



Statens vegvesen

Arkeologiske undersøkelser

En vurdering av nyere avanserte arkeologiske registreringsmetoder i forbindelse med vegutbyggingsprosjekter

Statens vegvesens rapporter

Nr. 192



Vegdirektoratet
Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen
Miljøseksjonen
Februar 2013

Tittel

Arkeologiske undersøkelser

Title**Undertittel**

Vurdering av nyere avanserte arkeologiske registreringsmetoder

Subtitle**Forfatter**

Lars Gustavsen, Knut Paasche og Ole Risbøl

Author**Avdeling**

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Department**Seksjon**

Miljøseksjonen

Section**Prosjektnummer**

603620

Project number**Rapportnummer**

Nr. 192

Report number**Prosjektleder**

Eva Smådahl

Project manager**Godkjent av****Approved by****Emneord****Key words****Sammendrag**

Forsidebilde: NIKU og Airborne Technologies

Summary

Innholdsfortegnelse

Forord.....	4
1. Introduksjon	5
1.1. Om forprosjektet	5
1.2. Bakgrunn for prosjektet	5
1.3. Problemstilling.....	6
1.4. Rapportens oppbygning	6
2. Satellittdata	7
2.1. Metodehistorikk	7
2.2. Teknisk beskrivelse	8
2.3. Satellittsystemer.....	9
2.4. Metodebruk.....	10
2.4.1. Analysemuligheter.....	11
2.4.2. Vegetasjons- og jordspor.....	11
2.5. Metodeevaluering	14
3. LiDAR	18
3.1. Metodehistorikk	18
3.2. Teknisk beskrivelse	19
3.3. Metodebruk.....	23
3.4. Metodeevaluering	25
4. Arkeologisk geofysikk	30
4.1. Metodehistorikk	31
4.2. Elektriske metoder	34
4.2.1. Systematisk motstandsmåling.....	35
4.2.2. Earth Resistance Tomography (ERT)	38
4.3. Magnetiske metoder	41
4.3.1. Magnetometerundersøkelser	41

4.3.2.	Magnetisk susceptibilitet	47
4.4.	Georadar.....	51
5.	Andre metoder	59
5.1.	Flyfoto.....	59
5.2.	Hyperspektrale opptak.....	62
6.	Arkeologisk fjernmåling og planprosessen.....	66
6.1.	Dagens praksis ved arkeologisk registrering	66
6.2.	Vurdering av potensiale for bruk av metodene i ulike faser av et veiprojekt	67
7.	Konklusjon og anbefalinger.....	69
7.1.	Hvordan kan nyere arkeologiske metoder supplere/erstatte tradisjonelle metoder?.....	69
7.2	Veien videre.....	71
8.	Litteraturliste.....	72

Forord

Vegdirektoratet har bedt NIKU om å gjennomføre et forprosjekt der det redegjøres for hvilke arkeologiske metoder som kan være aktuelle å benytte i forbindelse med arkeologisk registreringsarbeid, samt kartlegge behov for videre utvikling og forskning på dette området. Bakgrunnen er at det de siste årene har kommet til en rekke nyere fjernmålingsmetoder som kan være med å forbedre og effektivisere de metodene som i dag brukes ved arkeologiske registreringer.

Statens vegvesen, Vegdirektoratet har med dette initiativ tatt første skritt i retning av å få utredet potensialet for mer forutsigbare, effektive metoder som grunnlag for bedre faglige vurderinger i krysningpunktet mellom arkeologiske registreringer og store utbyggingsprosjekter.

NIKU har i de senere årene hatt en strategisk satsning på å teste, utvikle og implementere nyere teknologisk avanserte metoder. I tillegg til teknologisk kompetanse innen geofysikk, GIS, laserskanning, databehandling, programvare og digital oppmåling, er NIKUs bakenforliggende kulturminnefaglig kompetanse viktig for å oppnå gode resultater på dette feltet.

NIKU deltar i dag i flere internasjonale prosjekter som jobber med forskning og utvikling av disse ulike metodene. Et slikt prosjekt er EU-prosjektet *ArchaeoLandscapes Europe*. Dette er et femårig EU-prosjekt som skal fremme kunnskap om og forskning på bruk av flyarkeologi og andre avanserte fjernmålingsmetoder. Videre deltar NIKU i prosjektet *LBI for Archaeological Prospection & Virtual Archaeology*. Dette forskningsprosjektet har som mål å utvikle faglig forsvarlige og kostnadseffektive metoder til bruk i ikke-destruktiv arkeologi. Bak instituttet står *Ludwig Boltzmann Gesellschaft* (LBG), et privat østerriksk forskningsinstitutt. NIKU leder den norske delen av dette prosjektet.

1. Introduksjon

1.1. Om forprosjektet

Dette forprosjektet er initiert fordi Statens vegvesen ved Vegdirektoratet ønsker en oversikt over nyere avanserte arkeologiske registreringsmetoder. Hensikten er å utrede i hvilken grad slike metoder kan erstatte eller supplere tradisjonelle arkeologiske metoder med tanke på å effektivisere prosessene uten at kvaliteten på undersøkelsene reduseres. I dette forprosjektet redegjøres det for hvilke arkeologiske metoder som kan være aktuelle å benytte. Dessuten kartlegges behovene for videreutvikling og forskning på dette området.

Arkeologisk fjernmåling er et samlebegrep for en rekke inngrepsfrie metoder. Disse karakteriseres av at det er fysisk avstand mellom instrumentet/plattformen som brukes til påvisning og de arkeologiske strukturene som er gjenstand for påvisning. I dette forprosjektet redegjør vi for nyere arkeologiske metoder samt deres historikk og beskriver hvordan og i hvilken grad de er tatt i bruk i arkeologien. Det foretas en sammenlikning av metodene og potensialet for videreutvikling av dem. Prosjektet tar også opp spørsmålet om i hvilken grad nye metoder kan erstatte de tradisjonelle metodene, eller om de kun vil være et supplement.

De aktuelle metodene er satellittopptak, flyfoto, flyskanning (LiDAR) samt ulike geofysiske undersøkelser. Dette er alle metoder som kan dekke store arealer på kort tid.

1.2. Bakgrunn for prosjektet

Hvert år gjennomføres det arkeologiske registreringer og undersøkelser i forbindelse med veiutbygging for mange millioner kroner. Tiltakene er hjemlet i § 9 i kulturminneloven, og i denne sammenheng gjennomføres mye av registreringsarbeidet ved hjelp av tradisjonelle arkeologiske metoder. Den alminnelige praksis innen arkeologisk registrering i dag er synfaring og prøvestikking i utmark og overflatesøk og sjakting i innmark. Avklaring av kulturminnehensyn i en planprosess er av mange grunner utfordrende. Mangelen på oversikt påvirker både verdivurderingene og de prioriteringer som tas av kulturminnemyndighetene.

Tradisjonelle metoder gir mange funn, men er relativt tidkrevende og kostbare. I tillegg kan intrusive metoder slik som prøvesjakting, prøvestikking og flateavdekking være destruktive i sin utførelse. Kulturminnenes bevaringsforhold kan utsettes for uheldige påvirkninger som direkte ødeleggelse og oksygentilførsel.

I tillegg til nasjonal kulturminnelovgivning har det kommet til flere internasjonale konvensjoner på kulturminnefeltet som Norge har sluttet seg til og som vektlegger vern. «Valletta konvensjonen» fra 1992 stiller krav til valg av ikke destruktive metoder og i stedet bevarer arkeologiske kulturminner på stedet i den utstrekning det er mulig (Valetta 1992):

«...non-destructive methods of investigation should be applied wherever possible» (Art. 3, punkt 1b)

«...archaeological heritage should be conserved and maintained preferably in situ» (Art. 4 punkt II)

Videre påpeker ICOMOS-charteret fra 1990 at:

«...gathering of information about the archaeological heritage should not destroy any more archaeological evidence than is necessary for the protectional or scientific

objectives of the investigation. Non-Destructive techniques, aerial or ground survey, and sampling should therefore be encouraged wherever possible, in preference to total excavation» (Art. 5) (ICOMOS 1990).

Skal vi følge opp målsettingene i Valetta konvensjonen er det viktig å øke erfaringsgrunnlaget for bruken av registreringsmetoder som i minst mulig grad berører kulturminnene.

I Riksantikvarens forvaltningsstrategi for 2010–2020 står det at en vil bidra til å etablere og gjennomføre nasjonale og regionale registreringsprosjekter og videreutvikle arbeidet med ulike prognoseverktøy. Videre står det om høyteknologiske metoder at en vil:

«...stimulere til videreutvikling og bruk av høyteknologiske metoder, som et verdifullt supplement til dagens metoder i forbindelse med registrering og utgravning», og at en videre vil «...bidra til å tilgjengeliggjøre informasjon knyttet til bruk av slike ikke-destruktive metoder...» (Riksantikvaren 2011) .

1.3. Problemstilling

Dette forprosjektet tar opp spørsmål knyttet til bruk av avanserte arkeologiske metoder og deres potensielle anvendelse i forbindelse med veiutbyggingsprosjekter. Hensikten er å vurdere i hvilken grad slike metoder kan erstatte eller supplere tradisjonelle metoder, og om de nye metodene kan effektivisere prosessen uten at kvaliteten på undersøkelsene reduseres. Målet er å gjøre kunnskapsbaserte vurderinger av konflikter med kulturverninteresser på et så tidlig stadium i planprosessen som mulig.

I tillegg til de tradisjonelle arkeologiske registreringsmetodene er det viktig at mulighetene utredes for å ta i bruk de nyere verktøy som har blitt tilgjengelige de siste årene. Dette forprosjektet vil redegjøre for hvilke alternative nyere arkeologiske inngrepsfrie fjernmålingsmetoder som finnes og hvordan disse kan anvendes. Videre vil prosjektet se på i hvilken grad, og på hvilken måte, aktuelle fjernmålingsmetoder som satellittopptak, flyfoto, flyskanning (LiDAR) samt ulike geofysiske undersøkelser kan erstatte tradisjonelle arkeologiske metoder.

1.4. Rapportens oppbygning

Deretter beskrives metodene mer inngående, både med hensyn til tekniske aspekter og hvordan metodene brukes i arkeologiske sammenheng. Til slutt evalueres metodene med hensyn til effektivitet, nytteverdi og begrensninger, både i forhold til hverandre og i forhold til tradisjonelle metoder.

De mest aktuelle metodene blir her beskrevet detaljert, og vurdert med hensyn til hvilke metoder eller kombinasjon av metoder som kan være aktuelle å benytte i forbindelse med ulike faser i et veiprojekt.

2. Satellittdata

Per i dag finnes det en lang rekke menneskeskapte satellitter i omløp rundt jorda. Satellittene brukes til kommunikasjon, værobservasjon og til navigasjon, samt til sivil og militær overvåkning. Satellitter som kartlegger jordens overflate ved hjelp av bildesensorer kalles *jordobservasjonssatellitter*. Disse satellittene brukes først og fremst til å kartlegge større endringer i landskap og infrastruktur, men de har også vist seg å være gode verktøy for å kunne detektere og kartlegge arkeologiske strukturer i form av vegetasjons- og jordspor.

2.1. Metodehistorikk

De første satellittene som kunne ta bilder av jorden fra verdensrommet ble utviklet i USA, Russland og Frankrike i løpet av 1960-tallet. Dette var hovedsakelig eksperimentelle satellitter som ble brukt til militære og meteorologiske formål. I 1972 ble den første sivile jordobservasjonssatellitten, Landsat-1¹, skutt opp. Landsat-1 kunne levere datasett som gjorde det mulig å registrere lysbølger i det infrarøde så vel som det synlige spektrumet, slik at hydrologiske, pedologiske, geologiske og biologiske fenomener på jordoverflaten for første gang kunne kartlegges fra verdensrommet. Utover 1980- og 90-tallet ble det utviklet og skutt opp en rekke nye jordobservasjonssatellitter, deriblant det franske SPOT-systemet (*Système Pour l'Observation de la Terre*)² og den europeiske romfartsorganisasjonens ESR-1-system³. Data fra disse tidlige satellittsystemene preges av det vi per i dag vil karakterisere som nokså lav oppløsning, og datasettene har i all hovedsak vært myntet på jordobservasjon på nokså overordnet nivå. De har vært brukt til å kartlegge store endringer i landskapet, slik som ørkenspredning, avskoging, byspredning og vegetasjonsendringer (Parcak 2009).

Nytteverdien av disse tidlige datasettene var fra et arkeologisk ståsted i beste fall begrenset, og det tok noe tid før verdien av denne typen fjernmålingsdata ble verdsatt. Datasettene var vanskelige å få tak i og uten tilgang på egnede datamaskiner var de heller ikke enkle å ta i bruk. Den relativt lave oppløsningen på datasettene gjorde at kun større landskapsformasjoner var identifiserbare, selv om det ble gjort enkelte forsøk på å kartlegge tidligere naturressurser, større veianlegg og spor etter arkeologiske strukturer som kunne indikere tidligere aktivitetsområder.

Situasjonen endret seg nokså drastisk på midten av 1990-tallet, da høyoppløselige bilder fra russiske og amerikanske spionsatellitter ble nedgradert og tilgjengeliggjort for allmennheten. Ved hjelp av disse kunne man for første gang spore arkeologiske strukturer i satellittdata slik man tidligere hadde sporet dem i tradisjonelle flyfoto. På slutten av 1990-tallet ble også bilder fra det kommersielle IKONOS⁴-systemet for første gang tilgjengelig, og ettersom disse hadde en oppløsning ned til én meter per pixel var det mulig å identifisere mindre arkeologiske strukturer og anlegg som vegetasjonsspor i dyrket mark. I det siste tiåret har etterspørselen etter høyoppløselige satellittbilder økt, og det har kommet til en rekke nye satellittsystemer som leverer slike datasett. Per i dag finnes det flere hovedleverandører av høyoppløselige satellittdata (Fowler 2010), og det er nå mulig for hvem som helst å bestille både arkivmateriale og nye opptak via ulike nettjenester.

1 <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/landsat.html>

2 <http://www.astrium-geo.com/en/143-spot-satellite-imagery>

3 <http://earth.esa.int/ers/satconc/>

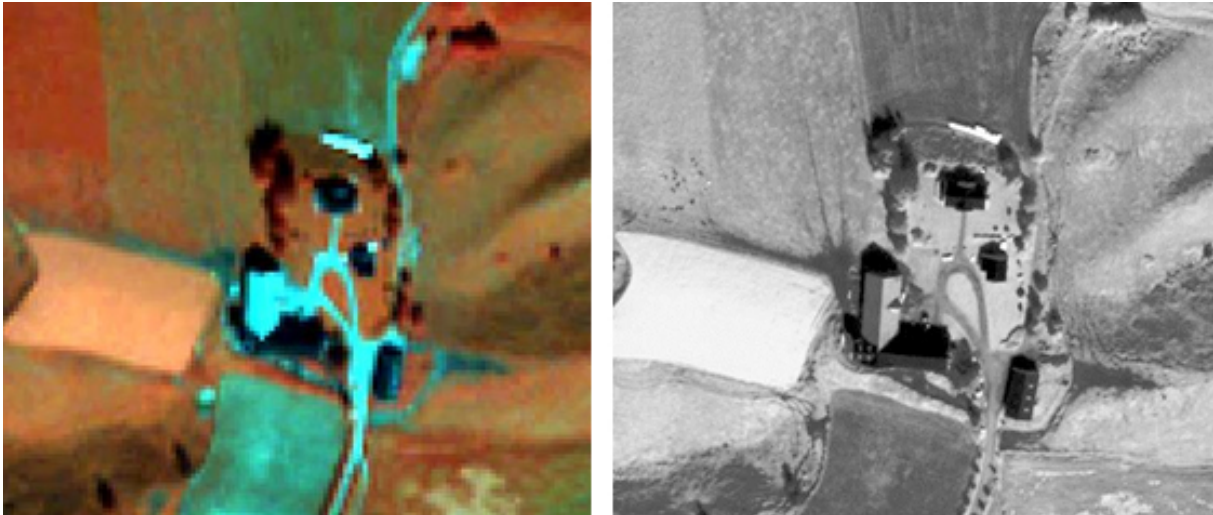
4 <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos.html>

Ettersom norsk kulturminneforskning og -forvaltning ble klar over mulighetene som lå i bruken av høyoppløselige satellittbilder, ble det i løpet av 2000-tallet satt i gang en rekke prosjekter hvor analyser av denne typen satellittdata inngikk som en viktig del. Undersøkelsene hadde i hovedsak som formål å kartlegge kulturminner på et overordnet nivå, samt å korrelere deteksjoner fra visuelle analyser av datasettene med jordkjemisk kartlegging (Grøn & Loska 2002, Grøn et al. 2004, Palmér et al. 2008). I de senere årene har også Riksantikvaren i samarbeid med Norsk Romsenter, Norsk Regnesentral, NIKU og utvalgte fylkeskommuner gjennomført et prosjekt for automatisk deteksjon av kulturminner i dyrket mark ved hjelp av høyoppløselige satellittbilder (Trier et al. 2009, Trier et al. 2012). Et av målene med dette prosjektet er at de ulike fylkene etter hvert skal ta i bruk satellittdata i forvaltningen av kulturminner og kulturlandskap.

2.2. Teknisk beskrivelse

Jordobservasjonssatellittene går i polare baner rundt jorda, hvilket betyr at de med jevne mellomrom krysser polene, vinkelrett på ekvator. Dette i motsetning til geostasjonære satellitter som mer eller mindre følger jordens rotasjon. Satellittene ligger i sol-synkrone baner mellom 480 og 770 km over jordens overflate, og de har optiske sensorer som kan levere bilder med oppløsning ned til ca. 0,5 m per pixel.

De optiske sensorene kan fange opp lys i både den synlige og nær-infrarøde delen av det elektromagnetiske spekteret (jfr. Figur 31), og bildene som leveres betegnes enten som pankromatiske (gråtonebilder) eller multispektrale (fargebilder). De pankromatiske bildene genereres fra én enkelt sensor som registrerer lys i hele det synlige spekteret, mens de multispektrale bildene genereres fra sensorer som registrerer elektromagnetiske stråler innenfor avgrensede deler av spekteret. I tillegg kan deler av det infrarøde spekteret registreres. Eksempelvis har QuickBird-satellitten fire multispektrale sensorer (rød, grønn, blå og nær-infrarød) samt én pankromatisk sensor. De pankromatiske bildene har alltid høyere oppløsning enn de multispektrale (Figur 1), men ved hjelp av avansert programvare kan man generere såkalte *pan-sharpened* bilder. I disse bildene kombineres lavoppløselig fargeinformasjon fra multispektrale opptak med informasjon fra høyoppløselige pankromatiske opptak, for å danne et øyensynlig skarpt multispektralt bilde (Lasaponara & Masini 2012b).



Figur 1 - Sammenligning av et multispektralt (venstre) og et pankromatisk datasett (høyre). Det multispektrale bildet har falske farger, der informasjon fra den røde sensoren er byttet ut med informasjon fra den nær-infrarøde. Legg merke til forskjellene i oppløsning mellom de to opptakene. Opphavsrett: DigitalGlobe.

Bildesensorene kan roteres, noe som muliggjør opptak av skråbilder (*off-nadir*) så vel som bilder tatt direkte over jordoverflaten (*true nadir*). *Off-nadir* opptak kan gjennomføres med 1-4 dagers mellomrom, mens man må vente i opptil 150 dager dersom man ønsker et *true nadir* opptak. Denne egenskapen gjør at store landområder kan dekkes og gjenoppsøkes av satellittene på relativt kort tid. For eksempel kan WorldView-2 systemet dekke inntil 1 million km² per dag og det kan nå et hvert punkt på jordkloden i løpet av litt over en dag. Denne registreringshastigheten gjør systemene svært fleksible og gjør det mulig å bestille opptak fra spesifikke områder til spesifikke tidspunkt. Dette kan være spesielt nyttig i forhold til å finne arkeologiske vegetasjonsspor i dyrket mark, da disse er avhengige av raskt skiftende lokale nedbørsmengder og temperaturforhold.

2.3. Satellittsystemer

Blant de mest brukte satellittsystemene til bruk for arkeologiske formål er IKONOS⁵, QuickBird⁶, WorldView⁷ og GeoEye⁸ (se også Tabell 1).

- **IKONOS**-satellitten ligger i bane 681 km over jordoverflaten og produserer opptak med optimal oppløsning på mellom 0,8 m pankromatisk og 4 m multispektralt. Satellitten ble skutt opp i 1999 og begynte å levere bilder 1. januar 2000. Med dette ble IKONOS den første satellitten som leverte offentlig tilgjengelige, høyoppløselige satellittdata.
- **QuickBird** ligger i bane ca. 450 km over jorda. Satellitten ble skutt opp i 2001 og leverer pankromatiske opptak med 0,6 m oppløsning og multispektrale opptak med 2,4 m oppløsning. *QuickBird* er i tillegg den satellitten som per i dag har størst lagringskapasitet, og som kan dekke de største områdene per sveip.

⁵ <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos.html>

⁶ <http://www.digitalglobe.com/downloads/QuickBird-DS-QB-Web.pdf>

⁷ <http://www.digitalglobe.com/downloads/WorldView1-DS-WV1-Web.pdf>

⁸ <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/geoeye-1.html>

- **WorldView 1** ligger i bane ca. 496 km over jorda, og ble skutt opp i 2007. Den har én pankromatisk sensor, og kan dekke ca. 750 000 km² per dag. **WorldView 2** ligger i bane 770 km over jorda. Denne satellitten har én pankromatisk sensor og 8 multispektrale sensorer. Det er en av de raskeste satellittsystemene og dekker inntil 1 million km² med høyoppløselige satellittbilder per dag. Satellittene har sensorer med pankromatisk oppløsning ned til 0,46 m pankromatisk og 1,84 m multispektralt.
- **GeoEye 1** ble skutt opp i september 2008 og ligger i bane 684 km over jorden. Denne satellitten leverer data med oppløsning på 0,41 m pankromatisk og 1,65 m multispektralt.

System	Operativt	Data ⁹	Oppløsning - MS	Oppløsning - Pan
Landsat 1-7	1972 - 1999	PAN, RGB, NIR, MIR, termisk	30 - 80 m	15 m
SPOT 1-7	1986	PAN, RGB, NIR	8 - 20 m	1,5 - 10 m
IKONOS	1999	PAN, RGB, NIR	4 m	0,8 m
QuickBird	2001	PAN, RGB, NIR	2,4 m	0,6 m
WorldView 1-2	2007	PAN, RGB	1,84 m	0,46 m ¹⁰
GeoEye 1	2008	PAN, RGB	1,65 m	0,41 m ¹²

Tabell 1 - Tabell over et utvalg satellittsystemer.

2.4. Metodebruk

Multispektrale opptak har blitt brukt i flere studier for påvisning av ikke-synlige kulturminner. I disse er det eksempelvis funnet kokegroper, mulige tufter og bygningsspor (Grøn et al. 2008, Palmér et al. 2008) samt spor etter utpløyde gravhauger (Trier et al. 2008). Multispektrale data har også vært brukt til miljøovervåking, der de blant annet har vist slitasjeskader på kulturminner ved Stonehenge i England (Bewley et al. 2005), og gjengroing ved kulturminner i Vesterålen i Nordland (Barlindhaug et al. 2007)

Satellittdata fra jordobservasjonssatellitter kan per i dag kjøpes fra store digitale arkiver, men det er også mulig å bestille nye opptak. Satellittdataene leveres georefererte, og de kan hentes inn i vanlige GIS-programvarepakker eller gratis innsynsprogrammer. I disse programmene kan man gjennomføre enkle justeringer av skarphet, kontrast og lysstyrke i bildene, og det er mulig å blande forskjellige fargekombinasjoner for å lage bilder med falske farger. Siden bildene er georefererte kan de også sammenstilles med databaser som for eksempel Riksantikvarens *Askeladden*, historisk kartmateriale eller jordsmonnsskart. På denne måten kan man med enkelthet vurdere datasettene mot kjente kulturminner og kulturmiljøer.

Satellittbildenes store fortrinn kommer imidlertid først til syne når de hentes inn i spesialprogramvare for videre bearbeiding og analyse. De mest anvendte programvarepakkene for disse formålene er Exelis ENVI¹¹ og ERDAS IMAGINE¹². Ved å manipulere data fra de forskjellige

⁹ PAN = Pankromatisk - RGB = rød, grønn, blå - NIR = nær-infrarød - MIR = mellom-infrarød

¹⁰ Datasett med inntil 0,5m oppløsning er tilgjengelig for allmennheten

¹¹ <http://www.exelisvis.com/language/en-US/ProductsServices/ENVI.aspx>

¹² <http://geospatial.intergraph.com/products/ERDASIMAGINE/ERDASIMAGINE/Details.aspx>

frekvensbåndene kan arkeologen selv fjerne støy og fremheve forskjeller i datasettene, og det er mulig å gjennomføre avanserte spektrale analyser av datasettene slik som *prinsipalkomponentsanalyse* (PCA) og *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). På denne måten kan vegetasjonsspor som indikerer kulturminner fremtre tydeligere og de blir enklere å tolke. I tillegg kan man fjerne støy, overflødig data og systematisk gjentakende mønstre i datasettene ved hjelp av filtreringsmetoder som for eksempel *Fast Fourier Transformation* (FFT) og *Minimum Noise Fraction* (MNF). Det finnes et utall slike analysemetoder, og bare de mest vanlige beskrives i korthet i kapittelet nedenfor.

2.4.1. Analysemuligheter

Utover den visuelle inspeksjonen av datasettet, vil *histogramutjevning* være den første analysen som blir gjennomført på et datasett. Metoden går ut på å fordele gråtonene i bildet over et større eller mindre intervall. Hver pixel i bildet har en verdi fra 0-255, og ved å fordele disse verdiene over et bestemt intervall kan man fremheve variasjoner og øke kontrastforskjellene i bildet. De aller fleste vegetasjonsspor kan identifiseres allerede ved en slik første justering.

I motsetning til de pankromatiske bildene som tas med én enkelt sensor, har de multispektrale datasettene data i forskjellige spektralbånd. Ved å blande disse dataene i såkalte *spektralbåndkombinasjoner*, kan man fremheve ulike aspekter ved forskjellige overflater og strukturer. Dette gjøres først og fremst for å tydeliggjøre vegetasjonsspor i datasettene (Parcak 2009 s. 86).

Prinsipalkomponentsanalyse (PCA) er en klassifiseringsmetode som brukes for å redusere datamengden i datasettet, og for å sile ut relevant informasjon. PCA fjerner overflødig informasjon i datasettet som kan maskere mindre arkeologiske strukturer, samtidig som den brukes for å fremheve variasjonen mellom båndene i datasettet for på denne måten å få frem flere detaljer fra datasettet. Metoden kan være svært nyttig for å fremheve arkeologiske strukturer, men krever nokså kraftig prosesseringskapasitet (Lasaponara & Masini 2012a).

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) er en metode som brukes for å måle vegetasjonens fysiske tilstand på et gitt tidspunkt. Metoden er en vegetasjonsindeks som baserer seg på å sammenligne data fra det nær-infrarøde spekteret med data fra det røde spekteret etter følgende formel:

$$NDVI = \frac{NIR - Rød}{NIR + Rød}$$

Jo høyere resultatet av formelen er, desto friskere er vegetasjonen, mens lavere verdier kan indikere død eller stresset vegetasjon. Formelen tar utgangspunkt i prinsippet om at vegetasjon reflekterer mye i det infrarøde spektret, samtidig som det absorberer mye i det synlige spektret. Områder med frisk vegetasjon eller biomasse vil ha høy refleksjon i det infrarøde spektret, sammenlignet med det røde, mens et område uten vegetasjon vil ha relativt lik refleksjon både i rødt og infrarødt, eller til og med mindre i rødt. NDVI har vist seg å være meget effektivt til å påvise enkelte typer vegetasjonsspor (Lasaponara & Masini 2007).

2.4.2. Vegetasjons- og jordspor

Det har lenge vært kjent at arkeologiske strukturer under bakken kan fremkalle såkalte vegetasjonsspor (en. *crop-marks*) eller jordspor (en. *soil-marks*). Årsakene til at disse fenomenene

oppstår er imidlertid svært kompliserte og ikke særdeles godt kartlagt. Vegetasjons- og jordspor oppstår i synlig form i dyrket mark, hvor de kan observeres som markerte variasjoner i vegetasjonen eller jordsmonnet (Figur 2). Selv om slike variasjoner ofte stammer fra naturlige formasjoner slik som gamle elveløp og geologi, eller moderne strukturer som dreneringsgrøfter, kan de også indikere tilstedeværelsen av arkeologiske strukturer under bakken. Spor etter tidligere bebyggelse, hulveier, grøfter, groper, gravhauger eller murverk kan på denne måten spores i det dyrkede landskapet.

Jordspor vises gjerne som variasjoner i farge, tekstur, fuktinnhold eller komposisjon dersom de underliggende strukturene har blitt fylt med jord som har andre egenskaper enn jorda omkring. Denne typen avvik opptrer helst på vårparten etter at snøen har smeltet og før vekstene på åkeren spirer, selv om de også kan oppstå seinhøstes etter at avlingene er høstet og åkerjorden bearbeidet.

Vegetasjonssporene på sin side, dannes øyensynlig fordi vegetasjonen vokser tykkere og høyere og gjennomgår en langsommere modningsprosess i områder hvor det er mer fuktighet og næringsstoffer i jorda, eksempelvis i groper fylt med næringsrik jord. Dersom vegetasjonen befinner seg over et begravd murverk hvor matjorda er tynnere, vil vegetasjonen derimot ha dårligere vekstforhold. Den vil da vokse tynnere og lavere og modnes tidligere enn områdene rundt. Det skilles mellom positive og negative vegetasjonsspor, hvor positive vegetasjonsspor oppstår i områder hvor det har vært forsenkninger i terrenget, mens negative vegetasjonsspor som regel oppstår over begravde murverk eller andre positive strukturer. De fleste vegetasjonsspor er positive og de opptrer helst i kornåkrer med bygg, hvete og havre. De kan imidlertid også opptre åkrer med i andre typer vegetasjon som raps, lin, erter og bønner, men sjeldnere i for eksempel potetåkrer (Riley 1982).



Figur 2 - QuickBird satellittbilde fra gården Guri ved Tjøllingvollen i Larvik kommune, Vestfold, tatt 7. august 2010. Bildet er histogramutjevnet for å få fremheve kontraster. Videre er de forskjellige fargebåndene kombinert slik at det røde båndet er byttet ut med det nær-infrarøde. Omtrent midt i bildet kan sees en åker med vegetasjonsspor etter moderne dreneringsgrøfter, samt to sirkulære strukturer som representerer fotgrøftene etter utpløyde gravhauger. Legg merke til at vegetasjonssporene som representerer dreneringsgrøfter ikke kan spores i åkrene rundt. Opphavsrett: DigitalGlobe, Norsk Regnesentral.

Figur 3 viser en forenklet skisse av hvordan man antar at vekstspor oppstår. Her ser man et tverrsnitt av jordsmonnet, med en positiv struktur i form av et murverk til venstre i bildet, og en negativ struktur i form av en grop til høyre i bildet. Figuren illustrerer hvordan forskjellen mellom vegetasjonen over de arkeologiske objektene og den omkransende vegetasjonen arter seg i forskjellige deler av vekstsesongen. Den demonstrerer således hvor viktig det er med kunnskap om hvilken tid på året man skal samle inn data for å få så tydelige vegetasjonsspor som mulig.



Bilde ikke tilgjengelig

Figur 3 - Forenklet skisse over vegetasjonsspor. Den venstre kolonnen viser eksempler på hvor en begravd mur vil føre til tynnere jordlag og bedre drenering. Dette gir relativt dårlige vekstforhold for kornet. Det vokser seg kortere og visner tidligere enn omgivelsene. Den høyre kolonnen viser et eksempel hvor en tidligere grøft eller grop er fylt med mer næringsrik jord enn i området rundt og således gir bedre vekstforhold enn i området rundt. Fra (Ericsson et al. 1992).

2.5. Metodeevaluering

Den store fordelen med bruk av satellittdata er at store områder kan undersøkes i løpet av relativt kort tid. Hvert satellittbilde dekker gjerne flere kvadratkilometer og, koblet sammen med informasjon fra eksempelvis *Askeladden*, er bruk av satellittdata en svært effektiv måte å skaffe seg oversikt over et arkeologisk landskap på.

Datasettene er relativt rimelige, spesielt dersom man går til innkjøp av arkivmateriale av allerede innhentet data. Eksempelvis koster et arkivopptak fra IKONOS-satellitten ca. 200 kr per km² med en minstebestilling på 49 km², mens minstebestillingen av QuickBird-datasettene er 64 km². Ved nye opptak blir datasettene noe dyrere da minstebestillingen nærmest doubles. Bestillingen av arkivopptak gjøres relativt lett gjennom satellittoperatørens nettsider. På disse kan man som regel få en oversikt over hva som finnes av satellittdata, og man kan få informasjon om kvaliteten på satellittbildene med hensyn til oppløsning, opptaksvinkel, når opptakene er gjort og hvor stor prosent av bildet som er dekket av skyer. Disse faktorene kan være vanskelige å forutsi i de tilfellene man bestiller nye opptak.

Andre kilder som bør konsulteres i forbindelse med, eller gjerne før oppstarten av et prosjekt, er gratistjenester som eksempelvis GoogleEarth¹³, Bing Maps¹⁴, GuleSider¹⁵, Finn Kart¹⁶ og Norge i Bilder¹⁷. Her har man enkel tilgang til arkivdata som inneholder detaljerte satellittbilder i tillegg til flybilder med svært høy oppløsning. Her har man imidlertid ikke tilgang til rådataene, og man kan ikke gjennomføre videreprosessering og analyser på samme måte som man kan med et rådatasett.

En effektiv bruk av satellittdata til å detektere arkeologiske strukturer i form av vegetasjonsspor avhenger av en rekke faktorer som bør vurderes nøye før man eventuelt går til innkjøp av data. I tillegg kan kvaliteten på satellittbildene påvirke resultatene. Erfaringsmessig vil datasett med lavere oppløsning enn 1 m x 1 m være for dårlig for å kunne påvise kulturminner med en høy grad av sikkerhet. Et annet usikkerhetsmoment er hvorvidt det faktisk vil være vegetasjonsspor av kulturhistorisk interesse å spore i satellittopptaket. Årsakene til at vegetasjonsspor oppstår er som nevnt ikke godt kartlagt, og det er så godt som umulig å forutsi om et opptak vil vise vegetasjonsspor eller ikke. Det vi kan si med sikkerhet er at mange komplekse faktorer spiller inn, slik som lokale nedbørmengder og temperaturforhold. Dersom man har hatt en regnfull periode på sensommeren etterfulgt av en lengre periode med tørke på høsten, eller man har hatt en tørkeperiode etterfulgt av en kort periode med nedbør, vil dette øke sjansene for at vegetasjonsspor oppstår.

Resultatene avhenger også i stor grad av tiden på året opptakene er gjort. Opptak vinterstid vil generelt sett ikke gi spesielt gode resultater, ettersom de fleste åkerområder i Norge vil være dekket av snø. På vårrparten vil man i enkelte tilfeller kunne se jordspor i datasettene, men disse kan være dannet av naturlige prosesser, og kan derfor ikke regnes som sikre indikatorer på tilstedeværelsen av arkeologiske strukturer. På forsommeren, da kornet er i ferd med å spire, kan man også observere små forskjeller i de lokale vekstforholdene, men disse forskjellene utjevnes så fort det omkringliggende kornet har begynt å spire. Dette kan skje svært raskt, og det kan være svært vanskelig å forutse. Om sommeren vil kornet i de fleste tilfeller vokse jevnt og ha samme fargenyanser, uten at veksten påvirkes nevneverdig av underliggende strukturer. Det er derfor først og fremst når kornet er i ferd med å modnes at man har størst sjanse til å observere vegetasjonsspor.

¹³ <http://www.google.com/earth/index.html>

¹⁴ <http://www.bing.com/maps/>

¹⁵ <http://www.gulesider.no/>

¹⁶ <http://www.kart.finn.no/>

¹⁷ <http://www.norgebilder.no/>



Figur 4 - QuickBird satellittbilde tatt av samme sted på forskjellige tider av året. Bildet til venstre er et opptak fra juli, mens bildet til høyre er fra august. Legg merke til at vegetasjonen har endret seg drastisk fra det ene til det andre bildet. Opphavsrett: DigitalGlobe.

Flere studier fremhever at de spektrale dataene har gitt mange nye funn, også i områder som har vært intensivt undersøkt av arkeologer tidligere. Der det er gjort LiDAR-skanninger samtidig pekes det på kombinasjonen med laserdata og hyperspektrale data som svært nyttige komplementære verktøy (Bewley et al. 2005, Rowlands et al. 2006).

Sentrale utfordringer i prosesseringen og analysene er geokorrigerings og grov pixeloppløsning (Winterbottom & Dawson 2005, Rowlands et al. 2006, Bassani et al. 2008). Flere av studiene påpeker at dataene blir best i ensartet vegetasjon, mens urbane områder, skog og naturmark kan være mer problematisk (Winterbottom & Dawson 2005, Bassani et al. 2008, Grøn et al. 2008, Palmér et al. 2008).

Oppsummering:

- Genererer høyoppløselige bilder i farger eller gråtoner
- Kan brukes til å kartlegge arkeologiske lokaliteter i form av vegetasjons- og jordspor

Fordeler:

- + Datasettene er relativt billige i innkjøp
- + Datasettene er lett tilgjengelige
- + Dekker svært store arealer
- + Programvare er lett tilgjengelig

Ulemper:

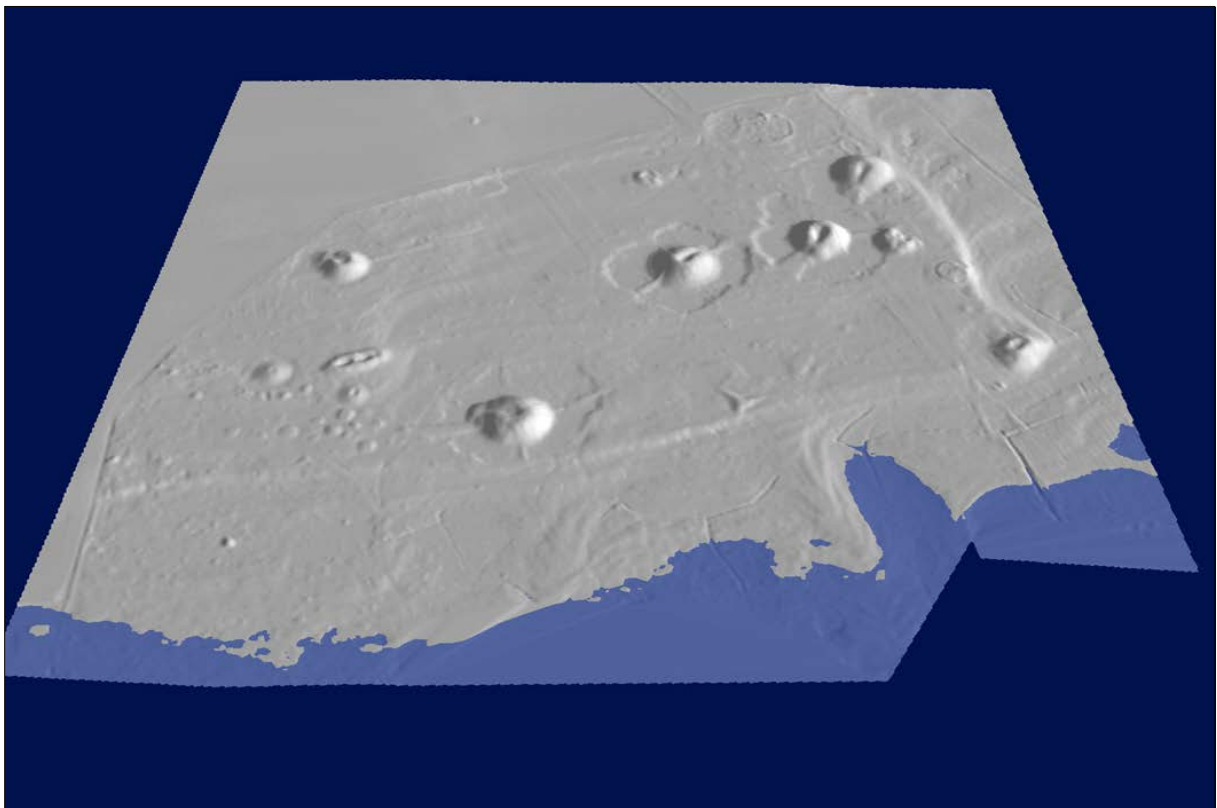
- Kun egnet for dyrket mark - Kan ikke brukes mot skogsområder
- Sesongavhengig
- Avhengig av datakvalitet
- Avhengig av at det finnes vegetasjonsspor
- Et usikkert verktøy for påvisning av arkeologi

Anbefaling:

Satellittdata bør tas i bruk på et tidlig tidspunkt i planprosessen for å få et generelt overblikk over den kulturhistoriske situasjonen innenfor et område, og for å kunne prioritere videre arbeid. Siden det bare er en viss mulighet for å detektere og kartlegge i dyrket mark, og siden dataene ikke kan brukes mot eksempelvis skogsområder, bør de imidlertid kombineres med andre typer data.

3. LiDAR

LiDAR (*Light Detection And Ranging*) kalles også for FLS (flybåren laserskanning) eller LLS (luftbåren laserskanning) på norsk og ALS (Aerial Laser Scanning) på engelsk. Denne metoden brukes blant annet til å lage detaljerte høydemodeller av terrenget til bruk ved kartproduksjon og i forbindelse med kartlegging av skogressurser. LiDAR kan kort beskrives som en metode hvor et laserinstrument montert under fly eller helikopter sender ut millioner av laserpulser i retning ned mot bakken. Pulsene reflekteres fra bakken eller fra toppen av vegetasjon, bygninger eller lignende og sendes tilbake til flyet. Her lagres retursignalene sammen med opplysninger om x-, y- og z-koordinater på de returnerte punktene. Disse punktene kan så brukes til å fremstille detaljerte høydemodeller av terrenget (Figur 5).



Figur 5 - En digital terrengmodell (DTM) av gravfeltet i Borreparken, Horten kommune. All vegetasjon er fjernet slik at gravminnene og terrenget rundt kommer tydelig frem. Data bearbeidet av NIKU. Opphavsrett: Vestfold fylkeskommune.

3.1. Metodehistorikk

Laserteknologien ble oppfunnet seint på 1950-tallet og ble fra midten av 1960-tallet blant annet anvendt til atmosfæriske målinger og som en metode for å påvise ubåter i vann. På slutten av 1960-tallet gjorde man de første eksperimenter med å montere laserinstrumenter under fly, og fra midten av 1970-tallet kunne man for første gang fremstille LiDAR-genererte topografiske høydemodeller. Mot slutten av 1980-tallet skjedde det viktige teknologiske fremskritt med utviklingen av høypresisjonstidtakere samt GPS- og IMU-teknologi (GPS = *Global Positioning System*, IMU = *Inertial Measurement Unit*), som sikrer flyets og instrumentenes nøyaktige posisjon selv når flyet beveger seg med høy hastighet og er utsatt for vregninger og kregninger. Disse oppfinnelsene økte

presisjonen på innmålingene og gjorde LiDAR adskillig mer anvendelig for et større spekter av bruksområder, og på midten av 1990-tallet opplevde LiDAR et kommersielt gjennombrudd (Campbell & Wynne 2011).

Få år senere - i år 2000 - ser vi de første eksempler på at arkeologer tar i bruk LiDAR (Holden 2001, Motkin 2001) og siden har bruken vært jevnt økende i det arkeologiske miljøet. Arkeologer i stadig flere land og miljøer utfører i dag skanningsprosjekter i forskning og forvaltning, basert enten på egne skanninger eller allerede eksisterende laserdata. Bruken av LiDAR i norsk arkeologi går tilbake til 2005 hvor det første prosjektet ble gjennomført med skanning av et 10 km² stort skogsområde i Elverum kommune hvor det ble påvist kullgroper, jernvinneanlegg og tjæregrofter (Risbøl et al. 2006). Dette er senere blitt fulgt opp av en rekke skanningsprosjekter med stor geografisk spredning og ulike problemstillinger knyttet til kulturminneforvaltning, -forskning og utredning (Risbøl 2009, Risbøl 2010, Nesbakken & Risbøl 2011, Bollandås et al. 2012, Trier & Pilø 2012).

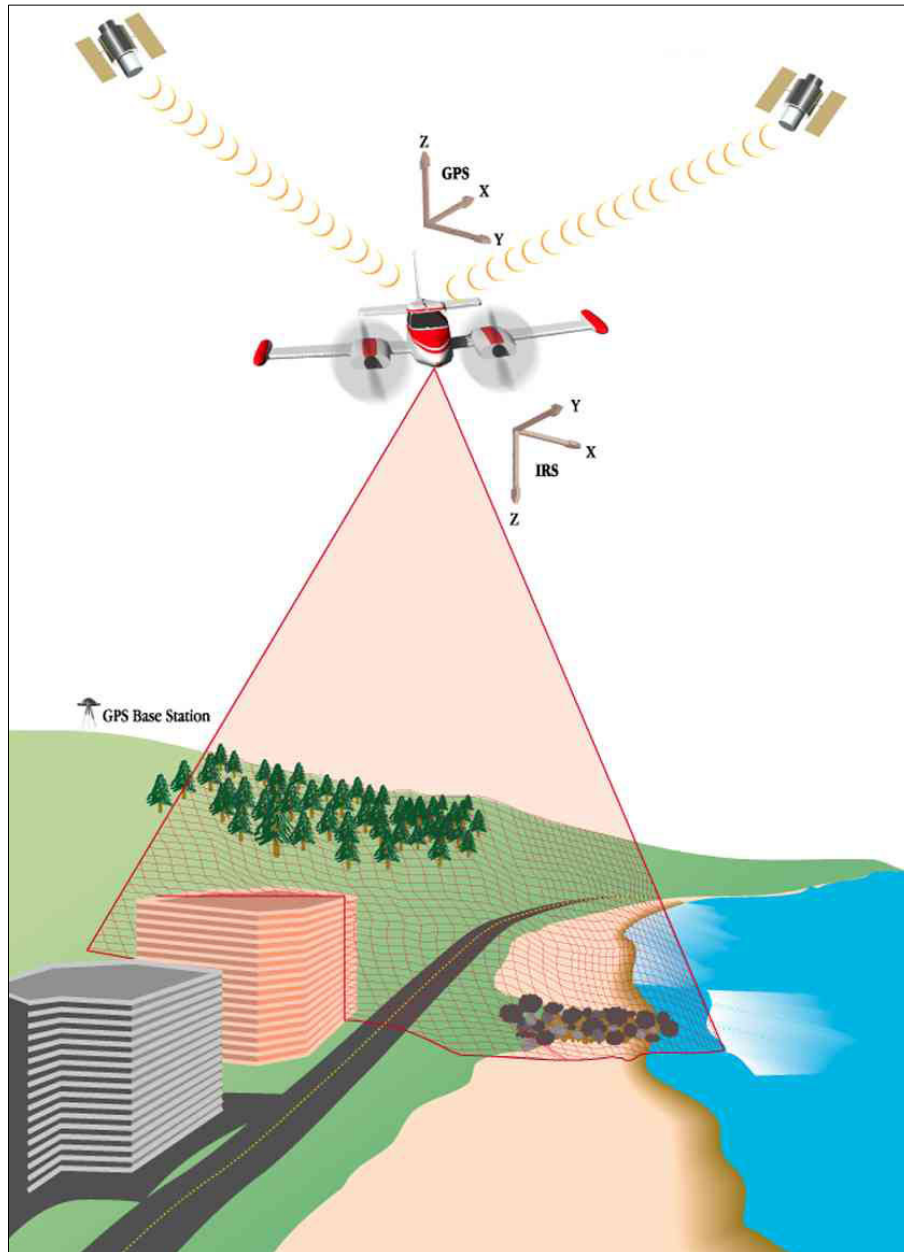
3.2. Teknisk beskrivelse

LiDAR er en fjernmålingsteknikk der korte pulser av nærinfrarødt lys sendes ned mot bakken fra en sensor montert under et fly eller helikopter (Figur 6). Pulsene blir distribuert ut til begge sider av flyretningen ved at et speil vipper frem og tilbake med en vinkel på typisk <20° (skannevinkel). Dette gjør at LiDAR-dataene blir samlet i en korridor under flyet som normalt er mellom 100 og 1000 m bred. Lyspulsene reflekteres tilbake til sensoren fra det som treffes på vei mot bakken, enten det er vegetasjon, bygninger, terrengoverflaten eller annet. Posisjonen til hver refleksjon kan deretter beregnes i tre dimensjoner (x, y og z) ved at flyets posisjon og orientering i rommet, skannevinkel samt tiden det tar fra pulsen forlot sensoren til returene er registrert i sensoren er kjent.

Posisjoneringen sikres ved bruk av avansert GPS- og IMU-teknologi som en integrert del av skanningssensoren. Nøyaktigheten på innmålingene ligger normalt på minimum 25-40 cm i det horisontale planet og 15-20 cm i det vertikale planet. Erfaringen er at dette er minimumstall og at nøyaktigheten ofte er bedre enn dette. Med en samling av nøyaktig innmålte punkter kan man ved hjelp av et sett med algoritmer bestemme hvilke treff som kommer fra bakken, hvilke som er fra toppen av vegetasjon, fra bygninger og så videre. Dermed er det mulig å filtrere bort de punkter en ikke ønsker skal være en del av datasettet, slik at en for eksempel kan lage en detaljert digital tredimensjonal modell av selve bakkeoverflaten. Hvis terrengmodellen er detaljert nok egner den seg svært godt til å se hvilke kulturminner som finnes i det terrenget som er skannet.

Det som er beskrevet her er konvensjonell skanningsteknikk. I de senere årene er full-waveform-skanning kommet til som en ny og forbedret metode for innsamling av data. Den gjør det mulig å foreta en mer fintfølede bortrensning av bakkenær vegetasjon enn det som er mulig med konvensjonell teknikk. Ved bruk av full-waveform-skanning er det mulig å skille mellom returer som ligger tettere hverandre i tid, fordi den samler inn opplysninger om hele den returnerte bølgelengde fremfor fire eller fem deler av den slik tilfellet er med konvensjonell skanning. Erfaringer fra bruken av konvensjonell LiDAR viser at vegetasjon som sperrer for innsyn til bakken langt på vei lar seg fjerne som et ledd i etterprosesseringen, men at bakkenær vegetasjon er en utfordring. Dette skyldes at det ofte ikke er mulig å skille mellom returer fra bakken og fra vegetasjon som ligger nær bakken med konvensjonell skanning. Full-waveform-skanning har vært anvendt med hell i enkelte arkeologiske prosjekter hvor finjustert bortfiltrering av vegetasjonen har gitt gode resultater med hensyn til

påvisning av kulturminner under kratt eller annen lav vegetasjon (Doneus et al. 2008). Ulempen ved full-waveform-skanning er at den teknisk sett er adskillig mer krevende å jobbe med, og at den genererer store datamengder som det kan være en utfordring å håndtere. Det må derfor avveies i hvert tilfelle om merverdien er av en slik betydning at det svarer seg å bruke full-waveform skanning.



Figur 6 - Prinsippkisse av flybåren laserskanning. Et laserinstrument montert under et fly sender laserpulser ned mot bakken innenfor en bestemt korridor. Pulsene returneres til instrumentet og lagres som tredimensjonale punkter via sensorer i flyet. Flyets posisjon registreres hele tiden av avanserte GPS- og IMU-systemer. Opphavsrettighet: Blom Geomatics.

Multiple Pulse in Air (MPiA) er en videreutvikling av konvensjonelle skannere som gjør at det kan samles inn flere punkter med høyere hastighet. Prinsippet er utviklet slik at sensoren klarer å sende avgårde en ny puls før den forrige har returnert til sensoren i motsetning til tidligere hvor det ikke var mulig å sende avgårde neste puls før den den forrige var returnert og lagret.

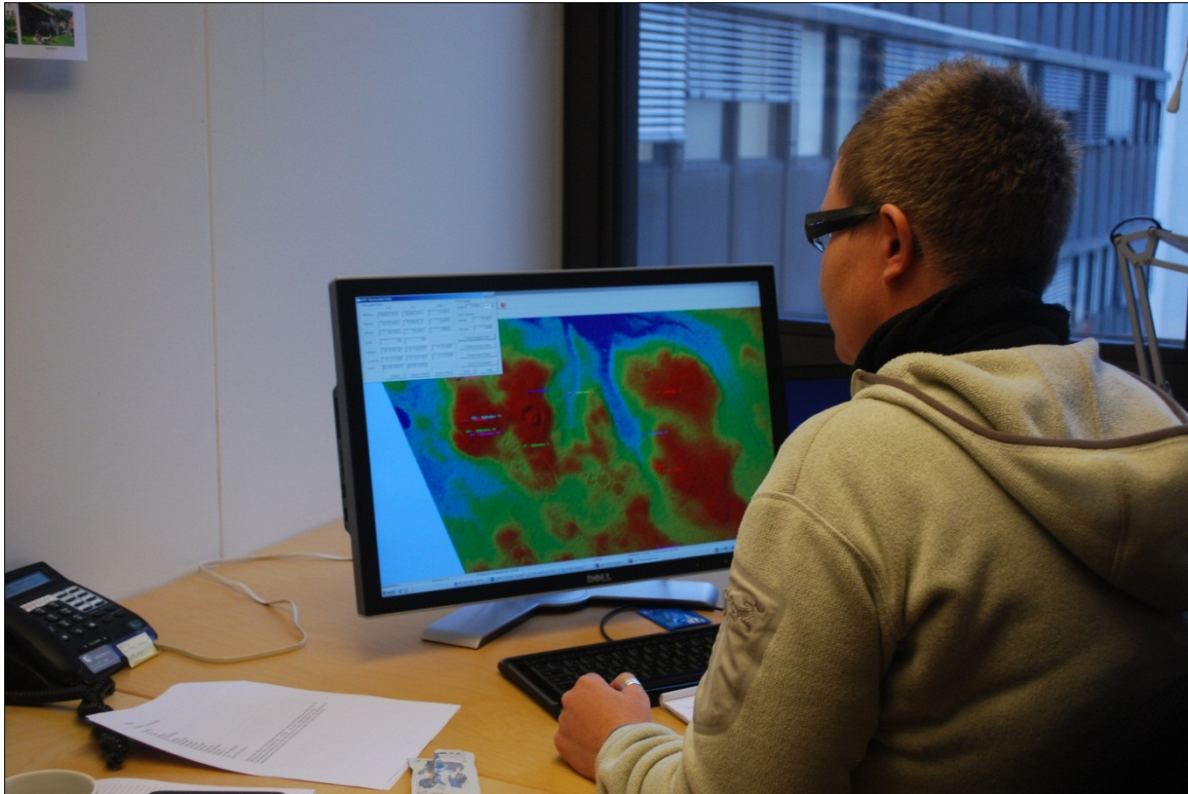
Batymetrisk skanning (skanning i vann) foretas med lys som ligger i det grønne spektret og som derfor kalles grønn laser. Laserpulsene trenger gjennom vannet og blir reflektert fra sjøbunnen eller fra strukturer på sjøbunnen, for eksempel vrak og lignende. På turen gjennom vannet utsettes laserpulsene for lysbrytning, spredning og/eller absorbering. Den begrensede gjennomtrengeligheten gjør at batymetrisk skanning er best egnet på lavt vann nær kysten samt i grunne elver og innsjøer. Ved klart vann kan penetrasjonsdybden være opp til 10 meter, men den er som oftest mindre som følge av forekomsten av alger og andre urenheter i vannet (Lambrick 2008, Doneus et al. 2012).

Når arkeologer ønsker å anvende LiDAR-data må disse enten bestilles fra en leverandør eller man kan ta i bruk allerede eksisterende data innhentet til andre formål. Fordelen med selv å bestille dataene, er at en da har kontroll på skanningsprosessen hva angår skanningstidspunkt, hvilke parametere det skannes etter, etterprosesseringen av dataene og så videre. Disse tingene har stor innflytelse på resultatet, og som en grunnregel er det en fordel at arkeologen bestiller skanningen selv, fremfor å ta i bruk eksisterende data. Dessverre blir dette ofte et spørsmål om økonomi. Selve skanningen kan være kostbar, og derfor blir det ofte til at de som jobber med kulturhistoriske problemstillinger må ta i bruk data som allerede finnes, fremfor å innhente egne datasett. Mengden tilgjengelig data øker hele tiden, og det bør understrekes at en kan komme langt med bruk av data samlet inn med annet formål enn kartlegging av kulturminner. Et godt alternativ er at arkeologer med kompetanse på LiDAR konsulteres hvis et område skal skannes med kartproduksjon, arealdisponering, utbygging eller lignende som formål og at bruksområdet av skanningen dermed utvides uten at merkostnadene ved for eksempel høyere oppløsning nødvendigvis blir større.

Når skanningen er utført, får en som regel et stort ferdigprosessert datasett bestående av millioner av punkter i las- eller ASCII-format. Datasettet vil typisk være klassifisert i henholdsvis bakkepunkter og ikke-bakkepunkter. Punktene kan importeres i et GIS eller i en programvare tilpasset håndteringen av laserdata. Vanligvis importeres punktskyen i en egnet programvare hvor den konverteres til en digital overflatemodell (DSM) eller terrengmodell (DTM). En DSM (S-en står for *Surface*) fremstilles av alle punkter (returer fra bakke, vegetasjon, bygninger, anlegg og så videre), mens en DTM er basert utelukkende på bakketreffene. Ved hjelp av et analyse- og innsynsverktøy som for eksempel *Quick Terrain Modeler*¹⁸ (QTM), som er en programvare utviklet for å håndtere store tredimensjonale datamengder, kan terrengmodellen tolkes for kulturminner (Figur 7).

Med en slik programvare kan terrengmodellen visualiseres, manipuleres og analyseres. Dette for å få best mulig grunnlag for å påvise og tolke strukturer på bakken som tydelig avviker fra omgivelsene. Den kunstige lyskilden som modellen er utstyrt med for å skape relieffvirkning (lys-skygge) kan flyttes rundt 360° samtidig som at vinkelen på lyset kan justeres. Det kan lages snitt gjennom et hvilket som helst objekt i modellen for å vise det valgte objektet i tverrsnitt, og modellens høydeverdi kan manipuleres slik at høydeforskjellene overdrives. På denne måten identifiseres kulturminner på terrengmodellen, de avmerkes på modellen og gis en tolkning. Etterpå må tolkningsarbeidet vanligvis følges opp med feltarbeid for å kontrollere et utvalg av tolkningsresultatene (Figur 8). I tillegg til å være et svært bra verktøy for å lokalisere og kartfeste kulturminner kan dokumentasjon (oppmåling) av kulturminnene også foretas digitalt på pc-skjermen med nærmere 90 % nøyaktighet sammenlignet

¹⁸ <http://www.appliedimagery.com>



Figur 7 - Tolkning av DTM ved bruk av programvaren *Quick Terrain Modeler*. Foto: NIKU.



Figur 8 - Verifisering av tolkningene i felt. Høydemodellen med tolkningsresultatene er lagt inn på en feltdatasamler tilkoblet CPOS-GPS. Foto: NIKU.

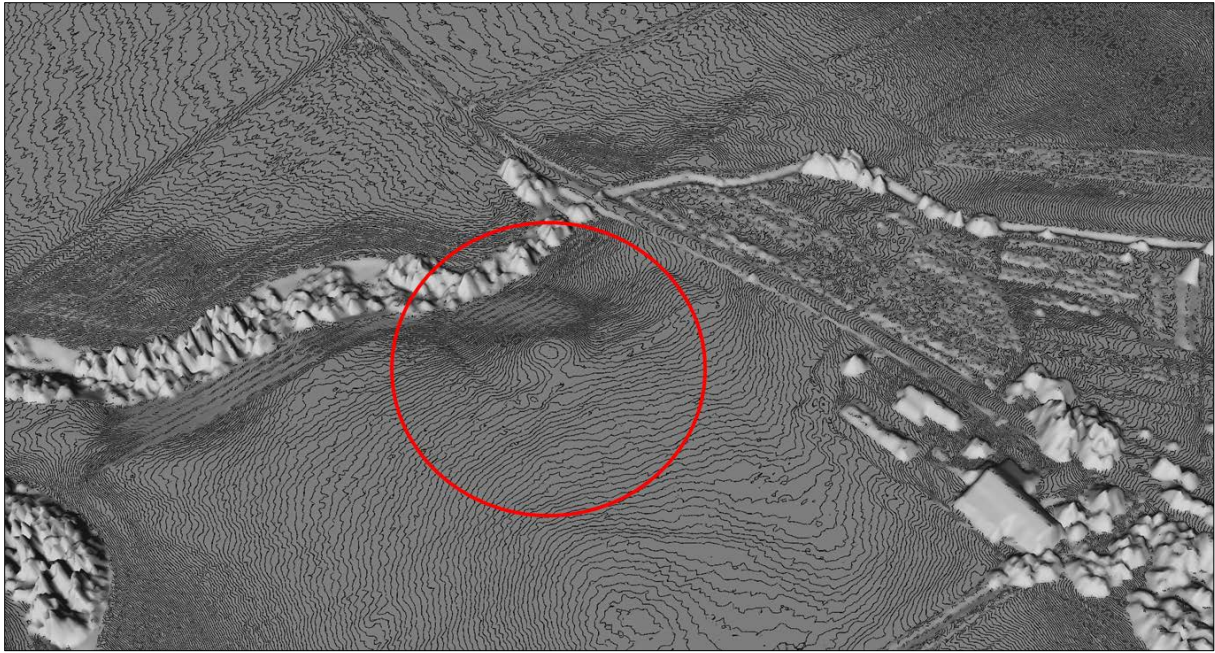
med tilsvarende dokumentasjon gjort i felt (Risbøl 2010). Siste trinn er å legge de registrerte kulturminnene inn i den nasjonale kulturminnedatabasen *Askeladden*.

3.3. Metodebruk

LiDAR har i løpet av et drøyt tiår blitt en viktig del av den arkeologiske verktøykassen, og ved hjelp av denne teknologien har arkeologene fått anledning til å jobbe med detaljerte, høyoppløselige tredimensjonale terrengmodeller som grunnlag for digital identifisering og tolkning av kulturminner. Før LiDAR ble et alternativ for arkeologisk kartlegging og dokumentasjon i 3D, ble kulturminners form forsøkt dokumentert med konturtegninger og andre tegnesymboler. Teodolitter, totalstasjoner og satellittposisjoningsutstyr (GPS) er også tatt i bruk til nøyaktig innmåling av arkeologiske kulturminner og utgravningsfelt, og til fremstilling av tredimensjonale modeller av mindre områder. Med totalstasjon eller GPS kan en samle inn punkter fra terrenget på samme måte som med LiDAR. Siden hvert punkt da må måles inn for seg, er disse metodene svært arbeidskrevende, og derfor ikke noe godt alternativ dersom større områder skal kartlegges. Fotogrammetri er også en alternativ måte å lage 3D-fremstillinger av anlegg eller terreng på, men denne metoden bygger på fototeknikk og har ikke det fortrinn LiDAR har med å kunne filtrere bort vegetasjon og andre elementer som sperrer for innsyn til bakken.

Da oppløsning er viktig for å kunne identifisere flest mulig kulturminner på terrengmodellene, er arkeologer kanskje den brukergruppen som stiller høyest krav til oppløsning på dataene. Etter en kort introduksjonsfase på begynnelsen av 2000-tallet begynte arkeologer i samarbeid med teknikere snart å videreutvikle metoden med tanke på å forbedre kvaliteten og visualiseringen av dataene. Lyssatte høydemodeller er det som er vanligst å bruke, men det utvikles og testes stadig ut nye måter å visualisere høydemodeller på for eksempel ved å ta i bruk full-waveform skanning (Doneus et al. 2008), *multiple view directions* (Devereux et al. 2008), *local relief model* (Hesse 2010) og *sky-view factor* (Zakšek et al. 2011). Hensikten er å forbedre mulighetene for å identifisere og tolke flest mulig kulturminner på de LiDAR-genererte DTMe.

Bruken av LiDAR i arkeologien har slått spesielt godt an som metode til kartlegging av kulturminner i skog. Siden registreringsintensiteten tradisjonelt har vært større i gårdsnære innmarksområder, er skog- og andre utmarksområder som regel dårligere registrert enn jordbruksområder hvor oversikten over kulturminnebestanden er bedre. Dette er en forvaltningsmessig utfordring både i Norge og i en rekke andre europeiske land og det finnes flere eksempler på at LiDAR er tatt i bruk for å forbedre oversikten over kulturminner i skog og annen utmark (Bofinger et al. 2006, Doneus & Briese 2006, Risbøl et al. 2006, Devereux et al. 2008). Selv om anvendelsen av LiDAR først og fremst er knyttet til skogsarealer brukes LiDAR også til kartlegging av kulturminner i innmarksområder hvor blant annet overpløydte kulturminner er påvist som svake forhøyninger i dyrket mark (Figur 9) (Holden et al. 2002, Crutchley 2006).



Figur 9 - Et eksempel på en overpløyd gravhaug på Rom i Tønsberg kommune. Høydekurvene viser at gravhaugen danner en forhøyning i åkeren. Data bearbejdet av NIKU. Opphavsrett: Vestfold fylkeskommune.

I tillegg til nyregistrering er et annet anvendelsesområde kvalitetssikring av eksisterende registreringer. Det nasjonale kulturminneregisteret *Askeladden* er den viktigste kilde til informasjon om kjente automatisk fredete kulturminner, men databasen er bygget opp over mange år og inneholder både feil og mangler. I tillegg til at svært mange kulturminner ikke finnes i registeret som følge av manglende registreringer, kan tidligere registrerte kulturminner være fjernet siden de ble registrert eller kartfestingen kan være feil. Dette betyr i praksis at opplysninger i *Askeladden* bør brukes med varsomhet, og at innholdet bør kvalitetssikres før det anvendes i forvaltningen. LiDAR egner seg godt til dette formålet og byr på gode muligheter for å konstatere om tidligere registrerte kulturminner fremdeles finnes i terrenget og om de er riktig avmerket i kartmaterialet.

Selv om det ikke er direkte relevant i forhold til nybygging av vei, bør det nevnes et siste anvendelsesområde for LiDAR-data. Dette er bruken av LiDAR-genererte høydemodeller som grunnlag for miljøovervåking. Miljøovervåking defineres som en systematisk innsamling av data ved hjelp av etterprøvbare metoder, basert på hypoteser om årsaks-/virkningssammenhenger. Innhenting av tilstandsdata fra samme objekt eller område med tidsmessige intervaller er et bærende element i miljøovervåking. Dataene sammenstilles i tidsserier, med det formål å dokumentere endringer over tid. Kombinert med analyser av hvilke årsaker som ligger til grunn for endringene, gir den samlede kunnskapen grunnlag for å forstå virkninger eller effekter av arealendringer. Dataene gir mulighet for å varsle, rette opp, samt generelt å forebygge en uønsket utvikling. Miljøovervåking er med andre ord et egnet verktøy til å forutse uønskete endringstendenser som grunnlag for å sette inn avbøtende tiltak. Potensialet for å bruke LiDAR til miljøovervåkingsformål innenfor forvaltningen av kulturminner er åpenbar, men det finnes så langt kun få eksempler på uttesting og ingen konkret bruk innenfor kulturminneforvaltningen (Barlindhaug et al. 2008, Kincey & Challis 2010, Risbøl & Amundsen 2011).

3.4. Metodeevaluering

Det fremste fortrinnet ved bruk av LiDAR-data er at det er mulig å fremstille særdeles detaljerte tredimensjonale gjengivelser av terrenget. Dette gjelder også den delen av terrenget som er dekket av skog og annen vegetasjon. For første gang er det mulig å foreta en detaljert kartlegging av terrenget fra fugleperspektiv uten at vegetasjon skjærer for innsyn til bakken slik tilfellet er ved flyfotografering og satellittopptak (Figur 10). LiDAR er derfor særdeles velegnet i alle typer landskap både åpne jordbrukslandskap og mer utilgjengelige skog- og utmarksområder. Dessuten kan store områder skannes i løpet av kort tid. Avhengig av hvilken terrengetype det er snakk om samt form og utstrekning på arealet som skal skannes, vil områder i størrelsesorden 50-100 km² kunne dekkes i løpet av en time. Setter en dette opp mot tradisjonell overflateregistrering til fots, betyr dette en enorm besparelse i tid.

Manglende registreringsdekning er en stor utfordring for kulturminneforvaltningen. Undersøkelser har vist at antall registrerte arkeologiske kulturminner øker drastisk når LiDAR tas i bruk. Selv i områder hvor tradisjonelle registreringer har vært utført tidligere kan bruken av LiDAR føre til en kraftig økning. Fra noen prosjekter rapporteres det om inntil 50 % økning (Doneus & Briese 2011, Georges-Leroy 2011) og i andre tilfeller inntil 80 % økning (Bollandsås et al. 2012). I et stort anlagt registreringsprosjekt i den tyske delstaten Baden-Württemberg har en så langt registrert over 60 000 mulige kulturminner ved hjelp av LiDAR i to områder på til sammen drøyt 3300 km² og kun i underkant av 6000 av disse var kjent fra før (Bofinger & Hesse 2011).

Videre er det gjort andre undersøkelser som viser hvor stor prosentdel av kulturminnene i et gitt område som lar seg kartlegge ved hjelp av LiDAR. I en norsk studie ble 83 % av kullgropene og 50 % av jernvinneanleggene i et område funnet på høydemodellene (Risbøl 2010), mens 66 % av det totale antall kulturminner ble påvist i et annet prosjekt (Bollandsås et al. 2012). Undersøkelser har også vist at når et kulturminne først er identifisert lar det seg gjøre å typebestemme det i over 90 % av tilfellene uten manuell besiktigelse på bakken (Risbøl 2010, Nesbakken & Risbøl 2011).

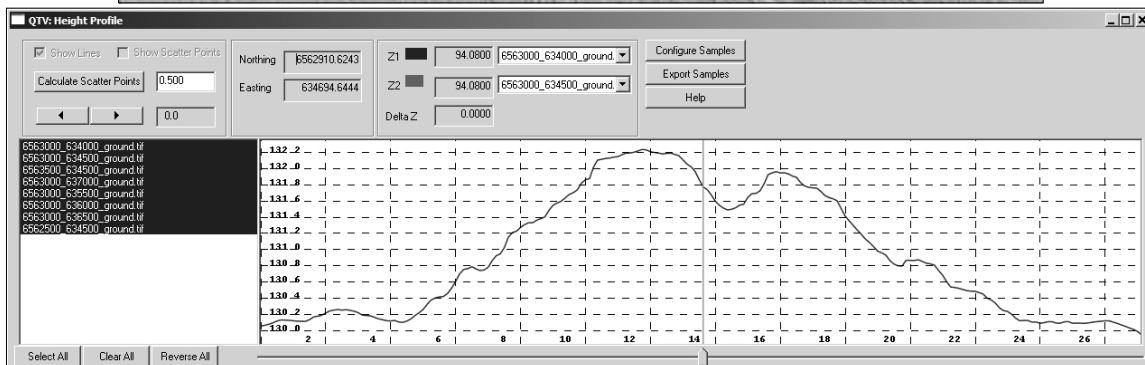
Som nevnt ovenfor kan en også foreta digital oppmåling av kulturminner basert på en DTM med relativ stor nøyaktighet direkte på pc-skjermen, altså uten å måtte dra i felt med målebånd eller annet måleutstyr. Med en nøyaktighet på desimeternivå på terrengmodellene får man dessuten en god og sikker kartfesting av kulturminnene. LiDAR-genererte DTMer egner seg derfor godt til å kvalitetssikre tidligere registreringer hvor kulturminner ble kartfestet manuelt eller ved bruk av GPS med større eller mindre nøyaktighet.

For at et kulturminne skal kunne identifiseres på en høydemodell er det en forutsetning at dets tilstedeværelse skaper en synlig høydeforskjell i terrenget. Ikke-synlige kulturminner lar seg ikke detektere med denne metoden. Men selv synlige kulturminner lar seg ikke alltid påvise. Dette skyldes blant annet at visse kulturminnetyper i liten grad skiller seg ut fra den omkringliggende topografien, men går i ett med terrenget. Kulturminner uten en klar geometrisk form lar seg derfor vanskeligere påvise enn dem som peker seg ut ved eksempelvis å være runde, kvadratiske eller rektangulære.

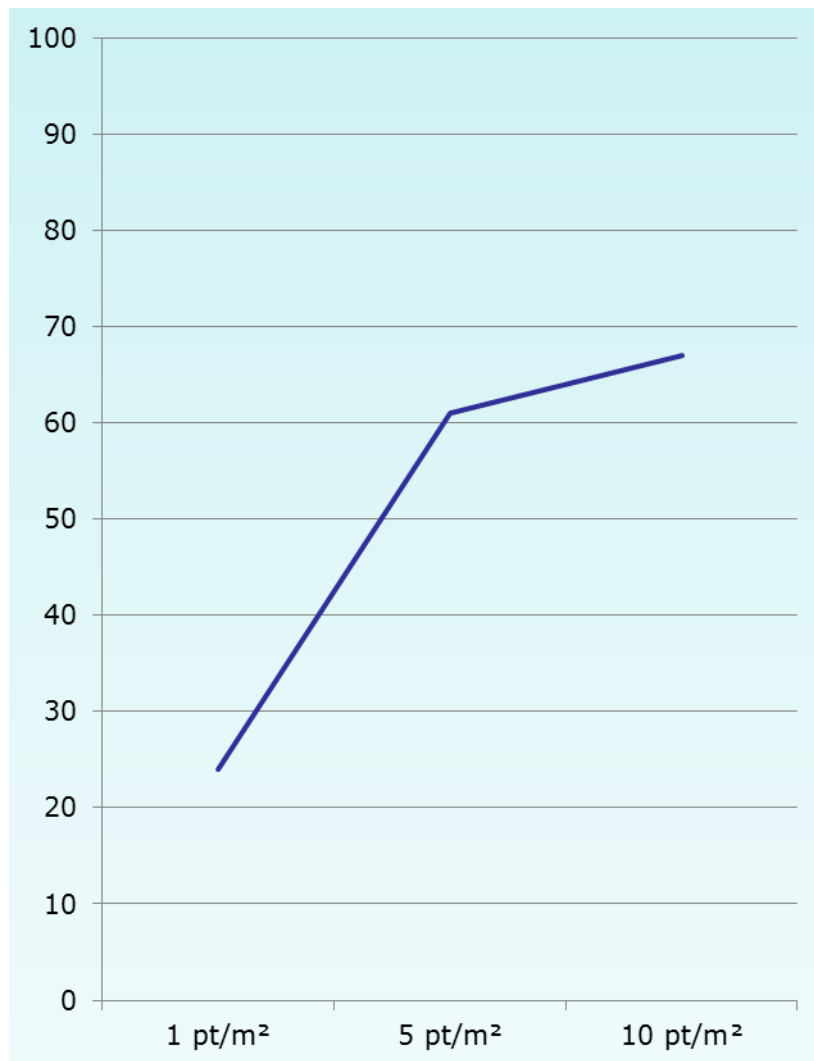
En kan også oppleve å få begrenset utbytte ved bruk av LiDAR i områder med meget tett vegetasjon. Hvis det er snakk om løvvegetasjon kan en til en viss grad gjøre noe med problemet ved å skanne før løvsprett eller etter løvfall, noe som imidlertid ikke vil ha noen videre effekt i de tilfeller hvor en står overfor meget tett barskog. Som en siste begrensning vil vi peke på problemet med å skanne

vertikale flater fra luften. Siden laserpulsene sendes vertikalt ned fra instrumentet i flyet eller helikopteret er det få av pulsene som vil bli reflektert fra vertikale flater. Det er derfor vanskelig å dokumentere vegger på bygninger, stående bautastein og lignende ved hjelp av LiDAR.

Et annet moment som berører kostnadseffektivitet er flerbruk av data. Det laserskannes i mange sammenhenger og den generelle bruken av LiDAR er økende. Det betyr at det ofte allerede finnes tilgjengelig data som gjør det overflødig å foreta en ny skanning. Dette vil ofte være tilfellet med store utbyggingsprosjekter som for eksempel veibygging, hvor området blir laserskannet for å kunne anvende en detaljert terrengmodell i flere deler av prosjekteringen. Utfordringen er imidlertid å legge til rette for at slike skanninger foretas slik at arkeologer kan ha størst mulig nytte av dem i sitt arbeid. Kvaliteten på laserskanningen er avgjørende for hvor anvendelig den er for å identifisere kulturminner og det er spesielt to ting som er viktige i så henseende. Det ene er oppløsningen på dataene (antall punkter per m²) og det andre er skanningstidspunkt - når på året skanningen gjennomføres. En undersøkelse har vist at antall kulturminner som lar seg detektere øker kraftig hvis antall punkter per m² økes fra 1 til 5, mens en økning utover dette gir mindre effekt (Figur 11) (Bollandsås et al. 2012). Anbefalingen fra arkeologisk hold er derfor at det skannes med ca. 5 punkter per m², men ofte er det godt over de krav andre sektorer stiller til dataene. Som nevnt ovenfor er det mest gunstig å skanne tidlig på våren eller sent på høsten hvor løvtrærne står uten blader. Dessuten er dette gunstige tidspunkt med tanke på undervegetasjon.



Figur 10 - Flyfoto og LiDAR-opptak av samme område. Terrenngmodellen viser to gravhauger som ligger i skogholtet midt på bildet. Grafen nederst viser et tverrsnitt av den sørøstligste gravhaugen. Profilen viser detaljer som en antatt plyndringsgrop i toppen samt fotgrøften rundt haugen. Illustrasjon: NIKU.



Figur 11 - Graf som viser effekten av økt punktetthet. Tallene på Y-aksen viser hvor stor prosentdel av arkeologiske kulturminner som lot seg påvise i datasettene. Illustrasjon: NIKU.

Oppsummering:

- Aktiv metode – Sender ut lyssignaler som reflekteres i terrenget
- Genererer tredimensjonale datasett
- Trær og vegetasjon kan filtreres vekk slik at arkeologiske strukturer kommer frem

Fordeler:

- + Dekker store områder på kort tid
- + Rask og effektiv datainnsamling
- + Rask prosessering og tolkning av dataene
- + Flerbrukspotensiale

Ulemper:

- Fungerer best i skogsområder, mindre bra i dyrket mark
- Detekterer kun kulturminner som er synlige på overflaten
- Detekterer kun enkelte typer kulturminner
- Avhengig av god datakvalitet

Anbefaling:

Samlet sett kan det konkluderes med at LiDAR er et svært nyttig og kostnadseffektivt verktøy som definitivt bør brukes i planleggingen av større veiprojekter. Ved hjelp av denne teknologien kan en få en grovmasket oversikt over kulturminnebestanden i et stort område på kort tid og med høy grad av sikkerhet og presisjon. Dette kan være viktige resultater i seg selv som i tillegg kan danne grunnlag for å gjøre prioriteringer. Således har man et godt grunnlag for å styre feltarbeidet og dermed gjøre dette mer effektivt.

4. Arkeologisk geofysikk

Arkeologisk geofysikk, også kalt geofysisk prospektering, har i løpet av de siste tiårene blitt viktige verktøy innen arkeologiske miljøer i utlandet (Scollar et al. 1990, Gaffney & Gater 2003). Metodene som brukes er mange og teknologien favner nokså vidt. Selve begrepet arkeologisk geofysikk er en samlebetegnelse på en rekke forskjellige metoder som lar oss dokumentere og visualisere arkeologiske lag, anlegg og strukturer uten å måtte ty til fysiske inngrep i bakken, og en godt etablert definisjon er:

«Undersøkelser av jordens fysiske egenskaper ved hjelp av inngrepsfrie måleteknikker for å påvise arkeologiske strukturer, lokaliteter og landskap» (Gaffney & Gater 2003 s. 13, oversatt i Gustavsen & Stamnes 2012).

Det finnes om lag 10 metoder som faller inn under dette begrepet, og av disse er det særlig magnetisk prospektering (Neubauer 2001, Aspinall et al. 2009), elektriske motstandsmåling (Gaffney 2008) og georadarmålinger (Leckebusch 2003, Conyers 2004) som har vist seg å være spesielt nyttige inn mot arkeologiske bruksområder og problemstillinger. De geofysiske instrumentene deles inn i aktive og passive instrumenter. Aktive instrumenter tilfører grunnen en eller annen form for energi, mens andre instrumenter tar passive målinger av et materiale. Av metodene som beskrives her, er det kun de magnetometriske som regnes som passive.

Alle geofysiske metoder baserer seg på å påvise og kartlegge iboende fysiske egenskaper i jordsmonnet, det være seg magnetisk respons, elektrisk motstand eller relativ konduktivitet. Metodenes potensiale bestemmes i hovedsak av kontrasten mellom jordens iboende fysiske egenskaper og de arkeologiske strukturene. Under egnede forhold kan man således, ved hjelp av geofysisk prospektering oppdage en rekke ulike strukturer av arkeologisk interesse, slik som for eksempel groper, grøfter, ildsteder, ovner og veifar. Prospektering ved hjelp av georadar genererer til og med tredimensjonale datasett som kan brukes til å oppdage stratigrafiske lagskiller, grøfter, groper og stolpehull, murverk og steinstrukturer, ned til dybder på 2 m i ulike jordsmonn.

Metodeutviklingen innen dette faget går raskt, og er tett knyttet til den generelle utviklingen innen datateknologi. Ved hjelp av kraftigere datamaskiner og bedre programvare, er det i dag mulig å undersøke større områder innenfor mindre tidsrammer. Mens tradisjonelle målinger ble gjennomført ved hjelp av enkeltkanalssystemer, hvor man kunne undersøke inntil 2500 m² per dag ved 25 cm linjeavstand, kan man ved hjelp av motoriserte målesystemer øke den romlige dekningen betraktelig samtidig som man også kan øke oppløsningen i datasettene. På denne måten kan områder på flere hektar undersøkes i løpet av en dag. Dette har ført til at undersøkelsesområdene ikke lenger trenger å begrenses til den anleggs- eller lokalitetsnivå, men at hele landskap kan undersøkes. Bruk av geofysiske metoder kan således være til hjelp ved for eksempel avgrensning av lokaliteter, til analyser og tolkinger så vel som til visualisering av hvordan en lokalitet eller et landskap en gang kan ha sett ut. Ved å undersøke større landskapsrom er det også mulig å sette lokalitetene inn i en større romlig kontekst (Campana & Piro 2009).

Både ved magnetiske målinger og radarmålinger, er det mulig å fremskaffe en foreløpig dataanalyse allerede i felt. Dette kan gjøres for å kvalitetssikre datasettene og for å planlegge undersøkelsene videre. For mer detaljerte dataanalyser må imidlertid kraftige datamaskiner og spesiell

prosesseringsprogramvare brukes. Dataanalysene og visualiseringen utføres ved bruk av avanserte prosesseringsalgoritmer og programvare som er utviklet spesielt for dette formålet (Neubauer 2001). De visualiserte dataene fra de individuelle målingene kombineres i form av georefererte bilder som må tolkes arkeologisk. For å få mest mulig informasjon ut av datasettene må de helst sammenstilles med andre former for informasjon, slik som satellittdata og flybilder, LiDAR-data, jordsmonnsskart og andre databaser i et geografisk informasjonssystem (GIS). Lokal kunnskap om arkeologiske kulturminner i området vil være essensielt, eventuelt sammen med testutgravninger av enkelte objekter for å forstå den lokale «koloritten».

De geofysiske metodene er fullstendig inngrepsfrie og undersøkelsene berører ikke de arkeologiske kontekstene på samme måte som for eksempel maskinell sjaktning. I tillegg kan man undersøke store flater på kort tid, noe som gjør disse metodene svært kostnadseffektive. Man bør imidlertid være klar over at geofysikk som metode også har sine begrensninger. Ved hjelp av geofysiske instrumenter er man i stand til å registrere endringer i de fysiske egenskapene i jordsmonnet, som for eksempel magnetisme og elektrisk motstand. Dette er egenskaper som kan påvirkes av naturlige fenomener. Samtidig er det heller ikke alle typer arkeologiske kontekster som innehar egenskaper som kan registreres av de geofysiske instrumentene. Det er derfor svært viktig at man kombinerer kunnskap om lokalitetens fysiske egenskaper med både kulturhistorisk og geofysisk kompetanse. Dette slik at undersøkelsen kan gjennomføres på best mulig vis, og at resultatene kan tolkes på best mulig måte. Tilgang til forskjellige typer instrumenter er også en nødvendighet ettersom man ofte er nødt til å bruke komplementære metoder for å få et optimalt resultat.

4.1. Metodehistorikk

Arkeologisk geofysikk presenteres ofte, og kanskje spesielt i Norge, som nyskapende og banebrytende. Faktum er imidlertid at geofysiske metoder har en nokså lang tradisjon innenfor arkeologiske miljøer i utlandet. Den første dokumenterte bruken av geofysiske metoder ved en arkeologisk lokalitet fant sted i USA så tidlig som i 1938, hvor man hadde som mål å finne deler av en tidligere kjent steinkirke ved hjelp av elektrisk motstandsmåling (Bevan 2000). Nesten et tiår etter denne første eksperimenteringen ble den første systematiske og vellykkede motstandsmålingen av en arkeologisk lokalitet gjennomført i England, hvor man klarte å påvise en rekke geofysiske avvik som ble tolket som nedgravninger i form av groper og grøfter (Clark 1996 s. 12-13).

Motstandsmålinger var, frem til slutten av 1950-tallet, nærmest enerådende som geofysisk metode i bruk ved arkeologiske undersøkelser i Europa, og instrumentene ble stadig tilpasset arkeologiske forhold. Etter hvert ble også transistorer og tørrbatterier tatt i bruk slik at instrumentene ble mer kompakte og pålitelige. Man kunne således gjennomføre relativt store undersøkelser i løpet av kort tid. Det var imidlertid klart at metoden hadde sine begrensninger og at bare enkelte typer strukturer lot seg påvise under gitte forhold. Et stort fremskritt i den arkeologiske geofysikken ble derfor gjort i England i 1957 da man for første gang klarte å påvise arkeologiske strukturer ved hjelp av et magnetometerinstrument (Clark 1996 s. 16).

En ny type teknologi innen arkeologisk prospektering ble tilgjengelig tidlig på 1970-tallet. Georadarteknologien, som i første rekke hadde vært brukt av geologer, hydrologer og andre geoteknikere, ble snart tilpasset bruk også i arkeologisk øyemed. Georadar som undersøkelsesmetode fikk først innpass innen nordamerikansk arkeologi, hvor en av de første

undersøkelsene som hadde som formål å detektere arkeologiske strukturer ble gjennomført i 1976 (Conyers 2004). I løpet av 1980- og 90-tallet fikk bruken av geofysiske metoder mer og mer innpass i feltarkeologien, og det ble etablert firmaer som produserte utstyr spesielt utviklet for arkeologiske undersøkelser. Viktig litteratur innen arkeologisk geofysikk som eksempelvis *Seeing Beneath the Soil* av Anthony Clark (Clark 1996) og *Archaeological Prospecting and Remote Sensing* av Irwin Scollar (Scollar et al. 1990) ble gitt ut, og i 1994 ble internettidskriftet *Archaeological Prospection* etablert.

Frem mot våre dager har stadig kraftigere datamaskiner blitt tatt i bruk også innen arkeologisk geofysikk, noe som har effektivisert datafangst og prosessering av datasettene. Dette har ført til at man kan ta i bruk systemer med flere sensorer, som i kombinasjon med GPS-systemer med svært nøyaktig posisjonskorrigering tillater stadig raskere datainnsamling. I tillegg har bruken av geografiske informasjonssystemer gjort dataanalyse, tolkning og presentasjon mer effektivt, og man har nå muligheten til å sammenstille mange forskjellige datakilder for videre bearbeiding. Det samme gjelder mulighetene for fremtidig arbeid med de innsamlede dataene, og videreformidling av den geografiske informasjonen til andre brukere.

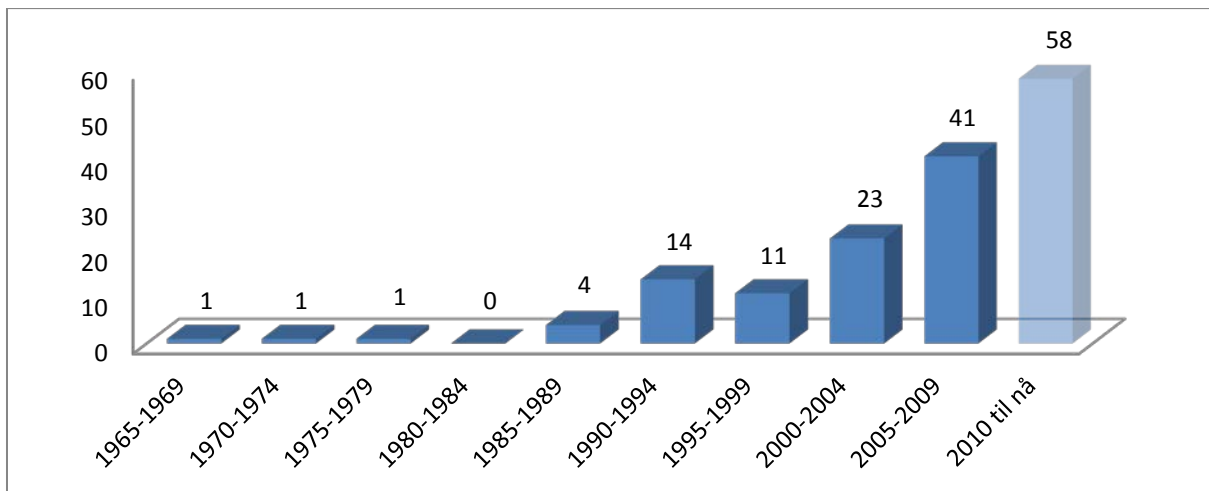
De siste tre tiårene preges altså av en større aksept for bruken av arkeologisk geofysikk, og i mange land har disse metodene blitt vanlige i forbindelse med forsknings- og forvaltningsprosjekter, noe som kanskje bør tolkes som et resultat av at den digitale kompetansen og interessen for bruk av teknologiske hjelpemidler blant arkeologer generelt har økt. Samtidig har metodene gått fra et nærmest eksperimentelt stadium til et anerkjent spesialisert fagområde innen arkeologien.

I Norge har det opp gjennom årene vært gjennomført sporadiske undersøkelser med forskjellige instrumenttyper og metoder, uten at disse har fått riktig gjennomslag. En gjennomgang av alle dokumenterte undersøkelser i norsk arkeologi viser at det er gjennomført rundt 180 geofysiske undersøkelser mellom 1968 og 2012 (Figur 12). Dette er et forholdsvis lavt tall sammenlignet med land i Europa og Nord-Amerika, der det gjerne gjennomføres flere hundre undersøkelser per år (Gustavsen & Stamnes 2012). Årsakene til at det er gjennomført såpass få undersøkelser i Norge er sammensatt, men henger antakeligvis sammen med negative erfaringer med tidlig bruk av metodene, der undersøkelsene ikke har gitt resultater som har svart til de forventningene man har hatt. Dette er hovedsakelig et resultat av bruk av utstyr og metoder som ikke har vært egnet for norske arkeologiske forhold. Eksempelvis har oppløsningen ved datainnhenting vært gjennomgående lav i forhold til dagens standard. Dette på grunn av at det ikke fantes program- og maskinvare som kunne håndtere, prosessere og visualisere større datasett på en effektiv måte, noe som igjen førte til at typiske arkeologiske strukturer som man treffer på under norske forhold ikke kunne detekteres. Videre ble de innhentede dataene prosessert med svært enkle programvarer, og det var færre muligheter for filtrering av datasettene. De rådende geologiske og geomorfologiske forholdene kunne derfor påvirke tolkningen av dataene negativt. Eksempelvis kunne områder med magmatisk berggrunn fullstendig maskere arkeologiske strukturer i magnetometerdata.

Siden det ikke har vært etablert forskning og bygget opp kompetanse på dette fagområdet i Norge før nylig, har arkeologene måtte ty til ekspertise utenfor det arkeologiske miljøet. De tidlige undersøkelsene ble derfor helst gjennomført av geoteknikere eller geofysikere, med få eller ingen forutsetninger for å forstå hva arkeologene egentlig var ute etter. Samtidig ble nok også metodenes fortrinn overkommunisert, mens det ikke ble lagt særlig vekt på å forklare hvilke begrensninger de

hadde. Resultater fra de tidlige undersøkelsene sto derfor ikke i forhold til forventningene man hadde, noe som resulterte i at arkeologisk geofysikk fikk et negativt omdømme i det arkeologiske miljøet i Norge.

I de senere årene har det imidlertid vært gjennomført geofysiske undersøkelser som har kartlagt et vidt spekter av arkeologiske strukturer og anlegg. Dette har i all hovedsak vært et resultat av at man nå kan innhente data med svært høy oppløsning, og at man har maskin- og programvare som kan håndtere datasettene på en effektiv måte. I tillegg er det per i dag etablert forskningsmiljøer rundt denne tematikken, og det er først og fremst arkeologer med kompetanse og kunnskap om geofysikk som nå gjennomfører de aller fleste undersøkelsene i Norge.



Figur 12 - Graf over bruk av arkeologisk geofysikk i Norge. Bruken har gått kraftig opp i de siste tiårene. Grafen er basert på en database opprettet og vedlikeholdt av Lars Gustavsen, NIKU og Arne A. Stamnes, NTNU.

4.2. Elektriske metoder

Prinsippet bak de elektriske metodene er forholdsvis enkelt. En gitt mengde elektrisk strøm føres ned i bakken og motstanden denne strømmen møter kan måles. Dersom strømmen sendes gjennom en homogen jordmasse vil den fordeles jevnt nedover i massene. Treffer den derimot på en arkeologisk eller geologisk struktur, vil fordelingen endres, alt ettersom strukturen leder strømmen bedre eller gir strømmen høyere motstand enn jordsmonnet rundt (Figur 13). Det som måles er altså hvor godt jordsmonnet lar elektrisk strøm passere (Gaffney & Gater 2003 s. 27).

Felles for de elektriske metodene som brukes i arkeologisk øyemed, er at de baserer seg på *Ohms lov*, som sier at:

$$R=V/I$$

hvor R = elektrisk motstand, V = volt (spenning) og I = ampere (strøm).

Dersom strømmengde og spenning holdes konstant, kan man også måle endringer i den elektriske motstanden (Clark 1996 s. 27). Motstandsverdiene avhenger i stor grad av fyllmassenes fuktighetsnivå og saltinnhold, og det er ikke strukturens egen resistivitetsverdi som måles, men verdiene i forhold til jordsmonnet rundt (Schmidt 2009). Vann løser opp negativt ladede salt-ioner i jorda, noe som fører til at den elektriske motstanden minsker. I teorien vil arkeologiske strukturer som magasinerer fuktighet, slik som groper og grøfter, eller metalliske objekter således lede strøm bedre og gi mindre elektrisk motstand, mens «tørre» strukturer som murverk, kompakte flater og gamle veifar vil hindre den elektriske ledeevnen, og på denne måten gi økt elektrisk motstand.

Bilde ikke tilgjengelig

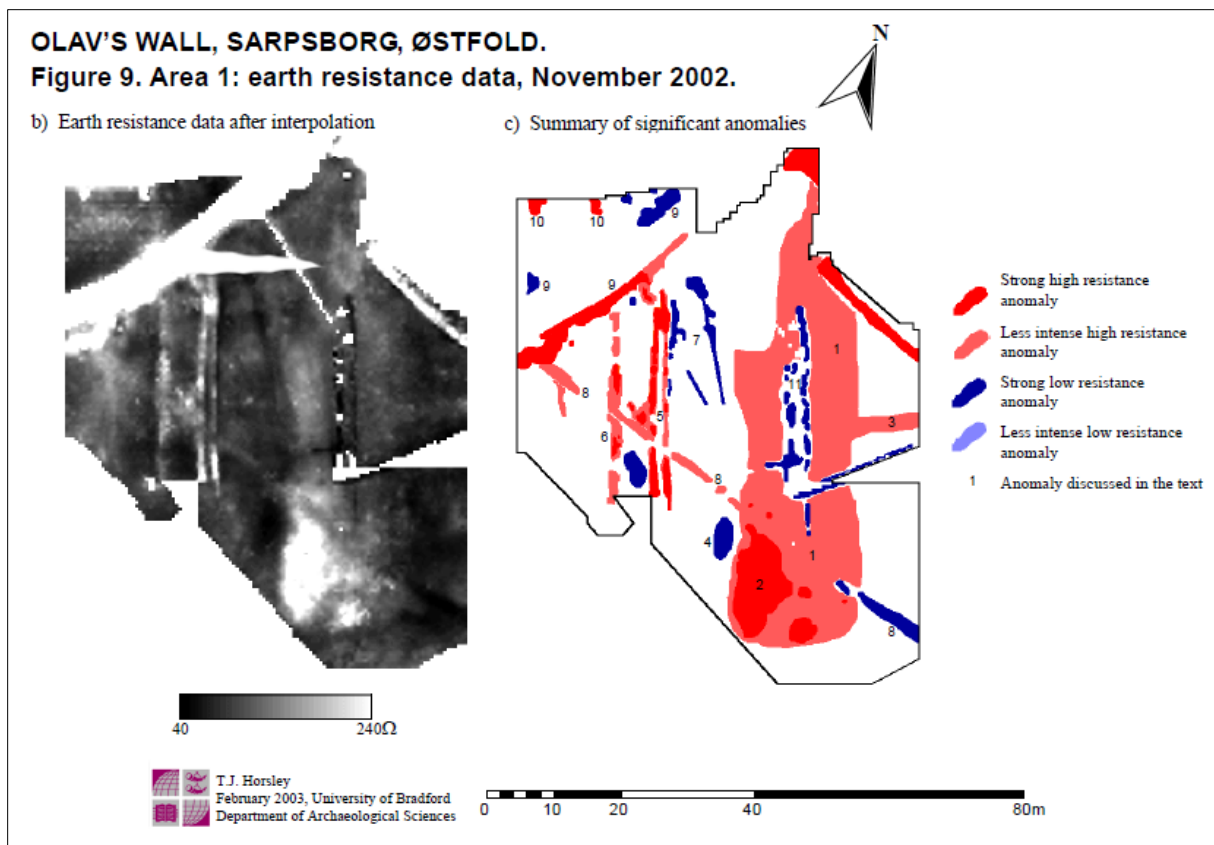
Figur 13 - Elektrisk strøm målt gjennom a) homogene jordmasser, b) «tørre» strukturer, som for eksempel murverk der strømmen ledes dårligere enn i jorda rundt, og c) strukturer som magasinerer fuktighet og dermed leder strøm bedre (Gaffney & Gater 2003 s. 30, figur 7).

4.2.1. Systematisk motstandsmåling

Den mest brukte av de elektriske metodene er systematiske målinger over et avgrenset område. Ved å måle og kartlegge differanser i den elektriske ledeevnen innenfor et rutenett kan man avdekke strukturer, anlegg og kulturlag under bakken i plan. Resultatet blir et todimensjonalt anomalikart over lokaliteten, som viser høyere eller lavere verdier enn de lokale normalverdiene (Figur 14).

For å måle motstandsverdiene benyttes sonder eller elektroder montert med en bestemt avstand på en ramme (Figur 15). Bredden mellom sondene avgjør dybden på målingene, hvor en avstand på en halv meter vil nå omtrent en halv meter ned i bakken, mens en sondeavstand på én meter vil nå cirka én meter i dybden. Det er her viktig å påpeke at den økte avstanden mellom sondene vil føre til lavere oppløsning i plan, noe som kan være uheldig dersom man er ute etter å kartlegge mindre strukturer som for eksempel stolpehull eller små kokegroper.

Rent praktisk gjennomføres undersøkelsene ved at man etablerer et rutenett over en lokalitet eller et anlegg ved hjelp av totalstasjon, GPS eller målebånd. Deretter strekkes det ut start- og stopplinjer i hver ende av rutenettet, og mellom disse strekkes det snorer med intervallmarkeringer. Sondene på rammen føres deretter ned i jorden ved intervallmarkeringene, hvorpå målingen tas. Deretter forflytter man seg til neste målepunkt hvor prosessen gjentas. Dette er altså en nokså tidkrevende metode. Det er i de senere årene gjort enkelte forsøk på å effektivisere måten undersøkelsene gjennomføres på, fortrinnsvis ved å motorisere instrumentene, men den manuelle metoden er fremdeles den som brukes oftest. Dataene som innhentes logges i et internminne i instrumentet, og kan i ettertid hentes inn i en programvarepakke for videre bearbeiding. Denne bearbeidingsprosessen omfatter gjerne filtrering av støy og georeferering av datasettet, før det hentes inn i et GIS for videre analyse, tolkning og visualisering.



Figur 14 - Eksempel på resultater fra en motstandsmåling gjennomført ved Olavsvollen, Sarpsborg, Østfold i 2003. De lyse områdene i datasettene til venstre indikerer strukturer med høy motstand mens de mørke områdene indikerer lav motstand. Tolkningen av datasettet til høyre viser det som sannsynligvis er rester etter et murverk som har omkranset den middelalderse bosetningen i Sarpsborg (Horsley 2002).



Figur 15 - Forskjellige systemer brukt ved systematisk motstandsmåling: a) med to elektroder, b) med seks elektroder, c) en eksperimentell vogn med flere elektroder og ett magnetometer (David 2008).

Metodeevaluering

Det er ikke gjennomført mange undersøkelser ved hjelp av systematisk motstandsmåling i norsk arkeologi, og det er derfor noe problematisk å vurdere metodens egnethet i forhold til norske arkeologiske forhold. Erfaringer fra de få eksemplene fra Norge, samt fra tilsvarende undersøkelser i utlandet viser at systematiske motstandsmålinger kan, dersom forholdene ligger til rette for det, gi svært gode resultater.

Fordelene ved bruk av de elektriske metodene er at instrumentene har en relativt enkel utforming og derfor er billige i innkjøp. Instrumentene er heller ikke svært kompliserte i bruk, hverken ved datainnsamling eller prosessering. Programvarene som brukes til å prosessere og visualisere datasettene samt analysere resultatene, krever lite maskin- og programvarekapasitet, da datamengdene er relativt små i forhold til ved andre prospekteringsmetoder. Disse faktorene er sannsynligvis årsaken til at systematiske motstandsmålinger er svært utbredt i enkelte arkeologiske miljøer, først og fremst i Storbritannia.

Ulempene ved bruken av denne metoden kan først og fremst relateres til tidsbruk. Innsamlingen av data tar uforholdsmessig lang tid, ettersom deler av instrumentene må føres fysisk ned i bakken før en måling kan gjennomføres. Under optimale forhold kan man regne med å undersøke ca. 1500m² per dag, avhengig av oppløsning. På grunn av at man er avhengig av denne fysiske kontakten med jordsmonnet, vil også frost og tele kunne gjøre en effektiv undersøkelse vanskelig. Videre er oppløsningen nokså lav i forhold til andre metoder. Målinger tas gjerne med 0,5 m eller 1 m mellomrom, noe som ikke vil være optimalt dersom en vil kartlegge mindre strukturer slik som stolpehull eller små enkeltliggende kokegroper. Resultatene vil også påvirkes i stor grad av årstidene og lokale nedbørmengder, ettersom vannmengden i jordsmonnet kan føre til at kontrasten mellom de arkeologiske strukturene og det omliggende jordsmonnet viskes ut. Dersom jordsmonnet er mettet med vann etter lengre tid med nedbør vil de arkeologiske strukturene altså være vanskeligere å spore i datasettene, og optimale data oppnås helst etter perioder med regn etterfulgt av perioder med tørke. Da vil det oppstå kontraster mellom de arkeologiske strukturene og den omliggende undergrunnen, og disse vil la seg påvise ved hjelp av motstandsmålinger.

Oppsummering:

- Aktiv metode - Sender strøm gjennom bakken
- Kan detektere strukturer med fuktig fyllmasse - lav motstand
- Kan detektere hardpakke strukturer og murverk - høy motstand

Fordeler:

- + Instrumenter og programvare billig i innkjøp og drift
- + Instrumentene er enkle å ta i bruk
- + Datasettene er relativt enkle å prosessere og tolke
- + Påvirkes i liten grad av lokale geologiske forhold

Ulemper:

- Datainnhenting tar lang tid - Instrumentene kan ikke motoriseres
- Sesongavhengig - påvirkes negativt av nedbørsmengder og frost
- Begrenset dybdeinformasjon
- Datasett med relativt lav oppløsning

Anbefaling:

På grunn av de mange ulempene som forbindes med bruk av systematiske motstandsmålinger, både med tanke på gjennomføring, oppløsning, og endelig resultat, er det vanskelig å anbefale denne typen undersøkelse som et effektivt verktøy i forbindelse med større veiprojekter. Til tross for at metoden har potensiale til å gi verdifull informasjon om en lokalitet, er innhenting av data såpass tidkrevende at bruken av metoden i større målestokk ikke kan forsvares.

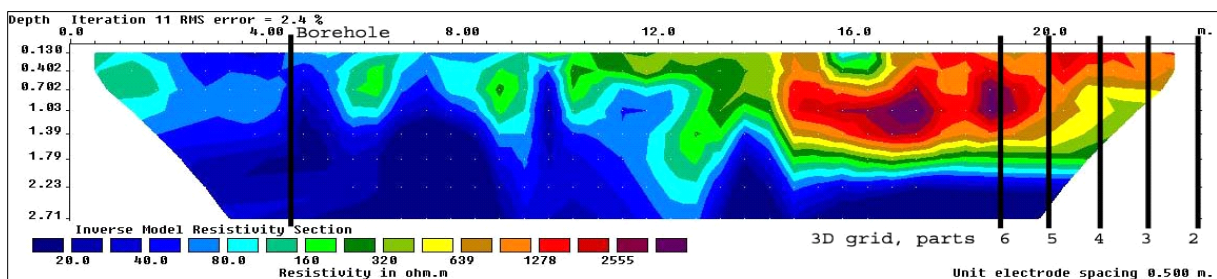
4.2.2. Earth Resistance Tomography (ERT)

Som nevnt i kapittelet om systematisk motstandsmåling, vil avstanden mellom elektrodene påvirke gjennomtrengningsevnen til instrumentet. Dette prinsippet kan utnyttes i en metode som kalles elektriske pseudoseksjoner eller *Earth Resistance Tomography* (ERT). Dette er en metode som har vært brukt mye i studier av geologiske fenomener, men som ikke brukes spesielt ofte innen arkeologien.

I prinsippet går metoden ut på å sette ut elektroder med et bestemt intervall i en rett linje over området som ønskes undersøkt, for så å måle motstanden suksessivt mellom elektrodene (Figur 16). Dette gjøres automatisk ved hjelp av datamaskiner. Ved å suksessivt øke avstanden mellom elektrodene på denne måten vil man få et bilde som representerer forskjeller i den elektriske ledeevnen fra jordoverflaten til et stykke dypere ned i bakken. Slik kan man generere digitale vertikallprofiler av jordsmonnet (Figur 17), som kan brukes til å undersøke omtrentlige stratigrafiske forhold på lokaliteten, eller for å undersøke om det befinner seg grøfter, groper, murverk eller tomrom innenfor den profilen som blir undersøkt (Gaffney & Gater 2003 s. 34-36).



Figur 16 - ERT-målinger i forbindelse med arkeologiske utgravninger i Nedre Langgate i Tønsberg, 2009. Elektrodenes er satt ned i bakken med 50 cm mellomrom. Foto: KP/NIKU.



Figur 17 - Digital profil basert på ERT-målinger ved en arkeologisk utgravning i Nedre Langgate i Tønsberg i 2009. Blå områder tyder på tette lag med høyt vanninnhold og høye konsentrasjoner av redusert jern, mens oransje og røde områder indikerer porøse, noe tørrere områder med lavere konsentrasjoner av redusert jern (Bergersen et al. 2008).

Etter at dataene er hentet inn kan de korrigeres for topografiske forhold i egnet programvare. Rådata kan være problematiske å tolke uten videre behandling ettersom de bare viser en vektet middelvei av resistiviteten innenfor målingens influensområde.. For å finne den spesifikke resistiviteten i de ulike delene av undergrunnen må dataene derfor gjennom en prosess som kalles *invertering*, hvor data fra undergrunnen deles opp i blokker som tilordnes bestemte motstandsverdier. Denne modellen blir så justert i flere trinn inntil responsen fra en teoretisk modell blir mest mulig lik pseudoseksjonen fra de målte dataene (Tsokas et al. 2009 s. 86). Dersom det er hentet inn flere parallelle profiler kan disse plasseres ved siden av hverandre, og ved å interpolere data mellom de innhentede profilene kan man teoretisk sett bygge opp et tredimensjonalt datasett likt det man får ved radarundersøkelser (Gaffney & Gater 2003 s. 60).

Metodeevaluering

ERT har i likhet med systematiske motstandsmålinger ikke vært mye brukt innen norsk arkeologi, selv om det er gjort enkelte forsøk i forbindelse med geotekniske undersøkelser i bymiljøer og av andre områder med bevarte kulturlag. Det er også gjort forsøk med denne metoden på gravhauger for å kunne kartlegge deres oppbygning og bevaringstilstand.

Fordelene ved bruk av ERT er at instrumentene er relativt billige i innkjøp i forhold til andre geofysiske instrumenter. Et annet fortrinn er at metoden genererer profiler gjennom jordsmonnet som kan konverteres til tredimensjonale datasett. Dette kan være hensiktsmessig i forhold til undersøkelser der det er viktig å frembringe informasjon om eventuelle bevaringsforhold, kulturlagstykkelse eller stratigrafiske forhold. Metoden kan derfor være aktuell i forbindelse med tilstandsvurdering av større strukturer og anlegg, som for eksempel gravhauger og hustufter, fangstgroper og gårdshauger.

Ulempene ved bruk av ERT er at metoden tar nokså lang tid å gjennomføre i felt. Videre er ikke oppløsningen spesielt høy, hverken i de vertikale eller horisontale datasettene. Vanligvis settes det ned elektroder med mellom 0,5 - 1 m mellomrom, noe som vil være tilstrekkelig for å kunne detektere større arkeologiske strukturer. Mindre strukturer, slik som de man gjerne kommer over under norske arkeologiske forhold, vil imidlertid være vanskelige å påvise ved hjelp av denne metoden. Som med systematiske motstandsmålinger, vil også ERT-målinger være avhengig av gode værforhold. Det vil si at målingene kan påvirkes negativt av variasjoner i nedbørs- og temperaturforhold.

Oppsummering:

- Aktiv metode - sender strøm gjennom bakken
- Kan detektere grøfter og groper
- Kan også detektere hardpakke flater, hulrom og stratigrafiske forhold

Fordeler:

- + Instrumenter er billige i innkjøp
- + Instrumenter er relativt enkle i bruk
- + Stor dybdegjennomtrengning

Ulemper:

- Datainnsamling tar svært lang tid
- Sesongavhengig
- Lav oppløsning på datasettene
- Resultatene kan være vanskelige å tolke

Anbefalinger:

Ettersom tidsbruken og oppløsningen ved bruk av ERT ikke står i forhold til de resultatene man vil oppnå, og siden bruken er sesongavhengig, finner vi det vanskelig å anbefale denne metoden inn mot et større veiprojekt.

4.3. Magnetiske metoder

Magnetisk prospektering er basert på målinger av jordens magnetfelt. Styrken på dette magnetfeltet er ca. 50 000 nanoTesla (nT) på den nordlige halvkule, og varierer med breddegradene i forhold til ekvator, og med aktivitet på sola. Alle typer jordsmonn påvirkes av dette magnetfeltet, og de fleste jordtyper inneholder svakt magnetiserte jernoksider eller jernholdige mineraler. Disse mineralene kan reagere og danne kraftigere magnetiske former ved ekstern påvirkning som ved for eksempel oksidering eller reduksjon, hvilket kan være en del av den naturlige jordsmonnsutviklingen, men også et resultat av menneskelig aktivitet. Menneskelig aktivitet har en tendens til å øke mengden av magnetisk materiale i jordsmonnet på et svært lokalt nivå, og disse endringene har vist seg å vedvare frem til våre dager. De utgjør et arkeologisk kildemateriale som det er mulig å utforske ved hjelp av avanserte geofysiske instrumenter slik som svært følsomme magnetometre og magnetisk susceptibilitetsmålere (Linford 2006 s. 2220).

4.3.1. Magnetometerundersøkelser

Dersom en arkeologisk struktur med en gitt magnetisk egenskap befinner seg i et materiale med en annen magnetisk egenskap, kan denne strukturen detekteres ved hjelp av magnetometre. Disse kommer i flere typer og utforminger. De tidligste modellene var såkalte protoninstrumenter, mens fluxgateinstrumenter er de mest vanlige nå til dags. De nyeste modellene er såkalte cesiumdampinstrumenter og SQUID-instrumenter som er svært ømfintlige for magnetiske endringer. Instrumentene er enten utformet som enkeltinstrumenter eller satt på rekke i en rammekonstruksjon slik at større områder kan dekkes over kortere tid.

To grunnkonsepter er viktige for å forstå hvordan et magnetometer kan detektere arkeologiske strukturer: *Termoremanent* og *indusert magnetisme*

Termoremanens er et begrep som benyttes om svakt magnetisk materie som har blitt varmpåvirket, og som har oppnådd en permanent magnetisering med samme retning som magnetfeltet det har blitt nedkjølt i. For at dette skal finne sted må oppvarmingen nå det såkalte Curie-punktet, det vil si den temperaturen der materialet mister sine magnetiske egenskaper. For hematitt er dette 675°C, mens det for magnetitt er 565°C. Når materialet har nådd denne temperaturen «nullstilles» de magnetiske egenskapene, og ved nedkjøling magnetiseres materialet på ny. Denne gang vil materialet være permanent magnetisert og mineralene vil ligge på linje med jordens magnetfelt. Det er på grunn av denne effekten at det er mulig å detektere varmpåvirkede strukturer slik som ildsteder, produksjonsovner, brente leirgulv og kokegroper ved hjelp av magnetometerinstrumenter (Aspinall et al. 2009).

Indusert magnetisme er et begrep som beskriver magnetisme som er tilført et materiale. Matjord som er påvirket av menneskelig aktivitet har som regel en høyere andel jernoksider og derfor høyere magnetisk susceptibilitet. Dette knyttes til brenning av eksempelvis vegetasjon, der reduksjon vil oppstå på grunn av mangel på oksygen. Dette gjør at mineralet hematitt, som er svakt magnetisk, reduseres til mineralet magnetitt. Når flammene avtar og oksygen igjen blir tilgjengelig re-oksideres magnetitten til mineralet maghemitt, og fører til permanent økt magnetisk susceptibilitet i jordsmonnet. Andre årsaker til økt magnetisk susceptibilitet kan være nærværet av mikroorganismer som skaper en reduserende eller oksiderende atmosfære under nedbrytning av organiske materialer, eller magnetotaktiske bakterier som innehar mikroskopiske magnetittkrystaller og som lever i

organiske materialer som for eksempel treverk. Menneskelig avfall som inneholder magnetiske materialer, eksempelvis tegl og keramikkskår, kan også øke den magnetiske susceptibiliteten i matjorda da disse materialene kan ha blitt blandet inn i gjødselen i forbindelse med jordbruksaktiviteter. Dersom en negativ arkeologisk struktur som for eksempel en grop eller grøft fylles med matjord med høye magnetiske verdier, vil kontrasten til den omliggende jordsmonnet skape en indusert magnetisme som kan måles ved overflaten (Aspinall et al. 2009 s. 22-26).

Magnetometerundersøkelser går altså ut på å måle og kartlegge ørsmå variasjoner i de magnetiske egenskapene i jordsmonnet. For at arkeologiske strukturer skal kunne detekteres, må det imidlertid være en magnetisk kontrast mellom strukturens fyllmasse eller konstruksjonsmateriale og det omkringliggende jordsmonnet. Dersom de magnetiske egenskapene er tilnærmet like i strukturen og i jordsmonnet rundt, vil strukturen ikke kunne spores ved hjelp av magnetometeret. Det er spesielt varmpåvirkede strukturer, slik som produksjonsovner, ildsteder og kokegroper som kan detekteres ved hjelp av denne metoden, selv om andre anleggstyper slik som fotgrøfter etter utpløyde gravhauger også i enkelte tilfeller kan spores.

Instrumentene som brukes til denne type kartlegging finnes i flere varianter, hvor de mest brukte er fluxgate- og cesiummagnetometre.

Fluxgatemagnetometeret er den vanligste typen i bruk innen arkeologisk prospektering. Det er et rent elektronisk instrument, som i de aller fleste tilfeller settes opp i såkalt gradiometerkonfigurasjon, der to sensorer monteres direkte over hverandre. På denne måten kan man fjerne effekten av jordens magnetfelt og bare måle variasjoner i styrken til et lokalt magnetfelt forårsaket av strukturer under bakken. En fluxgatesensor inneholder en lett permeabel (gjennomtrengelig) kjerne i nikkel-jernlegering. En gitt mengde strøm sendes gjennom en spole - den primære spolen - som er viklet rundt denne kjernen. Dette vil sette magnetiseringen av atomene i kjernen, og det oppnås når atomenes magnetiske akser er på linje. I nærvær av et eksternt magnetisk felt, og ved å bruke vekselstrøm til å drive den primære spolen, kan det måles en asymmetri i et magnetisk felt som er indusert i en sekundær spole. Denne asymmetrien er proporsjonal til det eksterne magnetfeltet og avhengig av sensorens retning. I arkeologisk prospektering brukes fluxgatemagnetometre vanligvis til å måle den vertikale komponenten av magnetfeltet. På grunn av at disse magnetometrene er retningsfølsomme kreves det at instrumentene er nøye justert før bruk. Fordelene med fluxgatemagnetometrene er at de er svært robuste og relativt billige i forhold til andre typer magnetometre. De har også en relativt høy følsomhet og måleraten er tilstrekkelig rask.

Cesiummagnetometeret er en type instrument som sorterer under en gruppe som kalles optisk pumpede, alkalidamp-, eller absorpsjonscellemagnetometre. Cesiummagnetometre er per i dag de mest følsomme instrumentene til vanlig profesjonell og kommersiell bruk. Disse magnetometrene er basert på optisk pumping av atomer i en alkalidamp inne i en glasscelle. I nærværet av et magnetisk felt vil valenselektronene i atomene eksiteres til en høyere kvantetilstand. Denne delingen av et enkelt atomenerginivå i to eller flere energinivå ved tilstedeværelsen av et magnetisk felt kalles Zeeman-effekten. Det høyere energinivået er ikke stabilt og elektronene vil falle tilbake til et mellomnivå. Når dette energinivået er fullt kan ikke mer energi absorberes, og glasscellen blir gjennomsiktig. På dette stadiet vil en radiosignal sendes gjennom dampen, noe som får elektronene til å falle tilbake til sitt opprinnelige energinivå, hvor pumpesyklusen repeteres. Frekvensen som

trengs for å repopulere grunnivået varierer med det omgivende magnetfeltet og kalles Lamour-frekvensen. Lamour-frekvensen er et mål for den totale magnetiske feltstyrken.

Den største fordelen med cesiummagnetometre er deres høye sensitivitet, mellom 0,002 og 0,05 nT (0,002 nT = 2 picoTesla), avhengig av måleraten. Cesiummagnetometre er i stand til å måle i opptil 100 Hz, hvilket vil si at det tas 100 målinger per sekund. Instrumentene er svært allsidige, men heftes av relativt høy pris, samt at de inneholder deler som eldes og som kan slites ned raskere enn i et fluxgatemagnetometer.



Figur 18 - Motorisert magnetometersystem brukt i forbindelse med geofysiske undersøkelser på Tjøllingvollen i Larvik, Vestfold i 2012. Foto: NIKU.

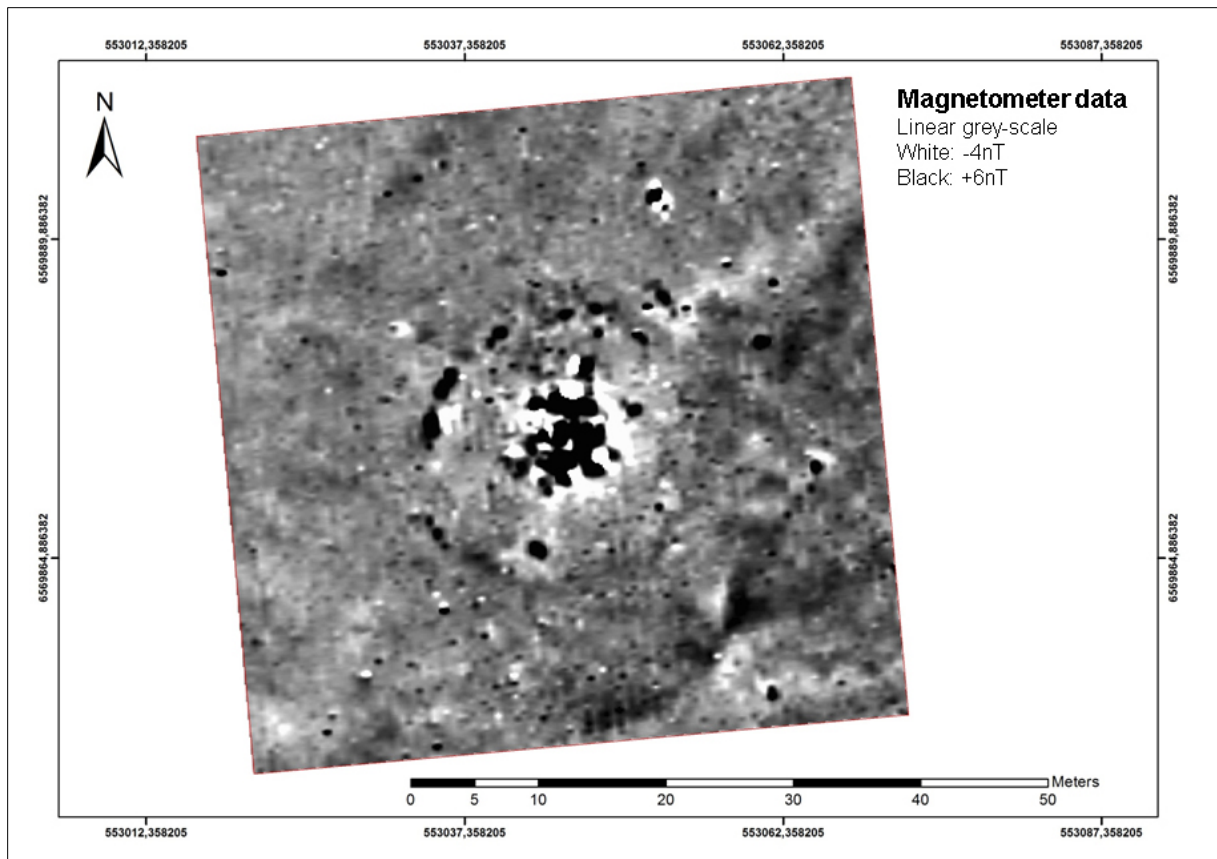
Manuelle magnetiske undersøkelser gjennomføres helst innenfor et rutenett etablert over en lokalitet. Operatøren av instrumentet beveger seg inn i hver rute innenfor dette rutenettet, og tar en måling. Moderne håndholdte magnetometersystemer kan programmeres slik at instrumentene tar målinger ved gitte tidsintervaller, noe som effektiviserer denne metoden betraktelig. Resultatet fra en slik undersøkelse blir et enkelt, todimensjonalt kart over lokaliteten som viser høyere eller lavere verdier enn de lokale normalverdiene. De avvikende verdiene kan deretter, ut i fra spesifikke egenskaper, tolkes som enten av naturlig, moderne eller arkeologisk opprinnelse.

En annen metode er den såkalte frisøkmetoden, der operatøren av instrumentet leser av styrken til de magnetiske målingene uten å faktisk lagre informasjonen. På denne måten kan man hurtig påvise magnetiske avvik og avgrense mulige undersøkelsesområder. Eksempler på slik bruk i Norge er ved de omfattende undersøkelsene i Gråfjellområdet, der geofysikeren Tatjana Smekalova brukte

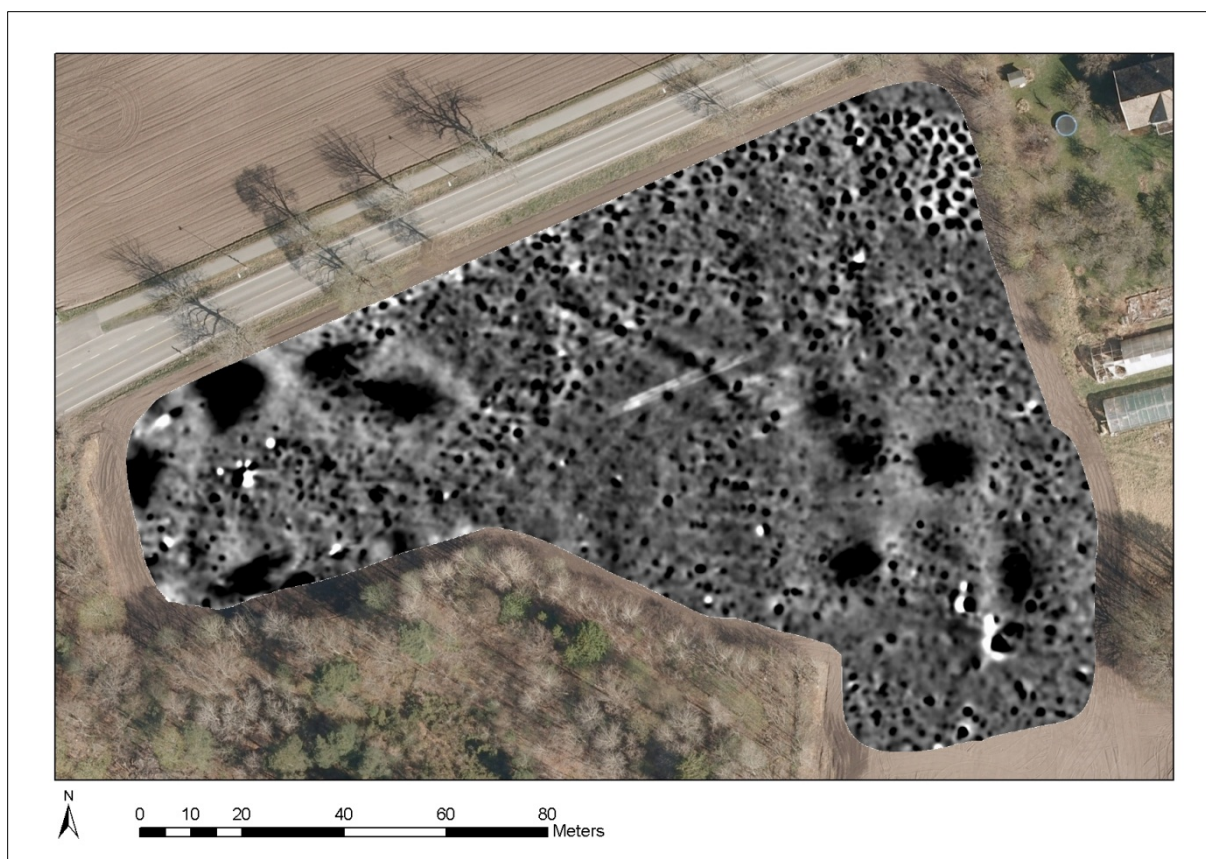
frisøkmetoden for å påvise jernvinnelokaliteter og røsteplasser for jernmalm (Risbøl & Smekalova 2003).

Manuelle undersøkelser med enkeltsensorer kan være svært effektivt ved små og vanskelig tilgjengelige lokaliteter, eller i lite farbart terreng. Ved større undersøkelsesområder bør man imidlertid vurdere bruk av motoriserte flerkanalssystemer. Utviklingen av slike systemer har kommet som en konsekvens av at man nå har kraftigere maskin- og programvare, noe som muliggjør en mer effektiv forprosessering av dataene. Således er det nå mulig å operere flere magnetometerinstrumenter samtidig, slik at man kan undersøke et bredere område. Styring av systemene ved hjelp av avansert GPS-teknologi gjør også at man slipper å sette ut koordinatsystemer, noe som effektiviserer undersøkelsene drastisk. De motoriserte flerkanalssystemene, gjør at man kan undersøke flere titalls hektar per dag (Figur 18), i motsetning til de manuelle undersøkelsene der undersøkelsene var begrenset til lokalitetsnivå.

For å få mest mulig ut av datasettene må de i etterarbeidsfasen prosesseres og bearbeides. Dette involverer ulike filtreringsrutinger som har til hensikt å fjerne støy og uregelmessigheter i dataene. De ferdigprosesserte datasettene leveres helst som georefererte gråskala TIF-bilder som viser høyere eller lavere magnetisk respons i forhold til en normalverdi (Figur 19). Bildene kan med enkelthet hentes inn i vanlige GIS-verktøy, der de kan finjusteres og sammenstilles med andre typer data, slik som satellittbilder, flyfoto og LiDAR-data. Deretter må de geofysiske anomaliene tolkes av erfarne arkeologer som har kunnskap om både den lokale arkeologien og de geofysiske resultatene. På denne måten gis de geofysiske anomaliene både kvalitative og kvantitative egenskaper og de kan settes i sammenheng med arkeologisk kunnskap om det umiddelbare nærområdet.



Figur 19 - Magnetometerdata fra Odberg i Lågendalen i Vestfold. Datasettet viser relative magnetiske verdier i et gråskalabilde. De mørke anomaliene utgjør høye magnetiske verdier, mens de hvite utgjør verdier som er lavere enn normalen. Fra (Trinks et al. 2007b).



Figur 20 - Magnetometerdata fra gården Lunde i Larvik kommune, Vestfold. Datasettet viser høyere (mørke) og lavere (lyse) magnetiske verdier i forhold til en gitt normalverdi. De små mørke flekkene innenfor det ca. 1, 5 hektar store området representerer et kokegropfelt bestående av over 1000 kokegroper, mens de store mørke flekkene er et resultat av geologiske fenomener. Illustrasjon: NIKU/LBI ArchPro. Bakgrunnsbilde: Statens kartverk.

Metodeevaluering

Magnetometerundersøkelser utgjør per i dag de raskeste undersøkelsesmetodene innen arkeologisk geofysikk. På grunn av utviklingen som har funnet sted de siste 10 årene er det nå mulig å operere magnetometersystemene som flerkanalssystemer der inntil 12 sensorer brukes samtidig. Systemene kan endog motoriseres, og ved hjelp av avansert GPS- teknologi og nyvinninger innen datalogging og forprosessering, kan man per i dag undersøke inntil 20 ha per dag med samme, eller enda høyere romlige oppløsning (inntil 25 x 12,5 cm) enn det som tidligere var tilfelle. Sensorenes sensitivitet har også økt, slik at man ved hjelp av enkelte instrumenttyper kan generere data med oppløsning inntil 0,005 nT. Sett under ett har altså denne utviklingen effektivisert datainnhentingene i felt betraktelig, samtidig som at kvaliteten på datasettene har blitt bedre.

Metoden er regnet som velegnet til å detektere spor etter brenning eller industriell aktivitet. Nedgravninger slik som grøfter og groper som har blitt fylt med brent eller delvis brent materiale vil også kunne påvises i det resulterende datasettet. I tillegg kan nedgravninger med omrota masse vises, dersom den magnetiske kontrasten er stor nok. Teglsteinsmurer eller murer konstruert av stein med magnetiske egenskaper kan også kartlegges, mens flatmarksgraver og andre nedgravninger hvor fyllmassene er homogene og ikke skiller seg nok fra undergrunnen rundt kan være en utfordring.

Når dette er sagt, er det en rekke ulemper med bruk av magnetometer som undersøkelsesmetode. Datasettene er i utgangspunktet todimensjonale, og gir derfor ingen dybdeinformasjon. Det er mulig å estimere dybder til enkeltanomalier innenfor hvert datasett, men ved store undersøkelser vil slike beregninger være svært tidkrevende. Videre kommer man ikke utenom det faktum at magnetometerundersøkelser ofte påvirkes negativt av de lokale geologiske forhold. Dette er spesielt synlig i enkelte deler av Norge der berggrunnen består av magmatiske bergarter eller der man har tykke morenemasser. Disse fenomenene kan, dersom jordsmonnet over ikke er spesielt tykt, fullstendig maskere de arkeologiske strukturene. Ettersom sensorene er spesielt følsomme, kan også tilstedeværelsen av metalliske objekter i jorda, eller moderne strukturer slik som kraftledninger og jernbanespor påvirke datasettene negativt. Magnetometre kan derfor vanligvis ikke benyttes i bymiljøer eller andre miljøer med moderne forstyrrelser.

Oppsummering:

- Passiv metode - Sender ikke ut signaler
- Kan detektere ildsteder og andre varmepåvirkede strukturer
- Kan også detektere negative strukturer fylt med magnetisk materiale

Fordeler:

- + En effektiv metode - Flerkanalssystemer som kan motoriseres
- + Enkelt å prosessere, visualisere og tolke data

Ulemper:

- Todimensjonale datasett - Begrenset dybdeinformasjon
- Kan påvirkes negativt av lokale geologiske forhold som f.eks. magmatisk berggrunn
- Metallgjenstander i jorda kan påvirke datasettene negativt
- Kan forstyrres av moderne infrastruktur - Kraftledninger, jernbane, kjøretøy o.l.
- Ikke alle typer strukturer kan påvises ved hjelp av magnetometre

Anbefaling:

Magnetometerundersøkelser bør inngå som en integrert del av forundersøkelsene. Magnetisk kartlegging ved hjelp av motoriserte instrumenter kan gjennomføres svært raskt, og ettersom man vil få et raskt overblikk over den arkeologiske og geologiske situasjonen, vil metodene være nyttige verktøy inn mot videre arbeid i planprosessen. Metodene bør dog anvendes med en viss grad av forsiktighet, da de vil påvirkes negativt av enkelte geologiske og geomorfologiske forhold.

4.3.2. Magnetisk susceptibilitet

Magnetisk susceptibilitetsmålinger har til hensikt å måle jordsmonnets evne til bli midlertidig magnetisert, altså hvor susceptibelt eller mottakelig det er for magnetisering via et tilført magnetisk felt. Forskjellige typer jordsmonn har ulik magnetisk susceptibilitet, noe som avhenger av mengden magnetiserbare mineraler i jorda. Susceptibiliteten påvirkes i arkeologisk øyemed av eksempelvis bosetning, industriell aktivitet eller jordbruk, og kan måles med et aktivt instrument. Dette

instrumentet består av en metallspole som genererer et vekslende magnetfelt med en gitt frekvens. Dersom et materiale kommer i nærheten av dette magnetfeltet vil det påvirke frekvensen proporsjonalt til den magnetiske susceptibiliteten i materialet. I motsetning til magnetometerundersøkelser som passivt måler et magnetfelt, tilfører susceptibilitetsmålere altså jorden et eksternt magnetfelt (Figur 21).

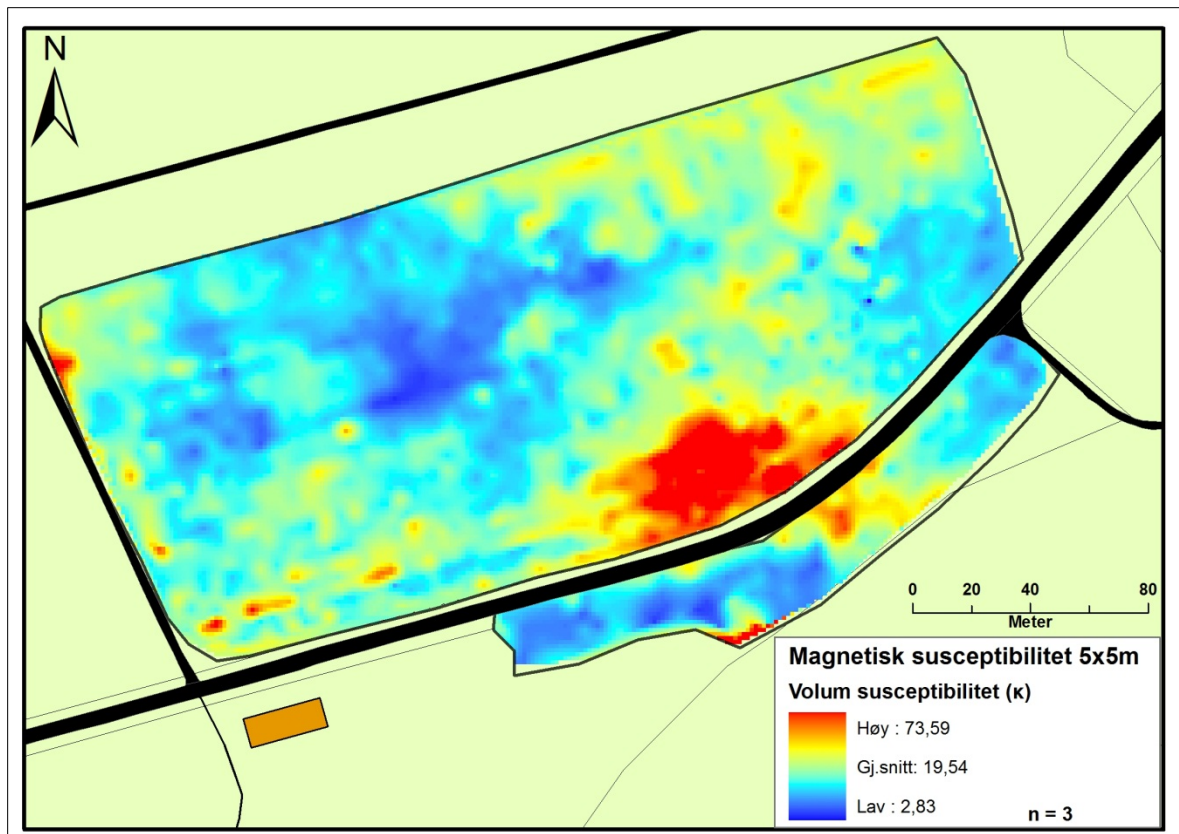
Undersøkelsene gjennomføres vanligvis ved at man deler opp lokaliteten i et rutenett på 5 m x 5 m, selv om denne oppløsningen kan justeres. En høyere oppløsning vil følgelig gi mer nøyaktige resultater, men undersøkelsen vil da ta lengre tid å gjennomføre. Deretter beveger operatøren seg suksessivt gjennom rutene hvor instrumentet plasseres på bakken før målingene leses av og logges. I etterarbeidsfasen plottes verdiene inn på et digitalt kart før det interpoleres mellom verdiene. Dette vil produsere et todimensjonalt oversiktskart over de ulike verdiene (Figur 22).

Susceptibilitetsmålinger har en begrenset gjennomtrengningsevne, og man måler kun ca. 10-15 cm av matjordlaget. Metoden kan derfor bare måle verdier der deler av arkeologiske strukturer og anlegg gjennom årene har blitt pløyd opp til overflaten. Det er derfor også en viss usikkerhet knyttet til hva man faktisk måler, siden moderne aktivitet vil kunne påvirke instrumentene. Den relativt lave oppløsningen på datasettene gjør også at resultatene kan være vanskelige å tolke, men metoden kan gi et grovt overblikk og avgrensning av tidligere aktivitetsområder. Videre kan susceptibilitetsmålinger være med på å vurdere potensialet for videre undersøkelser i forkant av magnetometerundersøkelser.



Figur 21 - Magnetisk susceptibilitetsmålinger i forbindelse med en utgraving ved Gokstadhaugen i 2012. Instrumentet som brukes er et Bartington MS2D¹⁹ Foto: NIKU.

¹⁹ <http://www.bartington.com/ms3.html>



Figur 22 - Systematiske målinger av magnetisk susceptibilitet på Gustad, Ekne i Nord-Trøndelag. De forhøyede verdiene i rødt indikerer et område med intens menneskelig aktivitet. Fra (Stamnes 2011).

Metodeevaluering

Det er ikke gjennomført mange undersøkelser av denne typen i Norge, og det er derfor noe vanskelig å vurdere metodens egnethet og nytteverdi inn mot et større veiprojekt. Magnetisk susceptibilitetsmålinger er en forholdsvis rask kartleggingsmetode, som ikke krever spesielt store ressurser for å gjennomføres. Metoden kan derfor brukes for å få et raskt overblikk over en lokalitet, og for å kunne vurdere om hvorvidt andre metoder vil være egnet.

Fra de få undersøkelsene som er gjennomført her til lands kan det synes som at oppløsningen er for lav til å kunne gi tilfredsstillende resultater, og at resultatene generelt sett er vanskelige å tolke med sikkerhet.

Oppsummering:

- Aktiv metode - Genererer et magnetfelt som påvirker jordsmonnet
- Kan påvise aktivitetssoner, landskapsbruk og jordsmonnsavgrensning
- Kan brukes til å vurdere potensialet for magnetometerundersøkelser

Fordeler:

- + Rask datainnsamling (ved lav oppløsning)
- + Enkel databehandling

Ulemper:

- Høy oppløsning tar lang tid
- Går ikke dypere enn ca. 10-15 cm ned i jordsmonnet
- Datasett kan være vanskelige å tolke med noen grad av sikkerhet

Anbefaling:

Magnetisk susceptibilitetsmåling anbefales ikke til bruk mot et stort veiprojekt, da de resulterende datasettene helst viser aktivitetssoner og ikke enkeltstrukturer. Selv om disse aktivitetssonene kan være av arkeologisk interesse, er de vanskelige å tolke i mangel på komplementære data som viser årsaken til de forhøyede susceptibilitetsmålingene.

4.4. Georadar

Forkortelsen RADAR kommer fra det engelske begrepet *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*ang*ing* og går, som navnet tilsier, ut på å beregne avstand til et objekt ved hjelp av radiobølger. Georadar, også kalt GPR (*GR*ound *PE*netrating *RA*dar), jordradar eller bakkeradar, er en variant av vanlig radarteknologi, hvor høyfrekvente radiobølger sendes nedover i bakken for å kunne kartlegge geofysiske egenskaper i undergrunnen.

I prinsippet kan en georadar på mange måter sammenlignes med et ekkolodd. En senderantenne i radarinstrumentet sender høyfrekvente elektromagnetiske bølger med en gitt frekvens - vanligvis mellom 100-1000 MHz - ned i jordsmonnet. Her reflekteres signalene i strukturer, objekter og strata med ulike geofysiske egenskaper. Dette styres i hovedsak av lagenes dielektriske permittivitet eller elektriske konduktivitet (Conyers 2004 s. 45). Retursignalene registreres og digitaliseres av en mottagerantenne. Tiden det tar fra signalet sendes ut til det returneres til instrumentet vil kunne gi en indikasjon på lagets eller strukturens dybde. Signalets hastighet måles i meter per nanosekunder (ns), og er proporsjonalt med avstanden til objektet eller laget det reflekteres i. Det er hovedsakelig den dielektriske permittiviteten i mediet og dets elektriske ledningsevne samt radarsignalets frekvens som styrer signalets forplantning i undergrunnen. Retursignalet vil også inneholde forskjellig informasjon om endringer i amplitude og frekvens og vil kunne indikere om disse er forårsaket av reflekterende eller absorberende materialer. Det som er karakteristisk for denne teknologien er at kun deler av energien i signalet reflekteres tilbake til en mottagerantenne, mens andre deler fortsetter lenger ned i undergrunnen før de reflekteres tilbake. Radiobølgene fortsetter på denne måten nedover i lagene helt til energien er oppbrukt eller til det påtreffes lag som fullstendig absorberer eller sprer energien. Dette betyr at man kan generere bilder av jordsmonnet som også inneholder dybdeinformasjon.

Radarantenner som sender ut et lavfrekvent signal (100 -200 MHz) tillater en større undersøkelsesdybde, men oppløsningen på datasettet vil da være redusert oppløsning. Dette på grunn av den lengre bølgelengden til signalet. Høyfrekvente signaler (800 -1000 MHz) har høyest oppløsning, men en begrenset signalgjennomtrengning (<1 m). Radarantenner som brukes til arkeologisk prospektering opererer helst med signaler sentrert rundt 400 eller 500 MHz, noe som gir gjennomtrengningsdybde på mellom 1,5 -3 m og samtidig tilfredsstillende oppløsning. Instrumentene består som regel av enkeltkanalsradarer (Figur 23), men flerkanalsinstrumenter, hvor flere radarer er montert på en skinne begynner så smått å bli vanlig. Vanligere blir det også at disse instrumentene kan trekkes etter terrenggående kjøretøy og at målingene kan plottes kontinuerlig ved hjelp av GPS eller totalstasjon. For eksempel kan det svenske radarsystemet *MALÅ Imaging Radar Array (MIRA)*²⁰, som har en antenneavstand på 8 cm dekke 3-4 hektar per dag (Figur 28), mens det kanadiske *Sensors and Software SPIDAR*²¹, som har en antenneavstand på 25 cm kan dekke inntil 6 hektar per dag.

²⁰ [http://www.malags.com/Products/MALA-Imaging-Radar-Array-\(MIRA\)-System](http://www.malags.com/Products/MALA-Imaging-Radar-Array-(MIRA)-System)

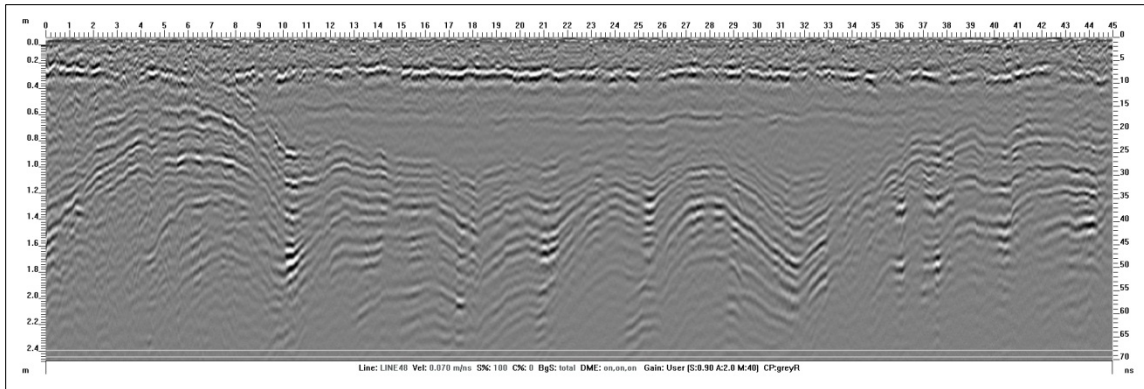
²¹ <http://www.sensoft.ca/Products/SPIDAR/Overview.aspx>



Figur 23 - Enkeltkanals radarsystem av typen *Sensors and Software Noggin 500*²². Med et slikt system er det mulig å undersøke ca. 2000-2500 m² per dag. Foto: NIKU.

I tilfeller der radarantennen dras, dyttes eller bæres over lokaliteten bygger man opp en såkalt radarprofil som representerer et digitalt tverrsnitt gjennom jordsmonnet (Figur 24). Disse radarprofilene kan studeres, manipuleres og analyseres individuelt, noe som var vanlig praksis ved tidlige radarundersøkelser. Slike analyser av enkeltprofiler kan være nyttige dersom man eksempelvis ønsker å undersøke oppbyggingen av gravhauger, der kan ha som mål å danne seg et inntrykk av de stratigrafiske forholdene i haugen, vurdere tykkelsen på de forskjellige kulturlagene, eller undersøke om haugen har vært utsatt for plyndring. Det finnes enkelte eksempler på denne typen undersøkelser i Norge, blant annet fra Borrehaugene (Myhre 2004, Trinks et al. 2007a), Halvdanshaugen (Pedersen 2004), Gokstadhaugen (Trinks et al. 2008). De digitale profilene kan imidlertid være svært vanskelige å tolke, selv for erfarne brukere, og den vertikale oppløsningen begrenses av bølgelengden på signalet. Således er det kun relativt tykke stratigrafiske enheter som kan kartlegges på denne måten, mens tynne lag ikke vil la seg påvise.

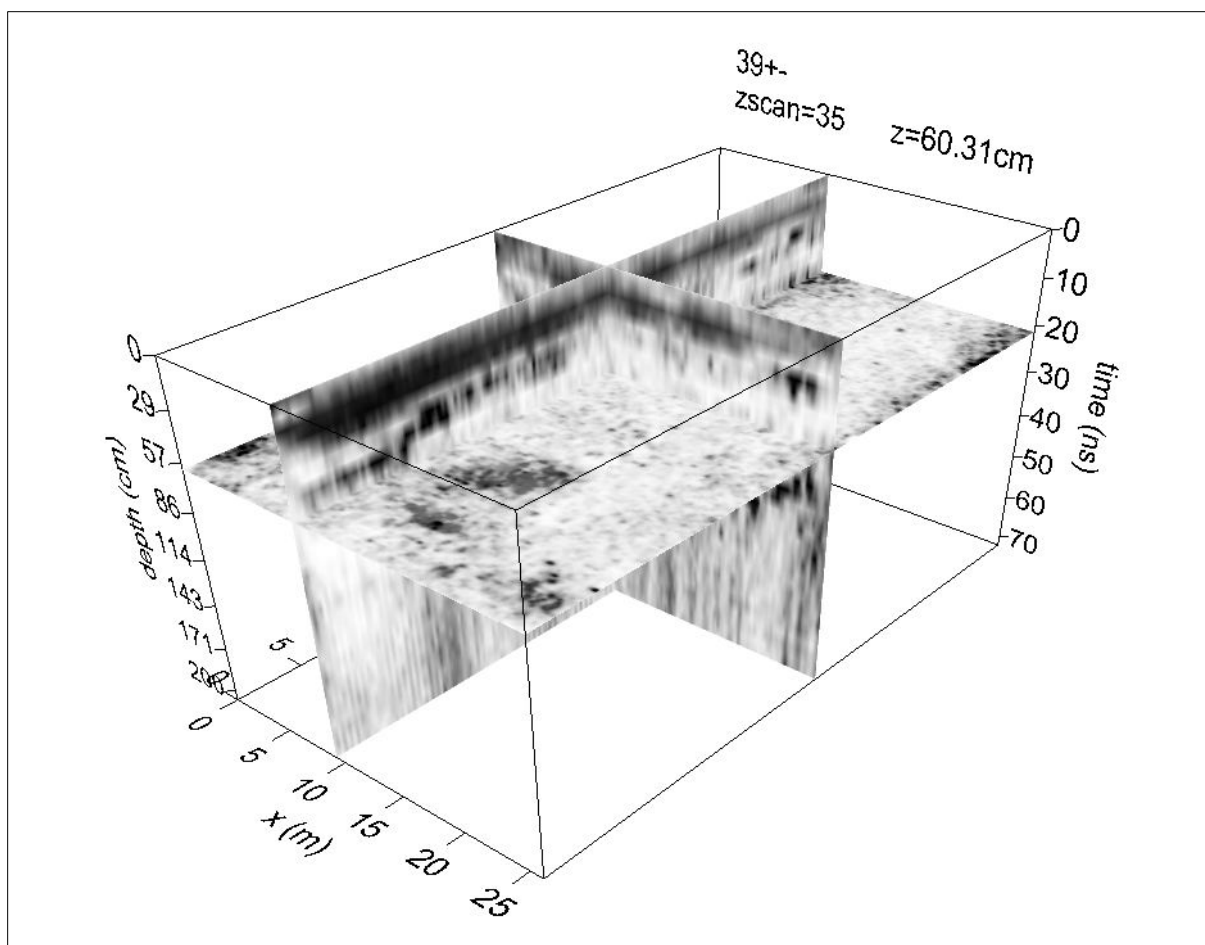
²² <http://www.sensoft.ca/Products/Noggin/Overview.aspx>



Figur 24 - Georadarprofil. Profilen representerer et digitalt tverrsnitt gjennom jorda. De øverste 30 cm er matjord. Overgangen mellom matjorden og den naturlige undergrunnen er markert med en rekke lineære refleksjoner som strekker seg horisontalt gjennom datasettet. De ondulerende linjene som kan observeres i bunnen av datasettet representerer løsmasser fra et uttørket elveleie. Illustrasjon: NIKU.

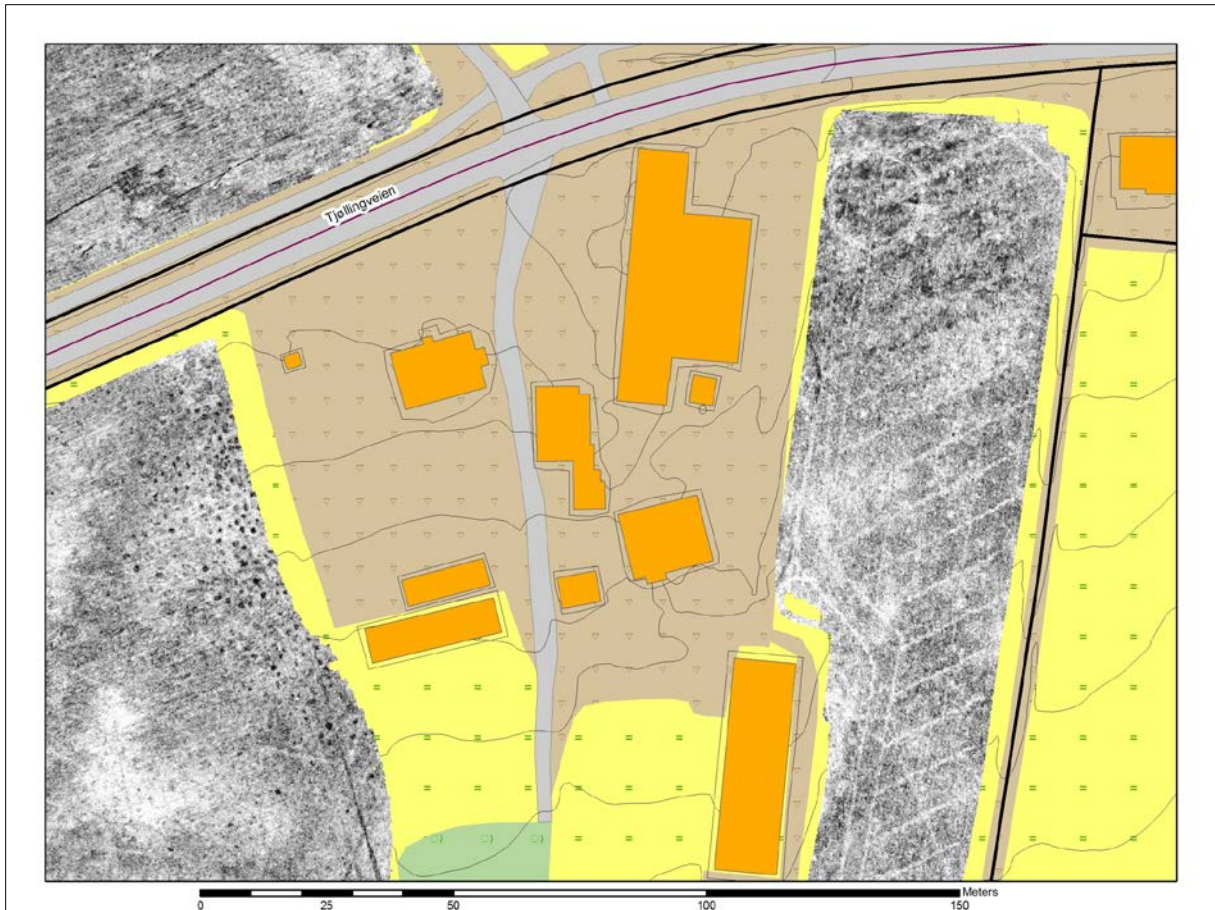
I det siste tiåret har det skjedd svært mye innen måten datasettene fra georadarundersøkelser prosesseres, visualiseres og tolkes. Det er nå vanlig å generere tredimensjonale datasett, noe som i all hovedsak er et resultat av utviklingen av nye maskin- og programvarer som igjen har økt prosesseringshastigheten betraktelig. De aller fleste georadarundersøkelser gjennomføres nå med en antenne som føres systematisk over parallelle linjer i et finmasket rutenett som på forhånd er etablert over undersøkelsesområdet. Ved enkeltkanalsundersøkelser er det vanlig å operere med en linjeavstand ned til 25 cm. Dette for å kunne detektere små eller uanselige strukturer slik som stolpehull eller smale grøfter (Neubauer et al. 2002). Resultatet av målinger over en individuell linje er, som tidligere, et digitalt vertikalt tverrsnitt av jordsmonnet i lengderetningen langs linjen. Ved å plassere linjene med tette mellomrom vil man bygge opp en serie med parallelle tverrsnitt som det i ettertid er mulig å sammenføre ved hjelp av spesialprogramvare. Det ferdige datasettet består således av en digital, tredimensjonal blokk som kan snittes i alle tenkelige retninger (Figur 25). Ved arkeologiske undersøkelser med georadar er det vanlig å dele opp blokken i horisontale dybdeskiver, det vil si skiver av den undersøkte lokaliteten sett ovenfra ved bestemte dybder.

Etter innhenting av data, må rådataene bearbeides og filtreres i spesialprogramvare. Her settes det også en fast hastighet på radarsignalet, slik at det lar seg gjøre å beregne dybden til de individuelle anomaliene i datasettet. Deretter genereres det dybdeskiver med gitte tykkelser, vanligvis mellom 5 cm og 10 cm. Dybdeskivene leveres i form av georefererte TIF-bilder i gråtoner. Disse kan hentes inn i vanlige GIS-applikasjoner, hvor de geofysiske anomaliene tolkes av erfarne arkeologer med kunnskap både om de geofysiske dataene og den lokale arkeologien. På denne måten kan man tillegge anomaliene både kvantitativ og kvalitativ informasjon.



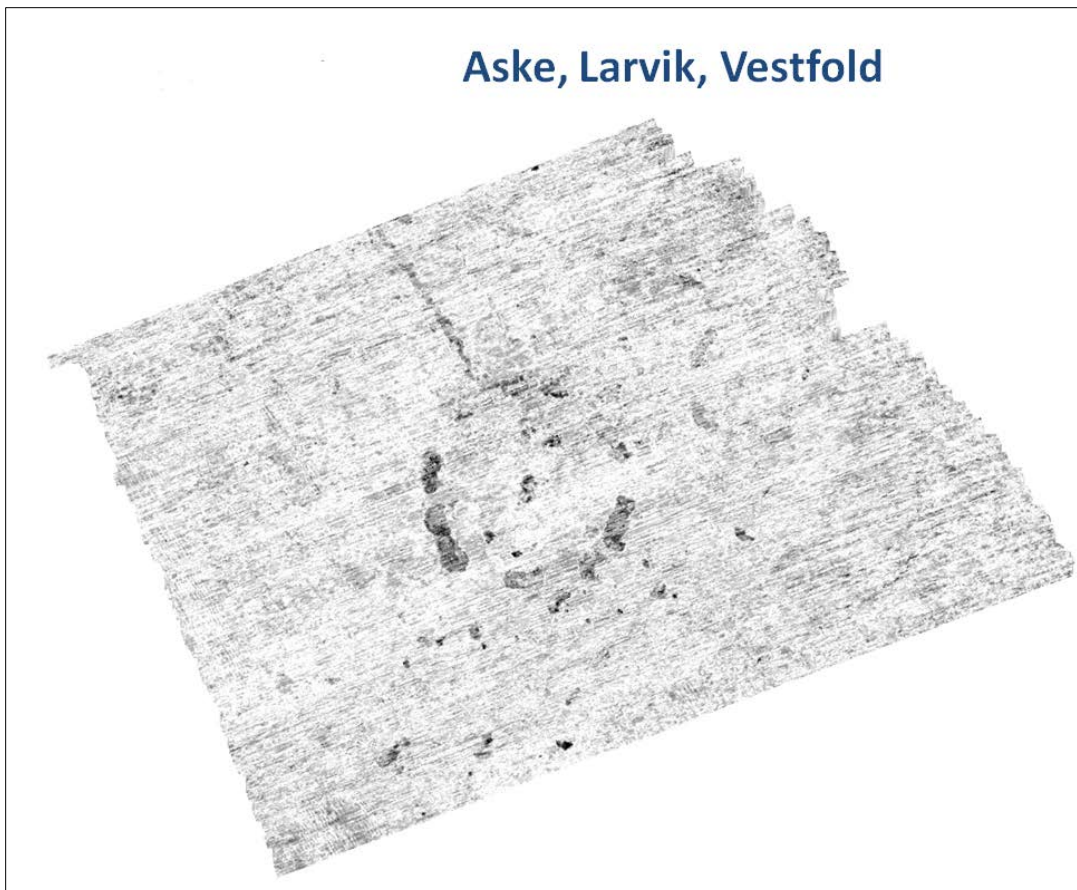
Figur 25 - Tredimensjonalt datasett fra en georadarundersøkelse gjennomført på Tjøllingvollen i 2012. Datasettet er opprinnelig et tredimensjonalt volum som har blitt snittet i forhold til tre forskjellige akser. Det horisontale snittet utgjør her en såkalt dybdeskive. Illustrasjon: NIKU.

Georadartechnologien er spesielt egnet til å kartlegge solide strukturer slik som murvegger og hardpakkede overflater, samt hulrom. Erfaringsmessig kan radaren også finne større nedgravninger slik som store stolpehull, kokegroper og fotgrøfter fra gravhauger (Figur 26 og Figur 27). For at en struktur skal kunne detekteres ved hjelp av denne metoden er det imidlertid viktig at det finnes tilstrekkelig fysisk kontrast mellom strukturens bestanddeler og jordsmonnet rundt, og at strukturen har stor nok overflate til å kunne detekteres. En nedgravning med fyllmasse som ikke skiller seg merkbart fra jordsmonnet den er gravd ned i vil eksempelvis være vanskelig å detektere, mens en murvegg gravd ned i sand vil kunne tre tydeligere frem i datasettet (Conyers 2004).



Figur 26 - Datasett fra en georadarundersøkelse gjennomført ved Tjøllingvollen i Larvik kommune, Vestfold i 2010. Datasettet har avdekket spor etter et stort kokegropfelt (til venstre i bildet) og en utpløyd gravhaug (til høyre i bildet). Legg også merke til de mange moderne dreneringsgrøftene innenfor undersøkelsesområdet. Illustrasjon: NIKU/LBI ArchPro.

Aske, Larvik, Vestfold



Figur 27 - Dybdeskive fra en georadarundersøkelse ved gården Aske i Larvik kommune, Vestfold. Datasettet viser en tilnærmet rund anomali som er tolket som restene av en utpløyd gravhaug. Illustrasjon: NIKU/LBI ArchPro.

Radarundersøkelser gjennomført i Norge og Sverige de siste fem årene har vist at datasettets oppløsning samt nøyaktig posisjonering er svært viktig for å kunne kartlegge og dokumentere arkeologiske strukturer (Trinks et al. 2009, Paasche & Trinks 2010, Trinks et al. 2010, Gustavsen & Karlsson 2011). En profilavstand på 25 cm resulterer i høy datakvalitet, samtidig som at effektiviteten i feltarbeidet opprettholdes. Dersom profilavstanden økes vil man kunne kartlegge større flater på kortere tid, men man risikerer da å gå glipp av mindre strukturer. I denne sammenheng er det viktig å påpeke at enkeltstrukturer som er mindre enn 50 cm i diameter kan være vanskelige å påvise ved en georadarundersøkelse. En annen viktig faktor for feltarbeidets fremdrift og datasettets kvalitet er selve overflaten innenfor undersøkelsesområdet. Flatene bør være så jevne som mulig, uten større hinder og vegetasjon. Gressbevokste flater bør være klippet og ryddet i forkant av undersøkelsene. Ut fra dette kan man altså utelukke ulendt terreng slik som for eksempel skogsområder og andre utmarksområder.



Figur 28 - Et motorisert georadarsystem av typen MALÅ MIRA (MALÅ Imaging Radar Array). Radarsystemet har 17 kanaler fordelt på 8 senderantenner og 9 mottagerantenner. Antennekonfigurasjonen gjør at systemet har en romlig oppløsning på 8 cm i bredden. Foto: NIKU.

Metodeevaluering:

Georadarmetoden er den geofysiske metoden som har vist seg å være mest effektiv mot den typen arkeologiske strukturer man kommer over under norske forhold. På grunn av at man kan operere med høy oppløsning og allikevel undersøke store områder, anses dette som et svært nyttig verktøy i forbindelse med forundersøkelser av områder med funnpotensiale. Vanligvis opereres de manuelle systemene med en romlig oppløsning på 25 cm i bredden og 2,5 cm i lengderetningen. Med en slik oppløsning kan man undersøke områder på inntil 2000 m² per dag eller ca. 1 hektar på en arbeidsuke. De nye, motoriserte systemene kan dekke flere hektar per dag, og har enda høyere oppløsning enn de manuelle systemene.

Metoden kan detektere et vidt spekter av kulturminnetyper, alt fra groper og grøfter til murverk og hulrom. Siden georadaren i liten grad påvirkes av lokale geologiske og geomorfologiske forhold, kan den også benyttes på flere typer områder enn de andre geofysiske instrumentene. Det er for eksempel gjennomført svært vellykkede undersøkelser i bymiljøer.

Georadarmetoden kan påvirkes negativt av høy jordfuktighet og av jord som har en høy andel leire, eller av svært tørr jord der matjorda kan være mineralrik som et resultat av fordampning. Dersom området er dekket av tykke morene- eller rasmasser i form av stein, vil heller ikke radarsignalene penetrere jordsmonnet under. Ettersom antennen må være i kontakt med bakken for å unngå såkalt luftkobling, der signalene reflekteres i overflaten og ikke sendes videre ned i jordsmonnet, kan det være vanskelig å gjennomføre undersøkelser i ulendt terreng som for eksempel i skogsområdet. Områder med hindringer i overflaten er heller ikke optimale for georadarundersøkelser, da dette vil

føre til problemer med gjennomføringen av undersøkelsen og med posisjoneringen av de innhentede dataene.

Oppsummering:

- En aktiv metode der elektromagnetiske signaler sendes ned i bakken
- Genererer tredimensjonale datasett som kan snittes i forskjellige vinkler

Fordeler:

- + Rask datainnsamling - Kan motoriseres, flerkanalssystemer
- + Tredimensjonale datasett gir dybdeinformasjon
- + Svært høy oppløsning - Ned til 8 cm i bredden
- + Påvirkes i liten grad av geologiske forhold
- + Gode eksempler fra norske forhold

Ulemper:

- Store datasett som kan være krevende å prosessere
- Kun effektivt i åpent lende
- Ikke alle arkeologiske strukturer lar seg påvise ved hjelp av georadar
- Kan begrenses av leirholdige masser og andre kompakte lag

Anbefaling:

På grunn av den høye oppløsningen og den raske datainnsamlingen, og at metoden har gitt svært gode resultater under norske forhold, mener vi at georadarundersøkelser bør utgjøre en svært viktig del av et større forprosjekt.

5. Andre metoder

5.1. Flyfoto

Flyfotografering er den fjernmålingsmetoden som har vært i bruk lengst i arkeologien og anvendelsen går tilbake til begynnelsen av 1900-tallet. Arkeologer i Storbritannia var først ute, og systematisk flyfotografering er i dag en godt integrert del av britisk arkeologi både innenfor forskning og forvaltning. Det samme er tilfellet innenfor visse arkeologiske miljøer i en rekke andre europeiske land. Prinsippene bak flyfotografering er de samme som de som er beskrevet ovenfor under kapittel 2 om satellittdata (se spesielt kap. 2.4.2). Tilstedeværelsen av menneskeskapte strukturer som ligger skjult under bakken påvirker jordsmonnet og vekstene som finnes over disse. Disse påvirkningene kan ofte identifiseres på flyfoto som enten jordspor (Figur 29) eller vegetasjonsspor (se Figur 3 og Figur 30) og dermed indirekte avsløre arkeologiske strukturer som i seg selv ikke er synlige over bakken.



Figur 29 - Ortofoto fra Odberg, Larvik kommune, Vestfold. Fotoet er tatt i 1982 og midt i bildet sees tre ringer etter fotgrøfter rundt bortpløyde gravhauger. Opphavsrett: Statens kartverk.

Selve flyfotograferingen foregår ved at man flyr over områder som kan være interessante og tar foto av observerte anomalier som kan være forårsaket av ikke-synlige kulturminner under bakkenivå. Så alt en trenger er i prinsippet et fly med en erfaren pilot og et godt fotoapparat. Hva vegetasjonsspor angår, så er disse tydeligst sent på sommeren når det er tørt og forskjellene mellom vegetasjonens

vekstforhold er størst. I tillegg er det en fordel om solen står relativt lavt og frembringer en tydelig skyggevirksomhet. Observasjoner av jordspor gjøres imidlertid best om våren eller høsten hvor åkrene står uten vegetasjon, men samtidig har hatt tid til å tørke noe opp. Om forholdene er ideelle for flyfotografering er veldig væravhengig og det kan derfor være store forskjeller fra det ene år til det andre.

Innenfor norsk arkeologi har flyfotografering ikke funnet særlig fotfeste, men enkelte arkeologer har brukt metoden med gode resultater siden Per Haavaldsen gjennomførte de første flyvingene i Vestfold på 1970-tallet (Haavaldsen 1976). Blant de mer spektakulære resultater kan nevnes flyfotograferingen på Stiklestad som fant sted i 2007 (Forseth 2007). Av andre publiserte resultater kan det vises til opptak fra Ringerike (Jacobsen 1990) og Romerike (Skre 1996).

Som et alternativ til selv å initiere flytur og ta egne foto, finnes det et meget rikholdig arkivmateriale med hundretusenvise av flybilder samlet inn siden man begynte å bringe kamera med opp i fly. Ikke minst er det et stort potensial for funn av vegetasjonsspor og jordspor ved å studere flyfoto som ble tatt systematisk i forbindelse med kartlegging av landet. Dette er vertikale foto (også kalt ortofoto) og de finnes fra store deler av landet fra slutten av 1930-tallet og fremover. De dekker især bebygde områder og jordbrukslandskapet, mens skog og utmark i mindre grad er blitt fotografert på samme systematiske måte. I de fleste tilfeller finnes det opptak av samme område med et visst tidsintervall helt frem til i dag. Som nevnt under kapittel 2.5 ovenfor finnes det i dag en rekke gratistjenester tilgjengelig på nett med tilgang til både satellittpoptak og flyfoto. Statens Kartverk har et meget stort arkiv av historiske flyfoto, men det finnes i tillegg en lang rekke andre større eller mindre arkiver som inneholder historiske flybildeopptak. I tillegg finnes det utenlandske arkiver som inneholder opptak fra Norge eksempelvis fra andre verdenskrig²³.

Flyarkeologi er en relativt billig metode som, hvis forholdene ligger til rette for det, kan bidra med mye ny kunnskap om tilstedeværelsen av arkeologiske strukturer som ikke er synlige over bakken. Ulempen er at det er en metode som er veldig avhengig av klimatiske og værmessige forhold, noe som gjør resultatene av innsatsen uforutsigbar. Dessuten vil muligheten for å ta denne metoden i bruk være avhengig av hvilken type vekster som dyrkes på de arealer som ønskes kartlagt. Korn og gress er velegnet, mens mais, poteter og lignende gjør denne formen for innhenting av informasjon vanskelig.

Oppsummering:

- Passiv metode som baserer seg på observasjon av vekstforskjeller i kornåkre
- Det finnes allerede arkiver som dekker store deler av jordbruksområdene i Norge
- Kan avdekke kulturminner i form av vegetasjonsspor

Fordeler:

- + Relativt kostnadseffektiv metode
- + Lett tilgjengelige datasett

²³ I det internasjonale EU-finansierte prosjektet ArchaeoLandscapes (<http://www.archaeolandscapes.eu/>) jobbes det med å lage en oversikt over arkiver i Europa som inneholder historiske flyfoto.

- + Enkel «dataprosessering»
- + Lett forståelige resultater

Ulemper:

- Væravhengig
- Sesongavhengig
- Kan kun benyttes i dyrket mark
- Usikker metode da den baserer seg på vekst- og jordspor

Anbefaling:

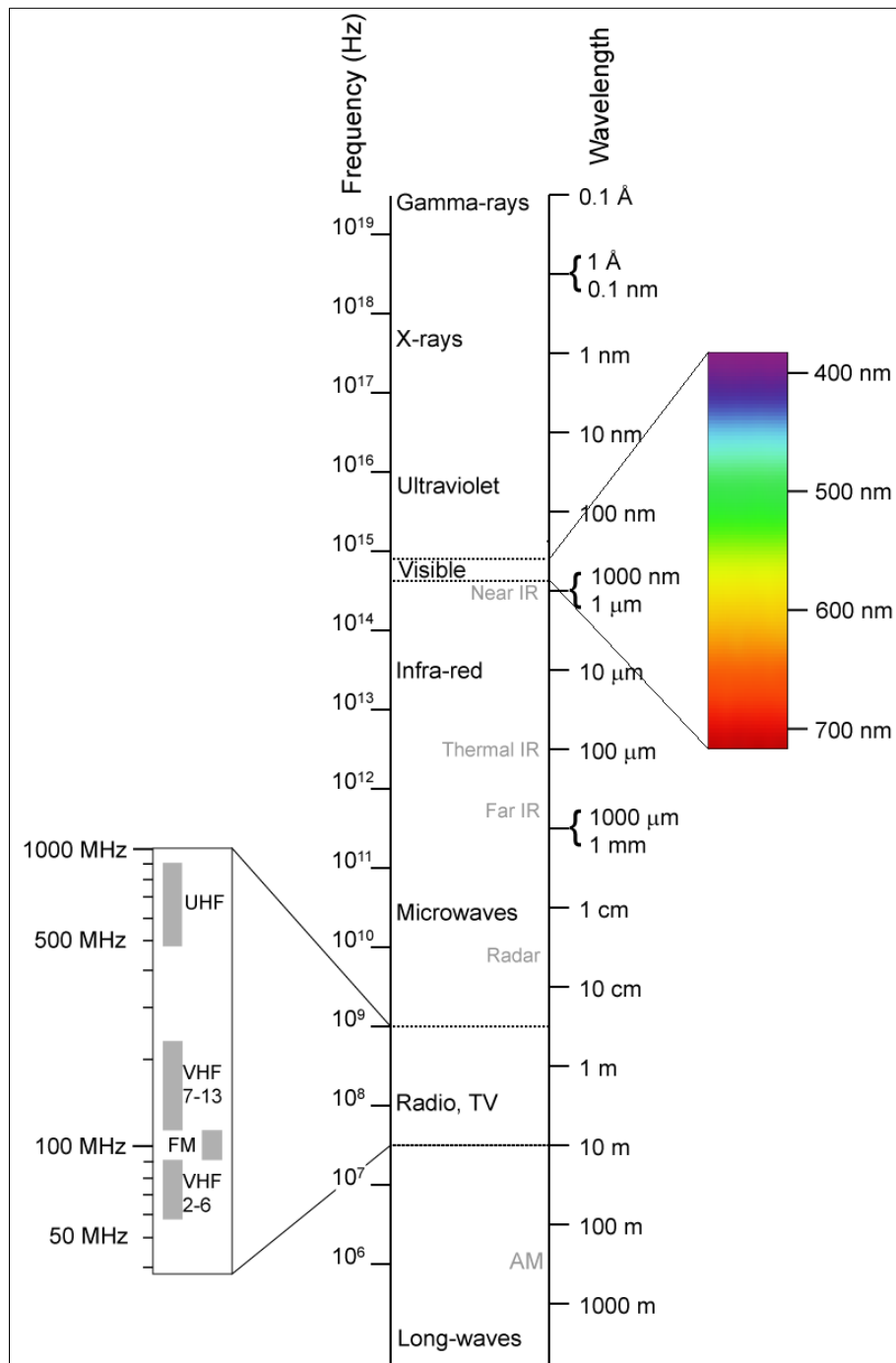
Flyfoto bør benyttes inn mot større veiprosjekter. Først og fremst bør de enorme flyfotoarkivene som eksisterer gjennomgås for det aktuelle området, men dersom forholdene viser seg å være fordelaktige bør det også vurderes å gå til innkjøp av nye opptak.



Figur 30 - Flybilde fra gården Gjerstad på Tjøllingvollen i Larvik kommune, Vestfold. De sirkulære vegetasjonsmerkene som kan observeres i åkeren rundt gårdstunet stammer fra fotgrøfter rundt graver i et utpløyd gravfelt. Vegetasjonssporene er i dette tilfellet positive, det vil si at de er høyere enn kornet rundt. De er også noe mørkere i farge. Dette kommer av at vekstforholdene i dette området er bedre enn i jordsmonnet rundt. Foto: Dobbeltsporprosjektet, Vestfold fylkeskommune.

5.2. Hyperspektrale opptak

Hyperspektral skanning registrerer elektromagnetisk refleksjon fra bakken, og regnes derfor som en passiv metode. Elektromagnetisk stråling kan forklares som bølger med ulike bølgelengder, der gammastråling og røntgenstråling er i én ende av spekteret med sine svært korte bølgelengder mens vi i motsatt ende finner mikrobølger og radiobølger med lange bølgelengder (Figur 31)



Figur 31 - Det elektromagnetisk spektrumet. Synlig lys utgjør en svært liten del av spekteret. Kilde: Wikipedia

Hyperspektral skanning har mye til felles med multispektrale satellittbilder. De hyperspektrale sensorene måler kun en begrenset del av det elektromagnetiske spekteret: synlig lys og deler av de nærinfrarøde strålene, det vil si bølgelengder fra ca. 0,4-2,5 μm (mikrometer). Multispektrale data fra eksempelvis satellitter registrerer også elektromagnetisk stråling, men på færre og derfor bredere bånd enn tilfellet er med hyperspektral skanning. De multispektrale dataene er ofte registrert på 12 bånd, som dekker både synlig lys, nær-infrarødt og i en del tilfeller også de lengre bølgelengdene i området som kalles termal infrarødt. Hyperspektral skanning fra fly skiller seg fra multispektral skanning fra satellitter blant annet gjennom at den hyperspektrale tas opp på flere, men smalere bånd, ofte flere hundre. Selv om de multispektrale bildene fra satellitter får en stadig bedre oppløsning, er hyperspektrale opptak fra fly mer detaljert i og med at den gjøres nærmere bakken. I tillegg blir det vanligvis gjort LiDAR-skanninger samtidig med den hyperspektrale skanningen, noe som gjør at georefereringen blir enklere.

Sollys som stråler mot bakken vil enten bli absorbert, reflektert, brutt eller spredt. For eksempel kan planter absorbere noen bølgelengder de har nytte av, mens de reflekterer mer av andre som er mindre nyttige. Klorofyllet i friske planter vil absorbere mye rødt men reflektere mye blått, gult og grønt. Vårt øye oppfatter dette som plantens grønnfarge. Når klorofyllet i planten endres vil det gi en annen absorpsjon og refleksjon. På denne måten kan måling av reflektert lys fra ulike bølgelengder fortelle noe om plantehelsen. Skannerne som brukes til disse formålene måler passiv, reflektert stråling; altså mengden solstråler som er reflektert fra vegetasjon eller annet på bakken. Bølgene registreres på mange adskilte smale bånd, slik at mengden stråling på hver bølgelengde kan skilles fra stråling med kortere eller lengre bølgelengder. Infrarød stråling kan fange opp variasjoner i eksempelvis fuktighet, plantehelse og jordkjemi. Ved skanning av lengre bølgelengder innenfor det infrarøde spekteret kan også varmelagring og temperaturforskjeller måles.

Variasjoner i fuktighet på bakken og i plantehelsen kan vise til arkeologiske spor under bakken. For eksempel kan murer eller steinpakninger under bakken gi dårligere fuktighet og næringsgrunnlag, som igjen gir dårligere plantehelse på overflaten rett over disse sporene. Tidligere tiders graver, kokegroper eller andre nedgravninger kan gi ekstra næring og fuktighet, og ekstra god plantehelse på overflaten.

På bar mark uten vegetasjon kan forskjeller mellom ulike mineraler i bakken vises gjennom forskjeller i de spektrale signaturene til ulike kjemiske stoff. Der de arkeologiske sporene har en annen kjemisk sammensetning enn områdene rundt, kan de identifiseres og vises ved hjelp av den hyperspektrale skanningen.

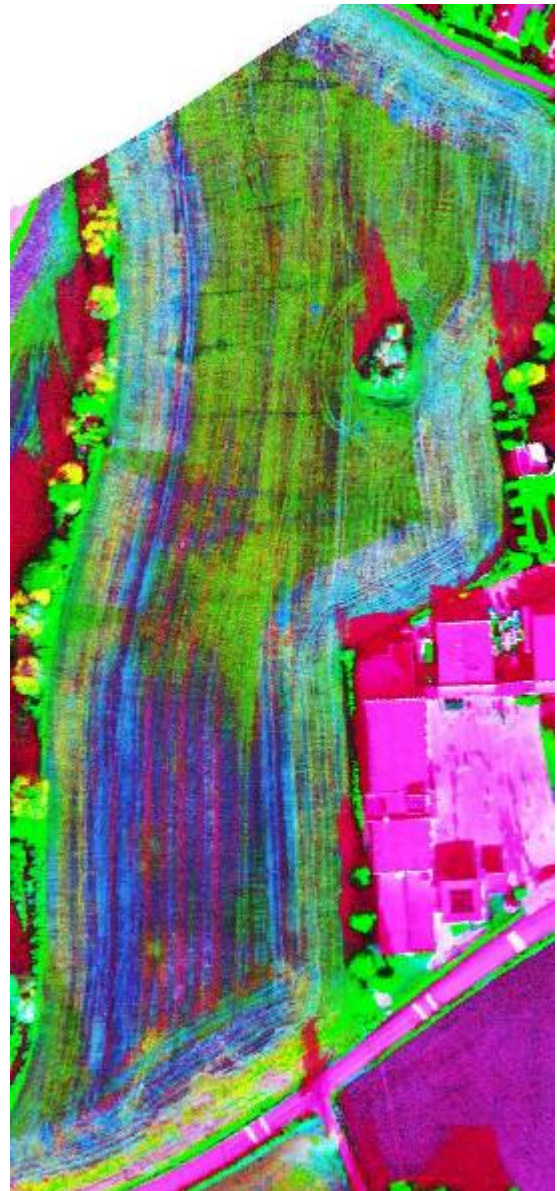
Selv om metoden er ny og derfor ikke spesielt godt utforsket, finnes det eksempler som viser at hyperspektrale skanninger kan produsere gode resultater i forhold arkeologiske strukturer, anlegg og lokaliteter. Eksempler fra en testflygning i Skottland ble alle vegetasjonsspor som tidligere var oppdaget gjennom systematiske undersøkelser av flybilder gjennom 25 år påvist i ett enkelt hyperspektralt skann (Aqduş et al. 2008). Samtidig må det sies at forut for slike resultater ligger det en del prosessering av dataene, som kan være både arbeids- og tidkrevende. I og med at arkeologien er mangfoldig, med ulike funn som gir ulik fuktighet, vegetasjonspåvirkning og kjemi, er det problematisk å kun lete etter veldig spesifikke spektrale signaturer eller gjennomføre helautomatisert prosessering (Winterbottom & Dawson 2005, Aqduş et al. 2008, Bassani et al. 2008,

Trier et al. 2009). Det en må lete etter, er kontrastene/anomalier mellom arkeologien og omgivelsene.

På samme måte som med satellittbildeanalyse kan også her prinsipalkomponentanalyse (PCA) bidra med å detektere de største variasjonen/kontrastene innenfor bildet, og lage et nytt bilde der komponentene med størst kontrast er fremhevet. I tillegg har ulike indekser vist seg nyttige, blant annet vegetasjonsindekser, og jordindekser for områder uten vegetasjon (Coren et al. 2005, Traviglia 2006, Aqduş et al. 2008, Traviglia 2008)



Figur 32. Flyfoto med vegetasjonsspor som viser gravfelt og hustufter på Virik i Vestfold (Haavaldsen 1983).



Figur 33. Virik vist i hyperspektrale data, VNIR, stripe 3, PC# 9,2, 1. Pseudokolor komposisjon (Meyer 2010).

Sentrale utfordringer i de hyperspektrale dataene er for det første nettopp mangfoldet i arkeologien, som gjør at det må søkes i mange ulike bånd på mange ulike måter, samtidig som det er vanskelig å finne gode nok kriterier for automatiserte søk. En annen sentral utfordring er å håndtere den store mengden data og informasjon som slike prosjekter medfører. Med hyperspektral skanning blir valg og fremsortering av de beste og mest relevante båndene en stor og potensielt tidkrevende del av prosessen (Traviglia 2006, Traviglia 2008). Skanningstidspunkt har også blitt diskutert. I Aqduš' (Aqduš et al. 2008) studie fra Skottland blir det oppgitt at et skann fra september ble gjort for sent på året til å vise vegetasjonsspor, det ble derfor ikke arbeidet videre med. Traviglia (Traviglia 2006, Traviglia 2008) minner videre om at identifisering av forskjellene mellom natur og kultur, og verifisering av funnene, er andre viktige deler av arbeidet med denne typen data. Samme problemstilling kjennes fra arbeidet med FLS. Hun oppsummerer, i likhet med de fleste andre studiene, med at denne typen skanninger kan påvise områder med potensial for funn av kulturminner og er nyttig for prioritering forut for nærmere undersøkelser (Emmolo et al. 2004, Traviglia 2006, Backe Forsberg et al. 2008, Traviglia 2008).

Oppsummering:

- En passiv metode som måler elektromagnetisk refleksjon fra bakken
- Kan detektere svært små forskjeller i vegetasjonens tilstand

Fordeler:

- + Kan detektere vekst- og jordspor som andre metoder ikke klarer å se
- + Kombineres gjerne med LiDAR-skanning – Kostnadseffektivt
- + Flere prosesseringsmuligheter enn ved eksempelvis satellittbilder

Ulemper:

- Sesongavhengig
- Store datamengder
- Komplisert databehandling og tolkning
- Kan kun benyttes effektivt i dyrket mark

Anbefaling:

Metoden er ikke godt nok testet ut under norske forhold for å kunne si noe om hvor godt den kan fungere mot norske arkeologiske forhold. Dersom det er muligheter for det, bør imidlertid denne metoden evalueres nærmere, ettersom den har gitt svært gode resultater i deler av verden med arkeologiske og topografiske forhold tilnærmet lik de norske.

6. Arkeologisk fjernmåling og planprosessen

Arkeologiske registreringer skal, som en del av planprosessen, bidra til å beskytte viktige arkeologiske kulturminner mot inngrep. Det er Statens vegvesen som styrer planprosessen i veisaker, men kommunen er plan- og vedtaksmyndighet. Videre er det fylkeskommunene og/eller Sametinget som har ansvar for registrering av arkeologiske kulturminner i forbindelse med planarbeidet.

6.1. Dagens praksis ved arkeologisk registrering

Tiltakene som gjennomføres av fylkeskommunen og/eller Sametinget i forhold til de arkeologiske kulturminnene er hjemlet i undersøkelsesplikten § 9 i kulturminneloven:

«Ved planlegging av offentlige og større private tiltak plikter den ansvarlige leder eller det ansvarlige forvaltningsorgan å undersøke om tiltaket vil virke inn på automatisk fredete kulturminner på en måte som nevnt i § 3 første ledd, jfr. § 8 første ledd.»
(Kulturminneloven 1978).

Videre er tiltakshaver i henhold til §9 pålagt å dekke de utgifter dette medfører. En plan kan med andre ord ikke gjennomføres før kulturminneregistreringer i henhold til § 9 er gjennomført.

Reguleringsplan/detaljplan nivå

Reguleringsplan – områderegulering eller detaljregulering er den plantypen som oftest er knyttet til gjennomføring av enkeltprosjekter. Alle planer behandles og vedtas på kommunalt nivå. Vedtatte planer gir rett til å disponere arealer i henhold til plan, og er slik å betrakte som forpliktende avtaler. Videre utarbeides det av kommunen områderegulering i de tilfeller der det er behov for mer detaljerte avklaringer av arealbruken enn det som går frem av kommuneplanens arealdel. Detaljregulering brukes for konkrete bygge- og anleggstiltak, som eksempelvis veiprosjekter og andre endringer av arealbruken.

Mye av det arkeologiske registreringsarbeidet gjennomføres i dag på dette plannivået, og ved hjelp av tradisjonelle arkeologiske metoder som utmarksregistrering, prøvestikking og maskinell sjakting - sistnevnte hovedsakelig i dyrket mark. Maskinell sjakting er en metode som gir mange funn av både gjenstander og arkeologiske konstruksjoner og genererer mye kunnskap. Imidlertid kan både sjakting og eventuelle etterfølgende flateavdekkinger være destruktive i sin utførelse.

Kommuneplan/overordnet nivå

Selv om hovedparten av registreringsarbeidene i forbindelse med arkeologiske kulturminner i dag utføres på reguleringsplan/detaljplannivå, foretas det også grovmaskete registreringer ved større veiutbyggingsprosjekter på kommuneplannivå eller såkalt overordnet nivå. Arkeologene foretar her potensialevurderinger som er basert på topografiske forhold, kunnskap om landhevning, vannstand, tidligere funn, registreringer i Askeladden og lignende.

Utfordringen for utbygger er at en avklaring i henhold til §9 og kulturminneloven som regel først kommer på plass på reguleringsplannivå. I områder med dyrket mark kommer avklaringen som oftest først etter at store deler av arealene er undersøkt ved hjelp av maskinell sjakting. Ved denne metoden fjernes matjorda for å se hvilke arkeologiske kulturminner som kan ligge skjult under overflaten.

Dagens praksis fører til at planmyndighetene og utbygger ofte får tilgang til avgjørende informasjon i forhold til arealbruken på et sent stadium i prosessen og dette kan skape uforutsigbarhet i forhold til fremdrift og kostnadsomfang.

6.2. Vurdering av potensiale for bruk av metodene i ulike faser av et veiprojekt

For å få best mulig utnyttelse av nyere arkeologiske metoder, er det viktig at de trekkes inn på et overordnet nivå, dvs på et så tidlig stadium i planprosessen som mulig. For de fleste prosjekter vil mange av disse undersøkelsene være mulig å gjennomføre på kommuneplannivå. Uansett plannivå, vil det være viktig at det først hentes inn opplysninger fra den nasjonale kulturminnedatabasen *Askeladden* om alle kjente registreringer fra tiltaksområdet.

Tradisjonelle arkeologiske metoder som systematisk utmarksregistrering, prøvestikking og maskinell sjakting, vil normalt først være aktuelle på reguleringsplannivå. Nyere inngrepsfrie metoder, som dekker store arealer på kort tid, vil egne seg godt på et overordnet plannivå. Plattformen for samling av alle relevante data er et GIS-verktøy i form av en geodatabase for det aktuelle undersøkelsesområdet.

I tillegg til de geofysiske registreringsmetodene er det spesielt satellittpoptak, LiDAR-data og flyfoto som er aktuelle på et slikt overordnet plannivå. Det er her viktig å legge vekt på at det ikke er den enkelte metoden, eller det enkelte datasett som skal gi svarene, men den samlede tilgangen på informasjon fra flere av de ulike metodene. All informasjon om arkeologiske kulturminner samles i en felles geodatabase som gir bedre grunnlag for å gjøre helhetsvurderinger slik at en kan treffe gode beslutninger.

Satellittpoptak er lette å anskaffe og manuell inspeksjon av disse, gjerne i kombinasjon med ulike flyfoto over de samme arealene, vil kunne avsløre mange arkeologiske kulturminner i dyrket mark. Det er viktig å merke seg at både satellittpoptakenes og de ulike flyfoto sin egnethet til å avsløre arkeologiske kulturminner vil variere fra opptak til opptak på grunn av at lys- og værforhold samt vegetasjonsbildet endrer seg etter årstidene. Selv om ikke alle metodene i hvert enkelt tilfelle vil fungere optimalt, er potensialet likevel høyt, og normalt vil en ved en systematisk gjennomgang av aktuelle arealer avsløre mange arkeologisk kulturminner.

Det er stadig mer vanlig at det finnes LiDAR-data over områder hvor det skal gjennomføres større utbyggingsprosjekter. Ofte vil også andre fagfelt ha skaffet til veie LiDAR-data (dette gjelder blant annet Statens vegvesen) som grunnlag for veiplanleggingen, med tanke på andre tema som skal vurderes i forbindelse med planprosessen. Flere av disse nyere metodene vil kunne gi synergieffekter på den måten at de kan utnyttes av flere fagfelt. Likevel vil det, som beskrevet ovenfor, være viktig at LiDAR-data som kulturminnevernet skal benytte seg av i utgangspunktet er samlet inn med tanke på påvisning av arkeologiske kulturminner. Det må velges riktig oppløsning, datasettene må filtreres med tanke på arkeologiske kulturminner og en arkeolog med kompetanse på LiDAR kan med fordel være med å avgjøre når på året opptakene skal gjennomføres, samt hvilke arealer som skal dekkes av skanningen.

Magnetometerundersøkelser er effektive, og dekker raskt store arealer. Generelt, og kanskje spesielt for georadar, kan en si at geofysiske undersøkelser der oppløsningen er høy dekker mindre arealer enn i de tilfellene der oppløsningen er lav. Erfaringsmessig bør man derfor innledningsvis

gjennomføre magnetometerundersøkelser over store arealer, for deretter å spisse undersøkelsene med andre metoder ettersom en får gjort de rette prioriteringene og kommer ned på et lavere plannivå.

Det er ikke mulig å si at de ulike fjernmålingsmetodene hører hjemme på det ene eller det andre plannivået. På generelt grunnlag kan en likevel si at vi med de nye metodene har fått gode muligheter til å avklare potensielle konflikter mellom utbygging og kulturminner på et tidlig tidspunkt. Mange av de mer konvensjonelle metodene som utmarksregistrering, prøvestikking og maskinell sjakting egner seg best på detaljplannivå. For større arealer er de tradisjonelle metodene tidkrevende.

7. Konklusjon og anbefalinger

Dette forprosjektet har tatt opp spørsmål knyttet til bruk av avanserte arkeologiske metoder og deres potensielle anvendelse i forbindelse med veiutbyggingsprosjekter. Hensikten har vært å vurdere i hvilken grad slike metoder kan erstatte eller supplere tradisjonelle metoder, og på den måten effektivisere prosessen uten at kvaliteten på undersøkelsene reduseres.

7.1. Hvordan kan nyere arkeologiske metoder supplere/erstatte tradisjonelle metoder?

De fjernmålingsmetodene som er vurdert her, er først og fremst satellittopptak, flyfoto, LiDAR hyperspektral skanning og geofysiske undersøkelsesmetoder. En vurdering av deres relevans, nytte og effektivitet er en kompleks øvelse som i tillegg til en vurdering av de forskjellige metodene i seg selv, omfatter parametere som landskapstype, kulturminnetype og plannivå.

De konvensjonelle metoder som brukes i de forskjellige landskapstyper er følgende:

I **dyrket mark** brukes vanligvis maskinell sjakting med gravemaskin. Dette har som formål å påvise ikke-synlige kulturminner som ligger skjult under matjorden. I tillegg gjennomføres det tidvis åkervandring etter manngardsprinsippet hvor markoverflaten gjennomføres for funn som indikerer spor etter forhistorisk aktivitet. Det kan være flintavslag, keramikk, skjørbrent stein, slagg og lignende. Dette suppleres i enkelte tilfeller med metalløk.

I **våtmark** (primært myrområder) går man vanligvis manngard på søk etter synlige kulturminner slik som kavlebruer og en spesiell type tjæreproduksjonsanlegg som ble konstruert i myr – såkalte myrmiler. I visse tilfeller tas det prøvestikk og enkelte ganger sjaktes det med maskin for å påvise steinalderlokaliteter eller kavlebruer som har blitt overtorvet av voksende myrdannelse.

I **skog** kartlegges synlige kulturminner i hovedsak gjennom utmarksregistreringer. Utmarkssregistreringene suppleres gjerne med systematisk prøvestikking av spesielle områder som vurderes å ha høyt potensiale for steinalderlokaliteter. I sjeldne tilfeller er sjakting med gravemaskin tatt i bruk til påvisning av steinalderlokaliteter og andre ikke-synlige kulturminner – primært spor etter boplasser fra jernalderen.

I **fjellområder** er det vanligst å gå manngard på søk etter synlige kulturminner, samt at det prøvestikkes etter steinalderlokaliteter. Det samme er tilfellet i **kystlandskap**, hvor det i tillegg kan være aktuelt å ta i bruk sjakting på mindre områder med dyrket mark.

Tabell 2 viser bruken av konvensjonelle metoder, og hvordan disse fordeler seg på landskapstyper. Tredje kolonne gir en oversikt over hvor de nyere metodene egner seg best. I både kolonne to og tre er de mest relevante/aktuelle metodene markert med understreking.

Landskapstyper	Konvensjonelle metoder	Nyere metoder
Dyrket mark	<u>sjakting</u> manngard	<u>magnetometer</u> <u>georadar</u> satellittbilder hyperspektral skanning flyfoto LiDAR
Våtmark	<u>manngard</u> prøvestikk sjakting	<u>LiDAR</u> georadar
Skog	<u>manngard</u> prøvestikking sjakting	<u>LiDAR</u> magnetometer
Snaufjell	<u>manngard</u> prøvestikking	LiDAR magnetometer
Kystlandskap	<u>manngard</u> prøvestikk sjakting	LiDAR magnetometer georadar

Tabell 2 - Forslag til hvordan nyere metoder kan supplere tradisjonelle undersøkelser i ulike landskapsområder.

Satellitt og flyfoto kan være viktige supplement til henholdsvis sjakting i dyrket mark samt registrering i utmarksområder og kystlandskap, da de har en viss utsagnskraft i forhold til hva som ligger skjult under bakken. «Fugleperspektivet» kan avsløre strukturer som ikke oppdages ved overflatebefaring.

LiDAR er først og fremst anvendelig i skogsområder, hvor den på grunn av sine vegetasjonspenetrerende egenskaper egner seg svært godt til å kartlegge synlige kulturminner. Videre kan den med fordel brukes i andre typer landskap, slik som fjellområder og våtmark. Den er ikke en fullkommen erstatning for tradisjonelt feltarbeid, men kan være et prioriteringsredskap med hensyn til å velge ut særlig interessante områder og derved gjennomføre feltarbeidet mer effektivt. **Hyperspektral skanning** er en metode som kan gi verdifulle opplysninger om tilstedeværelsen av ikke-synlige kulturminner i dyrket mark på en mer heldekkende måte enn det som er tilfellet med satellitt og flyfoto, men på et mindre detaljert nivå enn med geofysikk.

Bruk av **georadar** og **magnetometer** har vist seg effektiv til å kartlegge ikke-synlige kulturminner i dyrket mark på en effektiv måte og på et høyt detaljnivå. Fra å jobbe med små enkeltkanalssystemer, er det nå mulig å kjøre motoriserte storskalasystemer slik at både hastighet, presisjon og databehandling er forbedret. De første større prøveprosjektene med bruk av geofysikk er nå gjennomført i Norge, og gjennom mange nye arkeologiske funn har det vist seg at metodene i de fleste tilfeller fungerer godt. Mye kunnskapsoppbygging gjenstår likevel, og det er ønskelig å teste ut geofysikk i flere ulike landskapstyper med ulikt terreng og jordsmonn som representerer ulike fysiske egenskaper. De **geofysiske metodene** er inngrepsfrie, og er effektive på grunn av at store arealer dekkes på kort tid, men har som beskrevet ovenfor, også visse begrensninger. Det er derfor svært viktig at man kombinerer kunnskap om lokalitetens fysiske egenskaper med både geofysisk og kulturhistorisk kompetanse. Dette slik at undersøkelsene gjennomføres på et faglig forsvarlig nivå.

Dagens maskinelle sjakting i innmark er utfordrende fordi den også resulterer i direkte inngrep i kulturminnene. I tillegg til å medføre ulemper for grunneier, kan denne tradisjonelle undersøkelsesmetoden også ha negative konsekvenser for bevaringstilstand og bevaringsforhold for de arkeologiske kulturminnene i dyrket mark. Sjaktingen er også tidkrevende og dermed kostbar for tiltakshaver. Som alternativ representerer bruk av arkeologisk geofysikk en potensiell kostnadseffektivitet med hensyn til kartlegging av ikke-synlige kulturminner i dyrket mark.

Det må påpekes at det er bredden av ulike registrerings- og undersøkelsesmetoder som er det viktige. Det er summen av alle registreringsresultatene fra de ulike metodene, som integrert i en geodatabase, gir de beste forutsetninger for å oppnå gode resultater. Disse kan så anvendes til å sikre bedre forutsigbarhet hva angår arealdisponering og mulige konflikter med arkeologiske kulturminner.

Selv om det er opparbeidet mye kunnskap om bruk av de nyere metodene i Norge, er det per i dag ikke gjennomført systematiske sammenlignende studier av de forskjellige metodenes reelle effektivitet hva angår henholdsvis påvisning av arkeologiske spor og kostnadseffektivitet. Det er heller ikke gjennomført prosjekter med tanke på å få frem fordelene ved integrert tilnærming som tar i bruk flere supplerende metoder. Det er et behov for å komme videre fra gode, men spredte, enkeltresultater til et samlet overordnet grep som tar i bruk hele «verktøykassa».

7.2 Veien videre

I forbindelse med veiprojekter gjennomføres det arkeologiske undersøkelser her i landet for store summer hvert år. De nyere metodene representerer en potensiell effektivisering av de arkeologiske registreringene. For tiltakshaver ligger den største gevinsten ikke først og fremst i effektiviteten i feltarbeidet, men i forutsigbarheten og at man så tidlig som mulig får den nødvendige oversikten.

Nye metoder kan styrke det faglige beslutningsgrunnlaget tidlig i planprosessen, og på den måten spare samfunnet for ressursbruk. Mer kunnskap om dette vil kunne opparbeides gjennom uttesting av et samlet sett med nyere metoder inn mot et eller flere større utbyggingsprosjekt. Gjerne, og kanskje helst et veiprojekt, da en vesentlig del av de samlede arkeologiske undersøkelsene i dag foregår i tilknytning til veiprojekter. Skal en få best mulig utbytte av et slikt prosjekt, bør en velge prosjektområder som dekker flest mulig ulike landskapsrom (dyrket mark, skog, våtmark, fjell osv.).

I tillegg til uttesting av metodene i seg selv, er det viktig å få kartlagt bruken av nyere arkeologiske metoder i forhold til en regulær planprosess. For å få dette til er det behov for vilje og initiativ fra en stor aktør som eksempelvis Statens vegvesen. Gjennomføringen av et eventuelt prøveprosjekt bør inkludere både aktuelle forskningsmiljøer, det aktuelle arkeologiske landsdelsmuseet, fylkeskommunen, kommunen og ikke minst Riksantikvaren. Selv om vi på dette feltet er langt framme her i Norge, vil det være viktig å dra veksler på internasjonale forskningsmiljøer med spisskompetanse innen et felt som ligger i skjæringspunktet mellom teknologi og arkeologi.

8. Litteraturliste

- Aqduş, S. A., Drummond, J. & Hanson, W. S. 2008. Discovering Archaeological cropmarks: a hyperspectral approach. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* , XXXVII, 361-365.
- Aspinall, A., Gaffney, C. & Schmidt, A. 2009. *Magnetometry for archaeologists*, Lanham, Md., Plymouth, Altamira.
- Backe Forsberg, Y., Holmgren, R., Lanorte, A., Lasaponara, R. & Masini, N. 2008. Airborne and satellite multispectral imagery at the Etruscan site of San Giovenale, Blera (Lazio) - Preliminary results. *In: Lasaponara, R. & Masini, N., (eds.) Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop CNR, Rome, September 30 - October 4, 2008.* 225-228.
- Barlindhaug, S., Holm-Olsen, I. M., Risan, T., Risbøl, O. & Bøe Sollund, M.-L. 2008. Fortiden sett fra lufta – fjernmålingsmetoder til overvåking av kulturminner og kulturlandskap. *Kart og Plan*, 2, 106-108.
- Barlindhaug, S., Holm-Olsen, I. M. & Tømmervik, H. 2007. Monitoring archaeological sites in a changing landscape—using multitemporal satellite remote sensing as an ‘early warning’ method for detecting regrowth processes. *Archaeological Prospection*, 14, 231-244.
- Bassani, C., Cavalli, R. M., Pascucci, S. & Pignatti, A. 2008. Airborne hyperspectral remote sensing as a tool for detecting buried archaeological structures: preliminary results for land cover in different context. *In: Lasaponara, R. & Masini, N., (eds.) Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop CNR, Rome, September 30 – October 4. , 2008 Rome, Italy.* s 75-78.
- Bergersen, O., Hartnik, T., Bloem, E. & Petersén, A. H. 2008. Vurdering av bevaringstilstand og forhold i kulturlag i mettet/umettet sone ved Nedre Langgate 43, Tønsberg - Arkeologisk, jordfaglig og geofysisk analyse. Upublisert rapport, Oslo: NIKU/Bioforsk.
- Bevan, B. W. 2000. An early geophysical survey at Williamsburg, USA. *Archaeological Prospection*, 7, 51-58.
- Bewley, R. H., Crutchley, S. P. & Shell, C. A. 2005. New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site. *Antiquity*, 79, 636-647.
- Bofinger, J. & Hesse, R. 2011. As far as the laser can reach...: Laminar analysis of LiDAR detected structures as a powerful instrument for archaeological heritage management in Baden-Württemberg, Germany. *In: Cowley, D. C. (ed.) Remote sensing for archaeological heritage management. EAC Occasional Paper.* Brussel: Europae Archaeologia Consilium (EAC).
- Bofinger, J., Kurz, S. & Schmidt, S. 2006. Ancient maps - modern data sets: different investigative techniques in the landscape of the Early Iron Age princely hill fort Heuneburg, Baden-Württemberg. *In: Campana, S. & Forte, M. (eds.) From Space to Place: 2nd international conference on remote sensing in archaeology (Proceedings of the 2nd international workshop, CNR, Rome, Italy, December 2-4, 2006).* Oxford: Archaeopress.
- Bollandsås, O. M., Risbøl, O., Ene, L. T., Nesbakken, A., Gobakken, T. & Næsset, E. 2012. Using airborne small-footprint laser scanner data for detection of cultural remains in forests: an experimental study of the effects of pulse density and DTM smoothing. *Journal of Archaeological Science*, 39, 2733-2743.
- Campana, S. & Piro, S. (eds.) 2009. *Seeing the Unseen : Geophysics and Landscape Archaeology*, Boca Raton: CRC Press.
- Campbell, J. B. & Wynne, R. H. 2011. *Introduction to Remote Sensing*, New York, London, The Guildford Press.
- Clark, A. 1996. *Seeing beneath the soil: prospecting methods in archaeology*, London, Routledge.
- Conyers, L. B. 2004. *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*, Walnut Creek, CA, AltaMira Press.
- Coren, F., Visintini, D., Prearo, G. & Sterzai, P. 2005. Integrating lidar intensity measures and hyperspectral data for extracting of cultural heritage. *Workshop Italy-Canada for 3D Digital Imaging and Modeling: applications of heritage, industry, medicine and land.*

- Crutchley, S. 2006. Light Detection and Ranging (lidar) in the Witham Valley, Lincolnshire: an Assessment of New Remote Sensing Techniques. *Archaeological Prospection*, 13, 251–257.
- David, A. 2008. *Geophysical survey in archaeological field evaluation*, English Heritage.
- Devereux, B. J., Amable, G. S. & Crow, P. 2008. Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, 82, 470-479.
- Doneus, M. & Briese, C. 2006. Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. In: Ioannides, M., Arnold, D., Niccolucci, F. & Mania, K. (eds.) *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. Aire-La-Ville.
- Doneus, M. & Briese, C. 2011. Airborne laser scanning in forested areas - potential and limitations of an archaeological prospection technique. In: Cowley, D. C. (ed.) *Remote sensing for archaeological heritage management. EAC Occasional Paper No. 5*. Brussel: Europae Archaeologia Consilium (EAC).
- Doneus, M., Briese, C., Fera, M. & Janner, M. 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, 35/4, 882-893.
- Doneus, M., Pregesbauer, M., Briese, C. & Doneus, N. 2012. ALB – Airborne Laser Bathymetry: Surveying Underwater Topography. Presentasjon 13.09.2012 på AARG Annual meeting 2012, Budapest.
- Emmolo, D., Franco, V., Lo Brutto, M., Orlando, P. & Villa, B. 2004. Hyperspectral techniques and GIS for archaeological investigation. In: Proceedings from the XXth ISPRS Congress, 2004. 492-497.
- Ericsson, E., Rausing, G., Norrman, J., Hörberg, P. U. & Hansen, L. 1992. *Flygspaning efter historia. Flygarkeologins mål och metoder.*, Institutet för Kulturforskning (IK).
- Forseth, L. 2007. Å se fortiden fra luften. . *Fortidsminnevern*, 3 16-18.
- Fowler, M. J. F. 2010. Satellite imagery and archaeology. In: Cowley, D. C., Standring, R. A. & Abicht, M. J. (eds.) *Landscapes through the lens: aerial photographs and historic environment*. Oxford: Oxbow Books.
- Gaffney, C. 2008. Detecting trends in the prediction of the buried past: a review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry*, 50, 313-336.
- Gaffney, C. & Gater, J. 2003. *Revealing the buried past : geophysics for archaeologists*, Stroud, Gloucestershire, Tempus.
- Georges-Leroy, M. 2011. Airborne Laser Scanning for the management of archaeological sites in Lorraine (France). In: Cowley, D. C. (ed.) *Remote sensing for archaeological heritage management, Europae Archaeologia Consilium (EAC). EAC Occasional Paper No. 5*. Brussel.
- Grøn, O., Aurdal, L., Christensen, F., Tømmervik, H. & Loska, A. 2004. *Locating invisible cultural heritage sites in agricultural fields: evaluation of methods for satellite monitoring of cultural heritage sites - results 2003*, Oslo, NIKU.
- Grøn, O. & Loska, A. 2002. Development of methods for satellite monitoring of cultural heritage sites. *Technical report*. The Norwegian Directorate for Cultural Heritage.
- Grøn, O., Stylegar, F.-A., Palmér, S., Aase, S., Orlando, P., Esbensen, K., Kucheryavski, S. & 2008. 2008. Practical use of multispectral images in general Norwegian Cultural Heritage Management and focused Viking Age Research. Experiences for South-Western Norway. In: Lasaponara, R. & Masini, N., (eds.) Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop CNR, Rome, September 30 – October 4, 2008 Rome, Italy. 285-288.
- Gustavsen, L. & Karlsson, P. 2011. Georadarundersøkelse av Auduns borg i Jølster kommune, Sogn og Fjordane. *NIKU Oppdragsrapport 71/2011*. Oslo: NIKU.
- Gustavsen, L. & Stamnes, A. A. 2012. Arkeologisk geofysikk i Norge – En historisk oversikt og statusevaluering. *Primitive Tider*, 14, 77-95.
- Haavaldsen, P. 1976. Arkeologi fra luften. *Nicolay – arkeologisk tidsskrift*, 24, 10-11.

- Haavaldsen, P. 1983. Virik, et gårdsanlegg fra eldre jernalder på Østlandet. *Nicolay*, 41, 37-45.
- Hesse, R. 2010. LiDAR-derived Local Relief Models – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 17(2), 67-72.
- Holden, N. 2001. Digital airborne remote sensing: the principles of LiDAR and CASI. *AARGNews*, 22, 23.
- Holden, N., Horne, P. & Bewley, R. 2002. High-resolution digital airborne mapping and archaeology. In: Bewley, R. & Raczkowski, W. (eds.) *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*.
- Horsley, T. R. 2002. Olav's Wall, Sarpsborg, Østfold, Norway. Report on Geophysical Surveys, November 2002 for Borgarsyssel Museum. Sarpsborg: Borgarsyssel Museum.
- ICOMOS 1990. Charter for the Protection and Management of the Archaeological Heritage.
- Jacobsen, H. 1990. Flyarkeologisk rekognosering på Ringerike. *Viking*, LIII, 67-90.
- Kincey, M. & Challis, K. 2010. Monitoring fragile upland landscapes: The application of airborne lidar. *Journal for Nature Conservation*, 18, 126-134.
- Kulturminneloven 1978. Lov 9. juni 1978 nr. 50 om kulturminner (Kulturminneloven).
- Lambrick, G. 2008. *Air and Earth. Aerial archaeology in Ireland. A review for the Heritage Council*, Dublin.
- Lasaponara, R. & Masini, N. 2007. Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery. *Journal of Archaeological Science*, 34, 214-221.
- Lasaponara, R. & Masini, N. 2012a. Image Enhancement, Feature Extraction and Geospatial Analysis in an Archaeological Perspective. In: Lasaponara, R. & Masini, N. (eds.) *Satellite Remote Sensing: A New Tool for Archaeology*. Dordrecht: Springer.
- Lasaponara, R. & Masini, N. 2012b. Pan-sharpening Techniques to Enhance Archaeological Marks: An Overview. In: Lasaponara, R. & Masini, N. (eds.) *Satellite Remote Sensing: A New Tool for Archaeology*. Dordrecht: Springer.
- Leckebusch, J. 2003. Ground-penetrating radar: a modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection*, 10, 213-240.
- Linford, N. 2006. The application of geophysical methods to archaeological prospection. *Reports on Progress in Physics*, 69, 2205.
- Meyer, I. R. 2010. *Hyperspektrale signaturer av begravde arkeologiske objekter: en teststudie i Odberg (Lågendalen) basert på flybårne data*. I.R. Meyer.
- Motkin, D. 2001. An assessment of LIDAR for archaeological use. *AARGNews*, 22, 24-25.
- Myhre, B. 2004. Undersøkelse av storhauger på Borre i Vestfold. In: Larsen, J. H. & Rolfsen, P. (eds.) *Halvdanshaugen - arkeologi, historie og naturvitenskap*. Oslo: University of Oslo.
- Nesbakken, A. & Risbøl, O. 2011. Med laserblikk på villreinfangst i Varanger. *OTTAR*, 2.
- Neubauer, W. 2001. *Magnetische Prospektion in der Archäologie*, Wien.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S. & Melichar, P. 2002. Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: an approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9, 135-156.
- Paasche, K. & Trinks, I. 2010. Georadarundersøkelse av gravplass i Skoltebyen, Neiden, Finnmark. Arkeologisk undersøkelse. *NIKU Oppdragsrapport 33/2010*. Oslo: NIKU.
- Palmér, S., Grøn, O., Orlando, P. & Stylegar, F.-A. 2008. "Usynlige" kokegroper og satellitt-fjernmåling. *Viking*, LXXI, 193-202.
- Parcak, S. H. 2009. *Satellite remote sensing for archaeology*, London, Routledge.
- Pedersen, O. C. 2004. Georadarundersøkelsene av Halvdanshaugen. In: Larsen, J. H. & Rolfsen, P. (eds.) *Halvdanshaugen - arkeologi, historie og naturvitenskap*. Oslo: University of Oslo.
- Riksantikvaren 2011. Forvaltningsstrategi 2011: Utkast til forvaltningsstrategi, RA 2010–2020.
- Riley, D. N. 1982. *Aerial archaeology in Britain*, Aylesbury, Bucks, UK, Shire Publications.
- Risbøl, O. 2009. Fugleperspektiv på kulturminner. Bruk av flybåren laserskanning i arkeologien. *Viking*, 2009, 211-226.

- Risbøl, O. 2010. Towards an improved archaeological record through the use of airborne laserscanning. *In: Forte, M., Campana, S. & Liuzza, C. (eds.) Space, Time and Place. 3rd International Conference on Remote Sensing in Archaeology.*
- Risbøl, O. & Amundsen, H. R. 2011. Tilstandsanalyse og miljøovervåking av kulturminner og –miljøer langs regulerte vassdrag ved bruk av flybåren laserskanning. *Viking, Norsk arkeologisk årbok*, LXXIV, 279-304.
- Risbøl, O., Gjertsen, A. K. & Skare, K. 2006. Airborne laser scanning of cultural remains in forests: some preliminary results from a Norwegian project. *In: Campana, S. & Forte, M. (eds.) From Space to Place: 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology.* Oxford: Archaeopress.
- Risbøl, O. & Smekalova, T. 2003. *Archaeological survey and non-visible monuments - the use of magnetic prospecting in outfield archaeology* [Online]. Available: http://www.niku.no/archive/niku/prosjekter/grafjellweb_03/magnetometer.pdf [Accessed 19.04 2011].
- Rowlands, A., Sarris, A. & Bell, J. 2006. Airborne multi sensor remote sensing of exposed and subsurface archaeological remains at Itanos and Roussolakkos, Crete. *In: Campana, S. & Forte, M., (eds.) From space to place: 2nd international conference on remote sensing in archaeology (Proceedings of the 2nd international workshop, CNR, Rome, Italy, December 2-4, 2006), 2006 Rome, Italy.* Archaeopress, 113-116.
- Schmidt, A. 2009. Electrical and Magnetic Methods in Archaeological Prospection. *In: Campana, S. & Piro, S. (eds.) Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology.* London: Taylor & Francis Group.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A. & Herzog, I. 1990. *Archaeological prospecting and remote sensing*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Skre, D. 1996. Framgangsmåten ved åkerregistrering, flyfotografering, prøveundersøkelser og utgravninger. Materialets representativitet. . *In: Skre, D. (ed.) Herredømmet. Bosetning og besittelse på Romerike 200-1350 e.Kr. Avhandling (dr. philos.).* Oslo: Universitetet i Oslo.
- Stamnes, A. A. 2011. Georadar avdekker fortidsminner. *Spor*, 2011, 30-33.
- Traviglia, A. 2006. Archaeological usability of Hyperspectral images: successes and failures of image processing techniques. *In: From Space to Place - 2nd International conference on Remote Sensing in Archaeology, Dec. 4-7 2006 2006 Rome.* Oxford: Archaeopress, 123-130.
- Traviglia, A. 2008. The combinatorial explosion: defining procedures to reduce data redundancy and to validate the results of processed hyperspectral images. *In: Lasaponara, R. & Masini, N., (eds.) Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop CNR, Rome, September 30 – October 4., 2008 Rome, Italy.* 85-89.
- Trier, Ø. D., Larsen, S. Ø. & Solberg, R. 2008. Detection of circular patterns in high-resolution satellite images of agricultural land with CultSearcher. Oslo: Norsk regnesentral.
- Trier, Ø. T. D., Gustavsen, L., Pilø, L. H. & Tønning, C. 2012. Application of remote sensing in cultural heritage management – Project report 2011. Norsk Regnesentral.
- Trier, Ø. T. D., Larsen, S. Ø. & Solberg, R. 2009. Automatic detection of circular structures in high-resolution satellite images of agricultural land. *Archaeological Prospection*, 16, 1-15.
- Trier, Ø. T. D. & Pilø, L. 2012. Automatic detection of pit structures in airborne laser scanning data. *Archaeological Prospection*, 19, 103-121.
- Trinks, I., Eder- Hinterleitner, A. & Larsson, L. I. 2008. Archaeological prospection of the Gokstad burial mound. Unpublished report. UV Teknik, The Swedish National Heritage Board.
- Trinks, I., Fogelberg, A., Karlsson, P. & Hinterleitner, A. 2009. Arkeologisk undersökning med georadar vid Skänninge hospital. RAÄ. Riksantikvarieämbetet.
- Trinks, I., Gansum, T. & Hinterleitner, A. 2010. Mapping iron-age graves in Norway using magnetic and GPR prospection. *Antiquity*, 84.

- Trinks, I., Karlsson, P., Westergaard, B., Hinterleitner, A. & Larsson, L. I. 2007a. *Professional archaeological prospection - Borre Sites 1 & 2* [Online]. Vestfold fylkeskommune. Available: http://www.vfk.no/doc/kulturminnevern/geofysikk/Borre/web/Borre_web_files/frame.htm [Accessed 1st July 2012].
- Trinks, I., Karlsson, P., Westergaard, B., Hinterleitner, A. & Larsson, L. I. 2007b. Professional archaeological prospection - Odberg Site 2. Available: http://www.vfk.no/doc/kulturminnevern/geofysikk/Odberg_site_2/zip/odberg_site_2.zip [Accessed 22.11.2012].
- Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I. & Papadopoulos, N. 2009. Electrical resistivity tomography: A flexible technique in solving problems of archaeological research. *In: Campana, S. & Piro, S. (eds.) Seeing the Unseen - Geophysics and Landscape Archaeology*. London: CRC Press.
- Valetta. 1992. *European Convention on the Protection of the Archaeological Heritage* [Online]. Council of Europe. Available: <http://conventions.coe.int/Treaty/en/Treaties/Html/143.htm> [Accessed 20. november 2012].
- Winterbottom, S. J. & Dawson, T. 2005. Airborne Multi-spectral Prospection for buried Archaeology in Mobile Sand Dominated Systems. *Archaeological Prospection*, 12, 205-219.
- Zakšek, K., Oštir, K. & Kokalk, Ž. 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing*, 3, 398-415.



Statens vegvesen

Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep
0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162