

Foraminiferer i Kvartær stratigrafi: Laboratorie- og fremstillingsteknik samt udvalgte eksempler

KAREN LUISE KNUDSEN



Karen Luise Knudsen: Foraminiferer i Kvartær stratigrafi: Laboratorie- og fremstillingsteknik samt udvalgte eksempler. *Geologisk Tidsskrift*, nr. 3, pp. 1–25. København, 1998–10–29.

Formålet med denne artikel er at give studerende og andre interesserede en baggrund for at få størst muligt udbytte af de meget forskelligartede artikler, der publiceres om foraminiferernes anvendelse i palæoøkologi. Derudover er det et mål at give læseren en basal baggrund for selv at kunne gennemføre en foraminiferundersøgelse. Dels gives en grundig gennemgang af selve prøvetagnings- og laboratorteknikken, dels en indføring i almindeligt anvendte analysemetoder. Som baggrund for forståelsen af palæoøkologiske tolkninger på grundlag af foraminiferer gives en oversigt over recente faunaer i Skagerrak-Kattegat området samt et eksempel på recente faunafordelinger ud for en gletscher på Spitsbergen. Ved hjælp af en række eksempler, hovedsagelig fra dansk Kvartær stratigrafi, vises hvordan kendskabet til recente faunaer udnyttes i geologien, og der gives en beskrivelse og en diskussion af forskellige muligheder for fremstilling af palæoøkologiske resultater på en overskuelig og hensigtsmæssig måde.

Karen Luise Knudsen, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, 8000 Århus C, Danmark. 15. juni 1998.

1. Indledning

Foraminiferer bliver i højere og højere grad brugt i forbindelse med palæoceanografiske og palæoklimatiske undersøgelser. Ud fra kendskabet til foraminiferernes økologiske krav kan disse anvendes direkte som indikatorer for klima og miljø på aflejringstidspunktet. De benthiske foraminiferer afspejler således de økologiske forhold ved havbunden, mens de planktoniske indikerer overfladevandmassernes temperatur, salinitet og næringsforhold.

Sammensætningen af stabile oxygen og karbon isotoper i foraminiferskallerne kan også bruges i forbindelse med miljøtolkninger. Kalkskallerne dannes i isotopisk ligevægt med det omgivende vand, og de giver derfor oplysning om vandets kemiske sammensætning på det tidspunkt, da foraminifererne levede og dannede deres skaller. Hermed fås et indirekte mål for temperatur- og salinitetsforholdene på stedet (se oversigt af Mangerud 1992).

2. Oparbejdnings- og analyseteknik

Metoder til indsamling og oparbejdning af prøver til foraminiferanalyser er tidligere beskrevet af Meldgaard & Knudsen (1979). Da en del yderligere erfa-

ring er tilføjlet siden da, gives her en kort opdateret gennemgang. For en mere detaljeret gennemgang samt illustrationer af de enkelte punkter i processen henvises til artiklen af Meldgaard & Knudsen (1979).

2.1 Prøveafstand og prøvestørrelse

Prøveafstand og prøvestørrelse afhænger bla. af, hvilket formål man har med undersøgelsen, men bestemmes også af de praktiske muligheder. Ofte er prøvemængden f.eks. begrænset af, at mange forskellige forskere skal dele materialet fra den samme borekerne.

Prøveafstanden afhænger af, hvilken tidsmæssige opløsning man ønsker at nå frem til. Hvis sedimentationsraten og aflejringstiljøet i området er fuldstændig ukendt, vil det naturligvis være en fordel at starte med en pilotundersøgelse af nogle få prøver for derefter at gå tilbage og foretage den endelige prøvetagning. Ofte viser det sig alligevel at være nødvendigt med en ekstra endnu tættere prøvetagning, f.eks. omkring fauna-zonegrænserne, for at opnå en bedre tidsopløsning og forståelse for de oceanografiske og klimatiske ændringer. For at kunne få tilstrækkeligt materiale til AMS (Accelerator Mass Spectrometry) ¹⁴C dateringer er det desuden ofte nødvendigt at gå tilbage og udtage supplerende materiale. Først på et

relativt sent tidspunkt i en undersøgelse kender man de vigtigste niveauer, hvor ændringer i oceanografiske og klimatiske forhold afspejles i ændringer i faunaselskaberne. Med denne baggrund kan man give en fornuftig vurdering af, hvilke niveauer der bør dateres.

I aflejringer fra fjerde og fra den indre shelf (kontinentalsokkel) kan det være nødvendigt at udtage prøver på 100 g tør vægt til en foraminiferanalyse (se senere), mens det på den ydre shelf ofte er nok med 10–20 g. I dybhavssedimenter, der næsten udelukkende består af foraminiferer, er 1–2 g prøvemateriale ofte tilstrækkeligt. Man bør altid tilstræbe, at hver prøve repræsenterer et så kort tidsinterval som muligt. Derfor bør den enkelte prøve omfatte en så lille del af lagserien som muligt. Hvis der er synlig lagdeling i sedimentet, skal prøven således tages parallelt med denne og indenfor hvert sit veldefinerede lag.

2.2 Nedbrydning og sigtning

Prøven findeles i mindre stykker (1–3 cm³), mens den endnu er våd. Disse tørres i varmeskab (max. 50°C af hensyn til eventuelle senere aminosyre-dateringer), og den ønskede prøvemængde til analyse afvejes. Hvis der er rigeligt materiale til rådighed, er det en fordel at gemme lidt materiale som reserve, f.eks. til senere anvendelse til andre analysemetoder, men ofte vil det være nødvendigt at bruge alt. Kvartære sedimenter er normalt relativt lette at nedbryde. For det meste vil de være helt disintegrerede og klar til sigtning efter iblodsætning i vand (evt. tilsat lidt opvaskemiddel) i nogle få timer, eller måske natten over.

Hvis vand ikke er tilstrækkeligt til nedbrydningen, kan den tørrede og afvejede prøve i stedet sættes i blød i en ca. 5% opløsning af brintoverilte (H₂O₂). Efter ca. 20 minutters forløb vil materialet normalt være nedbrudt. Man bør bruge en så lav koncentration af brintoverilte som muligt og helst også en relativt kort iblodsætningstid, idet pyrit og/eller planterester i prøven kan forårsage dannelse af syre og dermed ætsning eller total opløsning af kalkskaller. Desuden vil brintoverilte også nedbryde visse løst sammenkittede agglutinerede foraminiferer (agglutinerede foraminiferer opbygger deres skal af korn fra havbunden).

Til prøver som består af meget fedt ler og eventuelt med et stort organisk indhold, kan man i stedet anvende en peptisator (Na₄P₂O₇ · 10 H₂O, et salt der neutraliserer positivt og negativt ladede molekyler i leret) til nedbrydningen. Enten koges prøven i 15–30 minutter i vand tilsat 1 teskefuld (ca. 10 g) peptisator, eller en tilsvarende mængde peptisator drysses direkte ud på den våde, lerede prøve på sigtebunden (se nedenfor). Ved at rotere prøven med peptisator og lidt vand rundt på sigten kan man få prøve og peptisator blandet og opnå en maksimal effekt. Om nødvendigt kan dette gentages flere gange.

Det nedbrudte prøvemateriale skylles med vand fra

vandhanen (se også Meldgaard & Knudsen 1979) igennem en serie sigter. Da de fleste udvoksede foraminiferer har en størrelse mellem 0,1 og 1,0 mm, og kun enkelte arter er mindre, anvendes normalt sigter med maskevidderne 0,063, 0,1 og 1,0 mm. Til visse undersøgelser udskiftes 0,1 mm sigten dog med en 0,125 mm sigte. For at kunne sammenligne sine resultater med tidligere undersøgelser, bør man såvidt muligt anvende de samme størrelsesfraktioner, som normalt er blevet brugt i undersøgelsesområdet.

Man analyserer normalt kun foraminiferer fra fraktionen større end 0,1 mm (eller 0,125 mm). Da det er meget vanskeligt og tidskrævende at analysere fraktionen 0,063–0,1 mm, checkes denne normalt kun for eventuelle yderligere arter. Denne fraktion skal dog altid gemmes til eventuel senere analyse i forbindelse med nye oplysninger og nye interesser, der måtte dukke op for området. Bemærk at der kan være helt specifikke krav til størrelsesfraktioner i forbindelse med udregning af temperatur og salinitet vha. 'transfer funktions' (se nedenfor). Dette gælder specielt for planktoniske foraminiferer.

Sigtefraktionerne skylles over i et filtrerpapir og tørres i varmeskab (max 50°C). De tørrede fraktioner vejes, idet de giver en vigtig oplysning om sedimenternes kornstørrelsesfordeling.

2.3 Tyngdeseparation

Hvis der er mange sedimentkorn tilstede i prøverne, er foraminiferanalysen meget tidskrævende. Man kan i sådanne prøver koncentrere foraminifererne i de enkelte fraktioner (skille dem fra de fleste sedimentkorn)

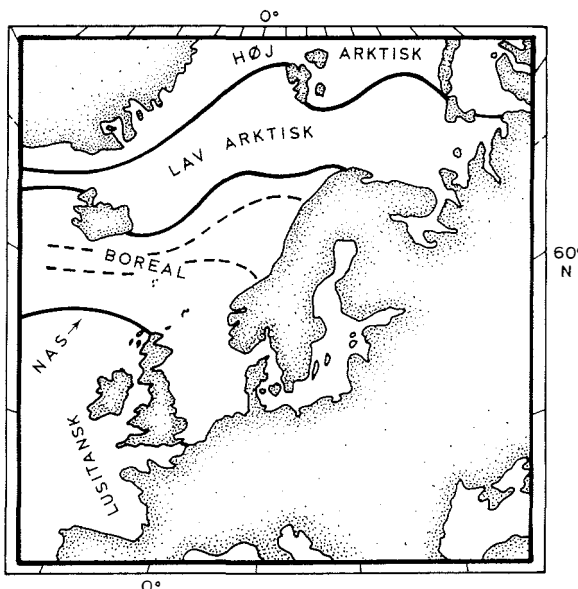


Fig. 1. Recente faunaprovinser i Nordatlanten. NAS = Den Nordatlantiske Strøm. Efter Feyling-Hanssen (1955).

vha. en tung væske. De fleste af disse tunge væsker er giftige, og hele processen skal derfor foregå i et aftræksskab. Til tyngdeseparationen kan f.eks. anvendes tetrachlorethylen (C_2Cl_4), som har en massefylde på $1,62 \text{ g/cm}^3$. På grund af væskens overfladespænding forbliver foraminifererne luftfyldte og flyder derfor ovenpå, mens sedimentkornene synker til bunds. Foraminifererne dekanteres til et filterpapir, og de tørres derefter i aftræksskabet, evt. ved hjælp af varmelamper (se også Meldgaard & Knudsen 1979).

Hvis det viser sig nødvendigt at bruge en endnu tungere væske, kan man anvende en blanding af dibromethan ($C_2H_4Br_2$, massefylde 2,18) og ethanol (C_2H_5OH). Væskerne blandes til den ønskede massefylde, ofte mellem 1,7 og 1,9 g/cm^3 . Massefylden af den tunge væske justeres jævnlige, idet ethanol hurtigt fordamper.

Tyngdeseparation kan også foretages med et Wolframsalt opløst i destileret vand til den ønskede densitet. Fordelen ved denne metode er, at Wolframsalt ikke er giftigt, men den er desværre vanskelig og tidskrævende, idet der ved processen udskilles saltkrystaller på foraminiferskallerne. Skallerne må derfor bagefter vaskes rene førend de kan bestemmes.

Man bør altid checke den tunge fraktion for eventuelle ekstra foraminiferer. Visse tunge linseformede arter har en tendens til at synke til bunds. Enhver tyngdeseparationen bør foregå relativt hurtigt for at undgå nedsynkning.

2.4 Farvning af recente prøver

I forbindelse med undersøgelser af recente foraminiferer er det muligt at skille de foraminiferer, som levede på indsamlingstidspunktet (biocoenosen) fra de, som var døde (thanatocoenosen). Farvestoffet Rose Bengal (Walton 1952) synes at være det mest velgørende.

Prøverne overhældes straks efter indsamlingen med ca. 60% alkohol, hvori de uden problemer kan bevarer i flere måneder (helst køligt). Farvningen foregår i laboratoriet i forbindelse med oparbejdning til analyse. Selve farvningen kan forgå på flere måder.

Ved den første metode farves hele prøven ved tilsætning af en knivspids Rose Bengal (ca. 1 g/l) direkte i prøvebeholderen. Denne rystes godt flere gange i starten, og derefter henstår den i ca. 1 døgn til farvningen er færdig. Prøvens volumen måles, den overføres til en gryde vha. lidt ekstra vand, tilsættes 10 g peptisator og opvarmes til 80–90°C i 20 minutter (må ikke koge). Derefter kan prøven sigtes, tørres og tyngdesepareres efter samme princip, som beskrevet for fossile prøver (men brug aldrig brintoverilte!).

En anden mulighed er, at kun fraktionerne $>0,063 \text{ mm}$ farves. Først måles volumen af den samlede materiale mængde, og derefter sigtes prøven for at fjerne det meste af lerfraktionen. Denne kan nemlig virke hindrende for, at farvningen bliver total. Hele

fraktionen $>0,063 \text{ mm}$ bliver herefter hensat i en gryde med vand tilsat Rose Bengal (1 g/l) i ca. 1 døgn. Derefter tilsættes 10 g peptisator og prøven opvarmes til lige under kogepunktet i 20 minutter, og til sidst sigtes, tørres og tyngdesepareres som beskrevet ovenfor.

Hvis man ønsker at kende prøvens tørvægt, f.eks. for at kunne sammenligne med fossile prøver, kan prøven tørres på følgende måde. Lad væsken (farvet eller ufarvet afhængig af metode) løbe fra prøven igennem et filterpapir, prøven tørres og vejes og må derefter igen stå i blød i vand i mindst et døgn, inden den kan sigtes. Det skal bemærkes, at denne tørreproces kan skade de agglutinerede foraminiferer, så disse bliver underrepræsenterede i prøven. Hvis man ønsker en komplet registrering af faunaen på stedet, bør man derfor undgå at tørre prøven. Hvis man derimod ønsker en korrekt sammenligning med fossile faunaer, hvor de agglutinerede foraminiferer alligevel er helt eller delvis destruerede, og hvor man normalt arbejder med tør vægt og ikke med volumen, bør man tørre prøven for at opnå det rigtige sammenligningsgrundlag. Det skal dog nævnes, at man til visse undersøgelser af fossile faunaer faktisk anvender prøvelommen i stedet for tørvægt (specielt i dybhavsboringer). Differencen mellem våd og tør vægt giver vandindholdet i sedimentet.

2.5 Kvantitative analyser

Da Kvartær perioden er for kort til, at der kan anvendes ledefossiler til stratigrafiske inddelinger, anvendes i stedet faunasammensætninger og ændringer af disse gennem tiden. Dette betyder, at det er nødvendigt at tage kvantitative metoder i anvendelse. Der bestemmes og analyseres mindst 300 foraminiferer i hver prøve, hvis dette er muligt. Prøven strøs jævnt ud over en udlæsningskål, som er delt i 45 felter (se også Meldgaard & Knudsen 1979). Felterne analyseres færdige ét efter ét, indtil man er nået op på mindst 300 eksemplarer, og totalmængden af foraminiferer kan herefter udregnes. De analyserede foraminiferer opbevares derefter samlet i en slide til eventuelle senere justeringer og sammenligninger.

Hvis en prøve indeholder både bentiske og planktoniske foraminiferer, analyseres og tolkes disse hver for sig (mindst 300 eksemplarer af hver), idet de lever helt adskilt i vandmasserne. De bentiske og planktoniske opbevares i hver sin slide.

Hvis den bentiske fauna indeholder både kalkskallede og agglutinerede foraminiferer (specielt almindeligt i recente og meget unge prøver), bør analysen fortsætte til mindst 300 kalkskallede er registreret. Dette er en forudsætning for en statistisk holdbar sammenligning med fossile bentiske faunaer, hvori den agglutinerede komponent oftest er destrueret af post-mortem processer. Omlejrede, præ-Kvartære foraminiferer tælles (bestemmes normalt ikke), men disse indregnes ikke i statistikken.

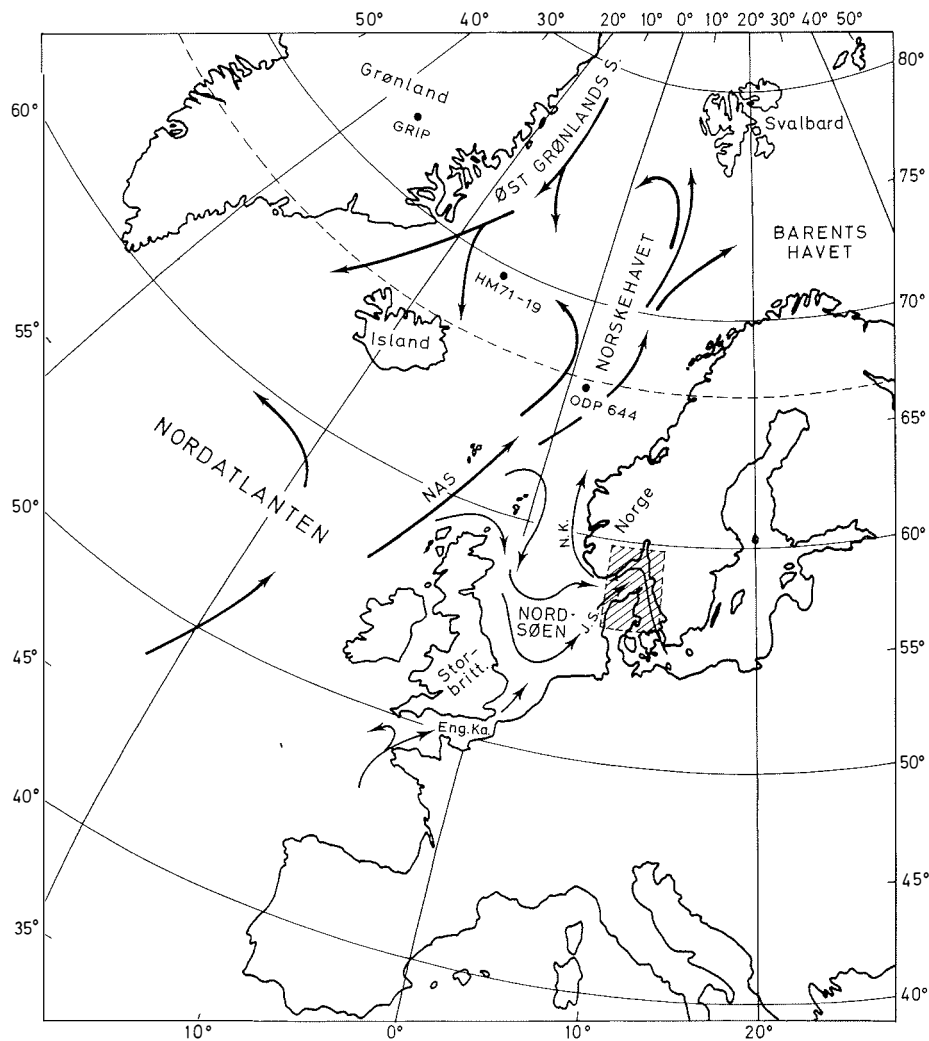


Fig. 2. Overfladestrømsystemet i Nordatlanten med angivelse af de lokaliteter, som er nævnt i teksten. NAS = Den Nordatlantiske Strøm; J.S. = Jyllandsstrømmen; N.K. = Den Norske Kyststrøm; Eng. Ka. = Den Engelse Kanal. Det skraverede område svarer til kortet Fig. 3A.

Grafisk fremstilling af resultater samt udregning af nogle enkle økologiske parametre fremgår af de eksempler fra Kvarter stratigrafi, som gennemgås i det følgende. For at give et indblik i et spektrum af mulige fremstillingsmetoder, er der valgt forskellige diagramtyper til de enkelte eksempler. Fordele og ulemper ved hver af disse gennemgås i forbindelse med beskrivelsen.

I moderne undersøgelser benyttes ofte såkaldte 'transfer functions' til beregning af palæotemperatur og palæosalinitet, hidtil dog specielt i forbindelse med tolkninger af planktoniske foraminiferer. Som grundlag for udregningerne kan man enten anvende selve artsfordelingen eller udvalgte arters oxygen isotop værdier gennem en lagserie. Forudsætningen for et godt resultat er et grundlæggende kendskab til den recente faunafordeling og til arternes recente oxygen isotop værdier i forhold til temperatur og salinitet. Foreløbige resultater ser lovende ud for de planktoniske foraminiferers vedkommende (Kroon et al. 1997,

Waelbroeck et al. 1998), men hidtil er det kun i enkelte tilfælde lykkedes at få fornuftige resultater af 'transfer function' beregninger på bentske foraminiferfaunaer, så disse er stadig på forsøgsstadiet. Metoderne vil ikke blive yderligere belyst her.

3. Originalreferencer og afbildning af arter

Til dokumentation af arterne i en foraminiferanalyse bør man altid præsentere en liste (tabel) over arter med angivelse af originalforfatter og helst også årstal for originalbeskrivelsen. Da der er meget forvirring omkring navngivning, kan dette være med til at klargøre en eventuel tvivl om, hvilke arter der er fundet i den aktuelle undersøgelse. Listen kan enten omfatte alle fundne arter eller kun de mest almindelige, f.eks. de som forekommer med mere end 1% i mindst én prøve. I stedet for en tabel kan man vælge at angive origi-

nalforfatteren til de enkelte arter inde i selve artiklen første gang arten nævnes i teksten.

De vigtigste arter kan derudover illustreres – enten som lysmikroskop fotos eller som elektronmikroskop optagelser. Lysmikroskop fotos kan virke lidt uskarpe, da det er vanskeligt at opnå tilstrækkelig stor dybdeskarphed, men som hjælpemiddel til bestemmelse af arter, er disse alligevel fortrinlige, fordi de gengiver netop det, som man ser i mikroskopet. Elektronmikroskop optagelser er specielt velegnede til illustration af detaljer. Også tegnede illustrationer af foraminifererne kan være velegnede, idet man her har mulighed for at fremhæve væsentlige karakterer.

På tavlerne I–III er vist lysmikroskop fotos af et udvalg af foraminiferarter, bla. en stor del af de, som indgår i de følgende eksempler. Der er dels lagt vægt på at illustrere forskellige skaltyper, dels arter som indikerer forskellige miljøer. Tavle IV viser et lille udvalg af elektronmikroskop optagelser med detaljer fra skallernes overflader. Tavlerne er kun lidt ændrede i forhold til Feyling-Hanssen & Knudsen (1979), men alle artsnavne er opdaterede i henhold til den moderne taxonomi (Tabel 1).

4. Recent datagrundlag, boreale og arktiske faunaer

Baggrunden for at kunne fortage en palæoekologisk tolkning på grundlag af foraminiferer er, at man har et godt kendskab til de recente foraminiferers udbredelse og deres krav til de fysiske, kemiske og biologiske omgivelser. Da biologers interesse for recente foraminiferer generelt har været yderst ringe, er det ofte geologer, der har suppleret deres palæontologiske og stratigrafiske undersøgelser med kortlægning af recente udbredelsesmønstre. Efterhånden er der således blevet opbygget et recent datagrundlag. Dette er bedst for shelfområder, hvor det er lettest at indsamle materiale og foretage målinger. I dybhavet og i arktiske områder er datagrundlaget derimod stadig relativt begrænset.

Selv om kendskabet til de økologiske sammenhænge således gradvist vokser, mangler man dog stadig forståelse for mange detaljer i forbindelse med visse arters økologiske krav. Nogle arter har man derfor stadig ikke mulighed for at anvende til økologiske tolkninger, enten fordi man ikke kender deres økologiske krav, eller fordi de måske slet ikke har specifikke krav til deres omgivelser. De økologiske sammenhænge er derudover ofte meget komplicerede og vanskelige at forstå. Det er naturligvis meget vigtigt at få videreudbygget datagrundlaget både mht. fordelingskort over de enkelte arter og faunatyper og mht. målinger af alle tænkelige kemiske, fysiske og biologiske parametre, der kan have betydning for fordelingen.

Tabel 1. Liste over foraminiferer, som er nævnt i teksten, med angivelse af originalforfatter og år.

Bentiske arter

Ammonia beccarii (Linné 1878)
Ammotium cassis (Parker 1870)
Astrononion gallowayi Loeblich & Tappan 1953
Bolivina skagerrakensis Qvale & Nigam 1985
Brizalina alata (Seguenza 1862)
Bulimina aculeata d'Orbigny 1826
Bulimina marginata d'Orbigny 1826
Buccella frigida (Cushman 1922)
Cassidulina laevigata d'Orbigny 1826
Cassidulina obtusa Williamson 1858
Cassidulina reniforme Nørvang 1945
Cibicides sp. A
Eggerelloides scabrus (Williamson 1858)
Elphidium albiumbilicatum (Weiss 1954)
Elphidium excavatum (Terquem 1875), forma *clavata* Cushman 1930
Elphidium excavatum (Terquem 1875), forma *selseyensis* (Heron-Allen & Earland 1911)
Elphidium magellanicum (Heron-Allen & Earland 1932)
Elphidium hallandense Brotzen 1943
Elphidium williamsoni Haynes 1973
Eoeponidella laesoensis Michelsen 1967
Epistominella takayanagii Iwasa 1955
Epistominella vitrea Parker 1953
Haynesina depressula (Walker & Jacob 1798)
Haynesina germanica (Ehrenberg 1840)
Haynesina orbiculare (Brady 1881)
Hoeglundina elegans (d'Orbigny 1826)
Hyalinea balthica (Schroeter 1783)
Islandiella helenae Feyling-Hanssen & Buzas 1976
Islandiella norcrossi (Cushman 1933)
Melonis barleeanus (Williamson 1858)
Nonionella iridea Heron-Allen & Earland 1932
Nonionellina labradorica (Dawson 1860)
Planulina ariminensis d'Orbigny 1826
Pullenia osloensis Feyling-Hanssen 1954
Pullenia subcarinata (d'Orbigny 1839)
Quinqueloculina seminulum (Linné 1758)
Sagrina subspinescens (Cushman 1922)
Stainforthia fusiformis (Williamson 1858)
Stainforthia loeblichii (Feyling-Hanssen 1954)
Trifarina angulosa (Williamson 1858)
Trifarina fluens (Todd 1947)
Uvigerina mediterranea Hofker 1932

Planktoniske arter

Globigerina bulloides d'Orbigny 1826
Neoglobobulimina pachyderma (Ehrenberg 1861) *sinistral*
Turborotalita quinqueloba (Natland 1838)

4.1 Boreale faunaer

Skagerrak-Kattegat ligger indenfor den boreale faunaprovins (Fig. 1). Størstedelen af vandet i området stammer fra en gren af Den Nordatlantiske Strøm (Golfstrømmen), der leverer ca. 90% af Nordsøens vand. Dette strømmer nord om Skotland ind i Nordsøen. Det meste løber sydpå langs Englands østkyst, ind i den sydlige Nordsø (Fig. 2) og igen nordpå langs

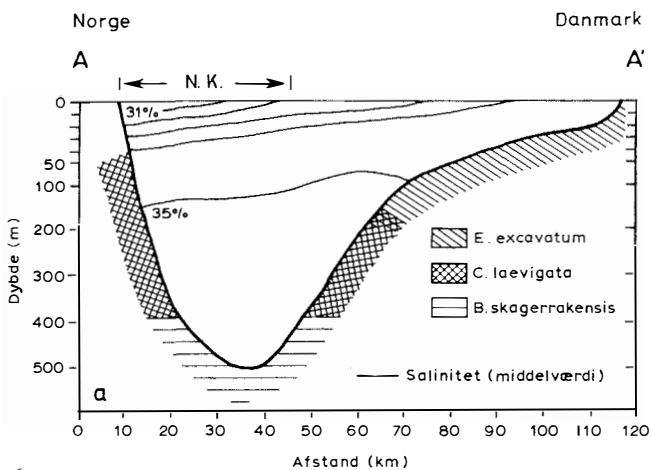
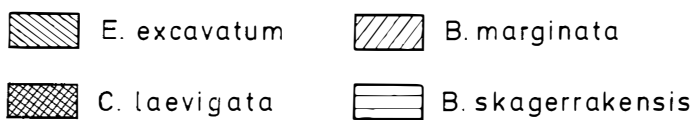
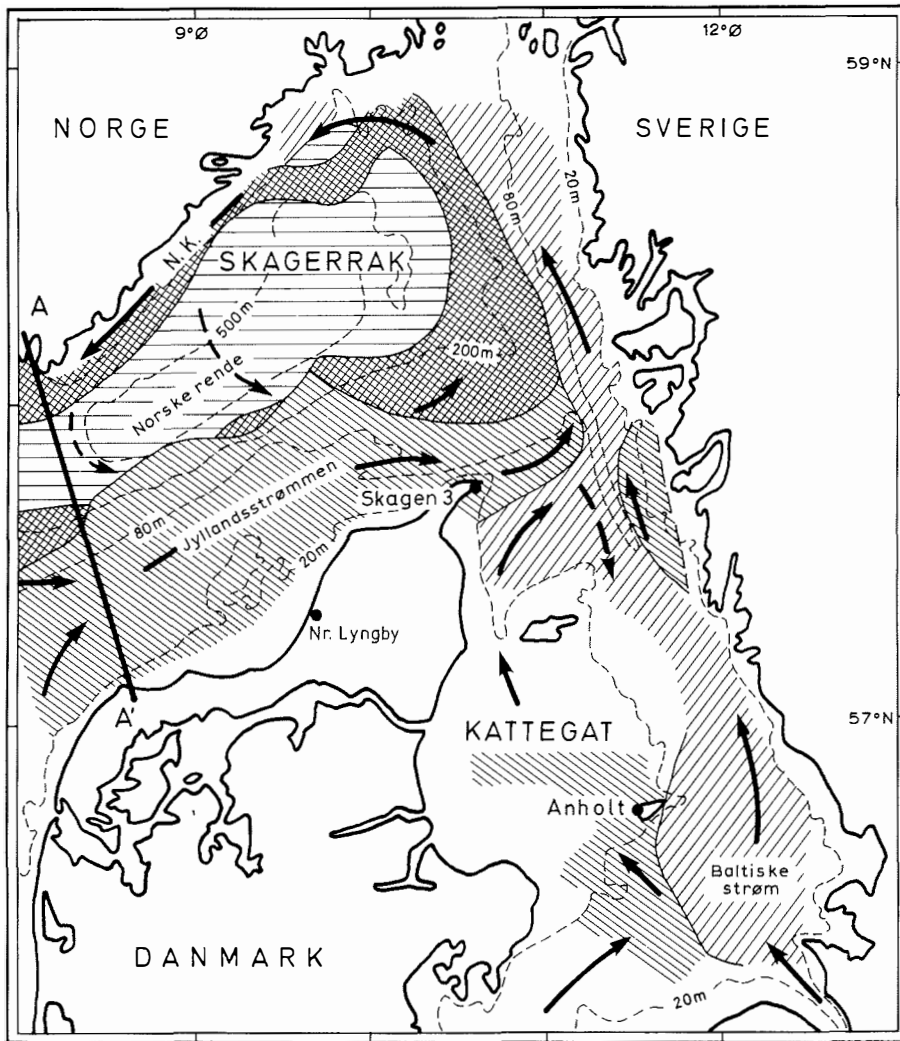


Fig. 3A. Recent udbredelser af de fire vigtigste foraminifer faunatyper (baseret på Q-mode faktoranalyse på 177 prøver og 22 arter) i Skagerrak-Kattegat. Dybdekurver og det fremherskende overflade-strømsystem er vist. N.K. = Den Norske Kyststrøm. Profil A-A' er vist på Fig. 3B. Efter Conradsen et al. (1994) og Seidenkrantz & Knudsen (1997).

Fig. 3B. Profil A-A' fra NNW til SSE over Skagerrak (se Fig 3A). Dybdeforhold, salinitet og faunatyper er angivet. N.K. = Den Norske Kyststrøm. Øvrige hydrologiske forhold, se Rohde (1987), Conradsen et al. (1994) og Seidenkrantz & Knudsen (1997).

Jyllands vestkyst. I Skagerrak samles Atlanterhavsvand, som løber ind langs sydskråningen af Norske Rende med den sydfra kommende strøm og danner Jyllandsstrømmen (Fig. 3). Denne strømmer ind i Kattegat, hvor den blandes med mindre saltholdigt vand fra Østersøen. Den Baltiske Strøm bevæger sig herfra nordover langs Sveriges vestkyst, følger nordskråningen af Norske Rende og drejer nordover tæt på Norges kyst, hvor den danner Den Norske Kyststrøm.

Forskere fra Danmark, Norge og Sverige har igennem en del år indsamlet data om recente bentiske foraminiferers udbredelse i Skagerrak-Kattegat området. Planktoniske foraminiferer er ikke inddraget, idet disse kun forekommer i de mest åbne dele af Skagerrak (kræver relativt stabil og normal marin salinitet). For at give et samlet billede af faunaudbredelsen og for bedre at forstå de økologiske sammenhænge, blev alle disse data samlet og behandlet statistisk af Conradsen et al. (1994). Da materialet oprindeligt var blevet behandlet forskelligt af de enkelte forskere, var det ikke muligt at illustrere fordelingen af den levende fauna i området, men kun den totale fauna (levende + døde). Dette har faktisk vist sig at være en fordel, når resultaterne skal bruges til tolkninger af palæomiljø. Levende faunaer viser en markant sæsonvariation i dominansen af arter på grund af arternes forskellige reproduktionstidspunkt. Øjeblikbilleder af levende faunaer ville derfor ikke være korrekte som sammenligningsgrundlag for fossile faunaer, der jo repræsenterer gennemsnittet af døde faunaer gennem flere år.

Den procentvise fordeling af de mest almindelige recente arter i Skagerrak-Kattegat området er vist separat på en serie kort af Conradsen et al. (1994, Fig. 3). Ved hjælp af en Q-mode faktoranalyse er faunaerne (prøvestationerne) derudover statistisk blevet grupperet efter indbyrdes lighed. Denne analyse resulterede i en opdeling i fem faunatyper, som har navn efter den dominerende art. Udbredelsen af de fire vigtigste af disse til palæoøkologiske tolkninger (kalkskalfaunaerne) er vist på kortet Fig. 3, hvor også dybdekurverne og de vigtigste strømsystemer er indtegnet.

Elphidium excavatum faunaen (her den boreale forma *selseyensis*, se Feyling-Hanssen 1972) forekommer i de mere lavtvandede dele af Kattegat (ned til ca. 30 m dybde) og i Skagerrak forekommer den fra de laveste områder ved Jyllands kyst og ud til omkring 200 m vanddybde. Alle disse områder er præget af store hydrografiske variationer både mht. salinitet og temperatur.

Bulimina marginata faunaen forekommer dels i de dybere dele af Kattegat under haloklinen, dels i Skagerrak langs den svenske kyst i områder (25–100 m), hvor der er en del sæsonvariationer i salinitet og temperatur. Både i Kattegat og i Skagerrak synes faunaen at være associeret med finkornede sedimenter rige på organisk materiale. Arten *Cassidulina laevigata* udgør ofte en væsentlig andel af denne faunatype.

Cassidulina laevigata faunaen forekommer i en overgangszone, der omkranser de dybeste dele af Skagerrak (100–300 m), hvor der er relativt stabile temperatur- og salinitetsforhold. Området er derimod præget af ret høj strømhastighed (sandet til finkornet sediment).

Bolivina skagerrakensis faunaen findes i de finkornede dybeste dele af Skagerrak (mere end 300 m) karakteriseret af oceanisk vand med stabil salinitet (>35‰) og relativt konstant temperatur hele året (3–7°C).

Med baggrund i kendskabet til de recente faunaer i området, kan man nu med en relativt stor grad af sikkerhed tolke palæoceanografiske ændringer i det samme område, men naturligvis kun for de tidsperioder, hvor området har ligget indenfor den boreale faunaprovin. Variabiliteten i de økologiske parametre, strømforhold og indhold af organisk materiale synes at have indflydelse på udbredelsen af faunaerne. Da flere af disse parametre tildels er knyttet til vanddybden, vil faunagrænser ofte til en vis grad følge dybdekurverne. Faunafordelingen i forhold til dybde og salinitet ses på profilen over Skagerrak, Fig. 3B.

4.2 Arktiske faunaer

Til tolkning af arktiske palæomiljøforhold må man sammenligne med faunaer fra recente arktiske områder, som menes at have en vis grad af lighed med de forhold, der herskede i havet omkring Danmark i istidene og under afsmeltningstiden efter disse.

Som baggrund for tolkningen af arktiske faunaer i

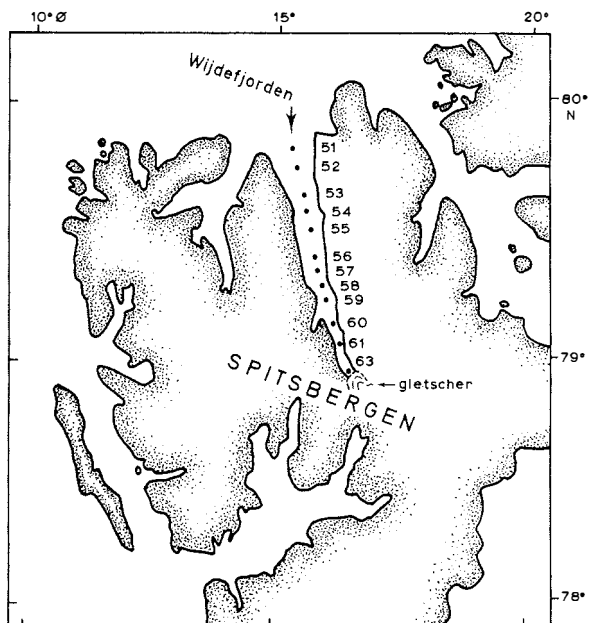


Fig. 4A. Kort over recente prøvetagningsstationer i Wijdefjorden, N. Spitsbergen, Svalbard. Efter Hald & Korsun (1997).

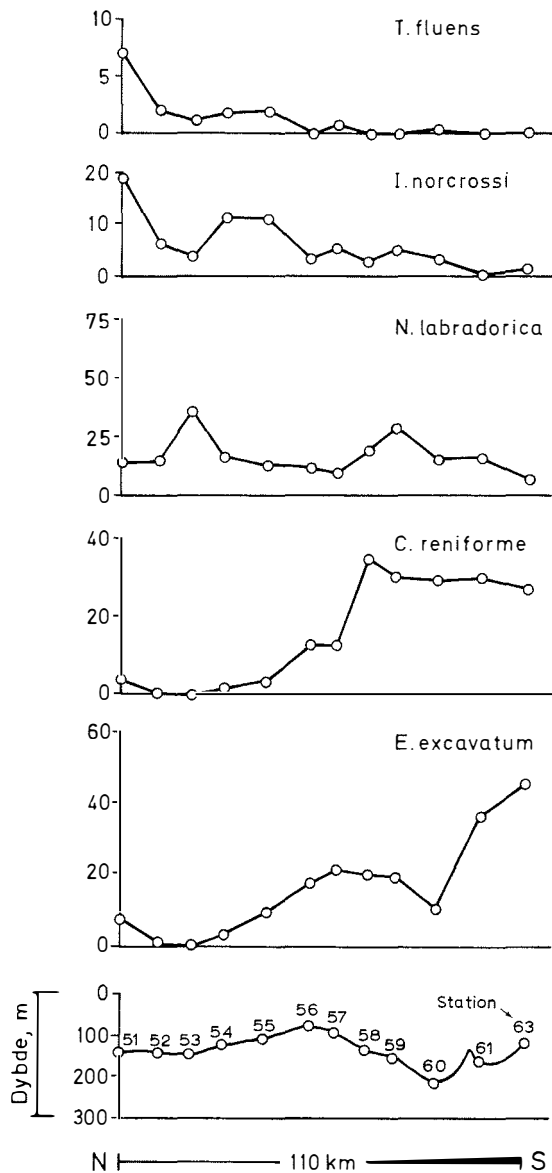


Fig. 4B. Profil fra syd til nord gennem Wijdefjorden (Fig. 4A). Det nederste diagram viser dybdeprofilen gennem fjorden fra gletscheren i syd til det åbne ocean i nord. De øvrige diagrammer viser den relative fordeling af udvalgte kalkskallede foraminiferer (totalfauna = levende + døde). Efter Hald & Korsun (1997).

danske Kvartære sedimenter gives en kort beskrivelse af en undersøgelse af recente foraminiferfaunaer i en fjord fra Spitsbergen (Hald & Korsun 1997). I stedet for at illustrere faunafordelingen arealmæssigt på et kort, er den procentvise fordeling af arter her vist på et længdeprofil gennem fjorden (Fig. 4A og 4B). Man får hermed et billede af faunaens ændring med afstanden fra en kælvende gletscher. Bemærk at den mest

gletschernære fauna er domineret af arterne *Elphidium excavatum* (her som den arktiske forma *clavata*, se Feyling-Hanssen 1972) og *Cassidulina reniforme*, to arktiske arter som tolererer både varierende salinitetsforhold og et stort indhold af suspenderet materiale i vandet (se også Hald et al. 1994). Længere ude i fjorden følger de arktiske arter, som kræver mere stabile forhold og højere salinitet, f.eks. *Nonionellina labradorica*, *Islandiella norcrossi* og *Trifarina fluens* (Fig 4B).

5. Eem Interglacial tid i Danmark og i Nordatlanten.

I tidligere interglaciale må de palæoceanografiske og palæoklimatiske forhold i Skagerrak-Kattegat området og i Nordatlanten have svaret nogenlunde til de nuværende. I aflejringer fra Eem Interglacial tid i området forekommer således faunaer, som var karakteriseret af nogenlunde den samme artssammensætning, som kendes fra områderne i dag – dog under forudsætning af at de økologiske betingelser iverigt var de samme. Det har dog længe været kendt, at temperaturen i Eem generelt var nogle få grader højere end i dag (Knudsen 1992, 1994). På grund af en stærkere Nordatlantisk strøm i Eem, har vandet i Nordsøen været præget af de lusitanske vandmasser, som i dag ligger vest for Storbritannien og Frankrig (se Fig. 1).

5.1 Eem i Nordjylland

To nye borerer gennem marine lagserier fra Eem i Nordjylland er fornylig blevet undersøgt i detaljer, nemlig Skagen 3 og Nørre Lyngby 2 borererne (Fig. 3A)(Seidenkrantz et al. 1995; Seidenkrantz & Knudsen 1997; Kristensen et al. 1998). Faunaudviklingen i begge disse tyder på, at der i Eem har været meget større variationer i klimaet, end man kender det fra den nuværende interglacial, Holocæn.

Som eksempler fra disse undersøgelser vises her to diagrammer, der illustrerer fordelingen af de vigtigste arter igennem Eem Interglacial tid i Skagen 3 boreren (Fig. 5 og 6). Prøvedybden er angivet til venstre i diagrammerne, på det ene i forbindelse med en lithologisk søjle og på det andet med de eksakte dybde-tal angivet. På Fig. 5 vises koncentrationen af de enkelte foraminiferarter (antal/100 g) som symboler samt en kurve for det totale antal benthiske foraminiferer i prøverne. Bemærk desuden at enkelte arter i 0,063 mm fraktionen er talt. Disse indgår ikke i procentudregningerne, idet kun et mindre udvalg af arter er talt op i denne størrelsesfraktion. Da faunaerne indeholdt relativt få planktoniske foraminiferer (kun to arter) er antallet af disse pr. 100 g vist som tal. Inddelingen i

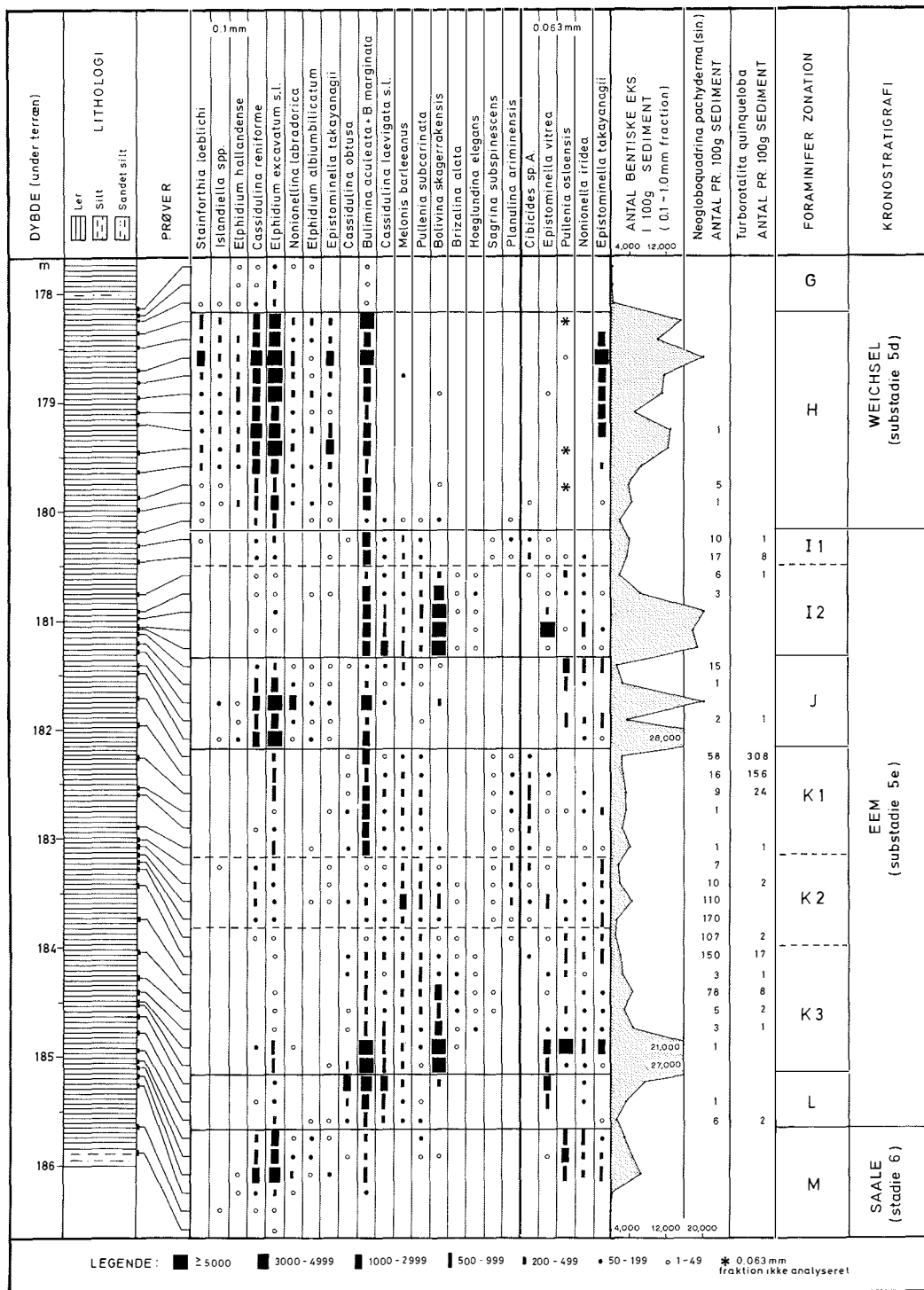


Fig. 5. Fordelingsdiagram (range chart) for Eem i Skagen 3 boringen. Koncentrationen (antal/100 g) af de hyppigste bentske arter fra fraktionen 0,1–1,0 mm vist med symboler. Enkelte specielt små former, som er talt i størrelsesfraktionen 0,063–0,1 mm, er også inkluderet. Det totale antal bentske foraminiferer (0,1–1,0 mm) er vist som kurve, mens antallet af planktoniske foraminiferer er vist som talrækker. Efter Seidenkrantz & Knudsen (1997).

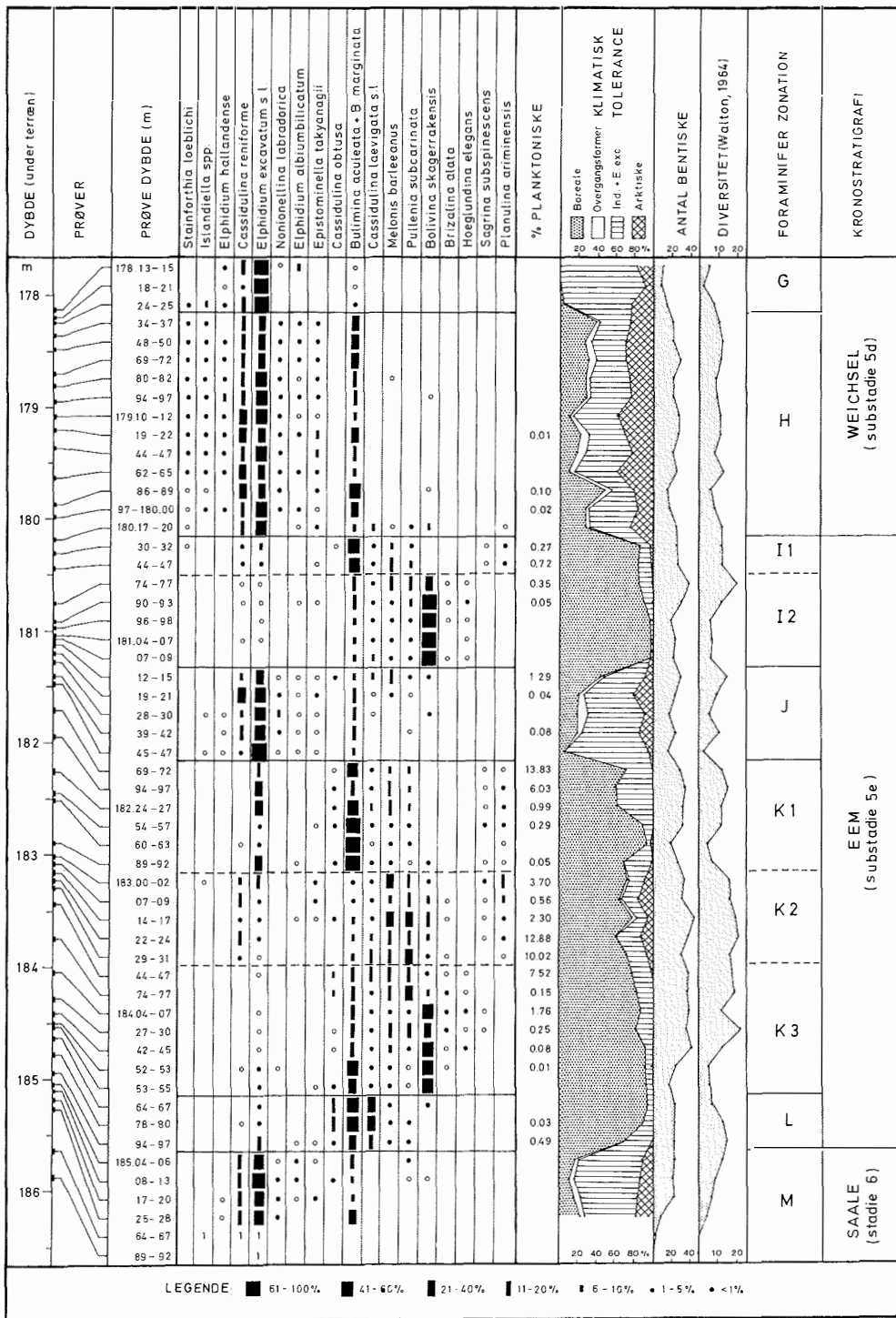
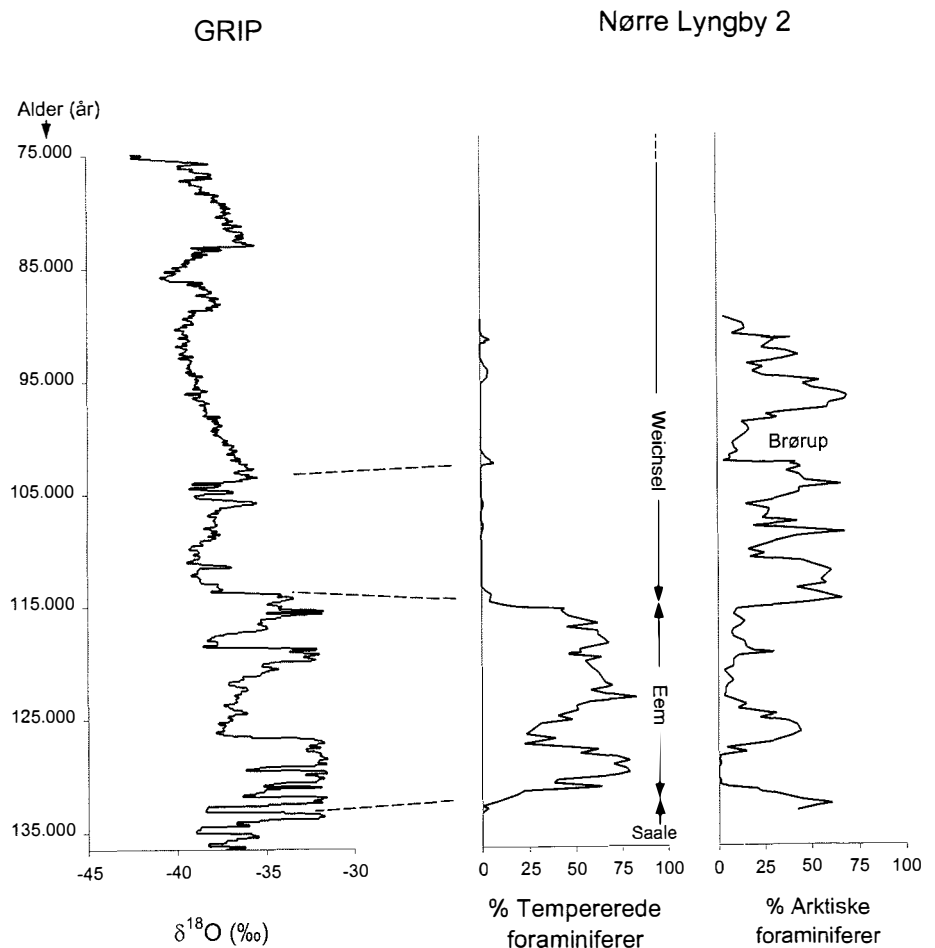


Fig. 6. Fordelingsdiagram (range chart) for Eem i Skagen 3 boringen. Udvalgte bentske arters procentvise fordeling er vist med symboler, mens den procentvise andel af planktoniske foraminiferer i forhold til det totale antal (bentske + planktoniske) er angivet som en talrække. Fire grupper af bentske arter, inddelt efter 'klimatisk tolerance' (se også tekst), er illustreret som sumkurver (Ind. = indifferent). Til højre er antallet af arter i prøverne samt den faunistiske spredning vist som kurver. Efter Seidenkrantz & Knudsen (1997).

Fig. 7. Den procentvise andel af henholdsvis boreale arter og arktiske arter i Eem og Tidlig Weichsel fra Nørre Lyngby 2 boringen (Seidenkrantz et al. 1995; Kristensen et al. 1998). Arterne er inddelt i de samme tolerancegrupper som i Skagen 3 boringen (Fig. 6). Kurvemønstret er sammenlignet med oxygen isotop kurven for GRIP iskernen fra Grønland (efter Johnsen et al. 1995; S. Johnsen pers. medd. 1998).



faunazoner (efter Salvador 1994), er vist til højre sammen med den kronostratigrafiske indplacering.

Figur 6 viser den procentvise fordeling af de samme arter som Fig. 5 (0,1–1,0 mm fraktionen). Baggrunden for at fremstille både et diagram med procentvis fordeling af arter og et med antal/100 g er, at disse supplerer hinanden godt. Ved fremstilling af den relative fordeling af arter (%) alene, ser man f.eks. ikke, om der er en reel ændring i antal eksemplarer af de enkelte arter. Den procentvise andel af en art kan således stige med f.eks. 60% af den totale fauna, uden at antallet af eksemplarer af denne art ændres, hvis antallet af de andre arter aftager. Man bør derfor nøje sammenligne de to typer af diagrammer, når man tolker sine resultater.

Antallet af bentiske arter samt Walton's (1964) mål for faunistisk spredning (faunaens diversitet) er vist som kurver på Fig. 6. En lav faunistisk spredning tyder på ekstreme økologiske forhold, mens spredningen stiger under stabile og normale marine forhold. Den procentvise andel af planktoniske foraminiferer er angivet i forhold til det totale antal foraminiferer i hver prøve (bentisk + planktonisk). Her er indholdet angivet

som en talrække, men ofte ses det fremstillet som en kurve. En høj procentandel af planktoniske foraminiferer betyder, at der var forbindelse til det åbne ocean, idet planktoniske foraminiferer kræver normal marin og stabil salinitet. For yderligere oplysninger om tolkninger på grundlag af forskellige økologiske parametre henvises til Feyling-Hanssen (1983).

Ved overgangen fra Saale til Eem ses en markant ændring fra arktiske til boreale forhold. Der ses et skift fra arktiske faunaer svarende til de, som findes i recente gletschernære forhold på Spitsbergen (Fig. 4B) med dominans af *Elphidium excavatum*, forma *clavata* og *Cassidulina reniforme* til boreale arter, først med dominans af *Bulimina marginata* og *Cassidulina laevigata*, derefter *Bolivina skagerrakensis*. Hvis man sammenligner de tidlige Eem faunaer med den recente faunaudbredelse i Skagerrak (se Fig. 3A, 3B) ses det klart, at der må være sket en relativt hurtig ændring i vanddybde fra omkring 100–200 m til omkring 300 m allerede i begyndelsen af Eem.

Faunamønstret igennem interglacialen som helhed viser, at der har været meget varierende økologiske forhold på stedet. På diagrammet med den procent-

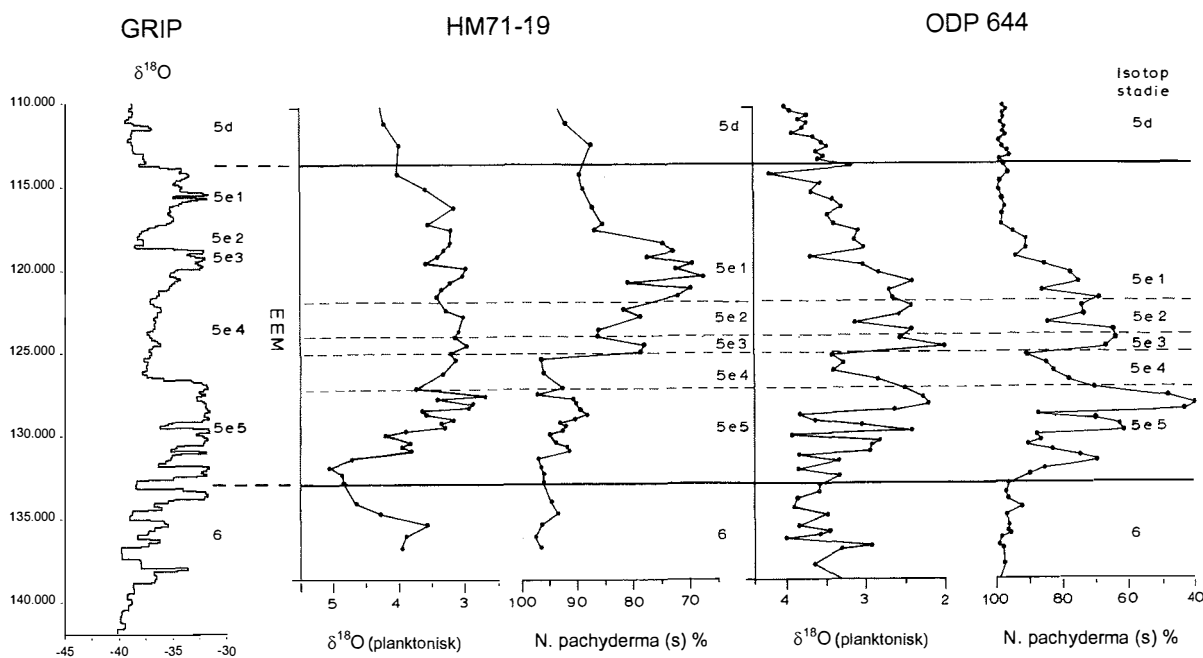


Fig. 8. Procentvis andel af *Neoglobobquadrina pachyderma* (sin.) og iltisotopforhold i Eem intervallet (substadie 5e5-5e1) fra to borekerner i Norskehavet (HM71-19 og ODP 644, Fig. 2) (efter Fronval & Jansen 1997). Fluktuationerne er sammenlignet med isotopkurven fra GRIP iskernen på Grønland sat op i forhold til aldersskala (efter Johnsen et al. 1995; S. Johnsen pers. medd. 1998).

viser fordeling af arter (Fig. 6) synes variationerne at være klart cykliske, idet *Bolivina skagerrakensis* optræder i to intervaller (Subzone K3 og I2), og faunaen skifter igen tilbage til *Bulimina marginata* dominans to gange (Subzone K1 og I1). Dette behøver dog ikke nødvendigvis at afspejle cyklisk varierende vanddybde på stedet, idet det jo primært er andre parametre (f.eks. stabilitet i salinitet og temperatur), der bestemmer udbredelsen. Faunaændringerne gennem Eem skyldes således snarere variationer i tilførslen af Atlantiske vandmasser via Skagerrak til området.

Arterne i den undersøgte lagserie er i Fig. 6 inddelt i fire grupper efter deres økologiske præference: Boreale (omfatter både boreale og lusitanske arter), transitionale (arter der forekommer både i kolde boreale og i varme subarktiske områder), indifferente (kosmopolitiske arter samt arter med ukendte økologiske krav), arktiske (omfatter både arktiske og subarktiske arter). En kurvfremstilling af disse grupperinger giver en god oversigt over den palæoøkologiske udvikling igennem lagserien. Det fremgår således klart, at der har været to perioder med indslag af arktiske foraminiferer (Subzone K2 og Zone J) i løbet af Eem. Både diagrammet med frekvenssvingninger og kurverne med gruppering efter klimatisk tolerance (Fig. 6) viser således klart, at der må have foregået markante oceanografiske skift i området i løbet af Eem. Tilsvarende skift i de klimatiske og oceanografiske

forhold gennem Eem er beskrevet fra Norskehavet af Fronval et al. (1998), der dog ikke mener, at variationerne kan spores længere sydpå end til det sydlige Norge.

Til sammenligning vises på Figur 7 de tilsvarende kurver for henholdsvis tempereret (borealt og lusitansk) og arktisk indhold i Eem-faunaerne fra Nørre Lyngby 2 boringen (Seidenkrantz et al. 1995; Kristensen et al. 1998). Også her ses oscillationer i faunaerne, idet der forekommer to perioder med et forøget indhold af kolde arter.

Kurverne for Nørre Lyngby 2 er udvidet til også at omfatte Tidlig Weichsel, hvor der ses markante svingninger i indholdet af højarktiske foraminiferer. En relativt lang periode med et lavt indhold af højarktiske arter er foreslået korreleret med Brørup Interstadial tid (Fig. 7).

Kurvemønstret i Nørre Lyngby 2 er sammenlignet med oxygen isotopkurven fra GRIP iskernen på Grønland (GRIP members 1993; Johnsen et al. 1995; Johnsen pers. komm. 1998). Det skal dog her bemærkes, at der hersker tvivl om, om den øjensynlige klimatiske ustabilitet i Eem i GRIP iskernen er reel. Men der er i hvert fald en umiddelbar lighed mellem disse og de ustabiliteter, som nu er registreret i både N. Europas shelfområder og i Norskehavet.

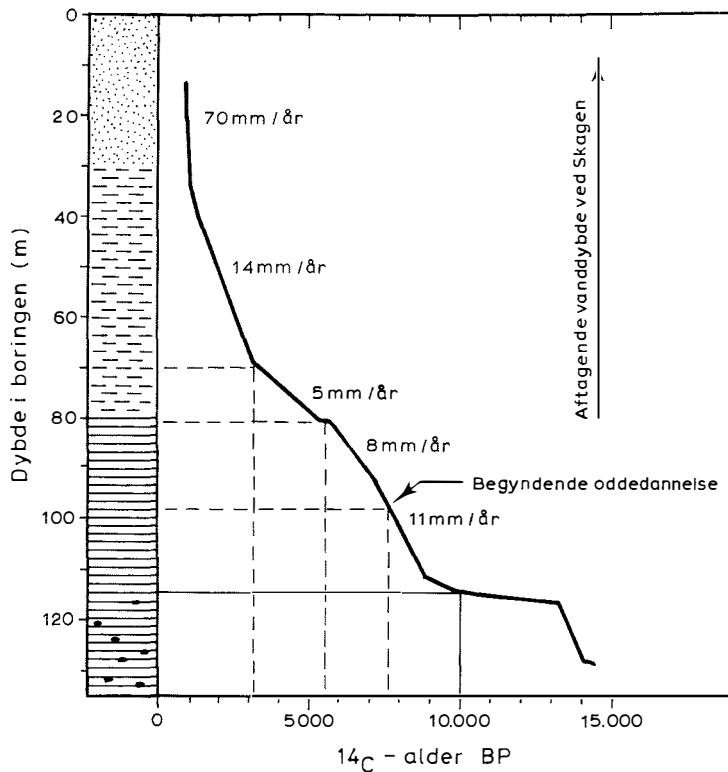
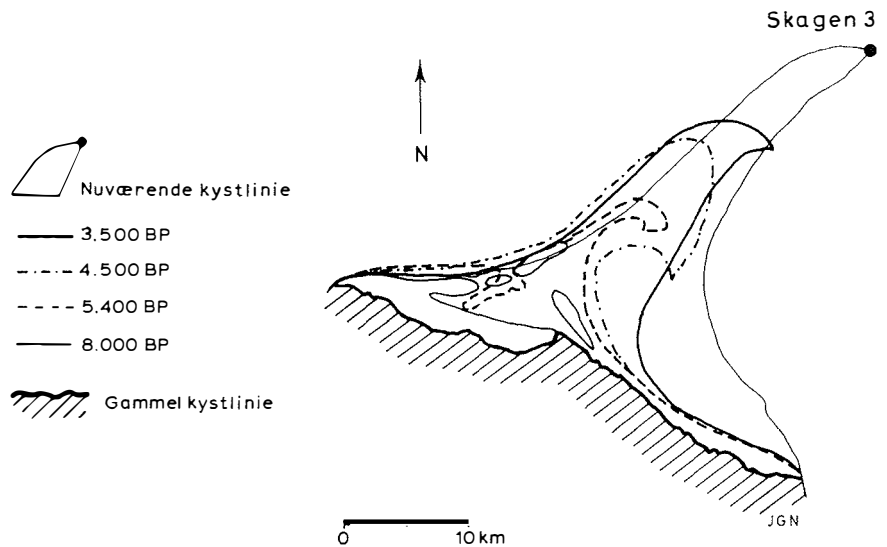


Fig. 9. Sedimentationsraten gennem de sidste ca. 15.000 ^{14}C år i Skagen 3 boringen baseret på ialt 34 AMS ^{14}C dateringer af makrofossilskaller fra den 132 m tykke marine lagserie (efter Conradsen & Heier-Nielsen 1995; Heier-Nielsen et al. 1995). Øverst illustreres dannelsen af Skagen Odde, hvor kystlinien har rykket gradvist nordøstover mod borestedet i løbet af de sidste ca. 10.000 år. Efter Hauerbach (1992).

5.2 Eem i Norskehavet

Indikationer på klimatisk ustabilitet i Eem er som nævnt registreret i flere boringer fra den nordligste del af Nordatlanten (nord for Island-Færø ryggen; Fronval & Jansen 1997, Fronval et al. 1998). Resultater af analyser af planktoniske foraminiferer og målinger af stabile isotoper fra to boringer i Norskehavet (HM71-19 og ODP 644, Fig 1) er vist på diagrammet Fig. 8 (efter Fronval & Jansen 1997).

Et indhold på mere end 90% sinistrale *Neoglobobulimina pachyderma* indikerer, at sommertemperaturen i overfladevandet har været lavere end 5°C i Saale og Weichsel (isotop stadiet 6 og 5) samt periodevist i Eem (substadiet 5e). I det meste af det interval, som Fronval & Jansen (1997) har korreleret med Eem (Fig. 8), ses et generelt lavere, men stærkt varierende indhold af denne form, hvilket indikerer højere, men veksellende temperaturforhold.

De forholdsvis lave oxygen isotop værdier i Eem intervallet viser også øgede vandtemperaturer i området i Eem Interglacial tid, men også disse værdier er stærkt svingende. Fronval & Jansen (1997) har også sammenlignet deres resultater med variationer i oxygen isotop værdierne i GRIP iskernen fra Grønland. En detaljeret sammenligning af den klimatiske udvikling er ikke mulig, men undersøgelsen viser klart, at de marinklimatiske forhold ligeledes har været ustabile i Norskehavet gennem Eem. Desuden tyder resultaterne på, at de varme vandmasser i Eem først nåede frem til den østlige del af området (ODP 644) og senere den vestlige del (HM71-19).

6. Senglacial og Holocæn palæoceanografi og palæogeografi

De øverste 132 m af Skagen 3 boringen (Fig. 3A) omfatter en komplet marin lagserie fra Weichsel deglaciationen og hele Holocæn perioden. På Fig. 9 (nederst) ses en lithologisk oversigt over lagserien samt et aldersprofil baseret på 34 AMS ¹⁴C dateringer foretaget på makrofossilskaller (mollusker og echinodermer). Kurven viser, at sedimentationsraten var meget høj under den første del af deglaciationen (15.000-13.000 BP). Efter en periode med lavere sedimentationsrate (i Bølling-Allerød komplekset, Yngre Dryas og Præboreal tid), blev den igen høj og øgedes yderligere op igennem Holocænet, specielt i de sidste 3000 år. På Fig. 9 vises desuden (øverst), hvorledes Skagen Odde gradvist er blevet udbygget i løbet af Holocæntid. Havdybden aftog gradvist ved borestedet fra en maximum havdybde på ca. 250 m omkring 15.000 BP (N. Richardt pers. komm. 1998) til omkring 100 m ved Weichsel-Holocæn grænsen 10.000 BP (Conradsen & Heier-Nielsen 1995). I begyndelsen aftog havdybden mest på grund af den isostatiske hævnning, men senere var årsagen i endnu højere grad

pålejring af sediment på borestedet (Conradsen & Heier-Nielsen 1995). I løbet af Holocæn tid nærmede kystlinien sig borestedet ved Skagen, der til sidst blev tørt land for ca. 300 år siden.

Figur 10 viser den procentvise andel af udvalgte arter (som kurver) i intervallet mellem 119 og 110 meters dybde i Skagen 3 boringen (Knudsen et al. 1996a), dvs. en del af deglaciationsperioden samt overgangen til postglaciale forhold.

Den palæoøkologiske udvikling ved Skagen under Weichsel isens afsmeltning ligner meget den, som er beskrevet for overgangen fra Saale til Eem. Weichsel-Holocæn grænsen kan dog illustreres med en langt større detaljeringsgrad, og derudover kan man ved hjælp af AMS ¹⁴C dateringer få et nøjagtigt billede af det tidsmæssige forløb. Under den initiale afsmeltningperiode er faunaerne præget af smeltevandstilførsel med meget suspenderet materiale og varierende økologiske forhold. Faunaerne er således totalt domineret af *Elphidium excavatum*, forma *clavata* og *Cassidulina reniforme* (Fig. 10), ligesom i recente gletschernære områder som f.eks. på Spitsbergen (sammenlign Fig. 4). Senere (13.000 til 9.600 BP) præges faunaen af indvandringen af arter som kræver mere stabile økologiske forhold og højere salinitet i bundvandet, f.eks. *Nonionella labradorica*.

Oxygen isotop målinger på foraminiferskaller, vist som en kurve til højre i diagrammet, støtter denne tolkning, idet en højere salinitet giver tungere isotop værdier. Det må her bemærkes, at man ofte i kystnære områder ser, at salinitetssvingningerne overpræger signalet fra både temperatur ændringer og isvolumen effekten, der er det vigtigste i åbne oceaner. Resultater af stabile isotop målinger er derfor ofte vanskelige at tolke i kystnære områder.

Under afsmeltningperioden har der sandsynligvis været en relativt stærk, men ikke konstant stratificering (lagdeling) af vandsøjlen i Skagerrak-Kattegat området, der var præget af udstømmende lavsalint overfladevand (en blanding af smeltevand og udstømmende vand fra den Baltiske Issø) og en modstrøm af koldt salint bundvand fra Atlanten.

Overgangen til boreale faunaer ved Skagen ses omkring 9.600 BP, hvor arter som *Bulimina marginata* og *Cassidulina laevigata* indvandrer til området. Dette svarer til faunatyper som kendes fra moderate dybder i det recente Skagerrak. Vanddybden har i denne periode været omkring 100 m (Conradsen & Heier-Nielsen 1995). Det skal bemærkes, at de økologiske forhold ikke på noget tidspunkt i Holocæn har været stabile nok i området (vandet har ikke været dybt nok) til indvandring af *Bolivina skagerrakensis* som det skete i Eem Interglacial tid.

Fremstilling af procentfordelinger med kurver som på Fig. 10 i stedet for symboler giver mulighed for at vise den reelle procentandel og ikke blot bestemte intervaller, som vist for Eem på Fig. 6, hvor f.eks. alt mellem 60 og 100% indgår i ét firkantsymbolsymbol. Med kurver kan man således også illustrere meget små

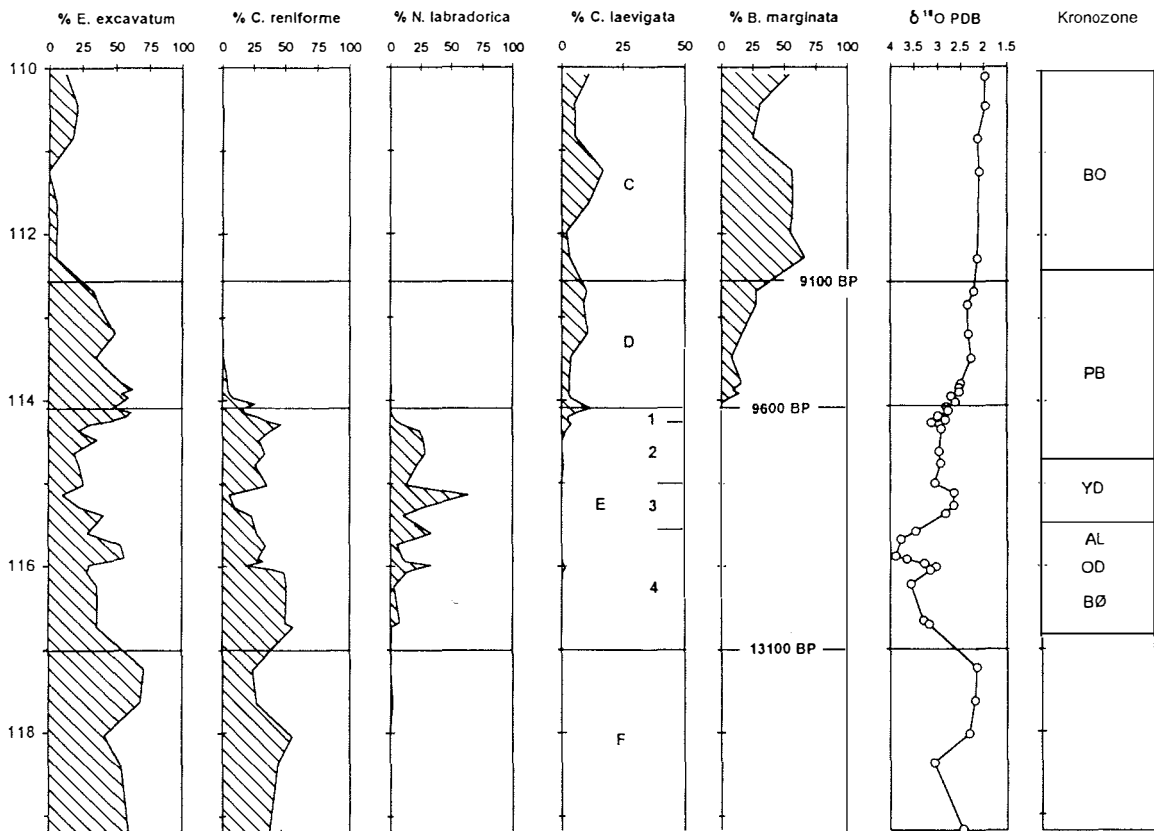


Fig. 10. Relativ fordeling af udvalgte foraminiferarter gennem Bølling-Allerød komplekset samt overgangen fra sen-glaciale til postglaciale forhold i Skagen 3 boringen (dybdeintervallet 119-110 m). Til højre er vist oxygen isotop målinger samt kronostratigrafisk indplacering. BØ = Bølling; OD = Ældre Dryas; AL = Allerød; YD = Yngre Dryas; PB = Præboreal; BO = Boreal. Efter Knudsen et al. (1996a og 1996b).

procentvariationer for de enkelte arter, hvilket i visse tilfælde er vigtigt. En fremstilling med kurver fylder imidlertid relativt meget, og man kan ikke illustrere så mange arter på den samme plads. Det optimale er ofte at vise en oversigt over så mange arter som muligt med symboldiagrammer og derudover supplere med kurver for enkelte, specielt vigtige økologiske indikatorer.

Faunaændringen ved overgangen til postglaciale forhold er også vist på Fig. 11 og 12, som illustrerer den procentvise andel af en del arter gennem deglaciationen og hele Holocænet. Da der altid er en vis naturlig variation i indholdet af arter, også selv om de økologiske forhold ikke har varieret væsentligt, ser man en del »støj« i kurverne. På diagrammerne (Fig. 11 og 12) er det vist, hvorledes man kan foretage en udjævning af kurveforløbet ved hjælp af glidende middeltal henover tre punkter. Dette giver et mere roligt og overskueligt kurvemønster, men man bør dog undlade dette i intervaller, hvor der er tegn på hurtige økologiske skift.

På grund af det store antal dateringer i lagserien,

har det været muligt (forsvarligt) at ændre dybdeskalaen fra Fig. 11 til en alderskala på Fig. 12. Der er udregnet en alder for hvert enkelt prøveniveau (baseret på aldersmodellen Fig. 9). Et diagram som Fig. 12, der viser alderskala i stedet for dybdeskala, giver et mere korrekt indtryk af det tidsmæssige hændelsesforløb (her dog i ^{14}C år og ikke i kalenderår). Man bør imidlertid kun konstruere et sådant diagram, hvis der eksisterer et godt dateringsgrundlag.

Hvis man vil sammenligne sine resultater med iskerneår eller med historiske data, er det nødvendigt at omregne alderskalaen fra ^{14}C år til kalenderår. Da ^{14}C år ikke altid har samme længde (varierende ^{14}C indhold i atmosfæren gennem tiden), vil det også være mest korrekt at omregne til kalenderår, når man sammenligner sedimentationsrater gennem en lagserie. Det er efterhånden muligt at foretage omregningen med relativt god sikkerhed tilbage til ca. 15.000 BP (Bard et al. 1990; Stuiver & Reimer 1993).

Når man har tilstrækkelig mange dateringer fra en lagserie, har man ligeledes mulighed for at udregne et mål for produktiviteten af foraminiferer, kaldet fora-

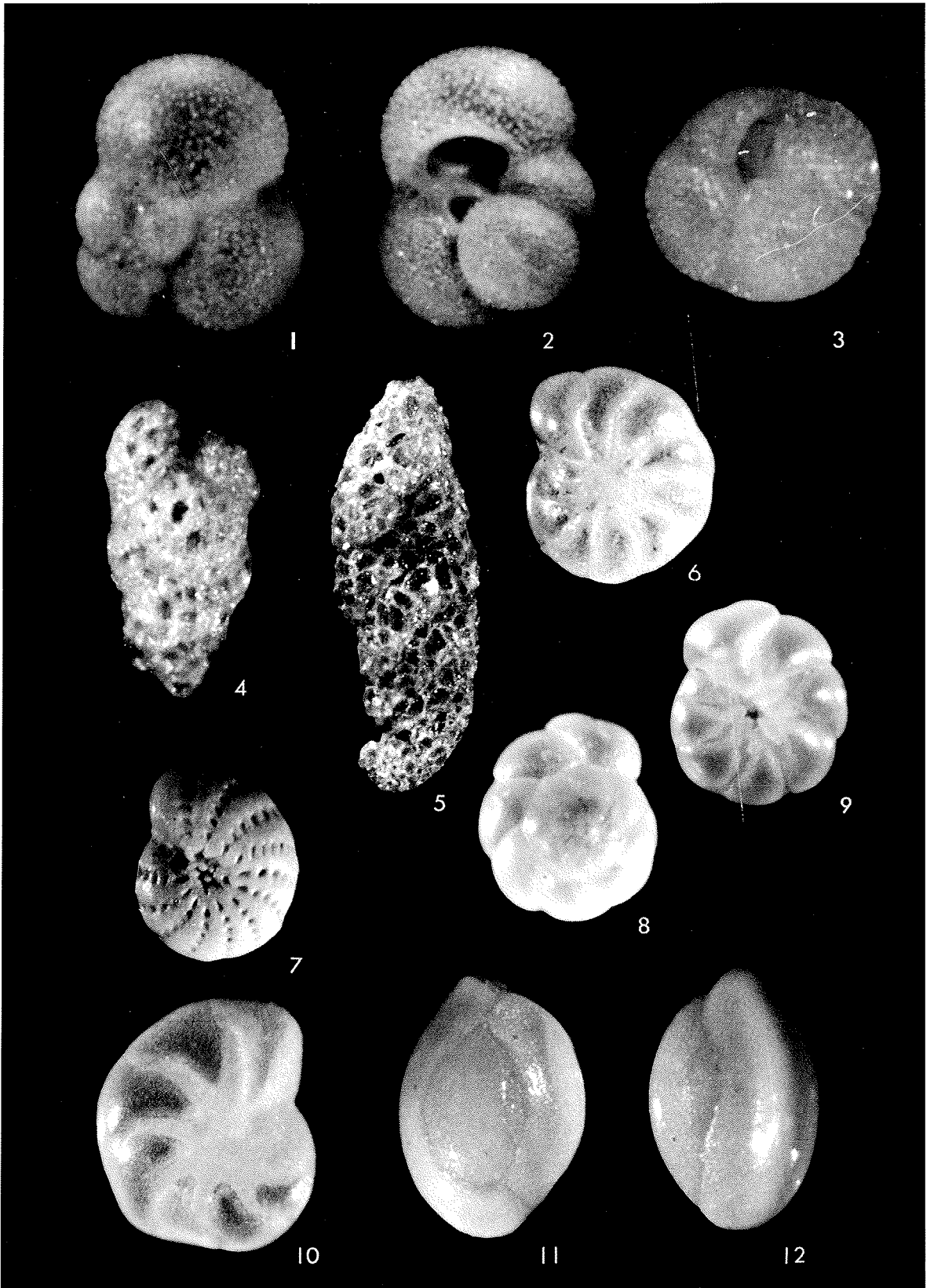
- G. J. & Went, E. (eds) Start of a glacial, 157–171. NATO ASI Series I 3. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg.
- Knudsen, K. L., 1994: The marine Quaternary in Denmark: a review of new evidence from glacial-interglacial studies. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 41, 203–218.
- Knudsen, K. L., Conradsen, K., Heier-Nielsen, S. & Seidenkrantz, M.-S. 1996a: Palaeoenvironments in the Skagerrak-Kattegat basin in the eastern North Sea during the last deglaciation. *Boreas* 25, 65–77.
- Knudsen, K. L., Conradsen, K., Heier-Nielsen, S. & Seidenkrantz, M.-S. 1996b: Quaternary palaeoceanography and palaeogeography in northern Denmark: a review of results from the Skagen cores. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 43, 22–31.
- Knudsen, K. L. & Seidenkrantz, M.-S. 1998: Holocene palaeoenvironments in the North Sea region: reflections from the Skagen Core. In Wilson, J. R. & Michelsen, O. (eds) *Geoscience in Aarhus*. Presented in connection with the 23rd Nordic Geological Winter Meeting, Aarhus, 45–48.
- Kristensen, P., Knudsen, K. L., Lykke-Andersen, H., Nørmark, E., Peakock, J. D. & Sinnoth, A. 1998: Interglacial and glacial climate oscillations in a marine shelf sequence from northern Denmark – a multidisciplinary study. *Quaternary Science Reviews* 17, 813–837.
- Kroon, D., Austin, W. E. N., Chapman, M. R. & Ganssen, G. M. 1997: Deglacial surface circulation changes in the northeastern Atlantic: Temperature and salinity records off NW Scotland on a century scale. *Paleoceanography* 12, 755–763.
- Lambeck, K. 1995: Late Devensian and Holocene shorelines of the British Isles and North Sea from models of glacial-hydro-isostatic rebound. *Journal of the Geological Society, London* 152, 437–448.
- Mangerud, J. 1992: Naturlige klimavariasjoner (II). Årsaken til istider og mellomistider. *Naturen* 3, 115–123.
- Meldgaard, S. & Knudsen, K. L. 1979: Metoder til indsamling og oparbejdning af prøver til foraminifer-analyser. *Dansk Natur Dansk Skole Årsskrift* 1997, 48–57.
- Rohde, J. 1987: The large-scale circulation in the Skagerrak: Interpretation of some observations. *Tellus* A39, 245–253.
- Salvador, A. (ed.) 1994: *International Stratigraphic Guide. Guide to Stratigraphic Classification. Terminology and Procedure*, 2nd edition. The Geological Society of America, Boulder, 220 pp.
- Seidenkrantz, M.-S. & Knudsen, K. L. 1997: Eemian Climatic and Hydrographical Instability on a Marine Shelf in Northern Denmark. *Quaternary Research* 47, 218–234.
- Seidenkrantz, M.-S., Kristensen, P. & Knudsen, K. L. 1995: Marine evidence for climatic instability during the last interglacial in shelf records from northwest Europe. *Journal of Quaternary Science* 10, 77–82.
- Stuiver, M. & Reimer, P. J. 1993: Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program. *Radiocarbon* 35, 215–230.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Duplessy, J.-C., Guiot, J., Labracherie, M., Leclaire, H. & Duprat, J. 1998: Improving past sea surface temperature estimates based on planktonic fossil faunas. *Paleoceanography* 13, 272–283.
- Walton, W. R. 1952: Techniques for recognition of living foraminifera. Contribution from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research 3, 56–60.
- Walton, W. R. 1964: Recent foraminiferal ecology and palaeoecology. In Imbrie, J. & Newell, N. D. (eds) *Approaches to Paleocology*, 151–237. Wiley & Sons: New York.

Tavle I. Planktoniske og bentiske foraminiferer.

- Fig. 1–3. Planktoniske foraminiferer fra arktiske og subarktiske områder i Nordatlanten. Hyaline kalkskaller.
- 1, 2. *Globigerina bulloides*, × 95
 3. *Neoglobobulimina pachyderma* (sinistral), × 110

Fig. 4–12. Bentiske foraminiferer, som hovedsagelig forekommer i boreale lavtvandsområder. Agglutinerede skaller, hyaline kalkskaller og porcelænsagtige kalkskaller.

4. *Eggerelloides scabrus*, × 75. Agglutineret skal.
5. *Ammotium cassis*, × 75. Agglutineret skal.
6. *Haynesina germanica*, × 75. Hyalin kalkskal.
7. *Elphidium williamsoni*, × 75. Hyalin kalkskal.
- 8.–9. *Ammonia beccarii*, × 75. Hyalin kalkskal, spiralside og umbilikalside.
10. *Elphidium albumbilicatum*, × 100. Hyalin kalkskal.
- 11.–12. *Quinqueloculina seminulum*, × 75. Porcelænsagtig kalkskal.



Tavle II. Bentske foraminiferer med hyalin kalkskal.

Fig. 1–2. Boreale foraminiferer fra relativt lavt vand.

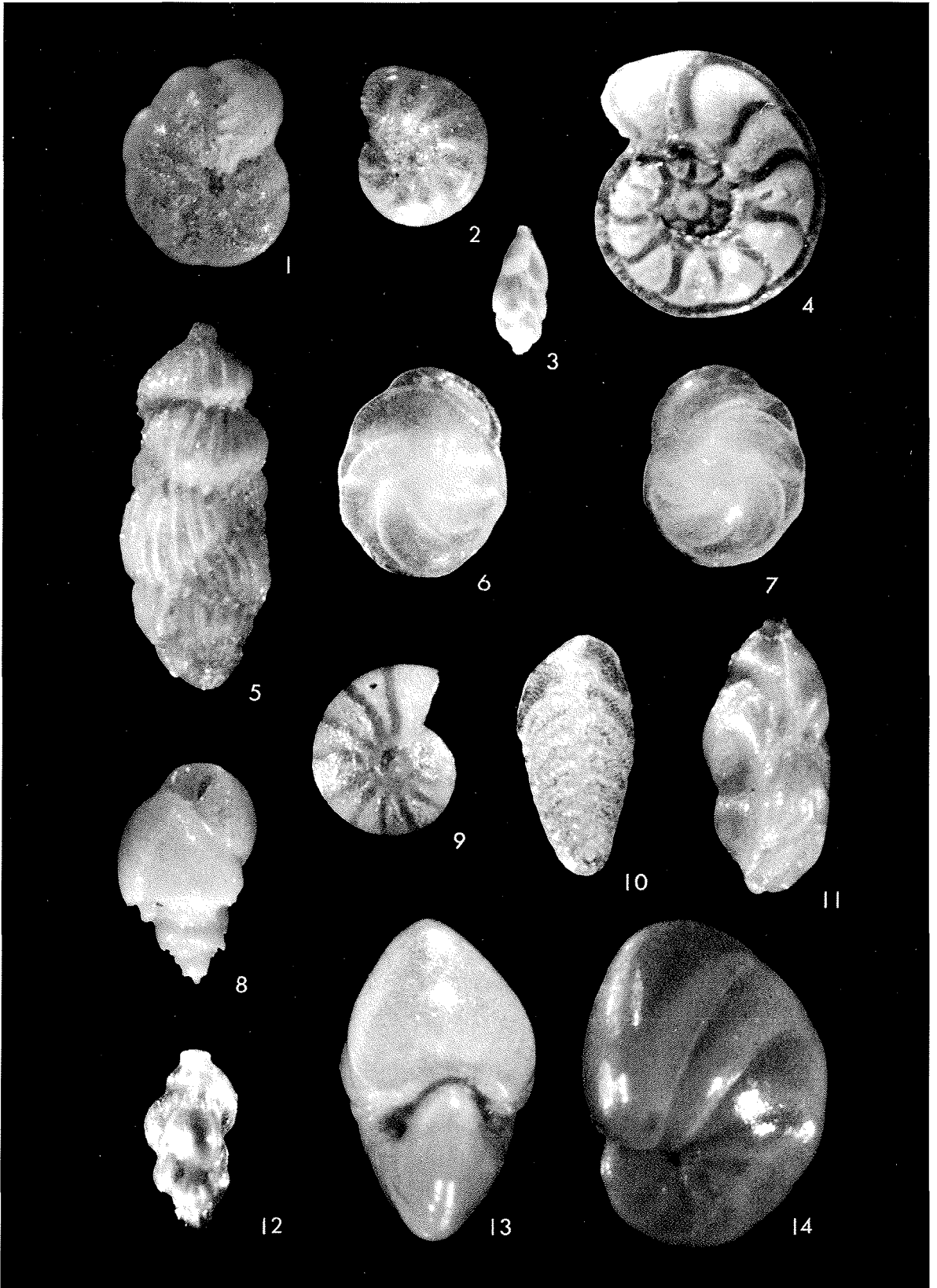
1. *Elphidium excavatum*, forma *selseyensis*, × 90.
2. *Haynesina depressula*, × 100.

Fig. 3–11. Boreale foraminiferer fra større vanddybde (ca. 50–300 m)

3. *Stainforthia fusiformis*, × 65.
4. *Hyalinea balthica*, × 75.
5. *Uvigerina mediterranea*, × 75.
- 6.–7. *Cassidulina laevigata*, × 75.
8. *Bulimina marginata*, × 75.
9. *Melonis barleeanus*, × 65.
10. *Bolivina skagerrakensis*, × 75.
11. *Trifarina angulosa*, × 75.

Fig. 12–14. Arktiske foraminiferer fra relativt dybt vand (> 20–30 m)

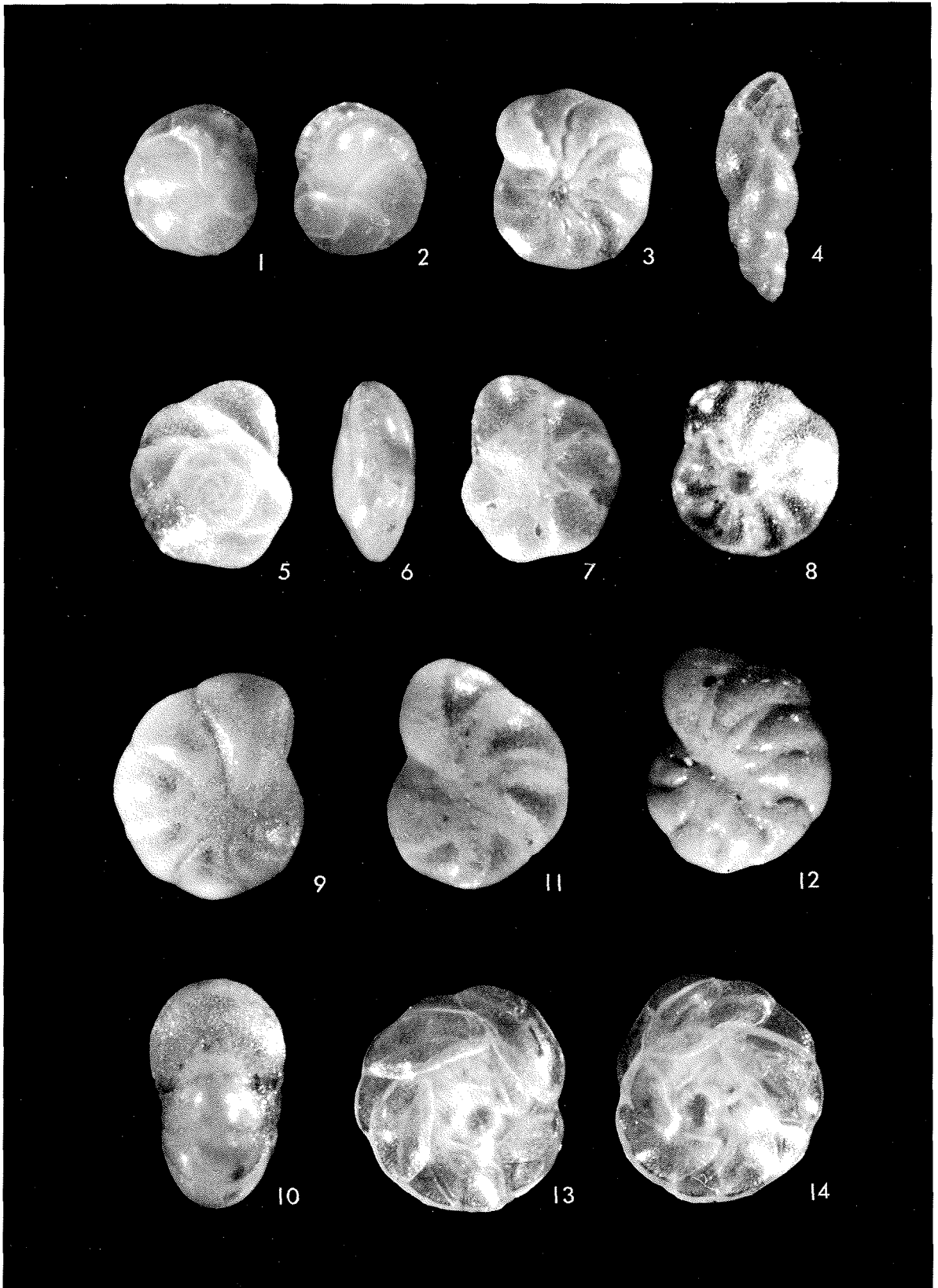
12. *Trifarina fluens*, × 75.
- 13.–14. *Nonionellina labradorica*, × 75.



Tavle III. Bentske foraminiferer med hyalin kalkskal

Fig. 1–14. Arktiske foraminiferer

- 1-2. *Cassidulina reniforme*, × 75.
- 3, 8. *Elphidium excavatum*, forma *clavata*, × 75.
- 4. *Stainforthia loeblichii*, × 75.
- 5–7. *Buccella frigida*, × 75.
- 9–10. *Haynesina orbiculare*, × 75.
- 11. *Elphidium hallandense*, × 75.
- 12. *Astrononion gallowayi*, × 75.
- 13-14. *Islandiella helenae*, × 60.



Tavle IV. Elektronmikroskop optagelser af benthiske foraminiferer

Fig. 1-3. *Eggerelloides scabrus*.

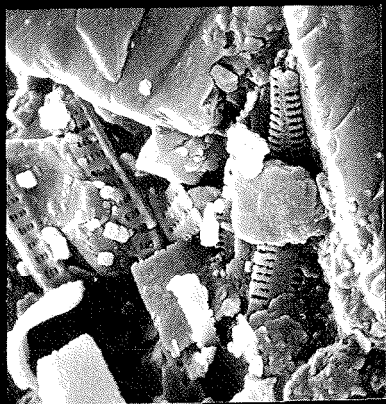
1. Udsnit af agglutineret skal, $\times 2600$.
2. Hele den agglutinerede skal, $\times 75$.
3. Udsnit af agglutineret skal, $\times 525$.

Fig. 4-5. *Elphidium excavatum*, forma *clavata*.

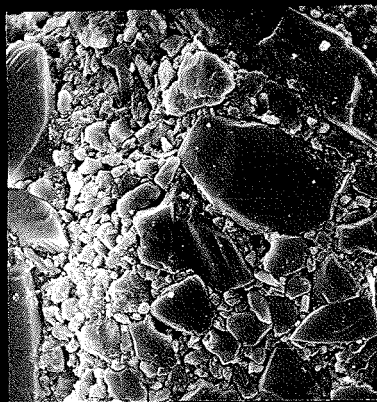
4. Overflade af hele skallen, $\times 200$.
5. Forstørrelse af umbilikalpartiet, $\times 710$.

Fig. 6-7. *Elphidium hallandense*.

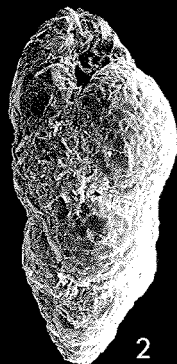
6. Overflade af hele skallen, $\times 80$.
7. Udsnit af umbilikalparti og suturer, $\times 240$.



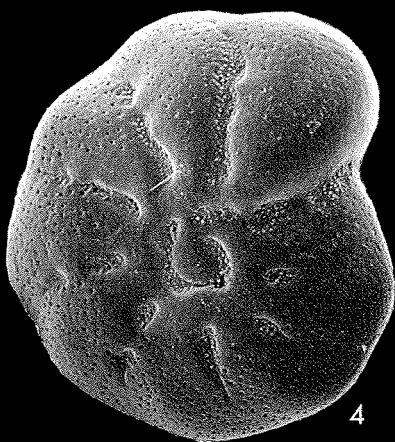
1



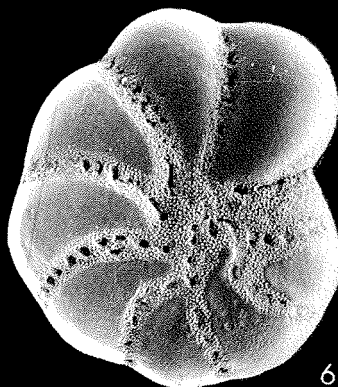
3



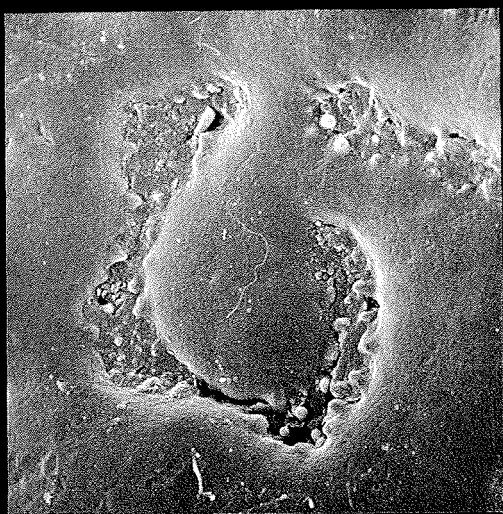
2



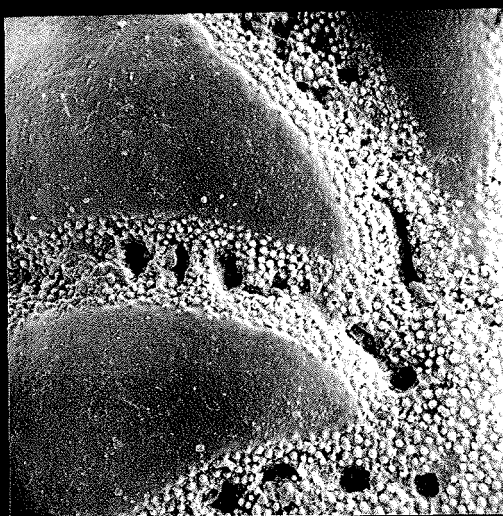
4



6



5



7