
Rapport SGC 125

Mobil markradarutrustning

Förstudie



©Svenskt Gastekniskt Center - December 2001

Peter Wilén (editor)
SwedPower AB

Rapport SGC 125 ISSN 1102-7371 ISRN SGC-R-125-SE

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e dyl i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC´s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydgas AB
Öresundskraft AB
Lunds Energi AB
Nova Naturgas AB
Birka Värme AB
Göteborg Energi AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Sammanfattning

Markradarsystem (GPR, "Ground Penetrating Radar") används i många olika sammanhang för att erhålla information om förhållanden under markytan. Vid läggning av gasledningar är det väsentlig att erhålla information både om markförhållanden, djup till berg, förekomst av block, schaktbarhet samt lägen för redan existerande ledningar och kablar.

Undersökningen som har baserats huvudsakligen på litteraturstudier, erfarenheter av olika tillämpningar av markradar samt kontakter med tillverkare och nyttjare visar på följande resultat:

- Det har inte framkommit någon särskild utrustning som uppfyller alla de önskemål som kan ställas på en markradarutrustning för ledningslokalisering. Det gäller penetrationsförmåga, mätupplösning, lokalisering, hanterbarhet och redovisning/presentation.
- Samtliga utrustningar, särskilt för ledningslokalisering, har en begränsad penetreringsförmåga i leriga jordar, som är beroende på typ av antenn.
- För markundersökningar med konventionell markradar har under senare år utveckling av nya antenner skett. Särskilt utveckling av antenner med lägre frekvenser ger ökade möjligheter för praktiska tillämpningar under svenska förhållanden.
- När det gäller andra geofysiska metoder är det främst resistivitmätning som är lämpligt för markundersökning. Under senare år har mer lättanvända system utvecklats som uppfyller flera önskade krav enligt ovan. Möjligheter till ledningslokalisering bör undersökas.

För ledningslokalisering föreslås att två utrustningar provas i fält under svenska förhållanden. En utrustning som arbetar med två eller fler antenner och en utrustning med ett mätsystem med enbart en antenn.

För markundersökning föreslås en eller två utrustningar provas samt flera olika antenner till dessa. Syftet är främst att undersöka och verifiera penetreringsförmåga samt lokalisering av bergyta ned till 1,5 – 3 m djup under markytan.

För undersökning i leriga jordar föreslås en lätthanterlig resistivitetsutrustning provas både för ledningslokalisering och lokalisering av bergöveryta/förekomst av block. Här är målsättningen att även undersöka större djup speciellt för tillämpning av styrd borring i lösa jordlager.

Sammanlagt föreslås 3-5 utrustningar testas och utvärderas i olika geologiska miljöer.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord	1
1. Markradar	2
1.1. Princip	2
1.2. Teoretisk bakgrund till markradarsystemet	3
1.3. Hur fungerar en markradar under svenska förhållanden?.....	5
1.4. Radarmätteknik.....	5
1.4.1. Energiförlust och dämpning	5
1.4.2. Penetration.....	6
1.4.3. Vertikal upplösning	6
1.4.4. Horisontell upplösning	6
1.4.5. Djupkonvertering, elektromagnetiska hastigheter.....	6
1.4.6. Antenner	7
1.4.7. Mjukvara	7
1.5. Referenser	8
2. Utrustningar för markradar	9
2.1. Allmänt	9
2.2. Utrustningar för markundersökningar	9
2.3. Utrustningar för ledningslokalisering	10
2.3.1. Små mobila georadarutrustningar	10
2.3.2. Olika typer av mätstrategi	12
2.3.3. Slutsatser från artikel presenterad på IGU – 20th World Gas Conference Proceedings, Copenhagen 1997. Print 1	12
3. Alternativa/kompletterande geofysiska metoder	14
3.1. Magnetiska metoder.....	14
3.1.1. Teori	14
3.1.2. Djuppenetration, vertikal och horisontell upplösning:.....	15
3.1.3. Korta kommentarer:	15
3.2. Elektromagnetiska metoder (EM-metoder)	16
3.2.1. Teori	16
3.2.2. Djuppenetration, vertikal och horisontell upplösning:.....	16
3.2.3. Korta kommentarer:	17
3.3. Geoelektrisk motståndsmätning- Resistivitetmetoden	17
3.3.1. Teori	17
3.3.2. Djuppenetration, vertikal och horisontell upplösning:.....	18
3.3.3. Korta kommentarer:	18
3.4. Referenser	18
4. Förslag till fältprovningsplan.....	19
4.1. Syfte	19
4.2. Val av provutrustningar	19
4.3. Genomförande	20
5. Bilagor	21
5.1. Utrustningar för magnetiska metoder	21
5.2. Utrustningar för elektromagnetiska metoder	22
5.3. Utrustningar för geoelektrisk motståndsmätning - Resistivitetmetoden.....	23

Förord

Föreliggande rapport avser delprojekt 1 av projektet mobil markradarutrustning, som finansieras av Svenskt Gastekniskt Center AB. Arbetet har genomförts med SwedPower AB som uppdragsledare och ansvarig för genomförandet av förstudien som helhet. Arbetet har bedrivits i samarbete med Geovetarcenter vid Göteborgs Universitet och Gradar Geofysik i Helsingborg.

Medverkande författare till rapporten är:

Peter Wilén, SwedPower AB

Daniel Simonsson, SwedPower AB

Peter Danielsson, SwedPower AB

Katarina Wallinder, Geovetarcenter

Anita Turesson, Geovetarcenter

Roberto Grassi, Gradar Geofysik

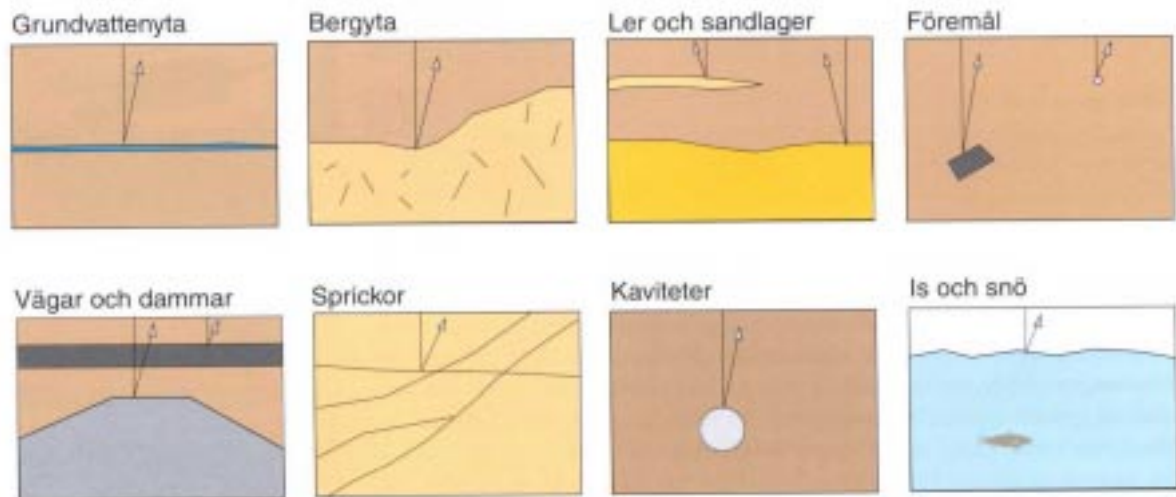
1. Markradar

1.1. Princip

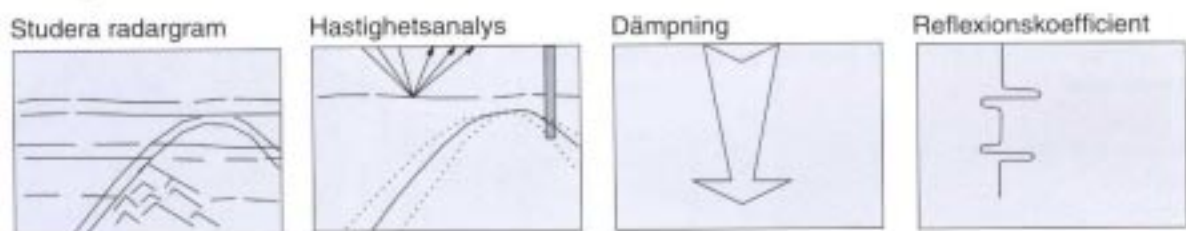
Markradarsystemet (ofta benämnd; GPR som står för ground penetrating radar) bygger på reflektion och diffraktion av elektromagnetiska vågor i marken.

Markradar används för många tillämpningar inom geologi, miljö, glaciologi, byggnation och konstruktion och arkeologi. Med markradar finns det möjlighet att skilja på olika material som t.ex. olika jordarter och berg, plast, metall, hålrum fyllda med vatten eller luft etc. (se figur 1).

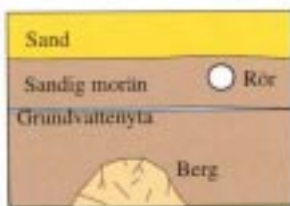
Reflektorer



Analys



Modell/tolkning



Figur 1. Exempel på användningsområden för GPR (Stanfors R., Triumph C.-A. och Emmelin A., 2001).

1.2. Teoretisk bakgrund till markradarsystemet

Med en markradar mäts kontraster av elektromagnetiska egenskaper i markprofilen. Fortplantning av elektromagnetiska vågor styrs främst av mediets dielektriska konstant¹ (eller relativa permittivitet) och konduktivitet. En elektromagnetisk våg blir delvis reflekterad/transmitterad när den möter en yta över vilken materialens dielektriska konstant skiljer sig (tabell 1). Ju större kontrasten är desto starkare blir den reflekterade signalen. Vissa material är mer genomsläppliga för radarpulsen än andra. Is är i stort sett transparent för radarpulsen medan vattenmättad lera och material mättat med saltvatten antingen absorberar eller reflekterar den större delen av energin, vilket i sin tur medför att signalen kraftigt dämpas och underliggande marklager blir svåra att registrera.

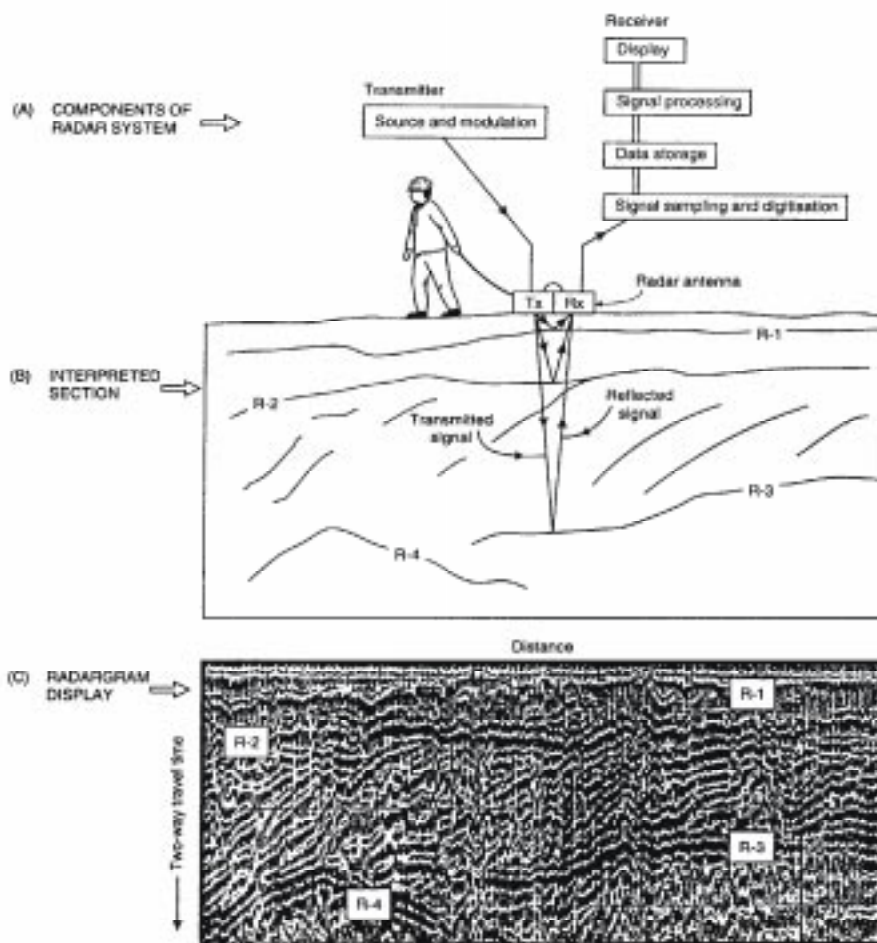
Medium	ϵ_r	Hastighet (m/ μ s)
Luft	1	300
Söt vatten	81	33
Is	3-4	150-173
Lera	4-16	74-150
Silt	9-23	63-100
Sand	4-30	55-150
Morän	9-25	60-100
Granit	5-7	113-134
Betong	4-10	95-150

Tabell 1.

Ungefärliga värden för ϵ_r (relativ permittivitet) och resulterande hastigheter för några olika medier. ϵ_r varierar stort med vatteninnehåll och ger ett hastighetsintervall, där den lägre gränsen anger hastigheten för ett vattenmättat medium, medan den högre anger hastigheten för ett torrt medium (Malå Geoscience).

Ett markradarsystem har fyra baskomponenter. En sändande och en mottagande del, en kontrollenhet och en displayenhet, vanligen en fältdator. I fältdatorn bestäms alla parametrar för mätningen, t.ex. tidsfönster, mätfrekvens och hur ofta signalen ska registreras. Kontrollenheten genererar radarpulser som utsänds via en antenn. Reflekterade signaler tas emot av mottagarantennen i analog form, omvandlas till digital form i kontrollenheten och sparas slutligen som tid och amplitud i fältdatorn. Vid kontinuerlig mätning förflyttas antennerna, med ett konstant avstånd mellan antennerna, över markprofilen i lugn gångtakt. Varje gång radarpulsen blir registrerad avsätts denna som ett vertikalt spår, ett trace, i radargrammet som successivt byggs upp på displayenheten under mätningen, med tid på den vertikala axeln och längd i meter (eller antal trace) på den horisontella axeln. Markradarsystemet kan liknas vid ett penetrerande ekolod (se principskiss av markradarsystemet figur 2).

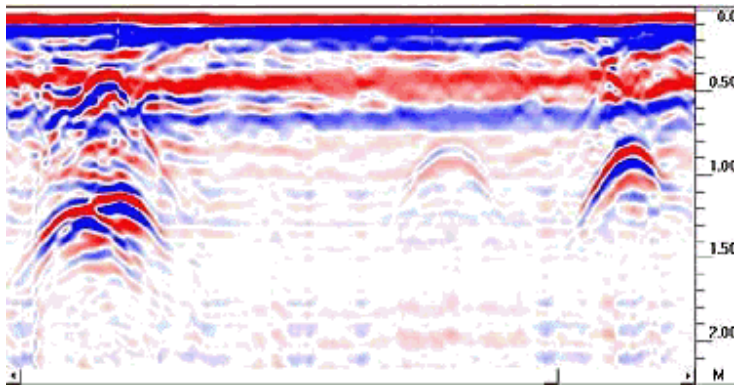
¹Ett dielektriskt material är en isolator där elektronerna är förhindrade att röra sig fritt i materialet p.g.a. bindningar till speciella atomer eller molekyler. Den dielektriska konstanten är ett mått på det aktuella materialets förmåga att försvaga ett elektriskt fält.



Figur 2. Principskiss över markradarsystemet (A), tolkad sektion (B) och ett radargram (C) (Reynolds, 1997).

För att lokalisera ledningar och rör bör mätningen utföras vinkelrätt över objekten. Mindre föremål som ledningar och rör liksom sten och block ger upphov till ett diffraktionsmönster i form av hyperbler i radargrammet. För att utesluta att hyperblerna är orsakade av sten och block, bör upprepade parallella mätningar göras i sidled för att på så sätt bekräfta den kontinuerliga utsträckningen av t.ex. ett rör.

Nedan visas ett exempel på hur rör kan se ut i ett radargram, mätningen är utförd i rät vinkel till rörens sträckning (figur 3).



Figur 3. Till vänster finns två stålror nedgrävda i samma dike med en telefonkabel ovanpå. Till höger finns ett pvc-rör och ytterligare ett stål rör nedgrävda på samma djup (Radar System Inc., hemsida).

1.3. Hur fungerar en markradar under svenska förhållanden?

Lera är vanligt förekommande på nivåer under högsta kustlinjen. Som framgår av texten nedan är inte markradar en lämplig metod för undersökningar i miljöer där lera utgör det översta marklagret eftersom signalen här ganska fort släcks ut. Morän är en mycket vanlig jordart på nivåer över högsta kustlinjen och återfinns ofta i skogsbeklädd mark. Morän är en osorterad jordart som innehåller fraktioner från ler till block. Stenar och block kan orsaka ett diffraktionsmönster i radargrammet som kan försvåra tolkningen. Det bästa resultatet med avseende på penetration och upplösning fås i sorterade sandiga jordarter och torv. Vid jämförelse av samma sediment, omättat respektive vattenmättat, är den teoretiska upplösningen större i ett vattenmättat sediment eftersom hastigheten här blir lägre men samtidigt dämpas radarvågen mer effektivt på grund av den högre dielektriska konstanten med sämre penetration som följd.

De flesta system är känsliga för kyla eftersom batterierna för strömförsörjning har sämre hållbarhet vid minusgrader. De flesta system är också känsliga för regn även om fältmässigheten här varierar för olika fabrikat. Kontakter och optiska fibrer måste skyddas från lösa partiklar för att systemet ska kunna fungera.

1.4. Radarmätteknik.

1.4.1. Energiförlust och dämpning

När en elektromagnetisk våg fortplantas i markprofilen minskar signalstyrkan p.g.a. energiförluster. Reflektions/transmissions förluster uppkommer varje gång vågen träffar på en gränssyta där medierna har olika dielektrisk konstant. Mie-spridning är en annan energiförlust orsakad av föremål med ungefär samma dimensioner som radarsignalens våglängd vilket ger diffraktioner som ses som hyperbler i radargrammet. Absorptionsförluster omvandlar elektromagnetisk energi till värme. Geometrisk spridning orsakar förluster då signalen fortplantar sig utåt från sändaren i en allt större volym.

Slutligen sker en dämpning beroende på mediets dielektriska, elektriska och magnetiska egenskaper samt signalens frekvens. Dämpningen är proportionell mot radarvågens frekvens,

ju högre frekvens desto effektivare blir dämpningen. Vattenmättade material dämpar mer än torra p.g.a. högre konduktivitet och den höga dielektriska konstanten för vatten (se tabell 1). Leror innehåller bundet vatten och har en stor elektrisk ledningsförmåga delvis beroende på lermineralens ytladdning, vilket ger en effektiv dämpning av radarsignalen och därmed ett begränsat penetrationsdjup i leror.

1.4.2. Penetration

Hur effektivt elektromagnetiska vågor fortplantas i ett medium styrs av mediets konduktivitet och dielektriska konstant samt antennens dominerande frekvens. Generellt når en lågfrekvent radarpuls djupare. För lågresistiva material, under 100 Ohmm som t.ex. leror, blir effekten av att välja en antenn med låg dominerande frekvens större jämfört med ett högresistivt medium som t.ex. torr sand, morän eller berg (Parasnis, 1997).

1.4.3. Vertikal upplösning

Vertikal upplösning anger det minsta vertikala avståndet mellan två reflekterande ytor som går att särskilja. Som tumregel är ett marklager vars mäktighet överstiger 1/4 våglängd detekterbart. Därav följer att högre frekvenser ger en större upplösning än lägre frekvenser. Minsta vertikala upplösning i ett medium med hastigheten $100 \text{ m } \mu\text{s}^{-1}$ med dominerande frekvenser på 400 MHz respektive 100 MHz är 0.06 m och 0.25 m (våglängd = hastighet/frekvens).

1.4.4. Horisontell upplösning

Den reflekterande ytan på en reflektor blir större med djupet på grund av radarpulsens konformiga fortplantning. Om det reflekterande objektet är större än diametern på radarpulsens kon, återges dess form korrekt i ett radargram. Är reflektorn mindre än radarpulsens diameter dominerar istället ett diffraktionsmönster och formen kan bli svår att urskilja. Diffraktionsmönstret kan också vara en hjälp till tolkning om syftet med undersökningen är att lokalisera föremål som kablar och rör. Den reflekterade ytans radie kan räknas ut: $\sqrt{(\text{tvåvägstimod/frekvens}) * \text{hastighet}/2}$. Som exempel blir radien på 3 m djup med antagen hastighet på $100 \text{ m}/\mu\text{s}$ för 100 MHz och 400 MHz, 1.2 respektive 0.6 m.

1.4.5. Djupkonvertering, elektromagnetiska hastigheter

Den vertikala axeln i ett radargram visar tid. Det är tiden det tar för en radarpuls att gå från den sändande enheten ner till en reflektor och tillbaka till den mottagande enheten, dvs tvåvägstimod. Det enklaste sättet att erhålla ett djup i meter är att korrelera med en reflektor på känt djup. Om det inte finns några kända djup i mätprofilen kan hastigheter mätas på plats genom att mäta samma punkt med ökat avstånd mellan två antennerna (förutsätter löstagbara antenner). Vid efterföljande bearbetning av fältdata kan tid/avstånds-funktionen lösas och medelhastigheter ner till olika reflektorer erhållas. Ett tredje sätt är att använda tabellvärden (tabell 1) för elektromagnetiska hastigheter vilket dock ger en större osäkerhet i djupberäkningarna. I tabell 1 ges ungefärliga elektromagnetiska hastigheter för några olika material.

1.4.6. Antenner

Valet av antenner innebär en balans mellan penetration och upplösning. En lågfrekvent antenn ger en radarpuls som penetrerar djupare men har samtidigt en större våglängd som i sin tur ger sämre upplösning, medan en högfrekvent antenn genererar en radarpuls med kortare våglängd med högre upplösning men som istället dämpas fortare. För geologiska material används oftast radarvågor i frekvenser mellan 25 till 500 MHz.

Oskärmade lågfrekventa antenner är primärt gjorda för djuppenetrerande undersökningar. Skärmade antenner är speciellt lämpade för urban miljö. Den dominerande frekvensen är kopplad till längden på antennen, en lång antenn ger låga frekvenser medan en kort ger höga frekvenser. De flesta antenner har ett smalt frekvensområde vilket gör att för att snabbt kunna variera mellan djupare penetration och högre upplösning i undersökningen behövs radarsystem med flera antenner, s.k. "multichannel radar systems".

Många antenner har nackdelen att de måste vara i nära kontakt med markytan, vilket kan ställa till med problem vid ojämnt underlag då förvrängning eller kluster i radardata kan uppkomma. Detta problem kan också uppkomma om stora (lågfrekventa) antenner används på icke plant underlag. Alternativa antenner som inte behöver lika nära kontakt med underlaget är icke plana antenner som "TEM-Horn" och "Hemispherical Butterfly Dipole (HBD)".

Den tunna kopparplatta som sänder ut radarsignalen ner i marken hos många antenner kan börja vibrera om den utsända energin blir för hög, s.k. "ringing", vilket kan allvarligt störa mottagarantennen. "HBD"-antennen har inte detta problem.

Antennsystem består antingen av en antenn som växlar mellan mottagning och sändning (monostatisk) eller av en sändar- och en mottagarantenn (bistatisk).

För geologiska ändamål används oftast en sändande och en mottagande antenn ("bistatic mode") men det förekommer också att en och samma antenn fungerar både som sändare och mottagare av signalen ("monostatic" mode). Antennerna genererar ett brett spektra av frekvenser, den dominerande frekvensen namnger antennen. En 100 MHz antenn har alltså en dominerande frekvens på 100 MHz och dessutom är bandet ca 100 MHz brett, d.v.s. antennen alstrar frekvenser från ca 50 till 150 MHz.

1.4.7. Mjukvara

Mjukvaran till georadar är schematiskt uppdelad i två delar - första delen tar emot och lagrar geodata från mottagande antenn och den andra analyserar och presenterar resultaten. De flesta georadarsystem har någon sorts presentation av data i fält för att förenkla mätningarna.

De större tillverkarna av georadarsystem inkluderar mjukvara i produkten men det finns också oberoende mjukvaror som kan ta emot data från dessa system för analys och presentation.

De flesta mjukvaror innehåller ett baspaket med varierande funktioner beroende på tillverkare. Baspaketet innehåller ofta funktioner som t.ex. signalfiltrering, djupberäkning, profil presentation och redigering av data. De olika baspaketen kan ofta kompletteras med diverse moduler för mer specifika analyser och presentationer som t.ex. väganalyser och 3D presentationer.

Vid lägesbestämning av mätområdet används bl.a. GPS, laser eller mätjul. Vilken lägesutrustning som används beror på val av antensystem och tillverkare.

1.5. Referenser

Den teoretiska delen av rapporten har i huvudsak inhämtats från nedanstående litteratur, vilken också kan rekommenderas för djupare teoretisk kunskap om markradarsystemet:

Reynolds J. M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics

Parasnis D. S., 1997, Principles of applied geophysics

Stanfors R., Triumf C.-A. och Emmelin A., 2001. Geofysik för bergbyggare. SveBeFo K15, ISBN 91-631-0633-7

2. Utrustningar för markradar

2.1. Allmänt

Studien visar att det troligen är svårt att hitta en metod/ utrustning som fungerar tillfredställande både för lokalisering av ledningar och för markundersökningar. Nedan beskrivs kort några olika typer av utrustningar och undersökningsmetoder.

2.2. Utrustningar för markundersökningar

Vilken utrustning som används för markundersökningar i rural miljö beror på önskat djup och upplösning, men i första hand används olika oskärmade antenner med låg frekvens. Vid val av utrustning för markundersökningar bör lämpligt system väljas utifrån terrängtyp, jordartsförhållanden, önskat djup och precision. Terrängtyp påverkar vilka system som är praktiskt användbara och de återstående faktorerna påverkar val av antennfrekvens. På marknaden finns ett antal olika utrustningar för markundersökningar. Följande tre tillverkare har produkter för professionella användare och kan anses likvärdiga:

- Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI). (<http://www.geophysical.com>).
Amerikanskt företag som tillverkar SIR systemet för markundersökningar. Oskärmade antenner mellan 15 och 120 MHz (35 och 70 MHz antenner tillverkas av Radarteam, Sverige) och skärmade mellan 100 och 1000MHz. Utrustningen kan monteras på tvåhjulig vagn. Mjukvaran RADAN för Windows eller Windows NT är baspaket. Kompletterande moduler för bl.a. 3D visualisering finns. Återförsäljare finns i Sverige: Radarteam Sweden AB.
- Malå Geoscience. (<http://www.malags.se>).
Svenskt företag som tillverkar ett komplett markradarsystem, Ramac/GPR. Till detta kan väljas oskärmade antenner; 25, 50, 100 och 200 MHz och skärmade; 100, 250, 500, 800 och 1000 MHz. Dessutom utvecklar Malå skräddarsydda radarsystem för speciella ändamål. Systemet är flexibelt, t.ex. används en och samma kontrollenhet för alla typer av antenner. De oskärmade antennerna monteras på en träram som gör det möjligt för en person att utföra mätningen. De skärmade antennerna är monterade i en box med draghandtag. Kontrollenheten bärs på ryggen och fältdatorn på magen. Det finns även andra tillbehör som underlättar fältmätningen. Mjukvaran Easy3D är baspaket.
- Sensors & Software. (<http://www.sensoft.on.ca>).
Kanadensiskt företag som tillhandahåller två olika kompletta markradarsystem: PulsEKKO-systemet och NoggIn-systemet. PulsEKKO-systemet är utformat för professionella användare och komplexa uppgifter, medan NoggIn-systemet är tänkt för att snabbt och lätt få en bild av undergrunden och för användare utan speciell erfarenhet av markradarundersökningar. Systemet PulsEKKO 100 GPR är designat för djupare geologiska undersökningar. De oskärmade antennerna har centrumfrekvenser på: 12.5, 25, 50, 100 och 200 MHz. Handtag är monterade på antennerna men dessa är inte hopkopplade med varandra. Antennerna kan också monteras på en släde eller efter ett fordon. Systemet PulsEKKO 1000 GPR är tänkt för tillämpningar där upplösningen är viktig. Systemet är med sina skärmade antenner optimerat för urbana miljöer. Antennernas centrum frekvenser är: 110, 225, 450, 900 och 1200 MHz. Antennerna är monterade i en

box försett med ett handtag som operatören kör framför sig. Mjukvaran EKKO_run är baspaketet för pulsEKKO-systemet. Kompletterande moduler för bl.a. 3D visualisering finns. Återförsäljare finns i Sverige.

2.3. Utrustningar för ledningslokalisering

För att lokalisera ledningar av olika typer finns det på marknaden ett antal olika typer av radarutrustningar. Dessa är i de flesta fall relativt lättanvända i urban miljö. Nedan i kapitel 2.3.3 redovisas en kort sammanfattning av en studie av tre stycken sådana utrustningar. Studien presenterades på en IGU-konferens 1997.

2.3.1. Små mobila georadarutrustningar

På marknaden finns idag ”portabla” georadarutrustningar på hjul som till utseendet liknar en gräsklippare. Dessa är framtagna främst för och mest lämpade för ledningslokalisering i urban miljö. Här följer en kort beskrivning av några av de på marknaden tillgängliga små mobila georadarutrustningar:

- **EKKOSCAN ULL.** Tillverkas av Ekko Dane Production A/S, Danmark (<http://www.ekkodane.dk>). Vagnsystem med tre hjul. Systemet har ett penetrationsdjup på 1.5 m och en positionsupplösning på +/- 3 cm till +/- 10 cm. Vikt för systemet är 29 kg.
- **GPR-8.** Tillverkas av KODEN Techno-Info.Co., Japan (<http://koden-electronics.co.jp>). Modellen har en antenn på 350 MHz och används av vissa gasbolag i Japan och Korea.
- **Interragator II** (se figur 4). Tillverkas av Vermeer, USA (<http://www.vermeer.com>). Vagnsystem med två hjul och frekvens på antennerna är 300 MHz. Upplösningen hävdas vara 0.02 meter på 0.46 meter djup och högsta penetrationsdjup är 6.1 meter. Vikt för hela systemet är 37 kg och operativ temperatur är 5 – 45°C. Mjukvara för analyser i Windows NT miljö. Svensk återförsäljare finns: Nordisk Vermeer, Staffanstorp.
- **Noggin250, Noggin500 och Noggin1000.** Tillverkas av Sensors & Softwares. (<http://www.sensoft.on.ca>). Systemen kan kompletteras med en fyrahjuls vagn. Antennernas centrumfrekvens framgår av namnen på systemen. Noggin250 är tänkt till djupare undersökningar på 5-10 meter enligt Sensor & Software, Noggin500 till ett djup på 3-5 meter och Noggin1000 till ett djup på 1 meter men med en bättre upplösning jämfört med föregående. Antennvikt är respektive 7.3 kg, 3 kg och 2.3 kg. Operativ temperatur för alla tre systemen är -40-+40°C. Mjukvaran möjliggör analys i fält eller senare analys på PC. Återförsäljare finns i Sverige.
- **Pathfinder** (se figur 4) . Tillverkas av Geophysical Survey Systems Inc. (<http://www.geophysical.com>). Vagnsystem med 4 hjul och två transmitterande och fyra mottagande antenner med centrumfrekvens på 300 MHz. Optimerad för bästa upplösning på djup mellan 1-4 meter. Mjukvaran Radan-NT för Windows NT används både för datainsamling och analys. Data

kan visualiseras i 3D och kan exporteras till GIS och CAD system. GPS eller laser kan användas för positionsbestämning. Återförsäljare finns i Sverige: Radarteam Sweden AB.

- **Pipehawk.** Tillverkas av Emrad, UK (<http://www.emrad.com>).
Vagnsystem med två hjul och två utbytbara antenner. 1GHz för penetrationsdjup till 1.5 meter och 150MHz för djup till 2.5 meter. Vikt för hela systemet är 44 kg och operativ temperatur är 0 – 45°C. Kontrollsystemet är flexibelt och samma system används för båda antennerna, som är enkelt att byte mellan. Mjukvaran medföljer systemet och är PC kompatibel.
- **Ramac/GPR Cart.** Tillverkas av Malå Geoscience. (<http://www.malags.se>).
Standardutförande är en fyrehjulig vagn med en 500MHz skärmd antenn och Ramac/GPR kontroll enhet. Denna antenn används för detektionsdjup upp till 4.5 meter. Vikt för vagn och antenn är 12 kg. Kontrollsystemet är samma för alla antenner och mjukvaran Easy 3D visualiserar resultaten i 3D.
- **SPRscan.** Tillverkas av ERA Technology, UK (<http://www.era.co.uk>).
Vagnsystem med två hjul och fyra enkelt utbytbara antenner på 250 MHz, 500 MHz, 1GHz och 2 GHz. Antennen på 500 MHz är mest lämpad för ledningslokalisering och har ett penetrationsdjup på 1.5-2 meter. Enligt ERA klarar systemet av 70-80% av brittiska jordar, som ofta innehåller mycket lera. Mjukvaran ger direkt visualisering i färg vilket kan underlätta i mätningen.

Det finns även större system för ledningslokalisering i urban miljö, bl.a. Malå Geoscience's CART som väger flera hundra kilo och måste dras av en bil. Fördelar med CART är att det går att välja vissa antennfrekvenser efter önskat djup och att den täcker en bredd av 2.5 m i ett svep. Nackdelar är tyngden och storleken på utrustningen. Figur 4 visar två exempel på ledningslokaliseringsutrustning.



Figur 4. Exempel på ledningslokaliseringstrustning, Interrigator II och Pathfinder.

2.3.2. Olika typer av mätstrategi

Vid mätningar kan det ibland vara lämpligt att använda olika typer av mätupplägg eller mätstrategi avseende mätgeometrier. Detta kan krävas för att få en säkrare uppfattning om objektets riktning och utsträckning. Olika tänkbara varianter på mätgeometri är :

- Parallella profiler, för hela sträckan eller bara vid lokaliserade objekt.
- Mätning i ett rutnätsmönster
- Cirkulära mätningar
- Kryssningsmetoden. Georadarn dirigeras omväxlande till höger och vänster sida om den sökta ledningen vilket ger sträckningen på ledningen.
- "Wild cat" Kortare mätprofiler i intressanta partier och i olika riktningar.

Vilken typ av mätupplägg man väljer är beroende på de förutsättningar och vilket syfte man har med mätningarna i det aktuella fallet.

2.3.3. Slutsatser från artikel presenterad på IGU – 20th World Gas Conference Proceedings, Copenhagen 1997. Print 1

Artikelns titel är "DO-02: Performance of radar systems used to locate buried services and free underground areas for pipe laying". Artikeln redovisar en undersökning av tre representativa impulsradarutrustningar som alla är kommersiellt tillgängliga (dock ej namngivna i artikel). Kraven på utrustningarna var bland annat att lokaliseringen av ledningar skulle ske direkt i fält med tillräcklig precision i plan och djup och att de skulle vara

tillräckligt användarvänliga. De skulle dessutom vara portabla och handhas av en till två personer och tåla de förhållanden som ofta föreligger i fält. Utrustningarna testades avseende prestanda och användbarhet både i laboratoriemiljö och i fält.

Erfarenheterna från försöken visar att radarsystemen för närvarande är mest lämpliga att användas av erfarna användare. Detta p.g.a. att det krävs stor erfarenhet och "kritiska ögon" för att tolka resultaten på ett bra sätt.

Det visade sig att det förelåg en ganska stor skillnad mellan de olika utrustningarna där en av utrustningarna var betydligt sämre än de två andra.

Försöken visar också att när det är markförhållandena är lämpliga (sorterade jordarter t ex sand) så fungerar radarn bra för att hitta exakta positioner för ledningar. Om det förekommer lera i marken så är dock dessa utrustningar inte särskilt lämpliga.

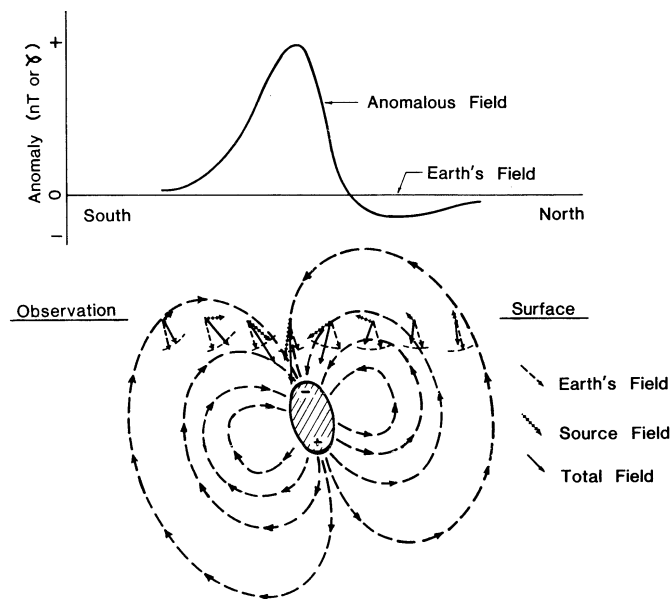
En annan slutsats är att metoden kan användas för att lokalisera ledningsfria områden där schaktfri ledningsdragning, styrd borring, rördrivning etc., skall användas. Det kan även vara lämpligt att kombinera radarmätningarna med "traditionella" rör- och kabellokaliseringsutrustningar.

3. Alternativa/kompletterande geofysiska metoder

3.1. Magnetiska metoder

3.1.1. Teori

Magnetiska metoder bygger på mätning av störningar i jordens totala magnetfält skapade av magnetiska källor under markytan. Man kan mäta magnetfältets styrka och/eller riktning.



Figur 5. Schematisk illustration av jordens magnetiska fält och den loka störningen som tillsammans producerar det observerade totala magnetiska fältet (ur Hinze, 1990)

Det finns två huvudtyper av instrument för mätning av magnetfältet:

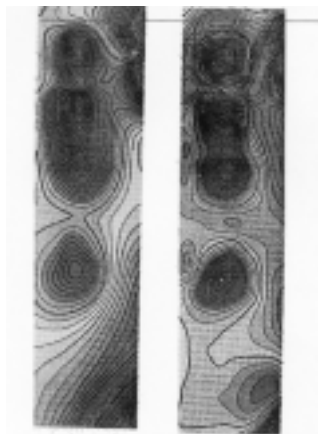
Fluxgatemagnetometrar, är så kallade vektorinstrument och mäter magnetfältets riktningar, vanligen vertikalkomponenten.

Protonmagnetometrar och Overhausermagnetometrar mäter totalfältets styrka, dessa kan även användas för att mäta vertikalgradienten med hjälp av två sensorer separerade i höjdd - gradiometermätning.

För att detektera marknära magnetiska objekt kan proton- eller overhausermagnetometrar rekommenderas. De består i huvudsak av 2 delar, en sensor och en dataenhet. Utrustningen är bärbar och kan användas av en person, vanligen placeras sensorn på en stav som man håller i en hand och dataenheten hängs i sele på kroppen. Vanligen mäts ett antal punkter längs en linje och totalfältets värde visas direkt på en display. Data lagras i instrumentet och kan vid dagens slut föras över till en dator för vidare bearbetning. Själva mätförloppet kan snabbt läras, men tolkning av data kräver dock viss erfarenhet.

Det kan vara nödvändigt att även placera ut en basstationsmagnetometer som kontinuerligt mäter magnetfältet på en plats för att kunna korrigera mätningarna för den dagliga variationen i magnetfältet.

Man kan mäta enstaka profiler och göra en två dimensionell modell av marken (figuren ovan), alternativt kan man mäta i ett rutnät och erhålla en konturkarta (figuren nedan).



Figur 6. Konturer av uppmätt magnetiskt totalfält (till vänster), samt konturer av uppmätt vertikalgradient (gradiometer) över nedgrävda stålrummor. Konturintervall: 100 nT. Gradiometermätningen ger högre lateral upplösning.

3.1.2. Djuppenetration, vertikal och horisontell upplösning:

Generellt avtar signalstyrkan snabbt med avståndet från objektet och det är rimligt att anta att ledningar och enstaka metallobjekt kan kännas av på 2-3 meters djup.

Den horisontella upplösningen begränsas av storleken på föremålet. Mätavstånd bör anpassas till halva djupet av det grundast liggande objektet som eftersöks.

3.1.3. Korta kommentarer:

- Kan användas i de flesta geologiska avlagringar för att finna metallobjekt och ev. grunt belägen berggrundsytta.
- Skall man kartera djup till berg kan det vara lämpligt att mäta magnetisk susceptibilitet (visar hur magnetiskt ett material är) på hållmark i närheten för att använda i modelleringen. (susceptibilitetsmätare är rel. billiga och lätta att hantera)
- En person kan, beroende på terrängtyp och valt punktavstånd, mäta 50-60 punkter i timmen.
- Relativt billiga att hyra, numera ingår digital datainsamlingsenhet, ofta snabb överföring till PC för databehandling.
- Elektriska stängsel och fordon mm ger utslag i mätningarna – viktigt att anteckna passage av ex el-staket för att kunna tolka resultatet.
- Rekommenderas ej för mätning i stadsmiljö.
- Den magnetiska signalen är komplex, kvantitativ tolkning fordrar kvalificerad personal.

Exempel på utrustningar redovisas i *bilaga 5.1*.

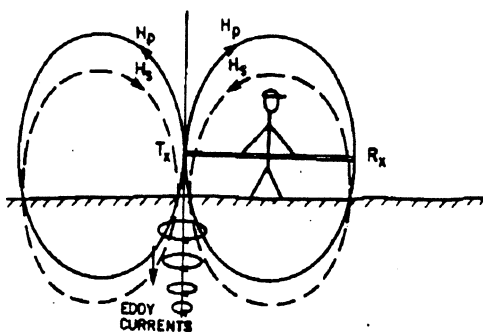
3.2. Elektromagnetiska metoder (EM-metoder)

3.2.1. Teori

Trots att även markradar är en metod som bygger på elektromagnetiska vågors utbredning i marken skiljer sig de underliggande principerna en del åt jämfört med andra elektromagnetiska metoder (EM-metoder). Medan radar ger en bild av strukturer och lagerföljder i marken ger EM-metoderna mer ett mått på markens ledningsförmåga.

Det finns ett flertal olika typer av instrument som bygger på elektromagnetiska metoder, den metod som mest kan komma till användning för att detektera marknära ledande objekt är markkonduktivitet, en EM-metod som direkt mäter markens medel elektriska konduktivitet

Metoden fungerar på det sätt att en sändare producerar ett tidsvarierande elektromagnetiskt primärt fält med en viss frekvens. När detta fält tränger ned i marken skapar det en spänning som i sin tur ger upphov till en ström som går igenom ledande lager under markytan. Denna ström skapar i sin tur ett sekundärt magnetiskt fält som kan mätas av en mottagare. Det sekundära fältet är proportionellt med markströmmen och därför även markens ledningsförmåga.



Figur 6. Schematisk skiss - elektromagnetisk induktion (EEGS, 1998)

Fördelar som alternativ till markradar:

På grund av att en lägre frekvens används för EM-metoderna släcks signalen inte ut lika snabbt i jordar med god ledningsförmåga.

Nackdelar som alternativ till markradar:

Endast ledande föremål kan detekteras, vilket t ex utesluter detektion av plaströr.

Oftast mäter man i ett rutnät och mätresultat presenteras ofta som konturkartor.

3.2.2. Djuppenetration, vertikal och horisontell upplösning:

Penetration och upplösning beror av använd frekvens, avstånd mellan sändare och mottagare, geometri samt kontrasten mellan omgivningen och det man söker efter (1/4 eller 1/2 spol separation).

3.2.3. Korta kommentarer:

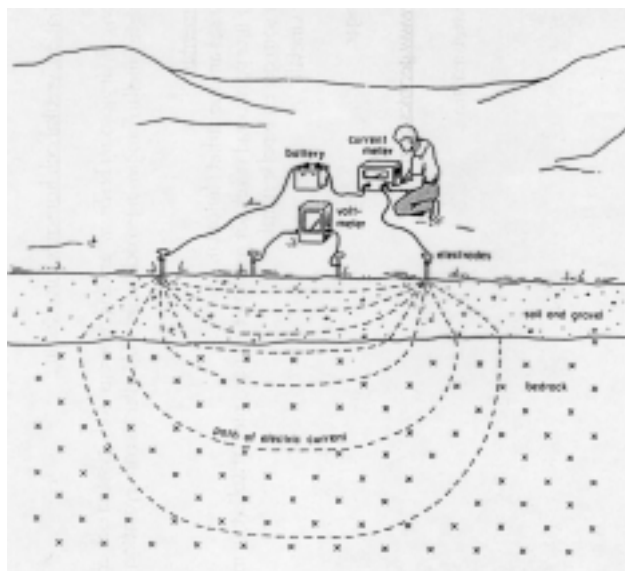
- Kan användas i de flesta geologiska material.
- Signalen är inte polariserad vilket gör resultatet aningen mer lätttolkat än magnetiska mätningar som ger en bipolär signal.
- Användbar för detektion av ledningar (metall), men även geologiska variationer i marken
- Högkonduktiva objekt som är mindre än avståndet mellan sändare och mottagare producerar en negativ signal

Exempel på utrustningar redovisas i *bilaga 5.2*.

3.3. Geoelektrisk motståndsmätning- Resistivitetsmetoden

3.3.1. Teori

Det finns ett antal olika metoder för geoelektriska mätningar. Man kan utnyttja jordens naturliga elektriska fält eller själv tillföra ström till marken. Resistivitetsmetoden sker vanligen genom att ström förs ned i marken med hjälp av ett par elektroder, och man mäter den genererade spänningsdifferens mellan två andra elektroder. Det uppmätta motståndet (spänningen/strömmen) kan sedan räknas om till ett resistivitetsvärde. Genom att öka avståndet mellan strömelektroderna kan man mäta resistiviteten på ett större djup i marken.



Figur 8. Traditionell resistivitetsmätning, med två strömelektroder och två potentialelektroder (Robinson och Coruh, 1988).

Mark med stort elektriskt motstånd - låg ledningsförmåga - kan representeras av grovkorniga friktionsjordar. Mark med litet elektriskt motstånd - hög ledningsförmåga - representeras av finkorniga - kohesionsjordar. Metoden kan (med kalibrering från borrhning) urskilja olika jordarter, större block och djup till berg.

Traditionella resistivitetssonderingar bedöms för detta ändamål som en för långsam metod. Dock finns det en relativt nyutvecklad metod där elektroderna inte behöver stickas ned i marken utan ligger ovanpå marken och mätning kan utföras under transport. Resistivitetmetoden kan användas som alternativ metod till markradar, för att t ex finna en grunt belägen berggrundsytta samt stora block. En fördel med resistivitetmetoden jämfört med markradar är att dess förmåga inte släcks ut på grund av förekomst av lera.

3.3.2. Djuppenetration, vertikal och horisontell upplösning:

Teoretiskt, finns det ingen gräns för penetrationen för metoden, utan den beror till stor del på valt elektrodavstånd och typ av mätmetod – välj elektrodavstånd som lämpar sig för den aktuella uppgiften. Horisontell upplösning begränsas av avståndet mellan potential- elektroderna samt strömelektroderna. Vertikal upplösning varierar beroende av materialet, men generellt kan man säga att det är svårt att skilja ut ett lager som är tunnare än djupet till dess övre begränsningsytta.

3.3.3. Korta kommentarer:

- Fungerar i de flesta geologiska miljöer, problem kan dock uppstå vid allt för stora resistivitetkontraster.
- Fungerar bra på lerjordar
- Kan urskilja ytnära berg och ev. block
- Mätning i stadsmiljö kan bli praktiskt svårt.
- Ledningar kan troligen detekteras om avståndet mellan mätpunkterna är kort.

Exempel på utrustningar redovisas i *bilaga 5.3*.

3.4. Referenser

Den teoretiska delen av rapporten har i huvudsak inhämtats från nedanstående litteratur, vilken också kan rekommenderas för djupare teoretisk kunskap om de alternativa metoderna:

Robinson, E.S and Coruh, C. (1998). Basic Exploration Geophysics, Wiley, New York.

Hinze, W.J. (1990) The Role of Gravity and Magnetic Methods in Engineering and Environmental Studies.

Greenhouse, J. And Slaine, D. (1999). Applications of Geophysics in Environmental Investigations. SAGEEP 1999.

4. Förslag till fältprovningsplan

4.1. Syfte

Utprovning av markradarutrustning har två syften:

- 1) Lokalisering av ledningar, aktuellt huvudsakligen i urban miljö, även dräneringsledningar i jordbruksmark.
- 2) Markundersökning, geologiska förhållanden. För ledningsförläggning är särskilt djup till berg och förekomst av block av intresse.

4.2. Val av provutrustningar

Fältprovningen föreslås utföras med några olika utrustningar som lånas eller hyrs in för detta.

- 1) Ledningslokalisering. Utprovning av en eller två utrustningar direkt utvecklade för ledningslokalisering. En utrustning där metoden baseras på flera antenner och samtidig mätning i olika riktningar samt en utrustning med en antenn och där metoden baseras på databearbetning i systemets mjukvara.

Plats: I urban miljö där uppgrävning skall utföras eller nyligen är gjord och där en exakt dokumentation av befintliga ledningar finns. Det är en fördel med ledningar på olika djup och av olika material, plast och metall. Eftersom dessa system sannolikt har en begränsad penetrering i lerjordar bör proven göras i sandigare jordar. Inledningsvis bör penetrationsförmågan i lera dokumenteras genom försök. Resultat från fältprover utomlands visar på liten penetrering i leriga jordar och därför avser vi inte undersöka ledningslokalisering under dessa svåra förhållanden. Försöken bör kunna göras i Göteborg men det finns lokaler som är bättre och lämpligare undersökningsplatser ska sökas.

Eventuellt testas en ledningslokaliseringsutrustning och en vanlig markradarutrustning med olika mätmetodik. Förutom direkta mätresultat skall även användbarhet och kostnad utvärderas.

- 2) Markradarutrustning. Utprovning av två utrustningar i lera, sandiga sediment och i moränmark. Avsikten är att utprova två utrustningar med några olika antenner. Av särskilt intresse är penetrationsförmåga och upplösning. Detta görs på platser där urschaktning för noggrann dokumentation inom kort tid eller direkt efter mätning skall göras. Provtagning och analys av jordprover avses även utföras. Detta göra förslagsvis vid pågående ledningsarbeten för gasledning eller någon annan ledningstyp. (Det är även möjligt att göra vid någon annan typ av entreprenadarbeten.)

Plats: Samtliga jordtyper som avses undersökas finns på i Göteborgstrakten. När det gäller lera bör både marin och sötvattenavsatt lera undersökas.

Förutom markradar avses även en resistivitetsutrustning testas främst för markundersökning. Detta ska göras samtidigt på samma platser som med radarutrustningarna. Det ska vara en lätt resistivitetsutrustning som mäter samtidigt som den dras fram på marken. Inga av de andra

beskrivna elektromagnetska metoderna anses ge önskvärd information på ett enkelt sätt och föreslås inte ingå i fältförsöken.

4.3. Genomförande

Utrustningen lånas eller hyrs av SGC för genomförande av testerna. Hanteringen av utrustning görs antingen enbart av SwedPower AB eller tillsammans med personal från respektive radarföretag.

Gemensamt arbete:

- 1) Planering av tester, lokalisering och kontroll av lämpliga undersökningsplatser.
- 2) Kontakt med radarföretag och detaljplanering av genomförande av tester, tidplan mm.

Ledningslokalisering:

Mätningen utförs under 2-3 dagar på en eller två försöksplatser. Uppgrävning och dokumentation utförs i anslutning till testet.

Markundersökning

Mätning utförs under 2-3 dagar med 2-3 utrustningar på minst två försöksplatser. Uppgrävning och dokumentation kan göras vid ett senare tillfälle.

Provtagning av jordmaterial, laboratorieanalyser, inmätning av ledningar mm vid grävning.

- 3) Dokumentation, sammanställning och redovisning i rapport

5. Bilagor

5.1. *Utrustningar för magnetiska metoder*

Geometrics, USA

Webbadress: www.geometrics.com

G-858 MagMapper, bärbar Cesium Magnetometer/Gradiometer, kan även integreras med en noggrann digital positionsmätare (GPS-ag132)

G-856 bärbar Magnetometer, används primärt som basstation för att mäta den dagliga variationen i jordens magnetfält,

G-856AX, bärbar magnetometer, kan användas för industriella, miljö och arkeologiska ändamål, det finns möjlighet för gradiometermätning om större upplösning krävs, (upplösning: 0.1 nT, absolut mätnoggrannhet: 0.5 nT,), fungerar optimalt i temperaturer mellan 0° och 40°C, men klarar mätning i temperaturer från -20° till +50°C.

Mjukvara: Geometrics har egen mjukvara, men det går även att använda andra.

Scintrex Earth Science Instrumentation, Kanada

Webbadress: www.idsdetection.com

SMARTMAG, cesium magnetiskt mätsystem i olikamodeller:

Modell SM-2, basstationsmätare

Modell SM-4, kan lagra 310 000 totalfältsmätningar/750 000 basstationsmätningar

Modell SM-4G, gradiometermätningar, kan variera avståndet mellan sensorerna (0.5 , 1 eller 1.5 meter emellan) kan lagra 190 000 mätningar.

Finns möjlighet att integrera med noggrann positionsbestämning.

Mjukvara: ENVIMAP

Arbetstemp: 10 till 85°C

Känslighet: 0.01 nT

ENVI- bärbar protonmagnetometer/gradiometer

totalfält, absolut mätnoggrannhet: +-1nT

arbetar i temp -40° till 60°C

Terraplus, Kanada

Webbadress: www.terraplus.com

GSM-19 version 6.0, overhauser magnetometer, med möjlighet till gradiometermätn. och tillägg med digital positionsmätare, upplösning: 0.01 till 0.001 nT, absolut noggrannhet: 0.1 nT, kan lagra 260 000 mätningar, kan utökas till 2 millioner, arbetstemp: -40 till 60°C

5.2. Utrustningar för elektromagnetiska metoder

Geonics, Kanada

Webbadress: www.geonics.com

Konduktivitetmätare, alla bärbara 1- personsintrumet

EM38, lätt (2,5 kg), 1m lång, arbetsfrekvens: 14, 6 kHz, kan arbeta upp till 30 timmar utan uppladdning, djupnedträngning: 1.5 m,

EM31-MK2, känslig för riktningar, bra för att detektera ledningar, effektiv djupnedträngning är ca 6m

(Metalldetektor)

EM61, signalen positiv över målet, bättre upplösning om man söker efter tankar, men sämre för ledningar

Scintrex Earth Science Instrumentation, Kanada

Webbadress: www.idsdetection.com

CM-031, mäter ledningsförmågan och den relativa storleken av realkomponenten av vertikal- delen av magnetfältet som ger möjlighet till detektion av metall objekt, effektiv djuppenetration max 6m, arbetsfrekvens 9765 kHz, kan arbeta 16 timmar utan uppladdning

Terraplus, Kanda

Webbadress: www.terraplus.com

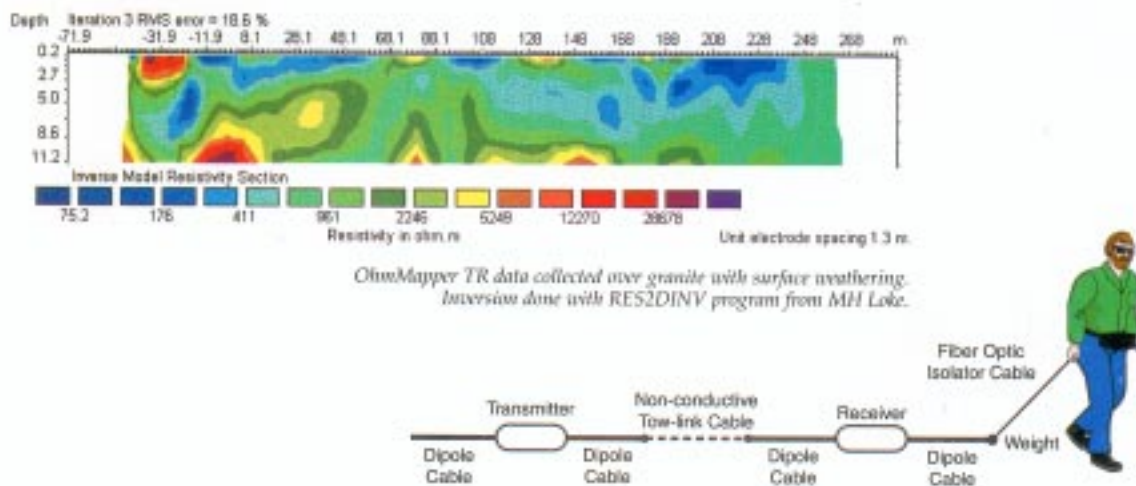
GEM-300, multifrekvent (8 325-19 975 Hz) markkonduktivitetmätare, kan välja att mäta 16 olika frekvenser samtidigt, lagringskapacitet: 240 000 mätningar, vikt: 8 kg

5.3. Utrustningar för geoelektrisk motståndsmätning - Resistivitetmetoden

Geometrics, Kanada

Webbadress: www.geometrics.com

Ohmmapper TRI™, Består av en sändare och en mottagare kopplade till en datasamlare som hängs runt midjan.



Figur 9. Principskiss av utrustningen samt exempel på resultatutseende.



SE-205 09 MALMÖ ● TEL 040-24 43 10 ● FAX 040-24 43 14
Hemsida www.sgc.se ● epost info@sgc.se
