMP en door een of meerdere spoelconfiguraties (model)**

	<b>FEMP</b>	<b>Model</b>
	gemiddelde fout (kg)	gemiddelde fout (kg)
<b>0-0.45</b>	4.54	4.25
<b>0.45-0.70</b>	4.81	3.32
<b>&gt; 0.70</b>	5.26	8.34

Enkel diep in de bodem heeft de FEMP een gemiddelde fout lager dan de gemiddelde fout van de hierboven opgestelde vergelijkingen. Objecten die dieper dan 70 cm gelokaliseerd zijn kunnen dus beter met de FEMP geschat worden dan met de combinatie van verschillende spoelconfiguraties. Dat kan met de volgende vergelijking:

$$m = 0.17 * FEMP + 5.22 \quad (16)$$

De berekende p-waarde is groter dan de vooropgestelde 5 % (Tabel 14). Dit wijst er op dat de nulhypothese niet kan worden verworpen en de FEMP niet voldoende in staat is om de massa van de diepe objecten te schatten. Dat kan ook besloten worden door het feit dat van de totale variantie van 195 (kg<sup>2</sup>) slechts 28 (kg<sup>2</sup>) verklaard wordt door het model. Bij gebrek aan een betere optie wordt dit model toch in gebruik genomen.

#### 4.9.3 Conclusie: methodologie voor massabepaling

Voor het bepalen van de massa van metalen objecten op basis van de ECa-metingen van een veld kan als volgt te werk gegaan worden:

- 1) Na interpolatie wordt voor elke spoelconfiguratie een gefilterde kaart gecreëerd ( $ECa_{filter}$ ).
- 2) Op elke locatie wordt de  $\Delta ECa$ -waarde berekend door:  $\Delta ECa = ECa - ECa_{filter}$
- 3) De FEMP wordt op elke locatie berekend met behulp van de  $\Delta ECa$ -waarden.
- 4) Het stroomdiagram op Figuur 34 wordt gevolgd waardoor elke locatie aan een diepte-interval wordt toegewezen.
- 5) Wanneer meerdere diepte-intervallen aan 1 anomalie worden toegewezen wordt enkel het interval met de meest oppervlakkige diepte weerhouden.
- 6) Per diepte-interval kan de massa volgens het overeenkomstige massamodel geschat worden.
- 7) Van elke anomalie wordt de maximaal geschatte massa geselecteerd.

Tabel 12. ANOVA van het massamodel voor objecten in de bouwvoor (0 tot 0.45 m)

Bron van variantie	Kwadraten-sommen	df	Gemiddelde kwadraten	F test	p-waarde
Lineaire regressie	368.57	1	368.57	16.112	0.01
Afwijking	114.379	5	22.876		
Totale variantie	482.949	6			

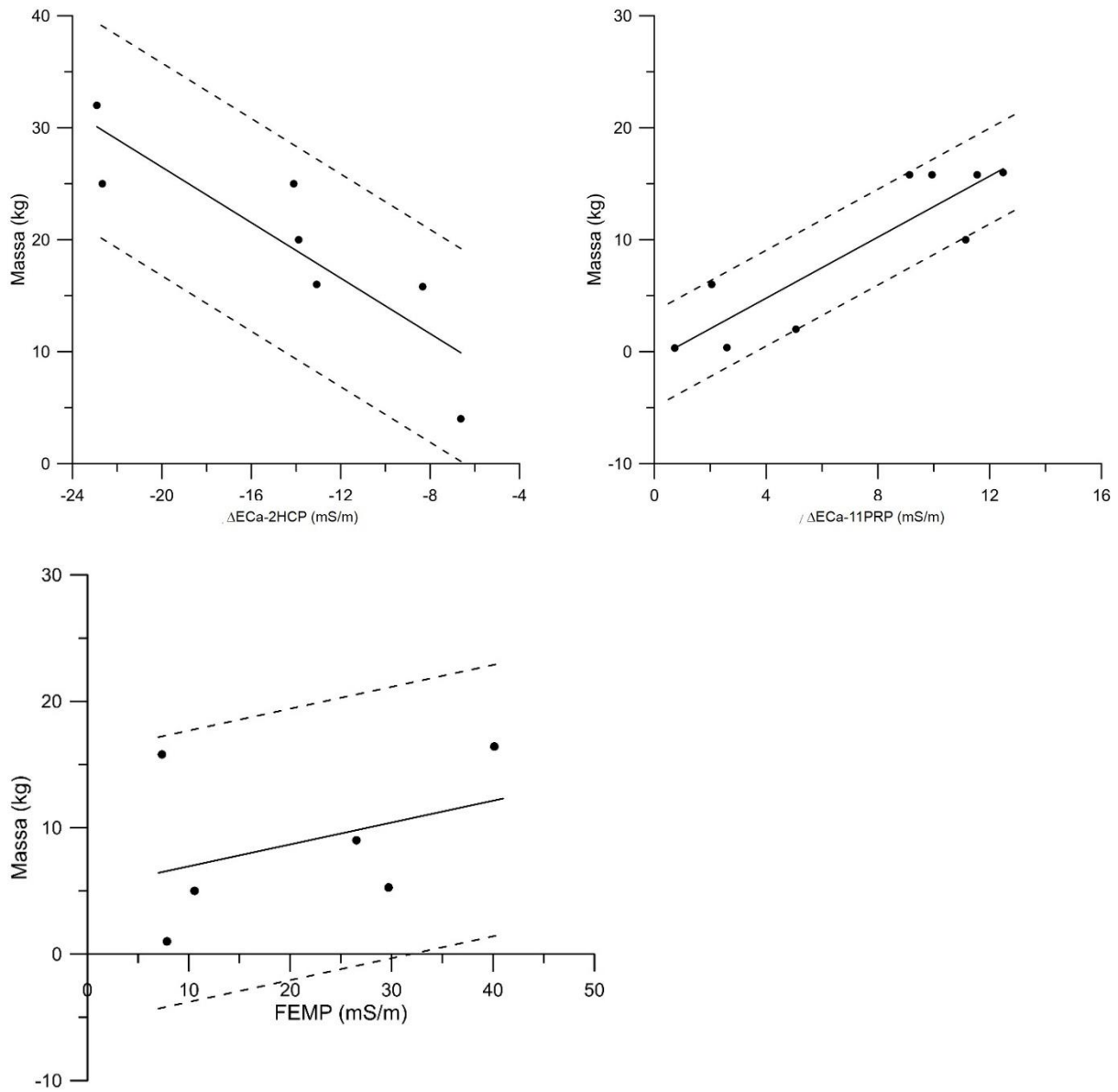
Tabel 13. ANOVA van het massamodel voor objecten net onder de bouwvoor (0.45 tot 0.70 m)

Bron van variantie	Kwadraten-sommen	df	Gemiddelde kwadraten	F test	p-waarde
Lineaire regressie	311.347	1	311.347	25.617	0.001
Afwijking	85.077	7	12.154		
Totale variantie	396.424	8			

Tabel 14. ANOVA van het massamodel voor objecten diep in de bodem (> 0.70 m)

Bron van variantie	Kwadraten-sommen	df	Gemiddelde kwadraten	F test	p-waarde
Lineaire regressie	28.203	1	28.203	0.677	0.457
Afwijking	166.627	4	41.657		
Totale variantie	194.829	5			





**Figuur 42. de verschillende modellen met hun 90% betrouwbaarheidsintervallen, (a) is in de bouwvoor, (b) net onder de bouwvoor en (c) voor objecten diep in de bodem**



## 5 Diepte- en massa-inschatting in de praktijk

### 5.1 De centrale frontzone

De methodologie uit 4.9.3 werd toegepast op proefveld 2. Naar schatting bevat het volledige proefveld meer dan 18 ton metaal, dat komt overeen met ongeveer 2.8 ton/ha (Tabel 15). 14 % van de totale massa bevindt zich in de bouwvoor (0-0.45 m). Het grootste aandeel, 80 % van de totale massa, bevindt zich net onder de bouwvoor (0.45-0.70 m) en slechts 5 % zit dieper in de bodem. Ook het aantal objecten is het hoogste net onder de bouwvoor (Tabel 15). De meeste objecten in de bouwvoor hebben een massa van 8 tot 16 kg.

Gekeken naar de verdeling van de objecten op het veld valt op dat de objecten op 0.40 m tot 0.70 m en dieper gelijkmatig verspreid over het veld liggen. De meest oppervlakkige objecten komen in clusters voor, bijvoorbeeld in het oosten en het zuiden van het veld (Figuur 43). Dat zijn de locaties die overeenkomen met de aanwezigheid van bunkers en Livens projectoren (zie 4.2.2). Dergelijke grote voorwerpen werden niet opgenomen in de dataset waarmee de methodologie werd opgesteld. De dataset bevat objecten tot een massa van 30 kg. Om die reden werden de anomalieën die een geschatte massa zwaarder dan 30 kg aantoonden niet meegerekend in Tabel 15.

Tabel 15. Het aantal objecten per diepte interval en hun massa van proefveld 2

	Massa (kg)	Aantal (-)
<b>0-0.45 m</b>	2692	200
<b>0.45-0.70 m</b>	14849	2383
<b>&gt; 0.70 m</b>	1118	142
<b>Totaal (tot)</b>	18659	2725
<b>Opp (ha)</b>	6.55	6.55
<b>Tot/ha</b>	2849	416

### 5.2 De rand van de frontzone

De methodologie uit 4.9.3 werd daarnaast ook toegepast op proefveld 4, dat zich aan de rand van de frontzone bevond. Volgens deze methode bevindt er zich in totaal ongeveer 1 ton/ha metaal op de velden die niet tot weinig geploegd worden tegenover 0.5 ton/ha op het veld dat regelmatig geploegd wordt. De verdeling van de massa van het metaal over de diepte-intervallen is voor de niet en weinig geploegde velden gelijkaardig aan elkaar: ongeveer 14 % van de totale

massa zit in de bouwvoor, 60 % net onder de bouwvoor en de resterende 20 à 30 % dieper in de bodem (Tabel 16). Bij het geploegde veld zit slechts 2 % van de totale massa in de bouwvoor, 84 % zit net onder de bouwvoor en 13 % dieper. Absoluut gezien bevat het geploegde veld tot bijna de helft minder metalen objecten per hectare bevat dan de niet of weinig geploegde velden: 86 objecten werden in het geploegde veld geïdentificeerd tegenover 173 en 156 objecten/ha in het niet en weinig geploegde veld.

Als de kaart van de verdeling van de metalen objecten (Figuur 43) met de luchtfoto (Figuur 27) van de velden wordt vergeleken kunnen meerdere objecten gekoppeld worden aan bomkraters op de foto. In deze gevallen zou het metalen object mogelijk een scherp van een ontplofte granaat kunnen voorstellen. De anomalieën die niet in een bomkrater gelokaliseerd zijn, kunnen van niet-ontplofte granaten afkomstig zijn.

**Tabel 16. Het aantal objecten per diepte interval en hun massa van de drie velden van proefveld 4**

	Massa (kg)			Aantal (-)		
	Veld a Geploegd	Veld b Weinig	Veld c Niet- geploegd	Veld a Geploegd	Veld b Weinig	Veld c Niet-geploegd
<b>0-0.45 m</b>	10	194	178	2	15	13
<b>0.45-0.70 m</b>	343	588	704	53	106	151
<b>&gt; 0.70 m</b>	55	239	377	7	32	50
<b>Totaal (tot)</b>	408	1021	1259	61	153	214
<b>Opp (ha)</b>	0.71	0.98	1.24	0.71	0.98	1.24
<b>Tot/ha</b>	575	1042	1015	86	156	173

### 5.3 Discussie: massa- en diepte-inschatting

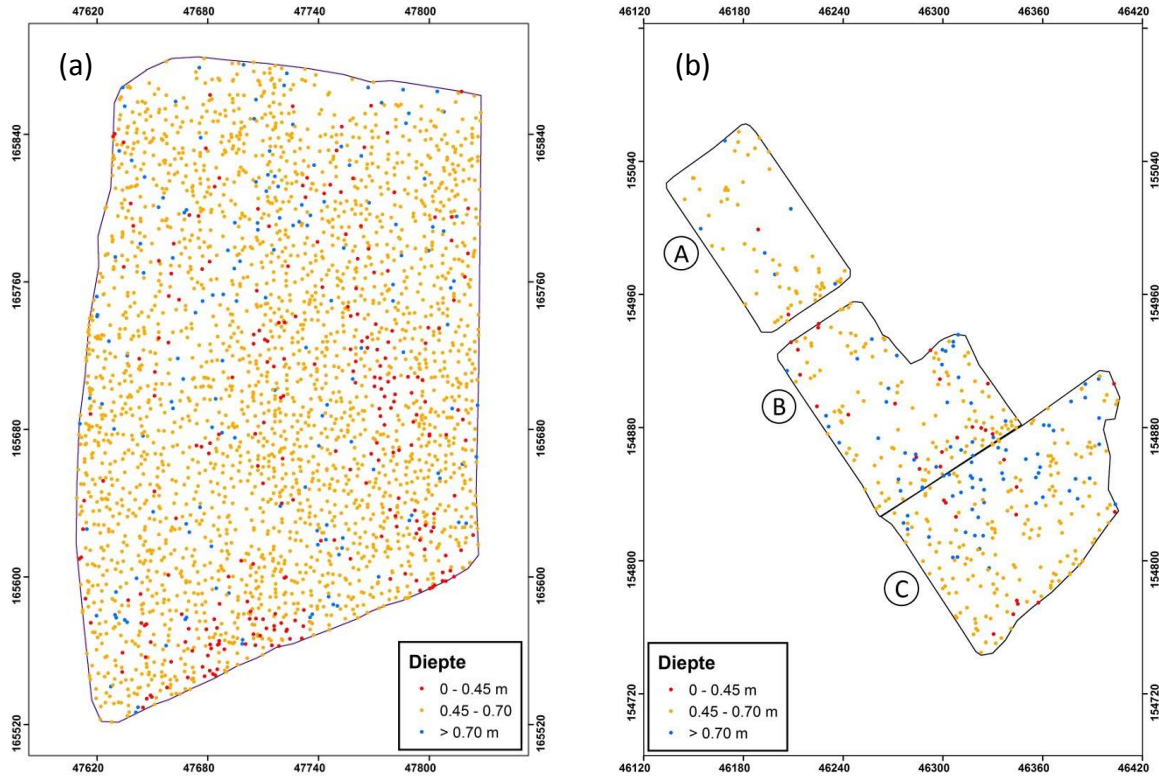
Het veld dat centraal in de frontzone gelegen is en dat jaarlijks wordt bewerkt bevat een geschatte hoeveelheid van 2.8 ton metaal per hectare. De velden aan de rand van de frontzone bevatten geschat 0.5 tot 1 ton metaal per hectare. De situering van een veld in de frontzone en mate van beschietingen en daaruit volgende bodemverstoring tijdens de oorlog heeft dus duidelijk een effect op de hoeveelheid achtergebleven metaal in de bodem. Ook de mate van veldbewerking zorgt voor een verschil in aantal metalen objecten. Door het ploegen van het veld worden voornamelijk objecten in de eerste 45 cm van de bodem aangetroffen en verwijderd. Daardoor stijgt na het ploegen het procentueel aandeel van objecten net onder die 45 cm tegenover het aandeel in de bovenste 45 cm.

Karg (2005) schatte dat 10 tot 15 % van de afgeschoten granaten niet ontplofte. Als er vanuit gegaan wordt dat elke anomalie, met een geschatte massa tot 30 kg, afkomstig is van een

afgeschoten en niet-ontplofte granaat, dan zouden er op proefveld 2 in Wijtschate 273 tot 409 gevaarlijke projectielen aanwezig zijn. Dat komt overeen met 42 tot 62 niet-ontplofte projectielen per hectare, of gemiddeld 1 niet-ontplofte granaat per 200 m<sup>2</sup>. De oppervlakte van de frontzone, berekend op basis van de meest uiterste frontlijnen en 500 m daarbuiten, bedraagt ongeveer 170 km<sup>2</sup>. De hoeveelheid achtergebleven metaal in de frontzone is lokaal zeer verschillend doordat de beschieting niet uniform gebeurde. Als elke zone een gelijkaardige verwoesting als proefveld 2 in Wijtschate kende, dan zou dit willen zeggen dat er naar schatting in de volledige frontzone nog ongeveer 714 000 niet-ontplofte granaten in de bodem aanwezig zijn.

Veel voorkomende granaten die door landbouwers worden aangetroffen zijn bijvoorbeeld Britse 18 ponders (8.57 kg) of de Duitse tegenhanger, de 7.7 cm granaat (7.1 kg) (De Vos et al., 2014). Anomalieën die overeenkomen met een object met een geschatte massa groter dan 7 kg zouden dus mogelijk veroorzaakt kunnen zijn door zulke niet-ontplofte granaten. Maar er worden ook veel handgranaten teruggevonden in de bodem. Deze handgranaten kunnen vaak nog ontploffen, zo zijn er dertien ongevallen bekend waarbij mensen om het leven kwamen (Desreumaux, 2011). Ze hebben een massa van slechts een honderdtal gram. Ook kogels, slechts enkele grammen zwaar, kunnen nog steeds ontploffen en voor veel menselijk leed zorgen. Anomalieën die voorspeld worden als veroorzaakt door een licht metalen voorwerp mogen dus niet zomaar als ongevaarlijke scherven bestempeld worden.

Er kan aanvullend een vergelijking met de locatie van bomkraters op luchtfoto's uit WO I gemaakt worden. Objecten die zich in een bomkrater bevinden zullen waarschijnlijk scherven van de ontplofte granaat voorstellen. Bij een object dat zich daarentegen op een ongeschonden plaats bevindt is de kans groter dat het om een gevaarlijk projectiel gaat.



**Figuur 43. Overzicht van de locatie en het diepte interval van de objecten op de vier velden, (a) proefveld 2, (b) proefveld 4 met het geploegde veld (veld a), het weinig-geploegde veld (veld b) en het niet-geploegde veld (veld c).**

## 6 Discussie

De magnetometer metingen geven een zwaar verstoord beeld van de ondergrond van WO I-velden. Elke scherf van een metalen object leidt immers tot een anomalie. Deze overvloed aan anomalieën maakt het moeilijk andere sporen, zoals loopgraven, terug te vinden. De diepte van de metalen objecten, ingeschat aan de hand van de FWHM-methode, bleek meestal dieper dan de werkelijke diepte. Dat wordt ook bevestigd in de resultaten van Pasion (1996). De FWHM-methode gaf voor elk object een aanvaardbare schatting, maar er werden te weinig objecten bekeken om daar verder conclusies uit te kunnen trekken. De FWHM-methode werkt namelijk enkel wanneer het object een duidelijke dipool signatuur voorstelt in de metingen. Veel objecten vertonen geen dipool of de dipolen lopen in elkaar over waardoor de juiste waarden niet met zekerheid konden worden geselecteerd. Vooral in WO I-velden waar bijna over het gehele veld scherven verspreid liggen is het geen sinecure om deze methode toe te passen.

Zoals de metingen van de EMI-sensor van enkele velden in de WO I frontzone laten zien, komen op de ECa-metingen van de 11PRP- en 1HCP-spoelconfiguraties en op de MSa-metingen van 2HCP-spoelconfiguraties de anomalieën veroorzaakt door metalen objecten het duidelijkst naar voor. Op deze MSa-metingen zijn meer subtiele sporen van verstoringen in de bodem, zoals met bodem opgevulde loopgraven, het best zichtbaar. Volgens de cumulatieve diepteresponscurves van de ECa-metingen zou het magnetisch veld van 11PRP-spoelconfiguratie het ondiepst in de bodem doordringen, gevolgd door de 1HCP- en 2HCP-configuraties. Voor de metalen objecten kon niet op deze benaderingen vertrouwd worden maar uit de data bleek toch dat de 11PRP- en 1HCP-spoelconfiguraties gevoeliger waren voor ondiep gelegen metalen objecten dan de 2HCP-configuratie. Ondanks de over het algemeen kleine afwijkingen van de 2HCP-spoelconfiguratie boven metalen objecten konden deze metingen het best gecorreleerd worden aan zowel de massa als de diepte van de objecten. De 1HCP- en 11PRP-spoelconfiguraties reageerden verschillend op de begraven objecten in die zin dat de 1HCP-spoelconfiguratie eerder gecorreleerd was met de diepte van een object terwijl de 11PRP-spoelconfiguratie gevoeliger bleek voor verschillen in massa. De FEMP, die voor het overgrote deel de ECa-metingen van 11PRP-spoelconfiguratie voorstelt, vertoonde ook goede correlaties met de massa van begraven objecten. Er werden daarvoor gelijkaardige resultaten als Saey et al. (2011) bekomen. Dit bevestigt de bruikbaarheid van de FEMP voor het inschatten van massa.

Algemeen viel op dat bij de ECa-metingen met de 2HCP-spoelconfiguratie de anomalieën telkens negatief waren, de anomalieën van de 11PRP-spoelconfiguratie altijd positief en de anomalieën van de 1HCP-spoelconfiguratie varieerden van teken. Het typische verloop van een ECa-anomalie voor de HCP-configuratie boven een metalen voorwerp is twee positieve pieken met daartussen een negatieve, dit werd zowel terug gevonden na theoretische modellering door Guillemoteau & Tronicke (2015) als, hoewel minder duidelijk, in de data in deze thesis. Hoe dieper een object zich

bevindt, hoe kleiner de negatieve piek wordt (dichter bij nul), tot er enkel een positieve respons te zien is na het overschrijden van een bepaalde diepte. Bij de 1HCP-spoelconfiguratie gebeurt dit op een diepte van 0.75 m, door zijn grotere spoelafstand wordt de omslag bij de 2HCP-configuratie dieper in de bodem verwacht, beneden de diepte tot waar metalen objecten waarneembaar zijn. Bij deze configuratie zijn begraven metalen objecten dus enkel zichtbaar als negatieve afwijkingen.

Voor de objecten in de bovenste 45 cm van de bodem, werd het massamodel enkel met de metingen van de 2HCP-spoelconfiguratie opgesteld. Van 0.45 tot 0.70 m diepte werd deze enkel met de 11PRP-metingen opgesteld en voor diepere objecten werd de FEMP gebruikt. De betrouwbaarheidsintervallen van deze modellen waren voor de diepere objecten vrij breed, maar kunnen toch een vrij betrouwbare indicatie geven van de massa. Voor de objecten net onder de bouwvoor kan met de meeste zekerheid de massa geschat worden.

De reden dat niet elk object een voorspelbare signatuur opleverde is dat zijn massa en diepte niet de enige variabelen zijn die een invloed op de waarde van de metingen uitoefenen. Ook de oriëntatie, de vorm en de samenstelling van het metaal van de objecten spelen hierin een rol. Het is daarnaast niet altijd met zekerheid te bepalen of een bepaalde anomalie enkel afkomstig is van het opgegraven object, er kunnen zich dieper in de bodem immers nog objecten bevinden die bij de benadering van het object niet werden opgegraven. Bij het selecteren van de maximale respons van een object kunnen daarenboven verschillen in waarden en vorm van anomalie optreden die te wijten zijn aan de richting waarin de sensor over het object beweegt. Guillemoteau & Tronicke (2015) ondervonden dat een voorwerp dat loodrecht op de meetlijnen is georiënteerd beter gedetecteerd wordt dan een voorwerp dat zich parallel met de meetlijnen bevindt. Er is daarnaast ook de instrumentele ruis van de sensor, deze is afhankelijk van het 'sampling interval', de interferentie door de omgeving en de spoelafstand (Delefortrie et al., 2014b). Hoe verder de zend- en ontvangstspoel van elkaar verwijderd zijn hoe kleiner de 'signal-to-noise'-ratio. Zo kwamen Delefortrie et al. (2014b) voor de 1HCP-, 11PRP- en 2HCP-spoelconfiguraties respectievelijk de volgende ruiswaarden uit: 0.8 mS/m, 0.5 mS/m en 1 mS/m. Er kan verwacht worden dat de metingen in deze thesis een gelijkaardig ruisniveau bezitten. Aangezien deze ruisniveau's eerder klein zijn werd hiermee tijdens de analyse geen rekening gehouden. Dat zal voor het toekennen van diepte-intervallen aan de anomalieën niet veel verschil uitmaken maar voor de massamodellen, waar een fout op de metingen tot andere resultaten leidt, kan dit wel voor verschillen zorgen. Bij de dataverwerking zelf is de manier van interpolatie een factor van onzekerheid, maar omdat er nooit geïnterpoleerde waarden werden gebruikt introduceert dat geen extra fout in de resultaten. Verder kan het gebruik van een andere filter dan de mediaan filter op de data ook andere waarden genereren. Al deze factoren dienen zeker in het achterhoofd gehouden te worden bij het gebruik van de diepte- en massamodellen.





Uiteindelijk werden al de modellen enkel opgesteld met de ECa-data. Een reden is dat bij het onderzoeken van de MSa-data bleek dat de vorm van anomalie een grotere aanwijzing was voor de diepte en massa dan enkel de maximaal afwijkende waarde boven een object. De piste om metaalobjecten te karakteriseren met MSa werd niet gevolgd.

In deze thesis werd een methodologie op punt gesteld en toegepast op diverse andere velden om tot een inschatting te komen van de hoeveelheid metaal in de ondergrond. Een diepgaande verificatie bleek niet mogelijk, voornamelijk omwille van veiligheidsredenen. Er mag immers in België niet gericht op zoek gegaan worden naar niet-ontplofte munitie waardoor het telkens wachten was op een speciale gelegenheid, zoals een archeologisch vooronderzoek, waarbij de bodem op een wettelijke en veilige manier werd opengelegd. Door het beperkte aantal van deze kansen was er uiteindelijk niet voldoende data voorhanden om zowel een kalibratie als een validatie uit te voeren, waardoor alle data gebruikt werd om een betrouwbaar model op te stellen. Het zou zeer wenselijk zijn in de toekomst een validatie van zowel de diepte- als de massamodellen te verrichten, waarbij systematisch de voorspellingen worden afgetoetst.

Door het vergelijken van de ECa-metingen van al de verschillende spoelconfiguraties kan ook een uitspraak gedaan worden over de massa en diepte van een metalen voorwerp (Figuur 44). In de figuur wordt de signatuur van enerzijds een handgranaat op beperkte diepte en anderzijds een zware massieve granaat op grotere diepte weergegeven.

Na het toepassen van de finale methodologie op vier verschillende velden in, of nabij de frontzone werd de impact van WO I activiteiten op de hoeveelheid achtergebleven metaal in de ondergrond duidelijk: op het proefveld in het centrum van de voormalige frontzone is meer dan tweemaal zo veel metaal (per hectare) in de bodem achtergebleven dan op de velden aan de rand van de frontzone. Ook de functie die het veld vervult bepaalt voor een deel de hoeveelheid metaal die nog in de bodem aanwezig is. Hoe meer het veld geploegd werd en wordt, hoe minder metalen fragmenten er in de bouwvoor zijn achtergebleven. Terreinen, zoals woonzones en tuinen, die zich in het centrum van de frontzone bevonden en waarop geen invasieve (landbouw-) activiteiten worden uitgevoerd zullen potentieel dus een alarmerende hoeveelheid al dan niet gevaarlijke metalen WO I restanten bevatten. Tot slot moet nog vermeld worden dat op alle geteste velden het grootste aantal metalen objecten net onder de bouwvoor gelokaliseerd is. Dit komt enerzijds omdat de meeste intacte sporen van WO I op die diepte in de bodem gesitueerd zijn, maar ook omdat landbouwers al gedurende bijna 100 jaar elk jaar scherven en bommen uit de bouwvoor (bovenste 45 cm) halen tijdens het ploegen.

Object	Diepte (m)	$\Delta$ ECa-metingen		
		1HCP	2HCP	11PRP
	0-0.3	--	--	++
	0.7-1.1	+	-	+

**Figuur 44.** Overzicht van de respons die verkregen wordt bij een ondiep gelegen klein object (zoals een handgranaat) en een diep gelegen groot object (zoals een 21 cm granaat).

## 7 Conclusie

Het doel van deze thesis was het opstellen van een methodologie om op basis van metingen met niet-invasieve bodemsensoren een uitspraak te kunnen doen over de diepte en massa van metalen voorwerpen in de ondergrond.

Het inschatten van de diepte van metalen objecten in de bodem met een magnetometer resulteerde in een model met een gemiddelde kwadratische fout van 0.08 m. Deze methode bleek echter enkel effectief wanneer de magnetometer duidelijk afgezonderde anomalieën genereerde. Op een veld met een grote verscheidenheid aan metalen fragmenten wordt het beeld dat door een magnetometer verkregen wordt zodanig druk dat het niet mogelijk is om aan alle objecten een diepte toe te kennen.

Het alternatief, een bodemonderzoek met een multi-signaal EMI-bodemsensor, gaf een robuuster resultaat. De objecten werden onderverdeeld in diepte-intervallen en per diepte-interval werd een model opgesteld om de massa in te schatten. Voornamelijk voor de objecten in de bovenste 0.45 m in de bodem en daar net onder lijken de modellen een degelijke voorspelling te kunnen maken van de massa van de metalen objecten. Deze modellen geven een gemiddelde kwadratische fout van respectievelijk 4 en 3 kg.

Op een veld dat tijdens de oorlog meermaals in het centrum van de gevechten heeft gelegen is 100 jaar na het uitbreken van WO I naar schatting 2.8 ton metaal per hectare aanwezig. Geschat wordt dat er gemiddeld 416 afzonderlijke objecten per hectare in de bodem zitten. Als er vanuit gegaan wordt dat al deze objecten afgeschoten granaten zijn waarvan 10 tot 15 % niet ontploft is komt dat neer op ongeveer 1 niet-ontplofte granaat per 200 m<sup>2</sup>, of iets in de grootteorde van enkele honderdduizenden niet-ontplofte projectielen in de volledige frontzone.

Aan de hand van metingen met een multi-signaal EMI-sensor op de velden in de WO I-frontzone kan men, door het volgen van de opgestelde methodologie, een voorspelling maken van de hoeveelheid metaal die daar nog aanwezig is. Daarenboven kan men ook in verschillende dimensies de begraven metalen objecten in kaart brengen.



## 8 Literatuurlijst

Aspinall, A., Gaffney, C. & Schmidt, A., (2008). *Magnetometry for archaeologists*. New York: Altamira Press.

Bracke, M., (2014). Basisrapport archeologische prospectie: Zillebeke-Zandvoordestraat. In opdracht van: Monument Vandekerckhove nv.

Brosten, T.R., Day-Lewis, F.D., Schultz, G.M., Curtis, G.P. & Lane Jr., J.W., (2011). Inversion of multi-frequency electromagnetic induction data for 3D characterization of hydraulic conductivity. *Journal of Applied Geophysics*, 73(4), 323–335.

Callegary, J.B., Ferré, T.P. a. & Groom, R.W., (2007). Vertical Spatial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction-Number Electromagnetic-Induction Instruments. *Vadose Zone Journal*, 6(1), 158.

Casey, K.F. & Baertlein, B.A., 1999. An overview of electromagnetic methods in subsurface detection. In: Baum, C.E. (Editor). *Detection and identification of visually obscured objects*. Londen, Groot-Brittannië: Taylor & Francis.

Delefortrie, S., Saey, T., Van De Vijver, E., De Smedt, P., Missiaen, T., Demerre, I. & Van Meirvenne, M., (2014a). Frequency domain electromagnetic induction survey in the intertidal zone: Limitations of low-induction-number and depth of exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 100, 14–22.

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

Desreumaux, J., (2011). *Land van schroot en knoken*. Leuven: Davidsfonds Uitgeverij.

De Vos, L., Simoens, T., Warnier, D. & Bostyn, F., (2014). *'14-'18 Oorlog in België*. Leuven: Davidsfonds Uitgeverij.

DUALEM Inc. (2006). DUALEM-21S: User's Manual. Dualem Inc., Milton, Canada.

Goovaerts, P., (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press.

Guelle, D., Smith, A., Lewis, A. & Bloodworth, T., (2003). *Metal detector handbook for humanitarian demining*. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities.

Guillemoteau, J. & Tronicke, J., (2015). Non-standard electromagnetic induction sensor configurations: Evaluating sensitivities and applicability. *Journal of Applied Geophysics*, 118, 15–23.

Johnson, J.K., (2006). *Remote Sensing in Archaeology*. Tuscaloosa: The University of Alabama Press.

Karg, F., (2005). Consideration of toxic metabolites from explosives & chemical warfare agents on polluted military and armament sites for health risk assessments. *Consoil 2005 Proceedings* (eds O. Uhlmann, G. Annokkee and F. Arendt). 710-720. Forschungszentrum Karlsruhe.

- Keegan, J., (2000). *The First World War*. New York: Vintage.
- Khadr, N., Barrow, B.J. & Bell, T.H., (1998). Target shape classification using electromagnetic induction sensor data. *Proc. UXO Forum*.
- Lagarias, J. C., Reeds, J.A., Wright M.H. & Wright, P.E. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal of Optimization*, Vol. 9, Number 1, 1998, pp. 112–147.
- McNeill, J.D., (1980a). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada.
- McNeill, J.D., (1980b). Electrical conductivity of soils and rocks. Technical Note TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada.
- McNeill, J.D. & Bosnar, M., (2000). Application of TDEM techniques to metal detection and discrimination: a case history with the new Geonics EM-63 fully time-domain metal detector. Technical Note TN-32, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada.
- Milsom, J., (2003). *Field Geophysics*. (3de druk). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Pasion, L.R., (1999). Detecting Unexploded Ordnance With Time Domain Electromagnetic [masterproef]. The University of British Columbia, Department of Earth and Ocean Sciences.
- Saey, T., Simpson, D., Vermeersch, H., Cockx, L., & Van Meirvenne, M., (2009). Comparing the EM38DD and DUALEM-21S sensors for depth-to-clay mapping. *Soil Science Society of America Journal*, 73(1), 7-12.
- Saey, T., Van Meirvenne, M., Dewilde, M., Wyffels, F., De Smedt, P., Meerschman, E., Islam, M.M., Meeuws, F. & Cockx, L., (2011). Combining multiple signals of an electromagnetic induction sensor to prospect land for metal objects. *Near Surface Geophysics*, 9(1794), 309–317.
- Saey, T., De Smedt, P., Meerschman, E., Islam, M.M., Meeuws, F., Van De Vijver, E., Lehouck, A. & Van Meirvenne, M., (2012). Electrical Conductivity Depth Modelling with a Multireceiver EMI Sensor for Prospecting Archaeological Features. *Archaeological Prospection*, 19(1), 21–30.
- Saey, T., Stichelbaut, B., Bourgeois J., Van Eetvelde, V. & Van Meirvenne M., (2013). Short Report An Interdisciplinary Non-invasive Approach to Landscape Archaeology of the Great War. *Archaeological Prospection*, 20, 39–44.
- SENSYS GmbH. Magnetic Areal Survey System Magneto MXPDA. Bad Saarow, Duitsland. Geraadpleegd op 18 mei 2015 via <http://www.sensys.de>
- Simpson, D., Lehouck, A., Verdonck, L., Vermeersch, H., Van Meirvenne, M., Thoen, E. & Docter, R., (2009). Comparison between electromagnetic induction and fluxgate gradiometer measurements on the buried remains of a 17th century castle. *Journal of Applied Geophysics*, 68(2), 294–300.

Stichelbaut, B., (2014). Zillebeke Zandvoordestraat: Historisch onderzoek projectgebied a.d.h.v. historische luchtfoto's en loopgravenkaarten Universiteit Gent. In opdracht van: Monument Vandekerckhove nv.

Stichelbaut, B., (2015). Heuvelland Kapellerie: Historisch onderzoek projectgebied a.d.h.v. historische luchtfoto's en loopgravenkaarten. Universiteit Gent. In opdracht van: Monument Vandekerckhove nv.

Thiesson, J., Dabas, M. & Flageul, S., (2009). Detection of resistive features using towed Slingram electromagnetic induction instruments. *Archaeological Prospection*, 16. 103–109.

Viaene, A., (1958). West-Vlaanderen. Brussel: Meddens. p 141 (Bewerking van kaart door Documentatiecentrum in Flanders Fields Museum).

Wait, J.R., (1962). A note on the electromagnetic response of a stratified earth. *Geophysics* 27, 382–385.