

Kravspecifikation for udførelse af geofysisk borehulslogging i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning

November 2010

Version 1.0



Thomas Vangkilde-Pedersen

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland

Indhold

1.	Indledning	3
2.	Opmåling og optegning af de fysiske forhold omkring boringen	4
3.	Særlige krav til udførelse for de enkelte metoder	6
3.1	Generelle krav.....	6
3.2	KS aktiviteter.....	7
3.3	Naturlig gamma.....	8
3.4	Spektral gamma.....	9
3.5	Normal resistivitet	9
3.6	Fokuseret resistivitet	10
3.7	Single point resistance.....	10
3.8	Selvpotentiale (SP).....	10
3.9	Elektromagnetisk induktion	11
3.10	Neutron-neutron porøsitet	11
3.11	Gamma-gamma densitet.....	12
3.12	Borehulsvæskens temperatur og ledningsevne	13
3.13	Kaliperlog	13
3.14	Flowlog.....	14
3.15	Soniclog	16
3.16	Videoinspektion.....	16
3.17	Optisk televiewer	17
3.18	Akustisk televiewer.....	17
3.19	VSP	17
4.	Afreportering	19
4.1	Papirrapport	19
4.2	Digitale data.....	20
5.	Referencer	21

1. Indledning

Borehulslogging er en geofysisk undersøgelse, der foregår ved nedsænkning af sonder/måleinstrumenter i et borehul. Herved måles forskellige fysiske parametre, som ved en fortolkning kan karakterisere de gennemborede jordlag og deres typiske egenskaber.

Borehulslogging anvendes i grundvandskortlægningen primært til lithologisk tolkning, stratigrafisk korrelation, bestemmelse af vandkvalitet, kortlægning af porøsitet, sprækker og indstrømningsmønstre og korrelation med seismiske data. Andre anvendelser i forbindelse med f.eks. indvindings- eller undersøgelsesboringer kan blandt andet være verifikation af boringsudbygning og filtersætning, lokalisering af utætheder i forerør, tilstand af filter og forureningsudbredelse.

Baggrunden for udarbejdelsen af kravspecifikationen er et fælles ønske fra Miljøcentrenes og GEUS' side om klare retningslinier for udførelse af borehulslogging i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning. For flere af målemetoderne er der procedurer og forhold i forbindelse med indsamlingen af data (kørsel af sonderne), som har betydning for kvaliteten og validiteten af målingerne. Formålet med denne kravspecifikation er udelukkende at beskrive sådanne forhold og angive retningslinier for udførelsen af målingerne, og dermed bane vejen for, at data optages på en måde, så der sikres brugbare, troværdige og sammenlignelige data.

Målgruppen for brug af kravspecifikationen er dels medarbejdere i Miljøcentrene, som skal bestille udførelse af borehulslogging, og dels medarbejdere i rådgivningsfirmaer, som udfører logging samt medarbejdere begge steder, som i forbindelse med grundvandskortlægningen efterfølgende arbejder med loggingdata. Endelig kan kravspecifikationen selvfølgelig finde anvendelse i andre sammenhænge end grundvandskortlægning i det omfang den er relevant for opgavetyper.

Denne kravspecifikation er version 1.0 og træder i kraft pr. 16. november 2010. Den kan hentes fra grundvandskortlægningens hjemmeside www.grundvandskortlaegning.dk og er udarbejdet af Thomas Vangkilde-Pedersen, GEUS med bidrag og kommentarer fra:

Anders Vest Christiansen, GEUS
Verner Søndergaard, GEUS
Ole Dyrsø Jensen, Miljøcenter Århus
Claus Ditlefsen, GEUS
Per Rasmussen, GEUS
Kurt Klitten, GEUS
Anne Maria Nielsen, Miljøcenter Aalborg
Kim Dan Jørgensen, Miljøcenter Roskilde
Mikkel Ulfeldt Hede, Miljøcenter Odense
Stine Rasmussen, Miljøcenter Århus
Henrik Andersen, Orbicon | Leif Hansen
Søren Bjørn, Alectia
Jørgen Ringgaard, Rambøll

2. Opmåling og optegning af de fysiske forhold omkring boringen

Det er vigtigt, at de fysiske forhold omkring en boring på loggingtidspunktet opmåles, optegnes og noteres samt evt. fotograferes. Ofte bliver den fysiske afslutning af en boring ændret efter logging, f.eks. afskæring af forerør ved overfladen, filtersætning etc. Det kan således have stor betydning for tolkningen af resultaterne at kende de fysiske forhold på loggingtidspunktet.

Boringsnavn og koordinater/lokalisering

I forbindelse med udførelse af undersøgelsesboringer som led i den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning skal der indhentes DGU nr. til boringen, allerede når den påbegyndes. Som udgangspunkt er det boreentreprenøren, der indhenter DGU nr. Ved boringer som udføres med tilsyn, kan det eventuelt være tilsynet, som indhenter DGU nr. Under alle omstændigheder vil DGU nr. således foreligge ved start af loggingoperationen, og mærkning af prøver og alle optegninger i øvrigt, herunder også data og andet materiale vedrørende udførelse af logging, kan påføres en unik og permanent identifikation.

Hvis der alligevel ikke er tildelt et DGU nr. på tidspunktet for udførelse af logging, skal boringen identificeres med så entydig en navngivning som muligt. Ofte anvendes navne som B1, B2 osv. Det vigtigste er selvfølgelig, at der er enighed blandt aktørerne i et givent projekt omkring navngivningen. For at undgå misforståelser skal der endvidere noteres så detaljeret et lokalitetsnavn som muligt, og medmindre der foreligger en situationsplan, koordinater eller f.eks. et præcisionsindmålt referencepunkt, skal boringen indtegnes på et 4 cm kort og et sæt koordinater noteres (indmålt med GPS, DGPS eller aflæst fra kort) med angivelse af projektion og datum (f.eks. EUREF89, Zone 32N, DVR).

Aktuel boringsafslutning/referenceniveau

Boringsafslutningen på loggingtidspunktet skal beskrives. Beskrivelsen skal omfatte:

- Boreddybde ifølge boreentreprenør
- Borediameter
- Borehulsvæske (mudder, vand etc.)
- Type af forerør (materiale)
- Diameter af forerør
- Dybde for bund af forerør
- Type af filterrør (materiale og filtertype)
- Diameter af filterrør
- Dybde for bund af filterrør
- Filterstrækning(er)
- Intervaller med gruskastning
- Intervaller med lerspærre
- Højde over terræn for top af fore-/filterrør
- Tidsrum siden pumpning eller borearbejde

I forbindelse med både borearbejde og logging er det vigtigt, at alle dybdeangivelser forholder sig til én præcist bestemt referencekote. Da terrænet omkring et borested ofte ændres i forbindelse med borearbejde og efterfølgende terrænreguleringer, skal der indledende etableres et fast kote punkt, indmålt med en nøjagtighed bedre end 1 cm, i en vis afstand fra arbejdspladsen. Det kan f.eks. være i form af et nedbanket, galvaniseret jernrør, og som udgangspunkt skal dette gøres af boreentreprenøren eller tilsynet. Fra dette kote punkt kan øvrige nødvendige referencepunkter indmåles ved hjælp af et laservaterpas eller tilsvarende. Den oprindelige terrænkote på selve borestedet bestemmes på denne måde, inden borearbejdet påbegyndes. Efterfølgende kan koter af top forerør og midlertidige referencepunkter anvendt ved logging m.v. tilsvarende indmåles efter behov. Det primære kote punkt fjernes først, når alle indmålinger er kotesat og alle data er blevet kontrolleret. Dokumentation i form af foto, hvorpå boringsafslutning og terræn kan ses, bør foreligge.

Den beskrevne fremgangsmåde sikrer, at alle dybdeangivelser hidrørende fra boringen (jordlag, filtersætninger m.v.) og udførte logs er i indbyrdes overensstemmelse, og i sidste ende kan relateres til konkrete, præcise koter. Oplysningerne til boringens obligatoriske lokaliseringsskema bliver samtidig sikret en god kvalitet. Værdien, af at alle indmålinger og dybdeangivelser har en fælles velbestemt referencekote, er stor og helt afgørende, når det drejer sig om undersøgelsesboringer, hvor samtolkning af geologiske, geokemiske, vandkemiske og loggingbaserede data er en central del af undersøgelsen.

3. Særlige krav til udførelse for de enkelte metoder

3.1 Generelle krav

Referenceniveau

For at undgå manuelle fejl i forbindelse med optagelse og efterfølgende eventuelle dybdekorrektioner, skal alle logs måles i meter under terræn (m.u.t.). Hvis top af forerør anvendes som reference for sonderne under kørslen, måles og noteres længden af røret og korrektion til terræn som referenceniveau foretages enten online under dataoptagelsen eller påføres data efter optagelse. Hvis et præcisionsindmålt referencepunkt findes ved borepladsen indmåles terræn, top af forerør og andre for loggingoperationen relevante referenceniveauer i forhold til dette med laservaterpas eller tilsvarende, så en kote med en nøjagtighed bedre end 1 cm kan angives for referenceniveauet for de udførte logs.

De udførte logs præsenteres i forbindelse med afrapporteringen altid i m.u.t., og afhængig af specifikationerne for den enkelte opgave også i koter. Omregningen til koter skal jf. ovenstående altid foretages i forbindelse med efterbehandlingen af logs. Koten for referencepunktet under optagelsen skal altid angives sammen med oplysninger om, hvordan den er bestemt og med hvilken usikkerhed. Hvis der ikke findes et præcisionsindmålt referencepunkt ved borepladsen, er det afgørende for værdien af relationen til koter, at terrænkoten i forbindelse med udførelse af borehulslogging indmåles med en på forhånd aftalt nøjagtighed, f.eks. ved hjælp af GPS.

Afhængig af specifikationerne for den enkelte opgave indleveres logdata til GERDA i m.u.t. eller koter.

Sampleinterval

Alle logs (undtagen sonic, se afsnit 3.15) skal optages med et sampleinterval på 1 cm, medmindre andet er særskilt aftalt, og der må ikke foretages filtrering af rådata inden lagring (se nærmere om filtrering under afrapportering i afsnit 4).

Logretning

Alle logs skal optages nedefra og op for at få den mest stabile kørsel i borehullet. Undtaget herfra er flowlog samt temperatur- og ledningsevnelogs, som normalt skal optages oppefra og ned. Dog kan flowlogs, i f.eks. åbne kalkboringer med mange fremspring ("hylde") eller i meget lavtydende boringer, i nogle tilfælde med fordel optages nedefra og op (se afsnit 3.14). Dette forudsætter, at flowsonden kan måle såvel nedadgående som opadgående strømning, og at flowloggen udføres ved nedpumpning af vand i boringen i stedet for som normalt ved oppumpning af vand.

Loghastighed

Hvis ikke andet er angivet under den enkelte logtype, skal sonderne køres med en hastighed på maksimalt 6 m/min. Dog kan resistivitets- og induktionslogs køres med en hastighed på 9 m/min., men ikke hvis den pågældende sonde skal optage andre logkurver.

Boringsdiameter

Målingernes horisontale indtrængning i formationen varierer både med logtype og med udstyrsspecifikationer. Det er således vigtigt at være opmærksom på den enkelte sondes anvendelighed i forhold til den aktuelle boringsdiameter.

Nogle logtyper som f.eks. densitet er retningsbestemte, mens andre som f.eks. sonic kræver symmetri omkring sonden. For disse logtyper må man derfor aktivt sikre, at sonden kører henholdsvis sidewall med en kaliperarm eller centralt i boringen ved brug af centraliseringsstyr (se nærmere herom under de enkelte logtyper).

Kalibrering, producentanvisninger, vedligehold og rengøring

Alle anvisninger omkring brug, kalibrering og vedligehold fra producenten af udstyret skal følges/være fulgt for det udstyr, som anvendes til logging. Eventuelle kalibreringsperioder må således ikke være overskredet, og anvisninger om f.eks. opvarmning af sonder før brug skal følges. Endvidere skal udstyret være rengjort for at undgå forurening af grundvandet.

Kalibrering af sonder skal kunne dokumenteres forud for start af en feltkampagne ved fremsendelse af kalibreringsskemaer. En feltkampagne kan indeholde alt fra én eller få og op til mange boringer, og en given leverandør af loggingydelser behøver ikke genfremsende kalibreringsdokumentation forud for hver enkelt kampagne, så længe kalibreringsperioden for udstyret ikke er overskredet siden sidste dokumentation.

3.2 KS aktiviteter

Repeat-logging

For alle logs udføres en repeat-strækning på 20 m fra bunden af boringen og op. Repeat-strækningen og den gældende log skal ved en visuel inspektion være ens, for at en given log kan accepteres. For flowlog skal der optages 2 ens (igen ved visuel inspektion) logs over hele logstrækningen, for at en given log kan accepteres (gælder også basisflow, se nærmere herom under flowlogging i afsnit 3.14). Feltplot af gældende log og repeatlog vedlægges ved afrapportering af det udførte arbejde.

Alternativt kan det særskilt aftales, at der som kvalitetssikring logges nedad til sammenligning med logging opad i stedet for at optage en repeat-strækning. Værdien af en sådan sammenligning forringes dog, hvis de to kørsler ikke udføres med samme logginghastighed, og generelt anbefales det at fastholde kravet om repeat-logging.

Krydscheck af logtyper

Som supplement til sammenligningen af repeat-strækninger udføres også krydscheck mellem de enkelte logtyper. Mange af de forskellige logtyper afspejler i et vidt omfang aflejringernes porøsitet og dermed indhold af porevæske. Således skal det checkes, at udsving med høje værdier på f.eks. resistivitet-, densitet- og soniclogs modsvarer af udsving med lave værdier på f.eks. induktion- og resistivitetslogs samt om udsvingene befinder sig i samme dybder. Tilsvarende kan naturlig gamma og SP-log checkes mod hinanden og flowlogs kan checkes mod f.eks. naturlig gamma, resistivitet og temperatur og ledningsevne. I forbindelse med tolkningen er det endvidere vigtig at sammenholde de forskellige logtyper

med kaliperloggen, for at checke om eventuelle kaviteter kan have givet anledning til anormale værdier.

Vertikal kontrol

For hver sonde skal dybdetællerens udgangsniveau noteres før nedkørsel og sammenlignes med den tilsvarende værdi efter opkørsel. Hvis der er uacceptabel stor forskel mellem de to værdier skal eventuelle fejlkilder undersøges og elimineres. Mulige fejlkilder kan for eksempel være belægning af mudder på logkabel eller dybdetællerens målehjul og/eller tape eller gummibånd på en del af kablet. Hvad der er en uacceptabel stor forskel må aftales individuelt fra opgave til opgave, da der for forskellige typer af undersøgelser kan være forskellig behov for nøjagtighed. Endvidere kan der være forskel på mulig nøjagtighed for forskellige udstyr og for det enkelte udstyr afhængig af hvor dyb en boring er.

For alle sonder som optager naturlig gamma skal der udføres et indbyrdes krydscheck mellem naturlig gamma kurverne med henblik på den vertikale kontrol af de registrerede logdata fra de enkelte sonder.

3.3 Naturlig gamma

Formationens naturlige gammastråling er et resultat af henfald af de radioaktive grundstoffer Uran (U), Thorium (Th) og Kalium (K), som findes i varierende mængder afhængig af lithologi. Henfaldet af radioaktive grundstoffer i jorden udviser statistisk variation. For at opnå en pålidelig og brugbar log, er det derfor nødvendigt at køre sonden med meget lav hastighed. Der stilles således krav om, at den sonde, hvorfra man ønsker at benytte kurven for naturlig gamma i det endelige logresultat (de fleste sondetyper indeholder en naturlig gamma-detektor for indbyrdes dybdekontrol af de enkelte logs) køres med en hastighed på maksimalt 3 m/min.

Naturlig gamma kan måles i både luft- og vandfyldte borehuller samt gennem forerør af både stål og plastik. Hulrum og fyldmateriale i forbindelse med gruskastning og/eller etablering af lerspærre mellem borehulsvæggen og filter- eller forerør kan imidlertid påvirke målingerne og forringe/forhindre tolkningen af den geologiske lagfølge. Ligeledes kan diameteren af en boring påvirke kvaliteten af gammaloggen. Jo større boringsdiameter, jo mindre er andelen af det signal sonden modtager fra formationen og dermed den statistiske sikkerhed. Hvis gammadetektoren er retningsbestemt, kan det endvidere i boringer med stor diameter give anledning til variationer i styrken af den målte naturlige gammastråling som følge af, at sonden kan svinge frem og tilbage mod borehulsvæggen. Hvis gammadetektoren er retningsbestemt, skal der derfor i boringer med en diameter over 10 cm benyttes centraliseringsstyr på den sonde, hvorfra man ønsker at benytte den naturlige gammalog i det endelige logresultat.

Enheden for måling af naturlig gammastråling er ved de fleste af de sonder der anvendes i Danmark CPS (Counts Per Second), De absolutte tælleletal er imidlertid udstyrsspecifikke, og der kan således ikke nødvendigvis foretages en kvantitativ sammenligning af tælleletal optaget med forskellige sonder, men kun en relativ sammenligning af variationsmønsteret.

Inden for oliesektoren anvender man enheden API (American Petroleum Institute) gamma ray unit baseret på kalibrering af en given sondes tælleantal i en testbrønd i Houston, Texas. Dette giver blandt andet mulighed for, under visse forudsætninger, at kunne beregne lerindholdet i bestemte typer sedimentter.

3.4 Spektral gamma

Ved spektral gamma logging registreres den naturlige gammastråling fra de tre radioaktive isotoper Uran (U), Thorium (Th) og Kalium (K), hver for sig. Udover de forhold som er beskrevet for henfald af radioaktive grundstoffer i jorden under naturlig gamma i afsnit 3.3 herover, måles ved spektral gamma logging kun i bestemte energivinduer. Det betyder, at strålingsintensiteten er meget lav, og at logginghastigheden derfor også skal være meget lav. Som udgangspunkt må logginghastigheden ikke være højere end 2 m/min., men det anbefales, afhængig af formålet med undersøgelsen, eventuelt at aftale endnu lavere logginghastighed.

Medmindre andet er aftalt, afrapporteres spektral gamma logkurverne som udgangspunkt i ppm for Uran og Thorium og i % af den samlede stråling for Kalium, mens den samlede naturlige gammastråling afrapporteres i CPS (se også afsnit 3.3 herover).

3.5 Normal resistivitet

Konventionel resistivitet (enhed Ohm-m) bestemmes med sonder med fire elektroder analogt til traditionelle geoelektriske undersøgelser på terrænoverfladen. Der findes to typer, hvoraf den ene har en måle-elektrode og en strøm-elektrode nede i boringen og samtidig et tilsvarende elektrodensæt ved jordoverfladen (Normal elektrode-konfiguration). Den anden type har to måle-elektroder og en strøm-elektrode nede i boringen og den anden strøm-elektrode ved terræn (Lateral elektrode-konfiguration). Begge typer anvendes derfor normalt kun i åbne borer og kan kun måle under vandspejlet. I filtersatte borer vil man dog også opnå et respons fra formationen gennem slidserne i filterstrækningen. Målingerne kan således benyttes til lokalisering af filterintervaller, men giver ikke brugbare resistivitetssinformationer. I forede sektioner af en boring vil man slet ikke opnå et respons fra formationen.

Tilstedeværelsen af stålforerør i toppen af en boring vil påvirke de sidste meter af målingerne i den åbne del af boringen op mod stålforingen. Ikke brugbare data skal fjernes i forbindelse med afrapporteringen.

Det er vigtigt, at overflade-elektroderne placeres med god kontakt i fortrinsvis våd eller fugtig jord, og at de placeres mindst 10 m væk fra borehullet, og i tilfældet med 2 overflade-elektroder en indbyrdes afstand på 20 m.

3.6 Fokuseret resistivitet

Fokuseret resistivitet (enhed Ohm-m) måles med en sonde med et specielt elektrodearrangement. Den anvendes normalt kun i åbne borer og kan kun måle under vandspejlet. I filtersatte borer vil man også opnå et respons fra formationen gennem slidserne i filterstrækningen. Målingerne kan således benyttes til lokalisering af filterintervaller, men giver ikke nødvendigvis brugbare resistivitetsinformationer. Blandt andet har sondens elektrodeafstand betydning for, i hvor høj grad målingerne påvirkes af filterrøret, ligesom slidsernes størrelse og fordeling har en betydning. Generelt gælder, at jo mindre sondens elektrodeafstand er, jo mere påvirkes målingerne af forholdene i borehullet tættest på sonden. I forede sektioner af en boring vil man slet ikke opnå et respons fra formationen.

Tilstedeværelsen af stålførerør i toppen af en boring vil påvirke de sidste meter af målingerne i den åbne del af boringen op mod stålforingen. Ikke brugbare data skal fjernes i forbindelse med afrapporteringen.

Hvis sonden har en overflade-elektrode, er det vigtigt at denne placeres med god kontakt i fortrinsvis våd eller fugtig jord, og mindst 10 m væk fra borehullet.

For sonder som ikke har en overflade-elektrode, skal det sikres, at anvisninger fra producenten om eventuel afskærmning af direkte elektrisk forbindelse mellem det ydre af sonden og de første meter af selve loggingkablet overholdes. Det gøres dels ved isolering af loggingkablet, og dels ved at omvikle overgangen fra sonde til den isolerede del af kablet med vandfast tape. Ved sonder med en sådan isolering på de første meter af loggingkablet, vil måledata først være repræsentative og brugbare i en afstand under vandspejlet og/eller bund af stålforing, som svarer til længden af den isolerede del af kablet. Igen skal ikke brugbare data skal fjernes i forbindelse med afrapporteringen.

3.7 Single point resistance

Single point resistance-sonden måler modstanden (enhed Ohm) mellem en elektrode på sonden og en fast reference-elektrode på overfladen. Den kan kun måle i den åbne eller filtersatte sektion og kun under vandspejlet. Det er vigtigt, at overflade-elektroden placeres med god kontakt i fortrinsvis våd eller fugtig jord, og afstanden fra borehullet til reference-elektroden skal være mindst 10 m.

3.8 Selvpotentiale (SP)

Selvpotentiale (SP) sonden måler det naturlige jævnstrømspotentiale (enhed mV) mellem en elektrode på sonden og en fast reference-elektrode på overfladen. Den kan kun måle i den åbne eller filtersatte sektion og kun under vandspejlet. Sonden bør kun anvendes, hvis væsken i boringen udgøres af boremudder. I borer med formationsvand giver den ikke brugbare data, idet der kun vil kunne opstå elektrokemiske selvpotentialer, hvis der er væsentlige kemiske forskelle imellem væsken i boringen og porevandet i formationen.

Det er vigtigt at overflade-elektroden placeres med god kontakt i fortrinsvis våd eller fugtig jord. Afstanden fra borehullet til reference-elektroden skal være mindst 10 m.

3.9 Elektromagnetisk induktion

Elektromagnetisk induktion anvendes til bestemmelse af formationens ledningsevne (enhed mS/m) i både vand- og luftfyldte borehuller, samt i såvel åbne som forede/filtersatte sektioner, så længe filter eller forerør ikke består af elektrisk ledende materiale. Al tilstedeværelse af elektrisk ledende materiale (f.eks. stål casing og filterstyr af metal osv.) vil påvirke målingerne i det pågældende interval. Ikke brugbare data skal fjernes i forbindelse med rapporteringen, inklusive peaks forårsaget af metalstyr.

Hulrum og fyldmateriale i forbindelse med gruskastning og/eller etablering af lerspærre mellem borehulsvæggen og filter- eller forerør kan påvirke det målte respons.

Der skal anvendes centraliseringsstyr (af ikke-elektrisk ledende materiale) ved kørsel af induktionssonde.

3.10 Neutron-neutron porøsitet

Sonder til porøsitetmålinger benytter en aktiv neutronkilde. Neutronstrålingen har en høj gennemtrængelighed af de fleste materialer, og der kan måles gennem fore- og filterrør af både plastic og stål. Dog skal man være opmærksom på, at hulrum og fyldmateriale i forbindelse med gruskastning og/eller etablering af lerspærre mellem borehulsvæggen og filter- eller forerør kan påvirke det målte respons, ligesom klorid i saltvand og i PVC rør også påvirker det målte respons.

Normalt vil en porøsitetssonde være kalibreret til at omsætte de direkte målinger til porøsitet i procent, men der findes udstyr, som ikke automatisk foretager denne omsætning. I så fald vil enheden typisk være CPS (Counts Per Second), og målingerne kun give information om de relative variationer af porøsiteten og ikke absolutte værdier. Varierende borehulsdiameter vil påvirke kvaliteten af en porøsitetsslog, som ikke er diameter-kompenseret, dvs. hvis den kun har én receiver.

Den relativt kraftige stråling fra neutronkilden kan aktivere/stimulere lerminerale i formationen til øget naturlig gammastråling, hvis sonden køres for langsomt eller hænger stille. Som regel køres også andre sonder, som indeholder naturlig gamma, og den naturlige gammalog der afrapporteres for en boring, skal derfor stamme fra en af disse og skal altid være kørt før porøsitetssonden. Endvidere er det vigtigt, at porøsitetssonden køres med de foreskrevne 6 m/min. og det skal undgås, at porøsitetssonden hænger stille f.eks. i toppen eller bunden af boringen mellem kørsler, da det vil kunne øge gammastrålingen og således ødelægge mulighederne for at optage en retvisende naturlig gammalog i nogen tid efter.

Ved brug af en neutronkilde skal alle forskrifter for transport, anvendelse og opbevaring af radioaktive kilder fra Statens Institut for Strålehygiejne (SIS) overholdes. Det udførende

firma skal have udpeget en ansvarlig for sikkerheden i forbindelse med brug af radioaktive kilder, som har gennemgået de krævede sikkerhedskurser. Endvidere skal loggingoperatøren have gennemgået en grundig instruktion fra den sikkerhedsansvarlige omkring sikkerheden i forbindelse med brug af radioaktive kilder. Forskrifter for afspærring af arbejdsområdet og sikkerhedsafstande til offentligt tilgængelige arealer skal overholdes, ligesom loggingoperatører skal bære det af SIS krævede sikkerhedsudstyr i form af blandt andet personlig målefilm til registrering af radioaktiv stråling samt audiovisuelle alarmer i tilfælde af overskridelse af grænseværdier for strålingsniveau. I tilfælde af uheld, som involverer radioaktiv stråling, skal SIS altid kontaktes, ligesom opdragsgiveren og egen sikkerhedsansvarlige skal kontaktes.

3.11 Gamma-gamma densitet

Sonder til densitetsmålinger benytter en aktiv gammakilde og er som regel konstrueret med retningsbestemte sensorer, der skal køre tæt til borehulsvæggen. Det gøres ved hjælp af en kaliperarm, som presser den rigtige side af sonden ind mod væggen, og samtidig måler diameteren af borehullet. Det vil sige, at længden af kaliperarmen sætter begrænsningen for, i hvor stor en diameter et givent udstyr kan benyttes. Hvis kaliperarmen ikke er lang nok til at presse sonden ind mod væggen, kan der ikke opnås brugbare målinger. En indikator på, at det er tilfældet, kan være, at den samtidig målte logkurve for borehulsdiameteren viser en fast konstant værdi svarende til kaliperarmens rækkevidde. I sådanne intervaller skal densitetsdata fjernes i forbindelse med afrapporteringen. Der kan ikke udføres brugbare densitetsmålinger gennem forerør eller filterrør af hverken plastic eller stål.

Normalt vil en densitetssonde være kalibreret til at omsætte de direkte målinger til densitet i g/cm^3 , men der findes udstyr, som ikke automatisk foretager denne omsætning. I så fald vil enheden typisk være CPS (Counts Per Second), og målingerne kun give information om de relative variationer af densiteten og ikke absolutte værdier. Varierende borehulsdiameter vil påvirke kvaliteten af en densitetslog, som ikke er diameter kompenseret, dvs. hvis den kun har én receiver.

Ved brug af en gammakilde skal alle forskrifter for transport, anvendelse og opbevaring af radioaktive kilder fra Statens Institut for Strålehygiejne (SIS) overholdes. Det udførende firma skal have udpeget en ansvarlig for sikkerheden i forbindelse med brug af radioaktive kilder, som har gennemgået de krævede sikkerhedskurser. Endvidere skal loggingoperatøren have gennemgået en grundig instruktion fra den sikkerhedsansvarlige omkring sikkerheden i forbindelse med brug af radioaktive kilder. Forskrifter for afspærring af arbejdsområdet og sikkerhedsafstande til offentligt tilgængelige arealer skal overholdes, ligesom loggingoperatører skal bære det af SIS krævede sikkerhedsudstyr i form af blandt andet personlig målefilm til registrering af radioaktiv stråling samt audiovisuelle alarmer i tilfælde af overskridelse af grænseværdier for strålingsniveau. I tilfælde af uheld, som involverer radioaktiv stråling, skal SIS altid kontaktes, ligesom opdragsgiveren og egen sikkerhedsansvarlige skal kontaktes.

3.12 Borehulsvæskens temperatur og ledningsevne

Når en sonde køres ned gennem et borehul, forstyrres den ligevægt, som har indstillet sig i borehulsvæsken. For at sikre, at der måles på en stabil væskesøjle i ligevægt, skal sonden, som måler borehulsvæskens temperatur og ledningsevne, derfor altid køres som den første i en boring. Endvidere skal boringen have været i ro (dvs. f.eks. uden pumpning eller borearbejde) i minimum 12 timer (f.eks. natten over), før der logges. For at måle på en uforstyrret væskesøjle, skal det første nedadgående log-run anvendes. Ved at anvende første nedadgående log-run undgås også (hvis sensorerne sidder nederst i sonden), at slam i bunden af borehullet sætter sig fast og påvirker måleresultaterne på et opadgående log-run.

Det kan, af praktiske årsager og hvis det aftales særskilt, besluttes ikke at overholde kravet om 12 timers stilstand i en boring forud for måling af væskens temperatur og ledningsevne. I så fald skal det angives i rapporten, at målingerne ikke er foretaget i en boring i ro, og at man skal være opmærksom på, at de målte variationer kan være påvirkede af pumpe- eller boreaktivitet i boringen i større eller mindre grad, afhængig af hvor længe boringen har stået i ro.

Borehulsvæskens temperatur og ledningsevne kan med fordel også måles under pumpning, hvilket giver information om eventuelle forskelle i temperatur og ledningsevne for vand fra de enkelte indstrømningszoner i boringen. Målinger af borehulsvæskens temperatur og ledningsevne under pumpning er ofte særdeles nyttige i forbindelse med tolkning af flowlogs, og vil ofte være mere følsomme for ganske svage indstrømningszoner, end flowlogs optaget med en propel flowsonde.

Elektrisk ledningsevne angives normalt i enheden mS/m og temperatur i °C. Ledningsevnen afhænger af temperaturen, og højere temperatur medfører en større ledningsevne. Den elektriske ledningsevne af borehulsvæsken ved den aktuelle temperatur kan sammen med formationsresistiviteten eller formationsledningsevnen benyttes til beregning af Formationsfaktoren (Archie, 1942).

Fordi den elektriske ledningsevne afhænger af temperaturen, er det i nogle sammenhænge standard i forbindelse med måling/angivelse af en væskes ledningsevne at omregne den målte ledningsevne til elektrisk ledningsevne ved 25 °C. Det kan aftales særskilt, at denne beregning ønskes foretaget i forbindelse med afrapporteringen, men ledningsevnen ved den aktuelle temperatur skal også altid afrapporteres.

3.13 Kaliperlog

Det skal sikres, at kaliperarmen (eller –armene, hvis sonden har flere) er tilstrækkelig lang til at dække de største diametervariationer i boringen. Som udgangspunkt skal Kaliperarmens rækkevidde være mindst en halv gang større end den diameter, boringen er boret i (bit size). En indikator på, at kaliperarmen er for kort kan være, at kurven for borehulsdiameteren viser en fast konstant værdi svarende til kaliperarmens rækkevidde.

Kaliperloggen er især vigtig i åbne borer for at kunne vurdere kvaliteten af øvrige logs i forbindelse med eventuelle store diametervariationer. Den er tillige nødvendig, hvis der skal udføres korrektion af flowlog for diametervariationer i åbne borer. Kaliperloggen rapporteres normalt i cm.

3.14 Flowlog

Før proceduren for flowlogging påbegyndes, er det vigtigt, at boringen er i ro. Der skal derfor være gået mindst en halv time fra der har været pumpet eller udført borearbejde i boringen, og til arbejdet med flowlogging (dvs. kalibrering og basisflowlog) påbegyndes. Det er endvidere vigtigt, at pumpning fra eventuelle nærliggende indvindingsboringer eller grundvandssænkingsboringer holdes konstant under logging arbejdet.

Som det første måles niveauet for rovandsspejlet i boringen.

Herefter skal flowsonden med den aktuelt valgte propelstørrelse kalibreres til det aktuelle borehul og til den aktuelle mekaniske træghed i propellens omdrejninger (slitage og kalkudfældninger kan give ændringer gennem tiden). Kalibreringen består i etablering af sammenhængen mellem propellens omdrejningshastighed og strømningshastigheden i den aktuelle boring.

På sin vej ned gennem boringen fortrænger sonden en vis mængde vand, hvilket kan give anledning til en tilsyneladende flowhastighed i hullet (stempeeffekt). Hvis boringens diameter er uden store variationer, tages der højde for stempeeffekten gennem kalibreringen af sonden i det aktuelle borehul, mens variationer i diameteren vil give anledning til variationer i den tilsyneladende flowhastighed forårsaget af stempeeffekten. Ved borer med ændringer i diameteren skal kalibreringen således foretages i den del af boringen, hvor diameteren er mest repræsentativ. I praksis foretages kalibreringen ved at variere sondens nedsænkingshastighed og aflæse de tilhørende tælletal eller omdrejningstal. Moderne digitale sonder optager sammen med propellens omdrejningstal sondens nedsænkingshastighed.

Efter kalibrering optages en basis flowlog uden pumpning ned gennem hele boringen med en hastighed på 6 m/min. svarende til 0,1 m/s. Basis flowloggen skal vise, om boringen er i ro, når der ikke pumpes, eller om der forekommer intern strømning mellem permeable horisonter med forskelligt trykniveau. Endvidere vil basis flowloggen vise eventuelle variationer i stempeeffekten forårsaget af diametervariationer i boringen.

Efter optagelse af basis flowloggen påbegyndes pumpning i boringen. Selve flowloggen skal optages ved stabil pumpeydelse, dvs. det er vigtigt, at pumpeydelsen monitoreres enten med et flowmeter på afgangsslangen fra pumpen, eller ved opfyldning af en beholder med kendt volumen kombineret med tidtagning. Desuden må flowloggen ikke optages før de horisonter, som kan aktiveres ved den givne pumpeydelse, er aktiveret, og ændringen i afsækning er minimal. Normalt vil der indstille sig en stabil pumpeydelse (dvs. at afsækningen følger en ret linie i semi-log), allerede efter få minutter og efter yderligere et stykke tid (typisk 10-30 minutter, men helt afhængig af de lokale hydrauliske egenskaber) vil ændringen i afsækningen være meget lille. Som tommelfingerregel kan anvendes, at

flowloggen først må udføres, når ændringen i afsænkningen af pumpevandspejlet er mindre end 1 cm pr. minut.

Når ændringen i afsænkningen er minimal, noteres pumpevandspejlet, og selve flowloggen udføres med en hastighed på 6 m/min., svarende til 0,1 m/s. En flowlog kan først godkendes, når der er optaget 2 flowlogs, som ved en visuel inspektion er ens over hele logstrækningen. Det er desuden vigtigt, at de optagne flowlogs starter 3-4 meter over bunden af forerøret/starten af filterstrækningen for at sikre, at der optages et referenceniveau over indstrømningshorisonterne svarende til den strømningshastighed, som genereres ved netop den aktuelle pumpeydelse, diameter og logginghastighed. Det teoretiske referenceniveau skal således beregnes og sammenlignes med det målte som en del af kvalitetssikringen af kalibreringen. Hvis der forekommer indstrømning over det niveau, hvor flowloggen starter, er dette check af kalibreringen ikke mulig, og en vurdering af størrelsen af sådan indstrømning vil være meget usikker. Efter flowlogging og inden pumpen slukkes, måles og noteres pumpevandspejlet igen.

Flowhastigheden i borehullet afhænger dels af den ydelse, der pumpes med, og dels af diameteren af borehullet. Jo større diameter, jo større ydelse skal der pumpes med, for at opnå en given flowhastighed. Kvaliteten af en flowlog øges med øget pumpeydelse, idet muligheden for at detektere selv små indstrømninger øges. Som retningslinie bør den maksimale flowhastighed i boringen være mindst halvt så stor som sondens egenhastighed. Det betyder, at i en boring med en diameter på 20 cm og en logging hastighed på 6 m/min. skal der pumpes med en ydelse på mindst ca. 5,7 m³/time. Det skal altid begrundes, hvis der er anvendt lavere pumpeydelse end svarende til denne retningslinie. Hvis denne mindste ydelse ikke er praktisk mulig som følge af for stor afsænkning, kan logginghastigheden eventuelt nedsættes til 4 m/min. Derved vil mindre indstrømninger bidrage relativt mere til den målte flowhastighed i forhold til den tilsyneladende flowhastighed, som inkluderer sondens egenhastighed.

Normalt optages flowlogs oppefra og ned og med oppumpning af vand. Dog kan flowlogs i nogle tilfælde med fordel optages nedefra og op og med injicering af vand i stedet for oppumpning (forudsat at flowsonden også kan måle nedadgående strømning). Det gælder f.eks. hvis ydelsen i en boring er ringe, og vandspejlet ved selv lave pumpeydelser falder så meget, at der ikke kan opnås information om de øverste indstrømningshorisonter. I åbne kalkboringer med mange fremspring ("hylder") kan det være en mulighed, for bedre at kunne holde logginghastigheden konstant.

Hvis en flowlog kun viser indstrømning i de øverste få meter af en boring, skyldes det sandsynligvis, at vandføringen i de øverste lag er så god, at man med den anvendte pumpeydelse ikke kan aktivere dybere niveauer. I et sådant tilfælde skal der derfor pumpes med højere ydelse for at aktivere resten af boringen og få information om dybere indstrømningshorisonter. Som regel vil en vurdering af de øvrige logs udført i boringen kunne indikere, om der kan forventes vandførende horisonter dybere i boringen (f.eks. ud fra en tolkning af den geologiske lagfølge). Det anbefales, at der altid på forhånd aftales en minimum pumpeydelse i forbindelse med flowlogging. Temperatur- og ledningsevnelogs udført under pumpning er typisk mere følsomme for ganske svage indstrømningszoner end flowlogs

optaget med en propel flowsonde og vil således ofte kunne bibringe supplerende information.

I forbindelse med afrapporteringen skal den resulterende basis flowlog og flowlog være korrigeret for sondens egenhastighed. Endvidere kan det aftales, at der beregnes og leveres en flowlog korrigeret for diametervariationer. For flowlogs optaget i åbne borer udføres denne beregning ved anvendelse af den aktuelle pumpeydelse og en kaliperlog, og i filtersatte borer ved anvendelse af den aktuelle pumpeydelse og filterrørets indre diameter.

3.15 Soniclog

Soniclogs kan kun måles i åbne borer. Ved udførelse af soniclogs skal der som udgangspunkt benyttes centraliseringsstyr på sonden. Hvis ikke sonden er tilstrækkeligt godt centraliseret, kan det resultere i fejlbehæftede data forårsaget af fejlagtige auto-picks af førsteindsatser på grund af lave amplituder og støjfyldte data. Fejlbehæftede data skal fjernes i forbindelse med afrapporteringen.

Hvis boringsdiameteren er meget stor, kan det forekomme, at signalet fra sonicsonden er for svagt til at nå ud i formationen. Det afhænger af den enkelte sondetype og styrken af dens signal, hvilken maksimal boringsdiameter den kan benyttes i. En indikator på at signalet ikke trænger ud i formationen vil være, at sonden viser en nogenlunde konstant lyd hastighed svarende til lyd hastigheden i vandet/boremudderet (ca. 1500 m/s).

Hastigheden, hvormed en sonicsonde kan køres, afhænger af udstyret, sampleafstanden og det optagevindue, som er nødvendigt i forhold til de lokale lyd hastigheder (der skal være tid til at udsende og registrere signalet). Som udgangspunkt skal soniclogs optages med en sampleafstand på 5 cm eller bedre og logginghastigheden tilpasses hertil. Dog må hastigheden ikke overstige 6 m/min.

Resultatet af en soniclog rapporteres som enten en transittid-log med enhed $\mu\text{sek/m}$ eller som lyd hastighed med enhed m/sek. Det kan eventuelt særskilt aftales, at der også beregnes og leveres en integreret hastighedslog. Endvidere kan en soniclog under visse forudsætninger også omregnes til en porøsitet-log. Varierende borehulsdiameter vil påvirke kvaliteten af en soniclog, som ikke er diameterkompenseret, dvs. hvis den kun har ét sæt transmitter og receiver.

3.16 Videoinspektion

Formålet med videoinspektion er ofte kontrol af udbygning/tilstand af eksisterende/nyetablerede borer, men kan også være geologisk karakterisering.

Ved udførelse af videoinspektion skal der som udgangspunkt benyttes udstyr med både et fremadrettet kamera og et sidevendt kamera, som kan roteres 360 grader. Hvis der findes svæv i vandet, skal der som udgangspunkt benyttes et kamera med en lyskilde, der giver

indirekte belysning. Videoinspektion skal udføres under forhold med så god sigt i boringen som muligt. Det vil sige ikke umiddelbart efter borearbejde eller pumpning, og som minimum skal en boring stå i ro 12 timer (f.eks. natten over) forud for videoinspektion. Videoinspektion kan ikke udføres i borehuller stabiliseret med boremudder. Der skal benyttes kamera og lyssætning, som passer til boringens diameter. Nedføringshastigheden er operatørbestemt afhængig af lys og sigt i boringen. Data skal leveres som digitale videofiler, eventuelt suppleret med digitale billedfiler.

3.17 Optisk televiewer

Formålet med udførelse af optisk televiewer kan være både kontrol af udbygning/tilstand af eksisterende/nyetablerede boringer og geologisk karakterisering, f.eks. kortlægning af sprækker og aflejningsstrukturer.

Ved optagelse med optisk televiewer skal der benyttes centraliseringsstyr, og det skal sikres, at sonden og dens lyssætning passer til boringens diameter. Optisk televiewer skal udføres under forhold med så god sigt i boringen som muligt. Det vil sige ikke umiddelbart efter borearbejde eller pumpning, og som minimum skal en boring stå i ro 12 timer (f.eks. natten over) forud for kørsel med sonden. Optisk televiewer kan ikke udføres i borehuller stabiliseret med boremudder. Logginghastigheden afhænger af det anvendte udstyr, men skal tilpasses, så der opnås kvadratiske pixels og en opløsning på 1 x 1 mm eller bedre. Data skal leveres som 360° digitale billedfiler orienteret i forhold til magnetisk nord.

3.18 Akustisk televiewer

Formålene med optagelse af akustisk televiewer kan være mange, f.eks.: kontrol af filter- og/eller forerør, kortlægning og karakterisering af sprækker og aflejningsstrukturer, diameter og form af borehullet, væggenes ruhed og hårdhed.

Ved optagelse med akustisk televiewer skal der benyttes centraliseringsstyr. Dårlig centralisering af sonden vil medføre misvisende information om boringens tværsnit og borehulsvæggens reflektivitet. Akustisk televiewer kan, i modsætning til videoinspektion og optisk televiewer, godt udføres i borehuller stabiliseret med boremudder. Logginghastigheden afhænger af det anvendte udstyr, men skal tilpasses, så der opnås kvadratiske pixels og en opløsning på 2 x 2 mm eller bedre. Data skal leveres som logkurver og 360° digitale billedfiler orienteret i forhold til magnetisk nord.

3.19 VSP

Formålet med udførelse af VSP målinger er at opnå information om de seismiske hastigheder for P- og evt. S-bølger til geologisk karakterisering og korrelation med overfladeseismik. VSP målinger kan udføres i både åbne og filtersatte borehuller. Tilstedeværelsen af stålforerør vil dog typisk påvirke målingerne.

Energikilde til udførelse af vertikale seismiske profiler kan være hammer og hammerplade, detonator, detonator og dynamit eller seismisk vibrator. Hvis der anvendes detonator eller detonator og dynamit skal de bringes til sprængning i et nedboret vandfyldt rør.

De seismiske signaler kan registreres med hydrofoner eller borehulsgeofoner, og data optages med et digitalt seismisk optagesystem. Borehulsgeofonerne kan være enten 1-komponente (dvs. måle vertikale bevægelser) eller 3-komponente (dvs. måle vertikale bevægelser og horisontale bevægelser i 2 retninger).

Hvis en boring er mindre end 50 m dyb, anbefales det at VSP'en optages med en afstand på 0,5 m mellem de enkelte registreringer. Ved dybere boringer anbefales det at VSP'en optages med en afstand på 1,0 m mellem de enkelte registreringer.

Ved udførelse af VSP skal der altid anvendes en referencehydrofon eller -geofon siddende i en fast position under alle registreringer, som efterfølgende kan anvendes til eventuelle tidslige korrektioner af de registrerede målinger.

Det seismiske optagesystem skal altid være jordet under udførelse af VSP målinger.

4. Afrapportering

4.1 Papirrapport

Efter udførelse af logging udarbejdes der, medmindre andet aftales, en skriftlig rapport, der som minimum indeholder følgende:

- Formålet med undersøgelsen
- Beskrivelse af arbejde udført i felten i forbindelse med dataindsamlingen
- Beskrivelse af efterfølgende tolkning og processeringsarbejde
- Beskrivelse af den løbende kvalitetssikring i felten og på kontoret
- Beskrivelse af de anvendte logtyper
- Plot af de endelige processerede logs og en situationsplan
- Informationer om boringsudbygning/boringsafslutning
- Geologisk beskrivelse baseret på boreprøver (brøndborer/GEUS/andre)
- Geologisk tolkning baseret på logs og eksisterende tekniske og geologiske boringsoplysninger
- Feltplot af gældende logs samt tilhørende repeatlogs

Rapporten kan tillige indeholde vurdering af boringens tekniske status, indstrømningsfordeling, vandkvalitet vurderet ud fra ledningsevne, densitets- og porøsitetsforhold, stratigrafisk korrelation samt andre specielle vurderinger, alt afhængig af formålet med undersøgelsen.

Situationsplanen skal vise beliggenheden af den eller de loggede boringer.

Logplottet skal, udover logkurverne, indeholde praktiske/tekniske oplysninger om boringen/arbejdet. Mængden af supplerende oplysninger kan fastsættes i samråd med opdragsgiveren, men i det omfang de er relevante bør følgende oplysninger inkluderes:

- DGU nr.
- Boringsnavn
- Lokaltet
- Dato for udførelse af loggingarbejde
- Referencepunkt for målinger
- Terrænkote og højdesystem
- Koordinater samt projektion og datum
- Brøndborer
- Boremetode
- Dybde ifølge brøndborer
- Bund af boring ifølge logging
- Boringsdiameter
- Boringsvæske

- Forerør (diameter, strækning)
- Udbygning (filterintervaller, afpropning)
- Rovandspejl
- Pumpevandspejl ved flowlogging
- Pumpeydelse ved flowlogging
- Navne og enheder for logkurver

Afskæring af ikke brugbare dele af logkurverne

Ikke brugbare dele af logkurver, som f.eks. sektioner af induktionslogs, eller resistivtetslogs, som er påvirket af tilstedeværelsen af metal i boringen, skal fjernes i forbindelse med afrapporteringen af udført borehulslogging.

Filtrering

Logs med relativt store statistiske variationer som naturlig gamma, porøsitet og densitet samt f.eks. sonic og flowlog skal som udgangspunkt filtreres inden præsentation. Som anbefaling foreslås et 24 cm glidende middelfilter. For øvrige logs foreslås som anbefaling et 10 cm glidende middelfilter, men behovet for filtrering afhænger af sample-interval og støjniveau. De anvendte filterparametre skal altid angives, og under alle omstændigheder er det vigtigt, at data ikke filtreres så hårdt, at signifikante detaljer går tabt.

4.2 Digitale data

Udover den skriftlige afrapportering skal rapporten og data leveres digitalt. Den skriftlige rapport leveres som pdf-fil og logdata leveres i LAS-format. Det aftales særskilt, hvorvidt LAS-filen skal indeholde logkurver i dybder under terræn eller i koter samt om logdata skal være filtrerede eller ufiltrerede. Det anbefales, at logkurverne i LAS-filen skal svare til de endelige processerede og filtrerede data på logplottet i den skriftlige rapport.

Logdata indsamlet i forbindelse med den afgiftsfinansierede grundvandskortlægning skal indberettes til GERDA databasen i LAS-format og med en præsentationsfil i pdf-format. LAS-filen skal indeholde de endelige logs præsenteret i den skriftlige rapport, men logkurverne skal være ufiltrerede. Hvis enkelte logkurver i LAS-filen er filtrerede, skal filen samtidig indeholde de tilsvarende ufiltrerede logkurver. Indberetningen skal følge forskrifterne for indberetning af loggingdata på GEUS' hjemmeside for GERDA <http://gerda.geus.dk/>.

5. Referencer

Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations. Technical Engineering and Design Guides as adapted from the US Army Corps of Engineers, no. 23. 1995. American Society of Civil Engineers. ASCE Press.

Geofysik og råstforkortlægning. Skov- og Naturstyrelsen, 1987. Råstofkontorets kortlægningsserie 5.

Bai, W. 1990. Geofysisk borehulsmåling logging. Laboratoriet for geoteknik. Ingeniørhøjskolen Horsens Teknikum.

Archie, G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans Am. Inst. Min. Metal and Petr. Eng., 149 pp. 54-62.