



Te Land, ter Zee en in de Lucht

Onderzoekstechnieken
voor archeologie en
bodembeheer



WAAIER OPKOMENDE ONDERZOEKSTECHNIEKEN

Colofon

Deze waaier is een uitgave van SIKB. De waaier geeft beknopte praktische informatie over een selectie aan innovatieve veldtechnieken bij archeologisch onderzoek en onderzoek naar verontreiniging, zowel op land als in de waterbodem.

Tekst

Programmabureau SIKB: Esther Wieringa, Arthur de Groof en Theo van Oeffelt

The Digital Digger: Wouter Verschoof-van der Vaart

Hussem Consultancy: Hans Hussem

Delta Marking: Andrew Devlin

Stema Systems: Michael Malik

Aqua Vision: Jeroen van Dam

Met inhoudelijke bijdragen van: Nikolaj Walraven, Ferry van den Oever, Eelco Rensink en Seger van den Brenk

Tekstredactie: Anne Marij Postel

Afbeeldingen

ArcheoPro, Grondslag, Informatie Vlaanderen, Kadaster, Nancy de Jong-Lambregts, Periplus Archeomare, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE), Saricon, Shutterstock, T&A Survey, Van der Helm, Universiteit Gent. Afbeeldingen omslag: ArcheoPro, Grondslag, T&A Survey.

SIKB heeft haar best gedaan om alle rechthebbenden wat betreft (foto)materiaal in deze waaier te achterhalen. Eenieder die meent dat zijn/haar materiaal zonder voorafgaande toestemming is gebruikt, wordt verzocht contact op te nemen met SIKB.

Vormgeving

Van Lint in vorm, Burgh-Haamstede

Uitgave: September 2022

SIKB

Postbus 420, 2800 AK GOUDA

Tel. 085 486 2450

info@sikb.nl

www.sikb.nl

Kennis van kwaliteit in bodem en archeologie



Inhoudsopgave

Landbodems

Ondiepe waterbodems

Airborne LiDAR ●●	7
Analoge luchtfotografie ●	9
Digitale luchtfotografie en fotogrammetrie ●●	11
Elektromagnetische Inductie (EMI) ●	13
Elektrische weerstandsonderzoek (EW) en Elektrische Resistiviteit Tomografie (ERT) ●	15
Ground Penetrating Radar (GPR) ●	17
Infrarood-spectrometrie ●	19
Magnetometrie in landbodems ●	21
Magnetometrie in waterbodems ●	23
Metaaldetectie ●●	25
Multi- en Hyperspectrale opnames ●	27
Side Scan Sonar en/of Sector Scan Sonar ●	29
Singlebeam- en Multibeam-echolood (SBES en MBES) ●	31
Sub-bottom profiler (SBP) ●	33
XRF ●	35





Introductie

Meer behoefte aan gebiedsdekkende bodeminformatie

De grote maatschappelijke opgaven, zoals klimaatadaptatie en energietransitie, en de Omgevingswet versterken de behoefte aan gebiedsgericht onderzoek. Na het in werking treden van de Omgevingswet zal de bodem (ook) juridisch gezien deel uitmaken van de fysieke leefomgeving. Daardoor zullen keuzes omtrent archeologie en bodemgebruik steeds meer een onderdeel vormen van een integrale gebiedsgerichte afweging. Hiervoor is gebiedsdekkende informatie over de bodem essentieel.

Kansen voor niet-invasieve meettechnieken

Geofysische en andere niet-invasieve meettechnieken (technieken waarvoor geen boor- of graafwerk nodig is) worden binnen de werkvelden waarop de SIKB-schema's zich richten (nog) relatief weinig toegepast. Deze technieken hebben zich echter al wel bewezen. Ze bieden kansen voor lijn- of vlakdekkende metingen en ze kunnen specifieke kenmerken en kwaliteiten van de bodem vaak nauwkeuriger in beeld brengen dan de klassieke meettechnieken (zoals monsterneming, gevolgd door chemische analyse in een laboratorium).

Kennis maken met niet-invasieve meettechnieken

We zien bij archeologie en bodembeheer wel een geleidelijke toename van de inzet van niet-invasieve meettechnieken, vaak als ondersteunende onderzoekstechniek. Technieken, en combinaties van technieken, worden steeds beter en toegankelijker. Omdat de resultaten van deze meettechnieken nu niet onder de voor bodembeheer geldende erkenningsregeling vallen, worden de uitkomsten daar meestal nog geverifieerd met klassieke metingen. In deze situatie zijn niet-invasieve technieken goed bruikbaar om alvast een beeld te krijgen van de kenmerken van de bodem waarnaar u op zoek bent. Het voor de klassieke metingen noodzakelijke boor- of graafwerk kan daarna dan veel gerichter worden ingezet. Dit geldt evengoed bij archeologie, waardoor deze technieken ook daar een waardevolle bijdrage kunnen leveren aan de kwaliteit van het onderzoek.

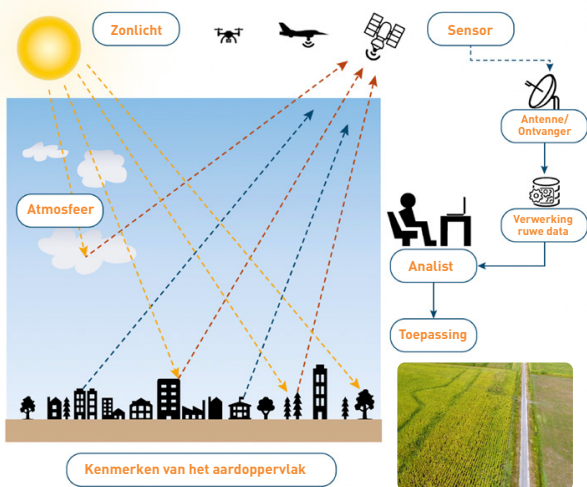
Via deze waaier wil SIKB u op een toegankelijke manier laten kennismaken met een aantal van deze innovatieve veldtechnieken bij archeologie en bodembeheer te land, ter zee en in de lucht en de mogelijkheden daarvan.



Vier gouden tips voor de opdrachtgever

1. Bedenk dat het uitvoeren van meettechnieken complex werk is en daarom veel specialistische kennis en ervaring vereist.
2. Weet wat u vraagt en welke techniek of combinatie van technieken het beste inspelt op uw vraag; deze waaier helpt u op weg.
3. Soms kunnen technieken gecombineerd worden ingezet voor bodem- en archeologisch onderzoek. Vraag uw specialist naar de mogelijkheden van gecombineerd onderzoek.
4. Ook de interpretatie van de data vereist veel kennis en ervaring. Ga vooraf in gesprek over uw verwachtingen en samenwerking bij het interpreteren van de gegevens.

Remote sensing



Schematische weergave van het principe (de werking) van remote sensing (Afbeelding: RCE, foto inzet: gemeente Vught)

Airborne LiDAR

Principe

Airborne Light Detection And Ranging (LiDAR) is een remote-sensing-techniek, vergelijkbaar met radar, die gebruikmaakt van infrarood licht om hoge resolutiehoogtemodellen van het aardoppervlak te maken. Een sensor – onder een vliegtuig, helikopter of drone – zendt een laserstraal uit richting de grond. Als deze straal iets raakt, bijvoorbeeld een blad, wordt een deel van de straal gereflecteerd naar de sensor.

De rest van de straal reist door en kan nog verschillende malen iets raken tot het iets raakt dat het niet kan penetreren; meestal de grond zelf. Vervolgens kan de afstand worden berekend tussen de sensor en elke reflectie. Verdere verwerking van de gegevens levert twee hoogtemodellen op: een DTM (digital terrain model) dat het maaiveld (zonder gebouwen enz.) weergeeft, en een DSM (digital surface model) dat alle data weergeeft inclusief gebouwen en vegetatie. Bij DSM zijn alle hoogteverschillen zichtbaar, dus ook die ontstaan door menselijk handelen (zoals dijken, groeves en grafheuvels).

Normaliter worden de hoogtemodellen met een visualisatietechniek omgezet van een raster met waardes naar een grijschaal of kleurenbeeld dat voor mensen beter leesbaar is.

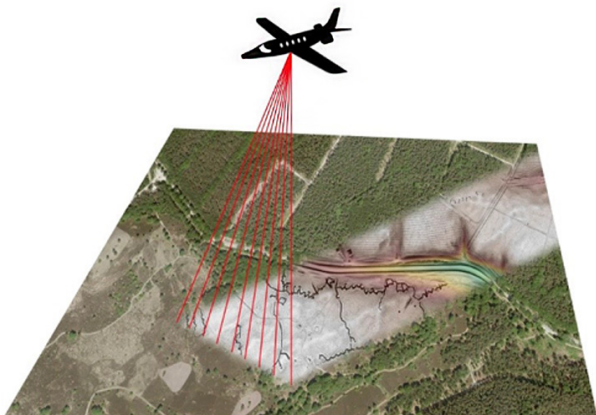
Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Opsporen van archeologische structuren in het landschap.
- **Bodembeheer:** Opsporen van overwoekerde structuren, maken van hoogtemodellen.
- **Waterbodembeheer:** Opsporen van objecten onder ondiep water. Onderzocht wordt of deze techniek bruikbaar is bij het meten van waterdiepte of baggerdikte.

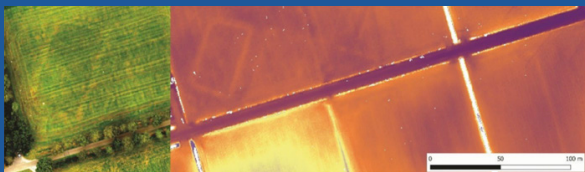
Aandachtspunten

- Alleen structuren die tot uiting komen als hoogteverschil kunnen met deze techniek worden opgespoord.
- Door verschillende visualisaties te gebruiken, zijn bepaalde structuren in de data beter te onderscheiden.
- Een groot voordeel van LiDAR ten opzichte van bijvoorbeeld luchtfoto's is dat met deze techniek ook onder bomen of andere vegetatie gemeten kan worden.





Principe van Airborne LiDAR (Afbeelding: Universiteit Gent)



*Voorbeeld resultaat: archeologische vindplaats
(Afbeelding: J. Waagen, UvA)*



Analoge luchtfotografie

Principe

Luchtfotografie heeft vanaf de tweede helft van de negentiende eeuw een snelle ontwikkeling doorgemaakt. Tegenwoordig zijn enorme hoeveelheden historische luchtfoto's beschikbaar die een waardevolle bron kunnen zijn voor het opsporen van structuren in het landschap. Er bestaan twee typen luchtfoto's: een verticale luchtfoto (zie afbeelding) is recht van boven genomen, terwijl een oblique luchtfoto onder een bepaalde hoek is genomen.

Structuren in het landschap zijn op luchtfoto's zichtbaar door verschillende oorzaken. Door verschillen in vochthuishouding, bijvoorbeeld vanwege een muur in de ondergrond, kunnen verkleuringen als gevolg van groeiverschillen in gewassen of natuurlijke vegetatie zichtbaar zijn. Daarnaast komen verkleuringen voor doordat grondsporen in de ondergrond worden aangeploegd of door het afgraven van de bovengrond. Ten slotte kan ook schaduwwerking door hoogteverschillen in het aardoppervlak zichtbaar zijn op luchtfoto's.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Opsporen van archeologische structuren in het landschap door middel van gewas-, vegetatie-, bodem- en schaduwverkleuringen.
- **Bodembeheer:** In kaart brengen van sporen van conflict met het oog op ontplofbare oorlogsresten. Maar ook bijvoorbeeld slotenpatronen, inrichting van vroegere bedrijfsterreinen en het groei-front van (illegale) stortplaatsen. Zichtbaar maken van funderingen, kavelgrenzen, sloten en grachten die na het maken van de foto bij bijvoorbeeld ruilverkaveling uit het zicht zijn geraakt.

Aandachtspunten

- Om analoge luchtfoto's te digitaliseren moeten gespecialiseerde orthorectificatietechnieken worden gebruikt. Bedrijven die zijn gespecialiseerd in het opsporen van ontplofbare oorlogsresten gebruiken grote databases uit de Tweede Wereldoorlog bij de interpretatie van de foto's.
- Het schaalniveau van een analoge luchtfoto is van groot belang om kleinere objecten te kunnen onderscheiden.
- Alleen structuren die tot uiting komen door gewas-, vegetatie-, bodem- en schaduwverschillen kunnen met deze techniek worden opgespoord.



Voorbeeld resultaat: inslagen oorlogsmunitie bij vliegveld
(Foto: Kadaster)



Digitale luchtfotografie en fotogrammetrie

Principe

Digitale luchtfotografie wordt tegenwoordig op grote schaal gebruikt voor het identificeren en lokaliseren van resten in de ondergrond. Een groot voordeel van deze (recente) luchtfoto's en satellietbeelden is de hoge resolutie, de gratis beschikbaarheid en het feit dat deze met hoge regelmaat opnieuw worden opgehaald. Hierdoor kunnen makkelijk beelden van specifieke perioden, bijvoorbeeld extreem droge zomers, worden geraadpleegd om verschillen in het landschap te detecteren, vergelijkbaar met analoge luchtfotografie (zie pagina 7). Daarnaast kunnen digitale luchtfoto's worden gebruikt voor het maken van driedimensionale beelden door middel van fotogrammetrie. Hierbij wordt met een hoge-resolutie-fotocamera (bijvoorbeeld aan een drone) een grote hoeveelheid foto's gemaakt, waaruit vervolgens met speciale software een 3D-model kan worden gegenereerd. Hieruit kunnen vervolgens afstanden, oppervlaktes en volumes worden berekend. Bij archeologie wordt fotogrammetrie ook gebruikt om driedimensionale beelden van archeologische objecten, structuren en opgravingsvlakken te maken.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Digitale luchtfotografie: opsporen van archeologische structuren in het landschap op basis van gewas-, vegetatie-, bodem- en schaduwverkleuringen. Fotogrammetrie: maken van 3D-modellen van archeologische objecten, structuren en opgravingsvlakken, ook in helder water.
- **Bodembeheer en waterbodembeheer:** In kaart brengen van sporen van conflict met het oog op ontplofbare oorlogsresten. Ook identificeren van potentiële verontreinigingsbronnen.

Aandachtspunten

- Alleen structuren die tot uiting komen als kleurverschil (bijvoorbeeld in de vegetatie) aan het huidige oppervlak kunnen met deze techniek worden opgespoord.





Voorbeeld van een digitale luchtfoto (Foto: Adobe stock)



*Voorbeeld resultaat fotogrammetrie: 3D model gronddepot
(Foto: Grondslag)*



Elektromagnetische Inductie (EMI)

Principe

Bij onderzoek met Elektromagnetische Inductie (EMI of Radio EM) wekt een zendspoel een elektromagnetisch veld op. Hierdoor ontstaan in de ondergrond elektrische stroompjes die op hun beurt een eigen magnetisch veld opwekken. Dit magnetisch veld wordt opgevangen door een ontvangspoel, waarna de Elektrische Geleidbaarheid (EC) en de magnetische susceptibiliteit (MS) van de ondergrond kan worden berekend. De EC wordt in niet-zoute bodems voornamelijk bepaald door het kleigehalte en in niet-waterverzadigde omstandigheden door het vochtgehalte. Ook de bodemdichtheid, organisch materiaal en metalen hebben invloed op de EC. De MS is voornamelijk een maat voor de verstoring van de organische toplaag van de bodem. Ook zorgen verhitte materialen, zoals gebakken klei en metalen, voor (sterke) signalen. Met systematische metingen kunnen afwijkende zones of objecten worden gelokaliseerd en vlakdekkend in kaart worden gebracht tot een diepte van 50 m -mv (in optimale omstandigheden). Ook kan een model van de ondergrond worden gegenereerd.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** EC: Opsporen van greppels, grachten en rivierbeddingen opgevuld met klei of organisch materiaal, (bak-)stenen funderingen, en zandruggen of ophogingen. MS: gedempte greppels, kuilen en putten, haarden, ovens, bakstenen en metalen objecten.
- **Bodembeheer:** In kaart brengen van verontreinigingscontouren van grondwaterpluimen of drijf- of zaklaag. Verificatie is noodzakelijk, bijvoorbeeld met een peilbuizennetwerk. Ook geschikt voor onderzoek naar geologie en stratigrafie. De techniek is ook geschikt voor het bepalen van voorkeursbanen en voor het opsporen van funderingen en metalen objecten, zoals HBO-tanks, explosieven en – als ze metaalhoudend zijn – kabels en leidingen.

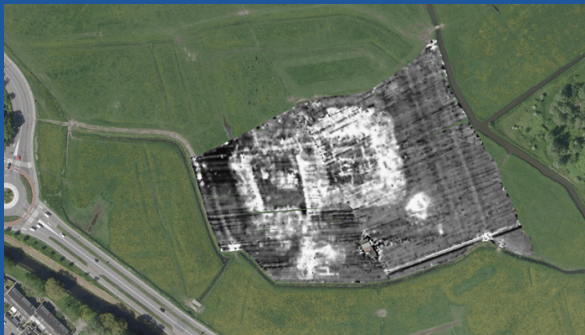
Aandachtspunten

- Toepasbaar in stedelijke en andere bebouwde gebieden, omdat de sensor geen contact maakt met de bodem, maar wel gevoelig is voor (moderne) magnetische objecten.
- EMI-onderzoek kan in aanmerkelijk drogere omstandigheden plaatsvinden dan bij elektrisch weerstandsonderzoek.
- Bij vorst is EMI-onderzoek af te raden vanwege verstorende vorstlenzen.





EMI in uitvoering (Foto: Nancy de Jong-Lambregts)



Voorbeeld resultaat: resten van een kasteel (Afbeelding: Saricon)



Elektrische weerstandsonderzoek (EW) en Elektrische Resistiviteit Tomografie (ERT)

Principe

Bij elektrische weerstandsonderzoek (EW) wordt de elektrische weerstand van het bovenste deel van het bodemvolume gemeten, door het plaatsen van elektroden (metalen pinnen) in de grond en het injecteren van stroom. De weerstandswaarde van de bodem wordt voornamelijk bepaald door het vochtgehalte, de grondsoort (poriën en korrelgrootte) en de aanwezige zouten. Met systematische metingen kunnen afwijkende zones worden gelokaliseerd. Grondoppervlakten kunnen in twee dimensies worden opgemeten. Ook kunnen verticale profielen en diepte-informatie worden verkregen door het plaatsen van meerdere elektroden in één lijn en het daarmee meten op verschillende dieptes: onderzoek op basis van Elektrische Resistiviteit Tomografie (ERT). Met ERT kan worden gemeten tot een diepte van 60 m -mv (in optimale omstandigheden).

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

Over het algemeen zijn lijnvormige objecten gemakkelijker te herkennen in de metingen dan willekeurig verspreide grondsporen.

- **Archeologie:** EW: Opsporen van muren en funderingen, diep ingegraven en/of met puin gevulde kuilen, grachten, ophoogpakketten, wegen/paden, sloten, (kring)greppels, (vlak)graven.
ERT: Is in het bijzonder geschikt om gelaagdheid van structuren te onderscheiden.
- **Bodembeheer:** EW: Opsporen van metalen pijpen, buizen, drains.
ERT: Opsporen van ondergrondse structuren, opbouw van bodemvolumes en stortplaatsen, verontreiniging met chloorhoudende oplosmiddelen of PAK's (kwalitatief, vooral ter voorbereiding op bodemsanering, verificatie door analyse van monsters is nodig), in kaart brengen van bodemstabiliteit en compactie.

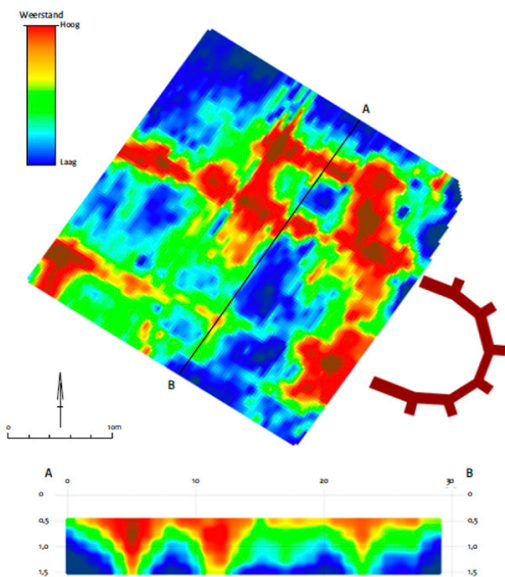
Aandachtspunten

- Afhankelijk van vochtverschillen in de ondergrond. Perioden van (langdurige) droogte, regen en vorst zijn daarom geen geschikte meetmomenten.
- Bodemcontact is noodzakelijk, door de elektroden in de grond te steken. Daarom is meten op bestrating of oppervlakteverharding niet mogelijk. Een opgebrachte laag of sterk verstoorde bovengrond kan EW en ERT negatief beïnvloeden.
- EW en met name ERT zijn traag, in verhouding tot andere geofysische technieken.





ERT in gebruik (Foto: ArcheoPro)



Voorbeeld resultaat: resten van een kerk (Afbeelding: ArcheoPro)



Ground Penetrating Radar (GPR)

Principe

Ground Penetrating Radar (GPR) zendt elektromagnetische golven de grond in. Als deze golven stuiten op bepaalde grensvlakken in de ondergrond, zoals op de overgangen tussen verschillende bodemlagen, dan wordt een deel van de golven teruggekaatst naar de antenne. De rest van de golven gaat verder de bodem in en weerkaatst op andere grensvlakken. Verplaatsen van de antenne levert een verticale doorsnede van de ondergrond (grondradarprofielen). Door systematisch meten en combineren kan een driedimensionaal beeld worden verkregen van de bodem en van horizontale vlakken (time-slices), op verschillende dieptes. Welke (combinatie van) antenne(s) het beste resultaat levert, is afhankelijk van de onderzoeksvraag en van de grootte en diepteligging van objecten.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

In kaart brengen van bodemlaagscheidingen en bodemvreemde objecten.

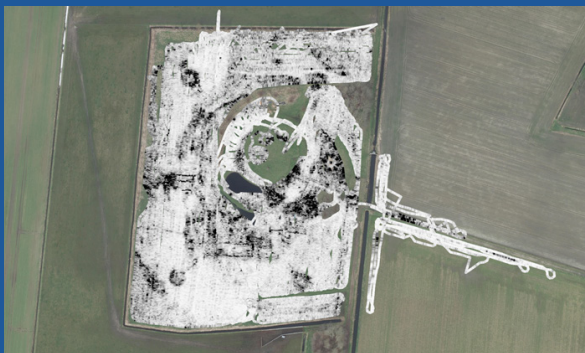
- Archeologie: Opsporen van natuur- en bakstenen muren, funderingen en uitbraaksleuven, holle ruimtes, geologische lagen en stratigrafie, kuilen, greppels en grachten, indien er voldoende fysisch contrast is tussen de sporen en de (natuurlijke) bodem.
- Bodembeheer: Opsporen van kabels, leidingen, opslagtanks, drijf- of zaklaag en in kaart brengen van contouren van verontreiniging met (aromatische) koolwaterstoffen, geologische lagen en stratigrafie (voorkeursstromingskanalen).

Aandachtspunten

- Weerkaatsend vermogen van objecten zelf en het verschil tussen objecten en de (natuurlijke) bodem waarin deze zijn ingebed.
- De antenne van de grondradar moet goed contact houden met de bodem. Hierdoor is GPR niet of minder geschikt voor het meten van terreinen met obstakels zoals drempels, stobben of struiken. Een grasveld of een bestraat terrein zijn ideale meetlocaties.
- GPR is minder geschikt voor gebieden met veel klei, vocht of zout in de ondergrond of met een hoge grondwaterstand.
- GPR is een techniek die in juiste omstandigheden een hogere resolutie kan genereren dan andere technieken. Daar staat tegenover dat de databewerking en -verwerking en de interpretatie hiervan meer tijdrovend kunnen zijn dan bij andere technieken.



GPR in gebruik (Foto: Nancy de Jong-Lambregts)



Voorbeeld resultaat: resten van een kasteel (Afbeelding: Saricon)



Infrarood-spectrometrie

Principe

Verschillende sensoren kunnen data verzamelen in het niet-zichtbare deel van het spectrum, zoals Nabij Infrarood (NIR), Midden Infrarood (MIR) en Thermisch Infrarood (TIR). Infraroodmeting wordt op verschillende manieren toegepast. NIR kan gebruikt worden om groei- en kleurverschillen in gewassen of natuurlijke vegetatie te detecteren, die kunnen wijzen op archeologische resten in de ondergrond. Met TIR of thermografie kunnen verschillen in temperatuur in beeld worden gebracht. Deze verschillen kunnen een indicatie zijn voor constructies, holle ruimtes, objecten of archeologische resten direct onder het aardoppervlak.

Een drijfslaagdiktemeter gebruikt een infraroodsignaal om onderscheid te maken tussen een polaire vloeistof (zoals (grond)water) en een apolaire vloeistof (zoals minerale olie). Bij het in een peilbuis of tank laten zakken van een sonde met een meetlint, klinkt bij het raken van de apolaire vloeistof een ander signaal dan bij het raken van een polaire vloeistof. Door het registreren van de diepte waarop beide signalen klinken, kan de drijf- of zaklaag in kaart worden gebracht.

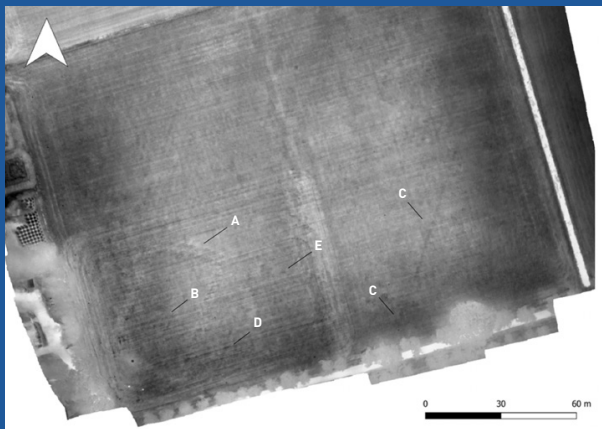
Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Opsporen van ondiep gelegen archeologische resten door het registreren van warmte-, kleur- of groeiverschillen.
- **Bodembeheer:** Opsporen van asbestdaken en drijf- en zaklagen in tanks en grondwater.

Aandachtspunten

- Hou bij het toepassen van thermografie rekening met factoren zoals bodemsamenstelling, aard van de archeologische sporen, tijdstip van opname en vochtigheid.
- Drijfslaagdiktemeter:
 - Laat de sonde langzaam zakken, voor een goede nauwkeurigheid.
 - Meet van beneden naar boven, om versmering aan de sonde te voorkomen.
 - Deze techniek is kostbaarder dan meten met een oliepastafixatie met kolom.





*Voorbeeld resultaat: thermische beelden archeologische vindplaats
(Afbeelding: J. Waagen, UvA)*



Magnetometrie in landbodems

Principe

Een magnetometer registreert (zeer kleine) variaties in het aardmagnetisch veld, die worden veroorzaakt door objecten op of onder het maaiveld of door afwijkingen in de bodemsamenstelling. Veel (archeologische) resten in de bodem, zoals een greppel, gedragen zich als een magneet of een serie magneten die het aardmagnetisch veld verstoren. Ook objecten (van klei) die boven de 700 °C zijn verwarmd, zoals baksteen, vulkanisch gesteente (tufsteen) en metalen, gedragen zich onder invloed van het aardmagnetisch veld als magneten. Met systematische metingen kunnen afwijkende zones of objecten worden gelokaliseerd en vlakdekkend in kaart worden gebracht tot een diepte van 3 à 4 m -mv (in optimale omstandigheden). Vaak kunnen ook aanwijzingen worden verkregen over de vorm of diepte van de afwijkingen.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Opsporen van (stook)ovens, oude én recente industriële activiteit (bijvoorbeeld metaalproductie), bakstenen muren, funderingen, uitbraaksporen en puinlagen met baksteen. Ook kunnen greppels en (paal)kuilen – indien opgevuld met materiaal met magnetische eigenschappen – in kaart worden gebracht.
- **Bodembeheer:** Relatief snel opsporen van bijvoorbeeld puinophogingen, slootdempingen, ondergrondse tanks, funderingen, funderingspalen, metalen objecten en explosieven.

Aandachtspunten

- Magnetische variatie (soil noise) van de ondergrond. Deze contrasten zijn in bijvoorbeeld duinzand redelijk groot, in dekzand zeer gering.
- Beperkt toepasbaar in stedelijke en bebouwde gebieden door de aanwezigheid van (moderne) magnetische objecten, zoals kabels, leidingen, metalen en/of baksteen(puin).
- Resultaten moeten worden geverifieerd met een andere techniek.
- Vooral belangrijk bij metingen in het gevoelige bereik bij archeologische toepassingen:
 - Een hoge grondwaterstand heeft een nadelige invloed op magnetische contrasten in de bodem, zoals in kleigebieden waar resten zich in of onder de zogenaamde gleyzone bevinden.
 - Bij vorst is onderzoek met magnetometrie af te raden vanwege versturende vorstlenzen.



Magnetometrisch onderzoek in uitvoering (Foto: Nancy de Jong-Lambregts)



Voorbeeld resultaat: resten van een klooster (Afbeelding: Saricon)



Magnetometrie in waterbodems

Principe

Magnetometrie is een passieve techniek die het natuurlijk aardmagnetisch veld registreert. Lokale afwijkingen van dit veld worden veroorzaakt door de aanwezigheid van ferromagnetische (ijzerhoudende) objecten en structuren, op of in de waterbodem. Met een combinatie van meerdere magnetometers (gradiometer-opstelling) kunnen ook schattingen van afmetingen en diepteligging van de objecten gemaakt worden.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** karteren van ijzerhoudende objecten (zoals onontplofte oorlogsresten, ijzeren wrakdelen of kanonnen).
- **Waterbodembeheer:** karteren van afgedekte geologische structuren, zoals oude opgevulde geulen.

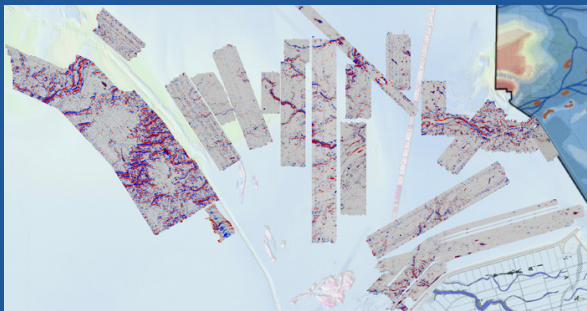
Aandachtspunten

- De magnetometer moet afgeschermd zijn van directe magnetische velden in de omgeving, zoals de motor van een meetvaartuig. In de praktijk wordt een magnetometer daarom achter een meetvaartuig gesleept op een afstand van minimaal vijf keer de lengte van het meetvaartuig.
- De sterkte van de gemeten uitslag neemt logaritmisch af met de afstand tussen de magnetometer en het object.
- Voor analyse van de data zijn de gegevens over de hoogte van de magnetometer boven de waterbodem nodig. Vuistregel: de maximale hoogte van de magnetometer boven de waterbodem is twee meter.
- Bij een opstelling met een enkele magnetometer is de nauwkeurigheid van de locatie gelijk aan de helft van de raai afstand.





*Magnetometer wordt geprepareerd voor gebruik onder water
(Foto: T&A Survey)*



*Voorbeeld resultaat: afgedekte geulen onder water
(Afbeelding: Periplus Archeomare)*



Metaaldetectie

Principe

Metaaldetectie is het systematisch onderzoeken van de bovenste laag, bijvoorbeeld de geploegde bovengrond, van een gebied waarbij zowel ferro-objecten (van ijzer) als non-ferro-objecten (van andere metalen zoals goud, zilver, koper of brons, enz.) in de bodem kunnen worden opgespoord. De aanwezigheid, aard, datering en verspreiding van aangetroffen objecten kan menselijke activiteit(en) in het gebied weerspiegelen. Een metaaldetector heeft een vergelijkbare werking als een EMI (zie pagina 11): een zendspoel wekt een elektromagnetisch veld op waardoor metalen (en metaalhoudende) objecten in de ondergrond kortstondig magnetisch worden en vervolgens door een ontvangspoel kunnen worden geregistreerd. Het dieptebereik van een gemiddelde metaaldetector is circa 30 cm -mv voor kleine objecten tot 1,5 m -mv voor zeer grote objecten. Het dieptebereik is ook afhankelijk van de grondsoort, van de bodemvochtigheid en van de vorm, ligging en eigenschappen van het object. Metaaldetectors kunnen ook in ondiep water worden gebruikt.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Opsporen van metalen objecten, zoals munten en gebruiksvoorwerpen.
- **Bodembeheer en waterbodembeheer:** Opsporen van ontplofbare oorlogsresten (bijvoorbeeld bommen en granaten), HBO-tanks en (indien metaalhoudend) kabels en leidingen.

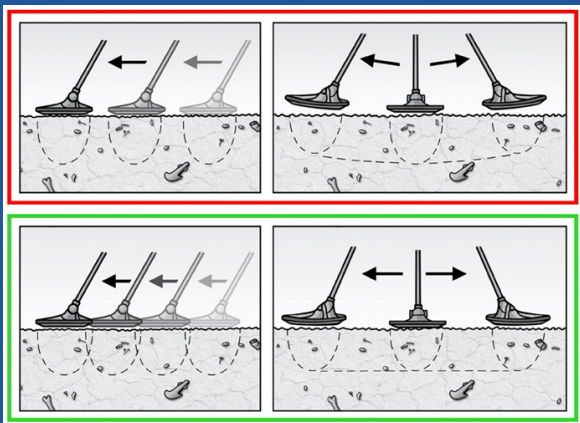
Aandachtspunten

- In Nederland geldt een meldplicht: de aard en locatie van metalen archeologische vondsten uit de Nederlandse bodem worden geregistreerd in de PAN-database (PAN = Portable Antiquities of the Netherlands): <https://portable-antiquities.nl/pan/#/public>.
- Om in een bepaald gebied te mogen zoeken, moet vooraf altijd toestemming worden verkregen van de grondeigenaar.
- Het is verboden om op archeologische monumenten te zoeken, daarnaast geldt in sommige gemeenten een detectorverbod. Zie www.portable-antiquities.nl/pan/resources/downloads/Metaaldetectie_NL_sept2021.pdf.





Metaaldetectie in uitvoering (Foto: Tim Kauling)



Verkeerde en goede zoektechniek (Uit: SIKB Leidraad Metaal)



Multi- en Hyperspectrale opnames

Principe

Bij multi- en hyperspectrale opnames worden meerdere spectrale banden tegelijkertijd vastgelegd door sensoren die zijn bevestigd aan een satelliet of een ander type meetstation. Deze beelden kunnen vervolgens (na bewerking) worden gebruikt om verschillen in het landschap te detecteren, vergelijkbaar met luchtfotografie (zie elders in deze waaier). Vooral de bewerking en analyse van hyperspectrale beelden is erg complex en vereist specialistische kennis. In bodembeheer wordt gebruiktgemaakt van hyperspectrale camera's (in het lichtspectrum van 0,38 tot 2,5 μm ; zichtbaar, infrarood en ultraviolet licht) om asbestdaken in kaart te brengen. Dit is gebaseerd op het feit dat elk materiaal, en dus ook asbest, een unieke combinatie van golflengten reflecteert.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Opsporen van archeologische structuren in het landschap door interpretatie van gewas-, vegetatie-, bodem- en schaduwverkleuringen.
- **Bodembeheer:** Opsporen van asbestdaken en drijf- en zaklagen in tanks en grondwater.

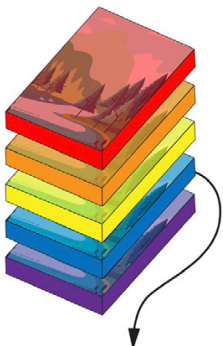
Aandachtspunten

- Spectroscopie: De resolutie van bijvoorbeeld data verzameld door verschillende satellieten (of satellietsystemen) kan sterk variëren.
- Het schaalniveau van de data is van groot belang om kleinere objecten te kunnen onderscheiden.
- Alleen structuren die tot uiting komen door gewas-, vegetatie-, bodem- en schaduwverschillen kunnen met deze techniek worden opgespoord.

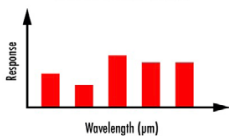


Multispectrale/hyperspectrale vergelijking

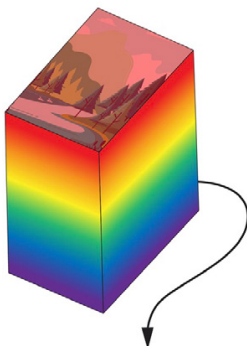
Multispectraal



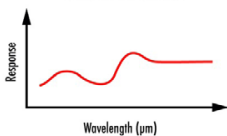
Several Spectral Bands



Hyperspectraal



Continuous Spectrum



Het verschil tussen multi- en hyperspectrale opnames
(Afbeelding: Edmond Optics)



Side Scan Sonar en/of Sector Scan Sonar

Principe

Akoestische techniek waarbij een hoogfrequente geluidsgolf wordt uitgezonden door een transducer. De sterkte en tijdsduur van de reflecties van de waterbodem worden omgezet in een echogram, vergelijkbaar met een zwartwitfoto van de waterbodem. Geschikt voor inventarisatie van grote gebieden, omdat het bereik onafhankelijk is van de waterdiepte.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- Karteren van objecten en structuren die op de waterbodem liggen of uit de waterbodem steken.
- Karteren van verschillende typen waterbodemsediment (klei, veen, slib, zand).

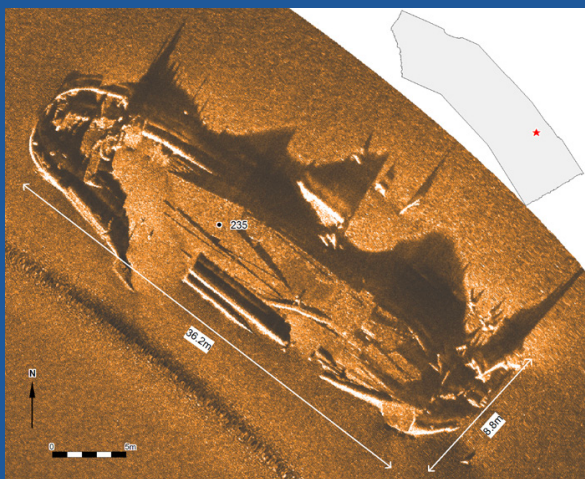
Aandachtspunten

- De hoogte van de transducer boven de bodem moet tien tot vijftien % van het ingestelde bereik zijn.
- Het maximale bereik is afhankelijk de gebruikte frequentie; hoe lager de frequentie, hoe groter het bereik.
- Resolutie is evenredig met gebruikte frequentie; voor detectie van objecten >1m moet deze minimaal 500 kHz zijn.





Side Scan Sonar (Foto: T&A Survey)



*Voorbeeld resultaat: een wrak onder water
(Afbeelding: Periplus Archeomare)*



Singlebeam- en Multibeam-echolood

Principe

Het Singlebeam-echolood kent twee varianten:

1. Hydrografisch echolood op basis van één frequentie, meestal rond de 200 kHz, met een meetprincipe op basis van de reflectie van de geluidspuls op de waterbodem. Dit is een basissysteem dat relatief eenvoudig en doelmatig, en in vrijwel alle situaties kan worden gebruikt voor het bepalen van bovenkant slib.
2. Hydrografisch echolood op basis van twee frequenties, meestal rond de 30 en 200 kHz. De verschillende frequenties worden gebruikt voor het tegelijkertijd meten van boven- en onderkant slib. Dit is mogelijk doordat het laagfrequente signaal meer penetratie heeft.

Het Multibeam-echolood (MBES) is een hydrografisch echolood dat dwars op de vaarrichting een bodemprofiel maakt. Door het meten in een raaienpatroon kan een vlakdekkend model (puntenwolk) van de diepteligging van de waterbodem worden gemaakt. Bereik en resolutie zijn afhankelijk van de waterdiepte onder de transducer, de gebruikte frequentie en de breedte van de afzonderlijke bundels. Vuistregels: Het opgenomen bereik bedraagt ongeveer 2,5 x de waterdiepte onder de transducer. Hoe hoger de frequentie en de bundelhoek, hoe hoger de resolutie, maar hoe beperkter het bereik. Dit zijn relatief kostbare systemen die veel specialistische kennis bij gebruik vereisen, en de meetresultaten hebben nabewerking nodig.

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** 3D-modellen in hoge resolutie van (wrak)objecten en structuren.
- **Waterbodembeheer:** Idem, plus beheer van kunstwerken, oeverbescherming en remmingswerken.

Aandachtspunten

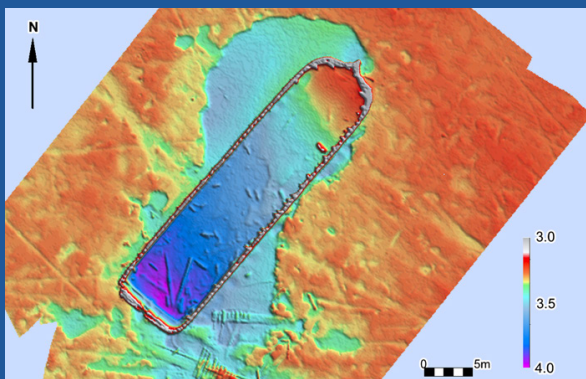
- Bij de Singlebeam-techniek is meting van gemiddelde geluidssnelheid in de waterkolom ter plaatse noodzakelijk. Dit kan ook vervangen worden door kalibratie met de 'barcheck'-methode. Bij MBES kan dit niet en zijn meerdere metingen van het geluidssnelheidsprofiel over de gehele waterkolom noodzakelijk.
- Bij de Singlebeam-techniek met twee frequenties is verificatie door vergelijkende boring(en) noodzakelijk. Bij één frequentie en bij MBES is dit niet noodzakelijk. *Vervolg zie achterzijde >*



- Bij de Singlebeam-techniek is bij één frequentie de minimale meetdiepte 0,3 meter, bij twee frequenties 0,5 meter. Hinder van waterplanten kan leiden tot onbetrouwbare metingen.
- De Singlebeam-techniek met twee frequenties is relatief goedkoop, maar in de praktijk lastig te bedienen en zal niet in alle situaties een betrouwbare meting van de onderzijde van het slib opleveren.
- Een systeem met een Multibeam-echolood vereist verregaande kalibraties en controles. Het gaat vaak om relatief grote en complexe installaties. Dit vereist grotere minimale (vaar)diepte voor effectief gebruik. Bovendien is er hinder van waterplanten en is continue beschikbaarheid van RTK-GPS-posities en correctie van scheepsbewegingen nodig.



Echolood in uitvoering (Foto: SIKB)



*Voorbeeld resultaat Multibeam-opname: wrak onder water
(Afbeelding: Periplus Archeomare)*



Sub-bottom profiler (SBP)

Principe

De sub-bottom profiler is een akoestische techniek waarmee de gelaagdheid onder de waterbodem in kaart worden gebracht. Dit gebeurt met een laagfrequent hoogenergetisch geluidssignaal. De metingen zijn gebaseerd op de looptijd van een geluidspuls, uitgezonden door een transducer aan of achter een meetvaartuig, die wordt gereflecteerd op dichtheidsovergangen op of in de waterbodem. Met deze techniek kan de opbouw van de waterbodems van enkele meters tot vele tientallen meters diepte in kaart worden gebracht.

De metingen worden varend uitgevoerd; in veel gevallen in een regelmatig patroon van langs- en dwarsraaien, waarna de gegevens bewerkt moeten worden.

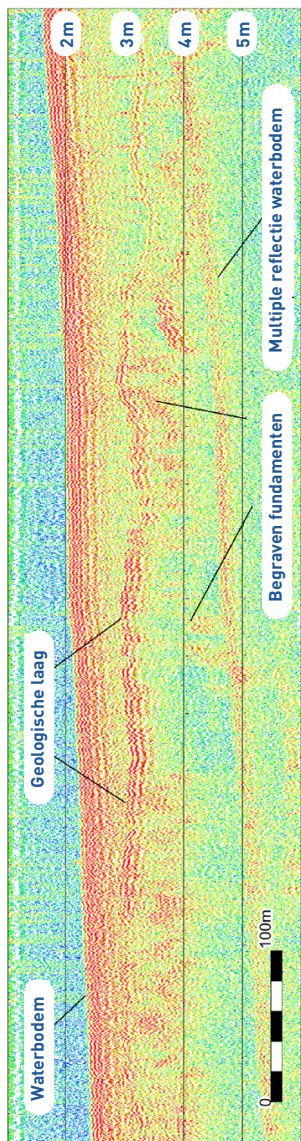
Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** karteren van laagopbouw (bijvoorbeeld ten behoeve van verdrinken landschappen). Niet geschikt voor het opsporen van losse objecten.
- **Waterbodembeheer:** Seismiek, bodemonderzoeken, bepalen van laagdikte en sedimentatie, opsporen van duikers, zinkers, ontplofbare oorlogsresten, stortafval, oude dijkpatronen, kabels en leidingen,

Aandachtspunten

- Meting van gemiddelde geluidssnelheid in de waterkolom ter plaatse is noodzakelijk. Geluidssnelheid in de bodem is sterk variabel voor verschillende bodemsoorten. Daarom is een verificatieboring noodzakelijk om geluidssnelheid/overgangen in bodemlagen te kunnen schalen.
- De penetratie in de bodem is mogelijk beperkt tot de waterdiepte vanwege het multiple effect.
- Er is een continue beschikbaarheid van RTK-GPS-posities nodig.
- Een SBP met één of twee frequenties zal niet (of minder goed) penetreren in een gasrijke waterbodem.





Voorbeeld resultaat: Profiel door een verdrinken stad (Afbeelding: Periplus Archeomare)

XRF

Principe

Röntgenfluorescentiespectrometrie (XRF) is een techniek om de anorganische (of chemische) samenstelling van een (bodem)monster of object te bepalen. Tijdens een meting wordt een (grond)monster of object blootgesteld aan röntgenstraling en worden de reflecties gemeten, waarbij elk element karakteristieke energie terugzendt. Het apparaat berekent zelf het gehalte aan aangetroffen elementen. Het uitvoeren van XRF kan zowel in een laboratorium (waarbij een monster verpoederd of gesmolten moet worden) als met een draagbaar (of handheld) apparaat in het veld, (waarbij het monster niet wordt voorbehandeld).

Toepasbaarheid bij archeologie en bodembeheer

- **Archeologie:** Bepalen van de chemische samenstelling van sediment en bodemlagen of van artefacten van keramiek, non-ferro-metalen, glas of faience.
- **Bodembeheer:** Meten van gehalten aan elementen in de bodem. De techniek is vooral geschikt voor het meten van gehalten aan zware metalen, onder andere lood, zink, koper en arseen.

Aandachtspunten

- Het apparaat bevat een röntgenbuis (of röntgenbron) waardoor veiligheidsmaatregelen moeten worden genomen volgens de Kernenergiewet en het Besluit stralingsbescherming.
- Het apparaat moet voorafgaand aan metingen worden gekalibreerd voor de te onderzoeken elementen.
- XRF is gevoelig voor vocht. Droog daarom altijd elk grondmonster vóór de meting. Als dat niet kan (zoals in het veld), meet dan het vochtgehalte met een vochtsensor en pas een vochtcorrectie toe. Gebruik de XRF niet onder water.
- Meet elk monster bij voorkeur meerdere keren, om rekening te houden met de heterogeniteit van een monster of object.
- Bij handheld-XRF vindt de meting aan het oppervlakte van het monster of object plaats, waardoor grove bodemvreemde materialen, corrosie, uitloging en verontreiniging van invloed kunnen zijn.
- Was (archeologische) objecten niet voorafgaand aan de meting met zeep, om verontreiniging met fosfaat te voorkomen.



Meting met een XRF in het veld (Foto: RCE /Amersfoort/DG2009_1408)



Uitlezing XRF in het veld (Foto: Van der Helm)



EMI onderzoek kasteel Middelburg (foto: Nancy de Jong-Lambregts)



Informatiepunten

SIKB

T 085 486 2450

E info@sikb.nl



www.sikb.nl

Actuele versie van SIKB-kwaliteitsrichtlijnen (BRL-en en protocollen). Andere voor de in deze waaier beschreven technieken relevante informatie.



www.bodemrichtlijn.nl

Een keur aan informatie over (onderzoek) aan bodem- en waterbodemkwaliteit, waaronder een systematische beschrijving van ruim 130 veldtechnieken voor onderzoek naar verontreiniging.



www.bodemplus.nl

Actuele lijst van erkende bedrijven (via zoekmenu).



www.cultureelerfgoed.nl

Factsheets Inventariserend veldonderzoek (via zoekmenu). Remote sensing voor archeologische prospectie met webviewer (via zoekmenu).



www.portable-antiquities.nl

Melden van oudheidkundige vondsten (m.n. gevonden met metaaldetector) in privé-bezit. Informatie over wettelijke regels rond metaaldetectie.

