

Anvendelse af gamma-logs ved korrelation af marine skifre i vandforsyningsboringer på Bornholm

GUNVER KRARUP PEDERSEN og KURT KLITTEN



Pedersen, G.K. og Klitten, K.: Anvendelse af gamma-logs ved korrelation af marine skifre i vandforsyningsboringer på Bornholm. *Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1987-89*, side 21-35, København, 15. januar 1990.

Gamma-logs have been run in five water supply wells and in two exploration boreholes which penetrate the Lower Palaeozoic marine shales on Bornholm. A very good correlation between sedimentary facies, TOC analyses and gamma-logs is demonstrated in the two exploration boreholes Skelbro 1 and Billegrav 1 which were cored continuously. Each of the major lithostratigraphic units within the Middle Cambrian, Ordovician and Lower Silurian shales is characterized by an easily recognizable gamma-log pattern which furthermore can be divided into several subunits reflecting a frequent change in grain-size, in TOC or in calcite cementation. Lateral correlation to gamma-logs in the four of the five water supply wells demonstrate the lateral continuity in the sedimentary facies of the Middle Cambrian to Lower Silurian shales. The gamma-log in the fifth water supply well shows a much more monotonous log-pattern, indicating small variations in the facies. This log was run in the *Cyrtograptus* shale and cannot be correlated to the other wells because it does not reach the Ordovician *Rastrites* shale.

*Gunver Krarup Pedersen, Institut for almen Geologi, Østervoldgade 10, 1350 København K.
Kurt Klitten, Institutet for Teknisk Geologi, Bygn. 204 DTH, 2800 Lyngby, 15. september 1989.*

Introduktion

I Danmark findes et meget stort antal vandforsyningsboringer igennem de øverste ca. 100 m af lagserien. En del af den geologiske information fra disse boringer kan hentes fra DGU's basisdatakort f. eks. Rasmussen & Gravesen (1980), men vigtige supplerende oplysninger kan hentes fra geofysiske logs i de pågældende boringer. Dette blev første gang demonstreret herhjemme af Klitten & Sørensen (1975), og har siden vundet større og større indpas ved studiet af en række hydrogeologiske specialproblemer (Engell-Jensen 1980; Bai & Schmidt 1986; Bai & Rasmussen 1986 og Keldstrup, Binzer & Knudsen 1981).

Specielt gamma-logging har vist sig meget anvendelig. Dette er blandt andet vist ved hydrogeologiske undersøgelser på Bornholm (Sørensen 1978 og Kærgaard 1978), hvor især den palæozoiske lagserie er velegnet for denne type undersøgelser. Dette skyldes dels, at lagserien udviser en stor lithologisk variation med deraf varierende logging respons, dels at de enkelte lithostratigrafiske enheder har en stor lateral udbredelse, hvilket gør det muligt at korrelere de forskellige typer af sandsten, skifre og kalksten fra boring til boring.

Institutet for Teknisk Geologi (ITG) har igen en årrække foretaget gamma-logging i en række vandforsyningsboringer på Sydbornholm med henblik på at opnå fuld log-dækning af hele den sedimentære lagserie. Dette er efterhånden opnået for hele den palæozoiske lagserie med undtagelse af *Cyrtograptus* Skiferen.

I maj 1984 boredes to videnskabelige undersøgelsesboringer, **Skelbro 1** og **Billegrav 1** (Fig. 1), igennem dele af den palæozoiske lagserie på Bornholm. Borearbejdet blev gennemført på 5 dage med materiel, som er udviklet ved Grønlands Geologiske Undersøgelse (Surlyk 1983). Borearbejdet resulterede i to borekerner (3 cm diam.) med en samlet længde på 103 m repræsenterende de mellem og øvre kambriske, de ordoviciske og de nederste silure sedimentter. Som led i et samarbejde med ITG målte gamma-logs i de to boringer. På grund af kernedækningen repræsenterer de en fremragende kalibreringsmulighed mellem sedimentære facies og gamma-log mønstre.

En 92 m dyb vandforsyningsboring udførtes senere samme år ved **Billeshøj** (Fig. 1) ca 400 m nordvest for Billegrav 1 med henblik på at gennemføre de **Grønne Skifre** og nå et stykke ned i **Balka Sandstenen** til de vandførende horisonter i

denne. Gamma-log i Billeshøj sammenholdt med ovennævnte gamma-logs viste, at såvel lagserien fra Billegrav 1 som lagserien fra Skelbro 1 træffes i Billeshøj, og at man i 92 m dybde kun var nået ca 12 m ned i de Grønne Skifre. Man måtte derfor forvente at skulle bore mindst 85 m dybere for at nå Balka Sandstenen, hvorfor borearbejdet blev indstillet.

I 1989 boredes en 79 m dyb vandforsyningsboring (DGU 248.054) på **Dueodde Golfbane** (Fig. 1) igennem den yngre del af de silure skifre, *Cyrtograptus* Skiferen. Denne lagserie ligger stratigrafisk ovenpå de skifre, som er blottet i Øleå, men selve det interval, som boringen repræsenterer, har ikke hidtil været kendt, hvorfor en gamma-log blev målt. Boringen blev i lighed med boringen ved Billeshøj foretaget som en »down the hole hammer« boring med luftopblæsning af cuttings.

I korrelationen og diskussionen af de udførte logs inddrages tillige 3 gamma-logs udført af H. Kærgaard i 1978 i tre ældre vandforsyningsboringer i området, **Sømarken 2,3 og 4** (Fig.1).

Vi ønsker med det foreliggende arbejde at vise, at gamma-log mønstrene for en række af de palæozoiske skifre på Bornholm er så karakteristiske, at de kan danne basis for en ret præcis lithostratigrafisk korrelation.

Metodik, måleudstyr og fortolkningsprincipper ved gamma-logging

Ved gamma-logging måles i regelen kontinuert det naturlige radioaktive strålingsniveau fra jordlagene ved nedsænkning af en strålingsfølsom detektor i borehullet. Som detektor anvendes oftest en scintilationstæller bestående af en thallium-aktiveret natriumjodid krystal, der omsætter radioaktiv strålingsintensitet til lysglimt. Detektoren består endvidere af en fotomultiplikator, der omsætter lysglimtsintensiteten til elektriske impulser. Disse elektriske impulser transmitteres i form af spændingsvariationer gennem logkablet op til registreringsinstrumentet ved jordoverfladen, hvor de udskrives på en analogskriver som en log-kurve. Moderne udstyr gør det også muligt at optage målesignalet digitalt, hvorved log-kurven kan udtegnedes med frit valg af såvel dybdeskala som måleskala.

Det er vigtigt, at data kan relateres så nøjagtigt som muligt til den aktuelle måledybde. Dette gøres i praksis hyppigst ved, at log-kablet ved nedsænkningen passerer hen over et kalibreret målehjul, der enten mekanisk eller elektronisk styrer dybdekorrelationen til den analoge eller den digitale recorder.

Udstyret, som anvendes af Institutet for Teknisk Geologi, er et analogt udstyr fra 1968. Det består af et dansk produceret (NEA-LINDBERG) BASC måleinstrument, som udover gamma-måling også kan benyttes til andre radioaktive log-typer. Endvidere indeholder det en højspændingsenhed til forsyning af forstærkeren til fotomultiplikatoren nede i log-sonden, hvilket af nogle log-udstyrsfabrikanter anses for mindre hensigtsmæssigt p.g.a. ekstra krav til log-kablets tekniske egenskaber.

Sonden, der er blevet anvendt til de ældre logs, havde en 1" x 1" NaJ-krystal. Den nyeste log, Golfbanen 1, fra 1989 er målt med en ny sonde, hvor krystallen er 4" lang, men kun 10 mm i tværsnitsdiameter. Da de to krystallers overfladeareal er omtrent ens (1" x 1" ϕ : 29,4 cm² mod 4" x 10 mm ϕ : 33 cm²) er den målte strålingsintensitet af samme størrelsesorden. Den målte stråling fra et givet lag er nemlig proportional med detektor-krystallens overfladeareal. Det er muligt at kalibrere gamma-log udstyr ved hjælp af en radioaktiv kilde med kendt strålingsniveau, således at sonder med forskellige krystalstørrelser vil måle samme strålingsintensitet. De her anvendte log-sonder er ikke blevet kalibreret.

De ældre ITG-logs er oprindeligt udskrevet på en RUSTRAK-skriver, hvor papiret føres frem mekanisk via en aksel, der synkront styres af dybdemålehjulet. Den nyeste ITG-log er derimod udskrevet på en Microservo-Graphic SR 6421 analog, hvor papirets fremdrift styres elektronisk fra et dybdemålehjul. Begge typer udskrift er sidenhen digitaliseret manuelt via et digitaliseringsbord og EDB-udtegnede i samme skala som de tre logs fra boringerne Sømarken 2-4.

Nedsænkningen af log-sonden er foregået manuelt. Herunder gælder det om at holde en rimelig konstant nedføringshastighed hele vejen ned gennem boringen, idet den radioaktive strålingsstatistiske natur medfører et behov for at udjævne målesignalet over et vist tidsinterval. Selv om sonden holdes på en fast position nede i boringen, vil målesignalet fluktuere. Den hyppigst

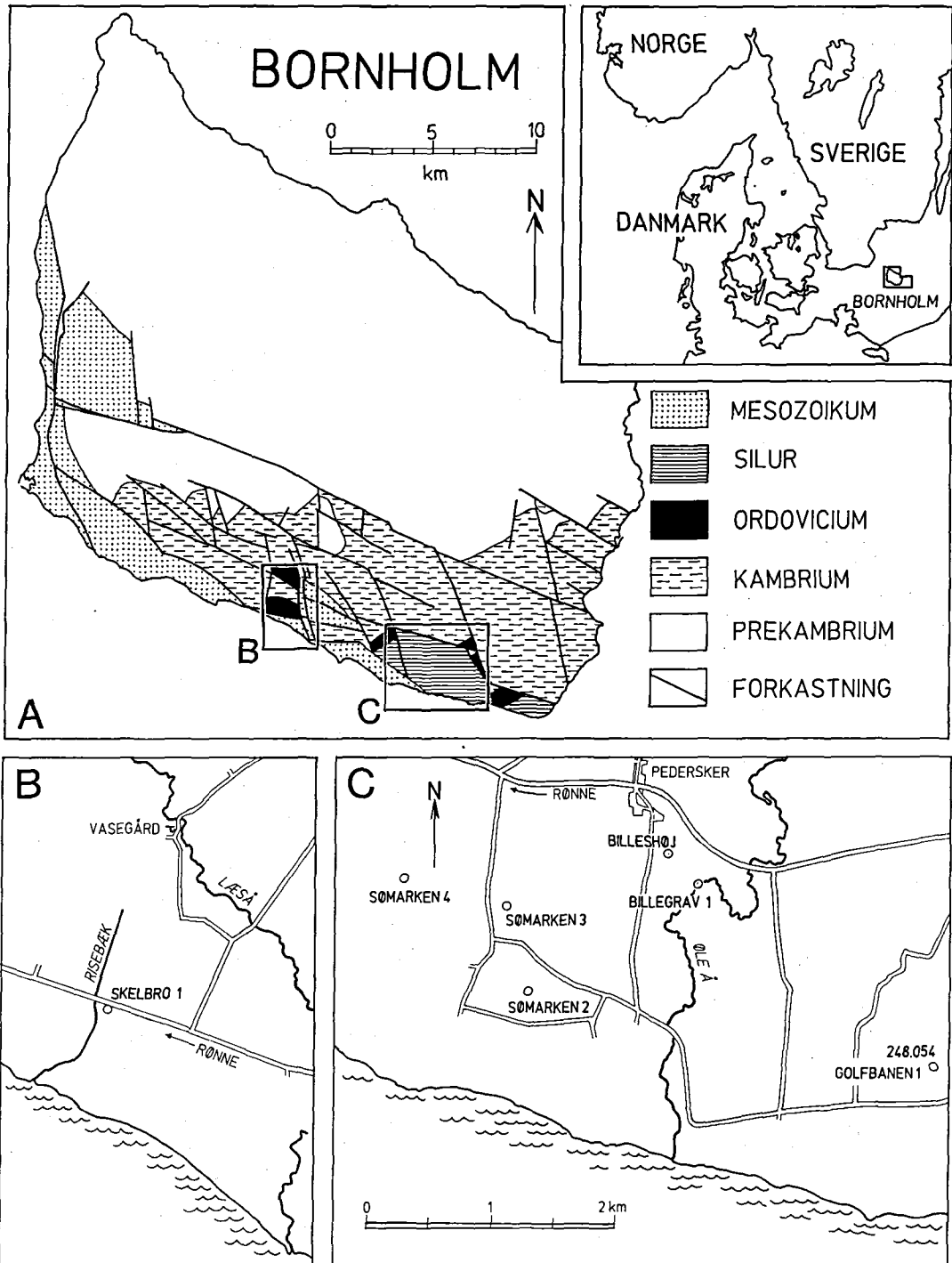


Fig. 1: Lokaltetskort. A viser udbredelsen af de palæozoiske aflejringer på Bornholm. B viser placeringen af boringen Skelbro 1. C viser boringerne Sømarken 2-4, Billeshøj, Billegrav 1 og Golfbanen 1. Sømarken 3 er beskrevet som Bavnegård boringen i Bjerreskov (1975).

Geological location map outlining the distribution of the Palaeozoic sediments on Bornholm. B shows the position of the well Skelbro 1, while C shows the wells Sømarken 2-4, Billeshøj, Billegrav 1 and Golfbanen 1. The biostratigraphy of Sømarken 3 (the Bavnegård well) was discussed by Bjerreskov (1975).

anvendte form for elektronisk midling foregår ved hjælp af en integrator med tidskonstant t_k , som oftest kan vælges til 1, 5 eller 25 sek., indenfor hvilke der midles. Det kan påvises, at målesignalets fluktuationer efter at have passeret integratoren vil være statistisk normalfordelt med en standardafvigelse på $\sqrt{N/2t_k}$ i forhold til middelværdien af N (IAEA Wien 1971). Fluktuationerne ses heraf at blive større, når der vælges en mindre tidskonstant.

Valget af tidskonstant influerer på valg af nedføringshastighed, som imidlertid tillige foretages ud fra den ønskede detaljeringsgrad. Jo mindre tidskonstant desto større kan log-hastigheden vælges. Til gengæld bliver de statistiske udsving på log-kurven også større, hvorved det kan blive vanskeligt at skelne tynde lags reelle strålingsudslag fra statistisk betingede udslag. Jo tyndere lag man derfor ønsker at kunne identificere, desto større tidskonstant og dermed lavere log-hastighed må der anvendes.

Ved alle de her medtagne logs er tidskonstanten 5 sek og loghastigheden 2–4 m/min.

Ved tolkning af gamma-logs, men især ved sammenligning af logs fra forskellige borer, er det, ifølge det ovenstående, vigtigt at vide, hvilken krystalstørrelse og tidskonstant samt log-hastighed, der har været anvendt ved de enkelte logs. Men der er andre forhold, der også øver indflydelse på den registrerede strålingsintensitet (Schlumberger 1972). Således f.eks. borehullets diameter, forerørets materialesammensætning og tykkelse, gruskastning, lerpakning og cementering. Ved skylleboringer, hvor der anvendes borevæske, influerer denne også på strålingsintensiteten.

Som konsekvens af ovenstående må det understreges, at man skal være forsigtig med at angive absolutte tælleletal som karakteristiske for strålingsniveauet for specifikke lithostratigrafiske enheder. Tolkningen består i højere grad i at identificere genkendelige mønstre samt vurdere årsagerne til de relative variationer i strålingsniveauet.

Ved målingen af jordlagenes naturlige radioaktivitet ved hjælp af en scintillationsdetektor er det i væsentlig grad gamma-stråling, der registreres, idet alfa- og beta-stråling ikke har særlig stor gennemtrængningsevne og derfor bremses af jordlagene. Gamma-stråling kan derimod gen-

nemtrænge fra 15 til 30 cm jord eller bjergart og passere igennem almindelige foringsrør af jern.

Kilderne til jordlagenes naturlige gamma-stråling er de radioaktive grundstoffer uran og thorium og en lang række henfaldsprodukter af disse grundstoffer, samt den radioaktive isotop af grundstoffet kalium. De nævnte radioaktive grundstoffer indgår i et stort antal mineraler, hvis mængde kan variere meget inden for de enkelte jordlag eller bjergarter, men som på den anden side – af geologiske grunde – ofte varierer ensartet i det samme jordlag fra boring til boring. Derved bliver det muligt at genkende laget ved dets strålmønster, og i mange tilfælde endvidere muligt at identificere dets lithologiske hovedkarakter ud fra strålingsniveauet. Det gælder især i sedimentære lagserier, hvor lersedimenter i regelen har højere naturlig gamma-stråling end sand- og kalksedimenter, medens rene kalksedimenter oftest har mindst gamma-stråling.

Årsagen til lersedimenternes generelt høje strålingsniveau er først og fremmest den radioaktive kalium isotop, der er knyttet til kaliumindholdet i ler- og glimmermineralerne. Hertil kommer det uopløselige thorium, som under forvittringsprocesserne følger aluminium over i lermineralselskaberne, samt det letopløselige uran, der i iltet form kan adsorberes på lermineraler eller udfældes ved reduktion i organiske eller fosforitrigre aflejringer (Rider 1986).

Sand- og kalksedimenter kan være mere eller mindre rene, og et øget lerindhold vil naturligvis medføre højere gamma-stråling. Tilstedeværelsen af glaukonit vil ligeledes øge strålingsintensiteten, fordi kalium indgår heri.

I kalkaflejringer træffer man endvidere ofte isolerede horisonter med stærkt forøget gamma-stråling enten p.g.a. uran, der er knyttet til organisk stof samt til fosforit, eller frembragt af kalium og thorium i lerhorisonter.

For sandaflejringer vedkommende er mineralsammensætningen bestemmende for strålingsniveauet. Det laveste niveau fås i rene kvartssandtyper, hvorimod radioaktiviteten øges med stigende indhold af feldspat, glimmer og tungmineraler.

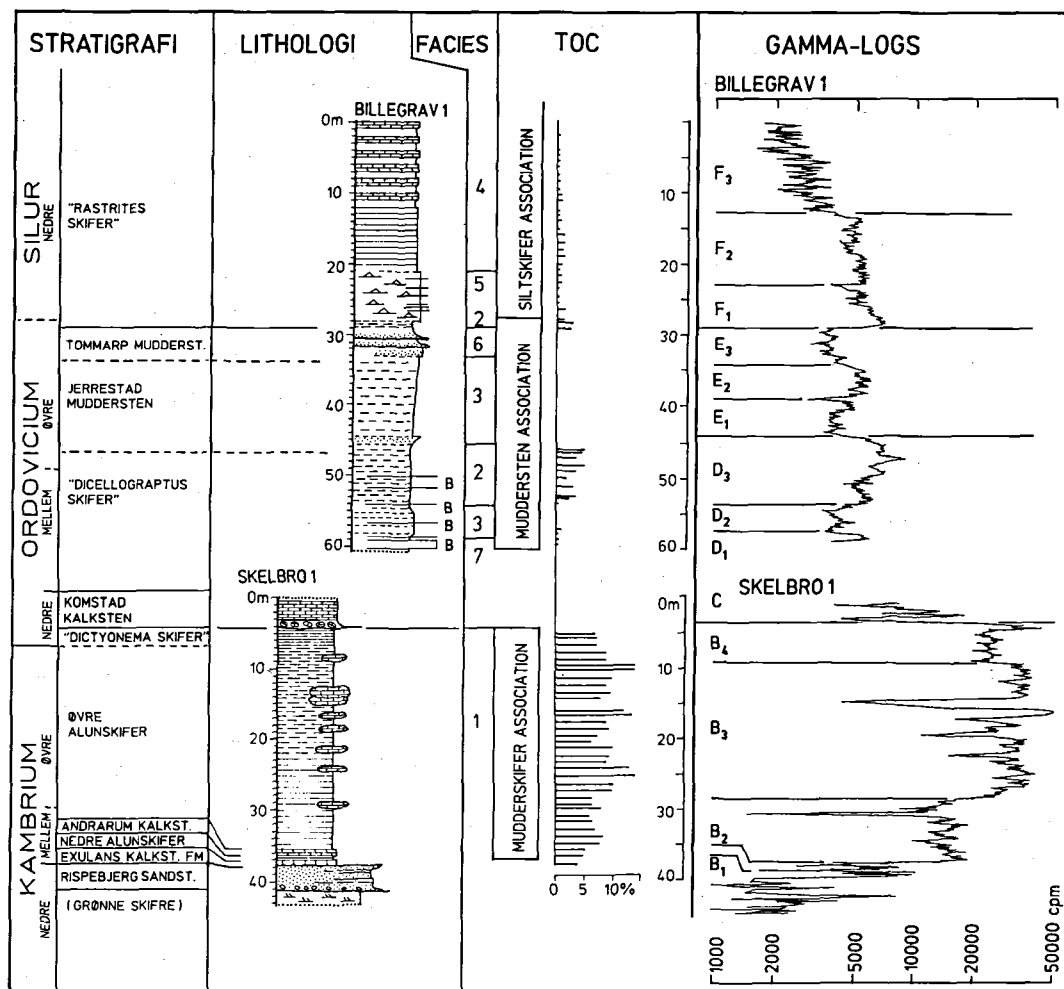


Fig. 2: Sedimentologisk log, TOC analyser og gamma-logs fra borerne Skelbro 1 og Billegrav 1. Gamma-loggen er inddelt i log-enhederne B-F, samt i underenheder med karakteristiske log-mønstre. Proportionaliteten mellem TOC og naturlig gamma-stråling ses. Bemærk, at de gennemborede antrakonit kongrektioner er registreret på gamma-loggen.

Sedimentological log, TOC analyses and gamma-logs from the wells Skelbro 1 and Billegrav 1. Note the match between sedimentary facies and gamma-log units. The gamma-radiation is closely linked to the TOC values. The carbonate concretions are easily recognized on the gamma-log.

Sedimentologiske undersøgelser

Den detaljerede sedimentologiske undersøgelse af borekernerne fra Skelbro 1 og Billegrav 1 har omfattet en opmåling af sedimentologiske logs, en røntgendiffraktometrisk undersøgelse af lermineralselskabet, undersøgelse af det organiske stofs mængde (TOC) og fordeling, samt en tolkning af de sedimentære facies (Pedersen 1989).

Figur 2 er baseret på data fra Skelbro 1 og Billegrav 1 og gør det muligt at sammenligne de sedimentære facies (kornstørrelse, strukturer, TOC) med den målte gamma-log. En røntgen-

diffraktometrisk undersøgelse af lermineralselskabet viser, at dette domineres af muskovit ($2M_1$) i Alun Skiferen og af muskovit + chlorit i *Dicellograptus* Skiferen, i Jerrestad Mudderstenen og i *Rastrites* Skiferen (Pedersen 1989). Denne ændring i lermineralselskabets sammensætning forventes ikke at medføre en væsentlig nedgang i den naturlige gamma-stråling. Da chlorit indholdet er relativt konstant i Jerrestad Mudderstenen og i *Rastrites* Skiferen, varierer gamma-strålingen i disse enheder med TOC-indholdet samt graden af calcit-cementering.

Fra borekernerne er udtaget et stort antal prø-

ver til undersøgelse af det organiske stofs mængde og sammensætning. TOC-bestemmelserne er udført af B. Buchardt og omfatter såvel upublicerede analyser som data fra Buchardt et al. (1986). På Fig. 2 bemærker man den meget fine overensstemmelse imellem TOC-værdierne og intensiteten af den naturlige gamma-stråling. Denne sammenhæng er tillige dokumenteret for Alun Skiferen i Jämtland (Snäll 1988: fig. 4,7). En sammenhæng mellem skifrenes gennemsnitskornstørrelse og gammastrålingen kan ikke påvises tilsvarende klart. Kornstørrelsesbestemmelsen i hærtnede skifre af den undersøgte type er dog behæftet med nogen usikkerhed, idet det kun er muligt at skønne det oprindelige mængdeforhold mellem ler og silt. Årsagen hertil er de diagenetiske ændringer, som har resulteret i nydannelse af mineraler i såvel ler- som siltfraktionen, ligesom der kan være sket opløsning af oprindelige, detritale mineraler.

Lithostratigrafi

Den mellem kambriske til nedre silure lagserie på Bornholm domineres af marine skifre, men omfatter også to kalkstensformationer (Poulsen 1966; Bjerreskov 1975; Gravesen & Bjerreskov 1982; Berg-Madsen 1985; Bjerreskov 1986, og Pedersen 1989). En kortfattet, dansksproget gennemgang af lagserien og den fossile fauna findes i Nielsen (1988, a og b).

Lagserien omfatter følgende lithostratigrafiske hovedenheder: Alun Skifer, Komstad Kalk, *Dicellograptus* Skifer, Jerrestad Muddersten og *Rastrites* Skifer. Korrelationen mellem borekerner og gamma-logs i Skelbro 1 og Billegrav 1 viser, at alle grænserne mellem ovennævnte enheder kan genkendes ved markante ændringer i gammastrålingen. Det samme gælder for grænsen nedad til den underliggende Rispebjerg Sandsten. De enkelte lithostratigrafiske enheder, inklusiv Rispebjerg Sandsten, kan endvidere identificeres indbyrdes ved hvert sit karakteristiske gammastrålingsmønster og -niveau. På Fig. 5 er disse log-mønstre betegnet med bogstaverne A til G.

Ved en detaljanalyse af log-mønstrene og korrelation dels til borekerne fra de to undersøgelsesboringer og dels til log-mønstrene i de øvrige boringer, er det endvidere muligt at inddele nogle af de lithostratigrafiske hovedenheder

i underenheder, med karakteristiske log-mønstre. Disse underenheder, på Fig. 2 og 5 angivet med bogstav svarende til hovedenheden efterfulgt af et nummer fra 1 og opefter, synes at afspejle facies variationer herunder forskelle i TOC eller i calcitcementering. I Alun Skiferen og Jerrestad Mudderstenen afslører log-underenhederne variationer inden for en sedimentær facies, mens *Dicellograptus* Skiferen og *Rastrites* Skiferen demonstrerer, at grænserne mellem log-underenhederne svarer til grænser mellem sedimentære facies (Fig. 2).

I det følgende gives en kortfattet beskrivelse af karakteristika ved de enkelte enheder:

Rispebjerg Sandsten, log-enhed A

Rispebjerg Sandstenen, som udgør de øverste 3-6 m af de nedre kambriske sandsten på Bornholm, er en lys, mellemkornet, stedvis heterolithisk sandsten, som lokalt indeholder fosforitnoder. Den udgør sammen med den øvre del af de Grønne Skifre en opadgrovende sekvens tolket som et resultat af en kystprogradering (Surlyk 1980).

Log-enhed A omfatter indtil videre alle formationer under Alun Skiferen, og en opdeling i underenheder afventer igangværende undersøgelser. Log-enhed A er repræsenteret i Skelbro 1, 43-37 m. Den omfatter her Rispebjerg Sandstenen samt toppen af de Grønne Skifre. Gammastrålingsniveauet i Rispebjerg Sandstenen er lavere end i de øvrige enheder, men dog varierende mellem 500 og 2000 cpm (Fig. 2).

Gamma-log mønstret i de underliggende Grønne Skifre kendes endnu kun delvis (Sørensen 1978, Kærgaard 1978). Strålingsniveauet er dog markant højere end i Rispebjerg Sandstenen, således at grænsen mellem disse to enheder let kan identificeres, se loggen fra Sømærken 4 (Fig. 5).

Alun Skiferen, log-enhed B1-B4

Denne enhed dækker Nedre Alun Skifer (B1), Øvre Alun Skifer (B2-B3) og *Dictyonema* Skiferen (B4). Alun Skiferen er en sort, fissil muderskifer med et meget højt indhold af organisk stof (facies 1). Figur 2 og 3 illustrerer en klar parallellitet mellem TOC værdierne og gammastrålingen. Andersson, Dahlman & Gee (1983:

Facies	Lamination	Sporfossiler	Dominerende kornstørrelse	Typisk TOC (%)	Naturlig gamma-stråling (1000 cpm) *	Log-enheder	Typisk forekomst (m. u. terræn)	Bemærkninger
1. Sort, organisk-rig mudderskifer	+	-	ler	5-10	15-40	B ₁ B ₂ B ₃ B ₄	Skelbro 1 37-4	Indeholder antrakonitboller
2. Mørk grå til sort muddersten	-	-	ler	3-5	6-8	D ₃ (F ₁)	Billegrav 1 54-45	
3. Grå muddersten og siltsten	-	+	silt	0.5	4-5	(D ₁) D ₂ E ₁ E ₂	61-54 45-34	Indeholder lag af bentonit (høj stråling)
4. Grå siltskifer	+	-	silt	0.5-1	2-5	F ₂ F ₃	21-2	Bemærk ændring i gammastråling ved calcitcementering
5. Silt-stribet mudderskifer	+	-	silt	1	6	F ₁	28-21	
6. Konglomeratisk sandsten	-	-	silt sand	?	3-4	E ₃	34-30	
7. Bentonit	-	-	ler	?	7	D ₁	61-59	Forekommer som 1-20 cm tykke lag

* Målt i 2" borehul med 1" krystal, tidskonstant = 5 sek og log-hastighed ca. 4 m/min.

Fig. 3: Oversigt over de sedimentære facies og disses naturlige gamma-stråling i Skelbro 1 og Billegrav 1 (sml. Pedersen (1989)).

Schematic summary of the sedimentary facies and their gamma radiation measured in Skelbro 1 and Billegrav 1 (Compare Pedersen (1989)).

fig. 3) viste, at der i den svenske Alun Skifer er en ligefrem proportionalitet mellem TOC og uranindholdet. En tilsvarende sammenhæng ville kunne forventes for den bornholmske Alun Skifer.

Log-enhed B kendetegnes generelt ved det ekstremt høje strålingsniveau, 10-50.000 cpm, hvilket er højere end i de øvrige enheder (Fig. 2, 5). Log-enhed B er repræsenteret i Skelbro 1, 37-4 m.

Log-enhed B1 er den ca. 1 m tykke Nedre Alun Skifer og denne adskilles fra B2 af den 1 m tykke Andrarum Kalk, der ses som et markant strålingsminimum.

Log-enhed B2 er repræsenteret i Skelbro 1 i intervallet 36-27 m. Alun Skiferen karakteriseres her af 5-8 % TOC og øverst findes talrige olenide trilobitter. Strålingsniveauet i B2 er 15-20.000 cpm og således tydeligt lavere end i den overliggende del af Øvre Alun Skifer.

Log-enhed B3 er repræsenteret i Skelbro 1 i intervallet 27-9 m. Alun Skiferen karakteriseres

her af meget høje TOC-værdier, 8-14 %, samt af tilstedeværelsen af bituminøse kalkstenskonkretioner (Fig. 2, 5). Strålingsniveauet ses at være 20-50.000 cpm og »antrakonitbollerne« fremtræder som tydelige minima.

Log-enhed B4 findes i Skelbro 1 i intervallet 9-4 m og formodes at repræsentere *Dictyonema* Skiferen. Grænsen mellem Øvre Alun Skifer og *Dictyonema* Skiferen kan ikke skelnes lithologisk i felten og ses ikke som ændrede facies i borekeren. Strålingsniveauet, 20-30.000 cpm, ses imidlertid at være signifikant lavere end i enhed B3.

Komstad Kalken, log-enhed C

Komstad Kalken er en 2-5 m tyk, ordovicisk kalksten med et varierende lerindhold, i gennemsnit 15 %, men lokalt op til 30 %. I toppen af Komstad Kalken er påvist et vist indhold af såvel fosforit som glaukonit (Nielsen pers. comm.). Kalkstenen er karakteriseret af talrige opløs-

ningsflader, hvoraf nogle er sammenfaldende med tynde skiferlag (Nielsen 1988a).

Log-enhed C er delvis repræsenteret i Skelbro 1, 4-0 m (Fig. 2). Strålingsniveauet er meget lavt, men udviser dog visse fluktuationer.

Dicellograptus Skiferen, log-enhed D1-D3

Dicellograptus Skiferen omfatter grå muddersten (facies 3) overlejret af sorte muddersten (facies 2), se Fig. 3. Grænsen mellem de to facies svarer til grænsen mellem log-enhed D2 og D3. Endvidere karakteriseres *Dicellograptus* Skiferen ved sit indhold af bentonit lag (facies 7). Bergstrøm & Nilsson (1974) demonstrerede hovedtrækkene i korrelationen med de tilsvarende bentonit lag i Skåne, men ved detaljeret korrelation ses betydelige variationer i bentonit lagenes tykkelse indenfor den bornholmske *Dicellograptus* Skifer (Pedersen 1989: fig.8).

Log-enhed D er delvis repræsenteret i Billegrav 1 (61-45 m) og kendetegnes generelt ved et højt strålingsniveau, 3-8000 cpm (Fig. 2,5).

Log-enhed D1 omfatter grå muddersten mellemlejret af et stort antal bentonit lag. Enheden er repræsenteret i Billegrav 1 (61-59 m), men er ikke gennemboret her, hvilket fremgår af korrelationer med Sømarken 2-4 og Billeshøj (Fig. 5). Bentonit lagene har en meget høj gamma-stråling og erkendes derfor, trods tykkelse mindre end 20 cm, som peaks på gamma-loggen.

Log-enhed D2 omfatter grå muddersten med få og tynde bentonit lag (Billegrav 1, 59-54 m). Sporfossilet *Chondrites* ses hyppigt, TOC-indholdet er lavt og gamma-strålingsniveauet ligger omkring 3000 cpm (Fig. 2,5).

Log-enhed D3 omfatter sorte muddersten med få, tynde bentonit lag (Billegrav 1, 54-45 m). Mudderstenen er graptolitholdig, TOC-indholdet er målt til 3-5 % og gamma-strålingsniveauet ligger omkring 8000 cpm (Fig. 2,5).

Jerrestad Mudderstenen, log-enhed E1-E3

Denne lithostratigrafiske enhed domineres af grå og grønlig muddersten, som ofte er tydeligt bioturberede (facies 3). Der er målt meget lave TOC-værdier i den nedre del (enhed E1), mens målinger mangler fra den øvre del af Jerrestad Mudderstenen. Facies 3 (log-enhed E1-E2) overlejres af nogle tynde lag af konglomeratiske sand-

sten (facies 6)(log-enhed E3), som formentlig kan korreleres med Tommarp Mudderstenen i Skåne. Der iagttages således en grovende-opad sekvens i den øverste del af Jerrestad Mudderstenen.

Log-enhed E er repræsenteret i Billegrav 1 (45-29 m) og kendetegnes ved et moderat strålingsniveau, 3-6000 cpm, samt et næsten symmetrisk mønster opbygget af underenhederne E1-E3 (Fig. 2,5). Disse underenheder kan gendes tydeligt i samtlige logs gennem Jerrestad Mudderstenen, selvom de tilsvarende lithologiske ændringer ikke ses tydeligt i borekernen.

Log-enhed E1 omfatter grå muddersten, som nederst og øverst i enheden indeholder talrige gravegange, *Chondrites*. Enhed E1 er repræsenteret i Billegrav 1 (45-39 m). Strålingsniveauet er lavt, 3-4000 cpm (Fig. 2,5).

Log-enhed E2 omfatter ligeledes grågrønne muddersten, men strålingsniveauet her er tydeligt højere end i E1 og E3. Enhed E2 er repræsenteret i Billegrav 1 (39-34 m) og har et strålingsniveau omkring 6000 cpm. Da log-enhed E1 og E2 tilhører samme sedimentære facies, tilskrives den mørke farve og den øgede gamma-stråling i E2 et forøget TOC-indhold. Mineralogiske forskelle mellem E1 og E2 er ikke påvist.

Log-enhed E3 karakteriseres af konglomeratiske sandsten (facies 6), men omfatter tillige underliggende lysegrå, sandede muddersten (facies 3). Der er målt 25 % calcit i intervallet 34-30 m, hvilket også bidrager til det lavere strålingsniveau i enhed E3. Grænsen mellem facies 3 og 6 er gradvis. I borekernen fra Billegrav 1 ses der endvidere at være en gradvis overgang mellem de grågrønne muddersten, som udgør log-enhed E2, og de lysegrå, sandede muddersten, som udgør den nederste del af log-enhed E3. Enhed E3 er repræsenteret i Billegrav 1 (34-29 m), kendetegnes af et lavt strålingsniveau, omkring 3000 cpm (Fig. 2,5), og svarer antagelig til Tommarp Mudderstenen.

Rastrites Skiferen, log-enhed F1-F5

Rastrites Skiferen er ikke gennemboret i sin helhed, og findes heller ikke blottet i et sammenhængende profil. Et samlet billede af formationen kan sammenstykes af borekernen fra Billegrav 1 samt blotningerne langs Øleå fra borestedet og sydpå opmålt af Bjerreskov (1975).

Dybde u.t.(m)	Prøve nr.	Mineralogi					Gamma- stråling 1000 cpm	Lithologi
		KM	Q	F	P	C		
11	3516		1.5	Blågrå, sandet siltskifer, svag lamination				
21*	3517		2	Mørkegrå, siltet mudderskifer, svag lamination				
33	3518		1.5	Grå mudderskifer, ? <i>Chondrites</i> gravegange				
41	3519 A		2	Mørkegrå, siltet mudderskifer, sub-mm lamination				
41	3519 B		2	Grågrøn, leret mudderskifer, strukturløs				
53	3520		2	Mørkegrå, siltet mudderskifer, svag lamination				
64	3521		1.5	Mørkegrå, siltet mudderskifer, lamination				
72*	3522 A			Grå og grøn mudderskifer, fissil, enkelte gravegange				
72	3522 B			Lys, meget finkornet sandsten med pyrit. Bentonit ?				
79	3523			Mørkegrå mudderskifer sub-mm lamination				

Fig. 4: Mineralogi, lithologi og gamma-stråling i 8 prøver af cuttings fra boringen Golfbanen 1. Bemærk prøvernes ensartethed undtagen 3522B, som muligvis repræsenterer et bentonitlag. Mineralogien er skønnet ud fra XRD analyser af knuste, ubehandlede totalprøver. K: Kaolinit + chlorit, M: Muskovit, Q: Kvarts, F: Feldspat (plagioklas), P: Pyrit, C: Calcit. * viser fragmenter af *Monograptus cf. flemingi*. Dybde målt i meter under terræn.

Mineralogy, lithology and gamma-radiation in 8 samples of cuttings from the well Golfbanen 1. Note the similarity between all the samples except 3522 B, which might be bentonite. The mineralogy is estimated from XRD analyses of crushed, untreated bulk samples. K: Kaolinite + chlorite, M: Muscovite, Q: Quartz, F: Feldspar (plagioclase), P: Pyrite, C: Calcite. * mark finds of *Monograptus cf. flemingi*. Depth in meters below ground.

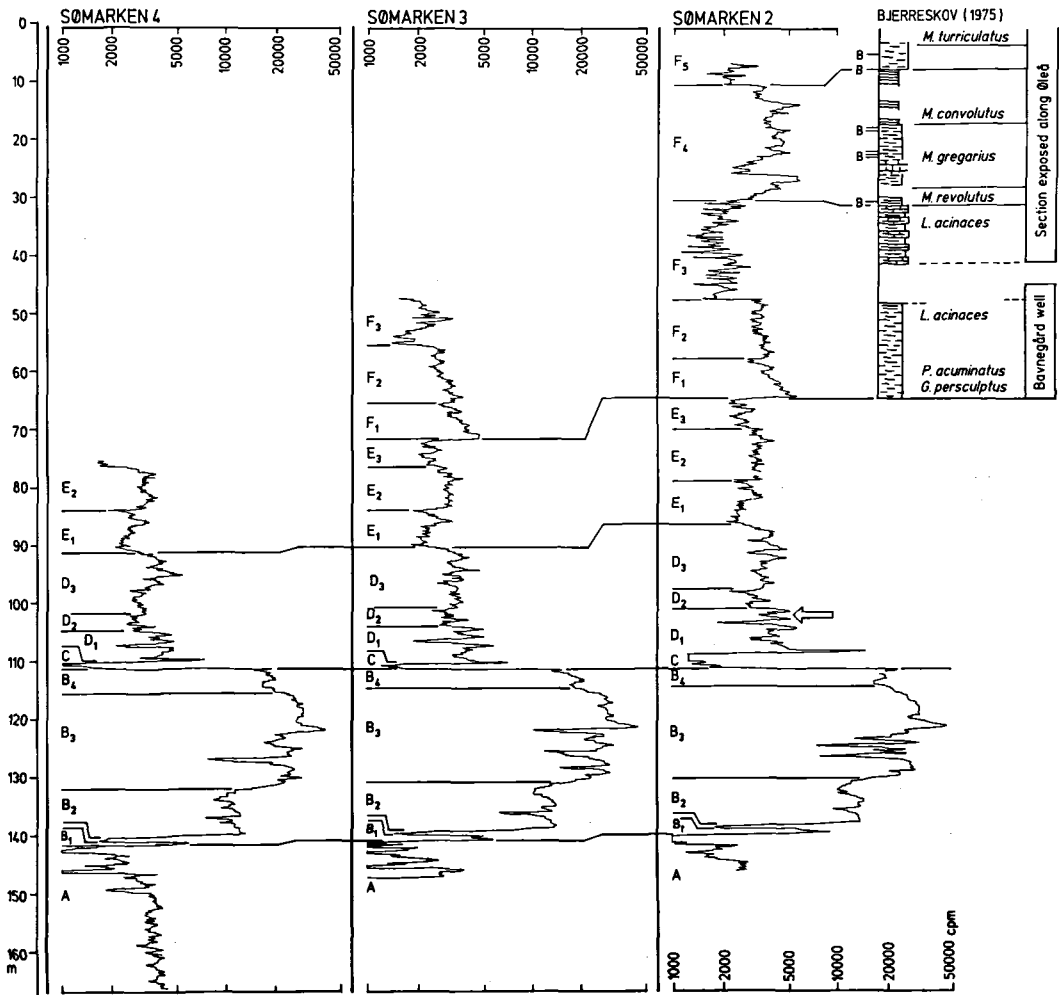
Herved opnås en samlet tykkelse på *Rastrites* Skiferen på 70-80 m, hvoraf de nederste 29 m er repræsenteret i Billegrav 1 (log-enhed F1-F3). Herudover eksisterer der gamma-log dækning for de følgende ca. 33 m i Sømarken 2. En korrelation mellem Øleå profilet og gamma-loggen fra Sømarken 2 er vist på Fig. 5. Log-enhederne F4 og F5 er baseret på denne korrelation og mangler dokumentation i form af borekerne. Der mangler således gamma-log fra de øverste 10-20 m af *Rastrites* Skiferen (*turriculatus-griestoniensis* zonerne).

Rastrites Skiferen domineres i Billegrav 1 af siltstribede mudderskifre med strømshabte sedimentstrukturer (facies 5) samt af grå siltskifre (facies 4), som i visse niveauer indeholder tynde,

calcitcementerede bænke (Fig. 2,3). Disse bestemmer strålingsmønstret for log-enhed F3, hvis øverste del kendes fra Sømarken 2 samt fra Øleå profilet. Skifrene i *revolutus* zonen er grå og svagt kalkholdige, mens *gregarius* zonen omfatter grå skifre med enkelte kalkstensbånd samt 5 tynde bentonit lag (Bjerreskov 1975). I *convolutus* zonen er skifrene mørkegrå til sorte imod toppen, hvilket betinger en stærk kontrast til de lysegrå muddersten i den nederste del af *turriculatus* zonen (grænsen mellem log-enhed F4 og F5).

Log-enhed F er delvis repræsenteret i Billegrav 1, 29-2 m. På grund af manglende data for ude-rendehed F5 kan log-enhed F ikke karakteriseres samlet.

Log-enhed F1 er repræsenteret i Billegrav 1



(29–23 m). Den karakteriseres ved en meget markant basis, som korrelerer med 1,5 m sorte, graptolitførende muddersten (facies 2), som henregnes til *persculptus* zonen. Enhed F1 karakteriseres endvidere af et aftagende strålingsniveau (Fig. 2,5). Borekernen fra dette interval domineres af siltstribet mudderskifer (facies 5) med et

gradvis tiltagende siltindhold opefter. Dette ledsages af et stigende calcitindhold (Pedersen 1989: fig.11). Kombinationen af disse faktorer kan forklare det markante fald i strålingsniveauet i toppen af log-enheden F1.

Log-enheden F2 er repræsenteret i Billegrav 1 (23–12 m) ved en sekvens af graptolitførende grå

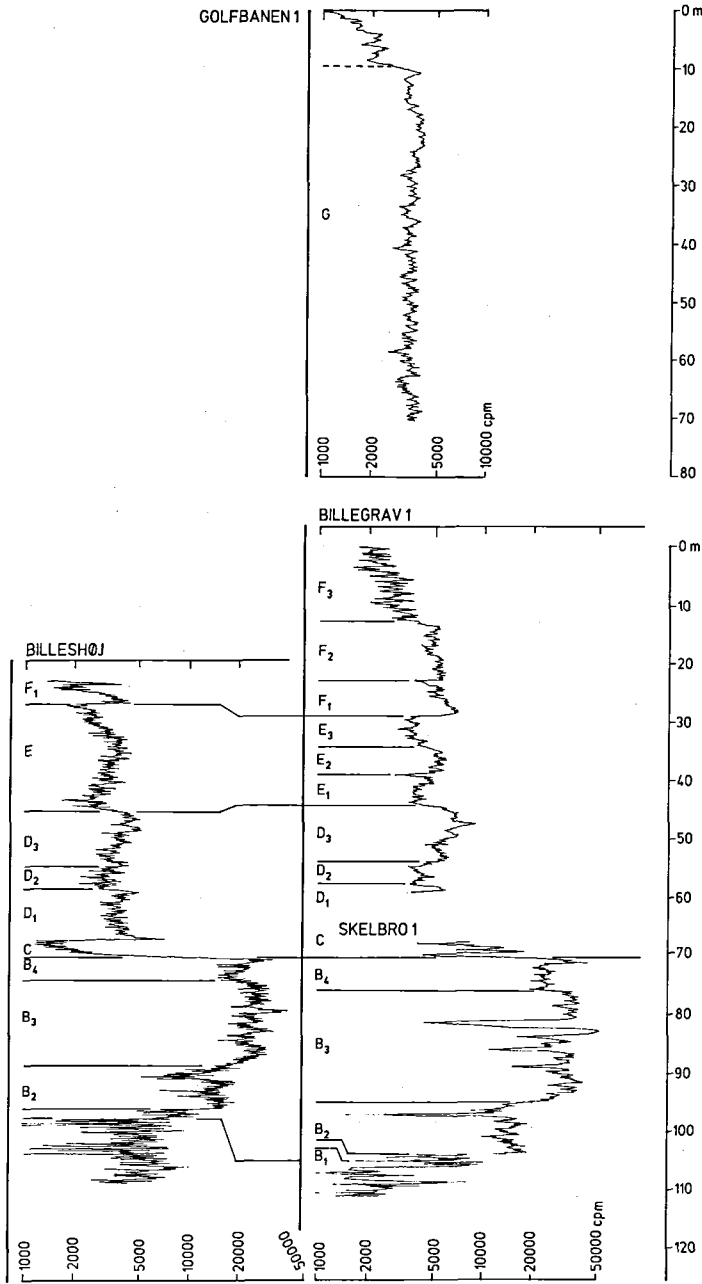


Fig. 5: Gamma-logs fra alle de undersøgte borer. Loggene fra Sømarken 2-4 er fra Kærgaard (1978). Bemærk den fine laterale korrelation imellem borerne. Basis af Komstad Kalken er anvendt som referenceniveau. De anvendte dybdeskalaer er fra henholdsvis Sømarken 2, Billegrav 1 og Golfbanen 1. De biostratigrafiske data fra Øleå profilet (Bjerreskov 1975) er korreleret med gamma-loggen fra Sømarken 2. Bunden af Billegrav 1 er vist på Sømarken 2 (pil).

Gamma-logs from all the wells discussed here. The logs from Sømarken 2-4 are from Kærgaard (1978). Note the good lateral correlation between the wells. The wells are correlated using the base of the Komstad Limestone as reference level. The depths refer to Sømarken 2, Billegrav 1 and Golfbanen 1. A possible correlation is shown between the Sømarken 2 well and the lithology and biostratigraphy of the Øleå section (Bjerreskov 1975; fig. 5). The bottom of Billegrav 1 is shown on the log from Sømarken 2 (arrow).

siltskifre (facies 4) med underordnede indslag af facies 5 (Fig. 2). Den ensartede lithologi afspejler sig også i det meget konstante gamma-strålningsniveau (Fig. 5). Ved korrelation med de biostratigrafiske undersøgelser i Sømarken 3 (Bavnegård boringen, Bjerreskov 1975) kan skifrene i F2 formodentlig henføres til *acinaces* zonen (Fig. 5).

Log-enheden F3 er delvis repræsenteret i Billegrav 1 (12-2m) som en serie grå siltskifre (facies 4) med talrige tynde, calcitcementerede bænke. Disse bevirker en klar ændring i log-mønstret. Dette skyldes, at gamma-strålingens intensitet betinges af mængden af radioaktivt stof pr. vægtenhed og ikke pr. volumenenhed af sedimentet. En calcitcimentering vil følgelig resultere i en

formindsket gamma-stråling (Rider 1986). En tolkning af gamma-loggen fra Sømarmen 2 indikerer, at de calcitcementerede bænke i facies 4 er begrænset stratigrafisk til et interval af ca. 17 m tykkelse (Fig. 5). Den øverste del af dette interval er henført til *acinaces* zonen (Bjerreskov 1975: fig.5, 0–10 m).

Log-enhed F4 er repræsenteret i Sømarmen 2, 31–11 m (Fig. 5). Den karakteriseres af et højt gennemsnitligt strålingsniveau med en række peaks samt et enkelt markant minimum. Enhed F4 er korreleret til skifre, hvis graptolitfauna tilhører *revolutus*, *gregarius* og *convolutus* zonerne. Det markante minimum korreleres til kalkstenene (15–17 m i Øleå profilet) og toppene modsvarende bentonit lag (18–24 m i Øleå profilet, Bjerreskov 1975: fig. 5). En yderligere opdeling af F4 i op til 3 underenheder vil muligvis kunne gennemføres i fremtiden, når supplerende data er tilvejebragt.

Log-enhed F5 er delvis repræsenteret i Sømarmen 2, 11–7 m (Fig. 5). Den er karakteriseret af et markant og brat fald i strålingsniveauet i forhold til F4. Et tilsvarende lithologisk skift til en mere siltrig skifer ses ved 33,5 m i Øleå profilet mellem skifre tilhørende henholdsvis *convolutus* og *turriculatus* zonerne. Log-enhed F5 afventer flere data.

Cyrtograptus Skiferen, log-enhed G

Cyrtograptus Skiferen omfatter ca. 75 m grå silt-skifre og grågrønne bioturberede muddersten samt enkelte, tynde bentonit lag (Bjerreskov 1975). Den nedre del af *Cyrtograptus* Skiferen er blottet langs Øleå. På grund af lagseriens generelle hældning forekommer yngre silure lag i det sydøstlige hjørne af den forkastningsblok, som Øleå ligger i (Fig. 1). Disse lag findes ikke blottet, men de er i 1989 gennemboret ved Dueodde Golfbane og beskrives nedenfor (boringen Golfbanen 1, DGU ark. nr. 248.054). Længere mod syd, ved Stenodde, findes de yngste silure lag på Bornholm, beskrevet af Bjerreskov & Jørgensen (1983). Den silure lagserie afspejler begyndelsen på dannelsen af et bassin med stor indsunkning og hurtig sediment-akkumulation syd for Bornholm. Evidenser herfor findes i seismiske data (Vejbæk 1985).

Boringen Golfbanen 1, DGU ark. nr. 248.054

Borearbejdet udførtes ved Dueodde Golfbane (Fig. 1,5) i april 1989 af firmaet Bornholms Brøndboring. Boringen er 79 m dyb og går ned i palæozoiske skifre fra 7 m dybde. Der er kun målt gamma-log i de øverste 72 m, idet bunden af hullet var skredet sammen. Der blev af brøndborenen udtaget 8 prøver af cuttings og disse danner grundlag for den lithologiske beskrivelse. M. Bjerreskov har i to prøver identificeret fragmenter af *Monograptus cf. flemingi*, som er en karakteristisk graptolit i Wenlock, Nedre Silur, undtagen den ældre del. Prøvernes alder kan derfor ikke angives til nogen bestemt graptolitzone inden for Wenlock, men skifrene i Golfbanen 1 repræsenterer sandsynligvis *riccartonensis* zonen eller yngre zoner (Bjerreskov, pers. comm.). På Bornholm har Bjerreskov & Jørgensen (1983: fig. 6) påvist *centrifugus* zonen ved Øleå og *lundgreni* zonen ved Stenodde, og lagserien i Golfbanen 1 repræsenterer dermed en del af det mellemiggende interval. Den nedre del af *Cyrtograptus* Skiferen er sen Llandovery og tilstedeværelsen af *M.cf. flemingi* indikerer derfor, at *Cyrtograptus* Skiferen ikke er gennemboret i Golfbanen 1.

Lithologisk er prøverne ret ensartede og karakteriseres af mørkegrå, lokalt grågrønne, fissile, siltrige skifre, som stedvis er laminerede, og som stedvis indeholder sporfossilet *Chondrites*. Mineralogisk domineres prøverne af kvarts, og herudover findes plagioklas, kaolinit, chlorit og muskovit samt ofte pyrit. Mineralerne er bestemt semikvantitativt ved XRD i uorienterede præparater af nedknuste »bulk« prøver (Fig. 4). Prøverne er bemærkelsesværdigt ensartede med 3522B som eneste markante undtagelse. Sidstnævnte prøve har et meget stort indhold af såvel plagioklas som lerminerale og kunne muligvis repræsentere et bentonit lag.

Log-enhed G er delvis repræsenteret i Golfbanen 1, 72–9 m (Fig. 5). Gamma-loggen viser et ret ensartet strålingsniveau, som indikerer relativt små lithologiske variationer. Det markant lavere strålingsniveau i de øverste 9 m skyldes dæmpningen fra forerøret. Det er ikke muligt at demonstrere nogen korrelation mellem gamma-loggen fra Sømarmen 2 og Golfbanen 1 i god overensstemmelse med ovennævnte palæontologiske data. Korrelationen mellem Sømarmen 2 og

Øleå profilet (Fig. 5) indicerer, at basis af *turriculatus* zonen findes i toppen af Sømarken 2, mens Golfbanen 1 ikke når toppen af *centrifugus* zonen. Det er sandsynligt, at boringen Golfbanen 1 skulle have været ca. 50 m dybere (tykkelsen af *turriculatus-centrifugus* zonerne), Bjerreskov (1975) for at muliggøre en sikker gamma-log korrelation med Sømarken 2.

Lateral korrelation af logs

Udover de allerede nævnte borer: Skelbro 1, Billegrav 1, Sømarken 2 og Golfbanen 1 foreligger der gamma-logs fra tre andre relativt tætliggende borer: Sømarken 3 og 4 samt Billeleshøj (Fig.1), der kan inddrages i en diskussion af den laterale kontinuitet af de sedimentære facies.

Figur 5 viser, at det med stor sikkerhed er muligt at korrelere såvel log-enheder som underenheder lateralt. Da log-enhederne er sammenfaldende med de lithostratigrafiske enheder, demonstreres også disses ensartede opbygning. Ved korrelationen mellem Billeleshøj og Billegrav 1 bemærkes, at strålingsintensiteten i Billegrav 1 generelt er højere end i Billeleshøj. Dette skyldes forskelle i borediameter: 2" i Billegrav 1 mod 4½" i Billeleshøj. Det samme forhold ses ved sammenligning af Skelbro 1, diameter 2", med Sømarken borerne, som er 8" i diameter.

Ved korrelationen ses, at hele den del af lagserien, som er dokumenteret i Skelbro 1, optræder i såvel Sømarken 2,3 og 4 som i Billeleshøj. Den eneste forskel borerne imellem ses i den samlede tykkelse af Alun Skiferen, som i Skelbro 1 er 33 m, hvorimod den i de øvrige er 27–28 m. Det er især underenheten B3, som er tykkere i Skelbro 1.

Dicellograptus Skiferen, som kendes fra Billegrav 1, er fuldstændigt repræsenteret i Billeleshøj og i Sømarken 2,3 og 4. Formationen ses at have en konstant tykkelse på ca. 23 m, og også de enkelte underenheder viser stor lateral kontinuitet. En detaljeret korrelation viser, at der i Billegrav 1 mangler de nederste ca. 7 m af enhed D1.

Jerrestad Mudderstenen optræder i alle fem borer, men er dog ikke fuldt repræsenteret i Sømarken 4. I modsætning til *Dicellograptus* Ski-

feren ses Jerrestad Mudderstenen at variere i tykkelse fra 16 til 21 m, med størst tykkelsesvariation inden for log-enhed E2.

Rastrites Skiferen er ikke komplet i Billegrav 1 og er derudover kun repræsenteret i Sømarken 2 og 3. Dog er de nederste få meter truffet øverst i Billeleshøj. *Rastrites* Skiferen er således helt eller delvis borte-roderet i de borer, der ligger længst »updip«. Log-enhederne F1 og F2, der er de eneste F-enheder, som er komplette i mere end en boring, udviser ingen tykkelsesvariationer.

Den sikkerhed, hvormed log-enhederne kan korreleres, dokumenterer den laterale kontinuitet af de lithostratigrafiske enheder og dermed af de sedimentære facies. Disse er tolket som aflejret på den ydre shelf (Pedersen 1989), og deres konstante log-mønstre bekræfter, at ensartede aflejningsprocesser karakteriserede større arealer end det, som afgrænses af borerne. De konstaterede tykkelsesforskelle understreger, at der har været lokale variationer i sedimentakkumulatio- nen. Det ville være interessant, om fremtidige målinger af gamma-logs ville sætte os i stand til at følge de lithostratigrafiske enheder over hele Bornholm og eventuelt til Skåne.

Udover at anvende gamma-logs til sedimentologiske og stratigrafiske undersøgelser kan de også anvendes strukturgeologisk. For eksempel ligger overgrænsen af log-enhed B4 66 m u. terræn i Sømarken 3 og 112 m u. terræn i Sømarken 2. Det kan deraf beregnes, at denne grænse har en tilsyneladende hældning på 4°, hvilket er i god overensstemmelse med Bjerreskov (1975). Det er derfor sandsynligt, at der ikke optræder større forkastninger mellem de to borer.

Gamma-loggens geologiske anvendelighed afhænger af muligheden for at genkende gamma-log mønstrene og afhænger dermed af den lithologiske variation. Genkendeligheden øges af, at den nedre palæozoiske lagserie på Bornholm kendetegnes af talrige hiati, hvilket betyder, at der oftest er skarpe overgange mellem de forskellige enheder. I de kambriske og ordoviciske skifre er variationen så stor, og de enkelte enheder så tynde, at 15–20 m dybe borer med tilhørende gamma-log er tilstrækkelig til at fastfæste den stratigrafiske position. De silure skifre er mere monotone, og derfor kræves betydeligt flere meter log for en sikker stratigrafisk bestemmelse.

Konklusion

De målte gamma-logs i borerne igennem de kambro-silure skifre på Bornholm har vist:

At det er muligt at definere syv log-enheder, betegnet A-G, hver svarende entydigt til en lithostratigrafisk enhed på formationsniveau. Den samlede tykkelse af enhederne er mindst 250 m, idet tykkelserne af F5 og G ikke er kendt.

At det er muligt at opstille underenheder i flere af log-enhederne. Grænserne mellem underenhederne svarer i nogle lithostratigrafiske enheder til facies grænser (D1-D2, D2-D3, F1-F2), mens flere underenheder også kan ligge inden for en enkelt facies (B1-B4, E1-E2). Underenhederne afspejler facies variationer med en stor lateral udbredelse, fordi underenhederne uden vanskeligheder kan korreleres over afstande af flere kilometer.

At der ved den laterale korrelation mellem borerne, foretaget på basis af underenhederne, kan konstateres lokale tykkelsesvariationer af enkelte underenheder.

At gamma-log mønstret i ca. 75 m af *Cyrtograptus* Skiferen for første gang er dokumenteret (Golfbanen 1) og udviser et betydeligt mere ensformigt strålingsniveau end observeret i de kambro-ordoviciske skifre.

At anvendelse af gamma-logging i forbindelse med udførelse af vandforsyningsboringer i de sydbornholmske forkastningsblokke har stor praktisk værdi, idet den nøjagtige stratigrafiske position af lagene kan bestemmes hurtigt. Dette har især betydning for beslutningen om eventuel fortsættelse af borearbejde til større dybde for at nå horisonter, der kan være vandførende.

Det må imidlertid erkendes, at den nuværende

viden om vandføringsevnen i den kambro-silure del af lagserien på Bornholm ikke er særlig detaljeret. Erfaringerne viser dog, at disse lag kun i begrænset omfang kan benyttes som grundvandsreservoir (Gravesen & Rasmussen 1980). Muligvis kan Rispebjerg Sandstenen, Komstad Kalken samt den calcitcementerede del af *Rastrites* Skiferen (log-enhed F3) i forbindelse med forkastningsbetinget opsprækning have en vis vandføringsevne, men ikke i nær samme størrelsesorden som observeret i de nedre kambriske sandsten.

Tak

Borearbejdet i forbindelse med Skelbro 1 og Billegrav 1 blev finansieret af Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd (j.nr. 11-4482) og Energi styrelsen (EFP-83, 2251-302) og udført med mandskab og materiel udlånt af Grønlands Geologiske Undersøgelse. Tilladelse til at bore blev givet af Fredningsnævnet for Bornholms Amts fredningskreds (j.nr. 70/1984) og af gårdejer Mogens Kofoed, Billegravgård. Cuttingsprøverne fra Golfbanen 1 blev stillet til rådighed af Bornholms Brøndboring og Danmarks Geologiske Undersøgelse. Terraqua A/S gav tilladelse til brug af gamma-logs fra Sømarken 2-4. Teknisk assistance blev ydet af M.Bjerreskov, J.Boserup, B.Buchardt, T.Cederberg, A.C.Clausen, A.M.-Nielsen, A.T.Nielsen, S. Sjørring og K.Villadsen. Jacob Egede digitaliserede gamma-loggene fra Billeshøj, Billegrav 1, Golfbanen 1 og Skelbro 1. Manuskriptet blev gennemlæst af M.Bjerreskov, B. Larsen og S. Sjørring. G.Pedersen renskrev manuskriptet og R.Madsen tegnede figurerne. Vi retter vor bedste tak til de nævnte personer og institutioner.

Litteratur

- Andersson, A., Dahlman, B. & Gee, D. G. 1983: Kerogen and uranium resources in the Cambrian alun shales of the Billingen-Falbygden and Närke Areas, Sweden. *Geol. Föreh. Stockholm Förh.*, 104, 197-209.
- Bai, W. & Rasmussen, K.R. 1986: *Logging i dybe vandforsyningsboringer med udvalgte eksempler fra Midtjylland. Kursus i vandforsyningsteknik XXXV*, 1986. Vandteknisk Forening, 121-140.
- Bai, W. & Schmidt, H. 1986: Borehulslogging som et hydrologisk værktøj. *Vandteknik*, nr. 4, 113-122.
- Berg-Madsen, V. 1985: The Middle Cambrian of Bornholm, Denmark: A stratigraphical revision of the lower alum

- shale and associated anthraconites. *Geol. Fören. Stockholm, Förh.* 106, 357-376.
- Bergström, S.M. & Nilsson, R. 1974: Age and correlation of the Middle Ordovician bentonites on Bornholm. *Bull. geol. Soc. Denmark*, 23, 27-48.
- Bjerreskov, M. 1975: Llandoveryan and Wenlockian graptolites from Bornholm. *Fossils and Strata*, 8, 94 p.
- Bjerreskov, M. 1986: Ordovician-Silur grænsen på Bornholm. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1985*, 15-18.
- Bjerreskov, M. & Jørgensen, K.Å. 1983: Late Wenlock graptolite-bearing tuffaceous sandstone from Bornholm, Denmark. *Bull. geol. Soc. Denmark*, 31, 129-149.
- Buchardt, B., Clausen, J. & Thomsen, E. 1986: Carbon isotope composition of Lower Palaeozoic kerogen: Effects of Maturation. *Advances in Organic Geochemistry 1985. Org. Chem.*, 10, 127-134.
- Engell-Jensen, M. 1980: Den spektrale, naturlige gamma-log. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1980*, 47-56.
- Gravesen, P. & Bjerreskov, M. 1982: Guide to excursion in Bornholm. Tornquist Project No. 86. *Dann. geol. Unders.* 84 p.
- Keldstrup, N., Binzer, K. & Knudsen, J. 1981: Hydrogeologiske forhold i Suså området. *Dansk Komite for Hydrogeologi. Rapp. Suså-H17*. 43 p + bilag.
- Klitten, K. & Sørensen, T. 1975: Geofysiske borehulsmålinger som redskab ved geohydrologiske undersøgelser. *Vandteknik*, 1, 1-9.
- Kærgaard, H. 1978: *Sømarkens Vandværk - geoelektriske sonderinger og gamma-logs*. Upubliceret rapport, Terraqua TQ 78012. Kalundborg 5 sider + 17 bilag.
- IAEA-Wien 1971: Nuclear Well Logging in Hydrology. *International Atomic Energy Agency, Technical Report Series* No. 126. Vienna, 90p.
- Nielsen, A.T. 1988a: Bornholms Geologi I, Palæozoikum. *VARV 1988-2*, 44-63.
- Nielsen, A.T. 1988b: Bornholms Geologi II, Palæozoikum. *VARV 1988-3*, 92-111.
- Pedersen, G.K. 1989: The sedimentology of Lower Palaeozoic black shales from the shallow wells Skelbro 1 and Billegrav 1, Bornholm, Denmark. *Bull. geol. Soc. Denmark*, 37, 151-73.
- Poulsen, V. 1966: Cambro-Silurian stratigraphy of Bornholm. *Meddr. Dansk geol. Foren.*, 16, 117-137.
- Rasmussen, L.Aa. & Gravesen, P. 1980: Hydrogeologisk kortlægning af Bornholms Amtskommune, Afsnit 2. *Dann. geol. Unders.*, 85p + kort.
- Rider, M.H. 1986: *The geological interpretation of well logs*. Blackie and Son, Glasgow. 175 p.
- Snäll, S. 1988: Mineralogy and maturity of the Alum Shales of South-Central Jämtland, Sweden. *Sver. geol. Unders.*, Ser. C, No. 818, 46 p.
- Surlyk, F. 1980: Denmark. - In: *Geology of the European countries Denmark, Finland, Iceland, Norway, Sweden*, 1-50. Dunod. Published in cooperation with the Comité National Français de Géologie (C.N.F.G.) on the occasion of the 26th International Geological Congress.
- Surlyk, F. 1983: Source rock sampling, stratigraphical and sedimentological studies in the Upper Palaeozoic of the Jameson Land basin, East Greenland. *Rapp. Grønlands geol. Unders.*, 115, 88-93.
- Sørensen, T. 1978: Geofysiske borehuls-logs i Nedre Kambrium på Bornholm. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1977*, 1-3.
- Vejbæk, O.V. 1985: Seismic stratigraphy and tectonics of sedimentary basins around Bornholm, southern Baltic. *Dann. geol. Unders.*, Ser.A, 8, 30 p.