



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Lærebog i Fundering

Kapitel 2 - Markundersøgelser

Jacobsen, Moust; Thorsen, Grete

Publication date:
1985

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Jacobsen, M., & Thorsen, G. (1985). *Lærebog i Fundering: Kapitel 2 - Markundersøgelser*. Centertrykkeriet, Aalborg Universitetscenter.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LÆREBOG I

FUNDERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER

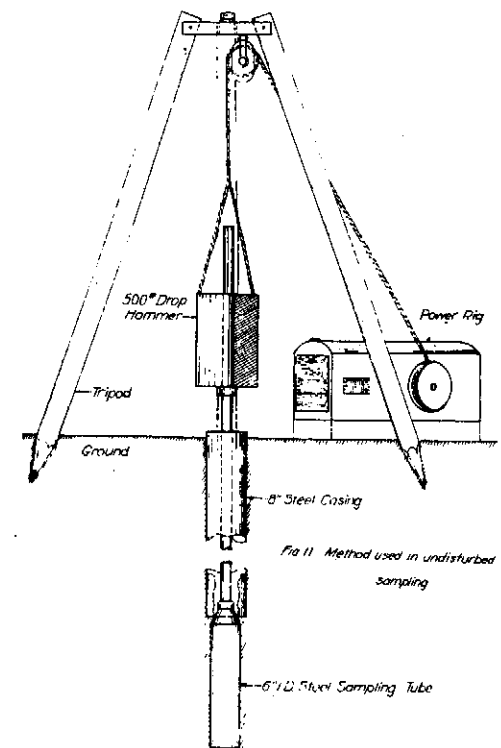
MOUST JACOBSEN OG GRETE THORSEN

MARKUNDERSØGELSER

2

KAPITEL 2

MARKUNDERSØGELSER



FORORD

Den planlagte lærebog i Fundering er blevet meget forsinket på grund af den store arbejdsbyrde, som påhviler lærerstaben i en tid med mange studerende og megen ændring i undervisningsplanen.

Det første kapitel »Geologisk Oversigt« blev udsendt okt. 1984, og det er vort håb at udsende et kapitel pr. semester.

Nærværende kapitel 2 er undergået mindre ændringer, dog er tilføjet et kort afsnit om offshoreundersøgelser.

Ved at udsende lærebogen kapitelvis, bliver hvert kapitel så billigt, at det dårligt kan betale sig at kopiere det. Det frarådes iøvrigt at kopiere brudstykker, fordi man derved nedsætter muligheden for at opnå et overblik over det enkelte emne.

Den 20. febr. 1985

Moust Jacobsen

Grete Thorsen

Eftertryk med kildeangivelse tilladt.

Tryk: Centertrykkeriet, Aalborg Universitetscenter.

ISBN 87-88787-02-8

INDHOLDSFORTEGNELSE

	side
2. Markundersøgelser	2.1
2.0 Indledning	2.1
Funderingsklasser	2.4
2.1 Indledende undersøgelser	2.6
Geologiske oplysninger	2.8
Luftfotos	2.10
2.2 Mekanisk sondering	2.12
Drejesondering med belastet spidsbor	2.12
Rammesondering	2.14
Hollandsk sondering	2.14
Sondering med penetrometer	2.15
Standard penetration test	2.15
2.3 Seismisk sondering	2.17
Refleksionsmetoden	2.18
Refraktionsmetoden	2.20
2.4 Geoelektrisk opmåling	2.22
Geoelektrisk kartering	2.26
Geoelektrisk sondering	2.28
Specifikke modstande for danske aflejringer	2.37
2.5 Andre geofysiske sonderingsmetoder	2.38
Dynamisk sondering	2.38
Sondering med »Georadar«	2.39
2.6 Lagfølgeundersøgelser	2.40
Geotekniske undersøgelsesboringer	2.40
Undersøgelsesboring i uhærdnede lag	2.41
Undersøgelsesboring i hærdnede lag	2.46

Skylle- eller sugeboringer	2.47
Prøvegravning og uforede boringer	2.48
Boreprofil	2.48
Metodens begrænsning	2.50
Planlægning af lagfølgeundersøgelser	2.52
2.7 In situ målinger	2.53
Vingeforsøg	2.53
Vandspejlsobservationer	2.55
Andre in situ målinger	2.55
2.8 Kontrolundersøgelser	2.58
Jordbundsforhold	2.58
Sætningsobservationer	2.59
Poretryksmålinger	2.60
2.9 Olie- og gaseftersøgning	2.63
Geofysiske undersøgelsesmetoder	2.63
Dybe boringer	2.64
2.10 Offshoreundersøgelser	2.66
Stabilitet af havbund	2.66
Positionsbestemmelse	2.67
Inspektion	2.67
Laboratorieforsøg på intakte prøver	2.67
In situ målinger	2.68

Appendix

Stikordsregister for kap. 1 og 2

2. MARKUNDERSØGELSER

2.0 INDLEDNING

Markundersøgelser udføres for at opnå et mere detaljeret kendskab til de geologiske forhold og jordens tekniske egenskaber, end den geologiske og geotekniske forhåndsviden kan give. Årsagen er hyppigst udførelsen af et teknisk projekt, men det kan fx også være ønsket om at klarlægge det pågældende områdes råstofressourcer.

Når et konkret projekt har nået en sådan udvikling, at dets omfang og eventuelle placering er fastlagt påbegyndes de geologiske og geotekniske markundersøgelser. De skal tilvejebringe de nødvendige oplysninger om områdets geologi, hydrologiske forhold og de egenskaber ved de trufne jordarter, som har betydning i den givne sammenhæng. Ved funderingsprojekter skal således klarlægges, hvordan de nødvendige påvirkninger fra den aktuelle konstruktion kan overføres til jorden uden at der sker skade på den aktuelle konstruktion eller på omgivelserne. Ved undersøgelse for lossepladser og nedsivningsanlæg for spildevand er det jordens kemiske respons på forurenet, nedsivende vand, der har den største interesse. Markundersøgernes omfang afhænger således af projektets omfang og af forhåndskendskabet til den aktuelle lokalitets geologi og geotekniske egenskaber. Der kan ikke gives generelle regler for omfanget af undersøgelserne, men disse bør føres så vidt, at der på intet tidspunkt under projektets udførelse kan opstå tvivl om dets forsvarlighed.

Ved fundering af bygninger eller andre bygværker klarlægges bundforholdene altid mindst til en sådan dybde, at der er sikkerhed for, at de underliggende lag ikke er dårligere i funderingsmæssig henseende end de allerede trufne jordlag. Ofte undersøges til større dybde for at få kendskab til hele den sætningsgivende del af jordlagene,

for at kunne vurdere bæreevnen af eventuelle pæle, eller for at undersøge, om der findes dybereliggende vandførende lag, der kan volde problemer for stabiliteten af udgravningens bund.

Geotekniske markundersøgelser kan inddeles i:

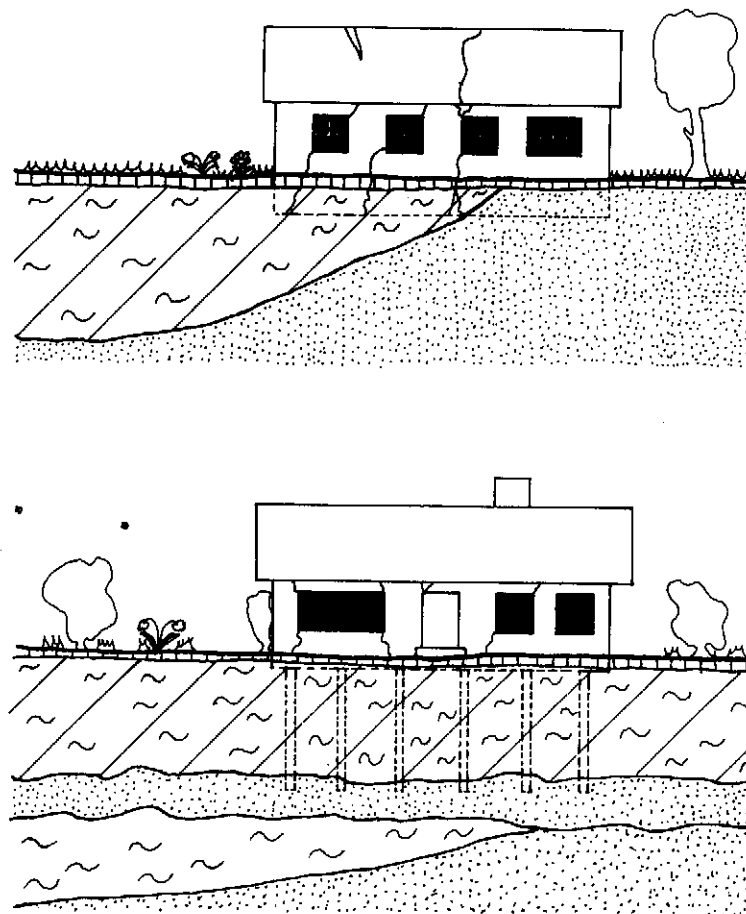
1. *Indledende undersøgelser*, der omfatter en vurdering af forholdene på baggrund af eksisterende viden.

2. *Projektundersøgelser*, der må medføre et kendskab til beliggenheden af og relevante egenskaber for de jordlag, der er afgørende for konstruktionens virkemåde. Ved en geologisk vurdering på stedet eller af optagne jordprøver skal alle stærkt sætningsgivende aflejringer konstateres (fx gytje (dynd), tørv, postglacialt ler, muld, fyld . . .), ligesom andre jordlag af betydning skal beskrives. Undersøgelsen skal desuden klarlægge grundvandsforholdene. Ved fundering af bygninger eller andre bygværker klarlægges bundforholdene altid mindst til en sådan dybde, at der er sikkerhed for, at de underliggende lag ikke er dårligere i funderingsmæssig henseende end de allerede trufne jordlag. Ofte undersøges til større dybde for at få kendskab til hele den sætningsgivende del af jordlagene, for at kunne vurdere bæreevnen af eventuelle pæle, eller for at undersøge, om der findes dybereliggende vandførende lag, der kan volde problemer for stabiliteten af udgravningens bund.

Projektundersøgelserne kan ved større projekter opdeles i forundersøgelser, hvis formål er at fastlægge placeringen af bygværket og en detailundersøgelse, hvis formål er at fastlægge jordbundsforholdene ved den valgte placering. Ved en forundersøgelse anvendes ofte sondering af mekanisk eller geofysisk art, suppleret med lagfølgeboringer. Ved en detailundersøgelse udføres geotekniske undersøgelsesboringer med optagelse af intakte og omrørte jordprøver. Der udføres endvidere forsøg til bestemmelse af jordens egenskaber og etableres pejling af grundvandsspejl. En så stor del af undersøgelserne som muligt udføres i marken, men ellers suppleres med laboratorieundersøgelser på det optagne prøvemateriale.

3. *Kontrolundersøgelser* under og/eller efter arbejdets udførelse. Under projektet suppleres projektundersøgelserne med en række kontrolundersøgelser til verifikation af de ved beregningerne forud-

satte laggrænser og lagenes egenskaber. Ved en geoteknisk undersøgelse opnås kun helt konkrete oplysninger i de enkelte punkter, hvor borer er udført. Kontrolundersøgelser under arbejdets udførelse er derfor meget væsentlige og kan ved større bygge- og anlægsarbejder blive særdeles omfattende.



Figur 2.1 Følgen af manglende undersøgelser

FUNDERINGSKLASSER

Med henblik på fastsættelse af minimumskrav til omfang og kvalitet af geotekniske undersøgelser, beregninger og udførelseskontrol for funderingsprojekter skelner normen (DS 415) mellem tre funderingsklasser, lempet, normal og skærpet funderingsklasse.

Ved fastsættelse af funderingsklasse skal følgende forhold tages i betragtning:

- Konstruktionens art og størrelse.
- Specielle forhold vedr. nabokonstruktioner (ledninger, bygninger og lignende).
- Jordbundsforhold.
- Grundvandsforhold.

Det er altså meget nødvendigt at inddrage geologisk viden på så tidligt et tidspunkt som muligt. Forekomsten af fedt tertært ler vil således altid kræve behandling i skærpet funderingsklasse, medens nogle andre jordarter (allerødaflejringer, interglaciale/interstadiale aflejringer eller aflejringer fra kridttiden) kræver en særlig vurdering, før funderingsklassen fastlægges.

Lempet funderingsklasse

Hertil regnes små og relativt simple konstruktioner, som det er muligt at sikre ud fra erfaringsregler, uden noget egentligt geoteknisk dimensioneringsgrundlag.

For direkte fundede bygværker skal det ved inspektion af de færdige udgravninger godtgøres, at funderingen overalt sker på sen-glaciale eller ældre aflejringer bestående af enten intakt friktionsjord eller nogenlunde fast, ikke sprækket ler ($c_v > 80 \text{ kN/m}^2$). Giver inspektionen ikke den nødvendige sikkerhed i den geologiske aldersbestemmelse eller i vurderingen af jords styrke, skal projektet behandles som for normal funderingsklasse. Inspektionen skal gennemføres af en person, der har tilstrækkelig geologisk og geoteknisk viden.

For pælefunderede bygværker skal udføres tilstrækkelige undersøgelser (normalt lagfølgeboringer eller prøveboringer, evt. suppleret med sonderinger) til, at underside af stærkt sætningsgivende aflejringer

ger kan fastlægges, hvor den inden for pælefunderingens udstrækning må antages at ligge dybest, samt til at der kan ske en rimelig sikker fastlæggelse af den negative overflademodstand.

Grundvandsforholdene vurderes ud fra en besigtigelse af forholdene under byggearbejdet. Konstateres der herunder betydende vandtilstrømning eller begyndende erosion, skal projektet behandles som for normal funderingsklasse.

Normal funderingsklasse

Hertil regnes de tilfælde, hvor det geotekniske dimensioneringsgrundlag kan regnes dækket af praktisk erfaring i et omfang, der tillader lempelser i de generelle krav til undersøgelsesberegninger og kontrol.

Undersøgelserne skal sædvanligvis omfatte boringer med tilhørende forsøg i et sådant omfang, at de relevante geotekniske data kan fastlægges i de aflejringer, der er bestemmende for fundamenternes bæreevne, for optrædende jordtryks størrelse, samt for stabilitets- og deformationsforholdene.

Grundvandsforholdene bør undersøges til en dybde under udgravningsniveau mindst lig udgravningsdybden under vandspejlsniveau.

Undersøgelserne af grundvandsforholdene kan i reglen indskrænkes til vandstandsobservationer i boringer og pejlerør under udførelse af de geotekniske undersøgelser samt en skønsmæssig vurdering af de hydrologiske forhold i øvrigt.

Skærpet funderingsklasse

Hertil regnes alle tilfælde, der er så komplicerede, at specielle særligt omfattende eller detaljerede undersøgelser og beregninger er nødvendige for at sikre funktionskravenes overholdelse. Undersøgelsesernes omfang skal mindst opfylde kravene for normal funderingsklasse.

Hertil regnes mere omfattende prøvebelastninger af pæle, pladebelastningsforsøg, forsøg til vurdering af afgravningsjordens anvendelighed som fyld, prøveopfyldninger med tilhørende sætningsobservationer, deformationsmålinger, poretryksmålinger, boringer, prøvepumpninger til vurdering af tilstrømningsforholdene samt mulighederne for midlertidigt eller permanent at ændre vandspejlsforholdene.

2.1 INDLEDENDE UNDERSØGELSER

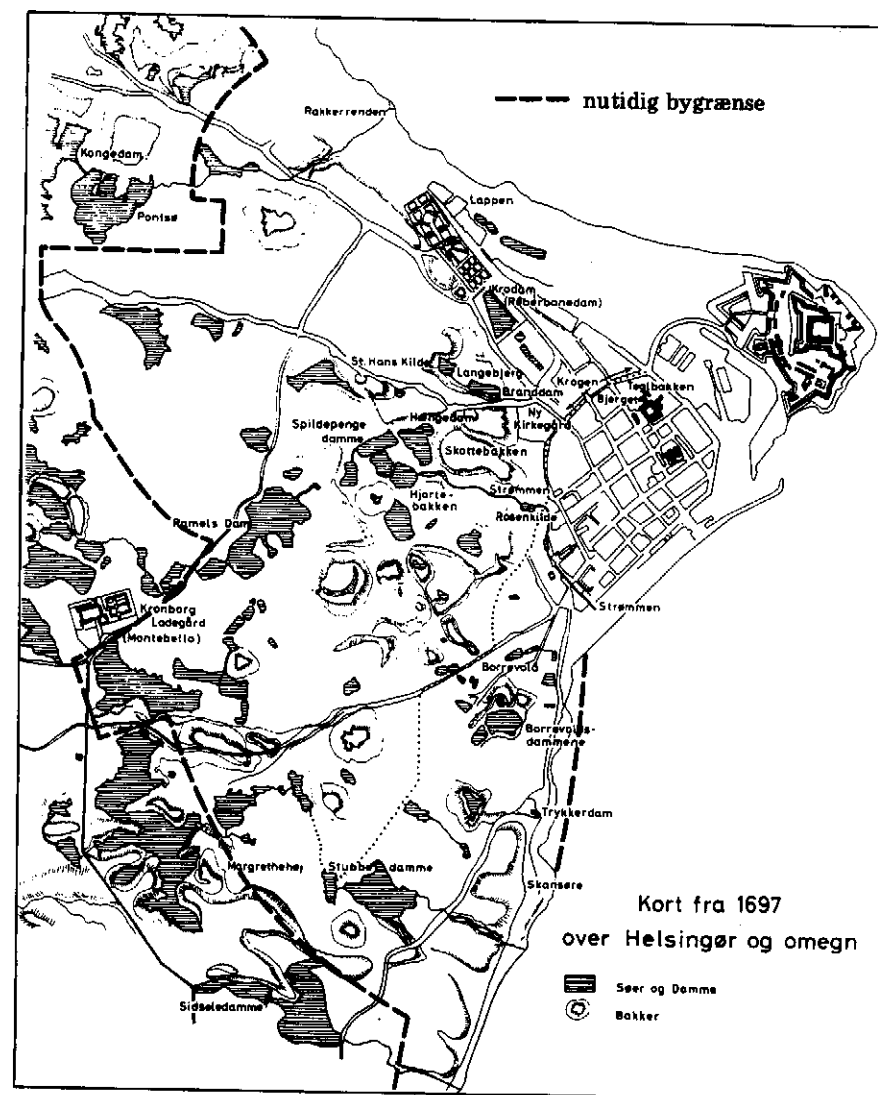
De første informationer om jordbundens beskaffenhed kan fås ved at studere landskabets form. Gamle kystlinier, flade strækninger, forsænkninger i terrænet og andre terrænformer kan give det første indtryk af den givne lokalitets jordbundsforhold.

Geodætisk Instituts 4 cm kort kan give gavnlige oplysninger, og sammenholdt med ældre kort kan eksempelvis findes tidligere vandløb, damme, grusgrave og opfyldninger. Det kan nævnes, at Helsingør ligger i et område, der tidligere var rigt på søer og damme. Et kort fra 1697 viser således mere end 10 gange så store vandarealer som i dag. Af figur 2.2 ses, at den nuværende bygrænse er tæt på disse områder, og man må regne med en del problemfyldt byggeri.

Nærliggende bygningers sætninger kan undersøges og sammenholdes med oplysninger om funderingsform og eventuelle bundundersøgelser. Eksisterende udgravninger kan inspiceres. Hos de lokale bygningsmyndigheder kan ofte indhentes værdifulde oplysninger om bundforhold og om tidligere aktiviteter, der har bevirket indgreb i det naturlige terræn, fx tilfyldte grus-, ler- og kalkgrave etc.

Viden fra andre fagområder kan fortælle om jordbundsforholdene. Således vidner selvsåede egetræer om sandbund eller mager jord. Jyske bynavne, der ender på -um, tyder på god jordbund, bynavne, der ender på -sig eller -tved, tyder på vanskelige funderingsforhold.

Foruden viden om jordbundsforholdene er det meget væsentligt allerede i de indledende undersøgelser at få klarhed over stedets hydrologiske forhold, idet grundvandsproblemer kan virke helt ødelæggende på et ellers godt projekt. Igen kan landskabsformen, sammenholdt med de første antagelser om jordbundsforholdene, give nogle oplysninger. Således vil meget bakket terræn give mulighed for artsisk grundvand i dalene, mens det ikke kan være tilfældet i flade egne. Søer og fjorde står som regel gennem sandlag i forbindelse med nogle af jordlagene på nærliggende lokaliteter. I visse tilfælde finder der vandindvinding sted i nærheden og oplysninger herfra kan give et fingerpeg om forventelige mængder af tilstrømmende vand samt beligheden af et øvre vandspejl.



Figur 2.2 Kort fra 1697 over Helsingør og omegn

GEOLOGISKE OPLYSNINGER

Danmarks Geologiske Undersøgelse (DGU) har siden slutningen af sidste århundrede udført et løbende karteringsarbejde, dvs. en geologisk kortlægning af de jordarter, der findes ca. 1 m under terræn. En del af det foreliggende materiale er udgivet i form af kortblade og kortbladsbeskrivelser (DGU, 1. række), hvor de geologiske kort forefindes i målestoksforholdet 1:100.000.

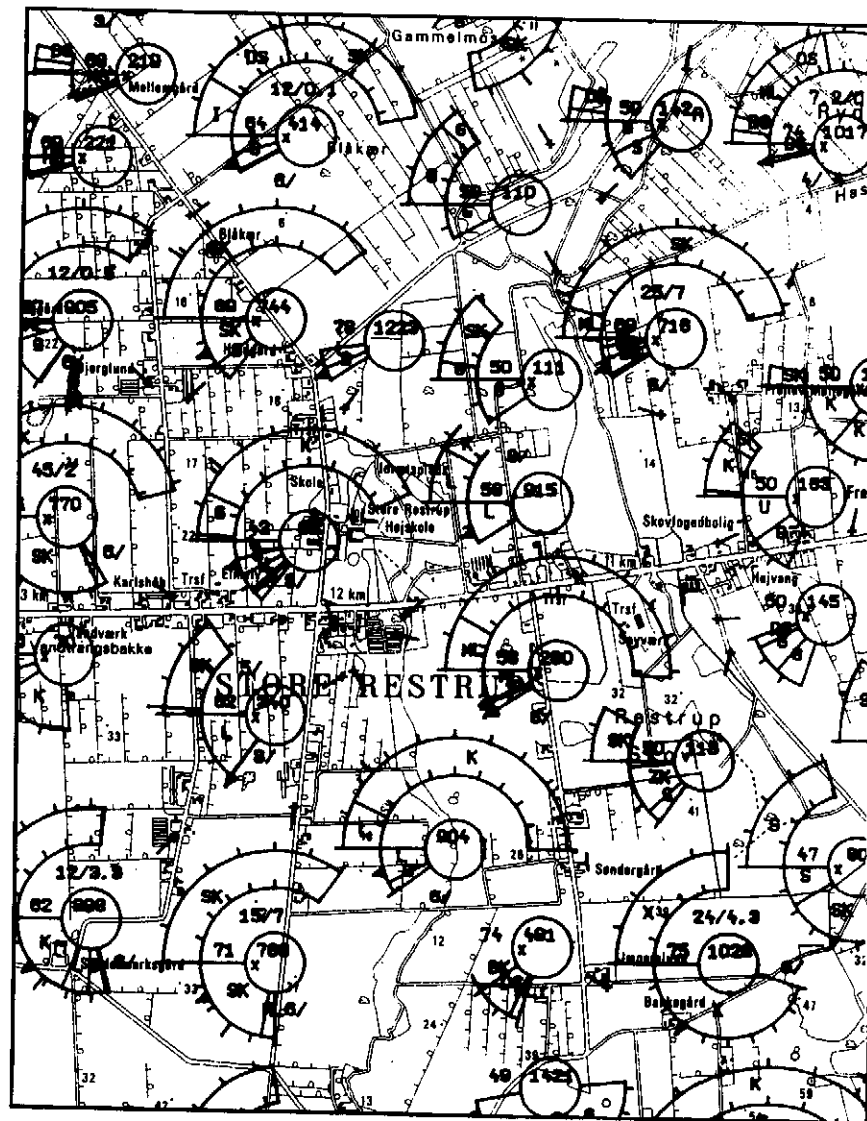
Alt karteret materiale forefindes i foreløbig udgave optegnet på transparentplaner 1:25.000 beregnet til brug sammen med Geodætisk Instituts 4 cm kort (jf. figur 2.4).

Borearkivet på DGU råder over et meget udstrakt arkivmateriale indeholdende oplysninger om boringer udført over hele landet. Her kan indhentes oplysninger om en lokalitets geologi. På de enkelte amter forefindes det samme materiale, for så vidt angår boringer udført inden for amtet. I amternes regi er fremstillet basisdatakort 1:25.000, der indeholder de væsentligste oplysninger om udførte boringer inden for området (jf. figur 2.3).

Basisdatakortet danner grundlag for en lang række geologiske kort, fx geohydrologiske kort, råstofkort, geomorfologiske kort, ingeniørgeologiske kort, der fremstilles for bedre at kunne tilfredsstille de krav, det moderne samfund stiller med hensyn til anvendelse af geologisk viden i planlægning, administration, forureningsbekæmpelse m.m.

En række ingeniørgeologiske beskrivelser af jordbundsforholdene i og omkring danske byer er udarbejdet af afdelingsgeolog, fru E.L. Mertz. Disse beskrivelser er udgivet som rapporter fra DGU og indeholder en oversigt over det aktuelle byområdes geologiske opbygning og de vigtigste jordarter i området samt en gennemgang af tidligere aktiviteter og indgreb i det naturlige landskab i og omkring byområdet.

Desuden forefindes tilgængelige oplysninger hos geotekniske specialfirmaer, der har deres egne arkiver med tidligere undersøgelsesresultater.



Figur 2.3 Basisdatakort (signaturer i appendix).

2.2 MEKANISK SONDERING

En sondering er en registrering af visse fysiske egenskaber i jorden. Det er en markundersøgelsesmetode, der kan give et indtryk af variationer i bundforholdene inden for det aktuelle område. Der optages ikke prøver og opnås ikke nøjere identifikation af jordarterne eller viden om deres styrke- og deformationsegenskaber. Sonderinger er imidlertid billige og benyttes som grundlag for placering af egentlige undersøgelsespunkter. Undersøgelsesfeltet dækkes af sonderinger, og enkelte punkter udvælges til nøjere undersøgelse ved borer.

De ældste metoder til undersøgelse af bundforhold er rent mekaniske: Der drives en sonde ned i jorden ved ramning, tryk eller omdrejning. Modstanden mod nedtrængning giver et udtryk for jordbundens relative fasthed uden iøvrigt at oplyse om de gennemtrængte lags art eller geotekniske egenskaber.

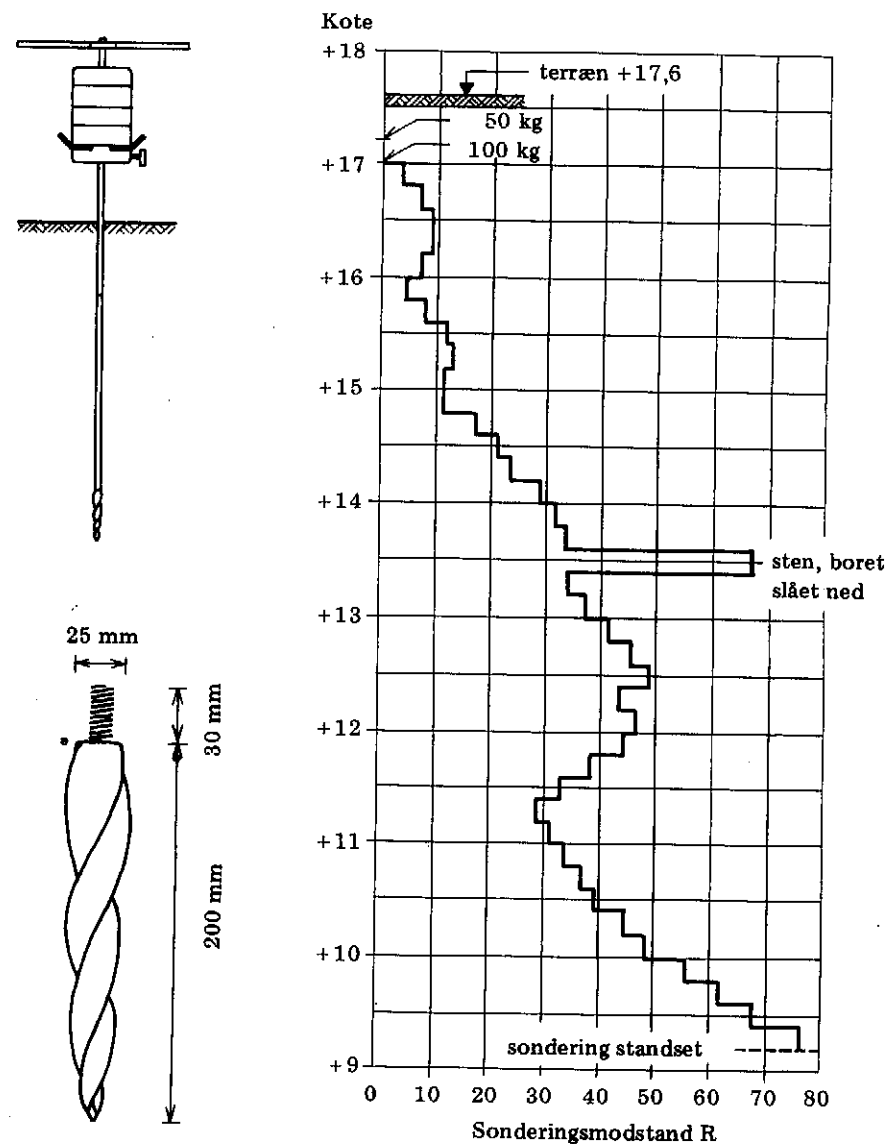
DREJESONDERING MED BELASTET SPIDSBOR

Drejesondering med belastet spidsbor var tidligere meget anvendt på grund af de ringe omkostninger, der var forbundet med brugen af det. Men i dag anvendes metoden kun sjældent, fordi bedre metoder i dag er relativt billigere end tidligere.

Spidsboret består af et 200 mm langt, pyramideformet stykke firkantstål, der er snoet 3/4 omgang, samt et antal 1 m lange, cylindriske stænger, der kan skrues sammen, efterhånden som spidsboret synker i jorden. Spidsboret lodbelastes med 100 kg. Den øverste stang er forsynet med et håndtag, hvormed boret kan drejes.

Et sonderingsdiagram viser først, hvor langt boret er sunket for lodbelastning alene, og herefter sonderingsmodstanden R , der er defineret som det antal halve omdrejninger, der skal til for at boret synker 20 cm. De registrerede resultater fremtræder som en trappekurve (se figur 2.6).

Ved den foreløbige tolkning af et sonderingsdiagram kan man for mindre konstruktioner i almindelighed påregne aflejringer uden væsentlige styrke- og deformationsproblemer under det niveau, i hvilket sonderingsmodstanden $R > 10$ og stigende med dybden. I kohæsions-



Figur 2.6 Sonderingsmodstand R

jord vil sonderingsmodstanden normalt stige jævnt med dybden, i friktionsjord vil den ofte være ret konstant. Uden kendskab til de geologiske forhold og de aktuelle jordarter på stedet kan sonderingsdiagrammer imidlertid være vildledende, idet fx en udmærket og fast sandaflejringsring kan give lille sonderingsmodstand, mens en trævlet tør udmærket kan give en sonderingsmodstand, der er over 10. Resultater af sonderinger med belastet spidsbor bør derfor altid sammenholdes med direkte oplysninger om jordlagene på stedet.

Andre årsager til vildledende resultater kan være:

- den voksende fasthed med dybden, som aflæses af diagrammet, kan skyldes voksende friktion langs borestangen.
- jordlagene ved spidsen omrøres, og man får derfor ikke noget indtryk af den intakte jords styrkeforhold.
- jordlagenes art kan ikke konstateres, selv om noget kan sluttes ved at lytte til borestangen (sand knaser), eller bemærke ryk i bevægelsen (sten).
- sand- og gruslag kan eventuelt forhindre borets nedtrængning til ønsket dybde.
- kapillarspændinger i fugtigt sand giver ekstra modstand, der falder, når GVS nås. Dette kan også tolkes som mindre bæredygtig jord.

RAMMESONDERING

Rammesonden består af en modelpæl, som drives ned i jorden af et ramslag med given vægt og faldhøjde. Da der er tale om en dynamisk påvirkning, kan rammesonden med en vis rimelighed anvendes til vurdering af den nødvendige længde af spidsbærende pæle i friktionsjord ved hjælp af rammeformlen. Resultatet fremstilles i et sonderingsdiagram, hvori angives antal slag pr. 20 cm nedsynkning.

HOLLANDSK SONDERING

En hollandsk sondering er en tryksondering. Sonden, der er en modelpæl af stål, er konstrueret således, at spidsmodstand og overflademodstand kan adskilles.

Sonden bruges fortrinsvis ved kendte jordbundsforhold til bestemmelse af sandlags friktionsvinkel.

Man presser et rør ned i jorden, inden i hvilket der løber en aksel, hvormed spidsen kan trykkes ned (jf. fig. 2.7). Ved passende foranstaltninger undgås at jordpartikler trænger ind mellem aksel og trykrør. Spidsen, der er 10 cm², er udformet som en 60° kegle.

Ved tryk på trykrøret går det mod spidsen, og der kan måles summen af spidsmodstanden Q_p og overflademodstanden Q_m . Ved tryk på akslen bevæges spidsen ned i jorden alene, og herved bestemmes spidsmodstanden Q_p . Man må i begge tilfælde sikre sig, at der er fremkaldt bruttilstand i jorden.

Målingerne bedømmes ud fra kendskabet til de geostatistiske formler, hvorved de nødvendige styrkeparametre til beregning af funderingspæle bestemmes. Forholdet mellem Q_m og Q_p kan vise, om det betragtede jordlag er kohæsionsjord eller friktionsjord.

SONDERING MED PENETROMETER

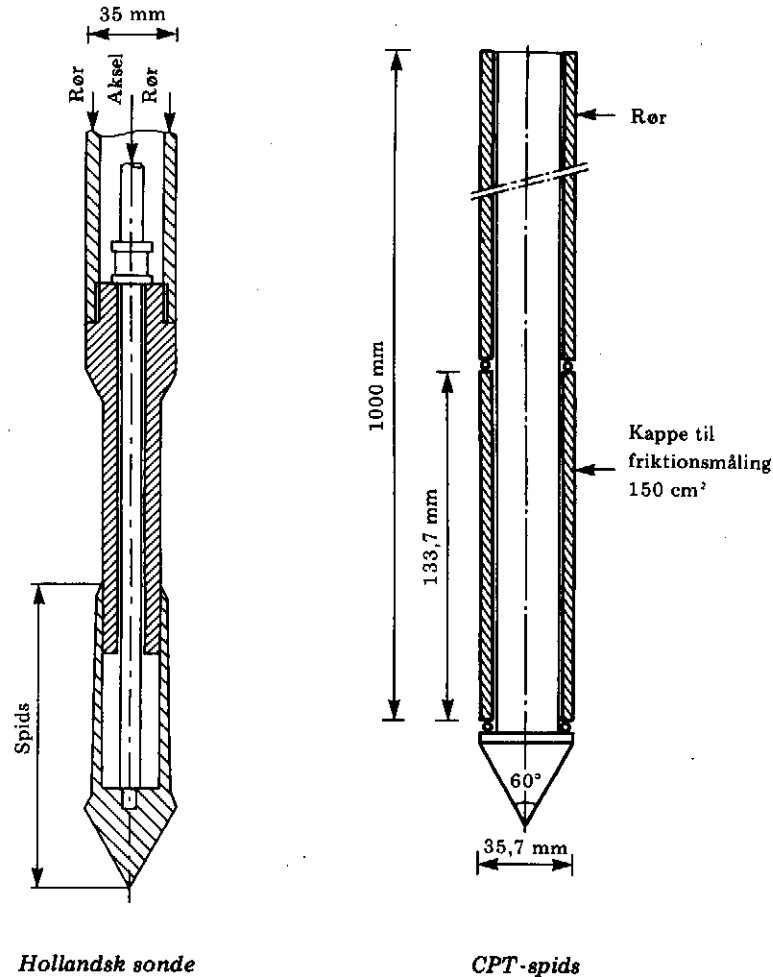
Et penetrometer er en kort pæl med kegleformet spids. Det kan fastgøres på en sonderingsstang og trykkes ned gennem jordlagene. Der registreres såvel spidsens modstand mod nedpresning, som de kræfter der overføres til pælens overflade på et kortere stykke (målestrækningen). I princippet måler penetrometret det samme som den hollandske sonde, men registreringen er elektrisk og den er lettere at arbejde med. Penetrometerforsøg omtales oftest som CPT forsøg (Cone penetration test) og finder især anvendelse inden for den marine geoteknik.

STANDARD PENETRATION TEST

SPT-forsøget er den eneste af de hidtil nævnte sonderinger, der udføres i et borehul. Det udføres ved nedramning af et stålrør (sonden) ved hjælp af et standardiseret faldlod. SPT-værdien N angiver antallet af slag for 30 cm nedramning af sonden i intakt jord under bunden af et borehul. Resultatet giver for friktionsjord et indtryk af lej-

ringstæthed. Værdien af resultaterne er meget afhængig af, om vandspejlet i boringen har været i ro. Selv ganske små opadrettede gradienter i friktionsmaterialet kan bevirke helt misvisende SPT-værdier.

Såfremt SPT-sonden er en hul stålcylder, kan den fyldes med materiale under nedramningen, jf. side 2.44.



Figur 2.7 Måleinstrumenter.

2.3 SEISMISK SONDERING

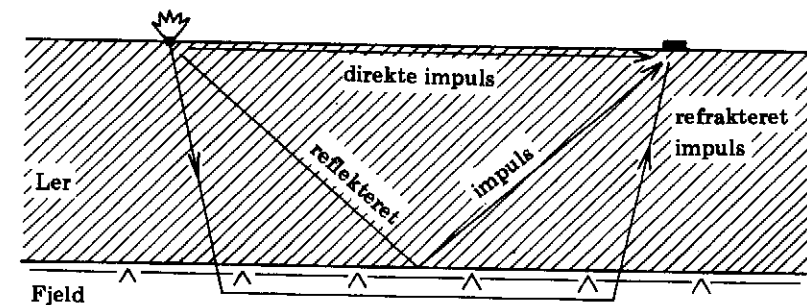
Seismisk sondering er en geofysisk målemetode, der er anvendelig ved projekter, der kræver kendskab til jordbundsforholdene i større områder. Man får indtryk af laggrænsernes beliggenhed, men får ikke viden om jordarter og deres tekniske egenskaber, hertil kræves boringer.

Ved seismiske sonderinger udnyttes det forhold, at forplantningshastigheden for lydbølger varierer med jordlagenes fasthed.

Fra en lyd giver forplanter sig tre forskellige impulser, 1) longitudinalbølger, 2) transversalbølger og 3) overfladebølger. Longitudinalbølgernes udbredelse sker med størst hastighed, det seismiske måleudstyr er derfor baseret på registreringen af longitudinalbølgernes udbredelse i jorden.

Fra en lyd giver udbreder lydbølgerne sig halvkugleformet gennem det øverste lag. Hvis lydbølgerne når et lag med større fasthed, vil en del af energien kastes tilbage fra laggrænsen (reflekteres) og en del forplanter sig (refrakteres) gennem dette lag med en hertil svarende forplantningshastighed.

Anbringes som vist på figuren en modtager (geofon) i en vis afstand fra en lyd giver, får geofonen følgende impulser, 1) den direkte impuls, 2) den reflekterede impuls og 3) den refrakterede impuls. Den direkte impuls forplanter sig med hastigheden v_1 direkte fra lyd giver til geofon. Den direkte impuls vil altid nå geofonen før den reflekterede impuls, idet lydbølgerne forplanter sig gennem samme ma-



Figur 2.8 Seismisk sondering

teriale, og forplantningsvejen for den direkte impuls er den korteste. Den refrakterede impuls forplanter sig med hastigheden v_1 fra lyd giver til laggrænse, med hastigheden v_2 gennem det nedre lag, og med hastigheden v_1 fra laggrænsen gennem det øverste lag til geofonen. Ved små afstande mellem lyd giver og geofon vil den direkte impuls ankomme først til geofonen. Ved større afstande mellem lyd giver og geofon kan den refrakterede impuls ankomme før den direkte impuls på grund af en større forplantningshastighed i de nedre lag.

REFLEKSIONSMETODEN

Refleksionsmetoden er baseret på en registrering af tidsforskellen mellem den direkte impuls og den reflekterede impuls. Dette princip har i mange år været anvendt ved registrering af vanddybder ved hjælp af ekkolod. Modtageren anbringes tæt ved lyd giveren, og forskellen i tid mellem den direkte impuls og den fra havbunden reflekterede impuls kan anvendes til fastlæggelse af vanddybden, når lyd hastigheden i vandet er kendt.

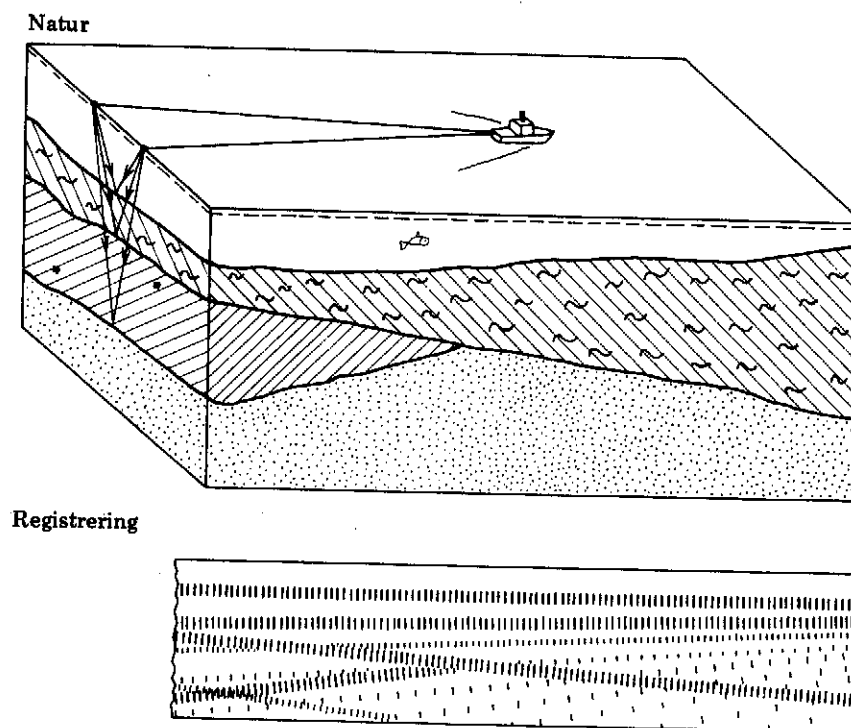
Såfremt lyd giveren har større effekt og lavere frekvens end et ekkolod, vil signalet kunne trænge ned gennem havbunden og reflekteres fra laggrænser mellem jordlagene. Et signal vil nemlig reflekteres, når det møder et lag med større fasthed, fordi lyd hastigheden da vokser.

For at opnå en klar refleksion fra en laggrænse er det nødvendigt, at det underliggende lag er markant forskelligt fra det overliggende, hvad lyd hastighed angår, således som det er tilfældet, såfremt bløde aflejringer underlejres af meget hårde aflejringer. I Danmark er dette sjældent tilfældet for de lagserier, der har interesse i forbindelse med geotekniske undersøgelser. Såfremt der anvendes en kontinuert registrering (som fx ved et skrivende ekkolod), kan metoden imidlertid give værdifulde oplysninger om variationer i bundforholdene.

Ved geotekniske undersøgelser anvendes refleksionsmetoden væsentligst til markundersøgelser på vanddækkede arealer, hvor lyd giver og modtager (hydrofon) anbringes i vandoverfladen på slæb efter en båd. Lyd giveren kan være en elektrisk gnist, der udløses med jævne mellemrum. Der foregår en kontinuert registrering af de impulser, hy-

drofonen modtager. Ved vanddybder ≥ 5 m kan opnås bestemmelser af væsentlige laggrænser inden for dybder på 20 à 30 m under havbund med nogle få meters nøjagtighed. Det er dog sådan, at havbunden og de underliggende laggrænser reflekterer signalet mere end en gang. Sådanne ekkoer, der registreres med mellemrum svarende til afstanden fra vandoverfladen, vanskeliggør tolkningen af dybere liggende laggrænser, idet det kan være vanskeligt at skelne senere ankomne impulser, hvis de ikke er meget kraftige.

Refleksionsmetoden giver kun brugbare resultater, såfremt lyd hastigheden er stigende med dybden. Under visse forhold kan det være vanskeligt at opnå fornøden nedtrængning. Det er således tilfældet, hvis havbunden er dækket af dynd, der på grund af forrådnelse har et stort indhold af gas.



Figur 2.9 Refleksionsmetoden

REFRAKTIONSMETODEN

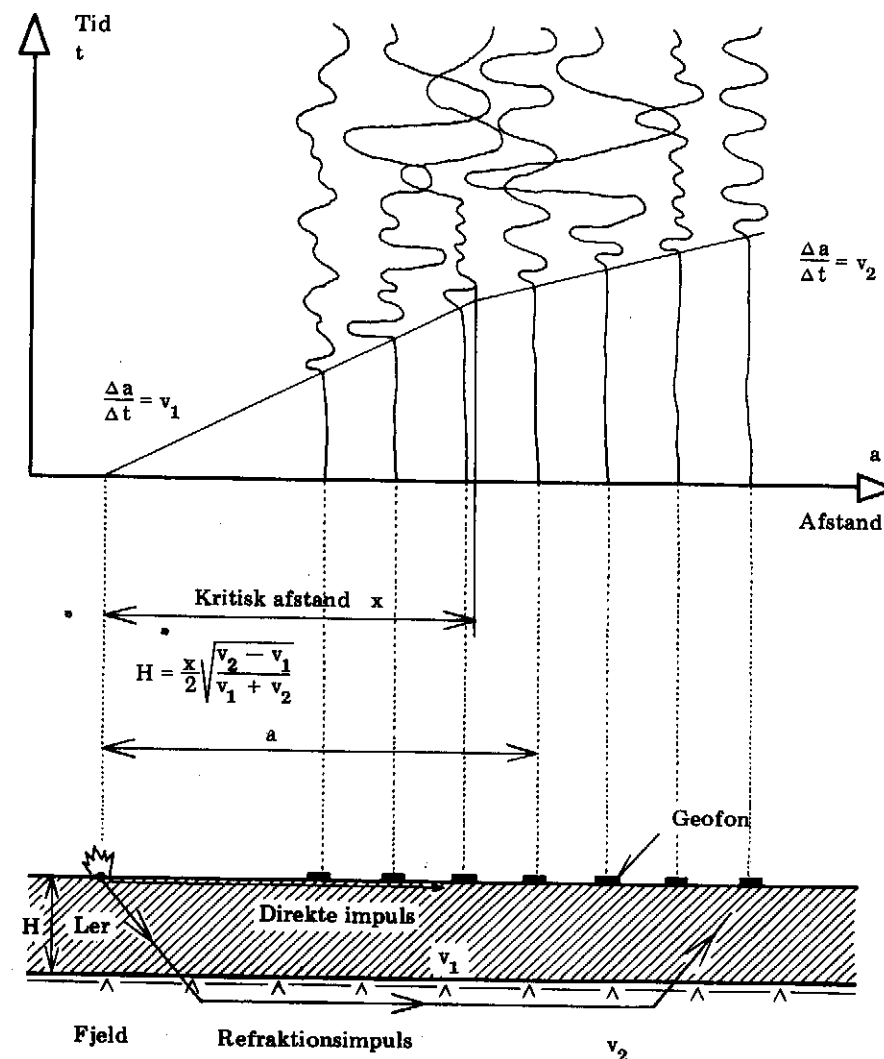
Refraktionsmetoden er baseret på en måling af den tid der går, fra et signal udsendes fra en lyd giver, til det første gang registreres på modtageren (geofonen). Såfremt geofonen er placeret tæt på lyd giveren, vil den impuls, der løber i direkte linie fra lyd giver til geofon, registreres først. Såfremt geofonen derimod er placeret i en vis afstand fra lyd giveren, kan signalets hurtigste vej gå gennem dybereliggende jordlag med højere lyd hastighed. Signalet vil være afbøjet (refrakteret) for at kunne løbe horisontalt gennem det dybere liggende jordlag.

Ved en refraktionsseismisk undersøgelse opstilles en række geofoner i forskellig afstand a fra lyd giveren (sprængningsstedet). På figur 2.10 er vist et eksempel på en opstilling med 7 geofoner anbragt på en lokalitet, hvor et lag af blødt ler overlejrer fast fjeld. De impulser, geofonerne modtager, registreres på et hurtigt løbende papirbånd.

Registreringen på dette bånd viser først et lodret, næsten retlinet stykke, der går over i en række voldsomme svingninger. Længden af det retlinede stykke angiver den tid, det tager for den hurtigste impuls at nå fra lyd giver til geofon. For de geofoner, der er nærmest lyd giveren, har den først ankomne impuls alene forplantet sig gennem det øverste lag med en hastighed v_1 . Denne hastighed findes som hældningen af den rette linie, der går gennem endepunkterne af de registrerede lodrette linier. Hvis de fjerneste geofoner er anbragt tilstrækkelig langt fra lyd giveren, bestemmes forplantningstiden for den først ankomne impuls til disse geofoner væsentligst af lyd hastigheden v_2 , i det nedre lag. Hældningen af en ret linie gennem endepunkterne af de registrerede lodrette linier ved de fjerneste geofoner bestemmer derfor v_2 . Skæringspunktet mellem de to rette linier ligger i afstanden x fra lyd giveren. Af x , v_1 og v_2 kan tykkelsen H af det øverste lag bestemmes.

Af eksemplet ses, at metoden er anvendelig ved registrering af én karakteristisk laggrænse, hvis lyd hastigheden og dermed fastheden i det nederste lag er væsentlig større end i det overliggende lag. I Danmark er dette normalt kun tilfældet i forbindelse med organiske af-

lejringer, og da disse ofte på grund af stort luftformigt indhold opsuger lyd energien, anvendes refraktionsmetoden praktisk taget ikke i forbindelse med geotekniske undersøgelser her i landet.



Figur 2.10 Refraktionsmetoden

2.4 GEOELEKTRISK OPMÅLING

Geoelektrisk opmåling er en geofysisk målemetode, der har vundet stor udbredelse i de senere år. Den giver en ide om laggrænser og jordarter, men kan ikke anvendes uden lagfølgeundersøgelser i udvalgte punkter.

Metoden bygger på måling af den elektriske ledningsevne i jorden. Ledningsevnen, der fremkommer som en kombineret virkning af porevandets og kornenes ledningsevne, betragtes ved denne metode som en karakteristisk størrelse for et jordlag.

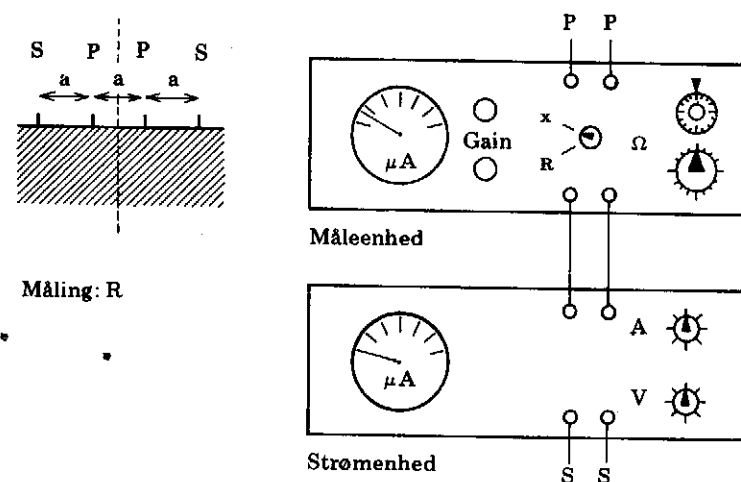
Ledningsevnen afhænger meget af vandets indhold af opløste stoffer, idet strømmen i stor udstrækning sker ved elektrolytisk ledning, der bliver kraftigere desto flere ioner, der er opløst i vandet. Kornenes ledningsevne kan have nogen indflydelse i lerlag, idet lerminerallerne har en vis ionbytningssevne. Kornenes ledningsevne afhænger dog også af de ioner, der findes i porevandet. Ledningsevnen i lerlag vil normalt være højere end i sandlag, ikke alene på grund af lerminerallerne større ledningsevne, men også fordi vandindholdet er større.

Ved den geoelektriske målemetode bestemmes den specifikke modstand, der er den reciprokke ledningsevne, i forskellige dybder under jordoverfladen. Man kan derfor bestemme et antal karakteristiske laggrænser, samt lagenes specifikke modstande, der med nogen forsigtighed og megen erfaring kan give en foreløbig grov inddeling af jordlagene. Vandmættede jordarter har mindre specifik modstand end delvis vandmættede jordarter, og kapillarvandspejlet vil derfor ved denne metode opfattes som en laggrænse.

Målearrangementet består af to strømelektroder, der stikkes ca. 10 cm ned i jorden og påtrykker jorden et elektrisk spændingsfelt med strømstyrken I . Imellem strømelektroderne (S) placeres to potentialelektroder (P), hvorover potentialfaldet V måles. Er elektrodeafstanden konstant og lig med a , kan den tilsyneladende specifikke modstand ρ_a beregnes af

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I} = 2\pi a R$$

Hvis jorden er homogen, varierer ρ_a ikke med a og er da netop jordens specifikke modstand. Består jorden af to lag, vil ρ_a for små værdier af a måles svarende til øvre lag, og for meget store værdier af a vil ρ_a svare til andet lag. ρ_a vil variere gradvis mellem de to værdier. Er der flere lag, vil ρ_a 's variation med a blive yderligere kompliceret (se senere). Da ρ_a således ikke i praksis svarer til et bestemt lags specifikke modstand, kaldes ρ_a for den *tilsyneladende* specifikke modstand.



Figur 2.11 Eksempel på måleapparater

Eksempel på måleprocedure

Måleapparatet består af to instrumenter, nemlig en strømenhed og en måleenhed. Strømenheden leverer strøm til strømelektroder og er udstyret med tre spændingsområder, således at spændingen over systemet kan tilpasses vekslende måleafstande og specifikke modstande. I måleenheden modtages fra potentialelektroderne et signal, der er et mål for potentialfaldet. Herefter indskydes en variabel modstand i stedet for potentialelektroderne. Den modstand, R , der netop giver samme signal som før, er da den søgte modstand.

Teori for et-lags system

Der betragtes en homogen jord, der strækker sig til stor dybde. Den påtrykte spænding på jordoverfladen og strømmens forløb i jord kan beregnes helt analog med vands strømning i jord. Blot skal jordens permeabilitet k erstattes af jordens specifikke ledningsevne $\sigma = 1/\rho$, hvor ρ er den specifikke modstand, det hydrauliske potentiale h af det elektriske potentiale V og vandmængden Q (m^3/sec) af den elektriske strømstyrke I .

Idet overfladen af en halvkugle er $2\pi r^2$, fås således differentialligningen for potentialet V i afstanden r fra et kildepunkt S med strømstyrken I (se også LG kap. 5)

$$I = -2\pi r^2 \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta V}{\delta r}$$

heraf fås, idet

$$V \rightarrow 0 \text{ for } r \rightarrow \infty$$

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r}$$

Såfremt der placeres to strømelektroder på jordens overflade, kan det resulterende potentiale V_r findes, når afstanden til de to strømelektroder r_+ og r_- kendes, idet superpositionsloven anvendes:

$$V_r = \frac{I}{2\pi\rho} \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right)$$

Med den opstilling, der er vist på figur 2.11, bliver potentialforskellen V_p mellem potentialelektroderne:

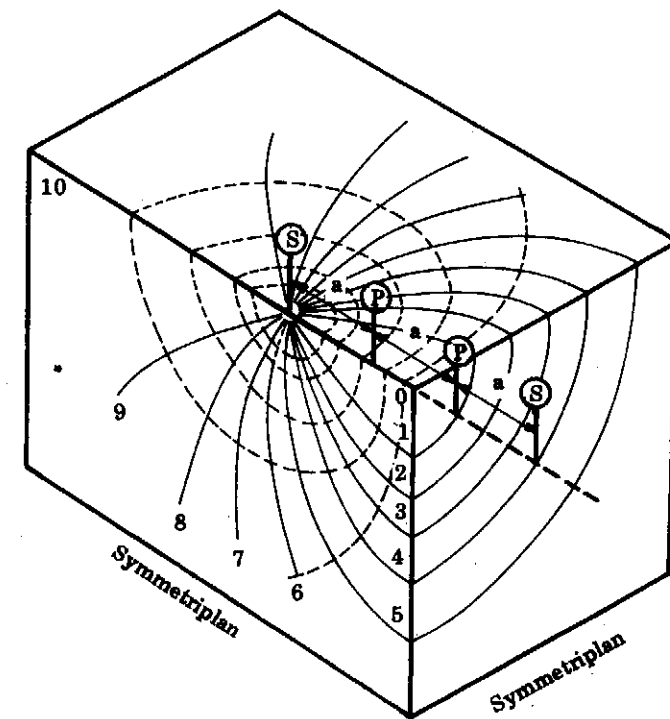
$$V_p = V_1 - V_2 = \rho \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \rho \frac{I}{2\pi} \left(-\frac{1}{a} + \frac{1}{2a} \right) = \rho \frac{I}{2\pi a}$$

Måles den samlede modstand $R = V_p/I$ fås heraf

$$\rho = 2\pi a R$$

Strømnettet er tredimensionalt og rotationssymmetrisk. På figuren er jorden skåret igennem langs et lodret midtnormalsnit til forbindelseslinjen mellem de to strømelektroder, der er en potentialflade. Strømladernes spor i denne potentialflade er cirkler. Strømlader og potentialflader står naturligvis vinkelret på hinanden.

Beregningsen er foretaget under forudsætning af homogen jord og kan derfor kun benyttes, hvis der ikke forekommer laggrænser med diskontinuiteter i ρ .



Figur 2.12 Potentialfelt i homogen aflejring

GEOELEKTRISK KARTERING

For at få det første grovere overblik over variationerne i bundforholdene i et område kan man udføre en række målinger, hvor opstillingscentret (målepunktet) flyttes, men hvor elektrodeafstanden er den samme ved hver måling. Herved opnås, at samme jordvolumen indrages ved hver måling, hvorfor variationer i ρ_a må skyldes variationer i jorden.

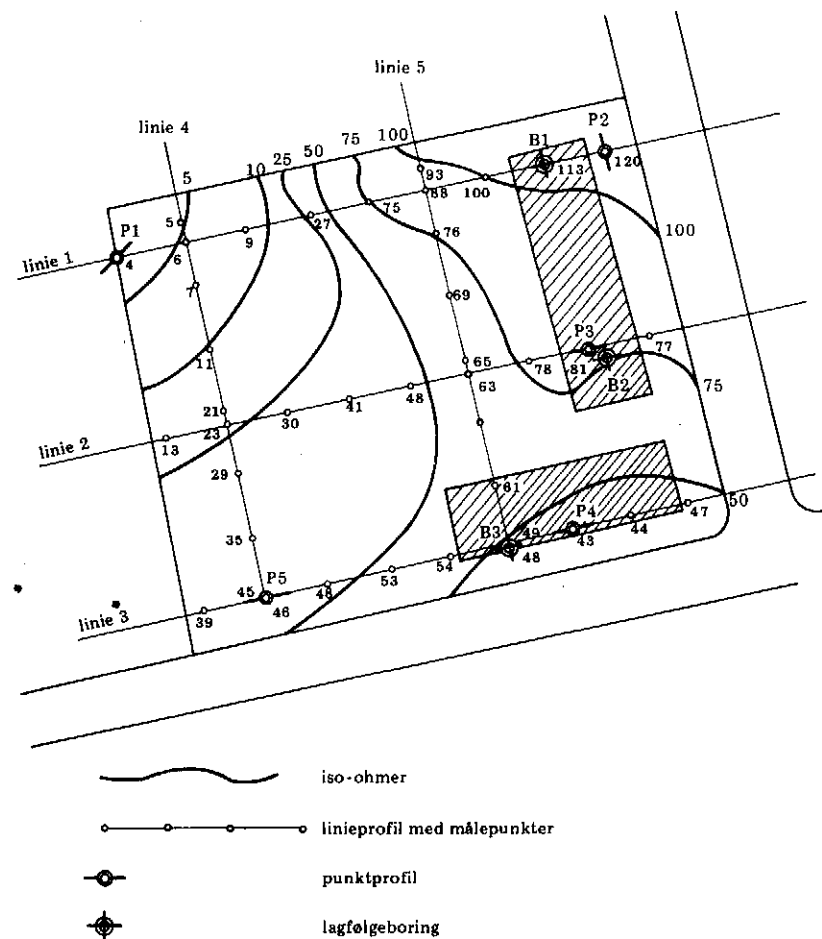
Man udvælger en række linier i terrænet, således at man på bedst mulig måde får dækket hele området. Målepunkterne lægges med en afstand, der er et helt multiplum af elektrodeafstanden a . I hvert punkt bestemmes ρ_a , og det er nu muligt at optegne et såkaldt resistivitetskort over området, der viser forløbet af kurver med samme værdier af ρ_a , de såkaldte iso-ohmer.

I måleopstillinger anvendes et godt skærmet flerlederkabel, hvorpå elektroderne er indmålt på forhånd, således at kablet tjener som målebånd. Er der netop a meter mellem målepunkterne kan opstillingen flyttes ved at lade kablet bugte sig som en kåldorm.

Meget lave ρ_a -værdier i et område kan betyde risiko for forekomst af organiske aflejringer og dermed måske dårlige funderingsforhold. Forekomst af meget fedt ler eller evt. saltvand i jordens porer vil dog også medføre små ρ_a -værdier. Et godt kendskab til områdets geologiske opbygning er derfor nødvendigt for at opnå en god udnyttelse af opmålingsresultaterne.

Ud fra resistivitetskortet og kendskabet til det aktuelle projekt planlægges herefter en række undersøgelser af profiler i et antal karakteristiske punkter. Dette kan gøres geoelektrisk ved punktprofilopmåling. Resultaterne af en geoelektrisk undersøgelse må imidlertid altid kalibreres ved udførelse af borer, hvis antal dog kan reduceres meget, hvis såvel de geoelektriske undersøgelser som borerne tyder på en lokalitet med få og karakteristiske laggrænser.

Geoelektriske undersøgelser benyttes med fordel i områder med ret få karakteristiske lag og relativt roligt udviklede lagfølger. De anvendes både til funderingsundersøgelser og hydrologiske undersøgelser.



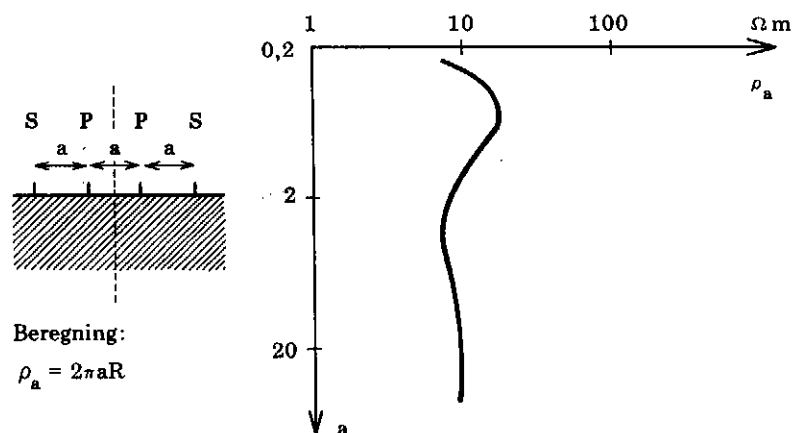
Figur 2.13 Geoelektrisk kartering (resistivitetskort).

GEOELEKTRISK SONDERING

Et groft skøn over jordens lagdeling kan opnås ved at foretage en geoelektrisk sondering, der er en måling i et bestemt målepunkt, med voksende elektrodeafstand a , hvorved der opnås, at de dybere liggende jordlags specifikke modstande efterhånden inddrages i målingen af den tilsyneladende modstand ρ_a .

Måleresultatet afbildes som vist på figur 2.14 i dobbeltlogaritmisk afbildning og kaldes i det følgende for markkurven. Såfremt den afbildes på gennemsigtigt papir, letter det sammenligningen med de såkaldte modelkurver, der er beregnet under forudsætning af et bestemt antal laggrænser og bestemte forhold mellem de specifikke modstande. Kombinationsmulighederne er dog så talrige, at der må henvises til speciallitteraturens tabelværker. Beregnede kurver foreligger i standardstørrelse (modul 62,5 mm), og markkurven skal derfor også tegnes i dette modul.

Selv med nøjagtig overensstemmelse med en forud beregnet kurve, kan tolkningen give misvisende resultater, såfremt der ikke er vandrette laggrænser i området, og såfremt nogle af lagene har varierende specifik modstand med dybden.



Figur 2.14 Markkurve

I det følgende vil blive gennemgået en metode, der bygger på relativt få kurver. Ved metoden betragtes først den øverste del af punktprofilen. Med lille elektrodeafstand påvirkes målingen nemlig kun af de to øverste lag, medens den næsten ikke er påvirket af de dybere liggende lag. Den øverste del af markkurven kan derfor tolkes ved sammenligning med modelkurver for to-lagssystemer, og man kan finde de to øverste lags specifikke modstande og den øverste laggrænse. Man må herefter under anvendelse af de såkaldte tre-lags hjælpekurver ved den videre tolkning betragte de to øverste lag som ét lag og finde det næste lags specifikke modstand og laggrænsen over dette lag.

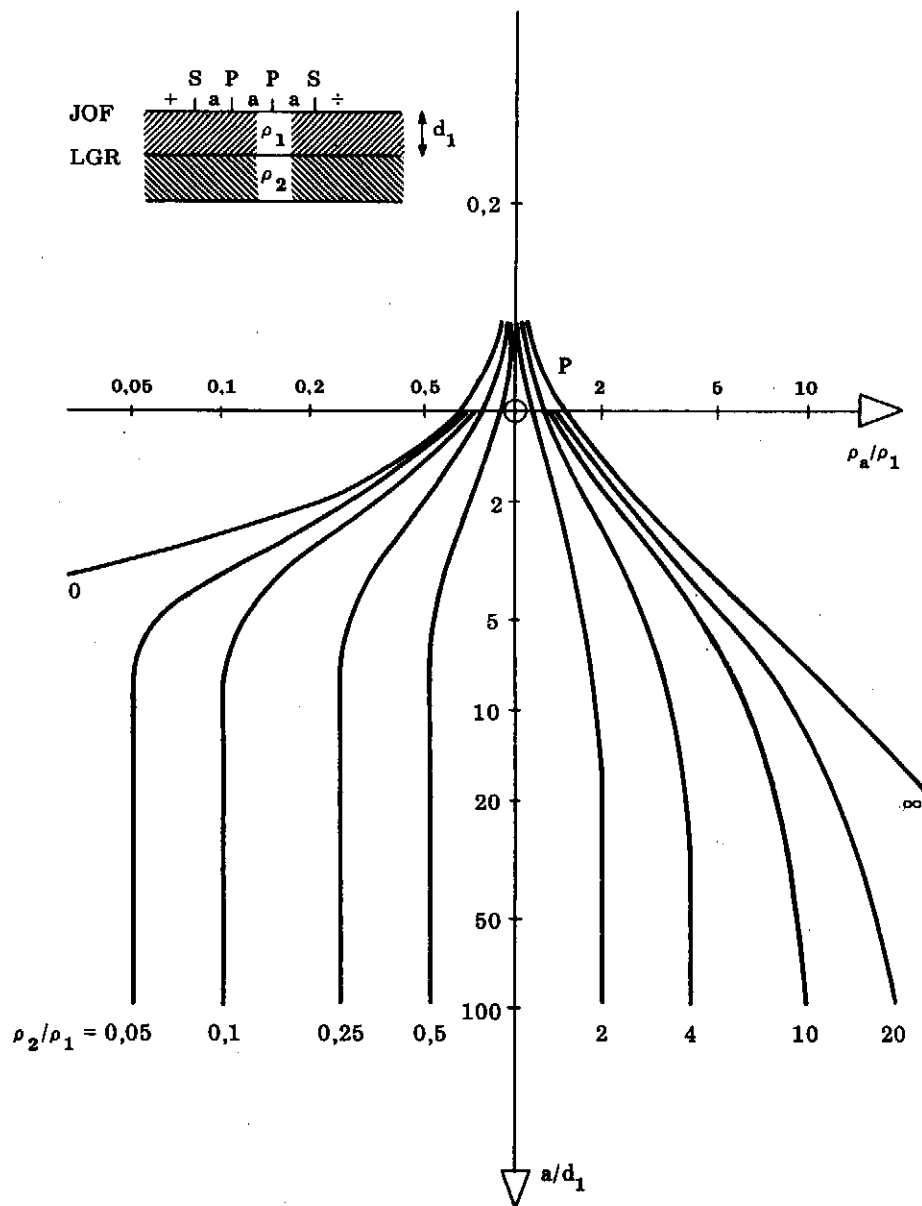
Metoden kan udstrækkes til fire eller fem lags systemer, men bliver da meget usikker. Metoden er mest velegnet på lokaliteter med få laggrænser mellem stærkt varierende jordlag. Lagtykkelsen skal være større, jo større dybden er, for at laggrænsen kan erkendes med sikkerhed. Tynde lag i større dybde ses næppe på måleresultatet.

To lags system

Der betragtes et jordlag, der underlejres af et andet jordlag til stor dybde. Det øvre jordlag har tykkelse d_1 og den specifikke modstand ρ_1 , det underliggende jord har den specifikke modstand ρ_2 .

Ved en geoelektrisk måling vil værdien af den tilsyneladende specifikke modstand ρ_a afhænge af elektrodeafstanden a . Ved små værdier af a/d_1 vil strømmen væsentligst forløbe i det øvre lag, og der måles dette lags specifikke modstand ρ_1 . Ved store værdier af a/d_1 vil strømmen derimod væsentligst forløbe i den underliggende jordmasse og dennes specifikke modstand ρ_2 måles. Imellem disse to ydergrænser varierer den tilsyneladende specifikke modstand ρ_a som en differentiabel og kontinuert funktion af a .

Placeringen af potentialelektroderne i trediedelspunkterne mellem strømelektroderne er først benyttet af Wenner og kaldes derfor Wenner - arrangementet. De tilsvarende modelkurver er beregnet af Hedstrøm i 1928 og her angivet som en kurveskare i dimensionsløs afbildning på figur 2.15. Ud ad akserne er afsat ρ_a/ρ_1 og a/d_1 og hver kurve svarer til en bestemt værdi af ρ_2/ρ_1 .



Figur 2.15 To lags modelkurve (Wennerarrangement)

Kurverne er vist i dobbeltlogaritmisk afbildning, hvorved opnås at en ρ_a -a kurve (markkurve) er identisk med den tilsvarende modelkurve på nær en forskydning af koordinatsystemet.

Såfremt man træffer en tolags lokalitet i marken sammenlignes markkurven med de teoretiske kurver ved at parallelforskyde de to koordinatsystemer i forhold til hinanden, indtil markkurven optræder som medlem af kurveskaren. Punktet P på modeldiagrammet vil altså have beliggenheden $\log \rho_1$, $\log d_1$ i ρ_a -a diagrammet, hvorved ρ_1 og d_1 kendes. Af modelkurverne aflæses ρ_2/ρ_1 , der herefter bestemmer den underliggende jords specifikke modstand ρ_2 .

Tre lags system

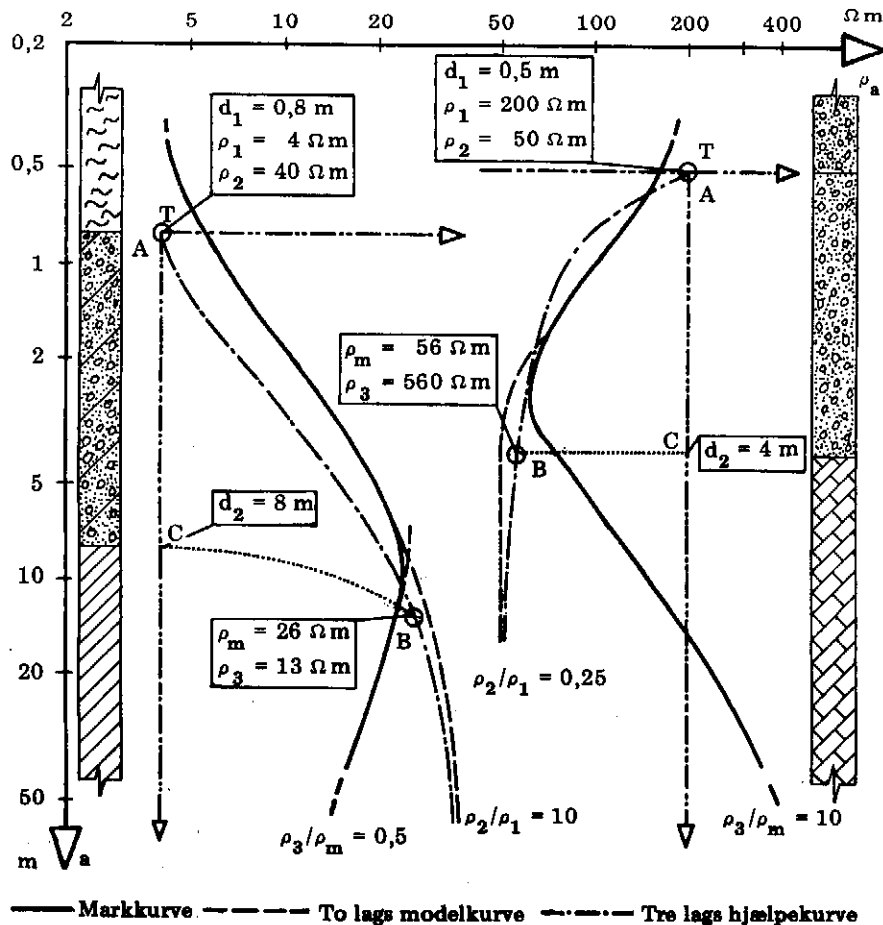
Det er meget sjældent, at en måling foretages på en to lags lokalitet, tre lags lokaliteter er langt hyppigere. I det følgende gennemgås teorien for tolkning af trelagskurver, men det er umiddelbart muligt at udvide metoden til endnu flere lag.

På figur 2.16 er vist to punktprofilopmålinger på en trelagslokalitet. Kurverne viser direkte, at i station 1 må det øvre lag og den nedre jordmasse være ledende i forhold til midterlaget, medens det modsatte er tilfældet i station 2. De to sidste muligheder er voksende eller aftagende specifik modstand med dybden.

Opgaven er at bestemme dybden d_1 til øvre laggrænse og dybden d_2 til nedre laggrænse samt de tre specifikke modstande ρ_1 , ρ_2 og ρ_3 , nummereret fra oven.

Markkurven sammenlignes først med tolags modelkurverne. Såfremt P anbringes i punkt A fås overensstemmelse mellem modelkurve og markkurve indtil en vis dybde, hvor den nedre jordmasses indflydelse bliver mærkbar. Af punkt A's beliggenhed og modelkurvens form fås d_1 , ρ_1 og ρ_2 , medens nedre laggrænses dybde d_2 og nedre jordmasses specifikke modstand ρ_3 endnu er ukendt.

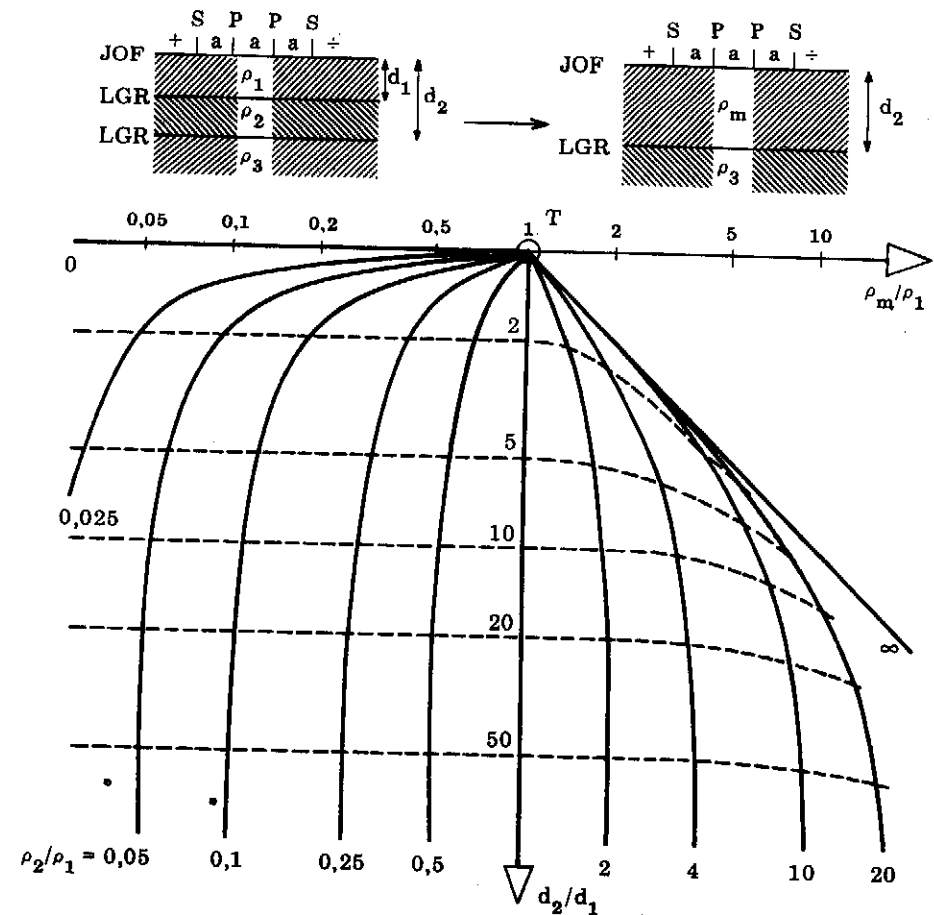
De to øverste lag ønskes nu betragtet som eet lag med en specifik modstand ρ_m , hvis værdi ligger mellem ρ_1 og ρ_2 , men afhænger af den endnu ukendte dybde d_2 til anden laggrænse. Det er imidlertid muligt at beregne sammenhængen mellem d_2 og ρ_m .



Figur 2.16 Markkurver

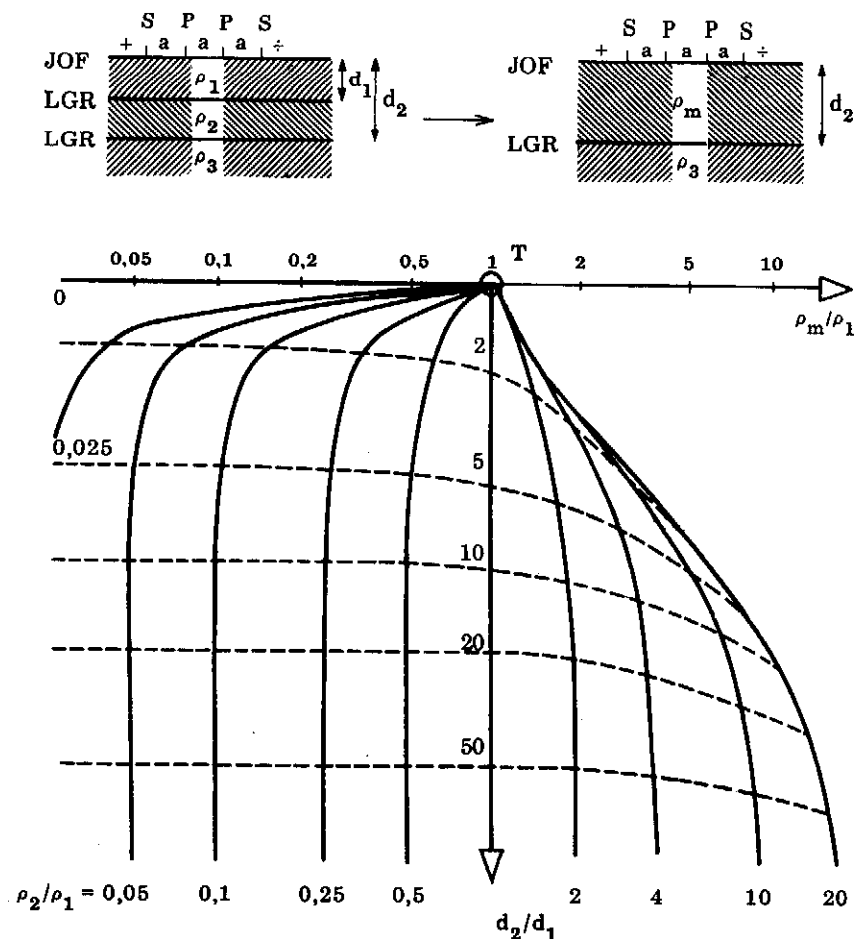
Beregningen foretages på grundlag af Kirchhofs lov for et parallelt strømfelts fordeling i et system bestående af to forskelligt ledende lag med laggrænse parallelt med strømretningen. Beregningen resulterer i to sæt tre lags hjælpekurver (figur 2.17 og 2.18). I figur 2.17 er nederste lag isolerende, i figur 2.18 er nederste lag ledende.

Det ses, at der findes en kurve for hver værdi af ρ_2/ρ_1 , som jo allerede kendes. Såfremt den kurve, der svarer til den aktuelle værdi af



Figur 2.17 Tre lags hjælpekurve. Nederste lag isolerende.

ρ_2/ρ_1 , tegnes gennem punkt A ved at lægge punkt T over A, angiver kurven de mulige steder for punkt P på tolagsmodelkurven, når de øvre lag betragtes under eet. Den nøjagtige placering af P fås når den sidste del af markkurven passer i kurveskaren på tolagsmodelkurverne. På figur 2.16 er dette tilfældet, når P falder i B. De to øverste lags specifikke modstand ρ_m aflæses direkte, medens nedre lags specifikke modstand fås af den udvalgte kurves ρ_2/ρ_1 -forhold, der nu er ρ_3/ρ_m .



Figur 2.18 Tre lags hjælpekurve. Nederste lag ledende.

Dybden d_2 kan ikke altid aflæses direkte. Det har ved talrige sammenligninger af laggrænser og tilhørende målinger vist sig, at afvigelsen er betydelig, såfremt ρ_2 er større end ρ_1 og ρ_3 . I disse tilfælde må dybden korrigeres. På figur 2.17 og 2.18 er indlagt punkterede linier, der skal følges ind til ordinataksen for at finde den korrekte dybde. Er den punkterede linie vandret, er der ingen korrektion. I station 1 i vort eksempel er dybden korrigeret fra B til C.

Slumbergermetoden

I den hidtidigt beskrevne opstilling med potentialelektroderne i trediedelspunkterne, den såkaldte Wenneropstilling, må alle elektroderne flyttes for hver ny værdi af a , og en sådan opmåling er temmelig mandskabskrævende.

I dag benyttes derfor næsten udelukkende Slumbergeropstillingen. De fire elektroder anbringes som sædvanlig på en ret linie og symmetrisk om målepunktet, men potentialelektroderne flyttes ikke, hvorved arbejdet naturligvis reduceres. Ved beregningen af de tilhørende modelkurver er der forudsat, at afstanden mellem potentialelektroderne a er meget mindre end afstanden mellem strømelektroderne L . I praksis skal a være mindre end $1/3 \times L$. Når L bliver større end $20a$ - $50a$, bliver målingen for unøjagtig, og man må derfor ændre a . Den tilsyneladende specifikke modstand ρ_a beregnes nu af

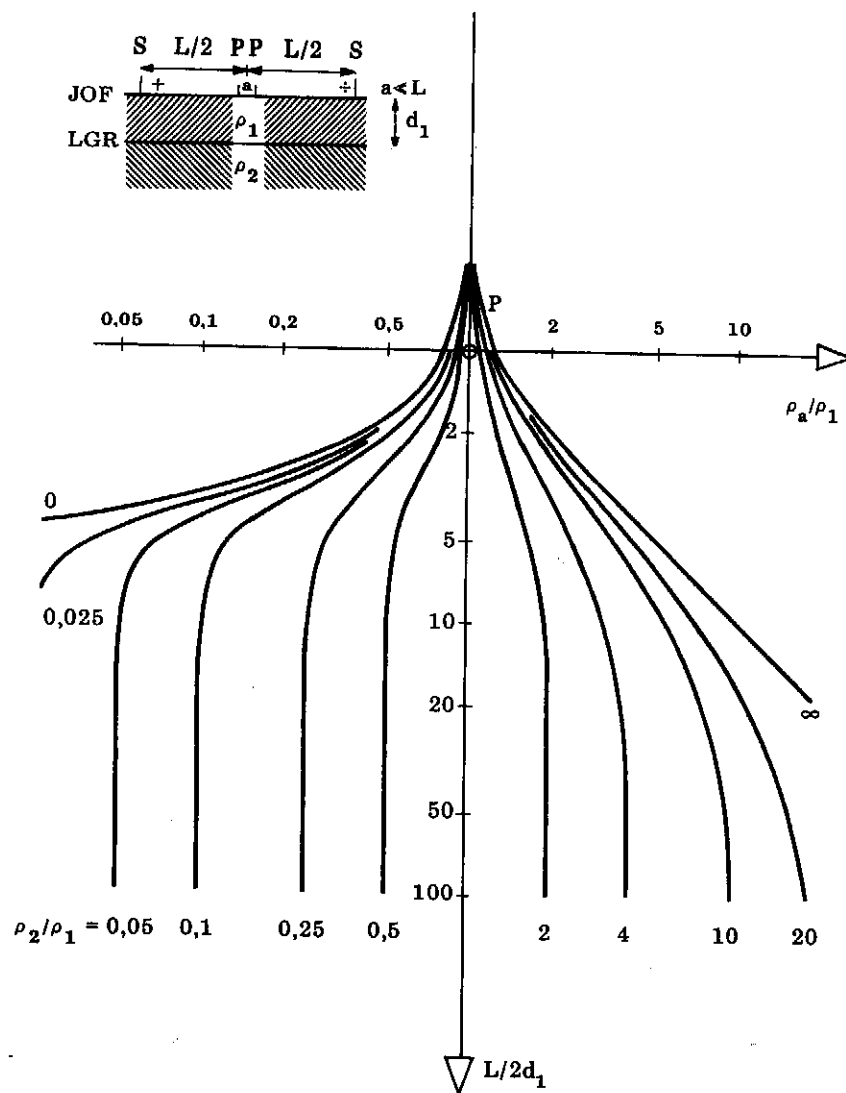
$$\rho_a = \pi \cdot a \frac{\alpha^2 - 1}{4} \cdot \frac{V}{I}$$

hvor $\alpha = L/a$.

Måleresultatet fremstilles ved at optegne ρ_a som funktion af $L/2$ i stedet for som funktion af a .

Modelkurverne for tolagssystemet afbildes med $L/2$ som ordinat (figur 2.19). Da forholdet mellem afstandene i målesystemet ustandselig ændres, afviger modelkurverne fra Wenneropstillingen. På grund af den trinvis flytning af potentialelektroderne vil kurven bestå af en række segmenter, hvor hvert segment ved en korrekt måling vil ligge helt over det underliggende segment. Man må derfor udjævne kurven før sammenligning med modelkurven.

Trelagshjælpekurverne (figur 2.17 og 2.18) er faktisk udregnet for Slumbergermetoden, men finder indtil videre anvendelse ved tolkning af måleresultater fra begge opstillinger.



Figur 2.19 To lags modelkurve (Slumbergerarrangement)

SPECIFIKKE MODSTANDE FOR DANSKE AFLEJRINGER

På grundlag af undersøgelser foretaget af Sorgenfrei, Dinesen og Klitten kan der opstilles følgende liste over specifikke modstande for en række karakteristiske danske jordarter:

Postglaciale ler, dynd og tørv	1 - 30 Ωm
Fedt, tertiært ler (Lillebæltsler)	1 - 20 Ωm
Tertiært glimmerler	10 - 40 Ωm
Moræneler	40 - 80 Ωm
Ler	10 - 40 Ωm
Sand og grus under GVS	50 - 200 Ωm
Sand og grus over GVS	100 - 2000 Ωm
Skrivekridt og kalk	100 - 500 Ωm

METODENS BEGRÆNSNING

Geoelektrisk sondering er mest velegnet på lokaliteter med få lag, der afviger meget fra hinanden, og hvis mægtighed er af samme størrelsesorden som dybden under jordoverfladen. Det er dog svært at tolke kurverne, såfremt det midterste lag er ledende, fordi samme forhold mellem lagets modstand og mægtighed giver næsten samme kurve. Såfremt det midterste lag har en modstand, der ligger imellem de omgivende lags modstande, kan lagets mægtighed let undervurderes (Kunetz 1966). Tolkning af opmålingsresultater fra en lokalitet med mere end tre lag er højst usikker på det her givne grundlag, men kan lettes ved sammenligning med direkte beregnede modelkurver af tre eller fire lags systemer.

Det er forudsat, at lagene er vandrette og uendelige af udstrækning. Wennermålingen anses for tilstrækkelig præcis, såfremt målingen foregår langs niveaukurverne og lagernes udstrækning er større end 5a. Slumbergermålingen stiller ikke så store krav til lokaliteten.

Der er dog en række andre fejlkilder, hvoraf kan nævnes: Salt i grundvandet, stammende fra jordlagets aflejring eller fra salthorste, frossent porevand, kraftige ledere nær jordoverfladen eller svage elektriske strømme i jorden.

2.6 LAGFØLGEUNDERSØGELSER

GEOTEKNISKE UNDERSØGELSESBORINGER

Ved en geoteknisk undersøgelsesboring forstås en boring, i hvilken der observeres laggrænser, udtages karakteristiske prøver af alle gennemborede lag til besigtigelse og til laboratorieforsøg, udføres forsøg til bestemmelse af lagenes styrkeegenskaber (evt. deformationsegenskaber) samt foretages observation af de hydrauliske forhold. Alle optagne prøver nummereres og indpakkes lufttæt.

Under borearbejdet føres omhyggelig journal, hvori noteres alle observerede laggrænser, bedømmelse af de gennemborede lag, nøjagtig dybde for alle optagne prøver, dybde og resultat af udførte forsøg, observation af vandspejl, samt oplysninger om sten, foretagne sprængninger etc.

Borejournall no 37	Fikspunktskote: 3,65	Boremethode:
Boring no 132 D	Udgangskote: 5,10	Foringsrør: 4"
	Udgangsniveau : 0 m u.t.	Udført af: [signature]

Borelederens beskrivelse af jordlagene	Dato kl.	Rørunderkant m u. udgangsniveau	Proveoptagning		Vingeforsøg				SPT	Anmærkning
			Løbe no	Rør eller pose	Vinge no	Drejetid min.	P _v kg	P' _v kg	Slagantal	
Laggrænse m u. u. : 0	12. 7. 1979 12 ⁴⁰	0,25	1	Pose						
Jordart: Tørvebund										
Farve: Sort										
Lugt: Ingen										
Iblandet: Plantens										
Fasthed:										
Vandindhold:										
Laggrænse m u. u. : 0,3	12 ⁴⁵	0,60 1,00 1,50 1,50 2,00 2,50 2,50	2 3 4 5 6	Pose Rør Pose Rør Pose						
Jordart: Dynd					7	2	10	2		Vandspejl 1,5 m u.t. Pejlerør nedsat 5 m u.t. Afproppet 4 min
Farve: Grågrøn										
Lugt:					7	2	11	3		
Iblandet:										

Figur 2.21 Udsnit af borejournal med alle oplysninger fra markarbejdet

UNDERSØGELSESBORING I UHÆRDNEDE LAG

I uhærdnede jordarter udføres undersøgelsesboringer gennem foringsrør for at forhindre, at materiale fra højere liggende lag falder ned og opblandes med materialet i boringens bund, eller at borehullet styrter helt sammen. Foringsrøret føres ned i jorden ved drejning eller tryk efterhånden som hullet uddybes.

Jorden fjernes med forskellige boreredskaber, der er udformet til optagelse af forskellige jordarter (jf. side 2.45). Boreredskaberne monteres på en borestang eller ophænges i wirer og presses, drejes eller rammes ned i bunden af borehullet. Optagelse af intakte prøver foregår med specielt udformede prøveoptagere (side 2.43).

I kohæsionsjord er det normal praksis, at der optages en intakt prøve og udføres et vingeforsøg pr. m samt udtages mindst een prøve af det øvrige opborede materiale (omrørt prøve).

I friktionsjord er det vanskeligt at optage intakte prøver under grundvandet. Hertil kan Bishopoptageren eventuelt anvendes (side 2.43), men også SPT-sonden kan optage en repræsentativ prøve, der viser kornfordeling og lagdeling. Under borearbejdet er det væsentligt at holde vandbevægelserne under kontrol, idet opadrettede gradienter bevirker en omlejring i jorden. Det er derfor nødvendigt, at der til stadighed er et højere vandspejl i boringen end i jorden. Selvom der således holdes overtryk i vandet i borerøret, er det alligevel vanskeligt at optage intakte sandprøver, dels fordi det er vanskeligt at sikre, at der ikke på noget tidspunkt opstår undertryk der bevirker opskydning af sandet i boringens bund, dels fordi sandet let kan falde ud af prøveoptageren. Det kan derfor være nødvendigt at anvende boreslam (bentonit) i boringen i stedet for vand for opnåelse af intakte sandprøver.

Borearbejdet foregår ved hjælp af et borespil, der er monteret på et treben eller boretårn. Gennem de senere år er sket en stor mekanisering, og ofte foregår arbejdet fra et mobilt boreværk monteret på en terrængående vogn. På vanddækkede arealer kan der bores fra flåde, skib eller fra specielt konstruerede boreplatforme.

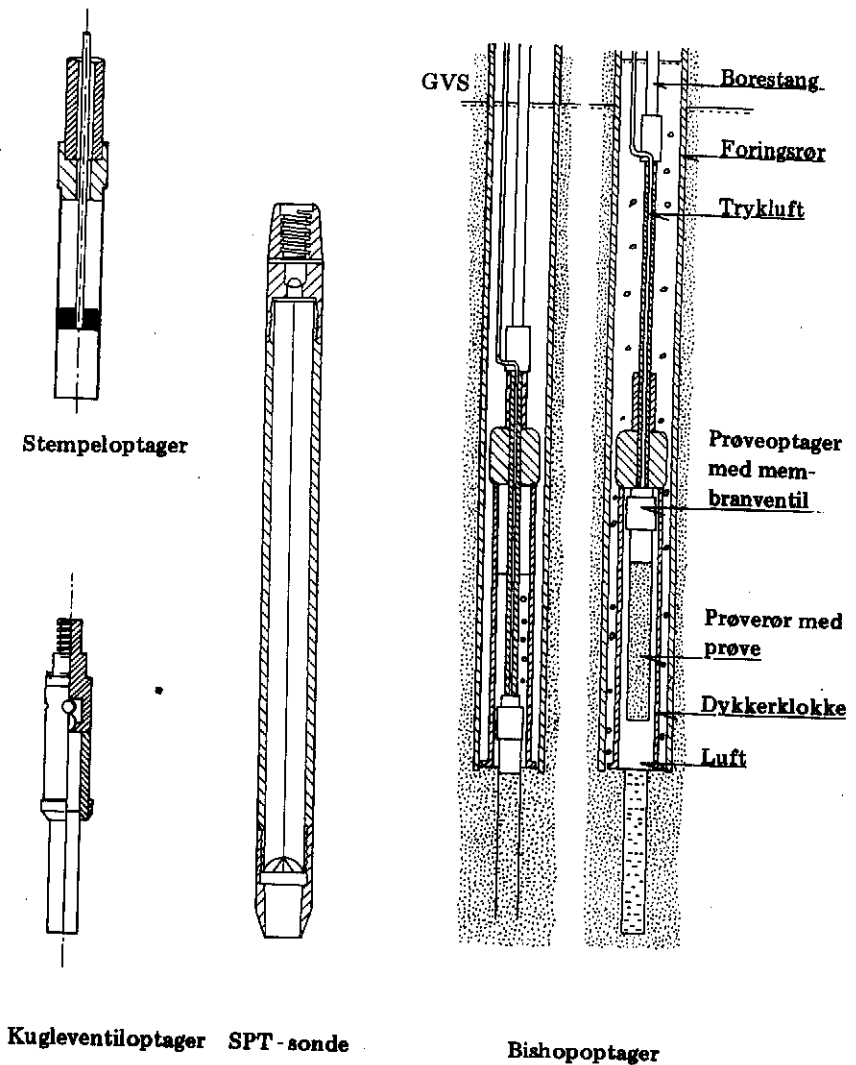
Intakte prøver

En fuldkommen intakt prøve kan ikke optages i uhærdnede lag, idet nedpresningen af prøveoptageren forårsager nogen forstyrrelse af jorden. Det nedpressede prøverørs vægge skal naturligvis være så tynde som muligt. Prøverørets vægareal bør udgøre mindre end 10% af åbningsarealet. Det sted, hvor prøven udtages, er aflastet af borehullet. Det er derfor vigtigt, at prøven udtages umiddelbart efter, at det overliggende jord er fjernet.

Der er gennem årene udfoldet megen opfindsomhed for at bringe jordprøver op til overfladen i intakt tilstand. Det vil være helt uoverkommeligt at nævne blot et passende udvalg, hvorfor der nedenfor blot er omtalt et par af de hyppigst anvendte prøveoptagere.

Stempeloptageren består af en prøverørsholder, der er fastgjort til en hul borestang, i hvilken stempelstangen kan forskydes. På prøveoptageren er fastgjort det prøverør, hvori prøven optages. Ved nedføringen i det oprensede borehul er stemplet fastholdt i sin nederste stilling i bunden af prøverøret, således at eventuelt resterende opølet materiale ikke kommer ind i dette. Når prøven skal tages, fastholdes stemplet med stempelstangen, mens prøvepatronen ved hjælp af den hule borestang presses ned i jorden. Når patronen er presset i sin frie længde ned i borehullets bund, drejes systemet frit af den omkringliggende jord og optrækkes. Under optrækningen støtter stemplet prøven foroven og hindrer denne i at glide ud af patronen. Med en stempeloptager optages prøver, der eksempelvis kan være 7 cm i diameter.

Kugleventiloptageren er en prøveoptager med kugleventil, hvortil der forneden er fastgjort et prøverør. Prøveoptageren presses ved hjælp af borestangen så langt ned i borehullets bund, at de øverste, forstyrrede lag kommer ind i selve optageren, mens jorden i prøverøret er mindst muligt forstyrret. Under nedpresningen, der standses før der kan opstå fare for komprimering af prøven, kan vand, luft og eventuelt slam undvige gennem kugleventilen. Når optageren er i bund, drejes den fri af jorden og trækkes op. Kugleventilen sørger for, at prøven ikke glider ud igen. Med en kugleventiloptager optages prøver, der eksempelvis kan være 4,2 cm i diameter. Denne prøveoptager er den hyppigst anvendte herhjemme.



Figur 2.22 Prøveoptagere (Prøvediametren varierer fra 40 - 70 mm)

SPT-sonde anvendes i forbindelse med lagfølgeboringer og skylleboringer. Der kan optages repræsentative, ofte næsten uforstyrrede prøver af næsten alle jordarter. Sonden kan være udformet som et på langs udskåret stålør, der ved afskruning af bund- og topstykke kan åbnes for besigtigelse og udtagning af jordprøven. For neden kan indsættes en lukkeanordning af tyndt fjederstål, der ved sondens optrækning tilbageholder jord med ringe kohæsion.

Bishopoptageren anvendes til at optage intakte sandprøver under vandspejlet. Over vandspejlet kan de øvrige prøveoptagere anvendes med held, fordi der er friktion mellem prøve og prøverør, således at prøven bliver hængende som helhed, og fordi det nederste af prøven holdes sammen af små kapillære kræfter. Når prøven optages under vandspejlet er de kapillære kræfter ikke til stede, og prøven drysser ud i bunden. Bishopoptageren består derfor foruden af selve prøverøret og -optager af en dykkerklokke, der fyldes med luft, hvorefter prøven trækkes op i denne, hvorved de kapillære kræfter igen kan virke. Prøveoptageren er forsynet med ventil foroven, således at prøvens øvre del påvirkes af et lille undertryk.

Boreredskaber

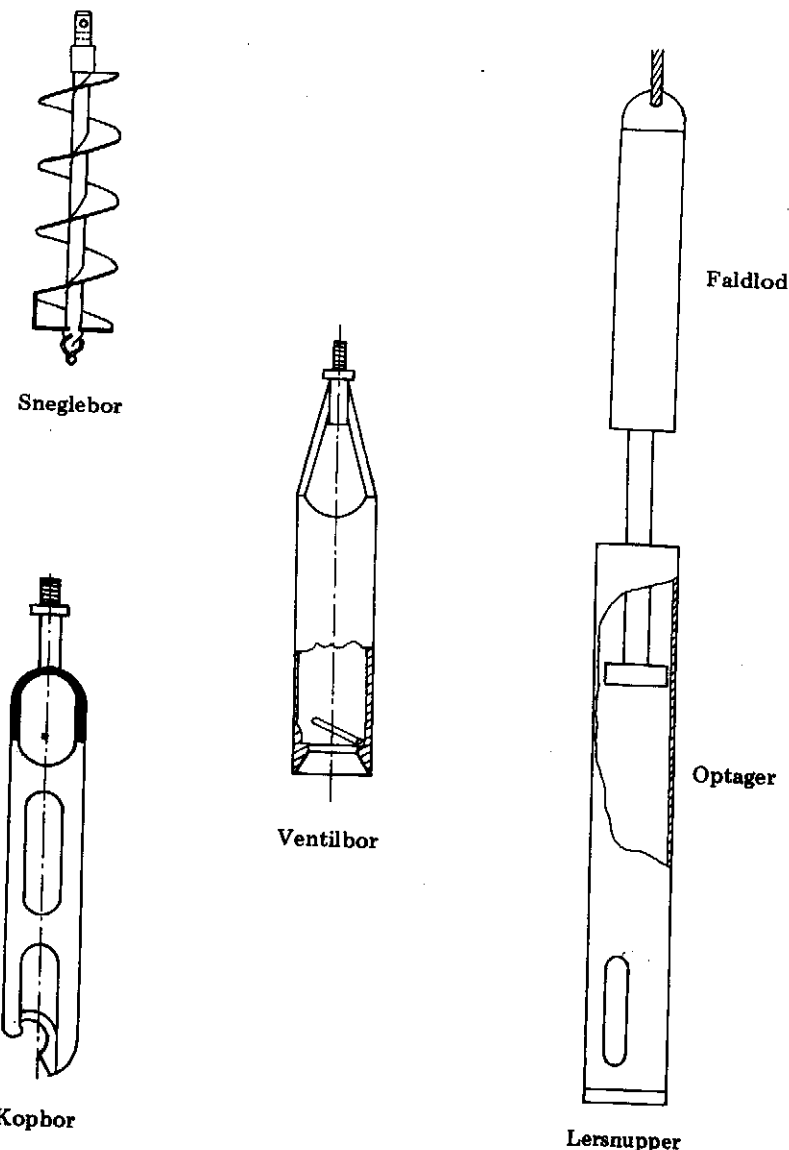
Uformningen af boreredskaber kan variere inden for ret vide grænser. De mest anvendte redskaber er

Snegleboret, der anvendes i stift ler.

Kopboret, der anvendes i jordarter med kapillaritet.

Lersnupper, der anvendes i kohæsive jordarter (silt og ler). Prøvematerialet er næsten uforstyrret og kan med fornøden omhu anvendes som intakte prøver.

Ventilboret benyttes til optagelse af friktionsjord under vandspejlsniveau og kaldes ofte for en *sandspand*. Ventilboret bringes i korte op- og nedadgående bevægelser, hvor ventilkappen henholdsvis lukkes og åbnes. Under den opadgående bevægelse dannes undertryk under optageren, hvorved materialet rives løs og svæver i vandet. Under den nedadgående bevægelse åbnes klappen, og vand og jord kommer ind i boret, der hales op af boringen, når det er næsten fyldt.



Figur 2.23 Boreredskaber (Diametren afhænger af borehullets diameter, der normalt ligger mellem 10 cm og 30 cm)

UNDERSØGELSESBORING I HÆRDNEDE LAG

I fast fjeld og mere eller mindre hærtnede aflejringer må prøver skæres fri. Undersøgellesboringer i disse aflejringer udføres bedst som kerneboringer.

Kerneboremaskinen roterer et kernerør, der er forsynet med en cylinderformet, skærende borekrone. Borekronens skær består normalt af industridiamanter, i enkelte tilfælde benyttes borekroner med hårdmetalskær. For at opnå en god prøvekvallitet anvendes et dobbelt kernerør, hvor yderrøret med borekrone roterer og friskærer en kerne af den gennemborede bjergart, mens inderrøret står stille og opfanger kernen, efterhånden som den friskæres.

Under borearbejdet afkøles borekronen af kølevand, der pumpes ned gennem de hule borestænger til kernerøret, hvor det passerer mellem inder- og yderrør til borekronen. Herfra løber vandet retur op langs ydersiden af kernerøret og fjerner samtidig det løsskårne materiale.

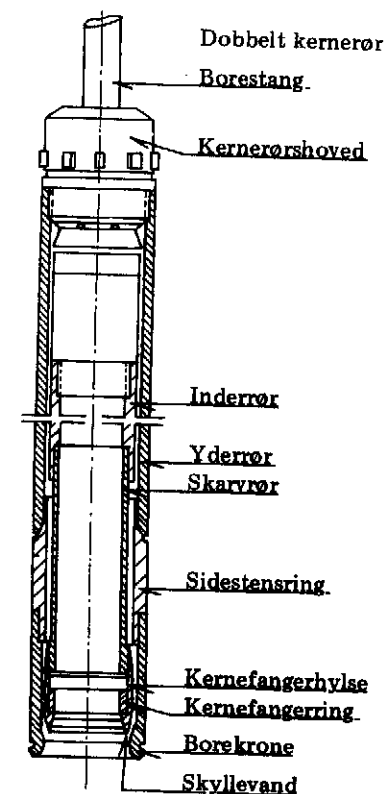
Diamantkronen består af en stålcyllinder med diamantskær. Diamantskæret er opbygget af en speciel metallegering, der enten er imprægneret med diamantpulver eller -støv, eller i hvilken er sat diamanter af forskellig stenstørrelse.

Dobbelt kernerør anvendes normalt i længder fra 0,5 m til 6 m, afhængig af arten af den gennemborede formation.

Rotationshastighed og tryk på borestammen kan reguleres og afhænger af bordimension, borekronetype samt af arten af den formation, hvori der bores.

Væsentlige betingelser for at opnå god prøvekvallitet ved kerneborring er, dels at der benyttes borekroner, der er velegnede til boring i den aktuelle formation, dels at den benyttede skyllevandsmængde afpasses meget nøje efter forholdene.

Hvis de gennemborede aflejringer er sprækkede eller indeholder knusningszoner, således at borehulsvæggen ikke kan stå ubeskyttet til den ønskede dybde, nedsættes foring (casing) i borehullet, og boringen føres videre i en mindre dimension, eller borehulsvæggen stabiliseres ved anvendelse af boreslam (fx bentonit).



Figur 2.24 Dobbelt kernerør (Diametren kan eksempelvis variere fra 40 mm til 150 mm)

SKYLLE- ELLER SUGEBORINGER

Skylle- eller sugeboringer udføres ved, at en kraftig vandstrøm fjerner det materiale, som roterende skæreværktøjer løsner fra boringens bund. Ved denne form for boringer får man oplysninger om ændring af jordlagene ved udtagning af prøver fra skyllevandet samt ændring i boremodstanden.

Som følge af selve metoden fås kun sparsomme oplysninger om prøvematerialets oprindelige sammensætning in situ, ligesom der ikke indhentes oplysninger om jordlagenes geotekniske parametre.

PRØVEGRAVNING OG UFOREDE BORINGER

I områder, hvor de geologiske forhold er velkendte, og hvor det forventede funderingsniveau ikke ligger for dybt, kan man undertiden nøjes med at udføre prøvegravninger til ca. 2 m eller uforede borer til nogle få meter under terræn. Ved prøvegravninger opnås et godt overblik over jordlagenes forløb, og prøvernes størrelse er ikke begrænset af prøveoptageren. Uforede korte borer benyttes ofte som forundersøgelse i stedet for indirekte undersøgelsesmetoder.

BOREPROFIL

Resultatet af en boring eller gravning optegnes som et boreprofil, hvorpå alle relevante oplysninger angives. Det er ikke alene resultatet af alle markundersøgelser, men også resultatet fra nogle af de forsøg, der er udført i laboratoriet på de optagne prøver.

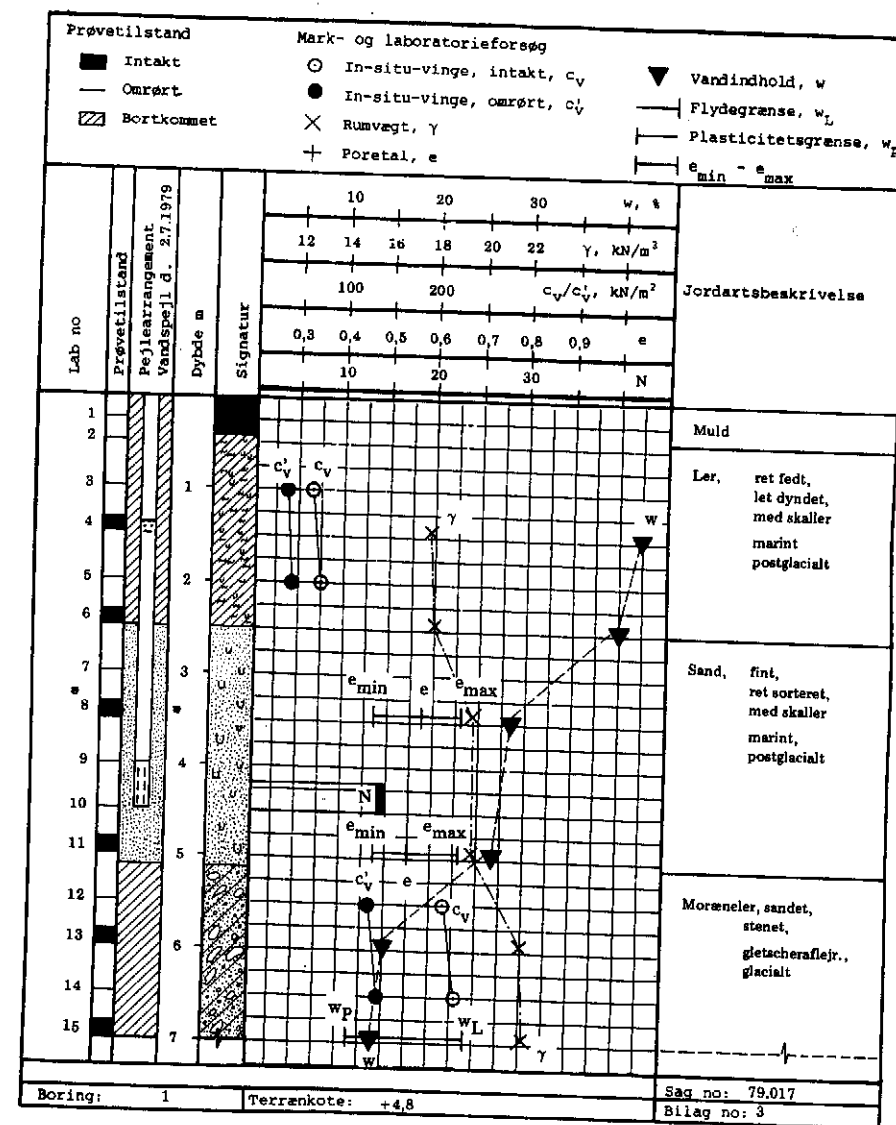
På figur 2.25 ses et boreprofil for en boring, der er ført til en dybde af 7 m. Der er optaget ialt 15 prøver, hvoraf de fleste er poseprøver, dvs. prøver af omrørt materiale fra et boreredskab. 6 af prøverne er intakte prøver, hvis rumvægt γ og vandindhold w er bestemt i laboratoriet. På sandprøverne er endvidere bestemt in situ poretal-let samt den tættest mulige lejring e_{\min} og den løsest mulige lejring e_{\max} . På en lerprøve er tilsvarende bestemt flydegrænsen w_c og plasticitetsgrænsen w_p . Der kan være foretaget andre bestemmelser, fx kornfordeling, men resultatet vil findes på en kornkurve.

Markforsøgene udføres i niveauer, hvor der ikke optages intaktprøver. De består i dette tilfælde af vingeforsøg i dyndlaget og lerlaget, og SPT-sondering i sandlaget (N-værdien).

På millimeterpapir afsættes alle målinger, og punkter fra samme type måling forbindes med rette linier, men der er naturligvis springvis variation i laggrænserne.

Alle prøverne bedømmes geologisk og der gives en beskrivelse af jordarten på boreprofilet (se senere kapitel). Beskrivelsen retter sig i nogen grad efter anvendelsen. På boreprofilet angives jordlagene med standardiserede signaturer (se Appendix).

BOREPROFIL



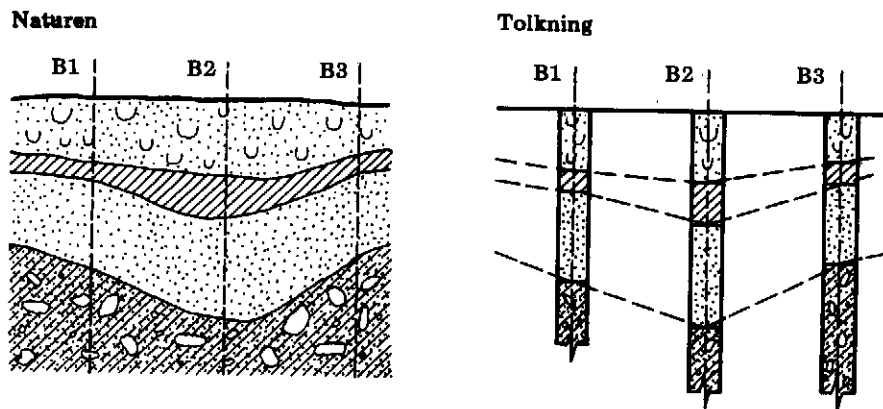
Figur 2.25 Boreprofil

METODENS BEGRÆNSNING

Lagfølgeundersøgelser har som formål at afklare de geologiske og geotekniske forhold på en given lokalitet, hvor en teknisk aktivitet skal foregå. Det kan eksempelvis være fundering af et bygværk, opfyldning af et større område eller en indvinding af grundvand. Såfremt teknikeren har den fornødne geologiske viden kan han da forudse de praktiske og teoretiske problemer, der kan opstå under projektets udførelse, og derved foretage en afgrænsning af de videre undersøgelser.

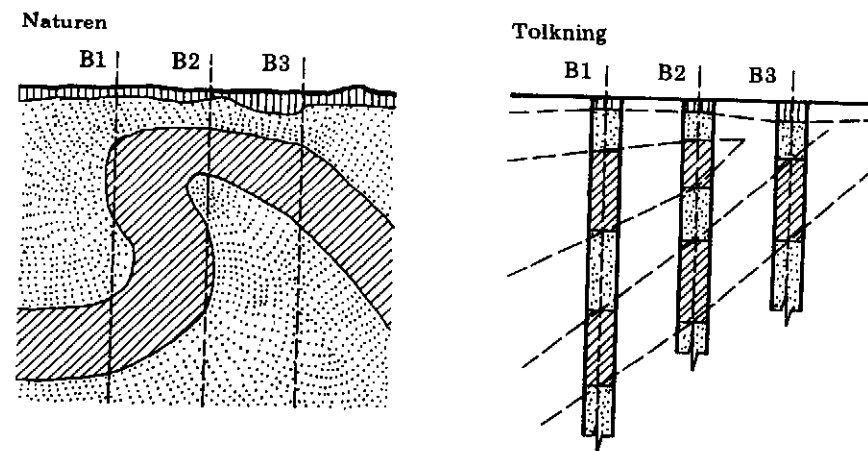
Undersøgelsesernes detailleringsgrad afhænger foruden af projektets art i høj grad af de geologiske forhold på stedet. I egne med ensartede jordbundsforhold kan forholdsvis få borer give et tilfredsstillende billede af jordlagene ved retlinet interpolation mellem borerne (figur 2.26).

I andre tilfælde kan borerne ikke tolkes på så simpel måde, jf. figur 2.27 og 2.28. Såfremt grundvandsspejlets beliggenhed spiller en rolle for projektet, er denne tolkning meget uheldig, og bedømmelse af stabilitet af jorden eller sætninger af jordlagene kan ikke hvile på noget sikkert grundlag.



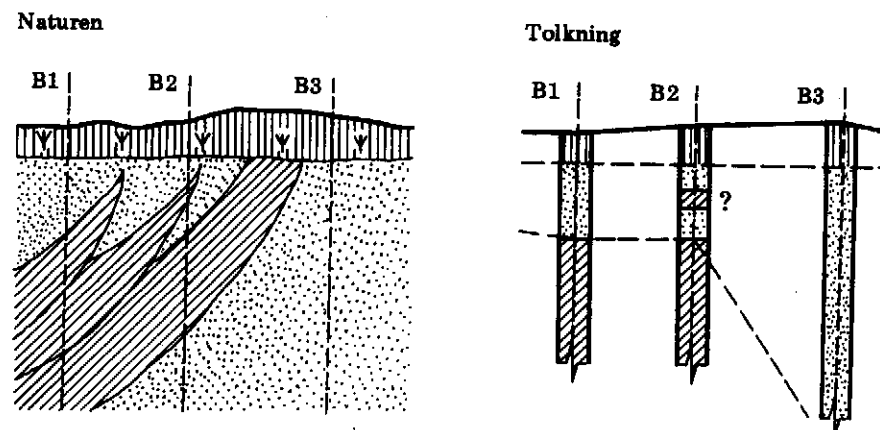
Figur 2.26 Lokalitet med ensartede jordbundsforhold

MARKUNDERSØGELSER



Figur 2.27 Enfoldig tolkning af boreprofiler

De viste eksempler er ikke usædvanlige, de ses faktisk i mange af vore klinter, der blot er tilfældige erosionssnit i landskabet. De ses endvidere i grusgrave og udgravninger. Af økonomiske grunde søges antallet af borer holdt nede på et minimum, og ofte vil man derfor ikke opdage en lokalitets indviklede geologiske opbygning før projektets praktiske udførelse og må i stedet tage de forsinkelser og uheld, der indtræffer. Det kan naturligvis blive både dyrt og tidsrøvende.



Figur 2.28 Forkastelig tolkning af boreprofiler

Resultaterne kan blive endnu mere forvirrende, såfremt borerne ikke placeres vinkelret på strygningsretningen, således som antaget på figur 2.27 og 2.28. I praksis placeres de normalt af hensyn til projektet og vil da ikke altid være placeret på samme linie.

Ved en forfinet teknik kan man forsøge at optage længere jordprøver samt bevare jordprøvernes orientering i forhold til verdenshjørnerne, således at det bliver muligt at observere strygningsretningen i jordprøven. Herefter kan man planlægge en række ekstra borer der kan give optimale oplysninger om lokalitetens geologiske opbygning.

PLANLÆGNING AF LAGFØLGEUNDERSØGELSER

Markundersøgelseernes omfang afhænger af projektets størrelse og art og hensynet til nabokonstruktioner som fx kloakker eller bygninger. Men de afhænger lige så meget af de jordbunds- og grundvandsforhold som er på den givne lokalitet. Såfremt jordbundsforholdene er uoverskuelige, må lagfølgeboringer placeres tæt for at undgå misforståelser (figur 2.27 og 2.28), ved jævnt varierende og væsentlig horizontale lagfølger kan antallet af borer reduceres og sonderingsmetoder anvendes som et godt supplement.

Markundersøgelserne skal altid føres så dybt, at man med tilstrækkelig sikkerhed kender beliggenheden af alle de jordlag, der har betydning for projektets heldige udførelse. I forbindelse med byggeri skal det således godtgøres, at undersøgelsen omfatter alle jordlag, der er stærkt sætningsgivende. Undersøgelsen skal derfor helst føres ned i faste senglaciale eller ældre aflejringer, eller såfremt dette ikke kan lade sig gøre, må alle risici vurderes. Endelig må stedets hydrologiske forhold vurderes.

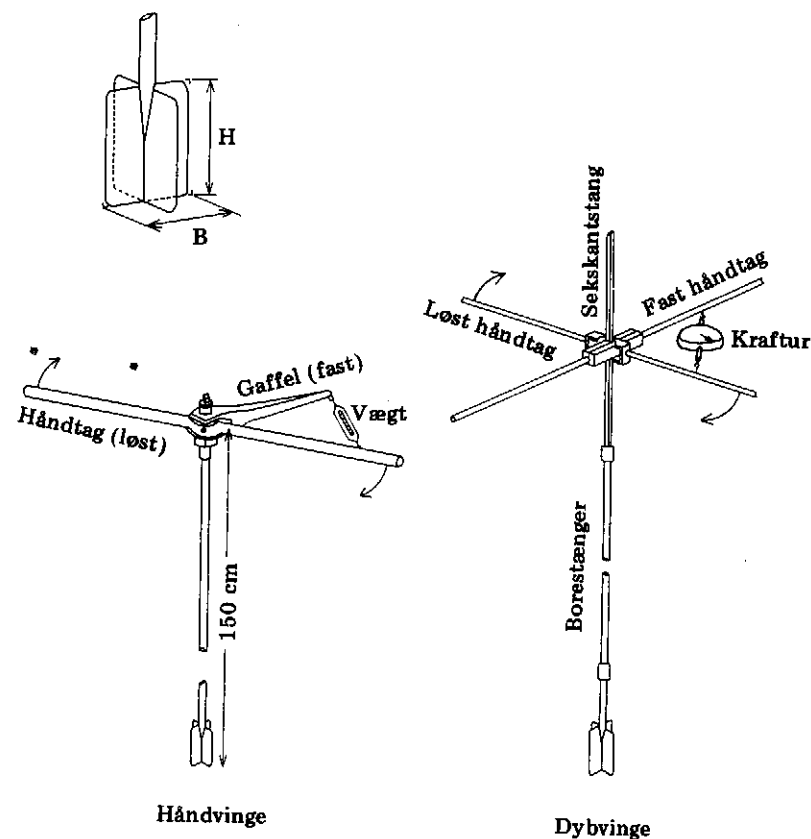
Det vil altid være ønskeligt at fastlægge undersøgelsens omfang i samarbejde med geologer, og specielt ved store anlægsarbejder er det helt nødvendigt.

2.7 IN SITU MÅLINGER

VINGEFORSØG

I forbindelse med lagfølgeundersøgelser udføres normalt visse mekaniske målinger til bestemmelse af styrke og/eller deformationsegenskaber i bestemte jordlag. De vigtigste er vingeforsøg.

Ved vingeforsøg måles jordens udrænede forskydningsstyrke i en tvungen brudflade omkring vingen. Vingeforsøg kan udføres fra terræn ved brug af håndvinger og i borer ved brug af dybvinger. Vingeforsøg bør ikke benyttes i sand.



Figur 2.29 Håndvinge og dybvinge

En vinge består af to lodrette korsstillede plader af højden H og bredden B fastgjort til en stang. Vingens nederste del presses mindst $2 \times H$ ned i intakt jord. Ved at dreje et håndtag påføres vingen et drejningsmoment, der måles på et dynamometer. Forøgelsen af drejningsmomentet skal ske jævnt og så langsomt, at brud opnås på 1 - 3 minutter. Vingerne findes i forskellige størrelser, således at forsøget næsten altid kan udføres med et passende stort drejningsmoment. Brud drejningsmomentet tages som udtryk for, at jordarten er i besiddelse af udrænet forskydningsstyrke, der regnes at virke på hele overfladen af vingens omskrevne cylinder og dennes endeflader. For at skelne denne måling fra andre målinger af den udrænedes forskydningsstyrke c_u , betegnes dette måleresultat c_v og kaldes hyppigt for vingestyrken.

Ved at anvende vinger med forskellige højde-bredde forhold kan man bestemme c_v 's størrelse i vandret og lodret retning og dermed få et indtryk af jordens anisotropi. Det benyttes dog ikke her i landet, hvor vingens højde er 1,5 til 2 gange vingens bredde.

Efter at den intakte forskydningsstyrke er bestemt, drejes vingen 10 gange rundt, hvorefter forsøget gentages, og den æltede forskydningsstyrke bestemmes. Heraf findes sensitiviteten $S_t = c_v/c'_v$.

Målemetoden forekommer umiddelbart at være meget grov, idet jorden må blive omrørt ved nedpresningen af vingen. Imidlertid viser sammenligning med andre forsøgstyper, at målingen i usprækket ler giver næsten korrekte værdier af den udrænedes forskydningsstyrke. I sprækket ler giver vingen dog alt for store brudværdier, idet en tvungen brudflade ikke følger sprækkesystemet.

Vingeforsøget kan ikke tolkes i sand, fordi sandet ikke kan komme i udrænet tilstand, og forsøgsresultatet derfor afhænger af de ukendte normalspændinger i brudfladen.

I stenet ler kan vingen støde på en sten, hvorved drejningsmomentet sættes i vejret for at overvinde denne ekstramodstand. Målingen er intet værd, og hvis den alligevel anføres på boreprofilen, må man se bort fra den ved tolkningen.

Når forsøget udføres, må man derfor være opmærksom på, om vingen er i sand, eller om der er sten i brudfladen. Sand giver en knasende lyd, og sten viser sig ved en huggende bevægelse af vingen.

VANDSPEJLSOBSERVATIONER

Når en boring er afsluttet, og foringsrøret skal trækkes op, udstyres borehullet med pejlerør for observation af vandspejlet. Et pejlerør består normalt af et ca. 25 mm PVC-rør med slidser på den nederste halve meter. Strækningen med slidser anbringes i det lag, i hvilket trykniveauet ønskes målt, omkring slidserne anbringes et grusmateriale som filter, og ved afpropning sørger man for, at kun vand fra dette lag kan løbe ind i pejlerøret. I lagdelt jord anbringes pejlerøret i de permeable lag og afpropning foretages i de mellemliggende, mindre permeable lag. Er der i boringen udelukkende truffet ler, vil det tage lang tid, inden den fornødne vandmængde løber til. Man kan da fylde røret med vand til den forventede højde og iagttage ændringen i vandspejlet, eller anvende piezometre til registrering af poretrykke (se side 2.60 - 2.61).

I større byggesager, hvor vandproblemer forventes, suppleres de øvrige undersøgelser med prøvepumpninger med tilhørende pejlinger af vandspejlssænkningen.

ANDRE IN SITU MÅLINGER

In situ poretal for sand

Medens man ved prøveoptagning i lagfølgeboringer let får en sandprøve ødelagt, således at poretallet ikke kan bestemmes, har man anderledes gode muligheder for at bestemme poretallet, når en sandoverflade ligger blottet (markporetalsbestemmelse).

Problemet er at bestemme det naturlige volumen, en sandprøve havde før prøveoptagelsen. Kendes tørvægten, kornrumvægten og volumenet, kan poretallet bestemmes. Man udtager derfor en vis sandmængde i overfladen og skal derefter bestemme hullets volumen. Den bedste fremgangsmåde består i at efterfylde hullet med normalsand ved en bestemt udlejringsmetode, således at poretallet er kendt (sandefterfyldningsmetoden). På en plan afrettet sandoverflade lægger man en plade, hvori der er et cirkulært hul, derefter graver man et hul i sandet af samme form som den kalibreringsskål, der benyttes i laboratoriet til bestemmelse af normalsandets poretal. Med et udlej-

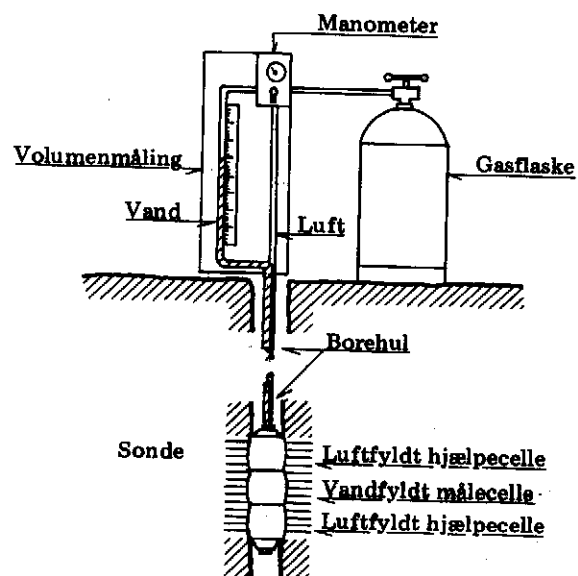
ringsapparat efterfyldes med normalsand, den overflødige sandmængde holdes tilbage i beholderen og ved vejning afgøres, hvor meget normalsand, der medgik ved bestemmelsen.

Metoden har talrige varianter. Eksempelvis kan nævnes, at hullets volumen kan måles ved at presse en gummiballon ned mod hullets sider.

En anden god metode består i at udtage en cylindrisk prøve med prøveoptager, idet man ved at grave ned ved siden af optageren kan lukke dennes bund med en murske og derved hindre prøven i at drysse ud.

Pressiometerforsøg

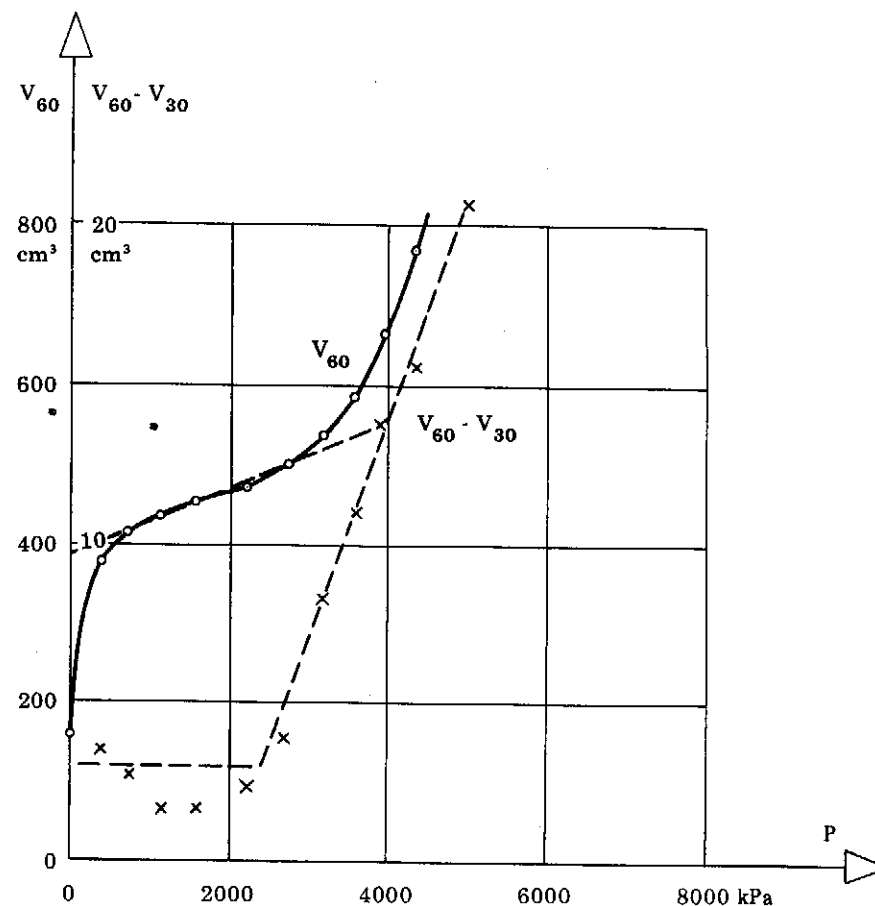
Pressiometersonden består af en cylinderformet gummibeholder, der indeholder en vandfyldt målecelle og luftfyldte hjælpeceller. Den anbringes ved måling i et borehul i et bestemt niveau (figur 2.30).



Figur 2.30 Principkitse af pressiometer

Ved forsøget øges trykket trinvis og for hvert trin foretages målinger af samhørende værdier af tryk og volumenændringer efter 30 og 60 sekunder. Resultatet kan afbildes som vist i figur 2.31. På dette grundlag kan foretages en kvalitativ bestemmelse af jordens elasticitetskoefficient samt en brudværdi, og derved kan jordens deformations- og styrkeegenskaber vurderes.

Herhjemme har pressiometerforsøg givet gode resultater ved vurdering af blødt skrivekridts deformationsegenskaber.



Figur 2.31 Pressiometermåling

Isotopmålinger

Hvis der udsendes gammastråler fra et kildepunkt, kan man i et målepunkt registrere strålingens svækkelse ved passagen gennem det mellemliggende stof. Anbringes kildepunkt og målepunkt på jordoverfladen med en blyafskærmning imellem, må strålingen passere gennem jorden, hvor den svækkes ved adsorption, refleksion og spredning. Det viser sig, at både vand- og faststofmolekylerne hindrer strålingen, således at man herved alene får et mål for den totale rumvægt. Man kan imidlertid også måle vandindholdet ved at sende »hurtige« neutroner ud fra kildepunktet. En del bremses af vandmolekylerne ved sammenstød, medens sammenstød med fast stof ikke nedsætter hastigheden væsentligt. Man kan i målepunktet registrere antallet af langsomme neutroner og benytte dette som et udtryk for vandindholdet.

Man kan måle fra jordoverfladen eller i en vis dybde under jordoverfladen ved at nedpresse en eller flere sonder.

2.8 KONTROLUNDERSØGELSER

JORDBUNDSFORHOLD

De undersøgelser, der foretages før et projekt udføres, fører til helt konkret viden om jordbundsforholdene i de punkter, hvor der er udført lagfølgeboringer, samt en vis viden om forløbet af laggrænser og variationer i jordarternes egenskaber mellem boringerne. På dette grundlag opstilles en række forudsætninger med den fornødne detaljeringsgrad.

Kontrolundersøgelserne foretages under projektets udførelse og tjener til at sikre, at der intetsteds forekommer afvigelser mellem forudsætninger og virkelighed i ugunstig retning, eller såfremt det alligevel skulle være tilfældet at standse og ændre projektet. Omfanget af kontrolmålinger afhænger af den geologiske kompleksitet.

Som eksempler på kontrolundersøgelser kan nævnes, at der under udgravningsarbejdet foretages inspektion af jordlagene, i ler kontrolleres de forudsatte udrænede forskydningsstyrker ved udførelse af

vingeforsøg, og i sand kontrolleres lejringstætheden med udførelse af markporetalsbestemmelse ved sandefterfyldningsmetoden. Markporetalsbestemmelse benyttes ligeledes til kontrol af den opnåede lejringstæthed i fyldmaterialer. Ved pælefundering kontrolleres de enkelte pæles bæreevne normalt ved registrering af rammemodstanden (antal slag pr. 20 cm nedsynkning), såfremt de er spidsbærende.

SÆTNINGSOBSERVATIONER

Sætningsobservationer udføres på bygninger i tilfælde, hvor fundamentstrykket er relativt højt, eller hvor kravene til ringe differenssætning er strenge. På egnede lokaliteter kan sådanne observationer danne grundlaget for studier af sætningsberegningers præcision eller for nye sætningsberegningemetoder.

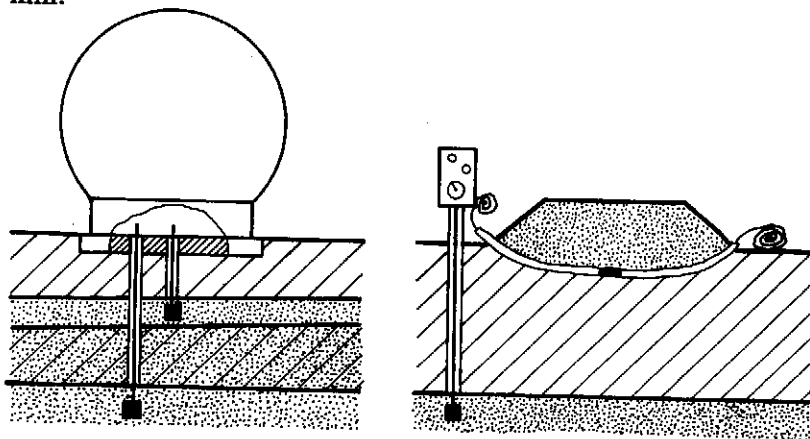
Sætningsobservationer foretages normalt på jordoverfladen. Der etableres en række fixpunkter i nærheden af den aktuelle lokalitet, og fixpunkterne forbindes med Geodætisk Instituts fixpunkter. Tid efter anden må de etablerede fixpunkters kote kontrolleres ved et nivellement. Geodætisk Instituts fixpunkter kan naturligvis anvendes direkte, men ligger sjældent i umiddelbar nærhed af lokaliteten. I bygningen eller på jordlaget indstøbes en række målepunkter, der må sidde godt beskyttet. Koten til målepunkterne kan bestemmes ved hydraulisk eller optisk nivellement. Ved at vælge opstillingspunktet midt imellem stationerne og anvende planparallel forplade kan et optisk nivellement udføres med en præcision på 0,5 mm.

Sætningsobservationer kan også udføres med dybtliggende referencepunkt. I bunden af en boring udstøbes en cementprop, hvori er fastgjort en jernstang, der fører op til jordoverfladen. Med et måleur kan man da måle sammentrykning af jordlaget ned til denne dybde. Er referencepunktet langt nede i jorden ($z > 3 \cdot D$), måles bygningens sætning. Da denne måling kan foretages med 0,01 mm's nøjagtighed, fås en meget nøjagtig bestemmelse af sætningens tidsforløb. Friktion langs med jernstangens sider er naturligvis en stor fejkilde, der kan imødegås ved at asfaltere stangen eller lade foringsrøret sidde tilbage omkring stangen. Eventuelt kan anvendes en stålwire, der holdes udstrakt af en vægt. Sådanne observationer er udført på en silo

herhjemme, samt på dyndlag, hvor man kunne observere dyndets udvidelse og sammentrækning ved ebbe og flod.

Såfremt fundamentet ikke kan betragtes som stift, vil sætningsobservationer af tilgængelige punkter ikke give relevante oplysninger. Således er bunden af en olietank slap, og en måling af randens sætning viser ikke, hvor meget midten sætter sig. Vejdæmnings eller opfyldninger er ikke i sig selv stive og et nivellement til oversiden fortæller ikke, hvordan undersiden sætter sig.

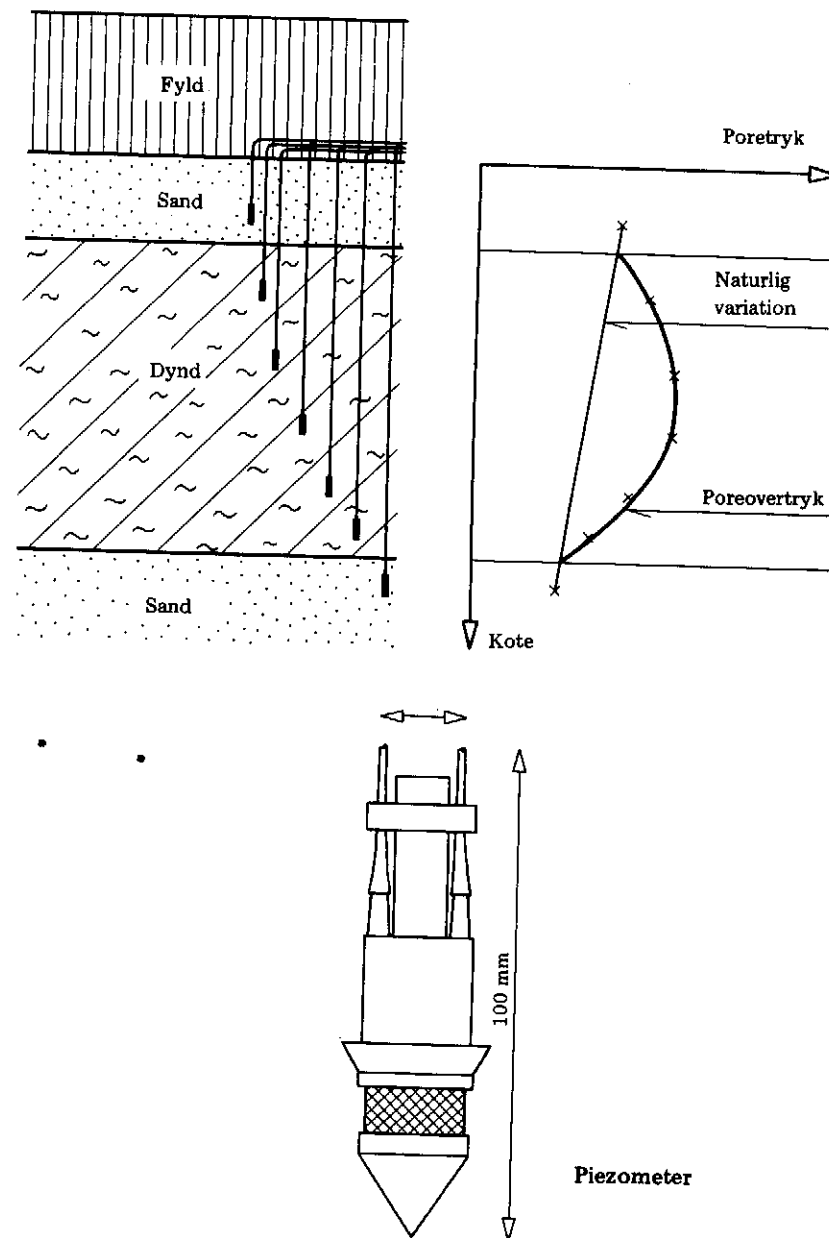
Der kan da udlægges plastslanger under bygning eller dæmning. Plastslangen skal være så stiv, at den ikke klapper sammen under den forøgede vægt. En særlig føler, der står i forbindelse med et fintmærkende manometer, kan trækkes gennem slangen og bestemme dennes nedsynkning i det antal punkter der ønskes, med en præcision på ca. 1 mm.



Figur 2.32 Sætningsobservationer under stift fundament og slapt fundament

PORETRYKSMALINGER

Normalt er kendskab til grundvandsspejlets beliggenhed en nødvendig forudsætning for at udføre en korrekt geoteknisk dimensionering eller for at kunne vælge de bedste fremgangsmåder ved udgravninger mm. I nogle tilfælde er det nødvendigt at have et mere detaljeret billede af poretrykkene, således at det fremgår, om der foregår strøm-



Figur 2.33 Poretryksmålinger med piezometer

ninger i jorden eller om der findes poreovertryk, der skyldes manglende konsolidering under de seneste belastningsændringer.

Poretryksmålinger kan således anvendes i forbindelse med stabilitetsbetragtninger af skråninger og er helt nødvendige i stort dæmningsbyggeri, såfremt store overtryk kan opstå i byggeperioden og gøre dæmningen midlertidig ustabil.

For at kunne bedømme sætningens tidsforløb kan poretryksmålinger være et godt supplement til sætningsobservationer. På grundlag af poretryksmålinger kan konsolideringsgraden beregnes gennem hele forløbet, og der fås et sikkert indicium for, hvornår krybningen er fremherskende. Sætningsobservationerne giver derimod en tidskurve, hvis tolkning i høj grad bygger på den enkeltes bedømmelse.

Måling af poreovertryk er imidlertid ikke problemfri. Det er nemlig en forudsætning for at bedømme overtrykkene, at man kender poretryksvariationerne ned gennem jordlaget svarende til den naturlige tilstand. Man må derfor have meget pålidelige observationer af grundvandsspejl i de forskellige jordlag. Endvidere rummer selve målingen visse fejlmuligheder. Efter at måleren er anbragt, går nogen tid, inden den nødvendige vandmængde er strømmet til måleren, og bliver den tid for lang, kan variationen i jordlagets poretryk måske ikke bestemmes. Nedsættes således et almindeligt pejlerør i fedt ler, vil vandet i røret fordampe lige så hurtigt, som det løber til, eller i bedste fald skal poretrykket være stabilt i årevis for at kunne måles. I sand er vandføringen så stor, at problemet ikke opstår, til gengæld har man sjældent problemer af ovennævnte art i sandaflejringer.

Man søger derfor ved konstruktionen af følelementet at reducere den nødvendige vandmængde mest mulig. Der findes således elektrisk registrerende følere, der kræver ekstremt små vandmængder, men som til gengæld er dyre. En billig føler, der også kun kræver små vandmængder, ses på figuren. Den er ca. 10 cm lang og har lige over spidsen en filterring, hvorigennem vandbevægelsen foregår. Til filterringen fører to tynde nylonlanger, der står i forbindelse med et kviksølvmanometer, der placeres i et roligt hjørne af byggepladsen. Hele systemet kan gennemskyllles med destilleret vand og eventuelle luftbobler fjernes.

2.9 OLIE- OG GASEFTERSØGNING

GEOFYSISKE UNDERSØGELSESMETODER

I forbindelse med olie- og gaseftersøgning anvendes geofysiske undersøgelsesmetoder dels i det indledende efterforskningsarbejde for at opnå et oversigtligt billede af geologien i et område, dels til at lokalisere eventuelle fælder i undergrunden, som muligvis indeholder olie- og gasforekomster. Ved de indledende undersøgelser anvendes magnetiske målinger, gravimetrisk målinger og seismiske målinger.

Ved magnetiske målinger opnås et indtryk af variationer i jordens magnetfelt. Dette kan give oplysninger om variationer i bjergarter, idet forskellige bjergarter har forskellige magnetiske egenskaber. Magnetiske målinger kan udføres fra flyver. De anvendes i det indledende efterforskningsarbejde til at give et billede af de geologiske forhold i et stort område.

Ved gravimetrisk målinger opnås et billede af tyngdevariationer i et område, idet det konstateres om de lokale bjergarter er tungere eller lettere end gennemsnittet af overfladens bjergarter (tyngdeanomalier). Gravimetrisk målinger anvendes fortrinsvis til at opnå et indtryk af den regionale geologi, men fx også til at lokalisere salthorste.

Seismiske målinger anvendes såvel i det indledende efterforskningsarbejde som i det mere detaljerede arbejde med lokalisering af mulige olie- og gasfælder. I olieeftersøgningen undersøges forholdene i op til nogle få km dybde. Det er altså et helt andet niveau og helt andre aflejrings typer, der har interesse end ved geotekniske undersøgelser, hvor ønsket er oplysninger om variationer i de overfladenære lag. Til undersøgelser i så stor dybde er refleksionsmetoden velegnet såvel til søs som på landjorden. Til søs udføres undersøgelserne som omtalt side 2.18. På landjorden udføres en sprængning og de reflekterede impulser opfanges af geofoner, der er placeret med jævne mellemrum i kilometerlange kabler. Resultaterne bliver edb-behandlet og kommer ved fortsatte målinger til at fremtræde på diagrammer,

der til forveksling ligner de diagrammer, der opnås ved en kontinuert registrering til søs.

De ovenfor omtalte geofysiske metoder er også nyttige i forbindelse med geotermisk energiprospektering.

DYBE BORINGER

Ved dybe boringer forstås boringer, der føres til flere kilometers dybde til forskel fra de tidligere omtalte undersøgelsesboringer, der kun undtagelsesvis når over 100 m.

Dybe boringer finder også anvendelse i forbindelse med olie- og gaseftersøgning og -produktion. I Danmark er udført en række boringer til flere kilometers dybde, men de har været resultatløse. De danner dog baggrund for vor viden om Danmarks dybgrund. Som bekendt har man senere fundet olie i den danske del af Nordsøen og her udføres til stadighed dybe boringer. Dybe boringer anvendes tillige i forbindelse med etablering af geotermiske varmeværker.

Boremotoden adskiller sig ikke væsentligt fra den tidligere omtalte kerneboremotode (side 2.46), men det grej, der anvendes, er langt større og tungere, og det giver sammen med boringens dybde en række specielle problemer.

Der bores normalt med et borehoved, hvis diameter kan variere fra 90 cm i de øvre lag til 22 cm. Borehovedet nedknuser de gennemborede bjergarter og bryder jorden i stykker. Det nedknuste materiale (cuttings) transporteres op til jordoverfladen af borevæsken. De gennemborede jordlags sammensætning følges gennem analyse af borevæskens indhold af »cuttings». På specielle strækninger optages kerneprøver.

I boringen anvendes forerør, hvis diameter kan variere fra 75 cm til 18 cm. Mellemrummet mellem forerør og jord udstøbes med cement for at forhindre væske og gas i at strømme fra det ene lag til det andet gennem borehullet.

En meget væsentlig komponent er boremudderet, der har en række vigtige funktioner, foruden den før omtalte. Boremudderet skal køle og smøre borehovedet og lægge sig som en tætnende hinde i bo-

rerørsvæggen for at forhindre væsketab til aflejringerne. Den vigtigste funktion er dog at stabilisere borehullet ved at påføre væggen et hydrostatisk tryk og af den grund er det vigtigt, at boremudderet har den rigtige rumvægt. Boremudderets rumvægt må afpasses den aktuelle opgave, således at trykket fra boremudderet er større end jordens formationstryk og mindre end jordens fraktureringstryk. Som boremudder anvendes normalt en opløsning af bentonit, en lerart som næsten udelukkende består af lermineralet montmorillonit. Forventes specielt høje modtryk i borehullet kan tilsættes baryt, hvorved borevæskens rumvægt kan øges til ca. 30 kN/m³. Ved olieboring er det meget vigtigt at forhindre »blow outs» (gas- og olieudslip gennem borehullet) og det må gøres ved at dimensionere boreslammet korrekt. »Blow outs» er en accelererende proces, fordi gas og olie der bobler op gennem boremudderet nedsætter boremudderets rumvægt, hvorved modtrykket falder. En rigtig dimensionering af boremudderet er således en meget vigtig faktor i forbindelse med boringer til stor dybde.

Borestangen, der skal overføre det vridende moment til borehovedet, består af rør, der fx kan være 10 cm i diameter. På grund af boringens længde spiller borestangens bøjelighed en stor rolle og det må hyppigt kontrolleres, at boringen har den rigtige retning. Retningen kan varieres under borearbejdet og det er muligt at bore skråt ud til den side, man måtte ønske. Derfor kan en række dybe indvindingsboringer udføres fra samme produktionsplatform, idet de derfra stråler ud i alle retninger.

Borearbejdet er ikke ufarligt, hverken for mandskab eller omgivelser. Sikkerheden er derfor et meget væsentligt led i borearbejdet. Der søges indbygget sikkerhedssystemer, der skal varsle blow outs og sikre, at ventilerne lukker, såfremt boremudderets tryk falder. Det er også vigtigt, at foringsrøret er støbt godt fast i jorden, så gassen ikke kan gå uden om ventilerne. Borehullet lukkes altid ved udstøbning, når det forlades.

2.10 OFFSHOREUNDERSØGELSER

Undersøgelser af havbunden og de øvre jordlag under den foregår principielt på samme måde som markundersøgelser på landjorden. Der udføres altså sonderinger og lagfølgeboringer, og de trufne jordlags geotekniske parametre fastlægges ud fra in situ målinger eller laboratorieforsøg. I begyndelsen af 70'erne, da olie- og gasindvinding i Nordsøen og mange andre steder i verden blev økonomisk forsvarligt, måtte man improvisere sig frem på grund af et stort tidspres, og mange af de første undersøgelsesprogrammer var meget mangelfulde. Fra de første pionerdage kan nævnes, at man forsøgte at pælefundere en offshorekonstruktion med samme længde af pæle som man brugte i den mexikanske golf. Men da man traf sandlag i Nordsøen i stedet for bløde lerlag til stor dybde, kunne de ikke slås ret langt ned!

Siden da er etableringen af offshorekonstruktioner lagt i faste rammer og normsat, så ovennævnte eksempel er i dag utænkeligt. De mange udfordringer, geoteknikeren har været udsat for, har imidlertid også sat gang i en udvikling, der om få år vil resultere i en betydelig forbedring af vurderingsgrundlaget for fundering af offshorekonstruktioner.

Årsagen til denne udvikling skal søges i en lang række forhold, der er specielle for havbundens geologi og for den teknologi, der kommer under anvendelse. En række af disse forhold nævnes i det følgende.

STABILITET AF HAVBUND

Et boreprofil på landjorden viser en geologisk udvikling, der er afsluttet, fx med en landhævning i stenalderen. Et boreprofil gennem en havbund kan derimod ikke uden videre antages at være stationært. Kraftige storme kan således forårsage stabilitetsbrud, selv i havbunde der kun hælder meget svagt. (Ned til 0.5%!) Jordmasserne i et stabilitetsbrud kan bevæge sig ret langt væk, inden det igen når en stabil fase. Selv uden stabilitetsbrud kan varierende vandtryk på havbunden fremkalde sandbølger på havbunden, der i forbindelse med strøm kan flytte store sandmængder.

Opbygning af organiskholdige aflejringer kan ske meget hurtigt fx ud for flodmundinger og vil resultere i meget løse aflejringer, der kan være meget gasholdige, og have en så lang konsolideringsperiode, at et overskydende porevandstryk vil reducere de effektive spændinger gennem meget lang tid.

Endvidere kan der visse steder i verden forekomme ændringer på grund af tektonisk aktivitet eller fordi isbjerge eroderer i havbunden.

I de tilfælde hvor fornøden stabilitet ikke har været til stede, har det ført til ødelæggelse eller lukning af offshorestrukturer.

Ved et tæt samarbejde mellem geologer, geofysikere og geoteknikere søger man at sikre sig, at de aktuelle lokaliteter er stabile.

POSITIONSBESTEMMELSE

Lokaliseringen af et bestemt punkt på havbunden — det punkt, hvori undersøgelser er foretaget eller hvor en konstruktion skal anbringes — er vanskelig. Muligvis bores fra et skib, hvis nøjagtige placering skal kendes, og derudover foregår undersøgelserne på en havbund, der i den danske del af Nordsøen ligger i kote -50, men mange andre steder ligger ned til 500 m under havniveau.

INSPEKTION

Inspektion af havbunden er også vanskelig, dels fordi sigtbarheden er ringe, og dels fordi eventuelle observationer skal lokaliseres. Der har været anvendt undervandskameraer, monteret på »slæder«, der kan trækkes hen over havbunden. På »slæderne« er også monteret projektorer, da det naturlige lys er alt for ringe.

LABORATORIEFORSØG PÅ INTAKTE PRØVER

Optagning af intakte prøver er meget vanskelig. Dels fordi en styret nedpresning af prøveoptagningsudstyr ved hjælp af borestænger, der når fra havoverfladen og til bunden af borehullet, er umulig, og prøverne derfor alene af denne årsag kan være meget forstyrrede. En aflastning af de totale spændinger kan udskille gasser, der er opløst i

porevandet i den naturlige tilstand, og prøvens naturlige struktur kan derved nedbrydes.

Problemet kan løses ved at placere en tung »borerig« på havbunden. Den må da manøvreres fra havoverfladen, eller »boreriggen« må udstyres med dykkerklokke. Prøveoptageren må anbringe prøven i en tryksikker beholder, der kan vedligeholde det meget store totale in situ tryk, og prøven må kunne anbringes under samme tryk i laboratorieudstyret, uden at trykket falder på noget tidspunkt!

Yderligere problemer opstår, såfremt der træffes faste bjergarter eller permafrost (!).

Problemerne vil blive løst, derom vidner allerede forskellige artikler, men det bliver meget dyrt at udføre sådanne forsøg og deres antal vil indskrænke sig til det absolut nødvendige. Derfor vil hovedvægten da også blive lagt på in situ målinger.

IN SITU MALINGER

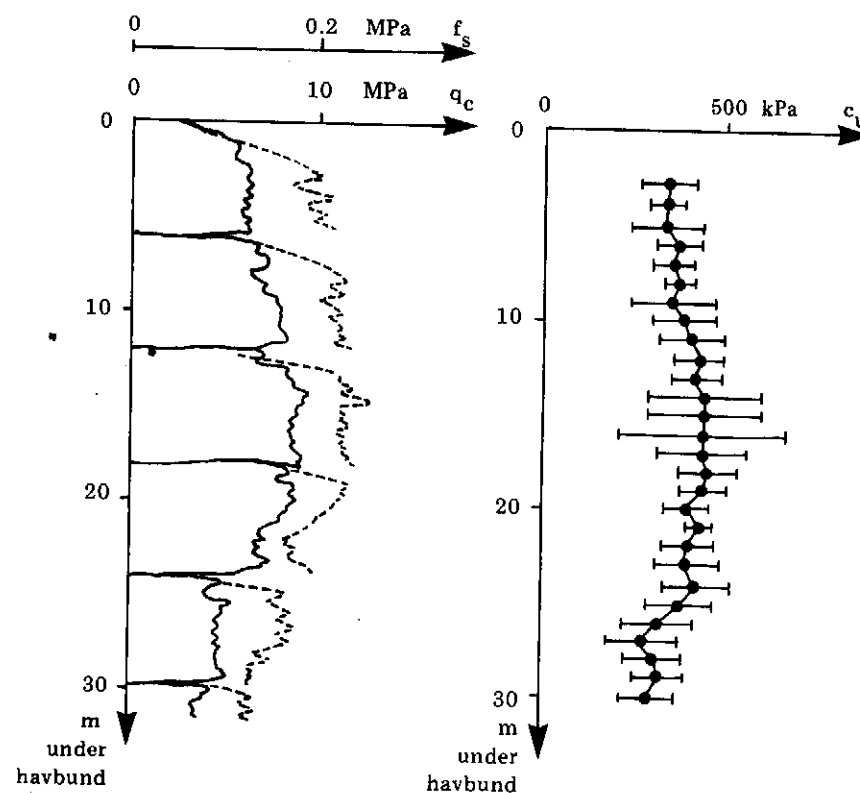
Udviklingen af in situ måleudstyr baserer sig på den velkendte teknik som er omtalt tidligere i dette kapitel.

Således er der udført et stort arbejde for at udvikle »Cone penetration forsøget« (side 2.15) med henblik på at opnå at måle relevante styrkeparametre for jorden. Samtidig udføres målinger af poretrykket, hvad der muliggør en vurdering af de effektive spændinger. Der er imidlertid lang vej igen, før sådant udstyr altid fører til pålidelige resultater.

På fig. 2.34 a) ses resultatet af et CPT forsøg, hvor overflademodstanden f_s og spidsmodstanden q_c er målt. CPT sonden er trykket ned i havbunden 6 m ad gangen. Herefter er den trukket op, og boringen ført ned gennem de 6 m. Påny trykkes sonden fra bunden af borerullet og yderligere 6 m ned, og sådan fortsættes til den ønskede dybde. Forsøget er først og fremmest velegnet til vurdering af pælefundering. Det er jo en lille modelpæl, der trykkes ned. Forsøget viser, at overflademodstanden i installationsfasen andrager ca. 3% af spidsmodstanden. Derimod fortæller f_s ikke noget om overflademodstandens endelige størrelse (regeneration!). Spidsmodstanden kan benyttes til beregning af den udrænede forskydningsstyrke c_u

ved brug af den geostatistiske formel for pæles spidsmodstand i ler. Overlejringstrykket kan dog blive så stort, at det bør indregnes i formelen. Problemet er da at finde en passende værdi af spidsmodstandsfaktoren, der som bekendt kan variere mellem 9 og 18. Den store værdi svarer til hårdt forbelastet ler. Den kan findes ved sammenligning med kvalitetsforsøg fra laboratoriet eller må ansættes erfaringsmæssigt.

Resultatet af alle CPT forsøg kan da afbildes som vist på fig. 2.34 b), hvor middelværdien og et interval svarende til 2 gange standardafvigelsen er afsat.



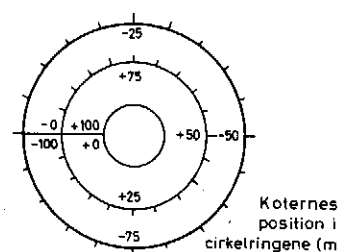
Figur 2.34 a) CPT forsøg på lokalitet med moræneler.
b) Statistisk vurdering af c_u , baseret på mange CPT forsøg.

Anvendelse af statistiske metoder vil give store fordele. Dels fordi observationernes antal er rimelig stort, dels fordi man håber ad denne vej at kunne nyttiggøre også mindre heldige men stadig meget dyre observationer.

APPENDIX

Ved optegning af geologiske basisdatakort (eksempel figur 2.3) benyttes følgende signaturer:

CIRKELDIAGRAMMER



• Beliggenhed af boring
 1.7/s s Ydelse i m³/h/m sænkning

Jordtagssymbol

■ Filterinterval A,B...
 ▲ Grundvandsstand for fitter A,B...

Borenummer
 Øvre: D.G.U. ark.nr.
 Nedre: Vandværkets nr.

Underkant af borerør

Boringens udførelsesår
 (1967)

Grundvandsstand
 i udførelsesåret
 ved senere pejling

Borediameter (8")
 Terræn (kote +10)
 Laggrænse (kote -4)

D.G.U. - prøvebeskrivelse
 foreligger

Oversigt over de signaturer, bogstavsymboler og farver, som DGU har anvendt i den geologiske kortlægning i de senere år. Silt er kun angivet på de geologiske kort i ganske få tilfælde. (Ex. fig. 2.4)








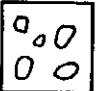

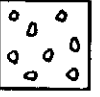
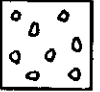

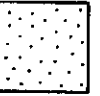



Danmarks Geologiske Undersøgelse		Bogstav- symboler	Karterings- tegn	Farver	Råstof- symboler
<i>Kvartære aflejringer</i>					
postglaciale	ferskvands	- tørv	FT	⊥	RTT
		- dynd/gytje	FP	∨	
		- ler	FL	∇	RLL
		- silt	FJ		
		- sand	FS	⊥	RSS
		- grus	FG	⊙	RGG
	kilde-, mose- & søkalk okker & myremalm	FK	×		RTK
		FJ	♂		ROO/RYY
	saltvands	- eve	HT	⌒	
		- marsk	HV	L	
senglaciale		- dynd/gytje	HP	^	
		- ler	HL	⋈	RLL
		- silt	HI		
		- sand	HS	⊥	RSS
		- grus	HG	⊙	RGG
	vindaflejret	- ler/silt	EI		
		- sand	ES	~ S	RES
	ferskvands	- ler	TL		RLL
		- silt	TI		
		- sand	TS	⊥	RSS
		- grus	TG	⊙	RGG
	saltvands	- ler	YL	Y	RLL
		- silt	YI		
		- sand	YS	Y	RSS
		- grus	YG	Y	RGG
				violette	

Danmarks Geologiske Undersøgelse		Bogstav- symboler	Karterings- tegn	Farver	Råstof- symboler
<i>glaciale</i>					
issø	- ler	ZL	⊥	rød-violette	RLL
	- silt	ZI			
	- sand	ZS	⊥		RSS
	- grus	ZG	⊙		RGG
	smeltevands	- ler	DL	=	RLL
		- silt	DI		
		- sand	DS	.	RSS
		- grus	DG	°	RGG
moræne	- ler	ML	Δ	brune	
	- silt	MI			
	- sand	MS	⋈		RMS
	- grus	MG	⊙		RMG
<i>Prækvartære aflejringer</i>					
kvartssand		KS			RKS
kvartsgrus		KG			RKG
glimmersand		GS			
oligocænt ler		OL			
eocæn mergel		SL			
eocænt moler		ED			REL
eocænt ler		LL			RXL
paleocænt grønsand		PS			
paleocænt ler		PL			
paleocæn kalk		PK			
tertiære brunkul		GC			RBC
daniens-kalk		ZK			
skrivekridt		SK			RSK
kalk, kridt		K			

Ved optegning af geotekniske boreprofiler, samt i denne bogs figurer, er anvendt følgende signaturer:

JORDARTSSIGNATURER

JORDARTSSIGNATURER

	Fyld		Skaller		Tørvedynd		Tørv
	Muld		Plante- rester		Dynd/ Gytje		
	Sten		Silt		Moræne- sand		
	Grus		Ler		Moræne- silt		
	Sand		Kalk/ Kridt		Moræne- ler		

STIKORDSREGISTER

FOR LÆREBOG I FUNDERING

Kapitel 1. Geologisk Oversigt. Okt. 1984

Kapitel 2. Markundersøgelser. Febr. 1985

Albit	1.21	Bundkonglomerat	1.30
Alkalifeldspat	1.21	Bygeologi	2.8
Allerødperioden	1.48	Bygværker, pælefunderede	2.4
Allerødaflejringer	2.4	Bølling-perioden	1.48
Amfiboler	1.21		
Ancylussøen	1.50	Chlorit	1.21
Anhydrit	1.21	Cilleborgler	1.33
Anorthit	1.21	Cone penetration test	2.68
Antiklinal	1.9	CPT-forsøg	2.15
Astenosfære	1.4, 1.7	CPT-sonde	2.68
Augut	1.21	Crosshole målemetoden	2.38
		Cuttings	2.64
Baltiske issø	1.48	Cyprina islandica	1.37
Baryt	2.65		
Basalt	1.20	Danien	1.28, 1.30
Basisdatakort	2.9	Danskekalk	1.30
Bassinområde, nordtysk	1.24	DGU	2.8
Bassinområde, norsk-dansk	1.24	Diagenese	1.16
Belastet spidsbor	2.12	Diamantkrone	2.46
Bentonit	2.41, 2.46, 2.65	Diatomejord	1.19, 1.32
Bishopoptager	2.41, 2.43, 2.44	Dobbelt kernerør	2.47
Blegsand	1.15	Dolomit	1.21
Blow out	2.65	Drejesondering	2.12
Borearkivet på DGU	2.8	Dybe boringer	2.64
Borehoved	2.64	Dybvinge	2.53
Borejournal	2.40	Dynamisk sondering	2.38
Borekrone	2.46	Dynd	1.19, 1.50
Boremudder	2.64	Dyndholdigt ler	1.50
Boreprofil	2.48, 2.49	Dyndlag	1.50
Boreredskaber	2.44	Dødis	1.41
Borerig på havbunden	2.68	Dødishuller	1.41
Boreslam	2.41, 2.46	Døgnvarv	1.18
Boring, skylle-	2.47		
Boring, suge-	2.47	Efterfyldningsmetode	2.55
Boringer, dybe	2.64	Elektrisk potentiale	2.24
Boringer, uforede	2.48	Elektrodeafstand	2.26
Brandenler	1.33	e _{max}	2.48
Brunjernsprofil	1.15	e _{min}	2.48
Brunjernsten	1.14, 1.21	Endogen geologi	1.1
Brunkul	1.19	Endogene processer	1.5
Bryozokalk	1.19, 1.30	Eocæn	1.32

Esbjerg yoldialer	1.36	Geologi, exogen	1.1
Eustatisk havspejlsstigning	1.44	Georadar	2.39
Eustatisk havspejlsændring	1.12	Geosynklinalteorien	1.5
Exfoliation	1.13	Gips	1.21
Exogen geologi	1.1	Glaukonit	1.20, 1.21
		Gletscheraflejringer	1.40
Feldspat	1.21	Glimmer, lys	1.21
Flint	1.20	Glimmer, mørk	1.21
Flydegrænse	2.48	Glimmerler	1.34
Flydejord	1.52	Glimmerminerale	1.21
Flyvesand	1.52	Gnejs	1.20
Foldefase, alpinsk	1.22	Granit	1.20
Foldefase, herzynsk	1.22	Gravimetriske målinger	2.63
Foldefase, kaledonisk	1.22	Grundvandsforhold	2.4
Foldefaser	1.22	Grønsandskalk	1.32
Foldning, alpin	1.28	Grønsandsler	1.32
Foldninger	1.8	Grønsandssand	1.32
Forerør	2.64	Gutenberg diskontinuitet	1.2
Foring (casing)	2.46	Gytje	1.19
Foringsrør	2.41	Gytjelag	1.50
Forkastning	1.8		
Forkastning, normal	1.8	Havbunden, borerig på	2.68
Forkastning, revers	1.8	Havbunden, inspektion af	2.67
Forkastning, sidevæerts	1.8	Havbunden, undersøgelse af	2.66
Forkisling	1.19	Havspejlsstigning, eustatisk	1.44
Formationstryk	2.65	Havspejlsændring, eustatisk	1.12
Forskydningsstyrke, intakt	2.54	Hedesletter	1.46
Forskydningsstyrke, udrænet	2.53	Hematit	1.21
Forskydningsstyrke, æltet	2.54	Hollandsk sondering	2.14
Forsøg, cone penetration	2.68	Hornblende	1.21
Forsøg, vinge-	2.41, 2.53	Hurtige neutroner	2.58
Forundersøgelser	2.2	Hydraulisk nivellement	2.59
Forvitring, fysisk	1.13	Hydrofon	2.18
Forvitring, kemisk	1.14	Hydrologiske forhold	2.6, 2.52
Forvittringsprofiler	1.15	Håndvinge	2.63
Fraktureringstryk	2.65	Hærdnede lag	2.46
Funderingsklasse, lempet	2.4		
Funderingsklasse, normal	2.5	Illit	1.21
Funderingsklasse, skærpet	2.5	Indledende undersøgelser	2.2, 2.6
		Inspektion af havbund	2.67
Gammastråler	2.58	Inspektion af jordlag	2.58
Geodætisk Instituts 4 cm kort	2.6	Intakt forskydningsstyrke	2.54
Geodætisk Instituts fixpunkter	2.59	Intakt prøve	2.41
Geoelektrisk kartering	2.26	Intakt sandprøve	2.44
Geoelektrisk opmåling	2.22	Interglaciale	2.4
Geoelektrisk sondering	2.28	Interstadialtider	1.35
Geofon	2.18, 2.20	Iso-ohmer	2.26
Geologi, endogen	1.1	Isostasi	1.3

Isostatisk landhævning	1.44	Lagfølgeunders., planlægn. af	2.52
Isotopmålinger	2.58	Lagfølgeundersøgelse	2.40
Issø	1.41	Laggrænser	2.40
Issøaflejringer	1.42	Landhævning, isostatisk	1.12, 1.44
Istider	1.35	Lava	1.8
Istidslandskab	1.40	Lava, basisk	1.10
		Lava, sur	1.8
Jernglans	1.21	Ledningsevne	2.22
Jernmeteoritter	1.2	Ledningsevne, specifik	2.24
Jernminerale	1.21	Lehmann diskontinuitet	1.2
Jernsandsten	1.33	Ler, dyndholdigt	1.50
Jernspat	1.21	Ler, tertært	2.4
Jordarter, organiske	1.19	Lerminerale	1.21
Jordskælvsbølger	1.2	Lersnupper	2.44
Jura	1.24	Lillebæltssler	1.33
		Limonit	1.14, 1.21, 1.33
Kalifeldspat	1.21	Lithosfære	1.4, 1.7
Kalkgytje	1.36	Litorina transgressionen	1.50
Kalkminerale	1.21	Luftfoto	2.10
Kalksandskalk	1.30	Lys glimmer	1.21
Kalkspat	1.21	Løss	1.18
Kaolinit	1.21		
Kappe	1.2	Magnetiske målinger	2.63
Kartering, geoelektrisk	2.26	Magnetit	1.21
Karteringskort	2.10	Markkurve	2.28
Kernebor	2.46	Markporetalsbestemmelse	2.55, 2.59
Kernerør, dobbelt	2.47	Mekanisk sondering	2.12
Kertemindemergel	1.32	Mellemistider	1.35
Knækalk	1.14	Metamorfose	1.6
Kisel	1.20	Meteoritter	1.2
Kiselgur	1.19	Miocæn	1.34
Kiselgytje	1.36	Modelkurve	2.28
Kokkoliter	1.26	Modstand, tilsyneladende	2.28
Kokkosfære	1.26	Modstand, specifik	2.22, 2.28, 2.37
Kontinentalforskydning	1.6	Moho	1.2
Kontrolundersøgelser	2.2, 2.58	Moler	1.32
Kopbor	2.44	Montmorillonit	1.21, 2.65
Koralkalk	1.19, 1.30	Morfologi	1.5
Kornfordeling	2.48	Moræne	1.40
Kridt	1.26	Moræneflader	1.40
Kugleventiloptager	2.42, 2.43	Morænelandskab, bølget	1.40
Kulbrinte	1.19	Morænelandskab, stærkt bakket	1.41
Kvarts	1.20	Muscovit	1.21
Kvartssand	1.34	Myremalm	1.16
Kvartær	1.35	Målinger, gravimetriske	2.63
		Målinger, magnetiske	2.63
Lag, hærdnede	2.46	Målinger, seismiske	2.63
Lag, permeable	2.55	Mørk glimmer	1.21

N-værdi	2.48	Prøvepumpning	2.55
Nabokonstruktioner	2.4	Pyrit	1.20
Nedskylsslam, senglacialt	1.48	Pyroxener	1.21
Nedskylstiden	1.48	Pælefunderede bygværker	2.4
Nivellement Hydraulisk	2.59		
Nivellement, optisk	2.59	Rammemodstand	2.59
Nordtysk Bassinområde	1.24	Rammesondering	2.14
Normalforkastning	1.8	Randmorænelandskab	1.41
Normalsand	2.55	Refleksionsmetoden	2.18
Norsk-dansk bassinområde	1.24	Refraktionsmetoden	2.20
Nutid	1.53	Reservoirbjergarter	1.19
		Residualbjergart	1.16
Observation af vandspejl	2.40	Resistivitetskort	2.27
Offshorekonstruktioner	2.66	Reversforkastning	1.8
Offshoreundersøgelser	2.66	Ringkøbing-Fyn højderyg	1.24
Okker	1.15	Rumvægt	2.48
Olie- og gaseftersøgning	2.63, 2.64	Rødler	1.14
Oligocæn	1.33	Rønæsler	1.33
Omrørt prøve	2.41		
Opmåling, geoelektrisk	2.22	Saltation	1.17
Optager, Bishop-	2.43, 2.44	Salthorste	1.10, 1.28
Optager, kugleventil-	2.42, 2.43	Saltminerale	1.21
Optager, prøve-	2.42	Saltpuder	1.10
Optager, stempel-	2.42, 2.43	Salttektik	1.10
Optisk nivellement	2.59	Saltvægge	1.10
		Sandbølger	2.66
Paleocæn	1.32	Sandefterfyldningsmetode	2.59
Pejlerør	2.55	Sandprøver, intakte	2.44
Penetrometer	2.15	Sandspand	2.44
Permeable lag	2.55	Saxacavasand	1.46
Piezometer	2.55, 2.61	Sediment	1.16
Pladetektonikteori	1.7	Seismisk måling	2.63
Plagioklas	1.21	Seismisk sondering	2.17
Plasticitetsgrænse	2.48	Senglacial	2.4
Pliocæn	1.34	Senglacialtid	1.46
Podsolprofil	1.15	Senon	1.26
Poretryksmåling	2.60	Sensitivitet	2.54
Postglacialtid	1.48	Septarieler	1.33
Pressiometerforsøg	2.56	Sideværts forkastning	1.8
Pressiometermåling	2.57	Signaturer, standardiserede	2.48
Processer, endogene	1.5	Skorpe	1.2
Processer, exogene	1.13	Skorstene	1.26
Projektundersøgelser	2.2	Skredjord	1.50
Prøve, intakt	2.41	Skrivekridt	1.26
Prøve, omrørt	2.41	Skylleboring	2.47
Prøvegravning	2.48	Slamkalk	1.30
Prøveoptagere	2.42, 2.43	Slangemåling	2.60

Slumbergermetoden	2.35	Undersøgelser, kontrol-	2.58
Smeltevandsaflejringer	1.40	Undersøgelsesboringer	2.40
Sneglebor	2.44		
Sonde, CPT-	2.68	Vandindhold	2.48
Sonde, SPT-	2.41	Vandspejl, observation af	2.40
Sondering, dynamisk	2.38	Vandspejlsobservationer	2.55
Sondering, geoelektrisk	2.28	Varv	1.18
Sondering, hollandsk	2.14	Ventilbor	2.44
Sondering, mekanisk	2.12	Vingeforsøg	2.41, 2.48, 2.53
Sondering, ramme-	2.14	Vulkanisme	1.8
Sondering, seismisk	2.17		
Sondering, SPT-	2.48	Wenner-arrangement	2.29
Sonderingsdiagram	2.12	Wiechert diskontinuitet	1.2
Sonderingsmodstand	2.13		
Specifik ledningsevne	2.24	Yoldiahavet	1.46
Specifik modstand	2.22, 2.28, 2.37	Yoldialer	1.46
Spidsbor, belastet	2.12	Yoldialer, Esbjerg-	1.36
SPT-forsøg	2.15	Yoldialer, ældre	1.36
SPT-sonde	2.41, 2.43, 2.44		
SPT-sondering	2.48	Øxenradesandsten	1.33
Standard penetration test	2.15		
Standardiserede signaturer	2.48	Årsvarv	1.18
Stempeloptager	2.42, 2.43	Åse	1.42
Stenmeteoritter	1.2		
Stensalt	1.21		
Strygningsretning	2.52		
Strømelektroder	2.22		
Sugeboring	2.47		
Sylvin	1.21		
Søkalk	1.14		
Søalm	1.15		
Søvindmergel	1.34		
Sætningsobservationer	2.59		
Tertiær	1.28		
Tertiært ler	2.4		
Tilsyneladende modstand	2.28		
To-lags modelkurve	2.30, 2.36		
Tre-lags hjælpekurve	2.33, 2.34		
Tunneldale	1.42		
Tørv	1.19		
Tørvelag	1.50		
Udrænet forskydningsstyrke	2.53		
Uforede boringer	2.48		
Undersøgelse af havbunden	2.66		
Undersøgelser, indledende	2.2, 2.6		