

# Alun Skiferen i Skandinavien

BJØRN BUCHARDT, ARNE THORSHØJ NIELSEN og NIELS HEMMINGSEN SCHOVSBO



Buchardt, B., Nielsen, A. T. og Schovsbo, N. H.: Alun Skiferen i Skandinavien. *Geologisk Tidsskrift*, hæfte 3, pp. 1–30, København, 1997–09–05.

Den skandinaviske Alun Skifer Formation er af mellem kambrisk til tidlig ordovicisk (Tremadoc) alder. Den er en typisk sortskifer med en atypisk geokemi og biologi. Formationen blev aflejret ved lave sedimentationshastigheder under veksellende, men lave oxiditetsforhold, den er lateralt og vertikalt meget ensartet, har et stort indhold af organisk materiale og spormetaller (herunder de højeste uran-koncentrationer kendt for nogen sort skifer) og indeholder en særegen fauna af overvejende bentske trilobiter. Den har endvidere gennemgået en kompleks begravelseshistorie under stærkt varierende varmepåvirkning forskellige steder i regionen. Endelig har skiferen været grundlag for en omfattende økonomisk udnyttelse i Skandinavien siden 1637. Nærværende afhandling giver en oversigt over skiferens aflejringshistorie, sedimentologi og palæontologi, dens organiske og uorganiske geokemi, dens termale udvikling og dens udnyttelseshistorie i Skandinavien. Derudover gives et forslag til en formel definition af Alun Skifer Formationen i Skandinavien ud fra en typesektion i Gislövshammar-2 boringen i det sydøstlige Skåne.

*Bjørn Buchardt, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350 København K, Arne Thorshøj Nielsen og Niels Hemmingsen Schovsbo, Geologisk Museum, Øster Voldgade 5–7, 1350 København K.*

## 1. Indledning

Den kambrisk-ordoviciske Alun Skifer i Skandinavien er en typisk *sortskifer*. Direkte oversat fra det engelske "*black shale*" dækker termen over laminerede, sorte skiferaflejringer med højt indhold af pyrit og organisk materiale og oftest berigede i spormetaller (f.eks. Tyson & Pearson 1991, Wignall 1994). Alun Skiferen udmærker sig blandt andre sorte skifre ved 1) at have en usædvanlig stor geografisk udbredelse, 2) at repræsentere et stabilt iltfattigt aflejringssmiljø gennem meget lang tid, 3) at kunne korreleres fra lokalitet til lokalitet takket være en særdeles detaljeret biostratigrafi, 4) at have et usædvanligt højt indhold af velbevaret organisk materiale, samt 5) at udvise de største uranberigelser i nogen kendt sort skifer. Derudover har Alun Skiferen gennemgået en kompleks termal historie, hvor identiske enheder kan følges fra områder uden varmepåvirkning til områder, der nærmer sig metamorfe forhold. Endelig har Alun Skiferen været en vigtig ressource for en lang række råstoffer, og dens økonomiske historie i Skandinavien er både alsidig og spændende.

Sorte skifre antages almindeligvis at være aflejret under iltfattige til iltfrie forhold. De er især blevet studeret af geokemikere, der har set den langsomme sedimentationshastighed og store metalberigelse som en oplagt mulighed for at undersøge geokemiske processer i overgangsfasen mellem havvand og sediment. Skiferens store indhold af marint organisk materiale gør dem endvidere til oplagte moderbjergarter, dvs. bjergarter, der ved opvarmning kan afgive olie og gas.

Sorte skifre er ikke ligeligt fordelt gennem den geologiske historie, perioder som Tidlig Palæozoikum og Kridt har f.eks. større hyppighed af sorte skifre end resten af Phanerozoikum. Denne fordeling af sorte skifre må nødvendigvis afspejle overordnede forhold i de globale kredsløb, bl.a. med relation til havniveauændringer, iskapper og atmosfærens sammensætning. Ideelt set kan man således betragte de sorte skifre som miljøarkiver, der indeholder oplysninger om bl.a. palæoklimatiske og palæoceanografiske forhold.

Nærværende oversigtsartikel er en opsummering af adskillige års arbejde med geokemiske, oliegeologiske og palæontologiske problemstillinger i Alun Skiferen i Baltoskandia<sup>1</sup>. Vores studier tog udgangspunkt i

<sup>1</sup> Baltoskandia anvendes her som betegnelse for Skandinavien, Finland og de landområder, der grænser op til den Finske Bugt og Østersøens østlige kyster (Martinsson 1974). Området er sammenfaldende med den vestlige del af det ældre palæozoiske Balto-Russiske Kontinent eller Baltica.

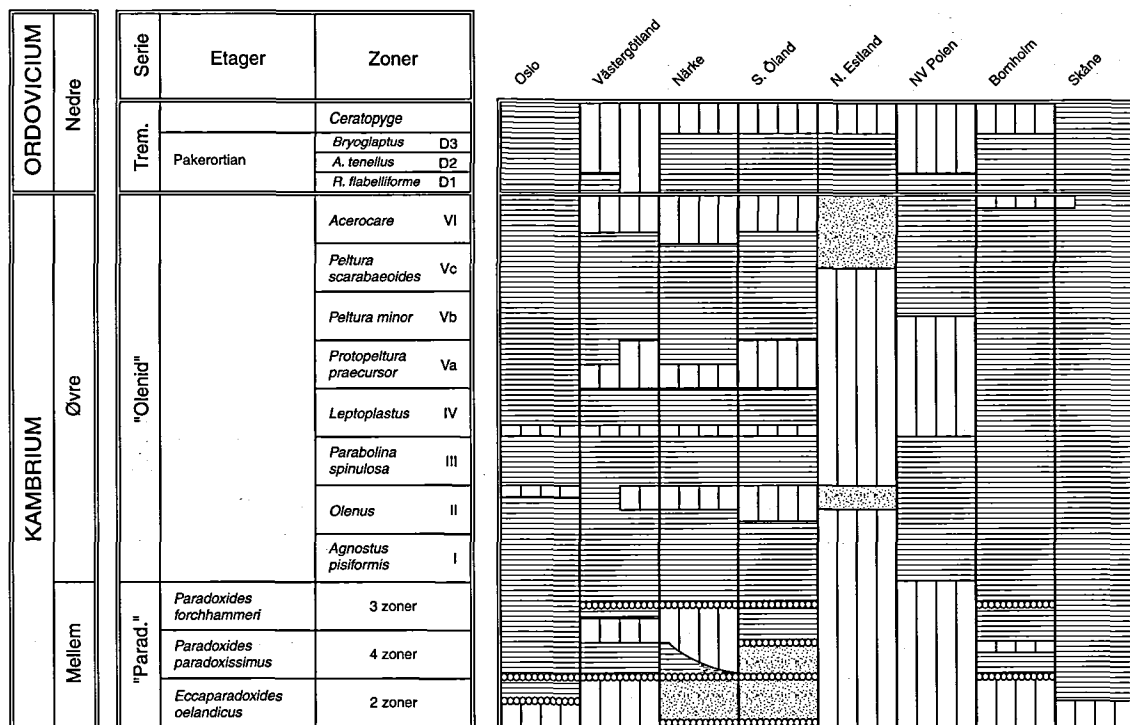


Fig. 1. Stratigrafisk inddeling af Alun Skifer Formationen i det sydlige Baltoskandia. Baseret på Westergård (1922, 1953), Henningsmoen (1957), Martinsson (1974) og Andersson et al. (1985). Vandret streghsignatur: skifer; lodret streghsignatur: aflejringer mangler; prikssignatur: sand- og siltsten; cirkler: konglomerat.

den generelle interesse for skiferen som potentiel moderbjergart i 1980-erne. Samarbejde med det amerikanske olieselskab Amoco Production Company og den tyske føderale geologiske undersøgelse (BGR) i Hannover gjorde det siden muligt at udvide undersøgelserne til også at omfatte materiale fra borer i Østersøen, det nordlige Polen og Kattegat samt at udføre nye overfladenære borer på Öland, i Mellemserverige og i Skåne. I de senere år har vi videreført arbejdet med Alun Skiferen og andre nedre palæozoiske sorte skifre med støtte fra Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd i Danmark, idet fokus for undersøgelserne dog er flyttet fra kulbrintepotentiale til aflejringsmiljøer og havniveauændringer.

I forbindelse med vores aktiviteter omkring Alun Skiferen er der under cand.scient. uddannelsen i København blevet udført et antal specialestudier over mere afgrænsede emnekredse (Dons 1989, Olsen 1989, Wilken 1994, Schovsbo 1995, J. K. Nielsen 1996). Resultater fra disse studier er inddraget i artiklen. Mere populære fremstillinger med relation til Alun Skiferen kan findes i tidsskrifterne *Varv* (A. T. Nielsen 1988a, 1988b og 1996) og *Naturens Verden* (Buchardt 1994). Generelle oversigter over Alun Skifer Formationen i Baltoskandia er givet i Martinsson (1974), Hessland & Armands (1978), Thickpenny (1984 og 1987) og Andersson et al. (1985).

## 2. Terminologi og stratigrafi – og et forslag til en formel definition

Sorte skifre, hvorfra der kan udvindes alunsalt (kaliumaluminiumsulfat), er fra gammel tid blevet benævnt alunskifre (tysk Alaunschiefer, engelsk alum shale) og alunproduktion ved ristning og udludning af skifer daterer sig i hvert fald tilbage til 1500-tallet (Stoltz 1932). I Skandinavien blev termen alunskifer første gang anvendt som betegnelse for de kambriske sorte skifre i anden halvdel af 1700-tallet (Hermelin 1767, Rinman 1788), men først med Angelin (1854) defineredes den inddeling, der efter revision af Linnaeus (1869) kendes som *Paradoxides* skifer, *Olenid* skifer og *Dictyonema* skifer (den navngivende graptolitslægt *Dictyonema* henregnes nu til *Rhabdinopora*, se Erdtmann 1982).

Den nuværende meget detaljerede biostratigrafiske inddeling af Alun Skiferen i Skandinavien (se Fig. 1) skyldes den svenske palæontolog A. H. Westergård (f.eks. Westergård 1909, 1922, 1946, 1947 og 1953). Efter revision af G. Henningsmoen (Henningsmoen 1957) omfatter Alun Skiferen nu 9 trilobitzoner i Mellem Kambrium og 8 trilobitzoner og 32 subzoner i Øvre Kambrium. De nedre ordoviciske (Tremadoc) *Dictyonema* og *Ceratopyge* skifre er opdelt i 7 graptolitzoner (Westergård 1909, Tjernvik 1958).

I mangel af et formelt litostratigrafisk navn indførte

Gee (1972) den engelske betegnelse *Alum Shale Formation* for den samlede kambro-ordoviciske sortsiefer enhed. Denne nomenklatur blev fulgt af Owen et al. (1990) i deres opdeling af de ordoviciske aflejringer i Oslo-området og af Vejrbæk et al. (1994), der opgraderede Alum Skiferen til en litostratigrafisk gruppe: *Alum Shale Group*. De valgte at lade enheden omfatte såvel de mellem kambriske *Exsulans* og Andrarum Kalksten som de sorte skifre i Mellem til Øvre Kambrium og Tremadoc. Endelig inkluderedes også *Ceratopyge* Kalkstenen fra øverste Tremadoc. I deres nomenklaturforslag (Vejrbæk et al. 1994) benævntes den bornholmske *Dictyonema* Skifer som Limensgade Leddet, mens man opretholdt den traditionelle skelnen mellem Nedre og Øvre Alum Skifer adskilt af Andrarum Kalkstenen (Poulsen 1966).

I nærværende arbejde har vi valgt at følge Gee (1972) og definerer Alum Skifer Formationen i det sydlige Skandinavien som den samlede litostratigrafiske enhed mellem de nedre til mellem kambriske sand- og siltsten og de nedre ordoviciske (Øvre Tremadoc til Arenig) kalksten. Ifølge denne definition omfatter Alum Skifer Formationen både *Exsulans* Kalkstenen og Andrarum Kalkstenen som led, ligesom de ufornede enheder *Dictyonema* skifer og *Ceratopyge* skifer er inkluderet i formationen. Derimod opretholder vi den overliggende *Ceratopyge* Kalksten (og dens norske ækvivalent Bjørkåsholmen Formationen, Owen et al. 1990) som en selvstændig formation, der definerer Alum Skiferens øvre grænse. Vi foreslår at benytte boringen Gislövshammar-2 (Nielsen & Buchardt 1994) fra Gislövshammar syd for Simrishamn i Skåne som typesektion for Alum Skifer Formationen (Fig. 2). Denne boring omfatter 80 m Alum Skifer og udviser en næsten komplet stratigrafisk udvikling af formationen (Nielsen & Buchardt 1994, Schovsbo 1995). Boringen er samtidig den grundigst undersøgte, hvad angår geokemiske variationer i Alum Skiferen (se også afsnit 8).

Aflejringer identiske med Alum Skifer Formationen er i det østlige og sydlige Østersøområde beskrevet under lokale navne. Disse omfatter Djupvik Formationen på Öland (van Wamel 1974), Türisalu Formationen i Estland (Kaljo et al. 1985), Kaporye Formationen i St. Petersburg området (Popov et al. 1997) og Piaśnica Formationen i dybe borer i det nordøstlige Polen (Bednarczyk 1984). Tilsvarende aflejringer af overvejende sen kambrisk alder kendes fra England (Warwichshire, Rushton 1974), det østligste Newfoundland (Hutchinson 1962) og New Brunswick (Hayes & Howell 1937).

### 3. Den geologiske ramme om Alum Skiferen

De nedre palæozoiske aflejringer i Baltoskandia er i de senere år blevet indarbejdet i en generel plade-tektonisk model, bl.a. gennem de internationale geofysiske projekter EUGENO-S og BABEL (EUGENO-

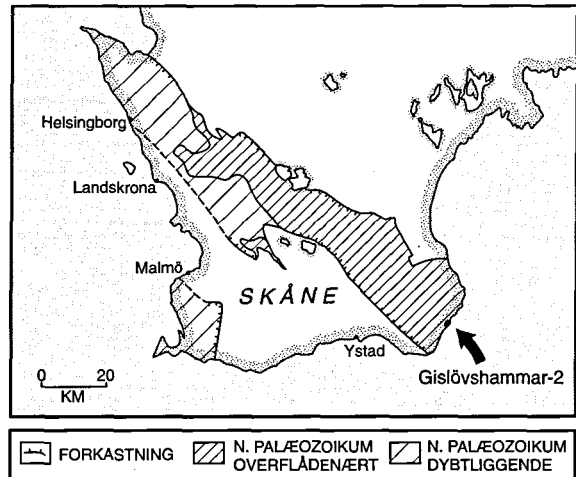


Fig. 2. Lokalisering af Gislövshammar-2 boringen i det sydøstlige Skåne. Boringen foreslås som typesektion for Alum Skifer Formationen.

S Working Group 1988, Berthelsen 1992). Ifølge disse rekonstruktioner aflejredes Alum Skiferen på de nuværende vestlige og sydlige dele af et veldefineret tidligt palæozoisk kontinent, der almindeligvis omtales som Det Balto-Russiske Kontinent eller Baltica (Berthelsen 1992). Kontinentet rev sig løs fra det proterozoiske Rodinia Kontinent i slutningen af Prækambrium og eksisterede som en separat enhed indtil kollisionen med Laurentia (Nordamerika, Grønland og Nordvestskotland) og Avalonia (Midtengland til Nordtyskland) i Silur. Palæogeografiske rekonstruktioner viser en beliggenhed af kontinentet på høje, sydlige breddegrader (45°–60°S) i Kambrium (Scotese & McKerrow 1990), og ifølge de nyeste palæomagnetiske data var kontinentet roteret næsten 180° ved begyndelsen af perioden (Torsvik 1996). Der er ingen indikation på aktive pladegrænser langs kontinentet gennem Kambrium, og subduktion langs Iapetus-oceanets rand kendes først fra Mellem Ordovicium (Bergström & Gee 1985).

Baltica omfattede Det Baltiske Skjold i vest og Den Østeuropæiske Platform i øst så langt som til de nuværende Uralbjerge. Områderne sydvest for Det Baltiske Skjold, der i dag tilhører Skagerrak-Kattegat Platformen, Det Danske Bassin og Ringkøbing-Fyn Højderyggen, var ligeledes en del af Baltica (Fig. 3). Teisseyre-Tornquist Zonen (TTZ) i Polen og Ukraine definerer den gamle pladegrænse mellem den østeuropæiske del af Baltica og det yngre centraleuropæiske kompleks af mindre plader. Sorgenfrei-Tornquist Zonen (STZ), der udgør den nordlige forlængelse af TTZ i det sydlige Skandinavien, er derimod en intrakraton forkastningszone med prækambrisk grundfjeld på begge sider. Den vestlige fortsættelse af den ældre palæozoiske pladegrænse kan følges som en dybtliggende struktur sydvest for STZ, hvor den formodent-

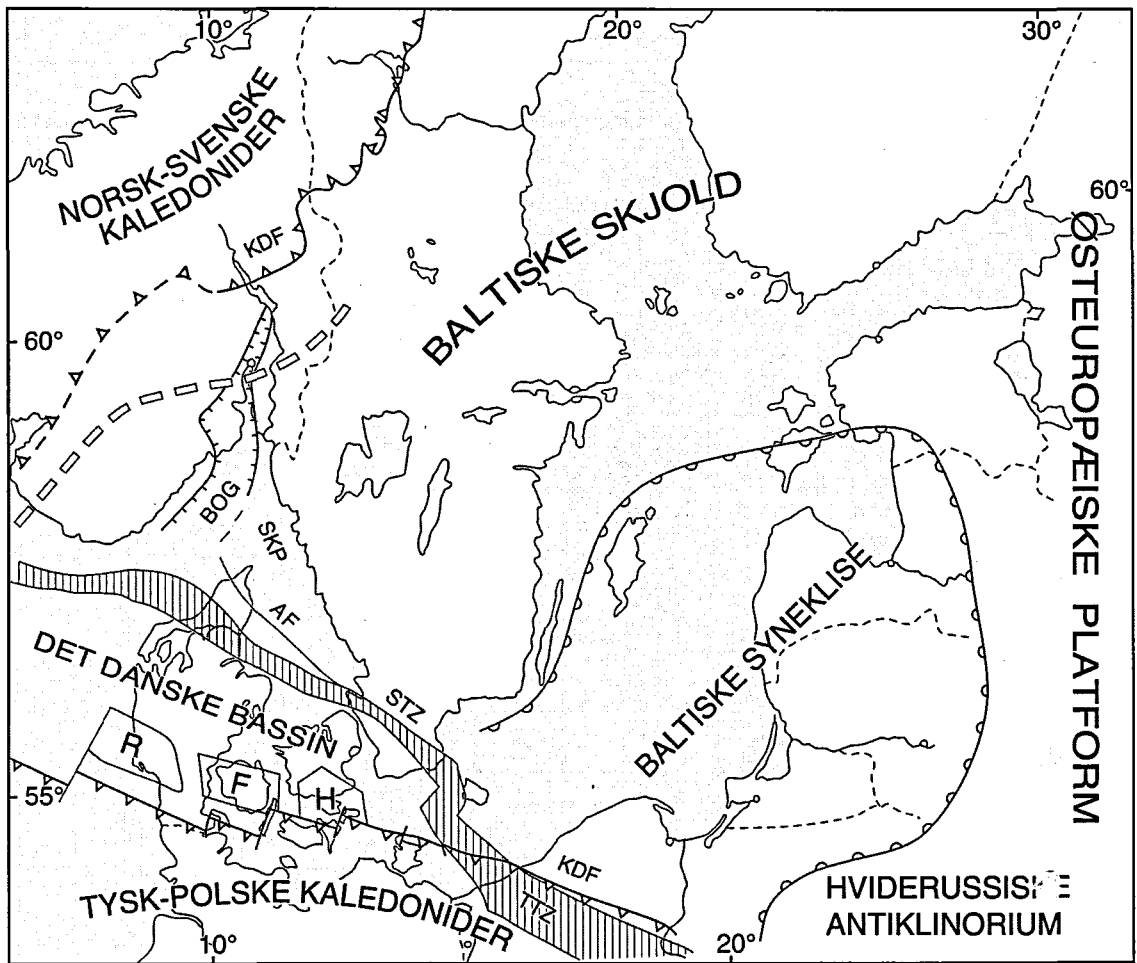


Fig. 3. Større strukturelle enheder i det sydlige Baltoskandia. AF: Anholt Forkastningen. BOG: Bamble-Oslo Graven. KDF: Kaledoniske Deformations Front. RFH: Ringkøbing-Fyn Højderyggen. SKP: Skagerrak-Kattegat Platformen. STZ: Sorgenfrei-Tornquist Zonen. TTZ: Teisseyre-Tornquist Zonen. Baseret på EUGENO-S Working Group (1988).

lig er sammenfaldende med den postulerede trans-europæiske forkastning (Berthelsen 1992) syd for Den Kaledoniske Deformationfront i Syddanmark, Nordtyskland og Polen (herefter omtalt som den tysk-polske KDF, se Fig. 3). Detaljerne omkring denne pladegrænse er stadig uklare, men det kan ikke udelukkes, at en oprindelig ydre baltisk shelf er begravet under de kaledoniske overskydningsdækker i Nordtyskland.

Nedre palæozoiske aflejringer kendes fra store dele af Baltica (Fig. 4). I den baltoskandiske del findes de som blottede eller overfladenære lag på Det Baltiske Skjold og som dybtliggende lag begravet under palæozoiske eller yngre aflejringer i Nordsøen, Danmark, det nordøstlige Polen og Østersøområdet. Udeformede nedre palæozoiske aflejringer afgrænses mod vest og syd af de kaledoniske fronter og mod sydøst af Det Hviderussiske Antiklinorium. Nord herfor fortsætter aflejringerne mod øst ind over Den Østeuropæiske Platform i Moskva Bassinet. Afgrænsningen mod nord

og nordøst i Sverige og Finland er erosionsbetinget.

Aflejring af de nedre palæozoiske bjergarter blev i overvejende grad kontrolleret af udviklingen i Iapetus-oceanet og Tornquist-havet vest og syd for Baltica (Ziegler 1990, EUGENO-S Working Group 1988, Berthelsen 1992). Den kambro-silure sedimentationscyklus indledtes i Sen Prækambrium og tidligste Kambrium med aflejring af grovklastiske bjergarter i rift-bassiner, f.eks. i de norske sparagmitbassiner. Herefter blev kontinentet gradvist oversvømmet, og grovklastiske, kystnære aflejringer afløstes af kalk- og mudderaflejringer i det meste af det sydlige Baltoskandia. Fra Tidlig Ordovicium til mellemste Silur eksisterede to veldefinerede aflejringsmiljøer i det baltoskandiske område: lavvandede kalkaflejringer på Det Baltiske Skjold og finkornede, siliciklastiske aflejringer på palæoshelfen vest og syd herfor. Sedimentationen var langsom i begge områder, og den maksimale aflejringstykkelser nåede ikke over 600 m. I Sen

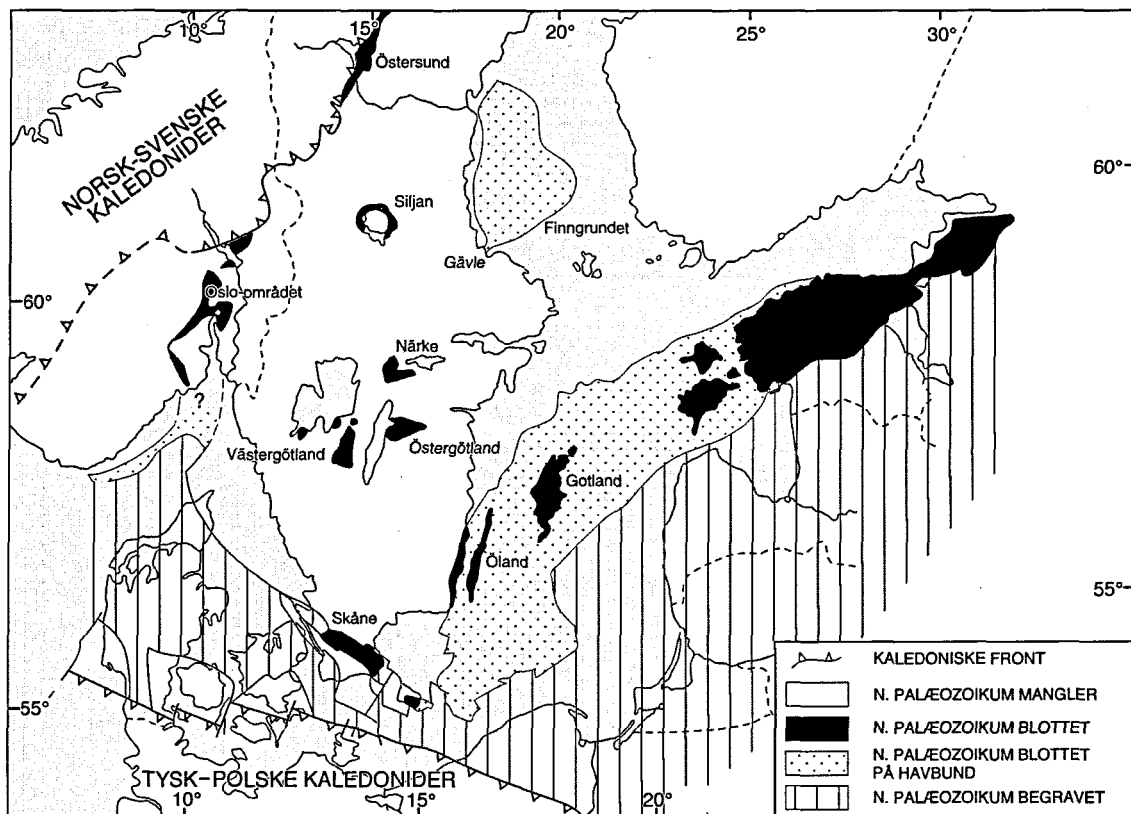


Fig. 4. Udbredelsen af de nedre palæozoiske aflejringer udenfor de Norsk-Svenske Kaledonider i Baltoskandia. På det sydøstligste område fra Letland til Kaliningrad samt Siljan-området har Alun Skiferen samme udbredelse.

Silur udvikledes et hurtigt indsynkende forlandsbassin på shelfen foran de tysk-polske Kaledonider, hvor der aflejreredes tre til fire km finklastiske sedimenter (Teller & Korewjo 1968, EUGENO-S Working Group 1988, Vejgård et al. 1994). Et tilsvarende forlandsbassin er postuleret langs randen af de norsk-svenske Kaledonider på Det Baltiske Skjold (Samuelson 1997). Den kaledoniske bjergkædedannelse, der var et resultat af lukningen af Iapetus-oceanet og Tornquist-havet, omfattede foldning og deformation af shelfområderne vest og syd for Det Baltiske Skjold, mens aflejringerne på skjoldet ikke blev berørt i nævneværdig grad.

Senhercynisk hævnning og ekstensionstektonik i Karbon og Tidlig Perm førte til blotning og erosion af de nedre palæozoiske aflejringer langs Det Baltiske Skjold. Fra Sen Perm ses fornyet indsynkning i Den Baltiske Syneklise og det nydannede Danske Bassin, og nedre palæozoiske aflejringer er her begravet på stor dybde under mesozoiske og kænozoiske sedimenter (Grigelis 1991, Michelsen & Nielsen 1991, Vejgård & Britze 1994). På selve skjoldet har indsynkningen derimod været beskeden, og de nedre palæozoiske aflejringer findes i dagblotninger.

Alun Skiferens nuværende udbredelse i Baltoskan-

dia skyldes et samspil mellem tektoniske begivenheder og erosion. Et oprindeligt sammenhængende dække af skifer er i dag opdelt i talrige isolerede områder med hver deres tektoniske udviklingshistorie. På Det Baltiske Skjold findes uforstyrret Alun Skifer i Östergötland, Närke og Västergötland, hvor de nedre palæozoiske aflejringer hviler direkte på det peneplaniserede grundfjeld (Fig. 4). I Östergötland og Närke er de nedre palæozoiske bjergarter bevaret i nedforkastede områder, mens de i Västergötland findes som erosionsrester under permo-karbone sils (Priem et al. 1968). Her danner de typiske plateau bjerge med højder på til 250 m over det subkambriske peneplan (Kinnekulle, Billingen og Halle-Hunneberg). Alun Skiferen er også påvist submarint i et område øst for Gävle, hvor den udgør en mindre del af de overvejende ordoviciske aflejringer i Bottenhavet mellem Sverige og Finland (Boström et al. 1978, Thorslund & Axberg 1979). I de nedre palæozoiske bjergarter i Siljanområdet mangler Alun Skiferen (Martinsson 1974).

Seismiske undersøgelser viser, at nedre palæozoiske aflejringer optræder i hele området mellem STZ og Ringkøbing-Fyn Højderyggen (Liboriussen et al. 1987, EUGENO-S Working Group 1988, Thomas et

al. 1993). Alun Skiferen er påvist i Slagelse-1 boringen på Sjælland (Poulsen 1974, Thomsen et al. 1983) og Terne-1 boringen i Kattegat (Buchardt & Lewan 1987, Michelsen & Nielsen 1991). Dens udbredelse kan formodes at svare til den generelle udbredelse af Nedre Palæozoikum i området. Skiferen er blottet i den sydøstlige del af STZ i Skåne og på Bornholm, hovedsageligt som resultat af blokforkastning og strukturel inversion i Jura og Kridt (Surlyk 1980, Japsen 1992, Liboriussen et al. 1987, Norling & Bergström 1987). I Det Dansk-Polske Trug kendes nedre palæozoiske aflejringer fra seismisk kortlægning og dybe boringer (Vejbæk 1985, Vejbæk et al. 1994). Alun Skifer er påvist i G-14 boringen nordøst for Rügen og flere boringer i det nordlige Polen (Fig. 5).

I det sydøstlige Baltoskandia findes Alun Skifer blottet langs Den Baltiske Syneklises nordlige rand på Öland (Thorslund & Westergård 1938, van Wamel 1974), i Estland (Pukkonen & Buchardt 1994) og i St. Petersborg (Popov et al. 1997). Skiferen er påvist i boringer på Gotland (Ahlberg 1989) og i havområderne sydvest herfor (van Hengel 1989). Letland, Litauen, Kaliningrad og det nordøstligste Polen danner den sydøstlige del af syneklisen, og nedre palæozoiske aflejringer er her overlejret af devone eller yngre lag (Grigelis 1991, Brangulis et al. 1993). Alun Skiferen mangler i et område øst for en linie fra Gotland til det østligste Polen, sandsynligvis som et resultat af erosion i tidlig Ordovicium.

I Syd Norge er nedre palæozoiske aflejringer bevaret i Oslo-graven og i områderne nord herfor til den norsk-svenske Kaledoniske Deformationsfront (herafter omtalt som den norsk-svenske KDF, se Fig. 3). I Oslo-gravens nordlige del er aflejringerne foldede og deformerede som resultat af den kaledoniske (skandiske) hovedfoldning, mens den sydlige del er kraftigt påvirket af magmatisk aktivitet i Perm. Alun Skifer, der kendes fra hele området, er overalt omdannet gennem tektonisk og termal påvirkning. Bamble-Skagerak Gravsænkningen sydvest for Oslo-graven formodes at indeholde nedre palæozoiske aflejringer (Lie et al. 1993).

KDF i Sverige og Norge udgør ét sammenhængende område fra Finnmarken til Vestnorge, og Alun Skiferen er stedvist bevaret som allochton eller autochton lag i eller langs med de nederste kaledoniske napper. Størst udbredelse har skiferen i et område fra Östersund i Jämtland til Vilhelmina i Västerbotten, hvor lagene gennem tektonisk repetition kan nå tykkelser på op til 300 m (Gee 1972, Andersson et al. 1985, Snäll 1988). Alun Skiferen har ofte fungeret som glidezone for de laveste napper i det kaledoniske allochton, og overalt i området er skiferen deformet, varme-påvirket og delvist lavmetamorf omdannet (Kisch 1980, Snäll 1988).

I de norsk-svenske Kaledonider er der beskrevet adskillige forekomster af sorte fyllitter med forhøjet indhold af uran og vanadium og i enkelte tilfælde typiske Alun Skifer fossiler (f.eks. Størmer 1941, Gee

1980, Bergström & Gee 1985). Forekomsterne ses både i tektoniske vinduer over paraautochton grundfjeld og i højere beliggende napper. I Kölinapperne ses grafitiserede fyllitter med højt uran- og vanadiumindhold sammen med pudelava og andre vulkanske bjergarter fra formodede øbuekomplekser vest for Baltica (Sundblad & Gee 1985, Gee 1987). Der er således ganske overbevisende indikationer for en præ-kaledonisk udbredelse af Alun Skiferen over en vestlig palæoshelf, der strakte sig 200 til 400 km vest for den norsk-svenske KDF, og som i dag er dækket af det kaledoniske allochton. Længst mod nord i Norge kendes sorte skifer af samme alder som Alun Skiferen fra Digermulhalvøen i Varangerområdet (Erdtmann 1982, Nikolaisen & Henningsmoen 1985 og 1990).

#### 4. Alun Skiferens bestanddele: Sedimentologi og mineralogi

Alun Skifer Formationen er som tidligere nævnt bemærkelsesværdigt ensartet over store afstande. Litologisk består den af mørkebrune til sorte, organisk-rige muddersten og mudderskifer med underordnede kalk- og siltstenshorisonter (Fig. 6, 10 og 12, se også Thickpenny 1984, Andersson et al. 1985, Lewan & Buchardt 1989, Pedersen 1989). Den er almindeligvis lamineret og mangler spor af bioturbation undtagen i enkelte horisonter nær bund og top. Tynde siltrige og glaukonitholdige lag optræder især i formationens nedre dele. Den markante skifrihed, der ofte ses i bjergartsprøver fra dagblotninger, er et resultat af overfladeforvitring, mens bjergarten i friske boreprøver optræder sammenhængende og homogen.

Sorte, bituminøse kalksten – de såkaldte antrakonitter – er almindelige som konkretioner eller konkretionære lag i hele formationen (Fig. 15). De kendes på deres karakteristiske lugt af svovlbrinte fra friske brudflader og benævnes også stinksten. På svensk er de fra gammel tid blevet kaldt orsten, muligvis fordi de i knust tilstand blev brugt som medicin til svin (ornesten, se diskussion i Berg-Madsen 1989). I tilknytning til konkretionshorisonter ses i Mellem Sverige og på Öland lokalt udviklede, tynde kalkstensbænke opbygget af calcitcementerede skallag (Dworatzek 1987). Den grå, ca. 1 m tykke, bænke Andrarum Kalksten fra Mellem Kambrium i Skåne og på Bornholm og dens laterale ækvivalent *Exporrecta* Konglomeratet i Västergötland er den eneste kontinuert udbredte, ikke konkretionære kalkstensenhed i formationen. Tilsvarende enheder med lokal udbredelse er *Exsulans* Kalkstenen fra Mellem Kambrium og *Incipiens* Kalkstenen fra Tremadoc.

Alun Skiferens bundgrænse er tidstransgressiv fra vest mod øst. I den sydlige og vestlige del af Baltoskandia (Oslo-området, Skåne) optræder skiferen første gang i det tidligste Mellem Kambrium, hvor den

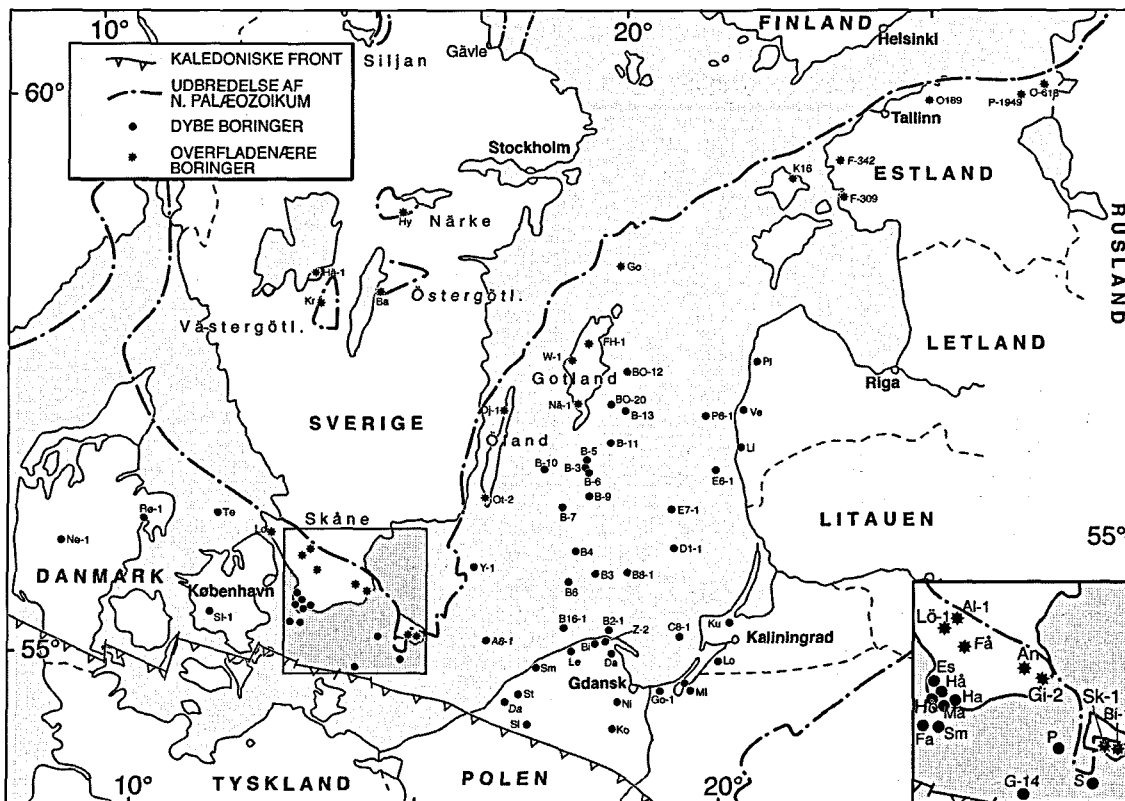


Fig. 5. Udvalgte borer i det baltoskandiske område, der har nået nedre palæozoiske lag. For data fra de enkelte borer henvises til Appendix 1 og 2.

overlejer nedre kambriske sand- og siltsten eller hviler direkte på grundfjeld (Westergård 1942 og 1944, Martinsson 1974). I Västergötland er de ældste skiferlag af midt-mellem kambrisk alder, mens den ældste Alun Skifer på Nordöland, i Polen og i G-14 boringen ved Rügen er sen kambrisk (Martinsson 1974, Bednarczyk 1984, Katzung et al. 1993). I Estland ses typisk Alun Skifer først i Tremadoc (Kaljo et al. 1985). Denne udvikling afspejler et gradvist stigende havniveau, hvor stadig større dele af Det Baltiske Skjold dækkedes af mudderaflejringer.

Alun Skiferens overgrænse er i flere områder erosivt betinget, og i f.eks. Västergötland mangler aflejringer fra Tremadoc næsten overalt. Hvor formationen er fuldt bevaret, defineres skiferens overgrænse ved basis af den regionalt udbredte *Ceratopyge* Kalksten aflejret i slutningen af Tremadoc. Denne kalksten repræsenterer et globalt fald i havniveau (*Ceratopyge* Regressive Event, Nicoll et al. 1992), der afsluttede det mere end 25 millioner år lange Alun Skifer regime i Baltoskandia.

Alun Skiferens tykkelse varierer fra under 1 m i randen af Den Baltiske Syneklise (nordlige Öland, Gotland, Estland og det østligste Polen (Fig. 7) til mere end 130 m i Terne-boringen i Kattegat (Buchardt &

Lewan 1987, Michelsen & Nielsen 1991). Tykkelsesvariationerne følger i grove træk de overordnede strukturelle enheder i det sydlige Baltoskandia. Bemærkelsesværdig er især overensstemmelsen mellem de relativt store mægtigheder i Skåne og Kattegat og forløbet af den langt senere anlagte STZ. Tilsvarende ses de største tykkelser i Oslo-området at være sammenfaldende med den senere Oslograv. Øjensynligt har disse områder allerede i kambrisk tid udgjort svaghedszoner i jordskorpen med større indsynkningshastighed end de omliggende områder. De mindre tykkelser syd for Skåne og Bornholm peger på en stabil ydre shelf med ingen eller kun begrænset indsynkning.

Mens skiferens tykkelsesformindskelse mod øst og nord i Sverige sandsynligvis afspejler de oprindelige aflejringsforhold, hvor de mindste tykkelser ofte er repræsenteret ved konglomerater, skyldes variationerne i den østlige del af Den Baltiske Syneklise senere erosion. Længere mod nord i Jämtland og Norrland i Sverige er det på grund af deformation og tektonisk repetition ikke muligt at vurdere Alun Skiferens oprindelige tykkelse.

Skiferens tykkelsesvariationer afspejler formationens fordeling mellem en kondenseret facies udviklet på Det Baltiske Skjold og en mere mægtig shelffacies

typisk for Skåne, Kattegat og det sydnorske område (Fig. 9). Alun Skiferen på platformen er sjældent over 25 m tyk, den er karakteriseret ved et højt indhold (op til 50%) af diagenetiske kalksten ofte udviklet som sammenhængende lag med intraformationelle konglomerater og cementerede skalgruslag, og skiferen omfatter mange hiati. Alun Skiferen på den tilgrænsende palæoshelf er generelt tykkere, indeholder mindre end 10% kalksten oftest udviklet som linseformede legemer, og viser en høj grad af stratigrafisk kontinuitet.

Mineralogisk adskiller Alun Skiferen sig ikke nævneværdigt fra andre sorte skifre. Den klastiske fase omfatter lerminerale (illit med underordnede forekomster af chlorit og kaolinit) og kvarts, mens den diagenetiske fase domineres af mikrokrySTALLIN pyrit (op til 20%) med underordnet feldspat, baryt og fosforit (Armands 1972, Pedersen 1989, Liu & Buchardt 1993). Pyritten optræder oftest som 1µ til 10µ store hindbærlignende (framboidale) korn i tæt kontakt til det organiske materiale, men kan også findes som lag eller konkretioner (J. K. Nielsen 1996). I den øvre kambriske skifer findes mm-store, tenformede pyritpseudomorfoser efter baryt og/eller gips (Callisen 1914). Baryt kendes også som sfæriske konkretioner op til 10 cm i diameter. Fosforit findes som imprægnering af skifer og fossiler i forbindelse med konglomerater og hiati.

De diagenetiske kalksten (antrakoniter) er opbygget af mikritisk til grovsparitisk calcit med underordnet indhold af pyrit (Dworatzek 1987, Dons 1989). Den mikritiske og finsparitiske antrakonit består af mørk grå til sort calcit med mange urenheder af ler og organisk materiale. Den er i sig selv strukturløs, men kan vise rester af lamination fra den muddermatriks, konkretionen er vokset i. Indlejret mellem de enkelte krystaller findes ler og organisk materiale. Den grovsparitiske antrakonit består af grå til brune, stænglede krystaller af calcit, der kan være op til 10 cm lange. Krystallerne, der oftest er uden urenheder, radierer ud fra en kerne af finsparitisk antrakonit. Strukturen benævnes cone-in-cone (Hansen 1945). Den grovsparitiske form kan udgøre fra 0% til 100% af en konkretion, den kan helt omslutte den finsparitiske, centrale del af konkretionen eller den kan være begrænset til konkretionens over- eller underside.

Konkretionsvæksten er uden tvivl begyndt i et tidligt diagenetisk miljø inden kompaktion af de omliggende mudderaflejringer. Kalkindholdet i de finsparitiske konkretioner afspejler sedimentets oprindelige porøsitet, der har ligget på mellem 60% og 85%. Væksten var sandsynligvis et resultat af forøget alkalinitet i porevandet som følge af sulfat reducerende bakteriers virksomhed, men kulstofisotopsammensætningen af karbonatkornene ( $\delta^{13}\text{C}$ -værdier mellem -15‰ og -2‰, Buchardt & Nielsen 1985) peger dog også på et tilskud af marint bikarbonat, sikkert fra opløsning af skalmateriale. Den store koncentration af konkretioner på platformen, hvor Alun Skiferen er præget af hiati, peger på en sammenhæng mellem

sedimentationsstop og konkretionsvækst, ligesom de mange konglomeratdannelser i forbindelse med konkretionslagene i disse områder kan tyde på periodevis submarin erosion, eventuelt relateret til kortvarige hav-niveausænkninger. Uran-bly dateringer af en konkretion fra Västergötland viser, at cone-in-cone dannelsen skete mere end 25 millioner år senere end væksten af den finsparitiske kerne (Israelson et al. 1996). Cone-in-cone krystaller antages almindeligvis at være dannet i et semikomprimeret sediment, og kompakteringsprocessen må derfor have været overordentlig langsom i Alun Skiferen.

## 5. Trilobitfauna og biofacies

Alun Skiferen er kendt for sin individrige fossile fauna, domineret af agnostide og olenide trilobiter med brachiopoder og fosfatskallede ostrakoder som mindre hyppige elementer i Kambrium og graptoliter i Tremadoc. Visse niveauer i Øvre Kambrium indeholder også yderst velbevarede fosfatiserede krebsdyr-mikrofossiler (Müller & Walossek 1985 og 1988), men overordnet er faunaen artsfattig. Forekomsten af en individrig fauna i et sortsifer miljø, *a priori* antaget aflejret under anoxiske forhold, har givet anledning til hovedbrud gennem tiden. Bl.a. har det været foreslået, at agnostide trilobiter fortrinsvis levede i et flydende tanglag nær havoverfladen ("Sargassohavsmodellen" Bergström 1973) eller at trilobiterne overvejende var allochtone (Dworatzek 1987). Sargassomodellen fandt støtte i den gamle formodning om en særlig jodberigelse i Alun Skiferen (f.eks. Henningsmoen 1957), et grundstof der er kendt for at kunne opkoncentreres i visse tangtyper. Forekomsten af jod har imidlertid vist sig at bero på meget gamle analyser (Svanberg 1848) og har ikke kunnet eftervises ved moderne analysemetoder (Schovsbo 1995). Den allochtone model må også afvises, bl.a. fordi den fossile fauna kun undtagelsesvis udviser tegn på sortering, og juvenile former er meget almindelige. I stedet mener vi, at agnostide og olenide trilobiter, der på globalt plan var meget almindelige i sortsifer miljøer, var specielt tilpassede til at leve under iltfattige forhold. Individrigdommen og den lave diversitet er også i god overensstemmelse med opportunistisk levevis og er samtidig forklaring på olenide og agnostide trilobiters store anvendelighed til biostratigrafi, idet den høje produktion af larver, evt. med forlænget larvestadie, medførte et stort spredningspotentiale. Disse grupper er dog kun anvendelige til biostratigrafi inden for sortsifer miljøet.

En række olenide bygningstræk kan tolkes som tilpasninger til levevis under nedsatte iltforhold, og der kan skelnes mellem tre basale morfotyper (Fig. 8): (1) *Olenus*-typen, karakteriseret af et fladt, tyndt skelet med smal akse, korte kindhorn og normalt ingen eller kun korte pigge på kropsleddene, (2) *Peltura*-typen, karakteriseret af et forholdsvis tvælvævet ske-





Fig. 6. Profil i den øvre kambriske del af Alun Skiferen (*Peltura scarabaeoides* Zonen) i Brattefors ved Kinnekulle. Skiferen (sort) er her udviklet i en typisk platformfacies med et stort indhold af delvist sammenvoksede lag af kalkkonkretioner (lyst gule). Profilet er ca. 7 m. højt. Foto B. Buchardt.

let, bred akse, korte eller ingen kindhorn/pigge på kropsleddene, og med små øjne placeret tæt ved hovedets forkant, (3) *Ctenopyge*-typen, der er små spinose olenider med meget smal akse, lange kindhorn og veludviklede pigge på kropsleddene. Kindhornene udspringer typisk langt fremme på den frie kind, øjnene er forholdsvis store, og en opadbuget forkant (frontal arch) er veludviklet.

*Olenus*-type trilobiter tolkes som bentiske. Sandsynligvis var evnen til aktiv svømning nyttig for overlevelse, og muligvis var nogle medlemmer af denne gruppe nektobentiske. Den forholdsvis smalle akse antyder dog, at benmuskulaturen ikke var specielt veludviklet i sammenligning med f.eks. *Peltura*-typen (se også Henningsmoen 1957, Fortey 1974, Fortey & Wilmot 1991). Det tynde skelet antages at være en tilpasning til forbedret respiration (Jell 1978), men kan også tolkes som en energibesparelse, både med hensyn til anlæggelse og bevægelse (letvægt). Den stratigrafiske og geografiske fordeling af slægten *Parabolina*, hvor en del arter opnår forholdsvis store størrelser, antyder en tilpasning til højere iltindhold end for flertallet af *Olenus*-type repræsentanter.

*Peltura*-type trilobiter tolkes som aktive svømmere (jf. Henningsmoen 1957). Den brede akse og skelettets

stærke konveksitet (store indre volumen) er en forudsætning for fasthæftelse af kraftige benmuskler. Tendensen med marginale og til dels reducerede øjne kendes også fra andre svømmende trilobiter, hvor synsønnen i flere tilfælde er helt forsvundet (Fortey 1985). Årsagen til øjereduktionen kendes ikke. Den ordoviciske slægt *Triarthrus*, hvor ben, antenner m.v. er kendt fra nordamerikanske fund, er af *Peltura*-type. Det er bemærkelsesværdigt, at benene her fortsætter ud under kanten af skelettet, hvilket er usædvanligt for trilobiter. Det har været foreslået, at de store ben med forstørrede gællegrøner var en tilpasning til et liv i et iltfattigt miljø (Henningsmoen 1957), samtidig med at de kan have forbedret dyrets svømmeegenskaberne. Baseret på deres geografiske og stratigrafiske fordeling tolkes *Peltura*-repræsentanterne i Alun Skiferen som nektobentiske. Gruppen er langt hyppigere i Mellemsverige og Öland end i Skåne-Bornholm-Oslo området, hvor jævnaldrende aflejringer domineres af *Ctenopyge* og *Sphaerophthalmus* repræsentanter.

*Ctenopyge*-typens veludviklede pigge og udvækster tolkes som bygningstræk, der modvirker nedsynkning i vandsøjlen, og gruppen udlægges som pelagisk. Kindhornene hos enkelte *Sphaerophthalmus* arter pegede endda nedad og en bundlevende levevis var

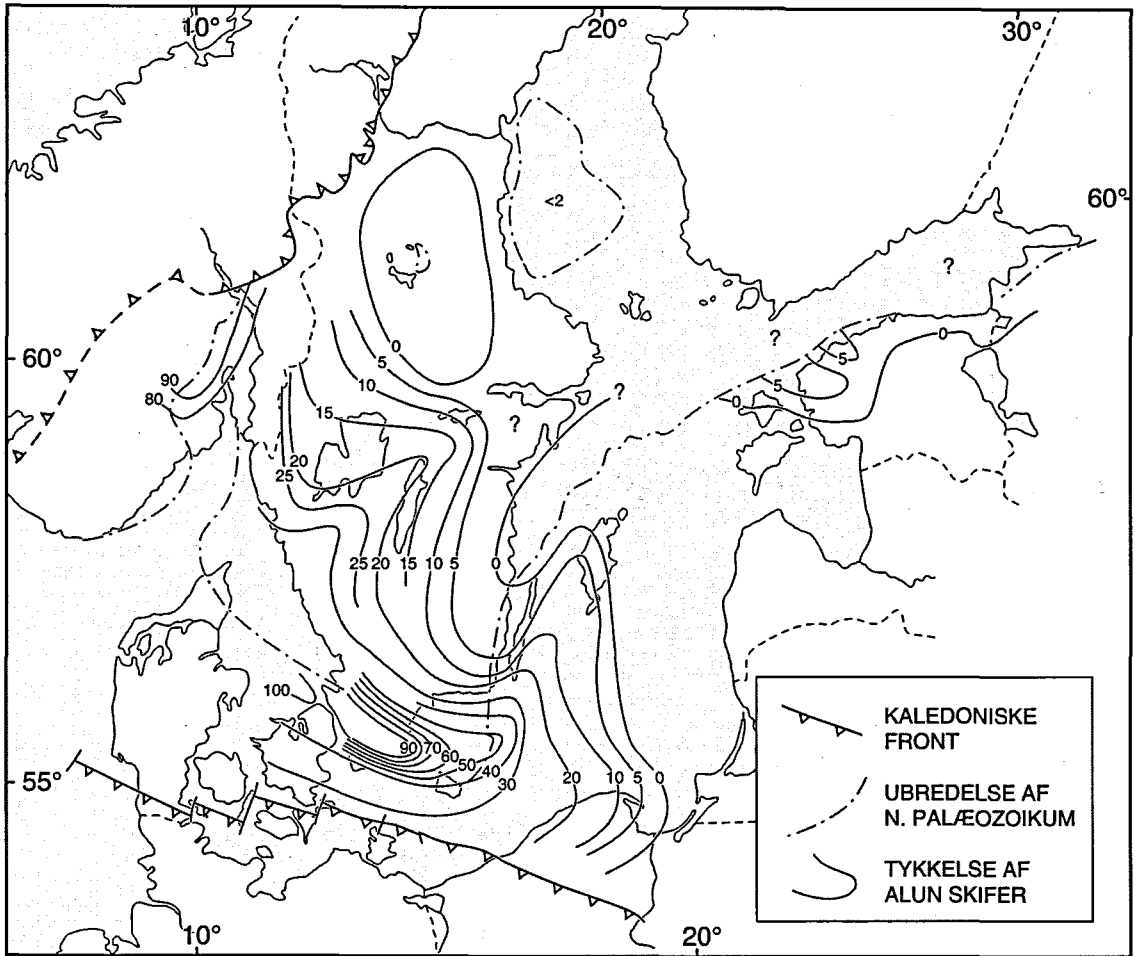
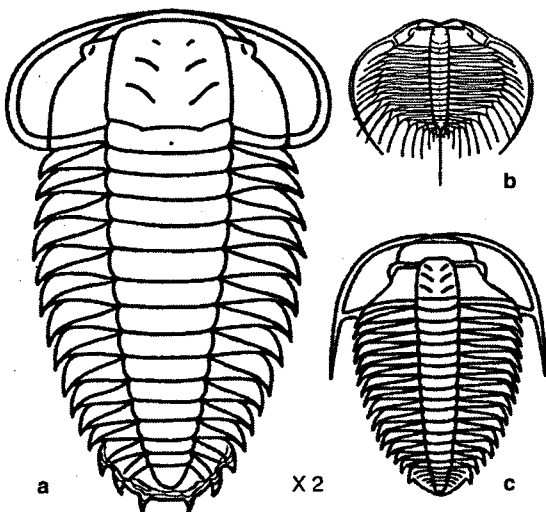


Fig. 7. Tykkelsesvariationer i Alun Skifer Formationen i det sydlige Baltoskandia. Tykkelserne angivet i m.



umuliggjort (Clarkson 1973). På den anden side antyder den meget smalle akse dårligt udviklede benmuskler og typen var derfor en langsom svømmer.

Agnostide trilobiter er meget almindelige i den mellem kambriske del af Alun Skiferen. Diversiteten falder markant ind i Øvre Kambrium, og agnostider optræder kun sporadisk over *Olenus* Zone niveau (Westergård 1922, 1946, Ahlberg & Ahlgren 1996). Grundet agnostiders hyppige optræden i sort skifer, deres lille størrelse og visse arters næsten globale udbredelse, er de ofte tolket som pelagiske og tilpassede til oceaniske forhold (se Robison 1972). De nævnte karakteristika kan dog lige så godt tages til indtægt for en bentisk levevis med tilpasning til iltfattige for-

Fig. 8. De tre trilobit typer, der dominerer Alun Skiferen. a: *Peltura*-type, (*Peltura scarabaeoides*), b: *Ctenopyge*-type (*Ctenopyge pecten*). C: *Olenus*-type (*Olenus gibbosus*).

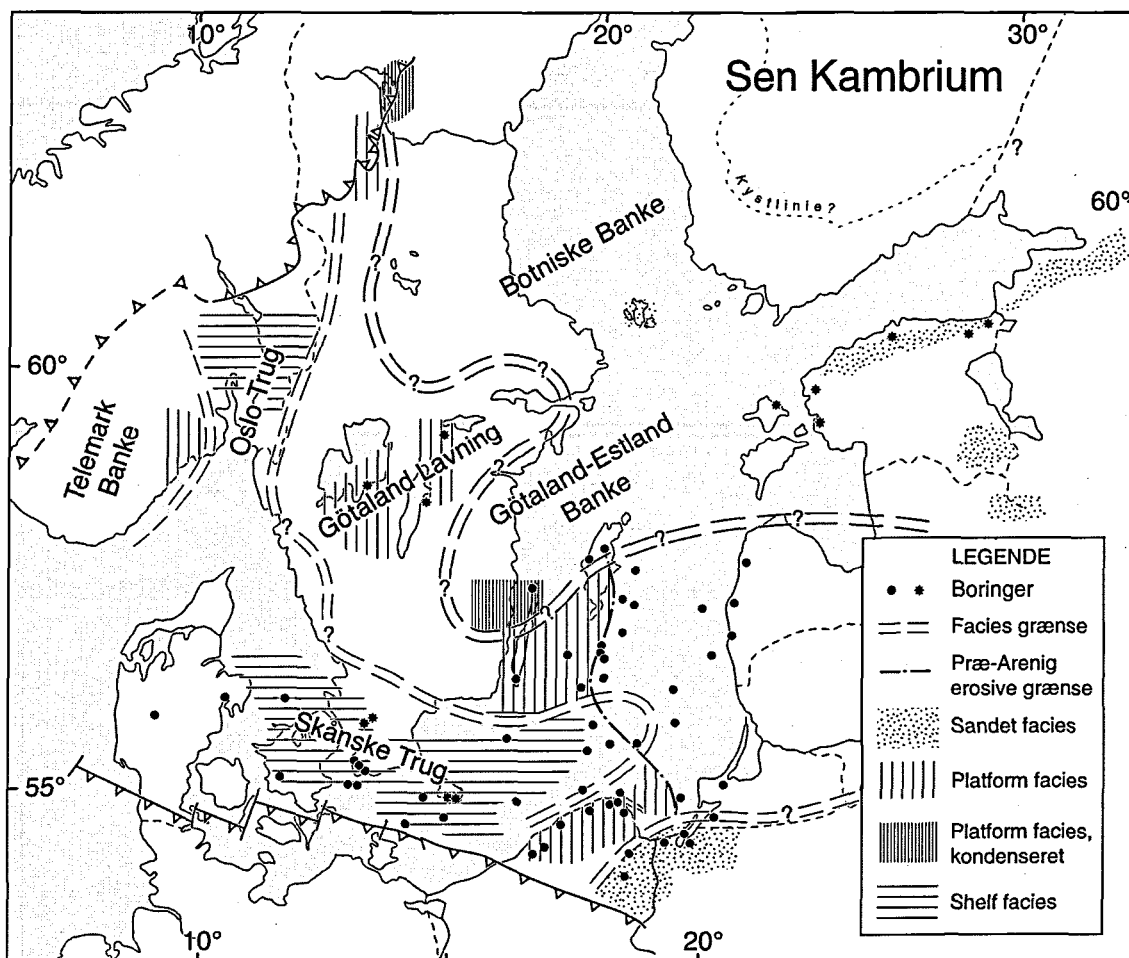


Fig. 9. Palæogeografi for Sen Kambrium.

hold med høj produktion af længelevende larver (Nielsen 1995 og 1997). Agnostider levede sammenrullet (Robison 1972, Müller & Walossek 1987) og kan sammenlignes med ostrakoder. Sidstnævnte gruppe er overvejende tilknyttet bunden (Barnes 1974).

Foruden olenide og agnostide trilobiter findes en række andre trilobiter i Alun Skiferen, særligt i Mellem Kambrium og kun yderst sporadisk i Øvre Kambrium. Alle disse betegnes for nemheds skyld "normale" trilobiter, hvilket naturligvis er en grov forenkling. Gruppen betragtes som helhed ikke specielt tilpasset til Alun Skifer miljøet. De fleste formodes at have været bentiske, og deres forekomst i Alun Skiferen vidner derfor om en vis tolerance overfor nedsatte iltforhold. Det er ikke sandsynligt, at f.eks. smalskede repræsentanter af *Paradoxides*, hvor arter kunne blive op til 30 cm lange, kunne svømme over længere afstande. Samtidig er gruppen meget almindelig i siltstensbæltet på lavere vand. De øvre kambriske former *Niobe* (*Niobella*), *Proceratopyge*, forskellige

asaphider og diverse andre er også henregnet til denne kategori af trilobiter. De niveauer, hvori disse trilobiter forekommer, synes alle aflejret under øvre dysoxiske forhold (se Fig. 11).

Alun Skiferen udviser markante stratigrafiske forskelle i trilobitfaunaens sammensætning, og der kan overordnet skelnes mellem tre sæt af biofacies af henholdvis mellem kambrisk, sen kambrisk og tremadoc alder. Den mellem kambriske Alun Skifer er domineret af agnostider, der forekommer sammen med en række af de normale trilobiter. Diversiteten falder med faldende iltindhold og ender i sin mest ekstreme form med artselskaber, der er stærkt domineret af kun en enkelt art (som det eksempelvis ses i den øvre kambriske *Agnostus pisiformis* Zone, hvor alle andre arter end zonefossilene er yderst sjældne). Der kan derfor skelnes mellem faunaselskaber (biofacies) med flere arter af agnostider, associeret med mindre hyppige normale trilobiter, og selskaber stort set uden normale trilobiter og domineret af kun én art af agnostider.



Fig. 10. Profil i den øvre kambriske del af Alun Skiferen (*Olenus* Zonen) i Andrarumbruddet i det østlige Skåne. Skiferen (gråsort) er udviklet i en typisk shelffacies med kun få lag af delvist sammenvoksede kalkkonkretioner (gule). Profilet er ca. 8 m højt. Foto B. Buchardt.

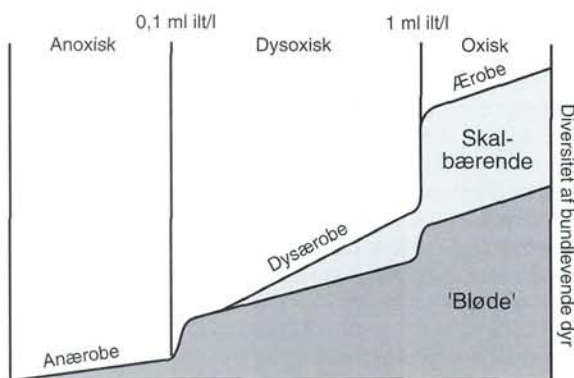


Fig. 11. Terminologi for iltbegrænsede miljøer. De omtrentlige iltgrænser 1,0 ml og 0,1 ml ilt pr. liter havvand skiller miljøer, der betegnes oxiske (fuldt iltindhold), dysoxiske (nedsat iltindhold) og anoxiske (ingen ilt). For biofacies i de forskellige miljøer anvendes ofte termerne ærobe, dysærobe og anærobe.

Lavtvandsbiofacies er repræsenteret i *Exsulans* Kalken og Andrarum Kalken, hvor diversiteten af trilobiter er meget høj. I disse enheder er agnostider sjældne eller fraværende.

Øvre Kambrium domineres af olenide trilobiter. Diversiteten er gennemgående lav, og enkeltlag domineres typisk af en til tre arter. Gennemgående er normale trilobiter yderst sjældne, og bortset fra *Olenus* Zonen er agnostider kun sporadisk forekommende. De mere iltrige dele (øvre dysoxiske, Fig. 11) af den øvre kambriske Alun Skifer domineres af *Olenus*-type olenider, der forekommer sammen med sjældne normale trilobiter og få arter af agnostider. Iltfattige (nede dysoxiske) niveauer domineres af *Peltura*-type olenider, der forsvinder med faldende iltindhold, og niveauer med laveste iltindhold (nede dysoxiske til anoxiske) domineres af *Ctenopyge*-type olenider.

Trilobiter er sjældne i den nedre ordoviciske del af Alun Skiferen, men dette afspejler snarere mangel på bevaring (kalkkonkretioner er langt mindre hyppige) end reelle biofacies ændringer. Fossilselskaberne domineres af graptoliter til forskel fra Øvre Kambrium, og inartikulate brachiopoder er mere almindelige. De fleste fund af trilobiter falder ind under grupperingen *Peltura*-type olenider.

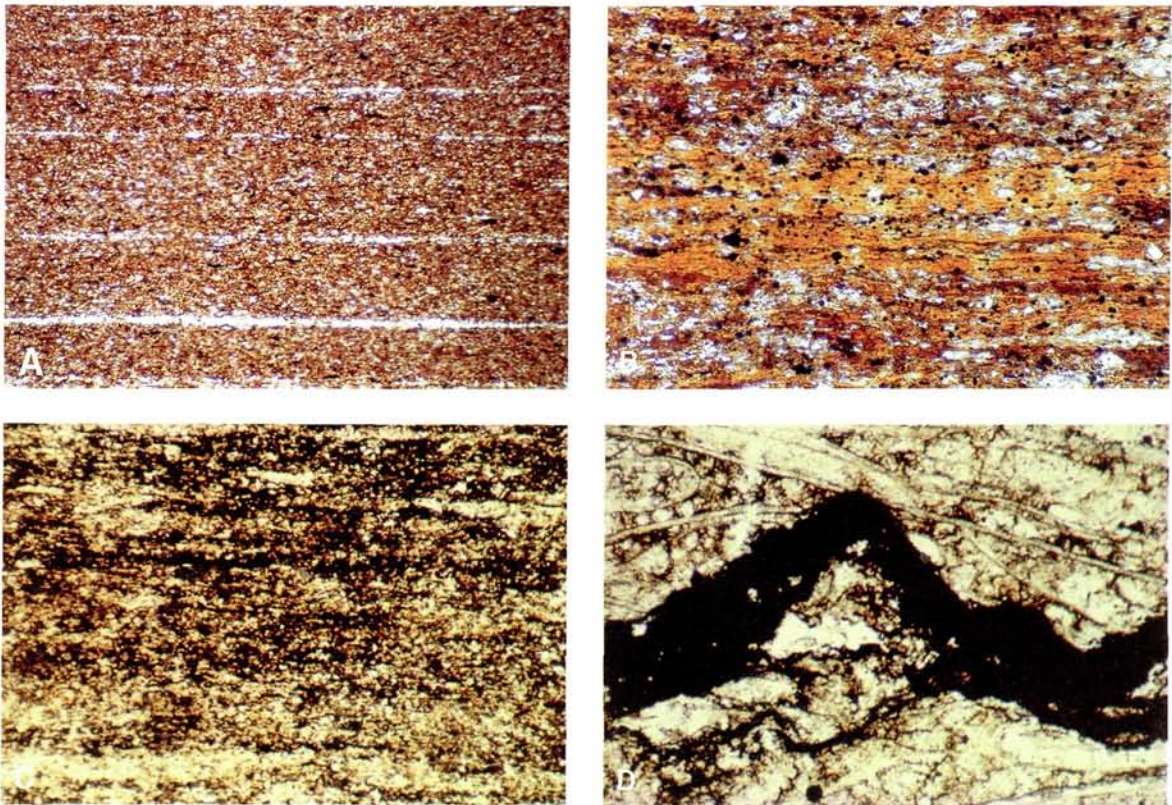


Fig. 12. Mikrofotos af Alun Skifer tyndslib. Højde på fotograferede områder ca. 1 cm. 12A. Fint lamineret prøve (Kinnekulle) med tynde siltlag (lyse korn). Rødbrune områder udgøres af organisk materiale og lern mineraler, mens de sorte partikler er pyrit. 12B. Fint lamineret prøve (Kinnekulle) med stort indhold af organisk materiale (ravgul) og pyrit (sorte partikler). 12C. Fint lamineret prøve (Bornholm) fra kraftigt varmepåvirket skifer. De massive sorte partier er forkullet organisk materiale og residualbitumen. 12D. Prøve af antrakonit (Slemmestad) med sprækkeudfyldning af residualbitumen. Antrakonitten udgøres af sparit og skeletrester fra trilobitter.

## 6. Aflejningsforhold:

### Var Alun Skifer havet anoxisk?

Alun Skiferen har traditionelt været betragtet som en relativt lavvandet aflejring dannet under anoxiske forhold, og de mange hiati og konglomerater har været forklaret som resultat af regressioner og subærisk erosion (f.eks. Poulsen 1966, Martinsson 1974). Sammenholdes de nyere geokemiske og palæontologiske data, synes det imidlertid nødvendigt at revidere denne opfattelse. Vi anskuer her Alun Skiferen som aflejret på relativt dybt vand under stormbølgebasis, dvs. under ca. 50 m vanddybde. Største vanddybde var bestemt af shelfens ydre grænse, der ved analogi til nutidige forhold kan sættes til mindre end 200 m (Shepard 1973). Fire faktorer var afgørende for etablering og opretholdelse af det specielle Alun Skifer aflejningsmiljø: Det Baltiske Skjolds ekstremt lave relief, den meget ringe sedimenttilførsel, kontinentets placering på høje breddegrader og sidst, men ikke mindst, ændringer i havniveau.

I sen prækambrisk tid blev Det Balto-Russiske kontinent udsat for en omfattende peneplanisering, og ved slutningen af Prækambrium var højtliggende områder begrænset til det nordlige Finland og muligvis dele af Ukraine (Rudberg 1984). Kambrium var en periode præget af et gradvist stigende havniveau, der kulminerede i begyndelsen af Ordovicium. Denne stigning førte til næsten total havdækning af kontinentet i slutningen af tidlig kambrisk tid, hvor land var begrænset til de højtliggende områder i Finland og måske Ukraine. Tilførsel af terrigent, klastisk materiale til Alun Skifer havet var derfor stærkt begrænset, og vi forestiller os en væsentlig del af skiferens klastiske indhold tilført med vinden, ligesom omlejring af tidligere aflejret materiale må have været en vigtig faktor. De meget lave sedimentationshastigheder (kornakkumulationsrater på 1–10 mm/1000 år, Thickpeny 1984), der kan sammenlignes med nutidig dybhavs-sedimentation, afspejler denne meget begrænsede tilførsel af klastisk, terrigent materiale.

Den ekstremt lave gradient på kontinentet (få cm

pr. km) resulterede i et aflejringssystem, hvor små ændringer i havniveau førte til store ændringer i beliggenhed af den kystnære zone. Hvis erosionsbasis i Alun Skifer havet har været defineret af stormbølgebasis, må der have eksisteret store områder af platformen, der lejlighedsvist blev "spulet" for sediment, og som derfor vil være præget af mange hiati i lagserierne. I disse områder har de sammenhængende kongreationslag fungeret som erosionsbestandige flader, og de mange konglomeratstrukturer i kongrektionerne kan forklares ud fra lejlighedsvis stormbølgepåvirkning. Det er derfor ikke nødvendigt at antage, at hiati og konglomerater indicerer egentlig regression og subærisk erosion. Selv områder som det nordlige Öland, hvor den ekstremt kondenserede øvre kambriske lagpakke udgøres af mindre end to meter overvejende konglomerater og kongrektioner, har sandsynligvis ligget på mere end 30 meters havdybde gennem hele perioden.

Endelig har kontinentets placering på høje, sydlige breddegrader (45–60°S, Scotese & McKerrow 1990) og de deraf følgende lave vandtemperaturer (der eksisterer ingen pålidelige palæotemperaturbestemmelser for Kambrium) forhindret produktion af karbonatbjergarter i større mængde og derved opbygningen af en karbonatplatform som tilfældet var senere i Ordovicium.

Alun Skiferen beskrives ofte som et typisk anoxisk/euxinisk aflejringssystem, hvor sort slam gennem lange tidsperioder blev afsat under iltfrie, giftige bundforhold (Thickpeny 1984 og 1987, Martinsson 1974). De hyppige forekomster af bundlevende dyr gennem hele formationen gør det imidlertid nødvendigt at revidere denne opfattelse. Som det er påvist i afsnittet om biofacies (side 8), kan forskellige niveauer i Alun Skiferen karakteriseres ved forskellige fauna-associationer, der hver især repræsenterer forskellige iltkoncentrationer ved havbunden (J. Bergström 1980). Sandsynligvis har Alun Skifer havet været præget af iltfattige (dysoxiske) bundforhold gennem lange perioder, mens egentlige iltfrie (anoxiske) episoder har været få og kortvarige. Dette udelukker naturligvis ikke, at porevandet i bundsedimenterne har været konstant anoxisk gennem meget lange perioder, hvad det store indhold af pyrit og velbevaret organisk materiale vidner om.

To aflejringssystemer benyttes almindeligvis til at forklare anoxisk sedimentation i yngre aflejringer: høj organisk produktivitet eller lagdelte vandsøjler (Demaison & Moore 1980, Arthur & Sageman 1994). Alun Skiferen er præget af meget lave akkumulationsrater for det organiske materiale (0,02 til 0,5 gram C/cm<sup>2</sup>/10<sup>3</sup> år, Lewan & Buchardt 1989), og høj organisk produktivitet kan derfor udelukkes som årsag til de udbredte iltfattige forhold. Lagdelte vandmasser forudsætter oftest tærskelbassiner eller relativt store havdybder. Ingen af disse forhold er opfyldt for Alun Skiferen. Skiferens iøjnefaldende ensartethed fra forekomst til forekomst i det baltoskandiske område vi-

ser, at Alun Skifer havet har udgjort ét samlet aflejringssområde. Under Alun Skifer havets største udbredelse i Baltoskandia i Tidlig Ordovicium blev der aflejret organisk-holdigt mudder på et område, der strakte sig fra shelfen vest for Norge til St. Petersburg og fra det nordlige Polen til det nordligste Norge, i alt mere end 1 million km<sup>2</sup>. Et så omfattende havområde domineret af overvejende iltfattige aflejringer har ingen nutidige analoger. Vi må derfor konkludere, at aktualitetsprincippet ikke kan bringes i anvendelse til beskrivelse af Alun Skiferens aflejningsforhold. Sandsynligvis har iltindholdet i havvandet, og følgelig også i atmosfæren, været signifikant lavere end i dag.

## 7. Organisk geokemi

Alun Skiferens organiske geokemi er beskrevet i en lang række afhandlinger og rapporter, hvis hovedsigte har været at vurdere skiferens potentiale som moderbjergart for kulbrinter (Buchardt et al. 1986, Buchardt & Lewan 1987, Dahl et al. 1988, Dahl et al. 1989, Lewan & Buchardt 1989, Buchardt & Lewan 1990, Buchardt et al. 1994, Wilken 1994, Bharati et al. 1995). Hovedparten af disse undersøgelser er baseret på materiale fra Mellemsverige og Öland, hvor skiferen ikke har været varmepåvirket i nævneværdig grad (se afsnit 9).

Indholdet af organisk kulstof (Totalt Organisk Kulstof eller TOC) i upåvirket (umoden) Alun Skifer varierer mellem 2% og 28% efter vægt. Det laveste organiske indhold (<6% TOC) findes i de mellem kambriske lag. Herover stiger indholdet gradvist til værdier mellem 12% og 25% i de øvre kambriske *Olenus* og *Peltura* Zoner. De øverste kambriske og nedre ordoviciske lag (*Acerocare* Zonen og *Dictyonema* Skiferen) er karakteriseret ved et lavere organisk indhold (5% til 15% TOC). Et tilsvarende variationsmønster ses i de varmepåvirkede (overmodne) skifre, blot har

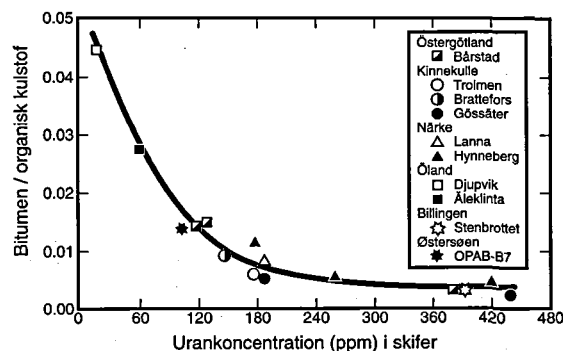


Fig. 13. Bitumenindhold (opløseligt organisk materiale) versus urankoncentration i umoden Alun Skifer. Ved urankoncentrationer over 180 ppm er der i praksis intet opløseligt organisk materiale tilbage i skiferen.

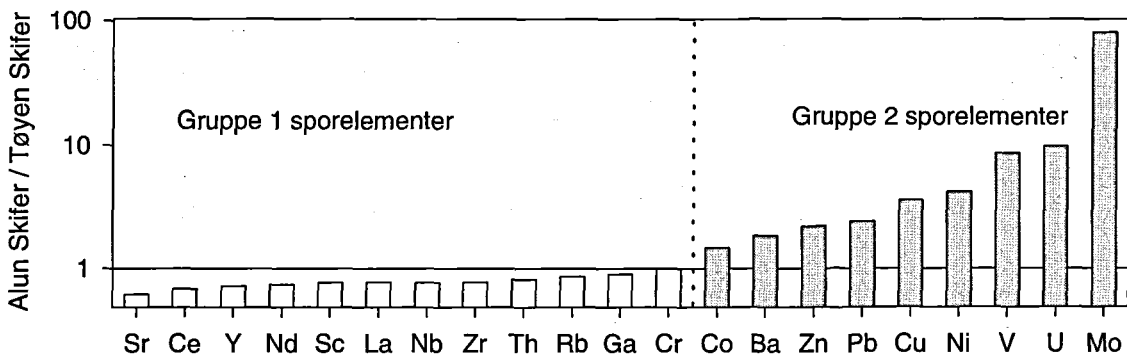


Fig. 14. Sporelementindholdet i Alun Skiferen sammenholdt med indholdet i Tøyen Skiferen i Gislövshamar-2 borekernen. Sporelementer beriget i Alun Skiferen (gruppe 2) er elementer specielt knyttet til dette aflejringsmiljø.

oliedannelse og -migration her reduceret TOC-værdierne væsentligt.

Alun Skiferen stammer fra tiden før udviklingen af højere landplanter, og det organiske materiale (OM) i skiferen er udelukkende af marin oprindelse. Skiferens organiske indhold domineres af strukturløst (amorft) OM med mindre indslag af struktureret OM (Fig. 16). Amorft OM kan beskrives som en blanding af bakterierester og udefinerbare nedbrydningsprodukter fra andet OM og udgør med sit høje indhold af fede syrer det vigtigste udgangsmateriale for oliedannelse. I tyndslib ses det organiske materiale i de TOC-rige lag i Alun Skiferen at danne veldefinerede horizontale laminae godt 0,1 mm til 0,5 mm tykke, der sandsynligvis afspejler udvikling af bakteriemåtter på havbunden (Fig. 12B). Det strukturerede OM består af algerester, bl.a. af *Tasmanites*-lignende algelegemer, kitinlignende skeletrester og vitrintilignende partikler (Buchardt et al. 1986, Buchardt & Lewan 1990). De specielle kolmnoduler opbygges af kompakt, strukturløst OM af ukendt oprindelse (Westergård 1922). De optræder som cm-store, sorte, kul-lignende legemer eller lag uden nogen intern struktur i de øvre kambriske *Peltura* Zoner i Västergötland, Östergötland og Närke. TOC-indholdet i kolmnodulerne er mellem 20% og 70%. Oprindelsen til kolm er ikke kendt, men de er sandsynligvis synsedimentære. Olsen (1989) har foreslået to dannelsesmodeller, enten en lokal udfældning af humussyrer i sedimentet eller en oprindelse som klumper af algedetritus dannet i vandmasserne.

Elementaranalyser af Alun Skiferens OM viser atomare brint/kulstof (H/C) forhold i umodne prøver mellem 1,10 og 1,30. Disse værdier karakteriserer det organiske materiale som tilhørende den såkaldte kerogentype II (Durand & Monin 1980), der omfatter en blanding af nedbrydningsprodukter fra alger, bakterier og højere planter (kerogen fra græsk "voksdanner" betegner OM, der ikke kan opløses i organiske opløsningsmidler). Det organiske materiales  $\delta^{13}\text{C}$ -værdier varierer systematisk mellem  $-31\%$  og  $-27\%$

efter stratigrafisk placering (Buchardt et al. 1986, Buchardt 1994). Isotopværdierne er typiske for nedre palæozoisk kerogen, der er kraftigt forarmet i  $^{13}\text{C}$  i forhold til nutidige værdier. Skiftet i isotopsammensætning kan sandsynligvis relateres til ændringer i fordelingen af kulstof mellem de globale kulstofreservoarer. Kulstofisotopforholdet ændres ikke ved varmepåvirkning og oliedannelse og kan derfor benyttes som stratigrafisk korrelationsværktøj mellem de enkelte områder.

En moderbjergart (source rock, kildebjergart) defineres som en bjergart, der kan danne flydende eller gasformige kulbrinter (Tissot & Welte 1984). I praksis opfyldes denne definition af bjergarter med et indhold af oliedannende organisk materiale på mere end 2% TOC, og den baltoskandiske Alun Skifer kan således beskrives som en moderbjergart af særdeles god kvalitet. Skiferen har gennemgået en kompleks termal historie (se afsnit 9), og en regional vurdering af skiferens oliedannelse vil først blive givet i forbindelse med dette afsnit.

Lag i Alun Skiferen med højt indhold af OM er ofte associeret med unormalt store koncentrationer af uran (se også afsnit 8 om sporelementer). I *Peltura* Zonerne i Västergötland når uranindholdet i skiferen værdier på 200 til 500 ppm (Andersson et al. 1985, Lewan & Buchardt 1989), mens kolmnodulerne i samme zone kan indeholde op til 7000 ppm uran (Leventhal 1990). Disse værdier svarer til en berigelse på 10 til 1000 gange sammenlignet med andre sorte skifre. I andre niveauer af Alun Skiferen er uranindholdet lavere, men stadig markant beriget.

Alfastråling fra henfald af uranatomer i skiferen har ført til ændringer i sammensætningen af OM i de uranrige horisonter (Dahl et al. 1988, Lewan & Buchardt 1989, Sundararaman & Dahl 1993, Wilken 1994). Det høje strålingsniveau resulterer i omdannelse og polymerisering af især de alifatiske kulbrinter, hvorimod de aromatiske kulbrinter ikke påvirkes i samme grad. Resultatet af processen er en stigning i det relative indhold af aromatiske forbindelser samt et fald i det



Fig. 15. Eksempler på tidligt diagenetiske, konkretionære kalksten (antrakonitter). 15A. Enkelt, linseformet konkretion. Bemærk den horisontale lamination i konkretionen og de deformerede skiferlag omkring. Kakeled, Kinnekulle. 15B. Konkretionsfragment med indlejret skalrigt lag af lys, "primær" kalksten. Degerhamn, Öland. Fotos B. Buchardt.

atomare H/C i Alun Skiferen, hvilket alt andet lige ændrer skiferens kulbrintepotentiale fra en oliedannende til en gasdannende moderbjergartstype. Relationen mellem mængden af ekstraherbare organiske forbindelser (bitumen) og uranindhold ses tydeligt af Fig. 13, der viser faldende bitumenmængder i skifer med mere end 100 ppm uran. Da alfapartiklernes middelevlængde i en skiferbjergart er mindre end 1 mm, er en forudsætning for strålingsskader af denne type en homogen fordeling af uranatomer i tæt kontakt med det organiske materiale som i Alun Skiferen. De observerede strålingsskader på det organiske materiale er relateret til strålingsdosis og derfor en funktion af både urankoncentration og eksponeringstid. Strålingsskader vil således kun kunne identificeres i uranrige skiferbjergarter af høj alder, og Alun Skiferen er da også til dato den eneste sortskifer, der viser tydelige eksempler på alfa-betingede strålingsskader.

## 8. Sporelement anomalier i Alun Skiferen

Alun Skifer Formationens høje indhold af organisk materiale og pyrit er ledsaget af en bemærkelsesværdig berigelse i sporelementer, der enten er redox-sensitiv (V, Mo og U) eller har affinitet til svovl (chalcophile grundstoffer: Co, Ni, Cu, Zn og Pb), se f.eks. Armands (1972), Bjørlykke (1974), Andersson et al. (1985), Olsen (1989), Lewan & Buchardt (1989) og Schovsbo (1995). Disse grundstoffer er ikke jævnt fordelt gennem formationen, men udviser karakteristiske berigelser i forskellige niveauer. Et typisk eksempel på de pågældende sporelementers stratigrafiske fordeling ses i bøkernen fra Gislövshammar i det østligste Skåne (Fig. 14 og 17). Fælles for sporelementerne er en relativ lav, men stort set konstant koncentration i Mellem Kambrium. Øvre Kambrium er karakteriseret ved et forhøjet indhold af de ovennævnte grundstoffer, der dog viser store variationer

over korte tidsintervaller. For vanadium ses den maksimale berigelse først i den nedre ordoviciske del af formationen.

Tilsvarende sporelementberigelser er karakteristiske for identiske stratigrafiske niveauer i Alun Skiferen overalt i det sydlige Skandinavien. Dette regionale berigelsesmønster viser, at opkoncentrering af de pågældende grundstoffer blev styret af variationer i aflejringforholdene. Lokal varmeinduceret mobilisering af sporelementerne i Alun Skiferen kendes i form af mindre bly-zink og barium mineraliseringer i Skåne (Tegengren 1924), langs den norsk-svenske KDF (Gee 1972) samt på Bornholm (Bøggild 1943). Disse mineraliseringer er alle relaterede til sprækkedannelser og har en hydrotermal oprindelse.

Alun Skiferens aflejringstilstand har som tidligere omtalt været karakteriseret ved et generelt lavt, men fluktuerende iltindhold og en lav sedimentationshastighed. Begge parametre er af stor betydning for optagelsen af sporelementer i et sediment. Eftersom kilden til sporelementberigelsen er havvandets naturlige indhold af de pågældende grundstoffer (Holland 1979), er aflejringshastigheden afgørende for den maksimale optagelse af sporelementer. En lav sedimentationsrate giver alt andet lige en lang eksponeringstid mellem sediment og havvand og derved længere tid til optagelse af opløste grundstoffer. Bundvandets iltindhold har stor betydning for sedimentets optagelse af sporelementer, da sedimentets bindingskapacitet bl.a. afhænger af mængde og type af organisk materiale samt af tilstedeværelsen af reducerede svovlforbindelser. Endelig har iltindholdet direkte betydning for de redox-sensitive sporelementers geokemi, idet deres oxidationstrin ændres med aflejringstilstandens iltindhold og pH. F.eks. er vanadium, uran og molybdæn mest mobile (lettest opløselige) på oxideret form, mens deres mobilitet mindskes med faldende iltindhold.

Ud over sedimentets geokemiske egenskaber styre-



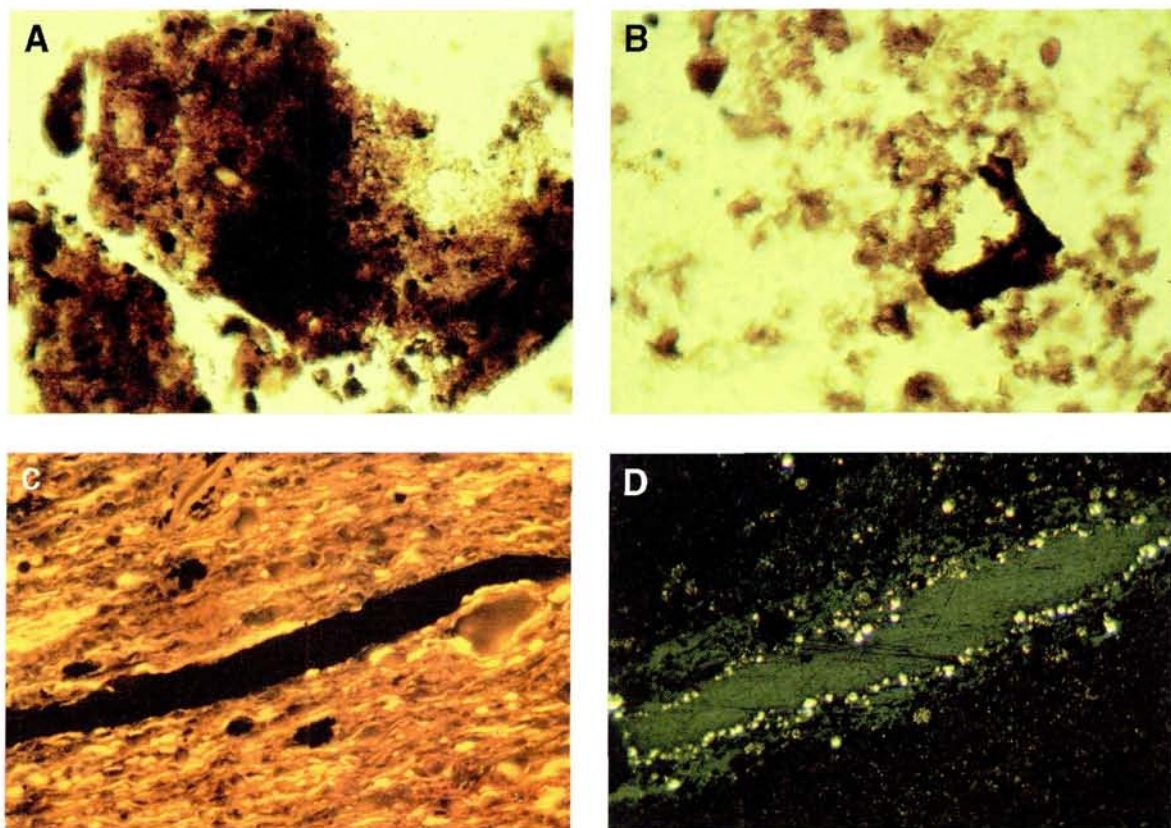


Fig. 16. Mikrofotos af organisk materiale (OM) fra Alun Skiferen. 16A. Kerogenkoncentrat af overvejende amorph kerogen med sort pyrit. Gennemfaldende lys. 16B. Kerogenkoncentrat med partikel af struktureret kerogen. Gennemfaldende lys. 16C. Polérpræp. med vitrinit-lignende partikel (sort) i grundmasse af algeholdigt (gult), lamineret sediment. Fluorescerende lys. 16D. Polérpræp. af vitrinitlignende partikel med "halo" af framboidal pyrit (gyldne korn) og amorph OM. Reflekterende lys.

des også den fossile faunas sammensætning af ændringer i bundvandets iltindhold. Sammenholdes den stratigrafiske fordeling mellem vanadium og nikkel i Alun Skiferen i Gislövshammar-kernen med variationer i den fossile trilobit- og brachiopodfauna, ses en dominans af pelagiske og nektobentiske trilobiter ved lave vanadium/nikkel forhold, mens høje forhold er sammenfaldende med forekomst af bentiske agnosti- der og brachiopoder (Fig. 18). Denne sammenhæng viser en berigelse af vanadium relativt til nikkel i Alun Skiferen ved øvre dysoxiske iltforhold, mens der ved nedre dysoxiske til anoxiske forhold ses et lavere vanadium/nikkel forhold. Fraktioneringen kan forklares ved forskellige fældningsmekanismer for metallerne. Vanadium optræder i naturligt havvand på dets mobile pentavalente form (vanadat), mens det ved reaktion med f.eks. opløst organisk materiale i hav- eller porevand reduceres til den mere immobile tetravalente form (vanadyl) eller til vanadium (III). Den endelige fiksering sker ved adsorption til organisk materiale. Disse processer har i Alun Skiferen forløbet i den øvre del af sedimentet, hvor det høje indhold af

organisk materiale har kunnet reducere og fælde vanadium fra havvandet. Modsat vanadium indgår nikkel ikke i redox-reaktioner, og fældning af nikkel i sedimentet sker primært ved reaktioner med sulfidioner dannet ved sulfatreducerende mikroorganismers aktivitet (Canfield & Raiswell 1991). De relative høje vanadium/nikkel forhold set under øvre dysoxiske iltforhold kan derved forklares gennem fældning af vanadium i den øvre del af sedimentet, mens nikkel fældes i dybere niveauer i sedimentet. Ved faldende iltindhold i bundvandet øges sulfid koncentrationen, og afstanden mellem fældningsmiljøerne for vanadium og nikkel i sedimentet indsnævres.

Uran og molybdæn fordeler sig anderledes i Alun Skiferen end vanadium og nikkel. Både uran og molybdæn er korreleret til skiferens TOC-indhold, hvorfor det er nærliggende at antage en berigelsesproces knyttet til akkumulation af det organisk materiale. I Gislövshammar-kernen viser urankoncentrationen en kraftig stigning i forhold til TOC-indholdet fra *Olenus* Zonen og opefter i Øvre Kambrium. I den nedre del af formationen er uranindholdet maksimalt 40 ppm

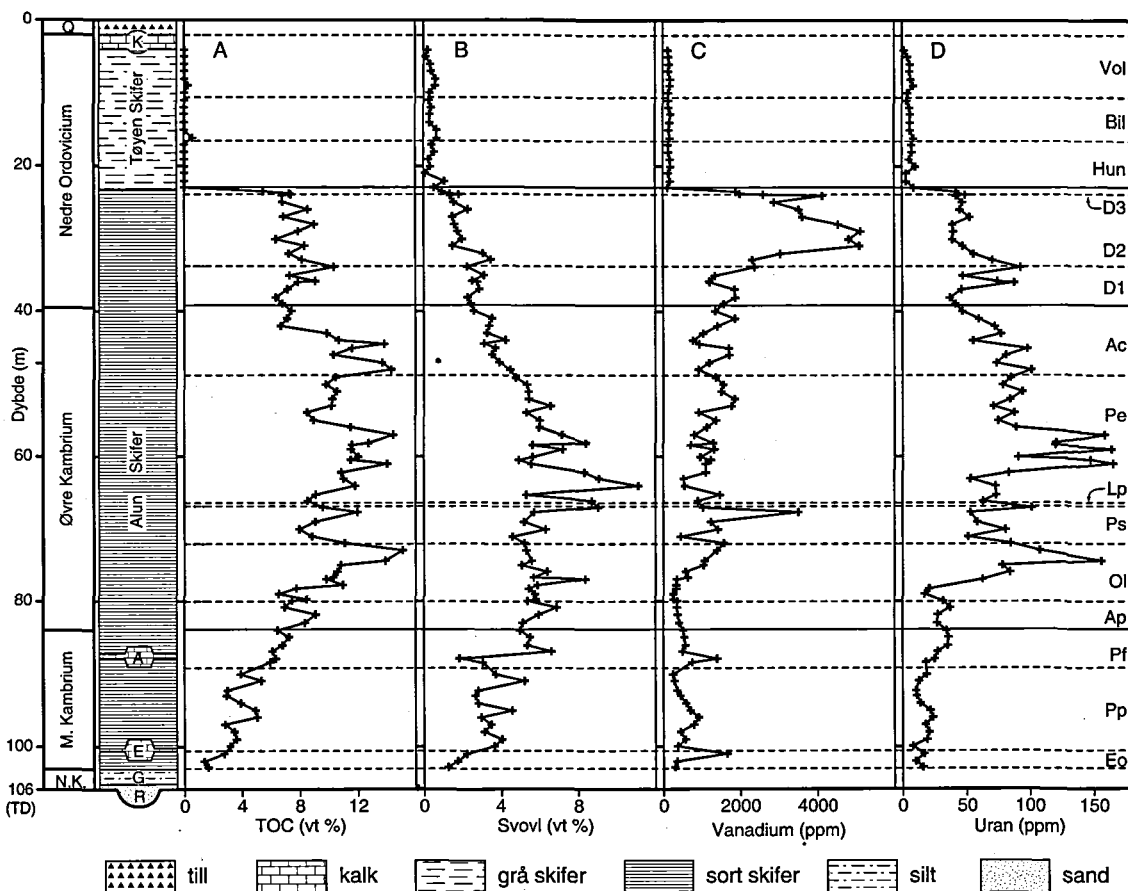


Fig. 17. Vertikale profiler af totalt organisk materiale (TOC), svovl, vanadium og uran i Gislövshammar-2 boringen. K: Komstad Kalk, A: Andrarum Kalk, E: *Exsulans* Kalk, G: Gislöv Fm., R: Rispebjerg Sandsten. Forkortelserne i højre side angiver den stratigrafiske inddeling af Alun Skiferen.

og U/TOC-forholdet omtrent 6 (ppm/vt.%). Fra *Olenus* Zonen øges både uranindholdet og U/TOC-forholdet markant. Sammenholdes molybdæn med TOC ses ingen tilsvarende ændring i Mo/TOC-forholdet. Den store uranberigelse kan være relateret til en speciel uranrig fase som f.eks. fosforit, der ikke optager molybdæn (Calvert 1976, Holland 1979), eller til ændringer i det organisk materials sammensætning. Den totale mængde fosfor følger indholdet af TOC (Armands 1972), og kan derfor ikke forklare den specielle uranberigelse. De tydelige uran-inducerede strålingsskader på det organiske materiale levner ingen tvivl om, at en stor del af uranatomerne er bundet til dette materiale. Kolmmoduler indeholder som tidligere omtalt op til 7000 ppm uran, mens koncentrationen af andre metaller er relativt lav (f.eks. molybdæn <130 ppm, Leventhal 1990). Stigningen i uran/TOC-forholdet i Alun Skiferen fra *Olenus* Zonen og op efter kan muligvis skyldes tilstedeværelse af små mængder af kolmlignende organisk materiale med en større affinitet til uran end de øvrige organiske partikler.

## 9. Termal historie

De nedre palæozoiske aflejringer i Baltoskandia har gennemgået en kompliceret termal historie, der omfatter både magmatisk påvirkning og gentagne begravelsescykler. Tidlige studier baseret på conodoner (S. M. Bergström 1980) og lermineralogi (Kisch 1980) fastlagde de generelle forskelle i varmepåvirkning fra område til område. En detaljeret viden om den termale udvikling krævede dog mere fintmækkende parametre, ligesom datadækningen måtte gøres lang større. I post-silure bjergarter er måling af optisk reflektans (%R<sub>s</sub>) på polerede organiske partikler af vitrinit-typen den hyppigst benyttede metode til vurdering af varmepåvirkning. Metoden kan i princippet ikke anvendes på ældre aflejringer, idet vitrinit er dannet ud fra rester af ligninholdige landplanter (Stach et al. 1982), der med sikkerhed først optræder i Sen Silur (f.eks. Gensel & Andrews 1987). I sin afhandling om termisk omdannelse af lermineraller i bjergarter fra KDF i Jämtland beskrev Kisch (1980) imidlertid or-

ganiske partikler i Alun Skiferen, der viste reflektansvariationer svarende til egentlig vitrinit. Yderligere undersøgelser af Thomsen et al. (1983), Buchardt et al. (1986) og Buchardt & Lewan (1987, 1990) bekræftede, at Alun Skiferen indeholder vitrinitlignende organiske partikler (Fig. 16C og 16D), og at disse partikler med succes kunne benyttes til bestemmelse af de termale omdannelser i skiferen. De vitrinitlignende partiklers oprindelse er ikke klar, men både graptolitfragmenter (Goodarzi 1988) og algerester (Buchardt & Lewan 1990) har været bragt i forslag.

Med denne viden i baghånden var det muligt at kortlægge forskelle i Alun Skiferens termale omdannelse i det sydlige Baltoskandia (se f.eks. Buchardt et al. 1986). For at bestemme Alun Skiferens kulbrintepotentiale i relation til reflektansmålingerne udførte vi dernæst forsøg med kunstig oliedannelse i laboratoriet, såkaldt vådpyrolyse, hvor skiferen bringes til at reagere med vand under høje tryk- og temperaturforhold (Lewan 1985, Buchardt & Lewan 1990). Herfra var det muligt at etablere en empirisk sammenhæng mellem termal påvirkning og oliedannelse i skiferen. Ifølge denne kalibrering sker der ingen oliedannelse, så længe skiferens reflektansværdier er lavere end 0,55% (umoden skifer), begyndende oliedannelse finder sted i intervallet mellem 0,55% og 0,85% (marginal moden skifer), mens den kraftigste oliedannelse findes i reflektansintervallet fra 0,85% til 1,40% (moden skifer i "olievinduet"). Alun Skifer med reflektansværdier over 1,40% har intet oliepotentiale tilbage og betegnes overmoden. Kisch (1980) definerede metamorfe forhold i Alun Skiferen til at begynde ved en reflektans på 2,7% (ankimeta-morfose).

Alun Skiferens  $R_o$ -værdier spænder fra 0,3% til 6,8% og repræsenterer således hele modenhedsintervallet fra umoden til metamorf skifer (Fig. 19). På Det Baltiske Skjold i Västergötland, Östergötland og Närke er Alun Skiferen umoden til marginalt moden. Lokale anomalier ses i Västergötland (S. M. Bergström 1980), hvor opvarmning fra de sen-karbone sills har ført til lokal overmodning (Billingen) eller egentlig kontaktmetamorfose (Halle-Hunneberg). Modenhedsmodellering viser, at skiferen næppe har været begravet under mere end 3 km dæklag (Buchardt et al. 1994, Middleton et al. 1996, Samuelson 1997). Den største kendte tykkelse af post-Alun Skifer aflejringer er små 200 m omfattende ordoviciske og nedre silure (Llandovery) lag. Indsykkningen må således overvejende have fundet sted i Sen Silur eller senere. Zeck et al. (1988) angiver, at hævnning af området indledtes ved begyndelsen af Mesozoikum.

I Estland og på den nordlige del af Öland er Alun Skiferen termalt umoden svarende til forholdene på Det Baltiske Skjold. Fra nord til syd på Öland ses en markant stigning i  $R_o$ -værdierne, der fortsætter ud i Østersøen i borerer syd for Öland. I Letland, Litauen, Kaliningrad og de tilstødende havområder mangler Alun Skiferen, men data fra andre nedre palæozoiske

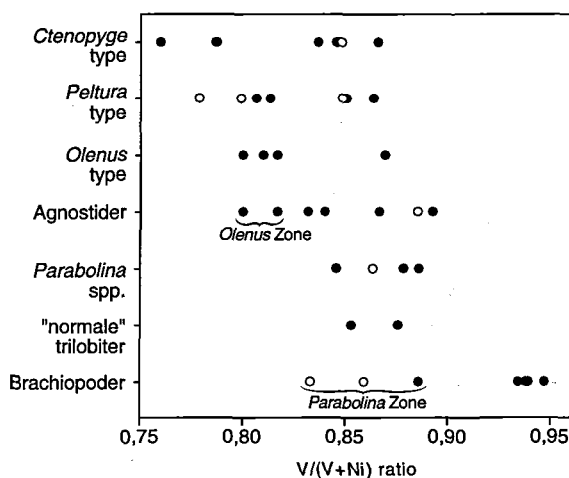


Fig. 18. Vanadium/nikkel forholdet sammenholdt med trilobit- og brachiopodfaunaen i udvalgte niveauer af Alun Skiferen i Gislövshammar-2 boreren. Fyldte cirkler angiver fossilholdige prøver, åbne cirkler viser fossilforekomster mindre end 20 cm over prøven.

aflejringer i området viser stigende termal påvirkning fra umodne forhold i Letland og det nordlige og østlige Litauen til modne forhold i den sydlige del af Den Baltiske Syneklise (Górecki et al. 1992). Indsykningsmodeller fra området (Górecki et al. 1992, Brangulis et al. 1993) viser en to-trins indsykningshistorie, hvor hurtig indsykning i Sen Silur og Tidlig Devon førte til kulbrintedannelse på dybder mellem to og fire km. Efter hævnning gennem Karbon fulgte fornyet indsykning i området fra Perm og fremefter.

Områderne syd og sydvest for Det Baltiske Skjold repræsenterer overgangszonen mellem det tektonisk stabile grundfjeld og de begravede tysk-polske Kaledonider. Den termale modenhed stiger systematisk fra nordøst mod sydvest og når ganske høje værdier tæt på deformationsfronten (Fig. 21). De fleste observationspunkter findes i Skåne, hvor den laveste termale omdannelse er målt i dagblotninger tæt på den nordlige afgrænsning af STZ ( $R_o$  fra 1,8% til 2,1%), mens den højeste omdannelse ses i dybe borerer i det sydvestlige Skåne syd for STZ ( $R_o$  over 3,2%). Opvarmning fra karbone dykes har lokalt overpræget den regionale modenhedsudvikling (Bergström et al. 1982). Reflektansmålinger fra Bornholm giver værdier, der svarer til det centrale Skåne ( $R_o$  fra 2,0% til 2,4%). Disse relativt høje termale modenheder svarer godt til data fra analyser af iltisotopforhold og væskeindeslutninger i bl.a. antrakoniterne i Alun Skiferen, der alle peger på høje temperaturer og begravelsesdybder på op mod 4 km (Buchardt & Nielsen 1985, Jensenius 1987). I det nordlige Polen stiger den termale indflydelse i Alun Skiferen fra modne forhold i Leba-området til lavmetamorfe forhold tæt på den

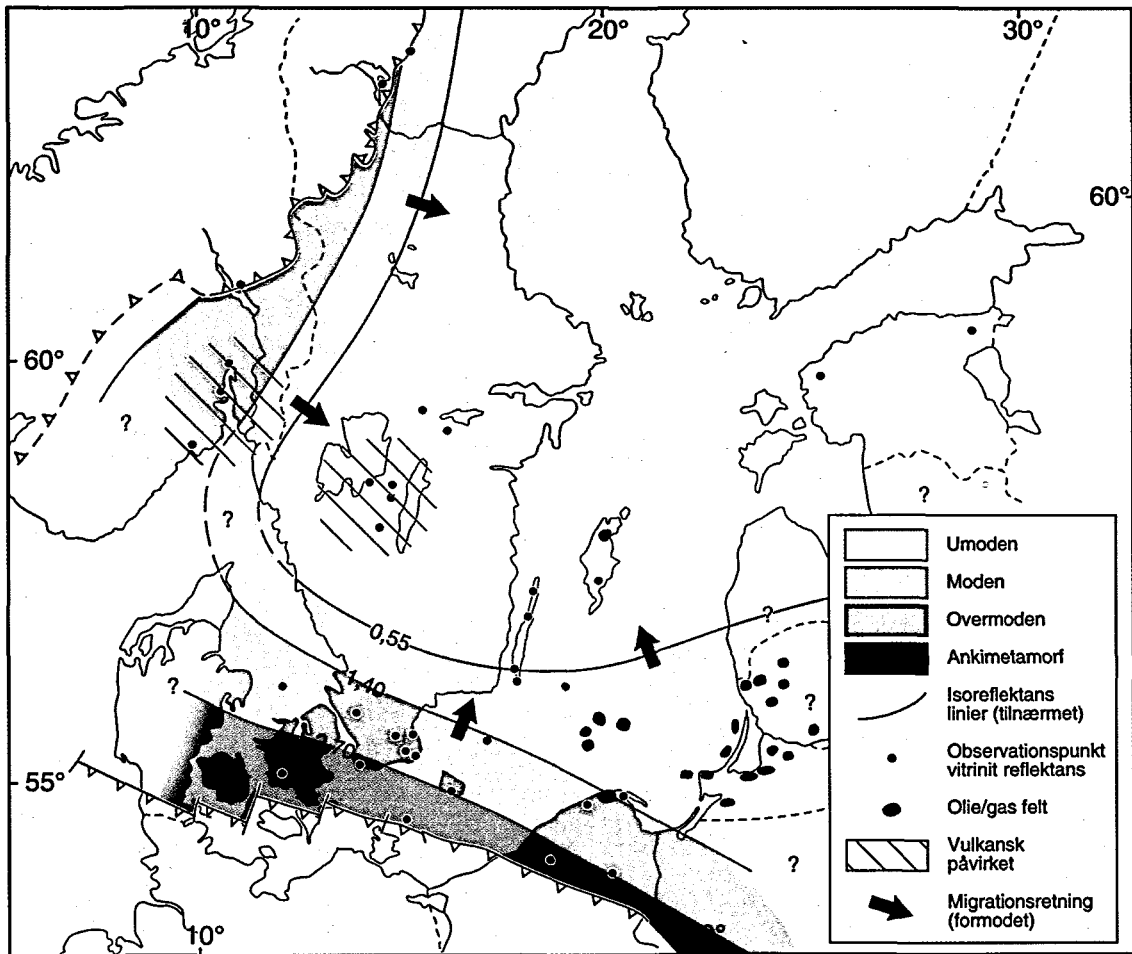


Fig. 19. Tentativt kort over modenhedsfordelingen i de nedre palæozoiske aflejringer i det sydlige Baltoskandia bestemt ud fra reflektans af Alun Skifer "vitrinit". Forløbet af modenhedslinierne langs de norsk-svenske Kaledonider er baseret på modenhedsmodellering i et kaledonsk forlandsbassin (Samuelson 1997). Figuren viser også de nedre palæozoiske olieletter i det sydøstlige område. Ikke alle disse felter har Alun Skiferen som kilde.

tysk-polske KDF (Górecki et al. 1992). I Slagelse-1 boringen på Sjælland og Terne-1 boringen i Kattegat er Alun Skiferen kraftigt varmepåvirket ( $R_o = 3,2\%$  i Slagelse-1 og  $2,7\%$  Terne-1) og viser ankimetamorfe omdannelser.

Alun Skiferens indsnykningshistorie i området er kompleks og omfatter mindst to adskilte indsnykningsforløb: et kaledonisk fra Kambrium til Devon og et post-hercynisk fra Perm (Zechstein) til nu. Den tidlige palæozoiske indsnykning var langsom helt frem til begyndelsen af Sen Silur, hvorefter hurtig indsnykning førte til akkumulation af mindst 3 km aflejringer gennem Sen Silur og tidligste Devon. Dette skift repræsenterer en ændring fra indsnykning overvejende betinget af termal kontraktion og sedimentbelastning langs Det Baltiske Skjold til udvikling af et forlandsbassin foran den tysk-polske KDF (Buchardt & Niel-

sen 1985, Vejrbæk 1985, EUGENO-S Working Group 1988, Michelsen & Nielsen 1991, Vejrbæk et al. 1994). Den post-kaledoniske hævnning og erosion af disse ganske store mægtigheder af forlandssedimenter er ikke præcist dateret, men skete sandsynligvis tidligere end eller samtidigt med den sen-karbone og tidligt perme rift-episode, der kan observeres under Zechstein aflejringerne i store dele af Danmark (Liboriussen et al. 1987, Michelsen & Nielsen 1991). Fra Sen Perm har området påny været udsat for indsnykning, denne gang i relation til dannelsen af Det Danske Bassin og tilgrænsende bassiner langs STZ. Inversion langs STZ i Kridt og Tidlig Tertiær har resulteret i hævnning og blotning af den termalt overmodne Alun Skifer på Bornholm og i Skåne.

Den veldefinerede stigning i modenhed fra nord og nordøst mod den tysk-polske KDF (Fig. 21) peger på,



Fig. 20. Alun Skifer olie? 20A. Sprækkeudfyldning med asfaltlignende pyrobitumen i borekerne fra Alun Skiferen ved Ranstad på Billingen. 20B. Frisk råolie fra kammerudfyldninger i nedre ordovicisk orthoceratit fra Kinnekulle. I begge tilfælde kan olien muligvis være dannet ved opvarmning af Alun Skifer fra den ovenliggende Kinnediabas. Fotos B. Buchardt.

at det nutidige modenhedsmønster kan forklares alene ud fra den kaledoniske indsynkningshistorie. Ifølge denne tolkning nåede Alun Skiferen olieinduet i Sen Silur, og oliedannelsen var afsluttet allerede i Tidlig Devon. Vores termale model forudsætter enten usædvanligt høje geotermale gradienter (40–45°C/km) eller yderligere aflejringsstykker på to til fire km ud over de tre km, der kan udledes af indsynkningsdiagrammerne og de seismiske profiler. Jeppsson & Laufeld (1986) har beskrevet øvre silure conodoner fra Öved-Ramsåsa Gruppen i Skåne, der viser ingen eller kun yderst begrænset varmepåvirkning. Dette peger mod store termale gradienter mellem Alun Skiferen og de sen-silure aflejringer i området, der adskilles af ca. 2 km sediment overvejende af Sen Silur alder. Det er således sandsynligt, at det kaledoniske forlandsbassin har været præget af store termale gradienter mellem bund og top.

Alun Skiferens udbredelse og modenhedsforhold er ukendt vest for Terne- og Slagelse-boringerne. Der er imidlertid al mulig grund til at antage, at Alun Skiferen har været udbredt over den samlede palæozoiske palæoshelf, og at erosionsrester derfor vil kunne påtræffes på stor dybde under yngre aflejringer så langt mod vest som KDF i Nordsøen. Seismisk påvisning af store mægtigheder af formodet nedre palæozoiske aflejringer i disse områder (Liboriussen et al. 1987, EUGENO-S 1988 Working Group, Vejrbæk & Britze 1994) peger på en modenhedshistorie svarende til den ovenfor beskrevne, og det er derfor næppe sandsynligt at finde umoden eller oliedannende Alun Skifer vest for STZ.

Kulbrinteforekomster kendes fra en række spredte forekomster i Baltoskandia (Fig. 19). De eneste kommercielle fund optræder i Den Baltiske Syneklise, hvor især Kaliningrad og de tilgrænsende områder er vigtige. Kulbrinter findes her i sandsten af mellem kambrisk alder (Górecki et al. 1992). På Gotland kendes

en række små olieforekomster i ordoviciske og silure revdannelser, der geokemisk synes at stamme fra Alun Skiferen (Dahl et al. 1989). I så fald må olien være migreret over relativt lange afstande fra de oliedannende områder mod syd og sydvest, idet Alun Skiferen under Gotland som tidligere nævnt er umoden. Spredte fund af olie i kambriske og ordoviciske kalksten i Västergötland (Fig. 20) må tilskrives enten lokal opvarmning fra de øvre palæozoiske sills eller oliedannelse i et norsk-svensk kaledonisk forlandsbassin nordvest herfor. Ifølge Middleton et al. (1996) og Samuelson (1997) blev et sådant forlandsbassin udviklet langs hele den vestlige margin af Det Baltiske Skjold i slutningen af Silur og begyndelsen af Devon, og en række forekomster af bitumen og asfalt i det svenske grundfjeld kan forklares ved oliedannelse i Alun Skiferen under indsynkningen i forlandsbassinet.

Modning af Alun Skiferen i det kaledoniske forlandsbassin syd og sydvest for Det Baltiske Skjold må have ført til dannelse af store mængder kulbrinter. Det kan undre, at der i dag ikke findes spor af disse i området. En del af den dannede olie er forblevet i skiferen, der på grund af sin tykkelse og ensartethed har haft ringe dræneringsegenskaber. Den kan den i dag ses som pyrobitumen og grafit, der medvirker til skiferens kraftige sortfarvning (Fig. 12C og 12D). Migrerende kulbrinter kan være akkumuleret i bjergarter af Devon alder (Old Red Sandstone) dannet i forbindelse med den kaledoniske foldning. Sådanne bjergarter kendes fra Öved-Ramsåsa Gruppen i Skåne (Öved Sandstenen, Jeppsson & Laufeld 1986), hvor de imidlertid ikke viser spor efter kulbrinter. I de øvrige undersøgte områder er disse bjergarter og dermed sporene af et eventuelt kulbrinteindhold fjernet ved senere erosion. Der kendes heller ikke spor efter kulbrinter i de nedre kambriske sandsten, der sikkert allerede var kraftigt cementerede ved kulbrintedannelsens indtræden. Der er således næppe udsigt til at finde

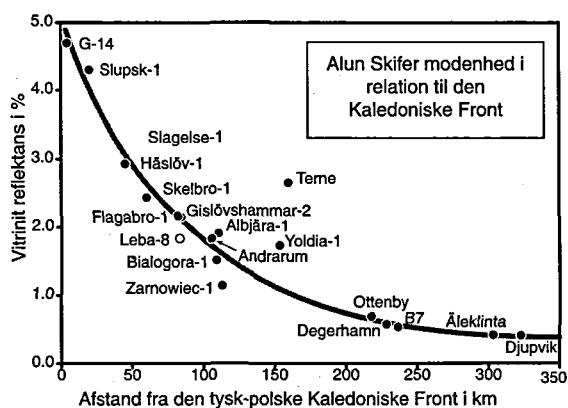


Fig. 21. Alun Skiferens termale modenhed set i relation til afstand fra den tyske-polske kaledonidfront. Modenheden er bestemt på basis af reflektans fra vitrinitlignende partikler i skiferen.

Alun Skifer baserede kulbrintedannelser i de danske områder.

## 10. Udnyttelseshistorie

Alun Skiferens udnyttelseshistorie er alsidig og spændende. De egenskaber, der gennem tiden har gjort Alun Skiferen økonomisk interessant, har alle deres oprindelse i de iltfattige aflejningsforhold: pyrit som udgangspunkt for alunproduktion, velbevaret organisk materiale som kilde til direkte energiudnyttelse og som udgangspunkt for kulbrintedannelse, antrakonitkonkretioner som basis for fremstilling af brændt kalk og cement, og den specielle metalberigelse som grundlag for udvindelse af bl.a. uran og radium.

**Alun.** Alunsalt ( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ) er et letopløseligt salt, der smager bittert med en astringerende (sammensnærende) effekt. Alun var tidligere et vigtigt kemikalie brugt bl.a. ved garvning af huder, bejdning og farvning af tekstiler og til brandhæmmende imprægnering af træværk. I medicinen har det bl.a. været benyttet som blødningsstandsende middel, og alunstifter til behandling af små snitsår f.eks. efter barbering forhandles stadig (DSB-stiften: Den Stopper Blodet). Alun bruges også i forbindelse med madlavning, bl.a. i den traditionelle syltning af svenske agurker.

Den første målrettede indsats for industriel udnyttelse af Alun Skiferen daterer sig til 1637, hvor den skånske adelsmand Joakim Beck oprettede et alunværk ved Andrarum i det østlige Skåne (Heiberg 1993, side 44). Skåne var endnu dengang en del af Danmark, og det kan derfor ikke undre at finde Christian den Fjerdes svigersøn Corfitz Ulfeldt som økonomisk bagmand i projektet. Joakim Beck gik fallit, alunværket

lukkede, og Ulfeldt lagde ved den lejlighed det Beck'ske gods Torup nær Malmø til sin voksende formue. De store mængder let tilgængeligt Alun Skifer ved Andrarum ledte naturligt til fornyet interesse efter den svenske magtovertagelse i 1658 (Stoltz 1932). Andrarumbruddet overgik til den svenske Piper-slægt, og det smukke 1700-tals Christinehof Slot tæt ved Andrarum står endnu som vidne om den rigdom, der blev skabt med udgangspunkt i alunproduktionen. På Christina Pipers tid i midten af 1700-tallet var produktionen på sit højeste, og virksomheden var den største i Skåne.

Alunproduktionen var baseret på skiferens indhold af pyrit og illit. Gennem ristning ved høj temperatur omdannedes pyrit til svovlsyre, der ved tilsætning af vand reagerede med illit under dannelse af letopløselige kaliumaluminiumsulfater. Efter udludning og inddampning kunne alunsaltet indvindes direkte fra opløsningen. Restproduktet var rødbrændt skiferslagge, den såkaldte rødfyr, der stadig kan ses i de store slaggehøje ved f.eks. Andrarum. Samtidigt med alunsaltet udfældedes også rødt slam, der var et vigtigt råmateriale for fremstilling af den røde farve – falurød – der pryder de fleste svenske træhuse. Også Sveriges andre Alun Skifer forekomster blev udnyttet til alunproduktion. I begyndelsen af 1800-tallet fandtes i alt otte "alunbruk" i landet, hvoraf Latorpbruket i Närke var det største (Hessland & Armands 1978). Da produktionen var på sit højeste, producerede de otte virksomheder mere end 250.000 kg alun årligt. Alunværket ved Degerhamn på Öland er bevaret som et særegent bruksmiljø, hvor de gamle udludningsanlæg stadig kan beses. Også i Oslo anlagdes et alunværk, mens et forsøg med alunudvinding på Bornholm i 1840-erne ikke blev nogen succes (Larsen 1965). Den sidste alunproduktion ophørte i 1912 med nedlæggelsen af Andrarumværket i Skåne.

**Byggematerialer og jordbrugskalk.** Særligt Alun Skiferen i Västergötland har et stort indhold af kalkkonkretioner (antrakoniter), der egner sig til fremstilling af brændt kalk. Samtidigt gør skiferens lave termale omdannelsesgrad den velegnet som brændsel. Produktionen af brændt kalk til landbrugskalk og mørtel var et vigtigt erhverv ved Billingen, Kinnekulle og Halle-Hunneberg, og overalt i området kan man endnu se spor efter skiferbrydning og kalkbrænding. Den sidste brænding ophørte så sent som i 1950-erne, og ved Trolmen på Kinnekulle kan man se velbevarede rester af de sidste kalkmiler.

En blanding af finmalet, brændt Alun Skifer og kalksten benyttedes i Sverige fra 1924 til fremstilling af gasbeton (Ytong) i industriel målestok (Munthe et al. 1928). Produktet var populært bl.a. til rumopdeling i nybyggeri og produktionen nåede i 1967 op på en årlig kapacitet på godt 800.000 m<sup>3</sup>. Fremstillingen var koncentreret til Närkeområdet og Västergötland; områder, der også kendetegnes ved høje urankoncentrationer i skiferen. De svenske sundhedsmyndigheder

blev sidst i tresserne opmærksomme på den sundhedsfare, som udgøres af radongas dannet ved henfald af uranatomer i skiferen (Hultquist 1956, Radonutredningen 1979, Åkerblom & Wilson 1982), og produktionen af gasbeton blev fra 1975 omlagt til andre råmaterialer (Andersson et al. 1985). Radongas har en halveringstid på 4 døgn og danner ved henfald radioaktive datterisotoper af bl.a. polonium og bismut, der ved indånding kan akkumuleres i lungevævet og dér give ophav til kræftskader. Tilsvarende problemer kendes fra henfald af uran i granitgrus benyttet f.eks. i betonbyggeri i Danmark.

*Olie og gas.* Som omtalt tidligere udgør Västergötland sammen med bl.a. Närke og Öland områder, hvor indsynkning og termal omdannelse har været ringe, og hvor Alun Skiferen er umoden, hvad angår olie-dannelse. Der kan derfor udvindes olie og gas ved destillation af skifre fra disse områder. Forsøgsproduktion af skiferolie fra Alun Skiferen indledtes ved Gössäter på Kinnekulle allerede i 1890-erne, men først i 1927 blev en egentlig industriel udvinding af råolie sat i system ved Kinne-Kleva ved Kinnekullens sydlige ende (Hessland & Armands 1978). Udvingningen fandt sted i store retorer under reducerende forhold ved tilledning af brint. Den udvundne råolie var let og velegnet til fremstilling af motorbrændstof, og anlægget blev anvendt af det svenske militær fra starten af Anden Verdenskrig og frem til 1950. Et tilsvarende skiferolieværk blev åbnet ved Kvarntorp i Närke i 1941, hvor produktionen først ophørte i 1966. Da produktionen af olieprodukter ved Kvarntorp var på sit højeste omkring 1960, fremstilledes årligt mere end 100.000 tons benzin, gasolie og fyringsolie. I alt er mere end 50 millioner tons skifer blevet brudt til olieproduktion i Närke. Som biprodukt udvandt man store mængder rent svovl til bl.a. svovlsyrefremstilling i celluloseindustrien. Desværre blev ikke alle de frigjorte svovlforbindelser fældet som svovlprodukter, og de lokale lugtgener fra skiferolieproduktionen har sikkert været omfattende.

Interessen for Alun Skiferen som moderbjergart daterer sig tilbage til 1950-erne, hvor en række boringer i det sydvestlige Skåne nåede skiferen i 2300 til 2600 meters dybde. Alle disse boringer var tørre, ganske som tilfældet var for Slagelse-1 boringen fra 1959, der nåede skiferen i godt 2900 meters dybde (Poulsen 1974). Først med det svenske OPAB's (OljeProspektering AB) indsats i Østersøen syd og øst for Öland fra 1973 til 1976 blev der udført egentlige moderbjergartsanalyser af de opborede Alun Skifer prøver. Hverken disse boringer eller Yoldia-1 boringen mellem Öland og Bornholm førte dog til påvisning af olieforekomster. I det danske område er Terne-1 boringen fra 1985 i Kattegat den eneste nyere efterforskningsboring, der har gennemboret Alun Skiferen (Michelsen & Nielsen 1991), mens andre boringer (Hans-1, Pernille-1, Stina-1 og Sæby-1) bl.a. skulle teste bjergarter, der kunne være reservoir for en even-

tuel Alun Skifer olie (Thomsen et al. 1987). Desværre var også disse boringer tørre. Siden 1989 har der ikke fra olieselskabernes side været interesse for at prospektere efter nedre palæozoiske "plays" i hverken det danske eller det svenske område.

Anderledes stiller situationen sig i det østlige Østersøområde, hvor der i 1980-erne blev påvist olie i nedre palæozoiske reservoirer både på land og til havs (Górecki et al. 1992, Brangulis et al. 1993). Kommercielle felter findes i mellem kambriske sandsten i Kalinin-grad og Litauen, og i dag produceres olie og kondensat fra mere end 10 felter. Det er dog uklart, om disse felter indeholder olie fra Alun Skifer eller fra andre nedre palæozoiske moderbjergarter. De små olie-felter på det nordlige Gotland havde i 1989 en daglig produktion på godt 50 tønner olie (Chew 1990), svarende stort set til Gotlandsfærgernes brændstofforbrug. Disse felter er i dag ude af produktion.

*Uran og andre metaller.* Alun Skiferens markante berigelse i en række metaller, herunder uran og vanadium, er allerere omtalt i afsnit 8. Her skal ses nærmere på de økonomiske aspekter af disse metalberigelser. Uranindholdet i Alun Skiferen varierer både stratigrafisk og regionalt, og de største uranberigelser findes i øvre kambriske lag i Billingen området i Västergötland (Dahlman & Gee 1977, Andersson et al. 1985), hvor uranindholdet er op til 400 ppm i *Peltura* Zonerne. Datterproduktet radium i kolmnoderne var tilstrækkelig stort til at påbegynde en forsøgsbrydning på Billings nordspids i starten af århundredet (Fig. 22A, Nordenskiöld 1883, Lundquist et al. 1931). Radium var dengang den vigtigste radioaktive strålingskilde og blev benyttet til medicinsk behandling af bl.a. kræftsygdomme. Brydningen blev aldrig rentabel, selskabet gik konkurs; men minegangene kan stadig ses i det gamle brud ved Stora Stolan.

Interessen for Alun Skiferen som grundlag for uranproduktion blev aktuel i forbindelse med Sveriges ambitiøse atomkraftprogram i 1960-erne og 1970-erne. En omfattende prospekteringsindsats førte til udpegning af et område på Sydbillingen syd for Skövde som velegnet til en forsøgsbrydning (Dahlman & Gee 1977). Her anlagde det statslige selskab AB Atomenergi i 1965 Ranstadværket som fuldskala pilot-anlæg til udvinding af uran og andre metaller fra Alun Skiferen. Brydningen fandt sted dels i et dagbrud, dels i minegange. Ifølge planerne skulle produktionen af uran ved fuld udbygning ligge på 120 tons årligt samtidig med biudvinding af bl.a. vanadium, molybdæn og nikkel. Omfattende protester fra lokale miljøgrupper – bl.a. på baggrund af problemer omkring udsivning af tungmetaller fra restskiferen – sammenholdt med faldende uranpriser på verdensmarkedet førte imidlertid til afbrydelse af produktionen allerede i 1970 (Martinsson 1974). Værket blev endelig lukket i 1984, og i dag er minen forsejlet og bruddet omdannet til rekreativt område omkring en kunstig sø.

Et højt vanadiumindhold er karakteristisk for den



Fig. 22. Aspekter af den praktiske udnyttelse af Alun Skiferen. 22A. Rester af minegange fra begyndelsen af århundredet fra brydning af radiumrige kolmnoduler ved St.Stolan, Nordbillingen. 22B. Nypakket kalkmile fra Kakeled ved Kinnekulle. Mileen er bygget af skiferflager og fyldt med en blanding af skifer og antrakonit. I baggrunden ses "rødfyr" fra tidligere brændinger. Mileen venter stadig på tilladelse til tænding. Fotos B. Buchardt.

ordoviciske del af Alun Skiferen (*Dictyonema* skiferen) i Skåne og på Öland (Westergård 1944, Andersson et al. 1985), hvor vanadiumkoncentrationen kan nå op på mellem 2500 og 3000 ppm i en 5 m tyk zone. Mindre mængder vanadium blev under 2. Verdenskrig udvundet af den skånske Alun Skifer, men brydningen var ikke rentabel efter krigen.

De omfattende udredningsarbejder, der i 1970-erne blev gennemført af SGU for den svenske stat (se f.eks. Hessland & Armands 1978, Andersson et al. 1985) med henblik på en storstilet økonomisk udnyttelse af Alun Skiferen ikke bare i Mellemsverige, men også i Skåne, Jämtland og Västerbotten, har ikke ført til fornyet aktivitet. Planerne omfattede ud over uranudnyttelse også mulighederne for at anvende Alun Skiferen som energiråstof i stort omfang. Skiferen udgør Sveriges største energireserve med et estimeret totalt energiindhold på mere end 300.000 milliarder megajoule! (Andersson et al. 1985).

I dag er interessen for Alun Skiferen som økonomisk råstof mindre end på noget tidspunkt siden Corfitz Ulfeldts dage. Et foreløbigt sidste, tragikomisk punktum for Alun Skiferens økonomiske udnyttelse blev sat i 1996, hvor Kinnekulle's kalkbrænderlaug – et privat amatørinitiativ i Västergötland på linie med fritidskulsviere og veteranjernbaneforeninger – fik forbud mod at genoplive den traditionelle kalkbrænding med Alun Skifer som brændsel på grund af lugtgener (Fig. 22B).

## 11. Har Alun Skiferen en videnskabelig fremtid?

Er Alun Skiferens rolle som studieobjekt udspillet med den aktuelt manglende økonomiske interesse? Forhåbentligt ikke.

Skiferens specielle geologi gør den til et velegnet "naturligt laboratorium", og en række vigtige studier udført gennem de seneste år peger på områder, hvor skiferen kan bidrage med nye videnskabelige resultater. De sidste ord om tolkningen af Alun Skiferens aflejringsmiljø er næppe sagt endnu, og vores undersøgelser af relationer mellem sporelementer, biofacies og iltindhold vil forhåbentligt kunne bidrage til at uddybe denne forståelse. I palæobiologisk sammenhæng har Klaus Müller og Dieter Wallosek haft succes med bearbejdning af fosfatiserede fossilrester fra konkretionerne i skiferen og har publiceret en række arbejder (f.eks. Müller & Wallosek 1985 og 1987), der med Euan Clarksons ord "entirely revolutionized our perspective on Late Cambrian life" (Clarkson & Taylor 1995). Yderligere studier af tilsvarende materiale vil utvivlsomt bringe nye revolutionerende fund for dagen. Selv har Clarkson påpeget de interessante muligheder, skiferen giver for detailstudier af mikroevolutionære miljøtilpasninger i de artsfattige trilobitfaunaer i Øvre Kambrium (Clarkson & Taylor 1995).

Skiferens indhold af uomdannet organisk materiale fra en tidlig fase af planteverdenens udvikling giver gode mulighed for studier af primitive algers organi-



ske geokemi, og her viser en særdeles detaljeret undersøgelse af det organiske materiales kemiske sammensætning (Bharati et al. 1995) vejen frem. Og selv om interessen for Alun Skiferen som moderbjergart er beskeden, har de omfattende modenhedsstudier åbnet mulighed for nytolkning af den kaledoniske indsynkningshistorie i Skandinavien som nyligt dokumenteret af Jörgen Samuelson (Samuelson 1997). Den tidligere omfattende brydning af Alun Skiferen kan danne basis for interessante miljøgeokemiske undersøgelser som demonstreret i et nyt arbejde af Bergbäk et al. (1997) fra det gamle alunværk ved Lovers syd for Kalmar, hvor forfatterne har studeret tungmetallers (herunder cadmiums) mobilisering og transport fra de gamle slaggebunker. Tilsvarende undersøgelser i f.eks. Västergötland, hvor skiferbrydningen fortsatte langt ind i dette århundrede, må kunne give værdifulde oplysninger om den tidlige tungmetalmobilisering.

Endelig er Alun Skiferen jo en af de få geologiske aflejringer med interskandinavisk udbredelse, og skandinavisk samarbejde er derfor et velkendt og værdsat aspekt af Alun Skifer studier. Der er således al mulig grund til at forvente, at Alun Skiferen også i fremtiden vil kunne interessere de geologiske forskere.

## 12. Efterskrift

Vores arbejde med Alun Skiferen har gennem årene været støttet af Amoco Production Company, det danske Energiministerium, det tyske Bundesministerium für Forschung und Technologie og Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd. Vi takker Jan Bergström (Stockholm) og Ole Valdemar Vejebak (GEUS) for nyttige og konstruktive kommentarer til manuskriptet. En speciel tak går til David G. Gee for hans mangeårige og inspirerende interesse for Alun Skiferen samt til de mange geologistuderende i København, der gennem årene har bidraget til forståelsen af Alun Skiferens geologi.

## Referencer

- Ahlberg, P. 1989: Cambrian stratigraphy of the När 1 deep well, Gotland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 111, 137–148.
- Ahlberg, P. & Ahlgren, J. 1996: Agnostids from the Upper Cambrian of Västergötland, Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 118, 129–140.
- Andersson, A., Dahlman, B., Gee, D. & Snäll, S. 1985: The Scandinavian Alum Shales. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie Ca 56*, Uppsala, 50 pp.
- Angelin, N. P. 1854: *Palaeontologica Scandinavica. Crustacea Formationis Transitionis 2*, Lund, 21–92.
- Armands, G. 1972: Geochemical studies of uranium, molybdenum and vanadium in a Swedish Alum Shale. *Stockholm Contributions in Geology* 27, 1–148.
- Arthur, M. A. & Sageman, B. B. 1994: Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits. *Annual Reviews in Earth and Planetary Science* 22, 499–551.
- Barnes, R. D. 1974: *Invertebrate Zoology*. 870 pp. W. B. Saunders Company, Philadelphia.
- Bednarczyk, W. 1984: Biostratigraphy of the Cambrian deposits in the Leba area. *Acta Geologica Polonica* 34, 96–110.
- Berg-Madsen, V. 1989: Origin and usage of the geological terms orsten, stinkstone and anthraconite. *Archives of Natural History* 16, 191–208.
- Bergbäk, B., Eklund, M., Lohm, U. & Svidén, J. 1997: Duration of soil cadmium and lead pollution from shale-based alum production. *Journal of Geochemical Exploration* 58, 309–317.
- Bergström, J. 1973: Organization, life and systematics of trilobites. *Fossils and Strata* 2, 69 pp.
- Bergström, J. 1980: Middle and Upper Cambrian biostratigraphy and sedimentation in south central Jämtland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 102, 373–376.
- Bergström, J., Holland, B., Larsson, K., Norling, E. & Sivhed, U. 1982: Guide to excursions in Scania. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie Ca 54*, 95 pp.
- Bergström, J. & Gee, D. G. 1985: The Cambrian in Scandinavia. In Gee, D. G. & Sturt, B. A. (eds) *The Caledonide Orogen – Scandinavia and related areas*, Wiley and Sons, New York, 247–271.
- Bergström, S. M. 1980: Conodonts as paleotemperature tools in Ordovician rocks of the Caledonides and adjacent areas in Scandinavia and the British Isles. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 102, 377–392.
- Berthelsen, A. 1992: Mobile Europe. In Blundell, M. D., Freeman, R. & Mueller, S. (eds) *European Geotraverse*. Cambridge University Press, 11–32.
- Bharati, S., Patience, R., Larter, S. R., Standen, G. & Poppett, I. J. F. 1995: Elucidation of the Alun Shale kerogen structure using a multi-disciplinary approach. *Organic Geochemistry* 23, 1043–1058.
- Bjørlykke, K. 1974: Depositional history and geochemical composition of Lower Palaeozoic epicontinental sediments from the Oslo Region. *Norges Geologiske Undersøkelse* 305, 1–81.
- Boström, K., Burman, J. O., Boström, B., Pontér, C., Brandlöv, S. & Alm, B. 1978: Geochemistry, mineralogy and origin of the sediments in the Gulf of Bothnia. *Finland Marine Research* 248, 8–35.
- Brangulis, A. P., Kanev, S. V., Margulis, L. S. & Pomeran-seva, R. A. 1993: Geology and hydrocarbon prospects of the Paleozoic in the Baltic region. In Parker, J. R. (ed) *Petroleum Geology of the Northwest Europe. Proceedings of the 4th Conference*, 651–656.
- Buchardt, B. & Nielsen, A.T. 1985: Carbon and oxygen isotope composition of Cambro-Silurian limestone and anthraconite from Bornholm: Evidence for deep burial diagenesis. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 33, 415–435.
- Buchardt, B., Clausen, J. & Thomsen, E. 1986: Carbon isotope composition of Lower Paleozoic kerogen: Effects of maturation. *Organic Geochemistry* 10, 127–134.
- Buchardt, B. & Lewan, M. D. 1987: Organic geochemistry and source rock potential of the Cambro-Ordovician

- Alum Shale in southern Scandinavia. Internal report, Amoco Production Company, Tulsa. 90 pp.
- Buchardt, B. & Lewan, M. D. 1990: Reflectance of vitrinite-like macerals as a thermal maturity index in the Cambrian-Ordovician Alum Shale, southern Scandinavia. *American Association of Petrology Geological Bulletin* 74, 394–406.
- Buchardt, B. 1994: Alunskiferen: Et isotopgeokemisk signal om 500 millioner gammelt iltvind i Norden. *Naturens Verden* 11, 408–416.
- Buchardt, B., Nielsen, A.T., Schovsbo, N. & Wilken, U. G. 1994: Source rock potential and thermal maturity of Lower Paleozoic black shales in Baltoscandia. PREW-SOR-Project Group, Geological Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, 58 pp.
- Bøggild, D. B. 1943: Danmarks Mineraler. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Ser. II 71, 68 pp.
- Callisen, K. 1914: Tenformede tungspatkrystaller (Pseudo-Gaylussit og Pseudo-Pirssonit) i Alunskiferen. *Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening* 4, 245–258.
- Calvert, S. E. 1976: The mineralogy and geochemistry of near-shore sediments. In Riley, J. P. & Chester, R. (eds) *Chemical Oceanography* 6, Academic Press, London, 187–280.
- Canfield, D. E. & Raiswell, R. 1991: Pyrite formation and fossil preservation. In Allison, A. & Briggs, D. E. G. (eds) *Taphonomy; releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, New York, 337–387.
- Chew, K. J. 1990: Europe. *American Association Petroleum Geologists Bulletin* 74, 10B, 240–256.
- Clarkson, E. N. K. 1973: Morphology and evolution of the eye in Upper Cambrian *Olenidae* (Trilobita). *Paleontology* 16, 735–763.
- Clarkson, E. N. K. & Taylor, C. M. 1995: The lost world of the olenid trilobites. *Geology Today*, 147–154.
- Dahl, J., Hallberg, R. & Kaplan, I. R. 1988: Effects of irradiation from uranium decay on extractable organic matter in the Alum Shales of Sweden. *Organic Geochemistry* 12, 559–571.
- Dahl, J., Chen, R. T. & Kaplan, I. R. 1989: Alum Shale bitumen maturation and migration: Implications for Gotland's oil. *Journal of Petroleum Geology* 12, 465–476.
- Dahlman, B. & Gee, D. 1977: Översigt över Billingen-Falbygdens geologi. Bilaga 1 i Betänkande av Billingenutredningen. Statens offentliga utredningar 1977, 47. Stockholm, Industridepartementet, 219–255.
- Demaison, G. J. & Moore, G. T. 1980: Anoxic environments and oil source bed genesis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 64, 1179–1209.
- Dons, T. 1989: Alunskifer Formationen, Bind 3: Västergötland – Diagenese. Institut for Historisk Geologi og Paläontologi, Københavns Universitet, København. Upubliceret cand.scient. afhandling, 94 pp.
- Durand, B. & Monin, J. C. 1980: Elemental analysis of kerogens (C, H, O, N, S, Fe). In Durand, B. (ed) *Kerogen, insoluble organic matter from sedimentary rocks*. Editions Technip Paris, 113–142.
- Dworatzek, M. 1987: Sedimentology and petrology of carbonates intercalations in the Upper Cambrian Olenid Shale facies of southern Sweden. Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C 819, 71 pp.
- Erdtmann, B. D. 1982: A reorganization and proposed phylogenetic classification of plantic Tremadoc (early Ordovician) dendroid graptolites. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 62, 121–144.
- EUGENO-S Working Group 1988: Crustal structure and tectonic evolution of the transition between the Baltic Shield and the North German Caledonides. *Tectonophysics* 150, 253–348.
- Fortey, R. A. 1974: The Ordovician trilobites of Spitsbergen. I. Olenidae. *Norsk Polarinstut Skrifter* 162, 81 pp.
- Fortey, R. A. 1985: Pelagic trilobites as an example of deducing the life habits of extinct arthropods. In Bowes D. R. and Waterston C. D. (eds) *Fossil arthropods as living animals*. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences 76, 219–230.
- Fortey, R. A. & Wilmot, N.V. 1991: Trilobite cuticle thickness in relation to paleoenvironment. *Paläontologie* 62, 141–151.
- Gee, D. G. 1972: The regional geological context of the Tåsjö uranium project, Caledonian Front, Central Sweden. Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C 671, 36 pp.
- Gee, D. G. 1980: Basement-cover relationships in the central Scandinavian Caledonides. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 96, 389–397.
- Gee, D. G. 1987: The Scandinavian Alum Shales – Mid Cambrian to Tremadocian deposition in response to early Caledonian subduction. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 67, 233–235.
- Gensel, P. G. & Andrews, H. N. 1987: The evolution of early land plants. *American Scientist* 75, 478–489.
- Goodarzi, F. 1988: Reflected light microscopy of chitinozoan fragments. *Marine and Petroleum Geology* 2, 72–78.
- Górecki, W., Lapinskas, P., Lashkova, L., Lashkov, E., Reicher, B., Sakalauskas, K. & Strzetelski, W. 1992: Petroleum Perspectives of the Baltic Syncline. *Polish Journal of Mineral Research* 1, 65–88.
- Grigelis, A. A. 1991: Geology and Geomorphology of the Baltic Sea. Lithuanian Geological Institute (in Russian with English summary), 421 pp.
- Hansen, K. 1945: The Middle and Upper Cambrian sedimentary rocks of Bornholm. *Danmarks Geologiske Undersøgelse*, 2. Række. 72 pp.
- Hayes, A. O. & Howell, B. F. 1937: Geology of Saint John, New Brunswick. Geological Society of America Special papers 5, 146 pp.
- Heiberg, S. 1993: Enhjørningen. Gyldendal, København. 451 pp.
- van Hengel, T. J. C. 1989: The shell Sweden venture. *Exploration Newsletter* 52, 8-9.
- Henningsmoen, G. 1957: The trilobite family Olenidae, with description of Norwegian material and remarks on the Olenid and Tremadocian Series. *Norsk Videnskaps-Akademi i Oslo, Skrifter* 1. Matematisk-Naturvidenskabelig Klasse 1, 303 pp.
- Hermelin, S. G. 1767: *Kungliga Svenska Vetenskaps Akademiens Handlingar* 28, Stockholm, 20–34.
- Hessland, I. & Armands, G. 1978: Alunskifer: Underlagsmaterialets Geologi. Statens Industriverk, Stockholm, 278 pp.
- Holland, H. D. 1979: Metals in black shales – a reassessment. *Economic Geology* 74, 1676–1680.
- Hultquist, B. 1956: Studies of naturally occurring ionizations with special reference to radiation doses in Swedish houses of various types. *Svenska Vetenskaps Akademiens Handlingar*, fjärde serien, Band 6, Stockholm.

- Hutchinson, R. D. 1962: Cambrian stratigraphy and trilobite faunas of southeastern Newfoundland. Geological Survey Canada Bulletin 88, 156 pp.
- Israelson, C., Halliday, A. N. & Buchardt, B. 1996: U-Pb dating of calcite concretions from Cambrian black shales and the Phanerozoic time scale. Earth and Planetary Science Letters 141, 153–159.
- Japsen, P. 1992: Landhævningerne i Sen Kridt og Tertiær i det nordlige Danmark. Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1990–91, 169–182.
- Jell, P. A. 1978: Trilobite respiration and genal caeca. Alcheringa 2, Sydney, 251–260.
- Jensenius, J. 1987: Regional studies of fluid inclusions in Paleozoic sediments from Southern Scandinavia. Bulletin of the Geological Society of Denmark 36, 221–235.
- Jeppsson, L. & Laufeld, S. 1986: The Late Silurian Öved-Ramsåsa Group in Skåne, South Sweden. Sveriges Geologiska Undersökning, Serie Ca 58, Uppsala. 45 pp.
- Kaljo, D., Borovko, N., Heinsalu, H., Khazanovich, K., Mens, K., Popov, L., Sergeyeva, S., Sobolevskaya, R. & Viira, V. 1985: The Cambrian-Ordovician boundary in the Baltic-Ladoga clint area (North Estonia and Leningrad Region, USSR). Proceedings Academy Science of Estonian SSR. Geology 35, 97–108.
- Katzung, G., Giese, U., Walter, R. & Von Winterfeld, 1993: The Rügen Caledonides, northeast Germany. Geological Magazine 130, 725–730.
- Kisch, H. J. 1980: Incipient metamorphism of Cambro-Silurian clastic rocks from the Jämtland Supergroup, Central Scandinavian Caledonides, Western Sweden: Illite crystallinity and 'vitrinite' reflectance. Journal geological Society London 137, 271–288.
- Larsen, A. 1965: Læså, Bornholm fra tidernes morgen. Bornholms Tidendes Forlag, Rønne, 151 pp.
- Leventhal, J. 1990: Comparative geochemistry of metals and rare earth elements from the Cambrian alum shale and kolm of Sweden. Special Publications International Association of Sedimentology 11, 203–216.
- Lewan, M. D. 1985: Evaluation of petroleum generation by hydrous pyrolysis experimentation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 315, 123–134.
- Lewan, M. D. & Buchardt, B. 1989: Irradiation of organic matter by uranium decay in the Alum Shale. Geochimica et Cosmochimica Acta 53, 1307–1322.
- Liboriussen, J., Ashton, P. & Tygesen, T. 1987: The tectonic evolution of the Fennoscandian Border Zone in Denmark. In Ziegler, P.A. (ed) Compressional Intra-Plate Deformations in the Alpine Foreland. Tectonophysics 137, 21–29.
- Lie, J. E., Husebye, E. S., Kinck, J. J. & Larsson, F. R. 1993: Geophysical evidence of Cambrian-Silurian sedimentary rocks in the Northern Skagerrak. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 115, 181–188.
- Linnarsson, J. G. O. 1869: Om Vestergötlands Cambriske og Siluriske aflagringar. Kungliga Svenska Vetenskabs Akademiens Handlingar 8(2) Stockholm, 1–89.
- Liu, K. & Buchardt, B. 1993: Geochemical characterization of Chinese Cambrian black shales and their comparison with Scandinavian Alum Shales. Scientia Geologica Sinica 2, 163–184.
- Lundquist, G., Högbom, A. & Westergård, A. H. 1931: Beskrivning til kortbladet Lugnås. Sveriges Geologiska Undersökning, Serie Aa 172, 185 pp.
- Martinsson, A. 1974: The Cambrian of Norden. In Holland, C.H. (ed) Cambrian of the British Isles, Norden and Spitsbergen. Lower Palaeozoic Rocks of the World 2. John Wiley and Sons, London, 185–283.
- Michelsen, O. & Nielsen, L. H. 1991: Well records on the Phanerozoic stratigraphy in the Fennoscandian Border Zone, Denmark. Hans-1, Sæby-1 and Terne-1 wells. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Serie A 29, 37 pp.
- Middleton, M. F., Tullborg, E. L., Larson, S. Å. & Björklund, L. 1996: Modelling of a Caledonian foreland basin in Sweden: petrophysical constraints. Marine and Petroleum Geology 13, 407–414.
- Munthe, H., Westergård, A. H. & Lundquist, G. 1928: Beskrivning till kartbladet Skövde. Sveriges Geologiska Undersökning, Serie Aa 121, 182 pp.
- Müller, K. J. & Walossek, D. 1985: *Skaracaida*, a new order of Crustacea from the Upper Cambrian of Västergötland, Sweden. Fossils and Strata 17, 65 pp.
- Müller, K. J. & Walossek, D. 1987: Morphology, ontogeny and life habit of *Agnostus pisiformis* from the Upper Cambrian of Sweden. Fossils and Strata 19, 124 pp.
- Müller, K. J. & Walossek, D. 1988: External morphology and larval development of the Upper Cambrian maxillopod *Bredocaris admirabilis*. Fossils and Strata 23, 70 pp.
- Nicoll, R. S., Nielsen, A. T., Laurie, J. R. & Shergold, J. H. 1992: Preliminary correlation of latest Cambrian to Early Ordovician sea level events in Australia and Scandinavia. In Webby B. D. and Laurie J. R. (eds) Global Perspectives on Ordovician Geology. Proceedings of the International Symposium on the Ordovician System 6, Elsevier, Rotterdam, 381–394.
- Nielsen, A. T. 1988a: Bornholms geologi I: Palæozoikum. Varv 1988, 44–63.
- Nielsen, A. T. 1988b: Bornholms geologi II: Palæozoikum. Varv 1988, 83–111.
- Nielsen, A. T. & Buchardt, B. 1994: Gislövshammar-2 shallow drillhole in eastern Scania, Sweden: Stratigraphy and geochemistry of the cored Lower Ordovician – Lower Cambrian strata. Final reports, Pre-Westphalian Source Rocks in northwest Europe. Geological Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, 44 pp.
- Nielsen, A. T. 1995: Trilobite systematics, biostratigraphy and paleoecology of the Lower Ordovician Komstad Limestone and Huk Formations, southern Scandinavia. Fossils and Strata 38, 374 pp.
- Nielsen, A. T. 1996: Iltsvind, sort slam og trilobiter – en Kambrisk cocktail. Varv 1996, 1–40.
- Nielsen, A. T. 1997: A review of Ordovician agnostid genera (*Trilobita*). Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences 87, pp. 463–501.
- Nielsen, J. K. 1996: Pyrit i Alunskiferen: Et studie over relationen mellem morfologi og geokemi. Geologisk Institut, Københavns Universitet, København. Upubliceret cand.scient. afhandling, 119 pp.
- Nikolaisen, F. & Henningsmoen, G. 1985: Upper Cambrian and Lower Tremadoc olenid trilobites from the Digermul Peninsula, Finnmark, northern Norway. Norges Geologiske Undersøgelse Bulletin 400, 1–49.
- Nikolaisen, F. & Henningsmoen, G. 1990: Lower and Middle Cambrian trilobites from the Digermul Peninsula, Finnmark, northern Norway. Norges Geologiske Undersøgelse Bulletin 419, 55–95.

- Nordenskiöld, A. E. 1883: Remarque sur le fer natif d'Ovifak et sur le bitume des roches cristallines de Suède. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences* 116, 667–678.
- Norling, E. & Bergström, J. 1987: Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of Scania, southern Sweden. *Tectonophysics* 137, 7–19.
- Olsen, M. 1989: Alun Skifer Formationen, Västergötland. Bind II: En geokemisk undersøgelse af uran, molybdæn og vanadium samt en bestemmelse af den organiske geokemi ved hjælp af termale modenhedsparametre. Institut for Historisk Geologi og Palæontologi, Københavns Universitet, København. Upubliceret cand.scient. afhandling, 116 pp.
- Owen, A. W., Bruton, D. L., Bockelie, J. F. & Bockelie, T. G. 1990: The Ordovician successions of the Oslo Region, Norway. *Norges Geologiske Undersøgelse Special Publications* no. 4, 18 pp.
- Pedersen, G. K. 1989: The sedimentology of Lower Palaeozoic black shales from the shallow wells Skelbro 1 and Billegrav 1, Bornholm, Denmark. *Bulletin of the Geological Society Denmark* 37, 151–174.
- Popov, L. E., Dronov, A. V., & Ivantsov, A. Ju. 1997: Outline of geology and stratigraphy. In Popov, L. E. (ed) *Wogogob Excursion Guide*, St. Petersburg, Russia. Uppsala University, Department of Historical Geology and Palaeontology, Uppsala, 2–9.
- Poulsen, C. 1974: Further contributions to the knowledge of the Palaeozoic of Slagelse no. 1, Western Sealand. *Danmarks Geologiske Undersøgelse*, II række, nr. 101, 42 pp.
- Poulsen, V. 1966: Cambro-Silurian Stratigraphy of Bornholm. *Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening* 16, 118–137.
- Priem, H. N. A., Mulder, F. G., Boelrijk, N. A. I. M., Hebeda, F. H., Verschure, R. H. & Verdurmen, E. A. T. H. 1968: Geochronological and paleomagnetic reconnaissance survey in part of central and southern Sweden. *Physics Earth Planetary Interiors* 1, 373–380.
- Pukkonen, E. & Buchardt, B. 1994: The Dictyonema Shale of Estonia. Final reports, Pre-Westphalian Source Rocks in northwest Europe. Geological Institute, Copenhagen, 37 pp.
- Radonutredningen 1979: Preliminary proposals for measures against radiation hazards in buildings. Report from the Radon Commission. Jordbruksdepartementet, Ds Jo 1979, 9, 114 pp.
- Rinman, S. 1788: *Bergwerks Lexicon*. Stockholm, 1248 pp.
- Robison, R. A. 1972: Mode of life of agnostide trilobites. *International Geological Congress*, 24th session, Section 7, 33–40.
- Rudberg, S. 1984: Scandinavian Highlands. In Embleton, C. (ed) *Geomorphology of Europe*. Verlag Chemie, Weinheim, 92–104.
- Rushton, A. W. A. 1974: The Cambrian of Wales and England. In Holland C. H. (ed) *Cambrian of the British Isles*, Norden and Spitzbergen. John Wiley & Sons, London, 43–121.
- Samuelson, J. 1997: Petroleum potential and thermal history of the Caledonian Foreland Basin, Sweden. *Chalmers Techniska Högskola, Geologiska Institutionen*, Publ. A 83, Göteborg, 61 pp.
- Schovsbo, N. H. 1995: Uorganisk geokemisk undersøgelse af Alunskifer Formationen i Sverige (Mellem Kambrium til Nedre Ordovicium); bundvandets iltindhold og sedimentationsratens betydning for den geokemiske sammensætning. *Geologisk Institut, Københavns Universitet, København*. Upubliceret cand.scient. afhandling, 103 pp.
- Scotese, C. R. & McKerrow, W. S. 1990: Revised World maps and introduction. In McKerrow, W. S. & Scotese, C. R. (eds): *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. Geological Society of London 12, 1–21.
- Shepard, F. P. 1973: *Submarine Geology*. Third edition. Harper and Row, 517pp.
- Snäll, S. 1988: Mineralogy and maturity of the alum shales of south-central Jämtland, Sweden. *Sveriges geologiska Undersökning, Serie C. No. 118*, 46 pp.
- Stach, E. M., Mackowsky, Th., Teichmüller, M., Taylor, G. H., Chandra, D. & Teichmüller, R. 1982: Stach's textbook of coal petrology. Gebrüder Bornträger, Berlin, 535 pp.
- Stoltz, E. 1932: Andrarums Alunbruk. En försvunnen bruksbygd. En historisk-geografisk og kulturgeografisk otrsstudie. *Svensk Geografisk Årsbok 1932*. Sydsvenska Geografiska Sällskapet, 65–122.
- Størmer, L. 1941: Dictyonema shales outside the Oslo Region. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 20, 161–170.
- Sundaraman, P. & Dahl, J. E. 1993: Depositional environment, thermal maturity and irradiation effects on porphyry distribution: Alum Shale, Sweden. *Organic Geochemistry* 20, 333–337.
- Sundblad, K. & Gee, D. G. 1985: Occurrence of a uraniferous-vanadiniferous graphitic phyllite in the Köli Nappe of the Stekenjokk area, central Swedish Caledonides. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 106, 269–274.
- Surlyk, F. 1980: Geology of the European countries: Denmark. In *Geology of the European countries: Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden*. 26th International Geological Congress, Paris. Graham and Trotman, London, 5–50.
- Svanberg, J. 1848: Jod i Alunskiffer och om kemiska förloppet ved alunskiffers rostning. *Öfversigt af Kungliga Vetenskaps Akademiens Förhandlingar* 5/7, 131–133.
- Tegengren, F. R. 1924: Sveriges ädlare malmer och bergverk. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie Ca 17*, 406 pp.
- Teller, L. & Korejwo, K. 1968: Early Paleozoic deposits in the deep substratum of NW Poland. *Acta Geologica Polonia* 18, 613–619.
- Thickpenny, A. 1984: The sedimentology of the Swedish Alum Shales. In Stow, D. O. W. & Piper, D. J. W. (eds) *Fine Grained Sediments, Deep Water Processes*. Blackwell, Oxford, 511–526.
- Thickpenny, A. 1987: Palaeo-oceanography and depositional environment of the Scandinavian Alum Shales: Sedimentological and geochemical evidence. In Leggett, J. K. & Zuffa, G. G. (eds) *Marine clastic sedimentology*. Graham & Trotman, London, 156–171.
- Thomas, S., Sivhed, U., Erlström, M. & Seifert, M. 1993: Seismostratigraphy and structural framework of the SW Baltic Sea. *Terra Nova* 5, 364–374.
- Thomsen, E., Lindgreen, H. & Wrang, P. 1983: Investigation on the source rock potential of Denmark. In Kaaschieter, J. P. H. & Reijers, T. J. A. (eds) *Petroleum geology of the southeastern North Sea and the adjacent onshore area*. *Geologie Mijnbouw* 62, 221–239.

- Thomsen, E., Damtoft, K. & Andersen, C. 1987: Hydrocarbon plays in Denmark outside the Central Trough. In Brooks, J. & Glennie, K.W. (eds) *Petroleum Geology of North West Europe*. Graham & Trotman, London, 375–388.
- Thorslund, P. & Westergaard, A. H. 1938: Deep boring through the Cambro-Silurian at File Haidar, Gotland. *Sveriges Geologiska Undersökning, Series C 415*, 56 pp.
- Thorslund, P. & Axberg, S. 1979: Geology of the southern Bothnian Sea, Part 1. *Bulletin Geologiska Institutet Universitet Uppsala, New Series 8*, 35–62.
- Tissot, B. P. & Welte, D. H. 1984: Petroleum formation and occurrence, a new approach to oil and gas exploration. Springer-Verlag, Berlin, 538 pp.
- Tjernvik, T. E. 1958: The Tremadocian beds at Flagabro in South-Eastern (Sweden). *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 80*, 259–276.
- Torsvik, T. H. 1996: Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Paleozoic; a tale of Baltica and Laurentia. *Earth Science Reviews 40*, 229–258.
- Tyson, R. V. & Pearson, T. H. 1991: Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview. *Geological Society Special Publication 58*, 1–24.
- Vejbæk, O. V. 1985: Seismic stratigraphy and tectonics of sedimentary basins around Bornholm southern Baltic. *Danmarks Geologiske Undersøgelse Serie A*, 30 pp.
- Vejbæk, O. V. & Britze, P. 1994: Geologisk kort over Danmark, Top præ-Zechstein. *Danmarks Geologiske Undersøgelse, Kortserie nr. 45*.
- Vejbæk, O. V., Stouge, S. & Poulsen, K. D. 1994: Palaeozoic tectonics and sedimentary evolution and hydrocarbon prospectivity in the Bornholm area. *Danmarks Geologiske Undersøgelse Serie A, no. 34*. 23 pp.
- van Wamel, W. A. 1974: Conodont biostratigraphy of the Upper Cambrian and Lower Ordovician of north-western Öland, south-eastern Sweden. *Utrecht Micropaleontological Bulletin 10*, 126 pp.
- Westergård, A. H. 1909: Studier öfver Dicyotgraptusskifferen och dess gränslager. *Meddelelser fra Lunds Geologiska Fältklubb, Ser. B 4*, Lund, 79 pp.
- Westergård, A. H. 1922: Sveriges Olenidskiffer. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie Ca 18*, 205 pp.
- Westergård, A. H. 1942: Stratigraphic results of the borings through the Alum Shales of Scania made in 1941–42. *Lunds Geologiska Fältklubb 185*, 1–20.
- Westergård, A. H. 1944: Borringar genom Skånes Alunskiffer. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C 459*, 37 pp.
- Westergård, A. H. 1946: *Agnostidea* of the Middle Cambrian of Sweden. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C 477*, 1–140.
- Westergård, A. H. 1947: Supplementary notes on the Upper Cambrian trilobites of Sweden. *Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C 489*, 1–28.
- Westergård, A. H. 1953: Two problematic fossils from the Cambrian in Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 75*, 465–469.
- Wignall, P. B. 1994: Black shales. *Geology and Geophysics Monograph Series 30*. Clarendon Press, Oxford, 127 pp.
- Wilken, U. G. 1994: An organic geochemical investigation of the Alum Shale in the Hällekis-1 shallow drill-core, with special emphasis on the influence of uranium decay on the organic matter. *Geological Institute, University of Copenhagen. Upubliceret cand.scient. afhandling*, 132 pp.
- Zeck, H. P., Andriessen, P. A. M., Hansen, K., Jensen, P. K. & Rasmussen, B. L. 1988: Paleozoic paleo-cover of the southern part of the Fennoscandian Shield – Fission track constraints. *Tectonophysics 149*, 61–66.
- Ziegler, P. 1990: *Geological Atlas of Western and Central Europe*. Shell International Petroleum Maatschappij B.V., 239 pp.
- Åkerblom, G. and Wilson, C. 1982: Radon – geological aspects of an environmental problem. *Sveriges Geologiska Undersökning, Rapporter och Meddelande 30*, 47 pp.

## Appendix 1. Overfladenære boringer omtalt i teksten (se Fig. 5)

navn	fork. land	år	ejerskab	område	TD m	stratigrafi top	stratigrafi bund
Billegrav-1	Bi-1 Danmark	1985	KU	Bornholm	61	Rastrites Skifer	Dicellogr. Sk.
Skelbro-1	Sk-1 Danmark	1985	KU	Bornholm	43	Komstad Kalkst.	Broens Odde Fm.
Hällekis-1	Hä-1 Sverige	1991	KU/BGR	Västergötl.	45	Tøyen Skifer	Lingulid Sst.
Krossstation	Kr Sverige	1970	KU	Västergötl.	70	Rastrites Skifer	Prækambrium
Hynneberg-1	Hy Sverige	1985	SGU	Närke	?	N.Ordovicium	M.Kambrium
Bårstad-1	Ba Sverige	?	SGU	Östergötl.	?	?	?
Albjera-1	Al-1 Sverige	1989	KU/ES	Skåne	159	Dicellogr. Sk.	Alun Skifer
Lönstorp-1	Lö-1 Sverige	1989	KU/ES	Skåne	82	Rastrites Skifer	Rastrites Skifer
Gislövshammar-2	Gi-2 Sverige	1991	KU/BGR	Skåne	106	Komstad Kalkst.	Rispebj. Sst.
Fågelsång-1	Få Sverige	?	SGU	Skåne	55	Dicellogr. Sk.	Alun Skifer
Flagabro-1	Fl Sverige	?	SGU	Skåne	54	Tøyen Skifer	Alun Skifer
Lovisefred	Lo Sverige	1977	SGU	Skåne	530	Wenlock	Arenig
Ottenby-2	Ot-2 Sverige	1990	KU/CTH	Öland	30	Köpingskl. Fm	Tessini Sst.
Djupvik-1	Dj-1 Sverige	1991	KU/BGR	Öland	7	Köpingskl. Fm	Tessini Sst.
När-1	Nä-1 Sverige	1968	SGU	Gotland	652	Silur	Prækambrium
File Haidar	W-1 Sverige	?	SGU	Gotland	?	?	?
File Haidar	FH-1 Sverige	1935	Skånska	Gotland	507	Silur	Prækambrium
Gotska Sandöen	Go Sverige	?	SGU	Østersøen	?	?	?

TD: Total dybde.

BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ;CTH: Chalmers Techniska Högskola, Göteborg; ES: Energistyrelsen; KU: Geologisk Institut, Københavns Universitet; SGU: Sveriges Geologiske Undersøgelse.

Appendix 2. Udvalgte dybe borer i det baltoskandiske område, der har nået nedre palæozoiske aflejringer (forkortelser refererer til Fig. 5)

navn	forkort.	land	år	status	boret af	top NP meter	top NP stratigr.	TD meter	TD stratigr.
Slagelse-1	SI-1	Danmark	1959	publ.	DAPCO	2594	Llandov.	2934	N.Kambrium
Nøvling-1	Nø-1	Danmark	1966	publ.	DUC	3465	Ludlow	3692	Ludlow
Rønde-1	Rø-1	Danmark	1966	publ.	DUC	4918	Ludlow	5258	Ludlow
Terne-1	Te	Danmark	1985	publ.	Amoco	2264	Ludlow	3326	N.Kambrium
Pernille-1	P	Danmark	1989	publ.	N.Hydro	3212	Wenlock	3624	Wenlock
Stina-1	S	Danmark	1989	konf.	Amoco	2118	Ludlow	2518	Wenlock
B-3	B-3	Sverige	1973	konf.	OPAB	53	Ludlow	1006	Prækambrium
B-3A	B-3A	Sverige	1973	konf.	OPAB	56	Silur	945	N.Kambrium
B-6	B-6	Sverige	1974	konf.	OPAB	25	Silur	838	M.Kambrium
B-7	B-7	Sverige	1974	konf.	OPAB	50	Silur	1020	Prækambrium
B-9	B-9	Sverige	1974	konf.	OPAB	?	Silur	1233	N.Kambrium
B-10	B-10	Sverige	1976	konf.	OPAB	44	Silur	509	Prækambrium
B-11	B-11	Sverige	1976	konf.	OPAB	88	Silur	1015	Prækambrium
BO-12	B-12	Sverige	1976	konf.	OPAB	118	Silur	793	Prækambrium
B-13	B-13	Sverige	1976	konf.	OPAB	169	Silur	958	Prækambrium
BO-20	BO-20	Sverige	1976	konf.	OPAB	77	Silur	644	M.Kambrium
Yoldia-1	Y-1	Sverige	1985	konf.	OPAB	161	Ludlow	998	N.Kambrium
Häslöv-1	Ha	Sverige	<1979	publ.	OPAB	2036	Silur	2572	N.Kambrium
Eskestorp-1	Es	Sverige	<1979	publ.	OPAB	2138	Silur	2493	N.Kambrium
Hölviksnäs-1	Hö	Sverige	<1950	publ.	OPAB	2067	Silur	2613	N.Kambrium
Maglarp-1	Ma	Sverige	<1979	publ.	OPAB	1906	Silur	1956	Silur
Falsterbo-1	Fa	Sverige	<1979	konf.	OPAB	?	?	?	?
Smygehuk-1	Sm	Sverige	<1979	publ.	OPAB	1620	Silur	1659	Silur
G-14 Arkona	G-14	Tyskland	>1980	publ.	Petrobalt.	1180	Silur	1967	Prækambrium
A8-1	A8-1	Polen	>1980	publ.	Petrobalt.	111	Ludlow	2272	Prækambrium
B16-1	B16-1	Polen	>1980	publ.	Petrobalt.	?	Prídolí	2409	Prækambrium
B2-1	B2-1	Polen	>1980	publ.	Petrobalt.	607	Prídolí	2910	Prækambrium
B8-1	B8-1	Polen	>1980	publ.	Petrobalt.	768	Prídolí	2505	Prækambrium
Bialogora-1	Bi	Polen	?	publ.	?	?	?	3058	M.Kambrium
Debki-1	De	Polen	?	publ.	?	?	?	2747	M.Kambrium
Koscierzyna-IG1	Ko	Polen	?	publ.	?	2097	N.Prídolí	5206	Vendian
Leba-8	Le	Polen	?	publ.	?	700	?	3340	Basement
Miasto-1	Mi	Polen	1966	publ.	?	2737	Ordov.	3745	Ordovicium
Slupsk-1	Sl	Polen	?	publ.	?	1150	Prídolí	?	Basement
Smoldzino-1	Sm	Polen	?	publ.	?	650	?	3430	Basement
Stubno-1	St	Polen	1966	publ.	?	2487	M.Siedl.	2530	M.Siedlice
Zarnowiec-2	Z-2	Polen	?	publ.	?	?	?	3247	Basement
C8-1	C8-1	Kalindr.	>1980	publ.	Petrobalt.	1168	Prídolí	3027	Prækambrium
D1-1	D1-1	Litauen	>1980	publ.	Petrobalt.	1110	Prídolí	2597	Prækambrium
E7-1	E7-1	Letland	>1980	publ.	Petrobalt.	657	Ludlow	1601	Prækambrium
E6-1	E6-1	Letland	>1980	publ.	Petrobalt.	607	Wenlock	1056	Prækambrium
P6-1	P6-1	Letland	>1980	publ.	Petrobalt.	470	Prídolí	1557	Prækambrium
Liepaja-1	Li	Letland	<1882	publ.	?	890	Ludlow	1950	Prækambrium
Ladoskino-1	Lo	Kalindr.	<1882	publ.	?	1145	Prídolí	3010	Prækambrium

NP: Nedre Palæozoikum; TD: Total dybde; publ.: publiceret; konf.: konfidentiel; Siedlice: Øvre Ludlow