

Den spektrale, naturlige gamma-log

MICHAEL ENGELL-JENSEN



Engell-Jensen, M.: Den spektrale, naturlige gamma-log. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1980*, side 47-56, København, 25. januar 1981.

Den naturligt forekommende γ -stråling fra jordlagene udsendes i forbindelse med henfaldet af radioaktive isotoper, hovedsagelig ^{40}K , ^{238}U og ^{232}Th . Den spektrale, naturlige gamma-log er en borehulsmåling af den individuelle γ -stråling fra ^{40}K og fra ^{238}U og ^{232}Th med tilhørende efterkommere. Herved fås oplysninger om koncentrationerne af kalium, uran og thorium i de gennemborede lag. Denne information giver et bedre grundlag for en lithologisk fortolkning i en sedimentær lagserie end oplysningerne fra den traditionelle integrale gamma-log om variationer i den totale γ -strålingsintensitet. Gennem eksempler illustreres den spektrale gamma-logs værdi ved lagbeskrivelsen i den enkelte boring og ved lithostratigrafisk korrelation mellem forskellige borer.

The natural γ -radiation from the layers of the earth is associated with the radioactive decay of isotopes, mainly ^{40}K , ^{238}U , and ^{232}Th . The spectral, natural gamma-ray log is a borehole measurement of the individual γ -radiation from ^{40}K and from ^{238}U and ^{232}Th with daughters. As a result, information about the concentrations of potassium, uranium, and thorium is obtained. This information forms a better basis of a lithological interpretation in sedimentary layers than the information from the traditional integral gamma-ray log on the variations in the intensity of the total γ -radiation. Examples are given which illustrate the value of the spectral gamma-ray log in the description of the individual layers and in lithostratigraphical correlation.

Michael Engell-Jensen, Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks Tekniske Højskole, DK-2800 Lyngby. 2. oktober, 1980.

Opgaven ved de fleste borearbejder er først og fremmest så nøjagtigt som muligt at gøre rede for den geologiske lagfølge, herunder de enkelte lags sammensætning på det sted, hvor der bores. Med henblik herpå kan en analyse af det opborede prøvemateriale suppleres med en eller flere geofysiske borehulsmålinger. Sådanne målinger foretages ved at sænke en målesonde ned i borehullet og registrere værdien af en eller flere fysiske jordlagsparametre som funktion af dybden (fig. 1). Målingerne kan derefter ved en geologisk-geofysisk fortolkning give oplysninger om jordlagenes art, beskaffenhed og sammensætning.

Geofysiske borehulsmålinger omfatter dels konventionelle målemetoder (f.eks. elektriske) og dels nukleare målemetoder baseret på naturlig eller induceret radioaktivitet. En betydningsfuld forskel mellem de to grupper er den, at i borehuller, der er forsynet med forerør, kan – bortset fra lydudbredelsesmålinger – kun anvendes nukleare målemetoder, idet disse alle er baseret på gennemtrængende neutron- eller γ -stråling.

Geofysiske borehulsmålinger er oprindeligt udviklet i forbindelse med dybere undersøgelsesboringer efter olie, gas eller malmforekomster

(Lieberkind 1978, Priisholm & Michelsen 1978). I lighed med mange andre steder i udlandet benyttes geofysiske borehulsmålinger nu også herhjemme, om end stadig i begrænset omfang, ved undersøgelser af kvartære og prækvartære aflejringer, f.eks. i relation til hydrogeologiske eller ingeniørgeologiske opgaver (Klitten & Sørensen 1975, Klitten & Pulawski 1975, Sørensen & Hansen 1977, Sørensen 1978).

En af de mest anvendte geofysiske borehulsmålinger – og den simpleste nukleare – er den integrale, naturlige gamma-log. Ved målingen foretages en kontinuert registrering af den totale intensitet af den naturligt forekommende γ -stråling fra jordlagene som funktion af dybden i borehullet. γ -strålingen udsendes i forbindelse med henfaldet af i det væsentlige tre isotoper, ^{40}K samt ^{238}U og ^{232}Th med tilhørende efterkommere.

I en sedimentær lagserie baseres fortolkningen af den integrale gamma-log på, at ler normalt udsender γ -stråling med større intensitet end sand, der igen som hovedregel er mere radioaktivt end kalk. Endelig er strålingen fra saltbjergarter, bortset fra kalisaltes, i reglen forsvindende.

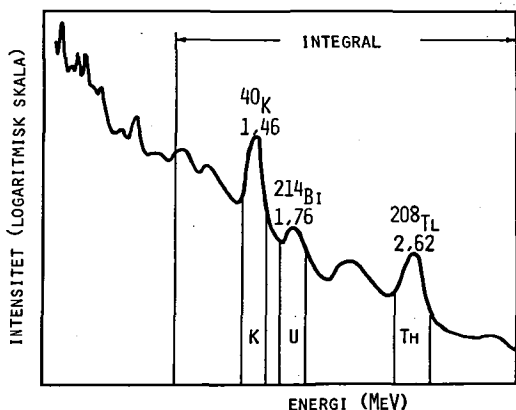


Fig. 2. Måling af den naturlige γ -stråling fra en prøve af mørkgrøn plastisk ler (scintillationsdetektor – 3"×3" cylindrisk NaI(Tl)-krystal) (Engell-Jensen 1979).

Registration of the natural γ -radiation from a sample of dark green plastic clay (scintillation detector – 3 × 3 in. cylindrical NaI(Tl)-crystal) (Engell-Jensen 1979).

streres som kontrol den integrale γ -strålingsintensitet i intervallet markeret med »integral« (integral gamma-log).

I de markerede energibånd er γ -strålingen fra en enkelt isotop særligt fremtrædende. Isotoperne er henholdsvis ^{40}K , ^{214}Bi fra ^{238}U -serien (fig. 3) og ^{208}Tl fra ^{232}Th -serien (fig. 4).

Intensiteten af γ -strålingen fra en enkelt isotop er proportional med isotopens koncentration. Forudsat at såkaldt sekulær ligevægt er til stede i henfaldskæderne, er koncentrationerne af ^{214}Bi og ^{208}Tl proportionale med henholdsvis ^{238}U - og ^{232}Th -koncentrationen i sedimentet.

Sekulær ligevægt i ^{232}Th -serien opnås allerede efter ca. 50 år, hvis henfaldskæden i dette tidsrum lades uforstyrret af fysiske og kemiske processer i det aflejrede sediment (Engell-Jensen 1979). Denne forudsætning vil normalt være opfyldt. I ^{238}U -serien indtræder ligevægt derimod først efter ca. 10^6 år, og hertil kommer, at der kendes flere eksempler på, at geokemiske processer i det aflejrede sediment har forstyrret ligevægten i ^{238}U -serien. Et skift fra reducerende til oxiderende omstændigheder kan føre til opløsning af uran, som herefter kan borttransporteres af porevand i bevægelse. Omvendt kan uran udskilles fra cirkulerende porevand, som passerer igennem et område med et reducerende miljø.

Sekulær ligevægt må således formodes altid at være til stede i ^{232}Th -henfaldskæden, mens lige-

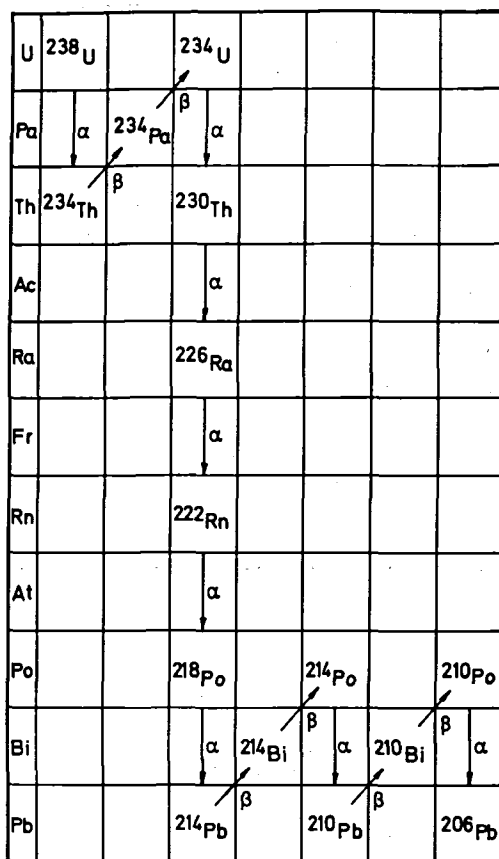


Fig. 3. Hovedlinierne i ^{238}U -henfaldskæden. Hver række svarer til et bestemt atomnummer (Z), hver søjle til et bestemt masetal (A).

The main paths in the ^{238}U decay chain. Each row corresponds to a definite atomic number (Z), each column to a definite mass number (A).

vægt i ^{238}U -serien kun kan forventes med sikkerhed, såfremt sedimentet er prækvartært (ældre end ca. 10^6 år), og såfremt det kan antages, at cirkulerende porevand i sedimentet ikke har forstyrret ligevægten i en periode på mindst 10^6 år tilbage.

Fortolkningsgrundlaget

I forbindelse med forvitringen af jordoverfladens bjergarter udfældes thorium let fra opløsning og udviser en tendens til at koncentreres i residualminerale så som bauxit og lerminerale, hvor bindingen i det væsentlige sker gennem adsorption (fig. 5). I sedimentære bjergarter er thorium således først og fremmest knyttet til lerminerale,

Th	^{232}Th		^{228}Th		
Ac	α	^{228}Ac	α		
Ra	β	^{228}Ra	^{224}Ra		
Fr			α		
Rn			^{220}Rn		
At			α		
Po			^{216}Po	^{212}Po	
Bi		α ~100%	^{212}Bi	β 66.3% α	
Pb			^{212}Pb	β α 33.7%	^{208}Pb
Tl				β	^{208}Tl

Fig. 4. Hovedlinierne i ^{232}Th -henfaldskæden. Hver række svarer til et bestemt atomnummer (Z), hver søjle til et bestemt massetal (A).

The main paths in the ^{232}Th decay chain. Each row corresponds to a definite atomic number (Z), each column to a definite mass number (A).

men findes dog også i mineraler, som er særlig resistente over for forvitring.

Kalium udskilles fra opløsning hovedsagelig ved adsorption i lermineraler fra montmorillonit-gruppen, som derved omdannes til illit. Derudover er kalium i sedimentære bjergarter primært knyttet til mere eller mindre forvitret kalifeldspat og glimmer samt eventuelle forekomster af glaukonit og kalisalte.

Uran oxideres og opløses let og danner uranylionen UO_2^{++} , som i form af komplekse ioner med karbonat, f.eks. $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^-$, er meget bevægelig i naturen. Uran udfældes på ny fra opløsning gennem i det væsentlige tre grupper af processer. For det første reduktion og dannelse af tungtopløselige forbindelser med organisk materiale, for det andet reaktioner med fosfationen PO_4^{3-} og f.eks. Ca (autunit $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), og for det tredje adsorption til fine partikler (ler).

Fordelingen af grundstofferne thorium, kalium og uran i en sedimentær bjergart giver således karakteristiske oplysninger om aflejringens type og sammensætning (Vinogradov 1959:163, Hassan et al. (1975, 1976), Hassan & Al-Maleh 1976). I lerbjergarter varierer thorium-koncentrationen fra ca. 8 til ca. 20 ppm afhængig af lermineralfraktionens størrelse og sammensætning (fig. 5). Kalium-koncentrationen indikerer normalt indholdet af lermineralet illit, i hvilket

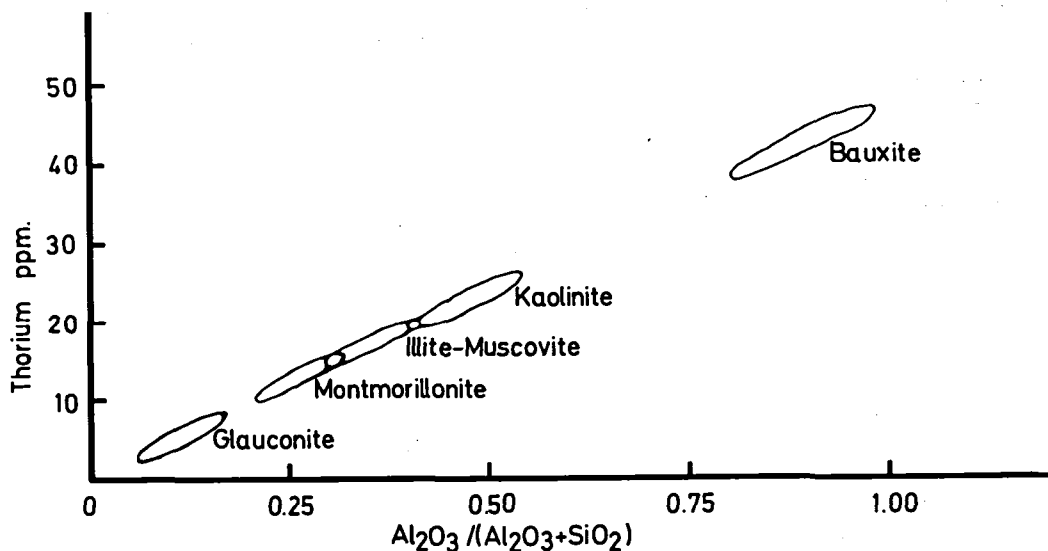


Fig. 5. Variationen af thorium i lermineraler, glaukonit og bauxit (Hassan & Hossin 1975).

Variation of thorium in clay minerals, glauconite, and bauxite (Hassan & Hossin 1975).

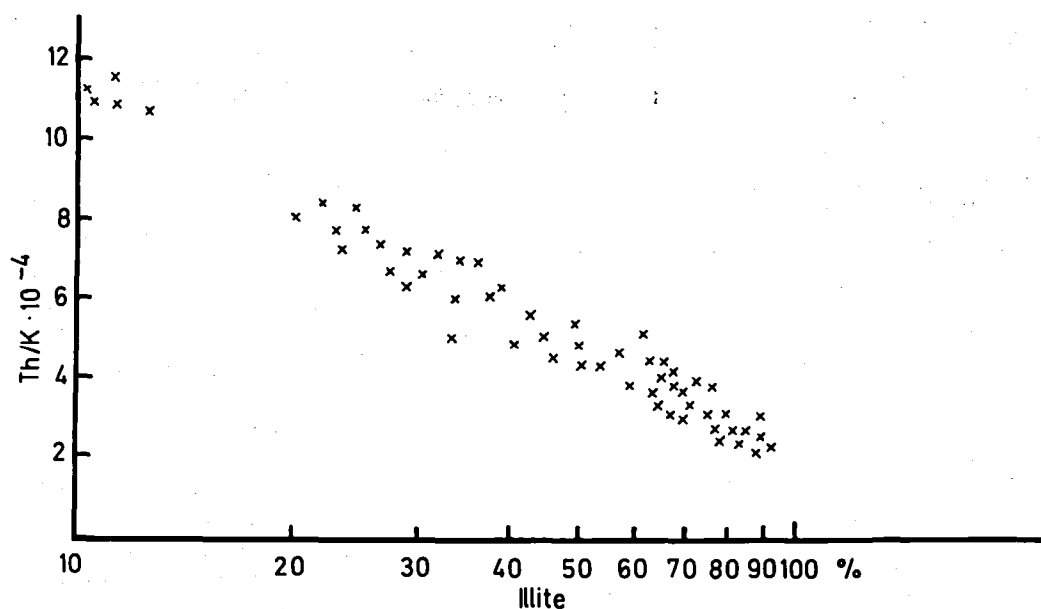


Fig. 6. Th/K-forholdet i lermineralfraktionen som funktion af illit-indholdet (Hassan & Hossin 1975).

Th/K ratio in the clay mineral fraction as a function of the illite content (Hassan & Hossin 1975).

Th/K-forholdet andrager ca. $2 \cdot 10^{-4}$ (fig. 6). Et væsentligt større Th/K-forhold tyder på en betydelig forekomst af lermineraler fra montmorillonit-, kaolinit- og eventuelt chlorit-gruppen, idet disse mineraler ikke indeholder kalium i nævneværdig grad (fig. 5 og 7). Høje koncentrationer af uran, op til over 100 ppm, indicerer horisonter rige på organisk materiale.

I sandaflejringer er koncentrationen af thorium hovedsagelig et udtryk for lerindholdet, men et

vist baggrundsniveau findes i form af thorium i resistente mineraler. Høje koncentrationer af kalium uden tilsvarende høje thorium-koncentrationer skyldes sædvanligvis et stort indhold af ka-lifeldspat, glimmer eller eventuelt glaukonit.

I rene kalkbjergarter er kun uran til stede. Uran-koncentrationer større end 3–4 ppm kan indicere zoner i kalken rige på fosforit og/eller organisk materiale. Et evt. lerindhold viser sig ved, at thorium samt sædvanligvis kalium (i ler-

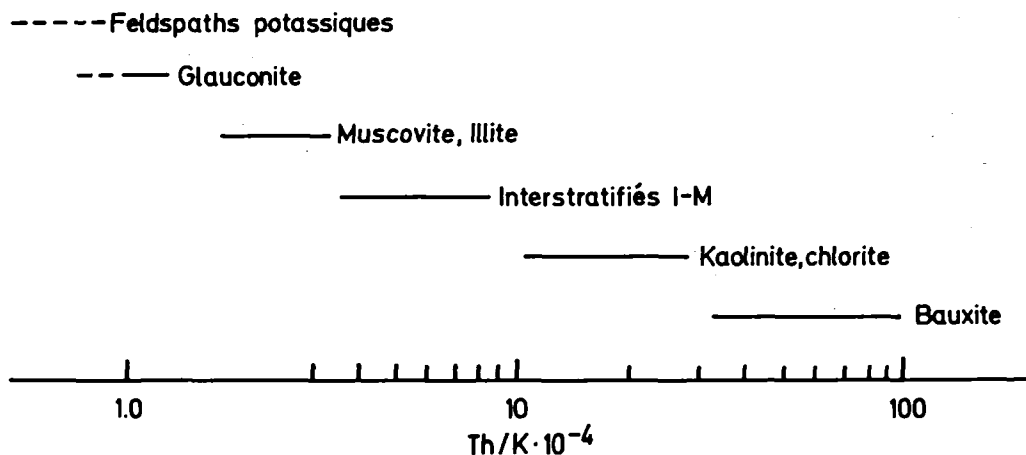


Fig. 7. Variationen af Th/K-forholdet i forskellige mineraler (Hassan & Hossin 1975).

Variation of the Th/K ratio in some minerals (Hassan & Hossin 1975).

mineralet illit) optræder. Kalium forekommer endvidere i mineralet glaukonit, som imidlertid kun indeholder thorium i ringe grad (se fig. 5 og 7). Glaukonit dannes på havbunden på lavt vand og opfattes i almindelighed som en indikator af kystnære aflejringsforhold.

Evaporitter indeholder normalt ikke thorium og uran, mens høje koncentrationer af kalium skyldes forekomsten af kalisalte.

Eksempler

De følgende to eksempler (se fig. 8 og 9) på en spektral, naturlig gamma-log er udført med et måleudstyr, som er udviklet på Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks tekniske Højskole (Engell-Jensen 1979). På det nuværende udviklingstrin er det bl.a. muligt ud fra de tre spektral-kanaler at vurdere størrelsen af ændringer i koncentrationsforholdene mellem kalium, uran og thorium. Derimod kan der endnu kun gives en kvalitativ vurdering af de absolutte koncentrationer af de tre stoffer. Ud fra log-kurverne er der foretaget en lithologisk fortolkning, som diskuteres og sammenlignes dels med den lithologiske tolkning, som den traditionelle integrale gamma-log ville give anledning til, og dels med brøndborerens lagfølgebeskrivelse.

Endelig vises på fig. 10 en litho-stratigrafisk korrelation mellem de to borer. Korrelationen er opstillet på basis af den samlede til rådighed værende information, d.v.s. såvel den spektrale gamma-log som prøvebeskrivelsen udarbejdet af DGU suppleret med oplysningerne fra brøndboreren.

Fig. 8 viser et afsnit af log-kurverne fra et borehul vest for Esrum Sø i Nordsjælland. Den spektrale gamma-log viser øverst et afsnit med lav tællehastighed i Th-kanalen, lav U-tællehastighed og middelstor tællehastighed i K-kanalen. Dette fortolkes som et sandlag med et forsvindende lerindhold og med et vist indhold af kalifeldspat (og/eller glimmer afhængig af de lokale geologiske forhold). Dernæst følger et lag med høj tællehastighed i alle kanaler, altså et lerlag med en betydelig lermineralfraktion, i hvilken det dominerende mineral er illit. I 105,6 m's dybde optræder et tredje hovedmønster, hvor Th- og K-kanalen falder til det hidtil laveste niveau, mens U/Th-forholdet er stort sammenlignet f.eks. med det øvre (lavaktive) sandlag. Dette indikerer en kalkformation. Fra kalkoverfladen til ca. 114 m angiver Th-kurven et lille lerindhold i kalken, og »bulen« i K-kurven fra 110,1–112,2 m uden tilsvarende stigning i Th-indholdet tyder på glaukonit. Endelig forekommer der fra 119,4 m til 125,3 m tre intervaller i kalken, hvor uran-koncentrationen vokser markant, hvilket kan indicere zoner, som er berigede med organisk materiale og/eller fosforit.

En fortolkning baseret alene på den integrale

gamma-log ville have givet de samme hovedlaggrænser, men lagbeskrivelsen ville blive mindre detaljeret og i visse tilfælde usikker. Den integrale tællehastighed kan således være tilnærmelsesvis den samme i sandlag og lerholdig kalk, ligesom man ved sandlag med en relativ høj γ -strålingsaktivitet ikke ud fra den integrale tællehastighed alene kan afgøre, om strålingsniveauet afspejler et lerindhold eller et højt indhold af f.eks. kalifeldspat, glimmer eller glaukonit. Zonerne i kalken, hvor den spektrale gamma-log på fig. 8 viser et forhøjet uran-indhold, afspejler sig også som en forøget tællehastighed i integral-kanalen. Men en integral gamma-log alene ville ikke kunne afgøre, om disse horisonter var udprægede lerhorisonter (Th+K), glaukonitholdige zoner (K) eller horisonter relativt berigede med organisk materiale eller fosforit (U).

Overensstemmelsen mellem log-fortolkningen og oplysningerne fra brøndboreren er god, bortset fra overgangen fra sort ler til grønsandskalk der tydeligt ligger ca. 3 m højere ifølge den spektrale gamma-log. Med hensyn til en identifikation af grønsandskalk i forhold til den underliggende kalk er dette ikke muligt ud fra integral-kanalen. En indikation af grønsandskalk fås derimod ud fra spektral-kanalerne, dels fra K-kanalen som antyder en glaukonitholdig zone og dels ved et mindre U/Th-forhold end i den underliggende kalk.

Fig. 9 viser et afsnit af en log fra et borehul nord for Esrum Sø, 2,8 km fra borehullet i fig. 8. I log-fortolkningen beskrives intervallet 91,4–98,1 m som et lerholdigt kalklag, men man bemærker, at den integrale tællehastighed er tilnærmelsesvis den samme i dette lag som i det øvre sandlag (over 84,4 m). En korrekt hovedtypebestemmelse af de to lag som henholdsvis sand og kalk er imidlertid mulig ud fra den spektrale log, idet U/Th-forholdet er markant højere i kalklaget end i sandlaget.

Oplysningerne fra brøndboreren omfatter kornstørrelsesangivelser i sandlaget, en information som log-fortolkningen ikke indeholder. Det er åbenbart, at lerlaget angivet i logfortolkningen fra 84,4–87,7 m er det samme, som laget angivet i borejournalen fra 85,7–88,6 m med betegnelsen »ler, gråt«. Med hensyn til den underliggende kalk viser den spektrale gamma-log to lag, »ler, sandet eller kalkholdigt« og »kalk, leret«, som ikke er angivet i borejournalen.

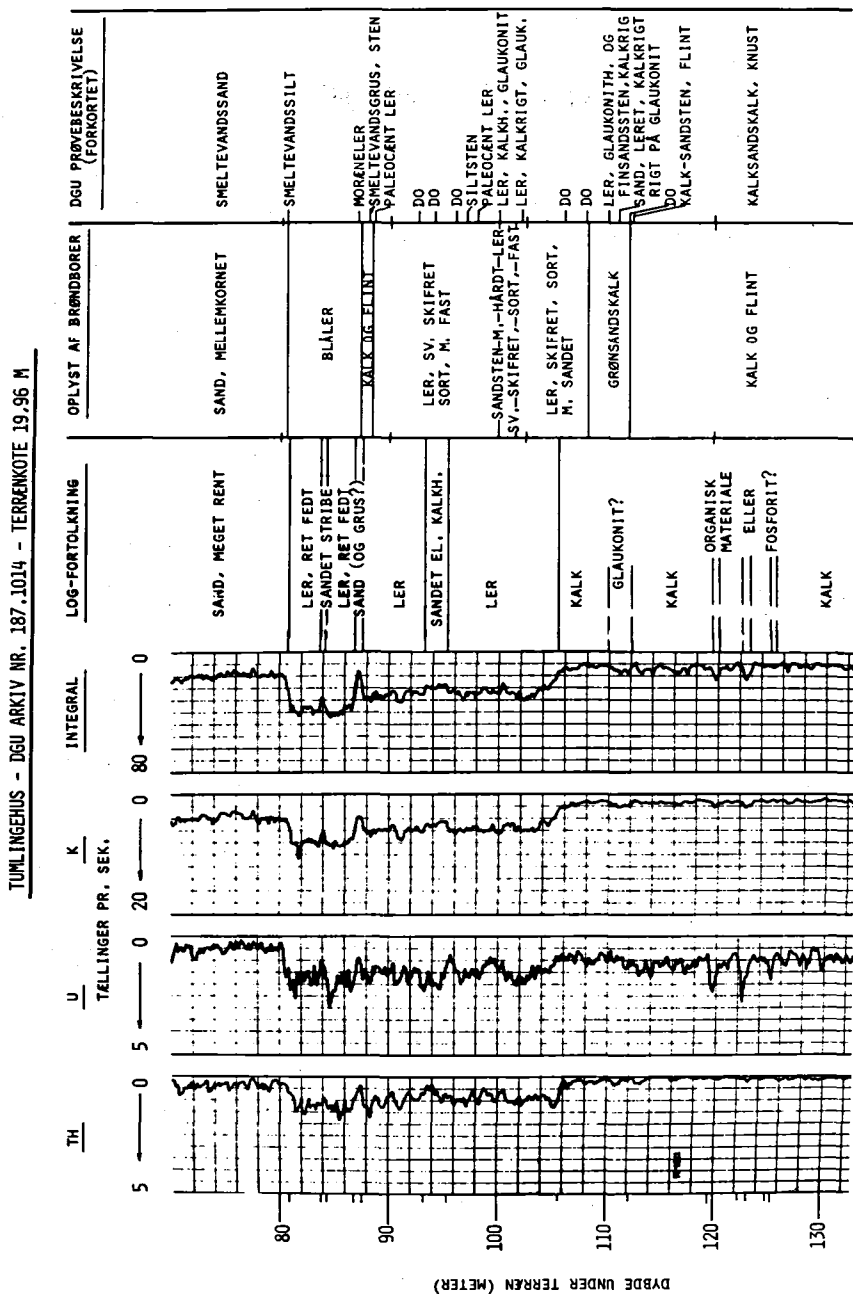


Fig. 8. Del af en spektral, naturlig gamma-log fra et borehole vest for Esrum Sø (Engell-Jensen 1979).

Section of a spectral natural gamma-ray log from a borehole west of Esrum Sø, North-east Zealand (Engell-Jensen 1979).

Fig. 10 viser en litho-stratigrafisk korrelation mellem de to borer opstillet på basis af såvel den spektrale gamma-log som DGU's prøvebeskrivelse suppleret med oplysningerne fra brøndborenen. Som hovedregel er laggrænserne fastlagt

ud fra den spektrale gamma-log, mens formationsbetegnelserne og angivelserne af dannelsesmåden for de kvartære lag er baseret på DGU's prøvebeskrivelser (anført på fig. 8 og 9).

I kalksandskalken optræder i begge borer

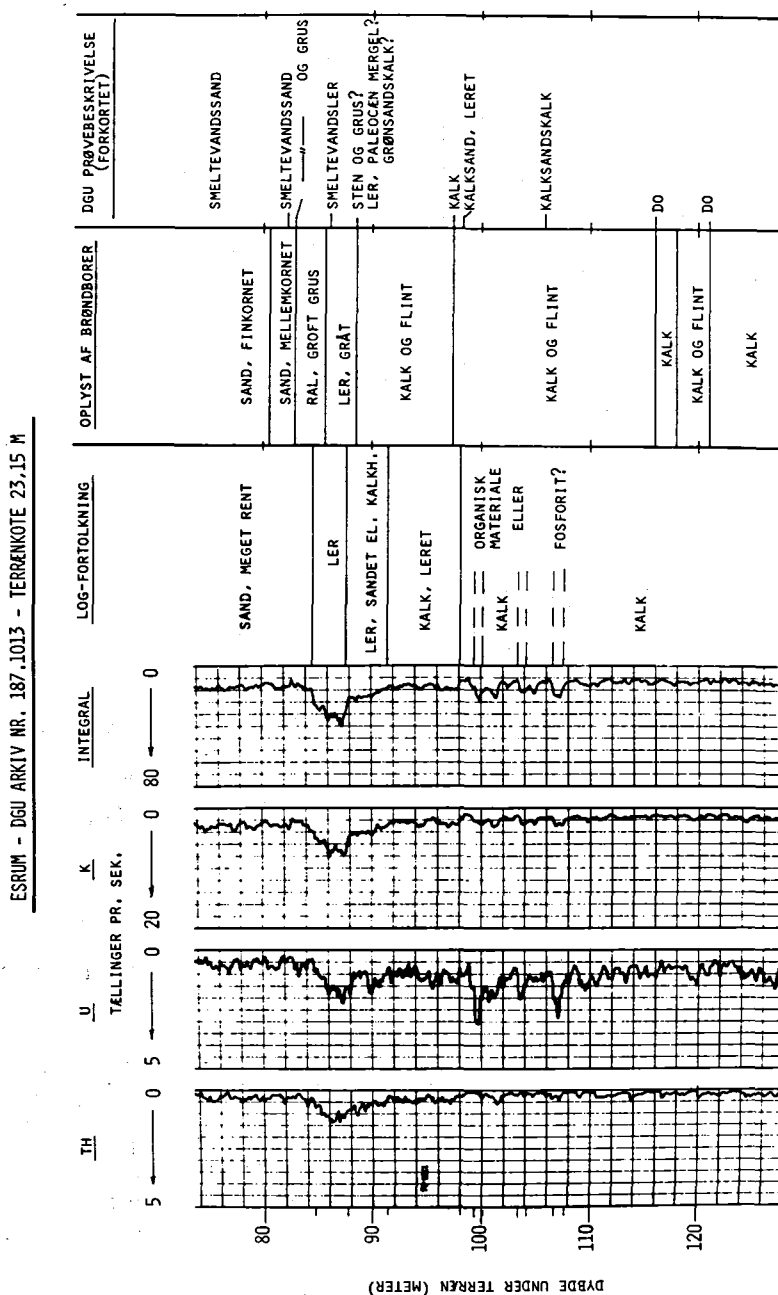


Fig. 9. Del af en spektral, naturlig gamma-log fra et borehul nord for Esum Sø (Engell-Jensen 1979):

Section of a spectral natural gamma-ray log from a borehole north of Esum Sø, North-east Zealand (Engell-Jensen 1979).

som tidligere nævnt tre uran-ledehorisonter, som er markeret med »A« på fig. 10. Det bemærkes, at kote-forskellen mellem horisonterne fra boring til boring andrager ca. 23 m, hvilket kan indicere en forkastning eller en tektonisk struktur. Det må

dog fremhæves, at afstanden mellem borerne er så stor som 2,8 km.

Konklusion

Selv om den spektrale gamma-log på det nuvæ-

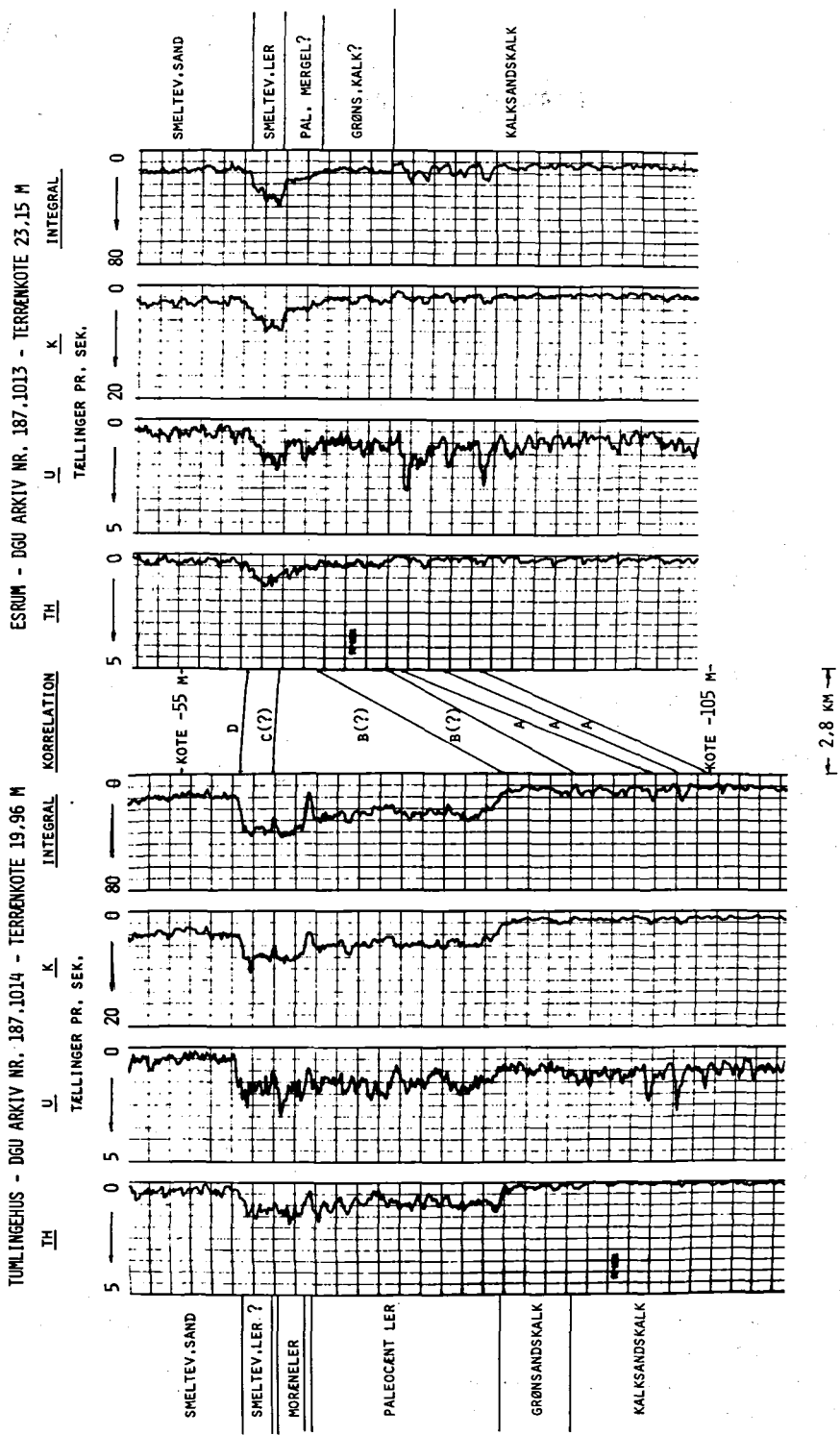


Fig. 10. Litho-stratigrafisk korrelation baseret på informationen fra den spektrale gamma-log og boreprøvebeskrivelsen.

Litho-stratigraphical correlation based on the information from the spectral gamma-ray log and the description of the drill samples.

rende udviklingstrin kun giver grundlag for en kvalitativ bestemmelse af koncentrationen af kalium, uran og thorium, frembyder målingen væsentlige fortolkningsmæssige fordele frem for en integral gamma-log.

For det første er identifikationen af lagtypen mere sikker på basis af den spektrale log. I eksemplet fig. 9 adskilles leret kalk fra sand på basis af U/Th-forholdet. Tilsvarende kan sand med et højt indhold af kalifeldspat, glimmer eller glaukonit skelnes fra sandet ler ud fra K/Th-forholdet. For det andet kan beskrivelsen af det enkelte lag gøres mere detaljeret. Th-kanalen er et udtryk for lerindholdet, mens K-kanalen kan være et udtryk såvel for lerindholdet (illit) som for indholdet af andre kalium-holdige mineraler (kalifeldspat, glimmer, glaukonit). Disse indeholder ikke thorium i samme grad som illit. Af både fig. 8 og 9 fremgår det, hvorledes ledehorisonterne i kalksandskalken ud fra den spektrale gamma-logs U-kanal kan identificeres som områder med et forhøjet uran-indhold, der antagelig skyldes organisk materiale eller fosforit. I modsætning hertil giver glaukonitholdige zoner i kalken sig kun udslag i K-kanalen (fig. 9), og endelig giver lerhorisonter sig udslag i Th-kanalen samt i K-kanalen (illit).

De viste eksempler illustrerer tydeligt værdien af den spektrale gamma-log som et supplement til prøvebeskrivelsen og oplysningerne fra brøndboreren.

I boring 1014, fig. 8, er den væsentligste nye information fra den spektrale gamma-log laggrænsernes præcise beliggenhed og påvisningen af ledehorisonterne i kalksandskalken. Boring 1013, fig. 9, er derimod et eksempel, hvor alle lag tilsyneladende ikke er blevet identificeret på basis af det opborede materiale, dels på grund af manglende oplysninger fra brøndboreren om laggrænser og dels på grund af for få prøver. Den spektrale gamma-log viser yderligere to lag, »ler, sandet eller kalkholdigt« fra 87,7 til 91,4 m og nedenunder »kalk, leret« til 98,1 m. Dette får afgørende betydning for den stratigrafiske korrelation mellem de to borer.

Ved den litho-stratigrafiske korrelation på fig. 10 fremgår værdien af den spektrale gamma-log således især ved fastlæggelsen af grænserne mellem de prækvartære formationer: kalksandskalk, grønsandskalk og paleocænt ler og mergel, men

illustreres også ved identifikationen af ledehorisonterne i kalksandskalken.

Selv om eksemplerne tydeligt viser den spektrale gamma-logs værdi som supplement til lagfølge- og prøvebeskrivelsen og den spektrale logs fordele fremfor den integrale gamma-log, forestår der dels en udvidelse af erfaringsgrundlaget over for en lang række af typisk danske sedimentære lag, dels en udvikling henimod en kvantitativ koncentrationsbestemmelse af kalium, uran og thorium ud fra de spektrale log-kurver.

Tak

Lektor Kurt Klitten, Institutet for teknisk geologi, Danmarks tekniske Højskole takkes for værdifulde kommentarer til manuskriptet under artiklens udarbejdelse.

Litteratur

- Engell-Jensen, M. 1979: *Borehulsmålinger af naturlig og neutroninduceret gammastråling – et redskab ved geologiske undersøgelser*. Licentiatafhandling. Afdelingen for Elektrofysik, Danmarks tekniske Højskole.
- Hassan, M. & Hossin, A. 1975: Contribution à l'étude des comportements du thorium et du potassium dans les roches sédimentaires. *C. R. Acad. Sc. (France)*, t. 280, 533–535.
- Hassan, M., Hossin, A. & Combaz, A. 1976: Fundamentals of The Differential Gamma-Ray Log – Interpretation Technique. *Soc. Prof. Well Log Analysts, 17th Symp.*, paper H, Denver.
- Hassan, M. & Al-Maleh, K. 1976: La répartition de l'uranium dans les phosphates Sénonien dans le Nord-Ouest Syrien. *C. R. Acad. Sc. (France)*, t. 282, 811–814.
- Klitten, K. & Sørensen, T. 1975: Geofysiske borehulsmålinger som redskab ved geohydrologiske undersøgelser. *Vandteknik*, Årg. 43 (1).
- Klitten, K. & Pulawski, B. 1975: Geofysiske borehulsmålinger som redskab ved geotekniske undersøgelser? *Nordisk Geoteknikermøde*, København, 22.–24. maj 1975. Dansk Geoteknisk Forening.
- Lieberkind, K. 1978: A conventional log evaluation method for detection of lithology and hydrocarbons in the Danish North Sea well M-1x. *Danm. geol. Unders., Årbog 1977*, 113–129.
- Nuclear Well Logging in Hydrology 1971: Technical Report Series No. 126, IAEA, Vienna.
- Priisholm, S. & Michelsen, O. 1978: The use of porosity logs in lithology determination, lithostratigraphy and basin analyses. *Danm. geol. Unders., Årbog 1977*, 89–100.
- Sørensen, T. & Hansen, H. O. 1977: Comprehensive Geohydrological Study of Consolidated Sedimentary Rocks in Bornholm. *Nordic Hydrology*, 8, 117–128.
- Sørensen, T. 1978: Geofysiske borehuls-logs i Nedre Kambrium på Bornholm. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1977*, 1–3.
- Vinogradov, A. P. 1959: *The Geochemistry of Rare and Dispersed Chemical Elements in Soils*, 2. ed., Consultants Bureau, Inc., New York, 163–172.