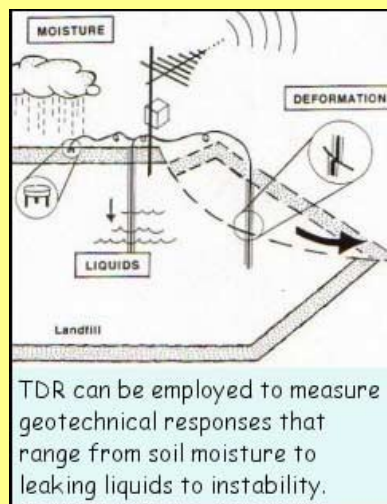




STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



TDR-mätning i Geotekniken – Förstudie

BJÖRN MÖLLER



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Varia **515**

TDR-mätning i Geotekniken
– Förstudie

BJÖRN MÖLLER

Varia	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Litteratortjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--01/515--SE
Projektnummer SGI	10955
Dnr SGI	1-0105-0328
©	Statens geotekniska institut

Förord

Föreliggande rapport beskriver tekniken för och användningen av Time Domain Reflectometry (TDR) för mätning av geotekniska och miljögeotekniska parametrar.

Rapporten har utarbetats av Björn Möller FmGeo AB och baseras på en litteraturgenomgång och deltagande i ett internationellt symposium, TDR 2001, vid Northwestern University, USA. En referensgrupp, bestående av Magnus Brusman SGI, Elke Myrhede Geo Innova och Elvin Ottosson SGI, har varit knuten till projektet. Härigenom har fakkunskap tillförts projektet vad gäller geoteknik, miljögeoteknik och elektrisk mätteknik.

Projektet har finansierats av Statens geotekniska institut.

Syftet med projektet har varit att studera vilka möjligheter det finns med TDR-tekniken inom det geotekniska och miljögeotekniska området samt att bedöma utvecklingspotential och behov av efterföljande projekt för att möjliggöra implementering av tekniken i Sverige.

I avsnitt 4, Tillämpningar, har en uppdelning gjorts i verifikationsexempel och praktiska exempel. Under rubriken verifikationsexempel visas systematiska studier som utförts under kontrollerade förhållanden medan i de praktiska exemplen beskrivs tillämpningar där syftet varit att mäta för kontroll och uppföljning i fält.

Rapporten har redigerats av Jan Lindgren, SGI.

Linköping i december 2001

Elvin Ottosson
Projektledare

Innehållsförteckning

Förord

1 Bakgrund	6
2 Fysikalisk bakgrund	8
2.1 Inledning	8
2.2 Princip för deformationsmätning i jord och berg	10
2.3 Princip för mätning av vatteninnehåll	11
3 Elektronik	12
3.1 Allmänt	12
3.2 Kabeltestutrustning (Pulsekometer)	13
3.3 Utrustning för mätning av vatteninnehåll i jord	14
3.4 Koaxialkabel/sensor	15
3.5 Installation av kablar för deformationsmätning	16
4 Tillämpningar	18
4.1 Mätning av vatteninnehåll i jord	18
4.1.1 Beskrivning	18
4.1.2 Verifikationsexempel	18
4.1.3 Praktiskt exempel	19
4.2 Deformationsmätning i berg	20
4.2.1 Beskrivning	20
4.2.2 Verifikationsexempel	21
4.2.3 Praktiskt exempel	23
4.3 Deformationsmätning i jord	24
4.3.1 Beskrivning	24
4.3.2 Verifikationsexempel	26
4.3.3 Praktiskt exempel	27
4.4 Deformationsmätning i konstruktioner	28
4.4.1 Beskrivning	28
4.4.2 Verifikationsexempel	28
4.4.3 Praktiskt exempel	28
4.5 Mätning av vätskenivåer	29
4.5.1 Beskrivning	29
4.5.2 Verifikationsexempel	30
4.5.3 Praktiskt exempel	31
4.6 Detektering av läckage och föroreningar	32
4.6.1 Beskrivning	32
4.6.2 Verifikationsexempel	32
4.6.3 Praktiskt exempel	34

5 Erfarenheter från symposiet TDR 2001	36
5.1 Soil Moisture och Hardware	36
5.2 Rock and Soil Deformation Monitoring	37
5.3 Subgrade Monitoring	37
5.4 Environmental Monitoring	37
5.5 Optical TDR and Structural Monitoring	38
5.6 Framtida utveckling	38
6 Möjliga utvecklingsprojekt	39
7 Litteraturlista	40

1 Bakgrund

Inom såväl den klassiska geotekniken som miljögeotekniken finns önskemål om att övervaka och mäta olika förhållande och förlopp för att få indikationer om status och/eller om något oönskat eller onormalt är på väg att inträffa. Det har utvecklats olika typer av både manuella och automatiska mätsystem för att kontrollera olika situationer och skeenden. Det kan t ex vara att förvarna om att risk för skred föreligger, att kontrollera läckage från deponier eller att kontrollera att grundvattenytans nivå i samband med byggnation är den som föreskrivits.

Gemensamt för idag existerande mätsystem är att det behövs elektriska givare och mätsystem som kräver omfattande installationsarbete och är relativt kostsamma i inköp. Av dessa skäl avstår man ibland från att klarlägga förhållandena och därmed blir riskbedömningen mer osäker.

Idag sker en stor utveckling, främst i USA, inom området mätning med TDR-teknik (time domain reflectometer). Tekniken baseras på att en elektrisk puls skickas in i en koaxialkabel och man analyserar den reflekterade pulsens form och energiinnehåll. På så sätt kan man t ex detektera en rörelse på djupet i jorden genom mätningar på en i jorden installerad koaxialkabel. TDR-tekniken utvecklades under 1950-talet i syfte att identifiera fel i t ex el- och telekablar. Sådana kabeltestare är i dag standardutrustning för tekniker inom områdena elkraft, tele, TV och på senare tid inom datornätverksområdet.

På 1970-talet började TDR-tekniken appliceras inom andra områden, t ex för utvärdering/bestämmning av geotekniska parametrar. Som så många andra geotekniska undersökningsmetoder, baserades även utvärderingar från TDR-mätningar på empirisk kunskap. Allteftersom åren gått har dessa empiriska relationer efter hand vetenskapligt verifierats. Metoden har även förbättrats såtillvida att modernare och mer funktionell utrustning tagits fram. Idag används tekniken inom ett flertal områden såsom geoteknik, jordbruk, markmiljö och naturligtvis eltekniken.

TDR är en indirekt repetitiv undersökningsmetod. Den är indirekt i den bemärkelsen att den storhet som mäts med hjälp av kalibreringsfaktorer kan översättas till ett mätvärde på den storhet som söks. Metoden är repetitiv eftersom det jordprov som mätningen utförs på inte förstörs, eller ens påverkas vid mätningen. I princip kan flera upprepade mätningar utföras på ett och samma jordprov. Således kan stora områden undersökas frekvent. Tänkbara tillämpningar är mätning av föroreningshalter och föroreningsspridning, bergrörelser och jordrörelser (t ex släntrörelser).

En stor mängd artiklar och dokument har genom åren publicerats inom området. 1994 hölls det första internationella symposiet inom området vid Northwestern University, Evanston, Illinois, USA.

Allmänt sett kan TDR-tekniken beskrivas som en mängd olika elektriska mätningar i syfte att bestämma läge och egenskaper hos anomalier i t ex jord och berg. TDR kan beskrivas som en endimensionell radar som består av en radiosändare, en riktad antenn och en radiomottagare. Sändaren skickar ut en känd elektrisk puls som mottagaren registrerar och genom att mäta hastigheten kan avståndet till reflektionspunkten beräknas. En analys av den reflekterande vågens geometri jämfört med den initialt utskickade ger information om anomalin. Genom detta

förfarande kan olika reflektorer längs en kabel mätas och analyseras och information erhållas från flera punkter längs en kabel. En variant är att i kabelns ände sätta en specialsond vars reflektorer kan mätas och analyseras.

Exempel på områden som idag anges för tekniken och som är mer eller mindre utprovade är:

- Detektering av skjuvrörelser i jord och berg
- Mätning av vatteninnehåll i omättade jordar
- Mätning av grundvattennivå
- Mätning av sättningar
- Detektering av läckage och föroreningar

Detektion av vätskeytor (t ex grundvattennivåer) har blivit ett snabbt växande tillämpningsområde för TDR. Vätskeytor ger nämligen kraftiga reflektioner i den typ av kablar som används vid TDR. TDR-tekniken har också visat sig lämplig att detektera läckage och föroreningar. Det område anses ha en stor potential i framtiden.

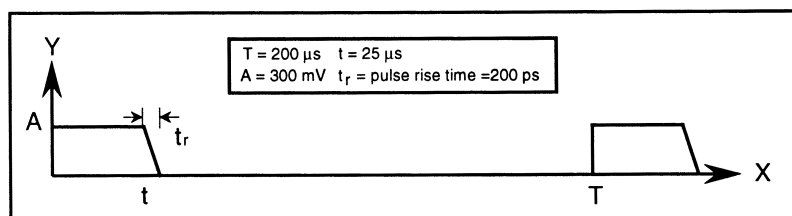
2 Fysikalisk bakgrund

2.1 Inledning

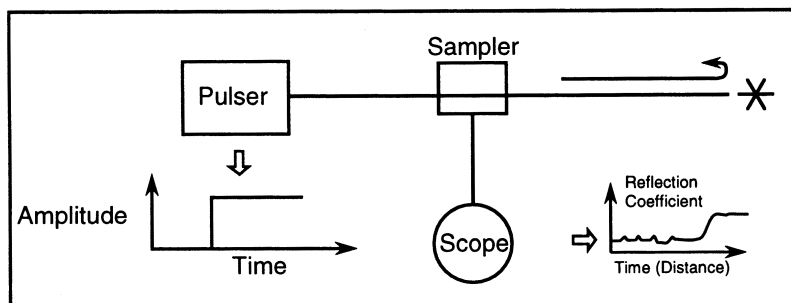
I stort fungerar TDR som en radar. En radar består av en radiosändare som skickar ut en kort elektromagnetisk puls, en riktbar antenn och en känslig radiomottagare. Efter att pulsen har skickats ut "lyssnar" radiomottagaren efter ett eko från ett föremål på avstånd mot vilket pulsen har reflekterats, t ex ett flygplan eller ett fartyg. Förutom att avstånd och hastighet kan räknas ut på basis av tiden mellan utskickad puls och mottagande av reflekterad puls, kan ekot analyseras och ge information om objektet som reflekterat pulsen. Samma principer som gäller för radar, gäller även för TDR med metalliska kablar och fiberoptiska kablar.

Avsikten med denna rapport är inte att i detalj redogöra för den fysikaliska bakgrunden och de samband som TDR bygger på. Den grundläggande idén baseras på elektromagnetiska fält och reflektioner av dessa. Läroböcker och tekniska beskrivningar inom detta område ger fullständiga beskrivningar av detta. En utförlig beskrivning av TDR ges t ex av O'Connor och Dowding (1999).

I *Figur 2.1* visas schematiskt principen för TDR-utrustningen. TDR-pulsgivaren alstrar en puls. Pulsen utbreder sig genom mottagaren och genom kabeln, vanligtvis används en koaxialkabel. Mottagaren använder en elektronisk samplingteknik för att producera lågfrekventa pulser av den högfrekventa ingångspulsen. Många pulser skickas ut och reflekteras i tiden av TDR-utrust-



a)



b)

Figur 2.1 TDR-utrustningens grundläggande komponenter; a) nominell puls (vågform); b) schematisk princip och funktion. (O'Connor och Dowding, 1999)

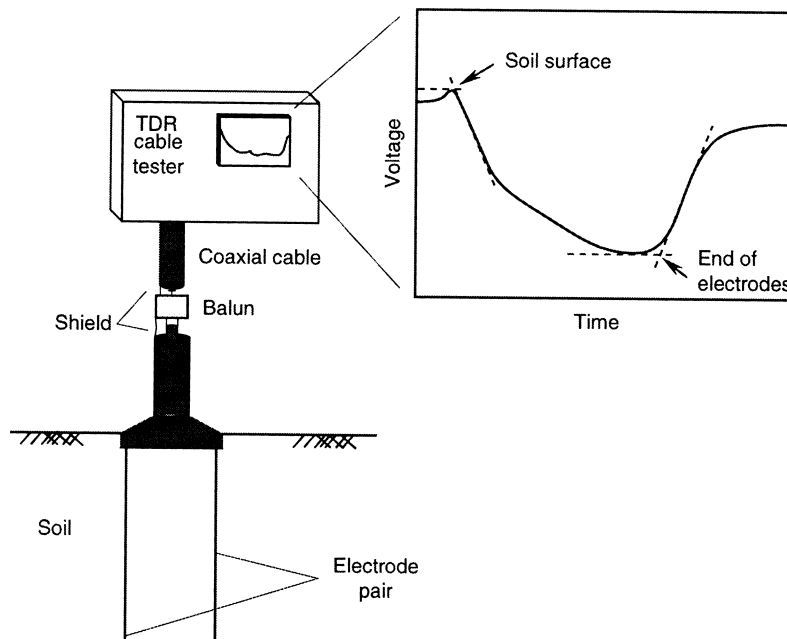
ningen. Det är därför nödvändigt att skapa en sammansatt bild av dessa reflexer. Den bild (TDR-signaturen) som erhålls visas som en reflektionskoefficient (kvoten mellan reflekterad och alstrad spänning).

Tidsskillnaden mellan en utskickad puls och den reflekterande pulsen från kabelförändringen (antingen brott eller förändring i kapacitans beroende på förändring av kabelns tjocklek) bestämmer unikt läget för förändringen. Ytterligare information kan erhållas genom att analysera utseendet, längden och amplituden av reflektionskoefficienten.

Utbredningen av en puls genom en koaxialkabel, t ex spänning och ström, kan beskrivas med fyra parametrar:

1. spänningsskillnaden mellan den yttre och inre konduktorn speglar kabelns förmåga att lagra elektrisk energi vilket uttrycks som kapacitans, C .
2. ström som leds genom konduktorn inducerar ett magnetiskt fält. Styrkan bestäms av kabelns induktans, L .
3. energiförlusten mellan de två ledarna benämns resistans, R .
4. dielektriciteten mellan de två konduktorerna har en låg konduktivitet, G , vilket också leder till energiförluster.

Enbart en koaxialkabel har funnits vara mindre lämplig för mätning av vatteninnehåll i jord. Därför har det utvecklats sonder för mätning av dielektriciteten. Dessa sonder består av två (eller flera) mätstavar som sticks ned i jorden. Detta visas schematiskt i *Figur 2.2*. Figuren visar även principen vid mätning, där pulsen utbreder sig ned genom koaxialkabeln tills den når jordelektroden. Vid markytan reflekteras en del av pulsen på grund av skillnaden i impedans vid övergången till jorden, medan en del av pulsen går vidare ned i elektroderna. En andra reflektion av pulsen sker vid änden på jordelektrodena.



Figur 2.2 System för att mäta den dielektriska konstanten i ett material mellan två elektroder. (O'Connor och Dowding, 1999)

Genom att kombinera olika typer av kablar och elektroder på en och samma mätutrustning kan flera olika storheter mätas samtidigt. Samma puls används. Skillnaden är att pulsen utbreder sig genom olika typer av kablar med olika egenskaper, vilket gör mätning av olika storheter möjlig.

2.2 Princip för deformationsmätning i jord och berg

Mätprincipen baseras på en elektrisk puls som skickas in i en kabel och analys av reflexen med avseende på tid och geometri. En elektrisk anomali i en kabel kommer att medföra att en del av den utsända pulsenergin reflekteras tillbaka. Anomalin kan fysikaliskt beskrivas som lokala förändringar av kabelns kapacitans och impedans, vilka kan ha uppstått på grund av mekanisk påverkan, inläckande vatten, skarvar och förgreningar samt jordfel i kablarna. Hur stor del som reflekteras tillbaka beror på skadans omfattning, eller egentligen hur mycket kabeln deformeras. Så länge som kabeln inte är helt av eller kortsluten vid skadestället kommer även kabelsträckan ”bakom” skadestället att kunna mätas. Med kännedom om pulshastigheten i kabeln kan avståndet till felkällan beräknas enligt ekvation (1).

$$L_{skada} = \frac{vt}{2} \quad (1)$$

Där L_{skada} är avståndet till skadan, v är pulsens hastighet och t är den uppmätta tiden.

Förhållandet mellan den utsända pulsens och den reflekterade pulsens effekt kallas reflektionsfaktor, R , som kan uttryckas med kabelns och felställets impedans, Z_{kabel} respektive Z_{fel} enligt ekvation (2).

$$R = (Z_{fel} - Z_{kabel}) / (Z_{fel} + Z_{kabel}) \quad (2)$$

Genom att mäta och beräkna reflektionsfaktorn kan denna sedan analyseras och [Tabell 2.1](#) ger en uppfattning om de slutsatser som kan dras beroende på reflektionsfaktorns storlek.

Analogin med stötvågsmätning på pålar är uppenbar. Ekvationerna 1 och 2 samt [Tabell 2.1](#) gäller också för mekaniska vågor.

Felkällorna 1–3 är lättförståeliga och ingår i många olika bedömningar som görs av såväl elektriska kablar som t ex vid integritetsmätning av betongpålar. I kategori 4 finns alla andra mätvärden som inte ges av kategori 1–3. Både i samband med analys av kablar och pålar

Tabell 1. Felkällor och reflektionsfaktor.

Typ av felkälla	Representation	Reflektionsfaktor
1) inget fel	$Z_{fel} = Z_{kabel}$	$R = 0$
2) öppen avklippt kabel	$Z_{fel} \rightarrow \infty$	$R = +1$
3) kortslutning	$Z_{fel} = 0$	$R = -1$
4) inget av 1, 2, eller 3	$Z_{fel} \neq Z_{kabel}, 0, \infty$	$R \neq 0, +1, -1$

betyder mätvärde i denna kategori någon form av anomali som skada, skarv eller kontaktdon. En ”skada” kan t ex vara en deformation av en kabel.

2.3 Princip för mätning av vatteninnehåll

Utifrån en instrumentering enligt *Figur 2.2* kan en skenbar dielektricitetskonstant, K_a bestämmas

$$K_a \approx (c/V_p)^2 = [(ct)/(2l_p)]^2 \quad (3)$$

Där c är hastigheten hos en elektromagnetisk våg i vakuum ($3 \cdot 10^8$ m/s).

V_p är utbredningshastigheten hos en spänningspuls i sonden med längden l_p

t är tiden mellan pulsens reflektion i topp och botten av sonden.

Dielektricitetskonstanten i luft är 1 och i vatten vid 20 °C 81. I vanligt förekommande torra mineraljordar är konstanten mellan 3 och 5. En liten förändring av fuktinnehållet i omättad jord ger således en signifikant förändring av jordvolymens dielektricitetskonstant.

3. Elektronik

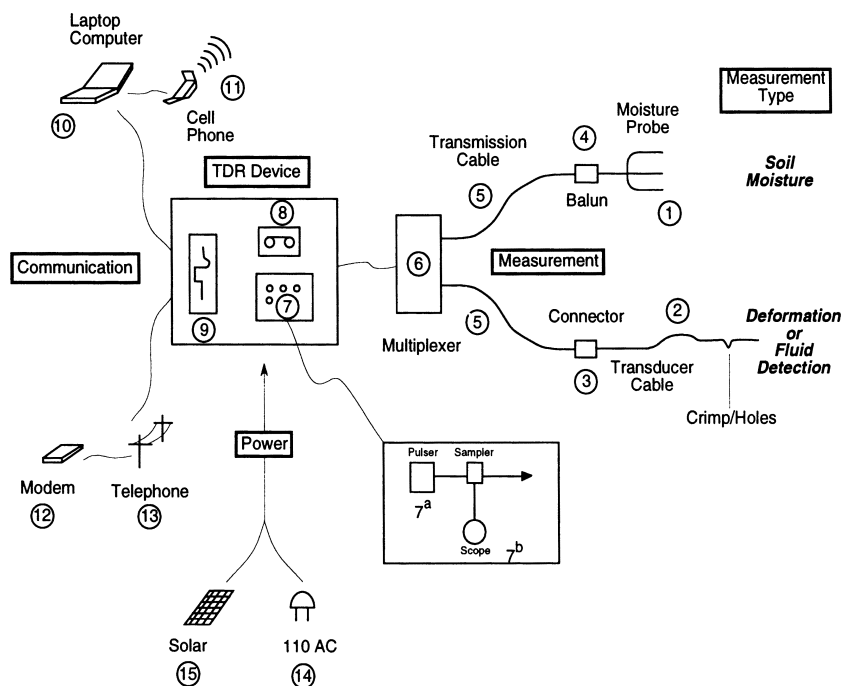
3.1 Allmänt

Inom TDR-tekniken används i stor utsträckning utrustning som finns tillgänglig inom marknaden för elektrisk mätteknik. Ett mätsystem för olika ändamål består oftast av ett antal olika standardkomponenter. Detta innebär också att utvecklingen följer den traditionella marknadens snabba förändringar mot miniaturisering och datorisering samt att komponenter blir billigare med tiden och får allt bättre hållbarhet och kvalitet.

I *Figur 3.1* visas komponenter som kan ingå i ett övervakningssystem med TDR-teknik. Som framgår är det många delar som kan ingå i vilket övervakningssystem som helst. Detta gäller t ex datakommunikation, datalagring, strömförsörjning, kablar (utom givarekablar) och sätt att mäta många kanaler samtidigt.

Utrustningen för mätning, strömförsörjning, datakommunikation, etc görs fältmässig genom inbyggnad i vattentäta skåp, se *Figur 3.2*.

Nedan redovisas allmänna synpunkter på utrustning och vad som är viktigt för TDR-tekniken.



Figur 3.1 Principfigur över olika komponenter i ett TDR mätsystem för automatisk datainsamling och övervakning. (O'Connor och Dowding, 1999)



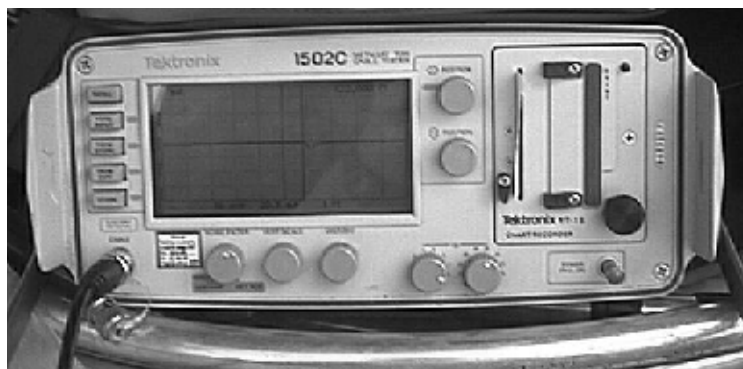
Figur 3.2 Fältmontering av ett TDR mätsystem för automatisk datainsamling och övervakning. (O'Connor och Dowding, odaterad)

3.2 Kabeltestutrustning (Pulsekometer)

Hjärtat och hjärnan i ett TDR-mätsystem är pulsekometern som är en vanlig utrustning inom branscher där kabelprovning är rutin. Det finns flera olika typer av kabeltestare på marknaden. Några utrustningar är bäst lämpade för mätning av vatteninnehåll i jord, andra är speciella för elektroniska applikationer och andra är svåra att använda eller fungerar inte för kabelmätning.

De mest mångsidiga och användbara kabeltestare för TDR-mätning är instrument ur Tektronics 1502B/C/CS serie, se *Figur 3.3*. Utrustningarna är bl. a. försedda med en display som direkt visar kabelns signatur. Strömförsörjningen sker med batteri och förloppen kan lagras och överföras till en dator via RS232 interface. Priset på utrustningen är ca \$ 9000 (år 2000). Utrustningen är relativt tung men robust och väl lämpad för fältbruk. Man kan också koppla en datalogger (CR10X) till den och på så sätt mäta flera kanaler och resultaten kan automatiskt överföras via t. ex. telenätet.

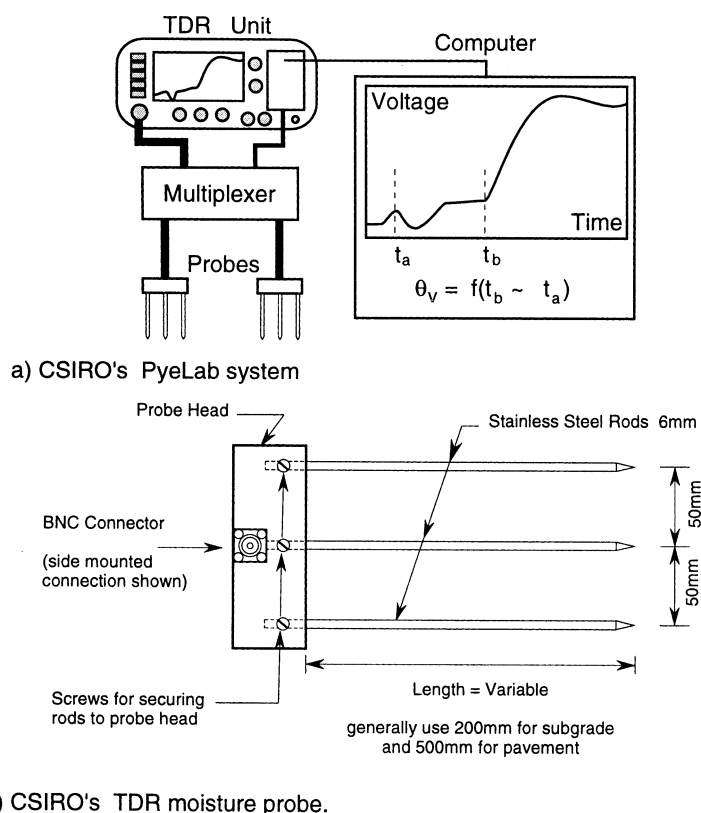
Campbell Scientific Inc. har en ny produkt, TDR 100, som anses lovande. Den kostar ca \$ 3500 (år 2000) och är mindre och lättare än Tektronics produkter. Den har ingen display men kan anslutas till en bärbar dator och därigenom kan resultaten visualiseras direkt i fält eller via en datalogger sparas eller föras vidare över telenätet.



Figur 3.3. Kabeltestare Tektronic 1502C (O'Connor och Dowding, odaterad)

3.3 Utrustning för mätning av vatteninnehåll i jord

En typisk sond för mätning av vatteninnehåll i jord består av två eller tre parallella stänger av rostfritt stål med en diameter av 2–3 mm och en längd av 15 till 50 cm. Avståndet mellan stängerna är vanligen 25 till 30 mm. Den karakteristiska TDR-vågformen beror på utrustningens utformning, tillstånd samt vilket medium den installeras i. I *Figur 3.4* visas en typisk sond med kringutrustning samt en typisk vågform från en mätning.



Figur 3.4. CSIRO's TDR-utrustning för mätning av vatteninnehållet i icke vattenmättad jord samt exempel på en sond bestående av tre elektroder. (O'Connor och Dowding, 1999)

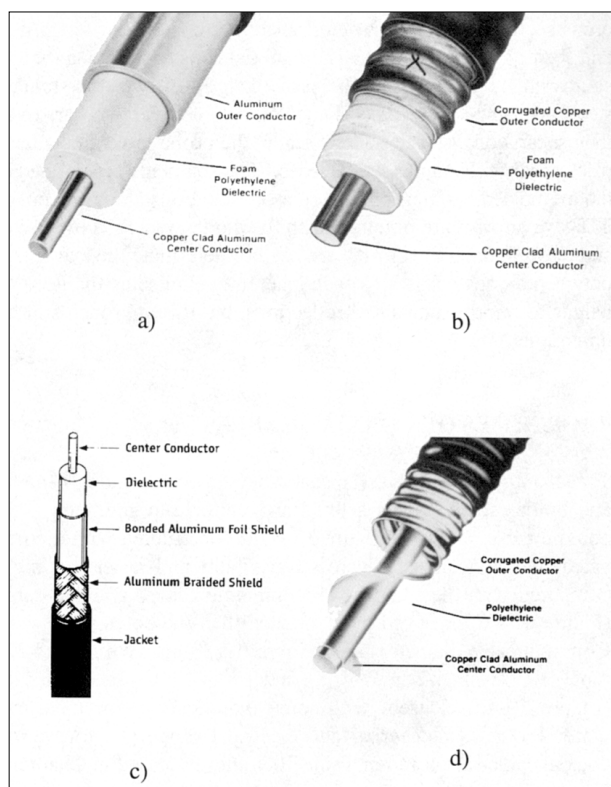
Figuren visar att flera sonder kan anslutas till olika kanaler på en multiplexer. Kanalerna kopplas automatiskt in var för sig och mäts. Registreringen sker i TDR-enheten som i princip består av ett digitalt (minnes)oscilloskop och en pulsgenerator eller en kabletestutrustning enligt avsnitt 3.2.

3.4 Koaxialkabel/sensor

I många TDR-applikationer består sensorn av endast en koaxialkabel och därför måste den väljas med omsorg så mätresultatet visas med godtagbar upplösning och noggrannhet.

I *Figur 3.5* visas olika typer av koaxialkablar som inom flera tillämpningar inom TDR-tekniken används som sensorer. Alla kablar består av ett ytterhölje som främst är ett isolerande mekaniskt skydd. Innanför detta finns den yttre ledaren som kan bestå av koppar eller aluminium som antingen är flätat, solitt eller korrugerat. Mellan den yttre och inre ledaren finns en elektrisk isolering som kan bestå av polyetylenplast eller luftfyllt utrymme med icke ledande distanser mellan yttre och inre ledare. Den inre ledaren består oftast av koppar som kan vara belagd med aluminium, tenn eller silver.

Vid mätning av deformationer i jord och berg används normalt en koaxialkabel med yttre ledare av tunnväggig aluminium eller av korrugerad koppar, se *Figur 3.5 a och b*. Vid mätning på konstruktioner väljs vanligen en yttre ledare av korrugerad koppar. Mätningar av vattennivå utförs bäst med en luftisolerad kabel eller en vanlig TV-kabel, se *Figur 3.5 c och d*.



Figur 3.5. Utseende av vanligt förekommande koaxialkablar inom TDR-tekniken. a) Tunnväggig kabel med den utvändiga ledaren av aluminium. b) Yttre ledaren av korrigerad koppar. c) Yttre ledaren av flätat aluminium. d) Yttre ledaren av korrigerad koppar och med en luftspalt. (O'Connor och Dowding, 1999)

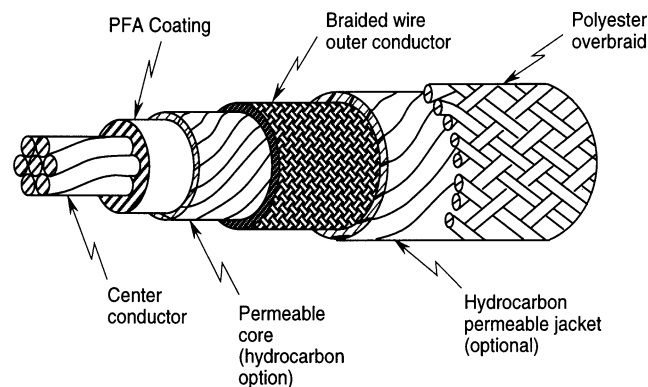
En koaxialkabel för deformationsmätning skall väljas så att elektriska impedansen (Z) ändras för små deformationer. T ex är en kabel med yttre ledare av korrugerad koppar lämplig för mätning av töjning i konstruktioner. Generellt gäller att isoleringen mellan inre och yttre ledare är en viktig egenskap att ta hänsyn till.

Kabel med isolering av luftspalt är att föredra vid mätning av vattennivå då denna har låg dämpning och ett högt signal-brusförhållande.

Kvaliteten på reflektionsvågen påverkas främst av kabelns resistans och dämpning.

Kabelns mekaniska egenskaper har stor betydelse vid deformationsmätning i jord och berg. Om möjligt väljs kabel med en solid yttre ledare som kan förses med kabelklämmor vilka fungerar som referenser för avståndsmätning.

Olika typer av specialkablar har tagits fram för olika mätändamål. I *Figur 3.6* visas ett sådant exempel. Kabeln har bland annat ett ringformat skikt som är permeabelt och därigenom kan t ex kontaminerat grundvatten påverka kabelns elektriska signatur och därmed är det möjligt att detektera föroreningar. Kabeln är patenterad.



Figur 3.6 Koaxialkabel för detektering av kolväten (efter O'Connor och Dowding, 1999).

3.5 Installation av kablar för deformationsmätning

Vid installation av geotekniska mätutrustningar som inklinometrar och extensometrar är det nödvändigt att utföra borrhningar och installationer av hög kvalitet av kompetent och kvalificerad personal som väl förstår i syftet med mätningarna. Detta gäller även vid installation av utrustning för TDR-mätningar eftersom sensorn/kabeln fungerar på snarlikt sätt som motsvarande traditionell geoteknisk utrustning.

I många geotekniska sammanhang är det nödvändigt att injektera fast mätutrustningen i borrhålet. Syftet är att fixera utrustningen i borrhålet och få den att samverka med omgivande jord eller berg. Den färdiga instrumenteringen skall samverka med jorden/berget såväl vad gäller vertikala som horisontella rörelseförändringar för att relevanta mätresultat skall erhållas. Injekteringsmedlet, när det väl är på plats och härdat, skall därför ha minst samma deformations- och hållfasthetsegenskaper som den omgivande jorden eller berget. Dessutom skall injekteringsmedlet fylla ut alla hålrum och "fästa" utrustningen mot omgivande jord och berg.

Vid indikering av skjuvzoner med hjälp av TDR-mätning är det viktigt att injekteringsmedlets hållfasthet är hög nog för att deformera kabeln men låg nog för att brista utan att deformera jorden. Dessa två krav kan uppfyllas genom en lämplig blandning av cement, vatten och bentonit. Det är också lämpligt att ta prover på injekteringsmedlet och prova dess hållfasthet i laboratorium efter t ex 28 dygn, Dowding (2001). Samma författare redovisar en teoretisk studie där förhållandet mellan injekteringsmedlets och jordens enaxliga tryckhållfasthet bör vara 10–20. Detta samband styrker författaren också genom en genomgång av några lyckade praktikfall där den typiska blandningen bestod av 65 % vatten, 33 % cement och 2 % bentonit och kabeln installerades i ett borrhål med 100 mm diameter.

Det är många faktorer som påverkar slutresultatet vid injektering av TDR-kablar men Dowding (2001) påpekar tre viktiga faktorer, nämligen

1. hydratisering av bentoniten
2. tillför expansionsmedel
3. injektera hålet nerifrån och upp

Bentoniten måste blandas och få svälla flera timmar före användning för att erhålla den förväntade hållfastheten. Ca 1 kg expansionsmedel per cementsäck (94 lb \approx 42 kg) skall tillföras blandningen för att motverka krympning av injekteringsmedlet. Expansionsmedlet gör också vätskan mer lättflytande vilket innebär att själva injekteringen från botten och uppåt blir enklare att utföra.

Kane (2000) rapporterar att ett injekteringsmedel med 10 % bentonit och resten cementpasta har fungerat bra men att också enbart cementpasta av låghållfasthetscement kan användas.

4 Tillämpningar

4.1 Mätning av vatteninnehåll i jord

4.1.1 Beskrivning

TDR-utrustningens känslighet för förändringar i den dielektriska konstanten mellan två ledare kan utnyttjas för att mäta vatteninnehåll i jord. Tekniken kan användas både för mätning av vattenkvot i den mättade zonen eller för fuktinnehåll i den omättade zonen. Tekniken är den samma, medan kalibreringsförfarandet kan skilja sig åt.

Grundutrustningen består av en TDR-enhet, en multiplexer och sonder (elektroder) som sticks ned i jorden. Vanligtvis används dubbla eller tredubbla elektroder. Stort arbete har under åren lagts ned på att utveckla elektroderna så att optimal information erhålls. De faktorer som påverkar mätresultatet och som har analyserats är sondens längd i jord, diameter, sondavstånd, typ av ledare m m. Vid analys av t ex vägkroppar där det grovkornigare materialet utsätter sonden för mekanisk åverkan har större sonder utnyttjats, se t. ex. O'Conner och Dowding (1999). Exempel på TDR-utrustning för mätning av vatteninnehåll i jord visas i *Figur 3.4*.

TDR-mätning av vatteninnehåll i jord baseras på empiriska samband mellan volumetriskt vatteninnehåll och gångtiden för en spänningspuls längs en sond i jord. Metodiken kan närmast liknas vid en relativ mätning, ett kvantitativt angreppssätt. För geotekniker är vattenkvoten uttryckt i absolut tal av stort intresse. Detta skulle mer motsvara ett kvalitativt angreppssätt. För att absoluta mätningar ska vara möjliga, måste utrustningen kalibreras. Eller rättare, dielektricitetskonstanten måste relateras till vatteninnehållet i jorden (vattenkvoten). En kalibrering måste alltid göras för den jord som mätning ska utföras i. Eftersom jordegenskaperna naturligt varierar såväl i horisontal- som vertikalled är en generell kalibrering svår att genomföra. Förutom vatteninnehåll är dielektricitetskonstanten beroende av bulkdensitet, specifik yta, partikel-form och organiskt innehåll. Det finns ännu inte något generellt samband utvecklat mellan dielektricitetskonstanten och vatteninnehållet i jord för att kunna utföra precisionsmätningar.

Beroende på vilken noggrannhet som önskas vid mätningen, kan publicerade korrelationsfaktorer väljas (ger sämre noggrannhet), eller kan platsspecifika korrelationsfaktorer bestämmas (ger bättre noggrannhet). Olika tillvägagångssätt för att bestämma platsspecifika kalibreringsfaktorer presenteras i litteraturen, se t.ex. O'Conner och Dowding (1999).

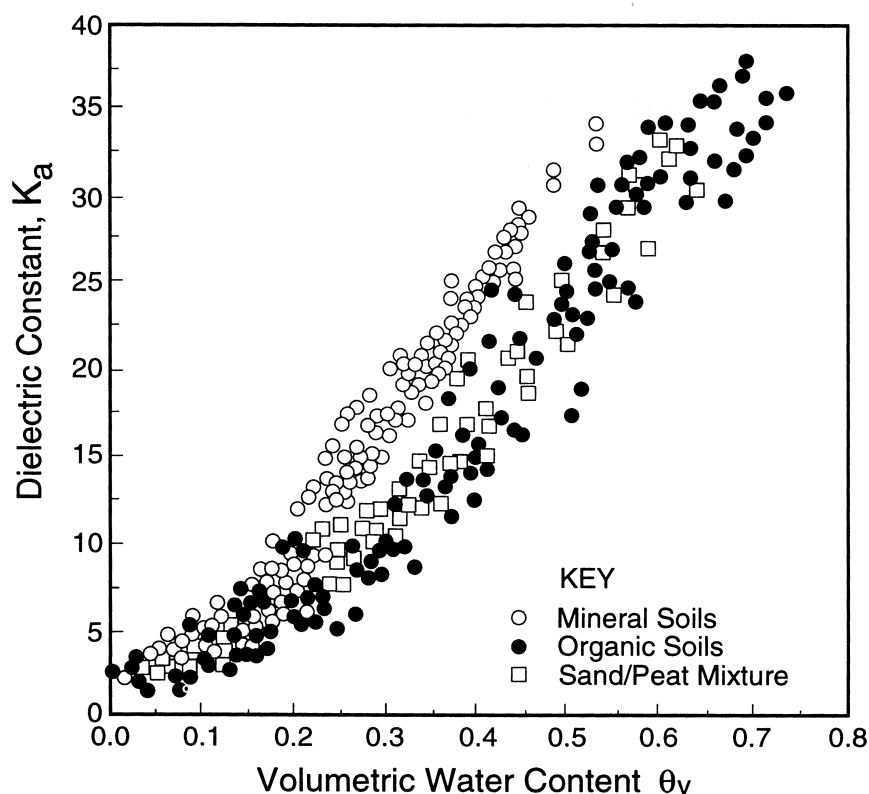
Många artiklar vid TDR 2001 belyste kalibrering av sonder. Det finns generella kalibreringsuttryck som inte alltid räcker till. De angavs att onoggrannheter över 2 % inte kunde accepteras. Vissa system klarade onoggrannheter på ca 1 % men då krävdes speciell kalibrering. Bäst resultat erhålls vid låga vattenhalter, upp till 30–40 %. Det som påverkar mätningen är främst ler- och saltinnehåll i jorden.

4.1.2 Verifikationsexempel

Allmänt kan en stor variation i förhållandet mellan dielektricitetskonstant och vatteninnehåll i jord förväntas. Bohl och Roth (1994), refererad i O'Conner och Dowding (1999), sammanställ-

de mätdata från ett stort antal försök i olika delar av världen, *Figur 4.1*, vilket bekräftar svårigheten att bestämma vatteninnehåll i absoluta tal på basis av dielektricitetskonstanten, åtminstone utan att veta jordens sammansättning.

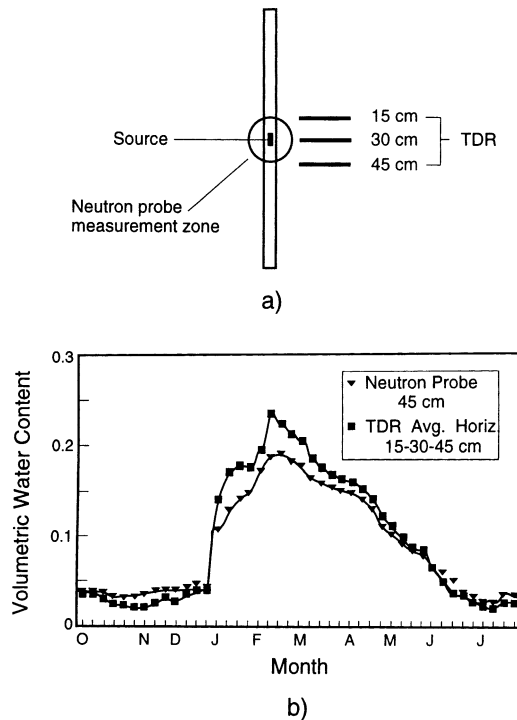
I organisk jord är enligt samma författare spridningen större än i mineraljordar. En jämförelse mellan resultat från TDR-mätning och mätning med neutronsond visar på ungefär samma onoggrannheter och därför kan TDR-mätning ersätta mätning med neutronsond. Onoggrannheten är uttryckt som korrelationskoefficient vid linjär regression och är för TDR-mätning $r^2 = 0,84$ medan för mätning med neutronsond är $r^2 = 0,82$.



Figur 4.1. Påverkan av typ av jord på förhållandet mellan vatteninnehåll och dielektricitetskonstant (efter Bohl och Roth, 1994).

4.1.3 Praktiskt exempel

En metod att mäta vatteninnehållet i jord är loggning med neutronsond. Schofield et al (1994), refererad i O'Conner och Dowding (1999), har utfört jämförande mätningar med neutronsond och TDR i försökssektioner i fält. Mätningar pågick under cirka ett års tid, och resultatet framgår av *Figur 4.2*. Mätningen visar god korrelation mellan de båda relativa metoderna. Ingen jämförelse finns med laboratoriebestämda värden.



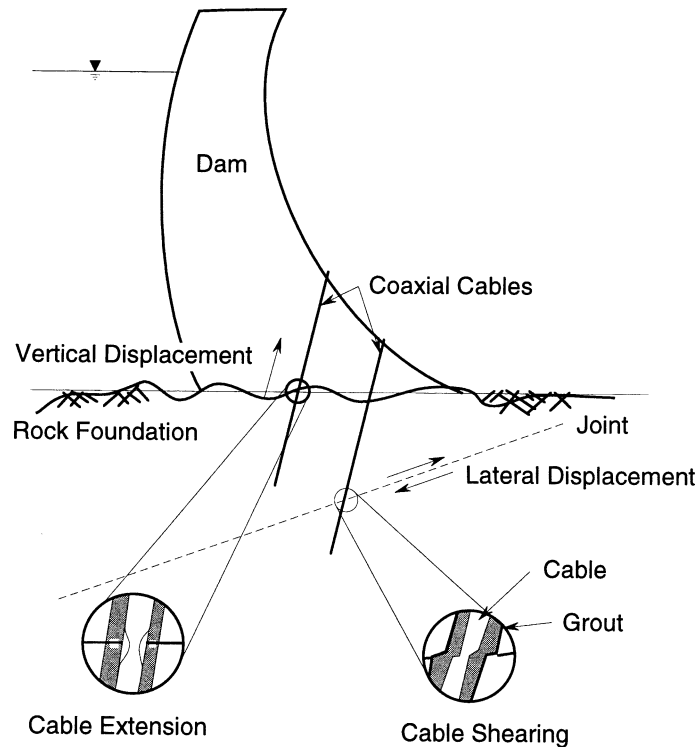
Figur 4.2 Jämförelse avseende mätning av vatteninnehåll med neutronsond respektive TDR; (a) tvärsnitt och (b) mätresultat med tiden. (efter Schofield et al, 1994)

4.2 Deformationsmätning i berg

4.2.1 Beskrivning

Att mäta deformationer i berg med hjälp av TDR utgör egentligen grunden för TDR som metod, nämligen att identifiera ”störningar” och fel på en kabel, antingen i form av töjningar (förändrat tvärsnitt) eller brott. Från början göts TDR-kablar in i bergmassan där grubbrytning ägde rum. Tanken var att detektera kabelbrott vilket utgjorde indikationer på större potentiella brott i bergmassan. Under en sådan mätning noterades att vågformen på reflekterade TDR-pulser ändrades inkrementellt med deformationen i bergmassan före brott. Efterföljande laboratorieundersökningar visade att det inte bara var möjligt att kvantifiera storleken på deformationerna, utan också, åtminstone i vissa fall, att skilja skjuvdeformationer från dragdeformationer. Idag utgör TDR-mätning rutin i samband med bl a grubbrytning runtom i världen.

Koaxialkablar gjuts in i borrhål i bergmassan, *Figur 4.3*. Skjuvning längs sprickplan ger upphov till deformationer inte bara i bergmassan utan även i koaxialkablarna. Spänningspulser skickas längs kablarna från TDR:s kabeltestutrustning. Defekter i kabeln, såsom t ex skjuvning, töjning och i värsta fall brott, kan detekteras av kabeltestaren. Reflekterade pulser beroende på förändringar i tvärsnittsarea längs kabeln superponeras på ursprungspulsen och skapar en reflekterad TDR-vågform.



Figur 4.3 Skjuv- och dragtjning i koaxialkabel på grund av relativa vertikala och horisontella rörelser i dammen (O'Connor och Dowding, 1999).

4.2.2 Verifikationsexempel

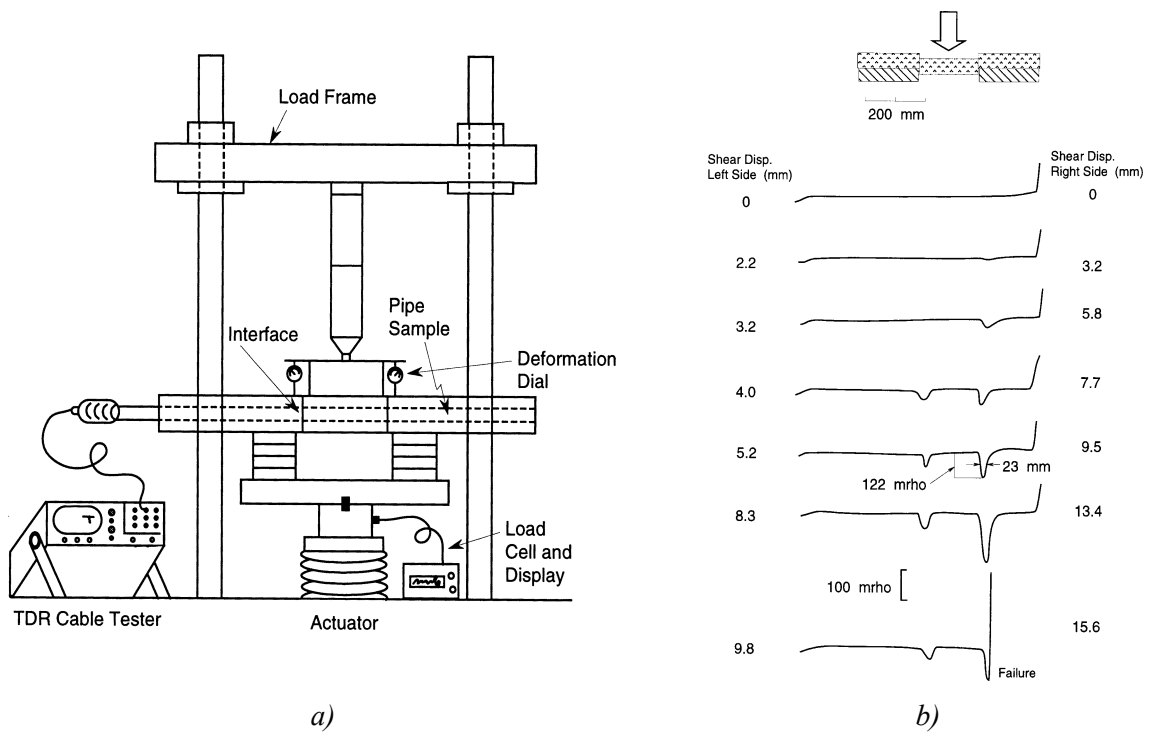
Eftersom grundstommen för utvecklingen av TDR-tekniken ligger inom applikationen bergmekanik, har av naturliga skäl ett stort antal verifikationsförsök utförts. I ett av dessa (Su, 1987), utsattes konstruktionen för en skjuvbelastning till dess att brott uppstod, *Figur 4.4*.

Tre segment skapades genom att ett rör med en kabel fastinjekterad kapades på två ställen så att kabeln förblev intakt. Det mellersta segmentet trycktes och på så sätt erhöles skjuvdeformationer mellan segmenten. Kraft och deformationer mättes samtidigt som kabelns TDR-signatur mättes. I *Figur 4.4a* visas försöksuppställningen och i figur 5.4b resultat i form av TDR-signaturer för olika deformationsnivåer.

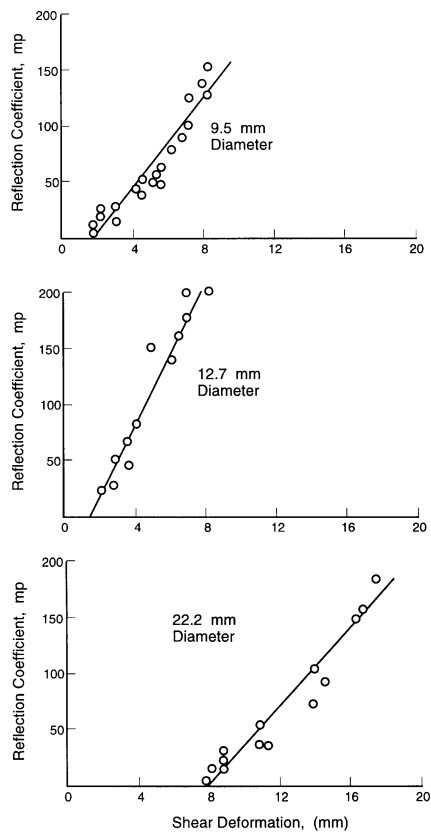
Försöken utfördes med bl. a olika storlek på kabelns diameter. Sammanställning av resultat framgår av *Figur 4.4c* där reflektionskoefficienten från TDR-mätningen visas som funktion av skjuvdeformationen för olika diametrar på kabeln.

Resultaten i *Figur 4.4b* visar att TDR-mätningen ger distinkta utslag för en skjuvdeformation och att utslaget ökar ju större deformationen är. Således finns en relation mellan storleken på reflektionskoefficienten och deformationen. Detta samband visas i *Figur 4.4c* för olika kabeldiametrar. Här framgår också att för olika kablar är upplösningen olika.

Detta verifikationsexempel visar på TDR-metodens potential att inte bara detektera skjuvzoner utan också att få en uppfattning om rörelsens storlek.



Figur 4.4 a och b. Försökupställning och resultat (efter O'Connor och Dowding, 1999).



Figur 4.4 c. Sammanställning av resultat för provning med olika diameter på kabeln (efter O'Connor och Dowding, 1999).

4.2.3 Praktiskt exempel

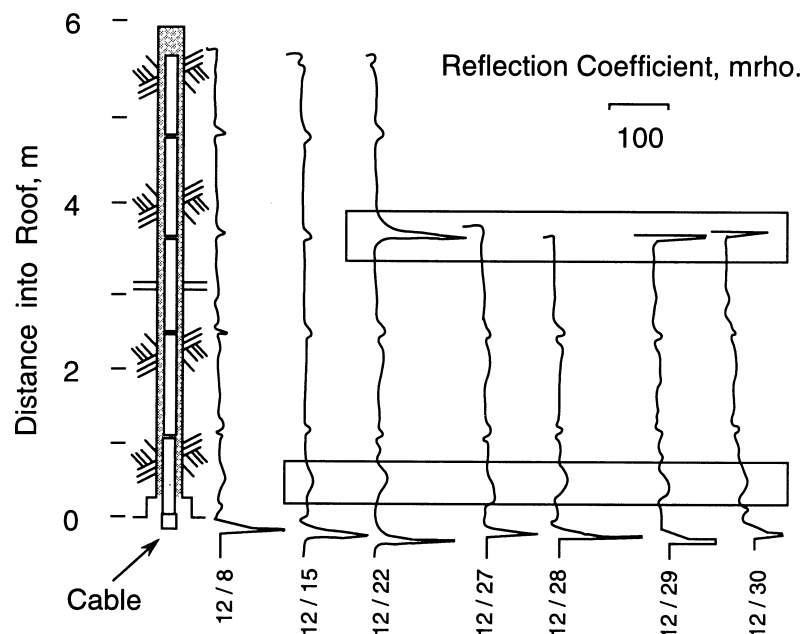
Det finns ett flertal praktiska exempel redovisade i den genomgångna litteraturen vad gäller mätning av deformationer i bergmassa. Emellertid är redovisningarna ofta bristfälliga och det saknas resultat i form av jämförande mätningar.

Francke et al (1994), refererad i O'Conner och Dowding (1999), använde TDR för att mäta rörelser i taket i ett gruvrum i en saltgruva. Det fanns lerlager, 6 och 21 cm tjocka lokaliserade till 2 respektive 4 m ovan taket. Principen för installation och resultat från TDR-mätningen var samma som framgår av *Figur 4.5* som härrör sig från en annan installation utförd av O'Conner and Zimmerly (1991).

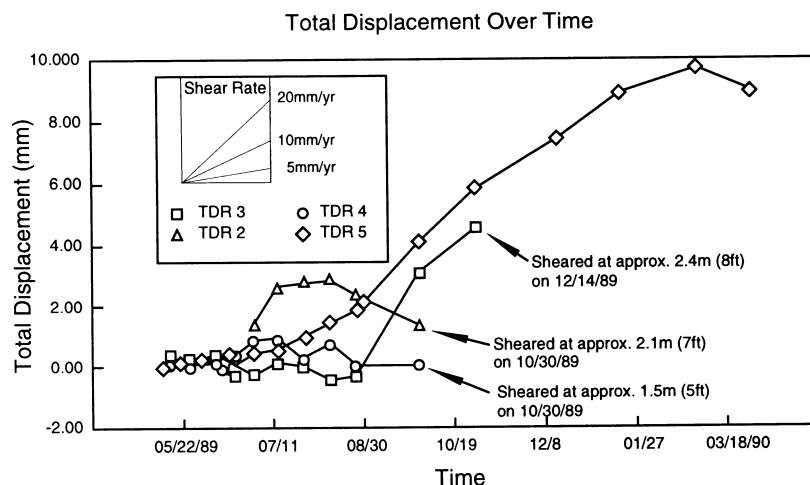
På kabeln monterades klämmor var 0,6 m som förändrade kabeltvärsnittet och därmed erhöles en markering i TDR-signaturen var 0,6 m. Det framgår tydligt av de uppmätta kurvorna att det förekommer dragbelastning/deformationer vid mynningen av det borrhål som kabeln installerats i samt skjuvdeformationer cirka 3,5 m från borrhålsmyningen.

För att erhålla storleken på uppmätta rörelser utfördes en laboratoriekalibrering liknade den som visas i *Figur 4.4*. På så sätt erhöles platsspecifika korrektionsfaktorer som gjorde det möjligt att uppskatta rörelsens storlek, se *Figur 4.5b*

Resultaten visar att rörelseutveckling var accelererande och att tre av 4 kablar gick till brott under mätperioden. Det framgår också att relativt små rörelseändringar kan detekteras.



Figur 4.5 a. Princip för installation av TDR-kabel och typiska resultat. (O'Conner och Zimmerly, 1991).



Figur 4.5b. Resultat från TDR-mätning i taket i en saltgruva. I figuren visas rörelsens utveckling med tiden på några intressanta nivåer. (Francke et al, 1994)

4.3 Deformationsmätning i jord

4.3.1 Beskrivning

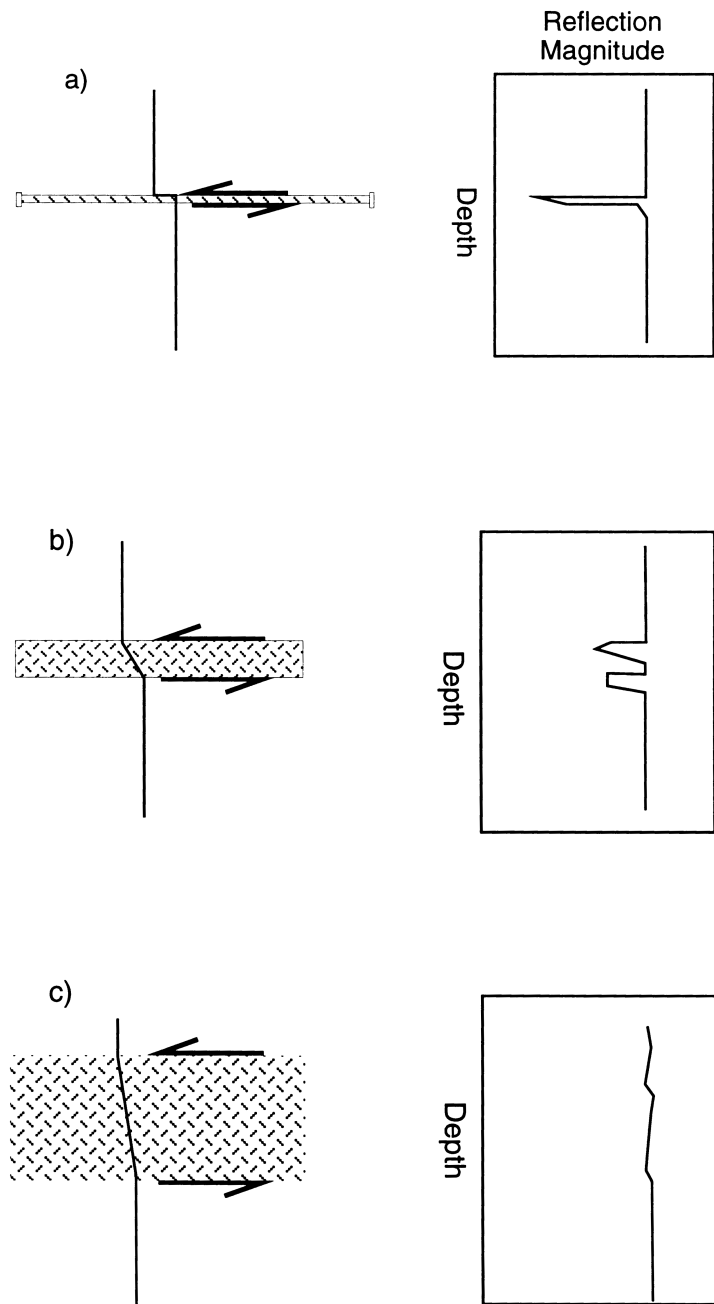
På samma sätt som deformationer mäts i bergmassa (ingjutna kablar – eller i detta fall snarare kanske det handlar om injekterade kablar) kan också deformationer/förskjutningar detekteras i jord. De skjuvzoner som är aktiva i samband med släntrörelser och skred kan detekteras. Metoden påminner något om de larmkablar som t ex Banverket länge använt längs bansträckningar där det finns risk för skred. Till skillnad från dessa, som bara aktiveras vid brott då kabeln slits av på grund av rörelserna i jorden, kan TDR-mätningar indikera rörelser före brott.

Den förhärskande metoden att mäta rörelser i jord, åtminstone på djupet, är med hjälp av inklinometrar. TDR-metoden fungerar i stort på liknande sätt som inklinometern, fransett att installations- och driftskostnaden är väsentligt lägre. Liksom inklinometern mäter man med TDR relativa rörelser, dvs förändringar jämfört med ett utgångsläge, t ex nollmätningstillfälle.

Olika brottmoder måste värderas för att kunna välja ett optimalt injekteringsbruk så att optimal samverkan mellan jord-bruk-kabel erhålls. Brott i jorden kan vara antingen lokaliserat (begränsad utsträckning av skjuvbandet) eller icke-lokaliserat (ett mer utbrett skjuvband), *Figur 4.6*.

En stor utbredning av skjuvzonen, *Figur 4.6b* och *4.6c*, kan leda till att injekteringsbruket runt kabeln spricker, men kanske ändå inte tillräckligt koncentrerad för att lokalt skjuva (deformera) kabeln. Möjligtvis böjs bara kabeln, och i så fall erhålls ingen TDR-reflektion. Will (1996) har i ett examensarbete undersökt olika kriterier som bör ställas på ett lämpligt ingjutnings/ injekteringsbruk för TDR-kablar. Primärt är det enligt Will en fråga om att hitta den cement-bentonitblandning som ger den lägsta hållfastheten men som ändå medger en skjuvdeformation av de vanligast kommersiellt förekommande koaxialkablarna.

Inte bara typ av ingjutnings/injekteringsbruk är viktig. Även valet av kabeldiameter styr noggrannheten på mätningarna och väljs utifrån vilken miljö mätning ska utföras i och storleken på förväntade deformationer.



Figur 4.6. Karakteristisk TDR-vågform för olika utsträckning av skjuvbandet;
 a) lokaliserat brott med begränsad utbredning av skjuvbandet;
 b) skjuvzon med böjning av koaxialkabeln;
 c) skjuvzon med relativt stor utbredning
 (efter O'Connor et al., 1995)

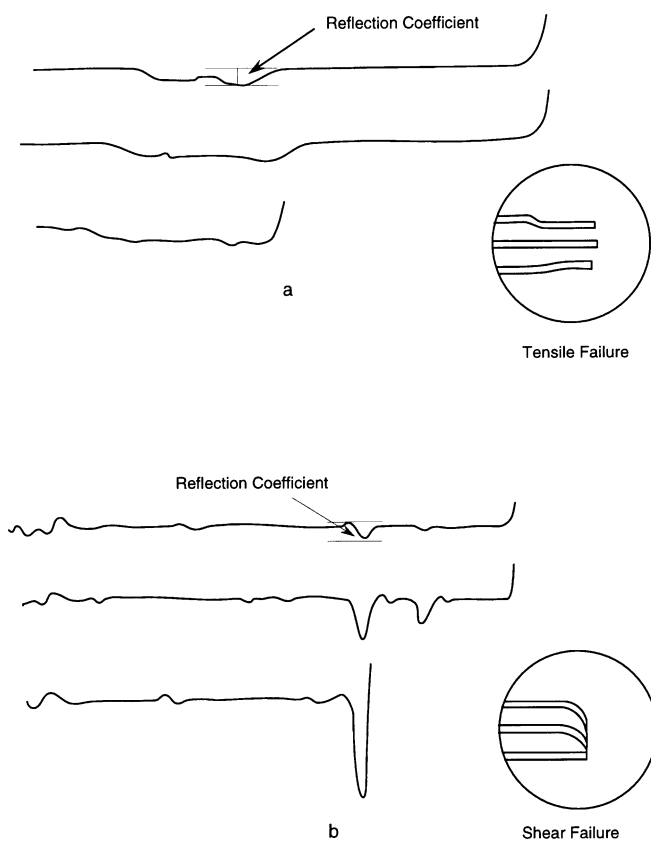
För att erhålla en reflex måste kabeln och därmed injekteringsbruket deformeras. Det innebär att det främst är skjuvdeformationer och i viss mån töjningar som kan registreras med TDR-tekniken.

Vissa författare (t ex Dowding och O'Connor) menar att det är en fördel att göra små avsmalningar, så som crimps, längs kabeln. Dessa avsmalningar kommer då att ge reflektioner på kända avstånd, vilket underlättar positionsbestämningen av zoner med rörelser och deformationer som avses detekteras. Andra författare, Kane (2000) menar att det är ett onödigt arbete att göra "crimps". Han anger som skäl att de lämnar signaturer som kan leda till misstolkning av resultaten och att de tar energi från signalen och därmed försvagar responsen från djupet.

4.3.2 Verifikationsexempel

Su (1987), refererad i O'Connor och Dowding (1999), genomförde på laboratorium ett antal försök med ingjutna kablar som utsattes för drag- respektive skjuvdeformationer till dess att brott erhöles. Principen och vissa resultat från dessa försök är redovisade i [avsnitt 4.2.2](#). Samma verifikationsmetod har använts för deformation i jord.

Ett annat resultat från dessa försök visas i [Figur 4.7](#) där det tydligt framgår att "störningen" på kurvan som mäts upp vid dragdeformation är bredare än vad som är fallet för skjuvdeformation. Det är bl a detta som utnyttjas vid bedömningen av omfattningen av drag- respektive skjuvdeformation.

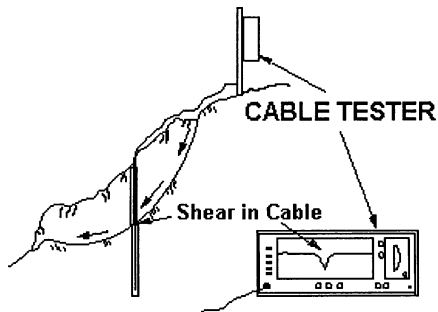


Figur 4.7.
Resultat från TDR-mätningar
med ingjutna kablar utsatta för
(a) dragbelastning till brott och
(b) skjuvbelastning till brott (efter
O'Connor och Dowding, 1999).

4.3.3 Praktiskt exempel

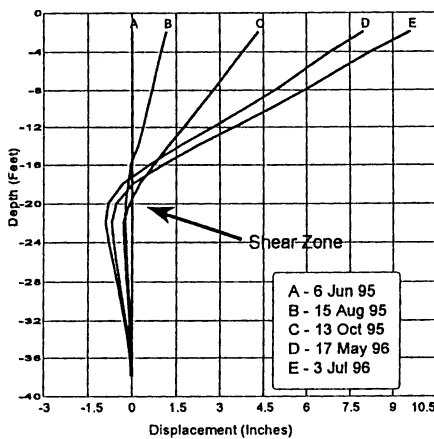
Kane (1998 och 1999) beskriver användningen av TDR för att mätadetektera släntrörelser, *Figur 4.8*. Figuren visar principen för TDR-mätning av rörelse i en slänt. Systemet har använts bl. a. för kontroll av rörelser vid Highway No 1 i Kalifornien. Mätningarna utfördes av ett automatiskt mätsystem med alarmfunktion.

Parallellt med TDR-mätningen utfördes även traditionell inklinometermätning. Resultatet från de bägge mätningarna redovisas i *Figur 4.9*. Som framgår av figuren ger bägge metoderna överensstämmande positionering av skjuvzonen.

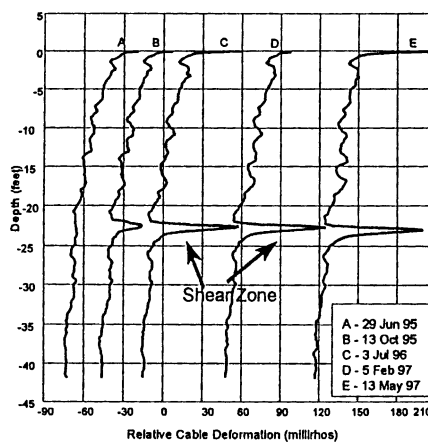


I *Figur 4.9c* redovisas mätningar från inklinometermätning och TDR-mätning som funktion av tiden. Inklinometermätningen redovisas som rörelse i tum medan resultatet från TDR-mätningen visas som reflektionskoefficient uttryckt i enheten millirhos.

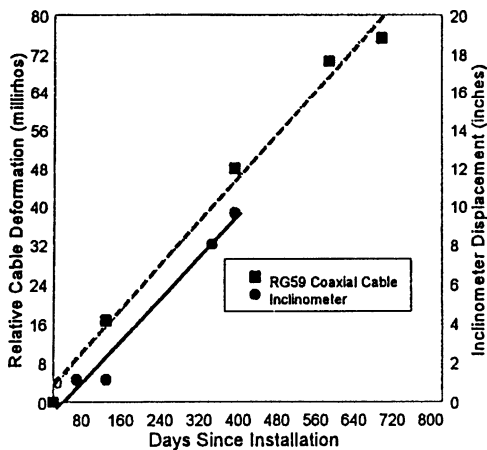
Figur 4.8. Installation för att övervaka rörelsen i bankslänt (Kane, 1998).



a)



b)



c)

Figur 4.9
Resultat från mätning med (a) inklinometer och (b) TDR. Det indikerade läget för skjuvzonen överensstämmer mellan de bägge mätmetoderna och i c) visas mätresultat som funktion av tiden för de båda metoderna. (Kane 1998)

4.4 Deformationsmätning i konstruktioner

4.4.1 Beskrivning

Vid mätningar i konstruktioner används såväl metalliska kablar (koaxialkablar) som fiberoptiska kablar. Möjligheten att med ett instrument göra mätningar i stora volymer gäller såväl för koaxialkablar som för fiberoptiska kablar. Däremot kan betydligt mindre deformationer inom det elastiska området detekteras med fiberoptiska kablar. Beroende på storleken på förväntade deformationer kan således olika typer av kablar väljas för mätningen.

I övrigt går mätningarna till på samma sätt som har beskrivits i föregående avsnitt, och metoden är densamma. Kablarna fästs på något sätt in i den konstruktion som mätningarna ska utföras på, vanligtvis gjuts de in. Det är viktigt att infästning väljs på sådant sätt att full samverkan mellan kabel, infästning och konstruktionsdelar erhålls. Liksom för övriga på marknaden förekommande mätmetoder är det väsentligt billigare att installera utrustningen i samband med nybyggnation än i befintliga konstruktioner.

Försök har även gjorts att mäta spänningsnivåer i konstruktionsdelar (Dubaniewicz, 1994), främst i sådana som utsätts för en yttre belastning. Vissa typer av fiberoptiska kablar är spänningskänsliga och skulle potentiellt kunna användas för att detektera förändringar i spänningsnivåer. Inom detta område sker idag en stor utveckling och det finns flera kommersiella system för mätning med fiberoptiska kablar i konstruktioner.

4.4.2 Verifikationsexempel

Mätning av deformation och spänning är i många fall samma sak. Spänningen erhålls genom Hookes lag när deformationsförändring uppmäts. Principen för deformations- och förskjutningsmätning i konstruktionsdelar, eller mellan konstruktionsdelar, är densamma som har redogjorts för i tidigare avsnitt. Det går generellt inte att mäta absoluta värden på deformationer/förskjutningar, utan enbart relativa, dvs skillnaden i deformation/förskjutning mellan mättidpunkten och en vald nolltidpunkt. Mätutslaget på de kurvor som registreras kan relateras till andra typer av mätningar, varvid en koppling mellan mätutslag och deformationens/förskjutningens storlek kan etableras specifikt för varje objekt.

4.4.3 Praktiskt exempel

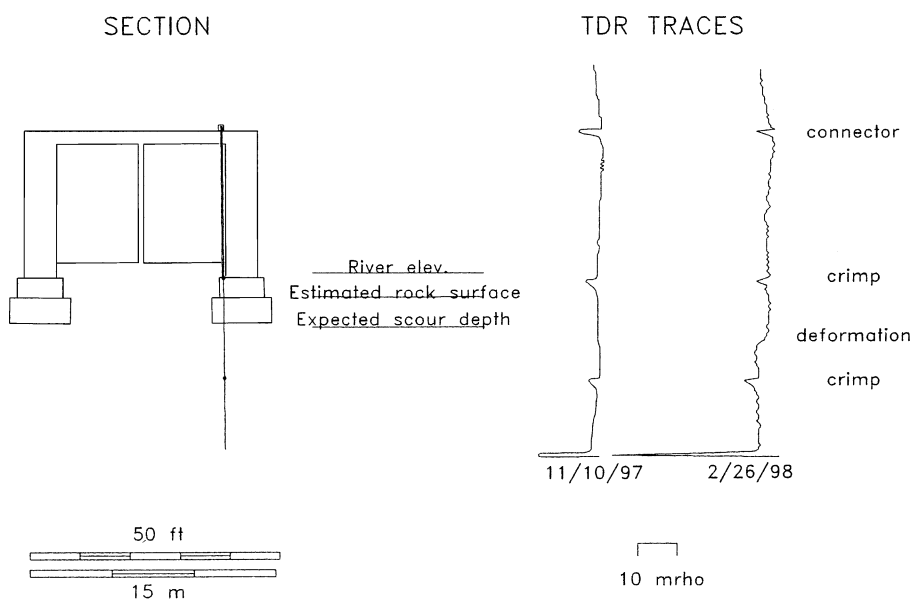
Ett flertal artiklar, främst från USA, behandlar infrastrukturkonstruktioner (broar). Uppenbarligen föreligger vissa problem med underminering av brostöd (plattgrundlagda), varvid deformationer och förskjutningar uppstår som kan äventyra konstruktionens totalstabilitet.

Dowding och Pierce (1996) diskuterar broars beteende uppmätt med TDR. Författarna konstaterar att mätning av såväl konstruktionens totalstabilitet (genom mätning av rörelser i grundläggning och brospann) liksom mätning av t ex uppsprickning hos pelare och plintar kan utföras. Vidare pekas på fördelarna med TDR, där stora volymer kan mätas enkelt och utan alltför kostsamma och komplicerade installationer. Författarna presenterar dock inga resultat, utan uppehåller sig kring en mer fenomenologisk beskrivning. TDR anges vara en framgångsrik metod för ändamålet.

En annan artikel av O'Connor och Dowding (odaterad) redovisar ett antal fältförsök, bl a mätning på infrastrukturkonstruktioner. Författarna ger i artikeln en god inblick i tekniken och användningen. Man pekar på systemets enkelhet och att man antingen kan välja en mer eller mindre automatisk, fjärrstyrd mätning – något som mer liknar övervakningssystem – eller ett

system där någon mäter med jämna tidsintervall. Det exempel avseende brokonstruktioner som ges i artikeln rör en bro, Klamathbron i Kalifornien, där man 1997 konstaterade att brostöden underminerats och att en 2 m djup ficka utbildats på ena sidan bron. Det bestämdes då att koaxialkablar skulle installeras i brostödet på den andra sidan för att mäta deformationer och förskjutningar. Koaxialkabeln installerades genom bropelare och ned genom hela grundläggningen, totalt ca 20 m. Mätresultatet framgår av *Figur 4.10*.

Koaxialkabeln var initialt försedd med ”störningar” (avsmalningar), s k crimps, vilket framgår av nollmätningen 1997–11–10 och även mätningen 1998–02–26. Vid mätningen 1998–02–26 ses den relativa förändringen från nollmätningen, och det kan utläsas att brokonstruktionen undergår en viss förskjutning/deformation.



Figur 4.10. Schematisk redovisning av kabelinstallation och mätresultat. (O'Connor och Dowding o.daterad).

4.5 Mätning av vätskenivåer

4.5.1 Beskrivning

Även om mätning av vatteninnehåll i jordbruksmark är det område som har drivit TDR-tekniken framåt, finns det andra typer av mätningar med vatten inblandat som har stor betydelse, t ex porvattentryck, grundvattennivåer, vattenstånd i vattendrag samt vätskenivåer i allmänhet. Sådana mätningar kan utföras med TDR, på grund av den mycket stora spänningsreflektion som uppstår vid övergången mellan luft och vatten när vatten stiger eller sjunker inuti det ringformiga utrymmet i en luft-dielektrisk koaxialkabel. Som tidigare redovisats är dielektricitetskonstanten 1 i luft och 8 i vatten vid 20 °C. Detta faktum utnyttjas vid mätning av vattennivåer. På samma sätt kan nivåer i andra vätskor med känd dielektricitetskonstant mätas med denna teknik. I t ex bensen är konstanten 2,3 och i etanol 24,3.

Generellt låter sig TDR-tekniken väl användas för att detektera vätskenivåer, t ex i olika processtekniska sammanhang. En kabel kan fästas på insidan av en behållare varvid vätskenivån kan följas kontinuerligt. Samma metodik kan användas för att detektera t ex grundvattenytan i ett borrhål.

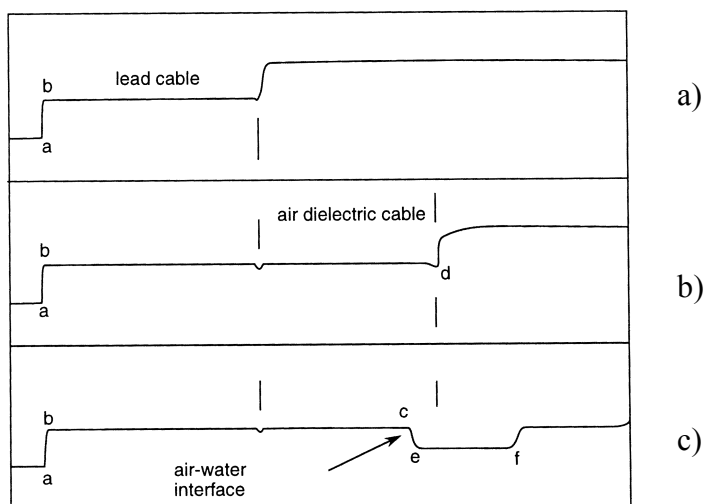
Uppgiften om möjligheterna att mäta porvattentryck synes vara överdriven. Det finns inga exempel redovisade utan det omnämns bara i inledande text.

4.5.2 Verifikationsexempel

Mätning av vattennivå kan belysas med ett kort exempel där en luft-dielektriska kabeln ansluts till en vanlig 50 ohms blykabel. I *Figur 4.11a* visas TDR-vågformen som erhålls för enbart en 50 ohm blykabel. *Figur 4.11b* visar vågformen för samma blykabel men då en 1 m lång luft-dielektrisk kabel anslutits till densamma. I *Figur 4.11c* visas den vågform som erhålls när 0,15 m av luft-dielektriska kabeln doppats ned i vatten.

I *Figur 4.11b* motsvarar punkt d änden på luft-dielektriska kabeln. I *Figur 4.11c* motsvaras änden av punkt f. Skillnaden i kabellängd som kan noteras är en effekt av de ändrade gångegenskaperna (ändring av dielektricitetskonstanten) pulsen får i kabeln när denna är omgiven av vatten. Genom att utnyttja detta faktum kan vattenytans läge bestämas. Det kan också noteras att den reflekterade vågen då luft-dielektriska kabeln är neddoppad i vatten är motriktad den som erhålls när kabeln är i luft.

En annan undersökning, Dowding, Huang och McComb (1996), redovisad i O'Connor och Dowding, (1999) redovisar försök där vattennivå fått stiga och sjunka med olika hastigheter under kontrollerade former. Man drar slutsatsen att djupet till vatten vid stigande vattenyta överskattas med 2 % och underskattas med 3 % när vattenytan faller. Efter korrektion för "vattendroppseffekten" kan onoggrannheten minskas till 1 % vid fallande vattenyta.

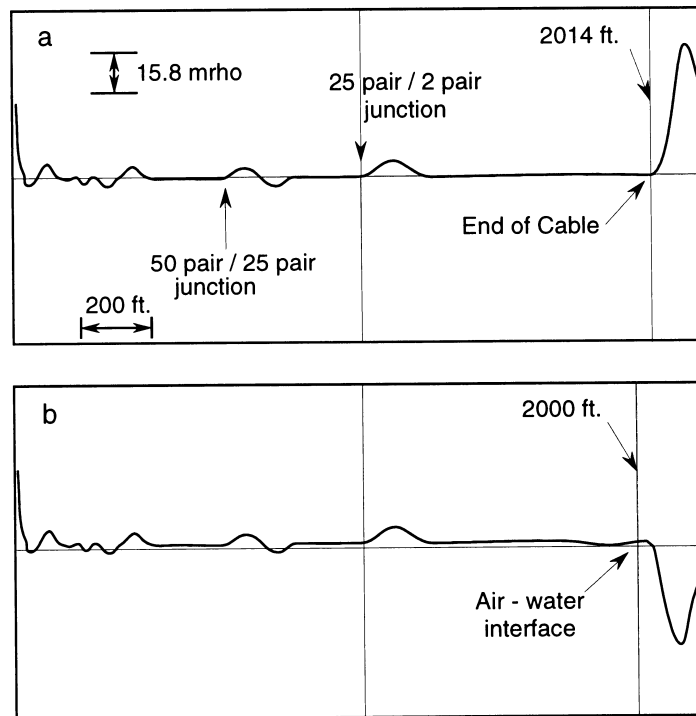


Figur 4.11. TDR-vågformer utvisande reflektion vid övergången mellan luft och vatten i en luft-dielektrisk koaxialkabel. a) vågform som erhålls med en 50 ohm blykabel; b) vågform som erhålls när en 1 m lång luft-dielektrisk kabel anslutits till blykabeln; c) vågform som erhålls när 0,15 m av luft-dielektriska kabeln doppats ned i vatten (O'Connor och Dowding, 1999).

4.5.3 Praktiskt exempel

O'Connor (1996) redovisar ett exempel på mätning av vattennivå i en reservoar (damm). Traditionellt mäts vattennivå med tryckgivare, och trycknivån räknas om till en överliggande vattennivå. Vid den aktuella dammen hade vattennivån sedan lång tid bestämts med tryckgivare, och ett automatiskt, fjärrstyrt övervakningssystem fanns installerat. I ett antal lägen installerades parallellt luft-dielektriska kablar för TDR-mätning. I artikeln ges en relativt ingående teknisk beskrivning.

Mätresultatet i form av TDR-kurvor redovisas i *Figur 4.12* för kabel installerad i samma rör som trycksgivaren (b) respektive separat vid sidan av trycksgivarens rör (a). Figuren visar att det för bägge installationerna erhålls en kraftig reflektion vid övergången mellan luft och vatten. En utvärdering av resultaten gav vattendjupet 9 ft (ca 2,70 m) under markytan mätt med TDR-teknik medan tryckgivaren gav 9,05 ft (2,72 m).



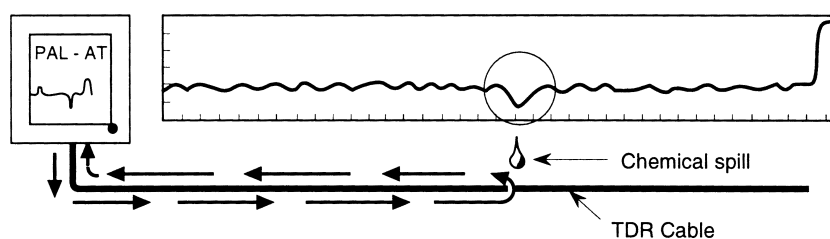
Figur 4.12. Resultat från TDR-mätning med luft-dielektriska kablar (a) installerad vid sidan av ett rör med portrycksgivare och (b) installerad i samma rör som portrycksgivare (O'Connor, 1996).

4.6 Detektering av läckage och föroreningar

4.6.1 Beskrivning

Efter att ha studerat TDR-reflektioner och vågformer då en kabel doppats ned i vatten, se [avsnitt 4.5.3](#), ligger det nära till hands att se applikationer där kablar kontinuerligt kan detektera förändringar i vattennivåer och läckage. Sådana system har utvecklats av olika företag, framförallt i USA.

En kabel av lämplig typ – tidigare har nämnts att kablar av olika typ har olika egenskaper och förmår ge reflektioner av olika kvalitet för varje specifik applikation – kan t ex läggas ned i jorden där förorenings-spridning kan förväntas. En ”nollavläsning” görs som visar reflektioner och vågformer vid tidpunkten för installationen. Denna nollavläsning lagras i TDR-utrustningen. Därefter utförs kontinuerlig mätning. Mätmetodiken är i princip densamma som redogjorts för i tidigare avsnitt om mätning av vatteninnehåll i jord. Mer generellt bör man uttrycka det som vätskeinnehåll i jord, eftersom vätskan inte nödvändigtvis behöver vara vatten vid miljötekniska mätningar. Reflektioner och vågformer jämförs hela tiden med den ursprungliga. Det är möjligt att koppla olika former av larm till utrustningen som aktiveras om avvikelser blir större än ett visst i förväg definierat värde. Utrustning visas schematiskt i [Figur 4.13](#).



Figur 4.13. Schematisk bild av TDR-utrustning för detektering av förorenings-spridning (efter O'Connor och Dowding, 1999).

TDR-tekniken synes ge utrymme för utvecklingsmöjligheter. Idag kan med tillräckligt god noggrannhet av vatteninnehåll i jord mätas. Utrustningen och mätutslaget kalibreras i det optimala fallet på själva mätplatsen varvid platsspecifika kalibreringsfaktorer erhålls. I förlängningen kan man tänka sig att utrustningen kalibreras för olika typer av föroreningar som sprids med grundvatten eller som rör sig mot en grundvattenyta. På så sätt skulle möjligtvis föroreningshalter kunna mätas och inte bara vätskenivåer. För detta krävs dock en relativt omfattande utveckling och uppbyggande av referensdatabanker.

4.6.2 Verifikationsexempel

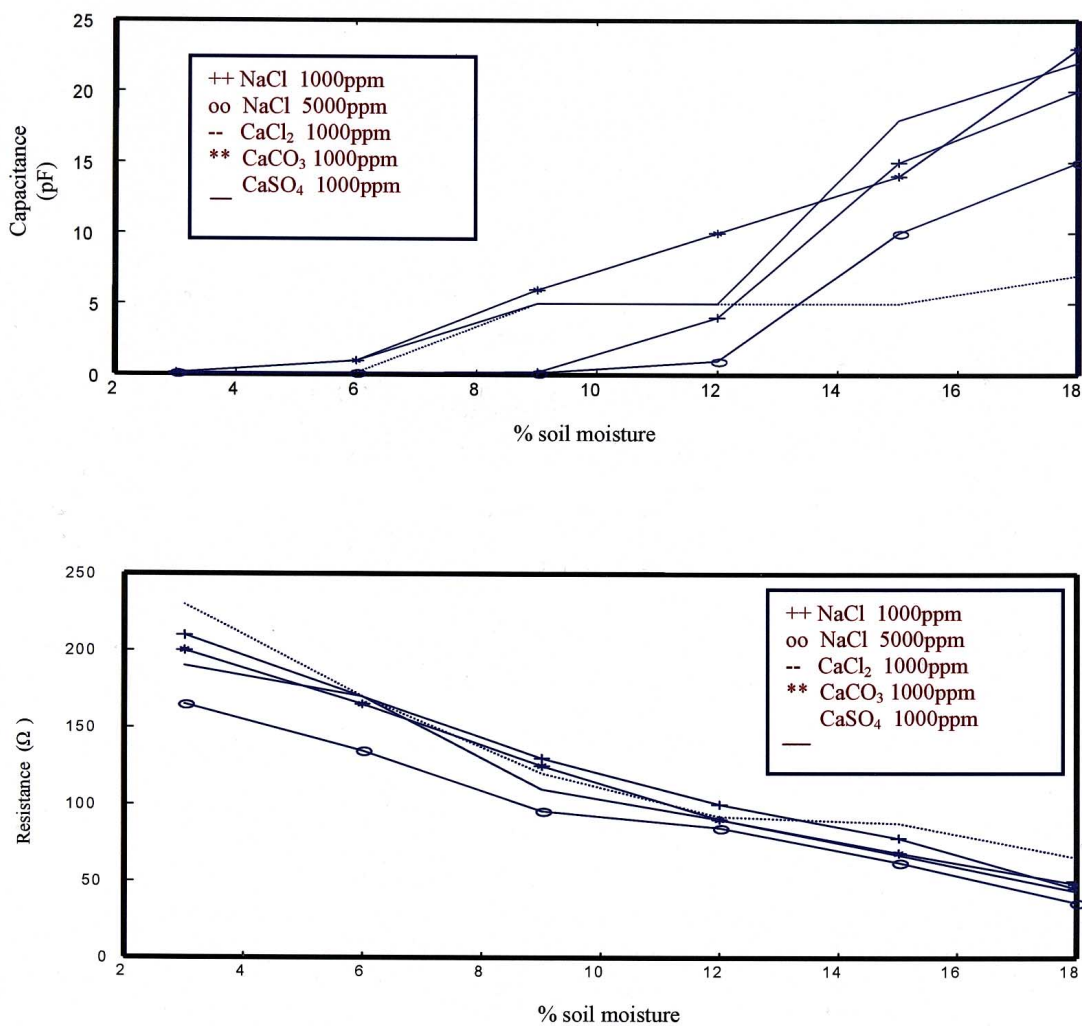
Under TDR 2001 presenterade flera lovande försök som i sin förlängning kan utnyttjas för bestämning av läckage och föroreningar i jord. Nedan redovisas kortfattat några laboratoriestudier som har en potential för vidare utveckling.

Persson (2001) beskriver laboratorieförsök där han blandat kolväten (motorolja) i sand som var helt eller delvis vattenmättad. Genom att mäta dielektricitetskonstanten och den elektriska konduktiviteten på olika inblandningar kunde han dra slutsatsen att i vattenmättad sand var det möjligt att bestämma mängden inblandad motorolja med ett fel på upp till 0,05 m³/ m³ genom

att endast använda sig av antingen dielektricitetskonstanten eller den elektriska konduktiviteten medan i omättad sand måste både dielektricitetskonstanten och den elektriska konduktiviteten bestämmas.

Said et al (2001) visade genom försök att det är möjligt att detektera CaCl_2 , CaCO_3 , NaCl och CaSO_4 med hjälp av TDR-tekniken. Försöken utfördes med olika vattenmättnadsgrad på en sand medan koncentrationen av joner hölls konstant på 1000 ppm och i något försök på 5000 ppm. I *Figur 4.14* visas hur den elektriska kapacitansen och dielektricitetskonstanten varierar med vattenhalten men också hur prover med olika koncentration av joner påverkar resultaten. Mätresultaten relaterat till vatteninnehållet är inte överraskande, då man som tidigare visats kan mäta vattenhalten i jord med TDR-teknik. Försöken är emellertid utförda i början av ett större forskningsprojekt, där man studerar hur TDR-mätningarna påverkas av olika typer av joninnehåll och dess koncentrationer.

De redovisade laboratoriestudierna visar att det är möjligt att med TDR-teknikens hjälp mäta/detektera olika slag av föroreningar även om mycket utvecklingsarbete kvarstår.



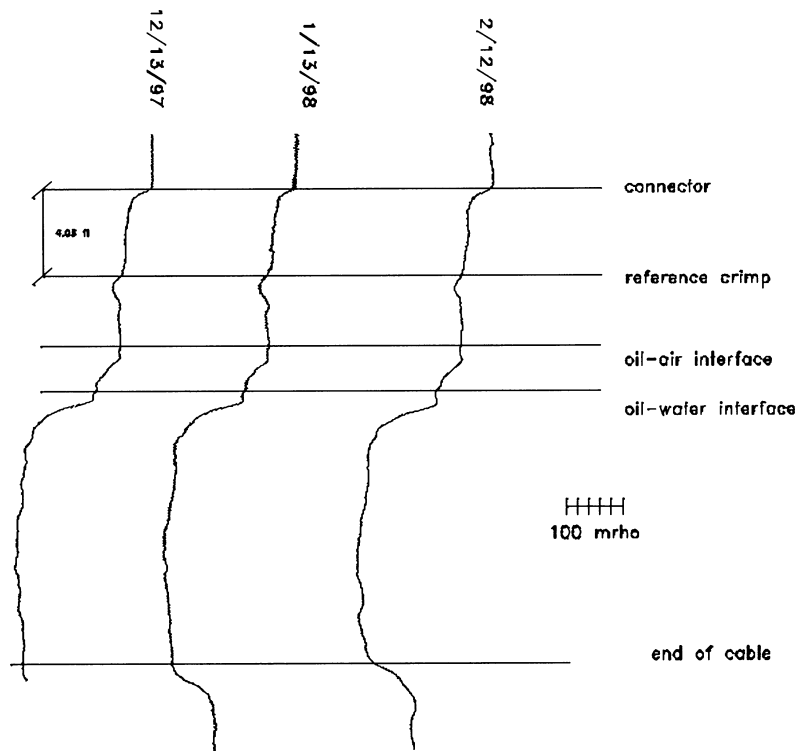
Figur 4.14 Vatteninnehåll som funktion av kapacitans och resistivitet för olika typer av joniblandning och koncentration. (Said, R. A. et al 2001)

4.6.3 Praktiskt exempel

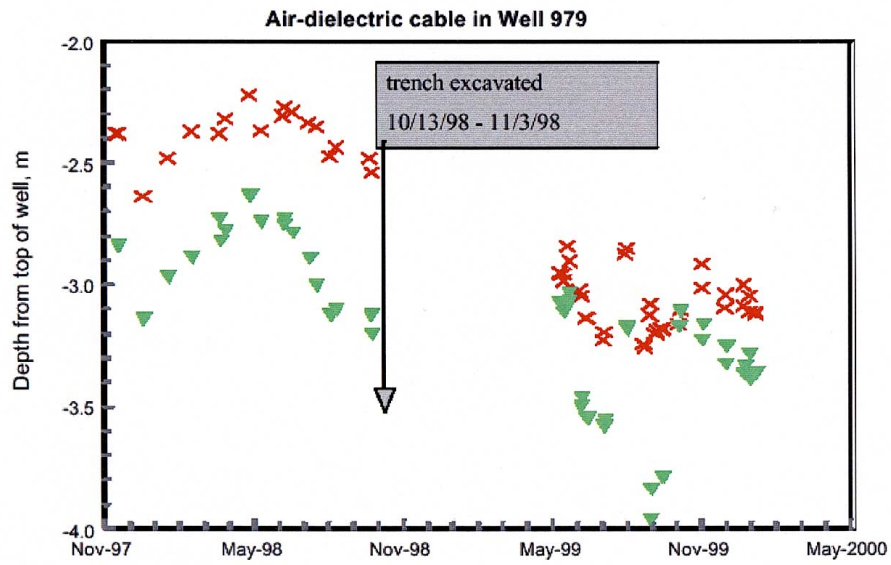
Den 20 augusti 1979 brast en oljeledning i staten Minnesota i USA och 1,7 miljoner liter råolja rann ut i omgivningen och förorenade markytan och den ytliga jorden. Ca 400 000 liter olja återstod efter sanering av området och denna antas dels ha runnit ner i jorden och lagt sig på grundvattenytan, dels runnit till ett lägre belägen våtmark. O'Conner (2001) redovisar mätningar på området med TDR-teknik vars syfte var att mäta förändringen av oljelagrets tjocklek med tiden när ett dike grävdes på platsen för att dränera ut oljan.

En luft-dielektrisk koaxialkabel installerades i ett observationsrör och ett automatiskt mätsystem samlade in mätvärden. I *Figur 4.15* visas TDR-signaturen uppmätt vid några olika tidpunkter. Av figuren framgår tydligt både oljelagrets överyta och den underlagrade grundvattenytan.

Tolkning av olje- och grundvattenytans läge från de uppmätta TDR-signaturerna redovisas i *Figur 4.16*. Där framgår tydligt hur det dränerande diket klarade av att transportera bort oljan.



Figur 4.15 TDR-signaturer vid några olika tidpunkter som dels visar ytan på råoljan och dels grundvattenytan, (O'Conner 2001).



Figur 4.16 Djup till oljelagrets överyta och djup till grundvattenytan som funktion av tiden före och efter ett dränerande dike grävdes. (O'Conner 2001).

5 Erfarenheter från symposiET TDR 2001

TDR 2001 ägde rum på Northwestern University i Evanston, som ligger nära Chigago i USA. Den fullständiga beteckningen på seminaret var "Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications", Evanston Sept. 5–7, 2001.

Symposiet var indelat i följande sessioner:

- STATE OF THE PRACTICE – Keynote Papers
- HARDWARE
- SOIL MOISTURE
- ROCK AND SOIL DEFORMATION MONITORING
- SUBGRADE MONITORING
- ENVIRONMENTAL MONITORING
- OPTICAL TDR AND STRUCTURAL MONITORING

Nedan redovisas i sammandrag det väsentligaste innehållet. För ytterligare information hänvisas till artiklarna som är publicerade i Proceedings från symposiet.

5.1 Soil Moisture och Hardware

Bestämning av fukttinnehåll i jord är påtagligt TDR-teknikens största område. En hel dag ägnades åt detta. Det fanns visserligen också under denna dag en session som behandlade utrustning, men denna session handlade nästa uteslutande om utveckling av utrustning och metoder för bestämning av vatteninnehåll för olika ändamål.

I flera artiklar diskuterades sondernas utformning med avseende på antal elektroder och övrig geometrisk utformning. Det vanligaste angreppssättet var teoretiskt. De flesta sonder är utformade för ytlig mätning av fukttinnehåll och därmed mest lämpade för jordbruksändamål där tydlig bevattning är en stor fråga. Metoden används också för mätning av torra jordbruksprodukter som t ex säd. En sensor som kunde installeras i rör av plast klarade mätning mot djupet, ned till ca 2,5 m djup. En annan sensor med okänd uppbyggnad kan grävas ned. En sondspets med inbyggda vridna elektroder kan mäta både vatten och jordmotstånd under nedpressning.

Ett system för mätning i vattenförande lager i sedimentärt berg beskrevs också. Detta system består av flera sensorer monterade i en sträng men avskiljda hydrauliskt med rörtätningar.

Många artiklar belyste kalibrering av sonder. Det finns generella kalibreringsuttryck som inte alltid räcker till. Det angavs att onoggrannheter över 2 % inte kan accepteras. Vissa system klarar onoggrannheter på ca 1 % men då krävs speciell kalibrering. Bäst resultat erhålls vid låga vattenhalter, upp till 30–40 %. Det som påverkar mätningen är främst ler- och saltinnehåll i jorden.

5.2 Rock and Soil Deformation Monitoring

Kane redovisade ett antal praktikfall där TDR-mätning använts för att detektera skjuvzoner i jord. Ökat utslag med tilltagande deformation redovisades samt jämförande mätningar med traditionell inklinometer. Bl a fanns resultat som visade att TDR-mätningen fungerade efter att inklinometerrören deformerats så att det inte var möjligt att mäta på traditionellt vis. Mätningar som visade när skjuvdeformationen blivit så stor att kabelbrott erhållits redovisades också. Kanes redovisade mätningar var oftast utförda med Campbell TDR 100 datalogger för automatisk mätning och dataöverföring med larmfunktion och vanlig kabel, RG59/U som kostar ca \$ 1/m. Det finns också en mer elastisk kabel med skum i som kostar ca \$ 2/m. Kane framhöll att injekteringsmedlet skulle var styvt nog att deformera kabeln. Han använde vanligen cement/bentonitblandning 90/10 % eller cement/kalkblandning 90/10 %.

Det redovisades också laborieförsök med skjuvning av koaxialkablar med mindre diameter, ca 4–10 mm, än vad som normalt används. Studien visar vilka krafter och deformationer de studerade kablarna kan utsättas för. Ett syfte med studien var att undersöka möjligheten att använda denna typ av kablar i småskaliga försök.

Flera artiklar belyste möjligheten att detektera rörelser i jorddammar, vanligen mot djupet. En artikel visade på möjligheten att detektera rörelser längs en damm. En kabel försedd med öglor hade monterats i en anordning som deformerade kabeln när den utsattes för dragning. En annan artikel visade en mer grundläggande studie där kablarna försetts med öglor vars radie var så stor att kabelns tvärsnittsytas började deformeras och därmed gav en TDR-signal. När kabeln därefter utsattes för dragning minskades öglorna och därmed ökade utslaget på TDR-mätningen.

5.3 Subgrade Monitoring

Det faktum att det finns mer innehåll i TDR-vågformen än information om vatteninnehåll gör att man kan få ut ytterligare information. Drenevich visade ett system för fältkontroll av packning där både vattenkvot och densitet kan bestämmas. Det verkade vara ett färdigt system som det finns kommersiella intressen i, även om det skall utvecklas ytterligare.

Ruth Roberson från Minnesota Department of Transportation visade en tillämpning där frostdjupet bestämts med TDR-teknik. I laboriet studerades mekanismen och hur TDR-mätningen visar på förändringar av dielektricitetskonstanten vid frysning/tiningsförsök. Instrumentering hade utförts i fält på 5 olika platser. Sonden som använts bestod av fyra olika segment med 15 cm längd. Datainsamling utfördes med ett automatiskt system som lade ut mätdata på Internet där de intresserade och berörda kunde ta del av mätningen några minuter efter att den utförts.

5.4 Environmental Monitoring

I [avsnitt 4.6](#) redovisas några exempel från innehållet i denna session. De flesta artiklarna visade laborieförsök där man försökt detektera olika föroreningar som kolväten eller salter av olika sammansättning. Grunden för dessa studier är att se på förändringar i dielektricitetskonstanten och korrelera denna mot t.ex. föroreningsgrad.

O'Conner visade hur TDR-tekniken använts för att mäta förändringar i ett skikt av olja ovan en grundvattenyta, se [avsnitt 4.6.3](#).

Ruth Roberson från Minnesota Department of Transportation redogjorde under denna session för försök med att mäta grundvattennivåer under en väggkropp. En inledande laboratoriestudie visade samband mellan förändrade vattennivåer och resultat från TDR-mätning med en luft-dielektrisk kabel. Instrumentering utfördes i fält där både en luft-dielektrisk kabel och en tryckgivare installerats i samma rör. Datainsamling utfördes med ett automatiskt system som lade ut mätdata på Internet där de intresserade och berörda kunde ta del av mätningen. Grundvattenytan bestämd med TDR-teknik och elektrisk tryckgivare visade sig överrensstämma väl och en slutsats var att ett robust och billigt system hade etablerats.

5.5 Optical TDR and Structural Monitoring

Under denna session visades ett flertal tillämpningar med optisk TDR-teknik (OTDR-teknik). Istället för en elektrisk kabel används en optisk ledare av glas eller annat ljusgenomsläppligt material. Denna teknik har främst använts för mätning av deformationer i konstruktioner där den optiska fibern kan gjutas in i en betongkonstruktion eller appliceras i efterhand.

En annan tillämpning med inriktning på miljögeoteknik presenterades i två olika artiklar. Tekniken går ut på att försä den optiska fibern med en absorbent som är känslig för främst olika kolväteföreningar. Genom denna teknik kan utslag fås vid OTDR-mätning som dels indikerar om det finns en förorening och i så fall var längs kabeln, dels i vissa fall vilken typ av förorening det rör sig om.

5.6 Framtida utveckling

Utvecklingen av hårdvara för TDR-teknik följer den utveckling som sker inom elektroteknik och datorteknik. TDR används inom stora områden såsom el-kraft, tele, TV och datornätverk där stora intressen finns. Utvecklingen inom dessa områden kan förväntas ge följd effekter för utrustning att använda inom geoteknik-, miljö- och konstruktionsområdena.

Eftersom mättekniken blir mer och mer förfinad ställs också högre krav på modeller och teorier för tillämpningar inom geoteknikområdet. Denna forskning och utveckling sker vad gäller mätningar som baseras på ändringar av dielektricitetskonstanten (vatteninnehåll, läckage och föroreningar mm) på flera olika håll i världen medan utvecklingen av deformationsmätning främst synes ske i USA. Det senare området baseras främst på praktiska tillämpningar och utveckling av utrustning som kan förväntas föra området framåt.

Tillämpningen att mäta vatteninnehåll i jord är idag kommersiell och ”färdigutvecklad” för sitt användningsområde.

Inom området läckage och föroreningar måste vidareutveckling ske innan det finns användbara system. Här verkar utvecklingen inom OTDR ha potential.

Tillämpningarna inom vägbyggnad med främst tjäl- och vattennivåmätning är intressanta och synes vara färdiga för praktiska tillämpningar. Samma förhållande gäller för deformationsmätning i konstruktioner med OTDR där det finns flera kommersiella system tillgängliga.

Inom området deformationsmätning är detektering av skjuvzoner det område som kommit längst i utvecklingen. Några företag i USA har specialiserat sig på detta och utför mätningar på kommersiell basis. Vad gäller mätning av sättningar och horisontalrörelser längs en horisontellt installerad kabel finns en del lovande resultat men systemen måste förfinas.

6 Möjliga utvecklingsprojekt

TDR-metoden är ny inom geoteknikområdet i Sverige. Metoden har hitintills endast använts i Sverige inom forskning på främst jordbruksområdet. Erfarenheter finns emellertid att hämta från andra delar av världen. För att tillämpligheten av metoden på svenska förhållanden ska kunna bedömas, måste den provas under kontrollerade och väl kända förhållanden.

Inom följande geotekniska och miljögeotekniska områden bedöms det finnas behov och utvecklingspotential för TDR-tekniken i Sverige:

- Metoder för mätning av föroreningsspridning i jord och för andra miljörelaterade mätningar.
- Mätning av fukthalten i den omättade zonen i siltjordar.
- System för deformationsmätning i jord.
- System för skredvarning.
- Mätning för tillståndsbedömning av vägar och järnvägar baserade på tjäl- och vattennivåmätning.

7 Litteraturlista

- (1) O'Conner, K och Dowding, C (1999). GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes. CRC Press, ISBN 0-8493-0586-1.
- (2) Israelsson, J och Edström, MO (odaterad). Skjuvrörelsemätning i berg.
- (3) Bohl, H och Roth, K (1994): Evaluation of Dielectric Mixing Models to Describe the Q(e) Relation, Proc. Symp. Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston, Illinois, Sept 7–9, U.S. Bureau of Mines, Special Publication SP 19–94, 1994, NTIS PB95-105789, pp. 309–319.
- (4) O'Connor, K et al. (1995): Development of a Highwall Monitoring System using Time Domain Reflectometry, Proc. 35th U.S. Sym. Rock Mech., Reno, Nevada, June, 1995, pp. 79–84.
- (5) Kane, W, F. (1998): Embankment monitoring with time domain reflectometry, Proc. Symp. Tailing and Mine Waste '98. 1998 Balkema, ISBN 905410922X.
- (6) Kane, W.F. och W.A. Parkinson (1998). Remote landslide monitoring including time domain reflectometry: short course manual. Stockton, California: KANE GeoTech, Inc.
- (7) O'Conner, K och Dowding, C (odaterad). Real Time Monitoring Of Infrastructure Using Tdr Technology: Case Histories. ?
- (8) O'Conner, K och Dowding, C (odaterad). Real Time Monitoring Of Infrastructure Using Tdr Technology: Principle. ?
- (9) Dowding, C.H, et al (2001). Detecting of Shearing in Soft Soil With Compliantly Grouted TDR Cables. Proceedings of the Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Evanston Sept. 5–7, 2001.
- (10) Persson, M, (2001). Using Time Domain Reflectometry for Non-Aqueous Phase Liquid Saturation Measurement. Proceedings of the Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Evanston Sept. 5–7, 2001.
- (11) Said, R. A. et al (2001). A TDR system for subsurface pollutants detection (II): Application and Analysis. Proceedings of the Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Evanston Sept. 5–7, 2001.
- (12) O'Conner, K, (2001). Use of TDR to Monitor changes in groundwater level and crude oil Thickness. Proceedings of the Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Evanston Sept. 5–7, 2001.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se