

Tidlig ordovicisk palæogeografi bestemt ud fra palæoceanografiske modelleringer kombineret med palæobiogeografiske data

JØRGEN LØYE CHRISTIANSEN



Christiansen, Jørgen Løye: Tidlig ordovicisk palæogeografi bestemt ud fra palæoceanografiske modelleringer kombineret med palæobiogeografiske data. *Geologisk Tidsskrift*, hæfte 1, pp. 1–7, København, 1999–04–29.

Palaeogeographic reconstructions are normally based on palaeomagnetic, palaeobiogeographic and palaeolithological data. Palaeoceanographic models however can, when combined with palaeobiogeographic data, be used as an essential constraining element in the palaeogeographic reconstructions. In this paper this approach has been taken with the Arenigian (Early Ordovician) as an example and a new palaeogeographic reconstruction for the Arenigian has been composed.

Jørgen Løye Christiansen, Institut for Geografi og Internationale Udviklingsstudier, Hus. 19.2., Roskilde Universitetscenter, Postboks 260, 4000 Roskilde.

Introduktion

Konceptuelle palæoklimatiske modeller fik deres gennembrud med Parrish's klassiske arbejde fra 1982. Siden er talrige palæoklimatiske modeller med varierende kompleksitet blevet udarbejdet for forskellige perioder af Phanerozoikum, men kun i få tilfælde er oceancirkulationen blevet taget i betragtning (f.eks. Kennett 1983; Boucot & Gray 1983; Wilde et al. 1989; Wilde 1991). Konceptuel palæoceanografisk modellering af oceancirkulationen i tidlig Ordovicium, er foretaget af Wilde et al. (1989) og Wilde (1991). Andre palæoceanografiske modeller for tidlig Ordovicium er empiriske og er konstrueret på baggrund af palæobiogeografiske data (f.eks. Bergström 1990; Finney & Chen 1990). Disse palæoceanografiske modeller er fast forankret i det aktualistiske princip, hvorfor effekten på oceancirkulationen af en hurtigere Jordrotation og orbitale variationer ikke er inddraget. Andre konceptuelle og numeriske palæoceanografiske modeller for forskellige tidsafsnit af Phanerozoikum (f.eks. Barron & Peterson 1991; Kutzbach et al. 1990; Webby 1992) ignorerer ligeledes effekten af en hurtigere Jordrotation og/eller effekten af orbitale variationer på oceancirkulationen.

På baggrund af fundamentale oceanografiske principper er en ny konceptuel palæoceanografisk model (KOPA-modellen) blevet opstillet. KOPA-modellen inddrager effekten af orbitale variationer samt effekten af en hurtigere Jordrotation på oceancirkulationen i planetarisk skala (>1000 km). KOPA-modellen repræsenterer derfor, i større udstrækning end tidligere modeller, den geologiske gennemsnitssituation

for det undersøgte tidsinterval: Arenig (tidlig Ordovicium).

Den marine fauna er i Arenig karakteriseret ved udtalt provinsialisme (Williams 1973; Cocks & Fortey 1982, 1990; Bergström 1990; Berry & Wilde 1990; Finney & Chen 1990; Bagnoli & Stouge 1991; Cooper et al. 1991; Neuman & Harper 1992). Muligheden for at kombinere KOPA-modellen med palæobiogeografiske data er derfor tilstede, hvorved en ny palæoceanografisk rekonstruktion for Arenig af Iapetushavet og dets omkransende kontinenter er blevet udarbejdet.

Den generelle atmosfæriske og oceaniske cirkulation

Jordens atmosfæriske og oceaniske cirkulation er tæt forbundne. Selvom talrige faktorer bidrager til udformningen af havstrømme, er det de fremherskende vinde, der er den altovervejende årsag til oceanernes overfladestrømme.

Den generelle cirkulation er ofte et synonym for atmosfærens zonale gennemsnitsopførsel, hvorfor betegnelsen den zonale model også anvendes (se Parrish, 1982). Med den zonale model forstås en generel konceptuel cirkulationsmodel for atmosfæren, baseret på astrofysiske forudsætninger der er karakteristiske for nutiden. Endvidere antages det, at Solens absolutte (eller gennemsnitlige) deklination er nul, samt at Jorden er totalt vanddækket. Under disse forhold vil de overfladenære vinde fordele sig på en regelmæssig måde, hvilket skyldes den ulige strålings-

balance af Jord-atmosfære systemet. Resultatet bliver en Hadley-cirkulation bestående af tre celler på hver halvkugle: Hadley-, Ferrel- og Polarcellen. Hadley-cellerne afgrænses af det ækvatoriale lavtryksbælte (0° Br.) og de subtropiske højtryksbælter (30° Br.), Ferrelcellerne af de subtropiske højtryksbælter (30° Br.) og de tempererede lavtryksbælter (60° Br.) mens Polarcellerne afgrænses af de tempererede lavtryksbælter (60° Br.) og de polare højtryksområder (90° Br.). Et resultat af den zonale model er et strikt zonalt strømningsmønster for den atmosfæriske cirkulation. Kontinenter forstyrrer imidlertid dette mønster, fordi termale egenskaber af land og hav er forskellige. Derfor dannes som respons på tilstedeværelsen af kontinenter høj- og lavtrykscentre, istedet for bæltet. Den breddegradsmæssige placering af høj- og lavtrykscentrene er dog generelt sammenfaldende med den placering af høj- og lavtryksbælterne som er forudsagt af den zonale model. Således bliver de subtropiske højtryksbælter over oceanerne til næsten stationære atmosfæriske højtryksområder, med centre beliggende over oceanernes østlige sider (Lockwood 1979). Lavtryksbælterne erstattes af atmosfæriske lavtrykscentre beliggende centralt over oceanerne, men ved samme breddegrad.

Et strikt zonalt strømningsmønster for den oceaniske cirkulation, baseret på den zonale model, kan kun forekomme ved en total vanddækket Jord. Meridionale barrierer forstyrrer imidlertid den øst-vestgående strømning. De meridionale barrierer kan være landmasser, men også en oversvømmet shelf er tilstrækkelig til at afbøje de planetariske oceaniske strømme (Wilde et al. 1989). Dette resulterer i cyklonstrømning omkring oceaniske lavtrykscentre, der placeres midt i oceanerne på samme breddegrad som de tempererede lavtryksbælter. Cirkulationen omkring subtropiske oceaniske højtrykscentre vil være anticyklon, med centeret placeret på det subtropiske højtryksbælte i oceanernes vestlige side, grundet vestintensivering (Stommel 1948).

Oceancirkulationen i Arenig

KOPA-modellen er baseret på almene fysisk-oceanografiske principper, og bygger videre på procedurer anvendt af Parrish (1982) og Wilde (1991). Imidlertid indrages, ved bestemmelsen af placeringen af høj- og lavtryksbælter i Arenig, to væsentlige forhold: (1) skift i Hadley-cirkulationen grundet Milankovitch-svingninger og (2) effekten af en hurtigere Jordrotation.

Orbitale variationer kan have haft en signifikant indflydelse på palæoklimaet (Parrish 1982; Perlmutter & Matthews 1990; Chandler et al. 1992; Matthews & Perlmutter 1994), men i forbindelse med palæoklimatisk modellering henvises ofte til, at de klimaskift der forårsages af præcessionen/excentriciteten og nutationen, og som resulterer i cyklostratigrafiske aflej-

ringer, er for detaljerede til at indgå i palæoklimatiske modeller (f.eks Parrish 1982; Chandler et al. 1992). Nye studier (Christiansen 1997) peger dog på, at variationer i de orbitale parametre bevirker, at den gennemsnitlige placering af høj- og lavtryksbælterne over tidsrum, som normalt behandles i palæoklimatiske modeller, er signifikant forskellige fra de værdier, der tidligere har været anvendt i konceptuelle palæoklimatiske modeller i planetarisk skala. På baggrund af data fra Perlmutter & Matthews (1990) og Matthews & Perlmutter (1994) er det sandsynliggjort, at de subtropiske højtryksbælters gennemsnitlige placering var 28° Br., mens de tempererede lavtryksbælters gennemsnitlige placering var ca. 53° Br. (Christiansen 1997). Hertil lægges effekten af en 12% hurtigere Jordrotation, der er interpoleret på baggrund af vækstmonstre i mellem devone og øvre karbone koraller (Wells 1963) samt 850 mill. år gamle stromatolitter (Vanyo & Awramik 1985). Under antagelse af at temperaturforskellen er konstant mellem ækvator og polerne, kan effekten af en hurtigere Jordrotation på de subtropiske højtryksbælters placering udregnes (Fultz et al. 1959; Lloyd 1982). Det subtropiske højtryksbælte vil således forskubbes ca. tre breddegrader mod ækvator ved en 12% hurtigere Jordrotation. Data fra Jenkins et al. (1993) indikerer, at Ferrelcellen vil indskrænkes i et forhold svarende til Hadleycellen. Dette betyder, at både det subtropiske højtryksbælte og det tempererede lavtryksbælte forskubbes yderligere tre breddegrader mod ækvator.

På baggrund af ovennævnte to faktorer placeres for Arenig det subtropiske højtryksbælte på 25° Br. og det tempererede lavtryksbælte på 50° Br. På høj- og lavtryksbælterne placeres de oceaniske trykcentre.

Ny palæogeografisk rekonstruktion for Arenig

Til bestemmelse af palæogeografi anvendes fortrinsvis palæomagnetiske data, klimarelateret litofacies og palæobiogeografiske data.

Usikkerheden på palæoceanografiske modeller, der bygger på fysisk-oceanografiske principper, er mindre end palæomagnetiske usikkerheder for tidlig Ordovicium (cf. Van der Voo 1993). Palæoceanografiske modeller kan derfor bidrage væsentligt til palæogeografisk rekonstruktion. En ny palæogeografisk rekonstruktion for Arenig, der harmonerer med palæomagnetiske data, palæoklimatiske data, palæobiogeografiske data og KOPA-modellen, er udarbejdet (Fig. 1-4).

Balticas placering

En placering af Baltica som vist på Fig. 1-4 vil, ved anvendelse af KOPA-modellen, betyde at Baltica ud-

Graptolitprovinsialisme

gjorde den østligste begrænsning af den tempererede cyklone gyro i Iapetushavet. Endvidere vil Balticas nordvestlige margin have udgjort den subtropiske anticyklone gyros sydøstligste begrænsning i Iapetushavet. Dette vil have resulteret i „upwelling“ nær Balticas nordvestlige margin og at køligt vand transporteredes fra Baltica til Taimyr (Fig. 1). Dette forhold kan forklare tilstedeværelsen af både atlantisk og pacifisk graptolitfauna i Taimyr (Finney & Chen 1990). Derudover kan ovennævnte forhold forklare tilstedeværelsen af repræsentanter fra de to førnævnte graptolitregioner (sensu Cooper et al. 1991) på Baltica (se Fig. 1).

Palæomagnetiske undersøgelser fra starten af 1990'erne (Smethurst 1992; Torsvik et al. 1992) tyder på, at Baltica i tidlig Ordoviciem var roteret mindst 50° med uret i forhold til dets nuværende orientering. Dette støttes af cephalopoddata fra den nordrussiske del af Baltica, der udviser signifikant lighed med cephalopodfaunaen fra det sydlige Tyrkiet (Crick 1990). Denne lighed kan bedre forklares ved en ca. 50° rotation med uret af Baltica (Torsvik et al. 1992) i forhold til en orientering af Baltica lig den nuværende (f.eks. Cocks & Fortey 1982; McKerrow et al. 1991).

Laurentias placering

Laurentias placering på ækvatoriale breddegrader i tidlig Ordoviciem er veldokumenteret (Cocks & Fortey 1982; Witzke 1990; McKerrow et al. 1991; Torsvik et al. 1992, 1995, 1996; Van der Voo 1993; Cocks & McKerrow 1993; Mac Niocail & Smethurst 1994).

I de fleste palæogeografiske rekonstruktioner er Siberia placeret umiddelbart øst for Laurentia. Den sydækvatoriale strøm har derfor ifølge KOPA-modellen løbet fra Siberia mod Laurentia. Denne strøm er sandsynligvis blevet blokeret af Bronson Hill-Tetagouche-Lushs Bight (BHTL) øbuen (sensu Cocks & McKerrow 1993) for herefter, som vestlig grænsestrøm, at indgå i den anticyklone gyro i det nordlige Iapetushav (Fig. 1–4).

Cephalopoddata fra Arenig viser stor faunalighed mellem Laurentia og Siberia (Crick 1990), og både Laurentia og Siberia er karakteriseret af lavvandsmarine bathyuride trilobitter (Cocks & Fortey 1982, 1990). Det er således sandsynligt, at afstanden mellem Laurentia og Siberia har været under 1000 km (sensu McKerrow & Cocks 1986).

Siberias placering

Siberia er på Fig. 1–4 placeret på ækvatoriale breddegrader og vil udgøre den nordøstlige begrænsning af den anticyklone gyro i Iapetushavet. Øst for Siberia er Kazakhstan placeret. Kazakhstan er givetvis dannet ved sammenhobning af migrerende øbuekomplek-

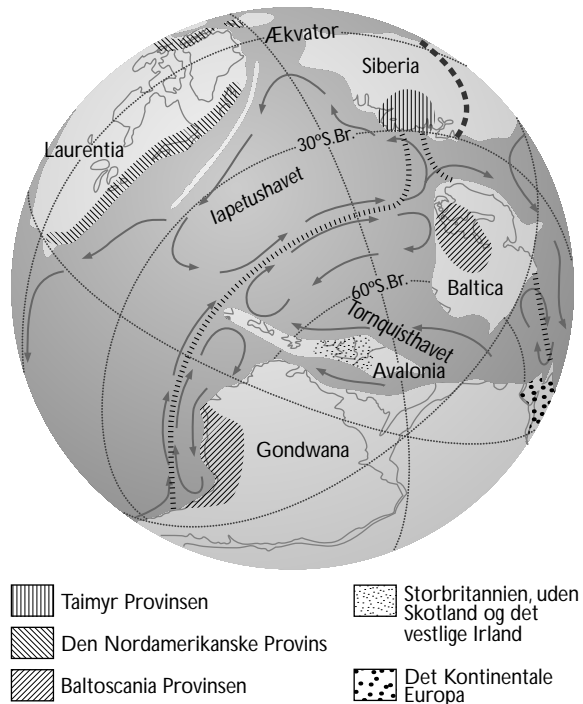
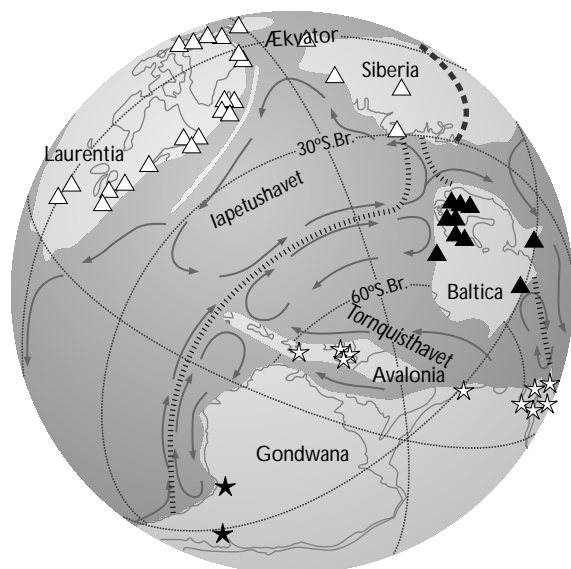


Fig. 1. Palæogeografisk rekonstruktion for tidlig Ordoviciem (Arenig) af Iapetushavet og omkransende kontinenter, hvorpå oceanekulationen ifølge KOPA-modellen er vist (ens for Fig. 1–4). Små bjælker i oceanerne markerer grænsen mellem kølige og varme overfladevandtemperaturer. Den stiplede linie øst for Siberia markerer grænsen til Kazakhstan. Fauna fra Kazakhstan er ikke vist. Endvidere er Precordillera mikrokontinentet ikke indtegnet, og fauna fra Precordillera er ikke vist. Se teksten for yderligere forklaring. På figuren er vist graptolitprovinser i Arenig ifølge Berry & Wilde (1990).

Palaeogeographic reconstruction for the Early Ordovician (Arenigian) of the Iapetus Ocean and its surrounding continents, whereupon the ocean circulation according to the KOPA-model is shown (identical in Fig. 1–4). Small bars in the oceans indicates the boundary between cool and warm sea surface temperatures. The dashed line east of Siberia indicates the boundary to Kazakhstan. Fauna from Kazakhstan is not shown. Furthermore, the Precordillera microcontinent is not pictured and fauna from the Precordillera is not shown. See text for further details. On the figure is shown Graptolite provinces in the Arenigian according to Berry & Wilde (1990).

Trilobitprovinsialisme



- △ Bathyuride trilobitter
- ▲ Ptychopygine / Megalaspide trilobitter
- ☆ Calymenaceane-Dalmanitaceane trilobitter
- ★ Dikelocephalide trilobitter

Fig. 2. Trilobitprovinsialismen i Arenig, baseret på Cocks & Fortey (1990), suppleret med data fra Cocks & Fortey (1982) og Fortey et al. (1989). Palæogeografi som i Fig. 1.

Trilobite provincialism in the Arenigian based on Cocks & Fortey (1990), supplemented with data from Cocks & Fortey (1982) and Fortey et al. (1989). Palaeogeography as in Fig. 1.

ser, der udvikledes langs en subduktionszone med forbindelse til Siberia (Nikitin et al. 1991). Den komplekse og ofte blandede fauna i Kazakhstan kan sandsynligvis tilskrives dette forhold. Siberia er karakteriseret af en pacifisk graptolit-fauna (Finney & Chen 1990) dog er graptolitfaunaen i Taimyr både atlantisk og pacifisk (Berry & Wilde 1990; Finney & Chen 1990). Hvis havstrømme skal være det forklarende element for denne faunafordeling må palæogeografien ændres. Ved at placere Taimyr umiddelbart nord for Balticas daværende vestlige margin, gives der, ved anvendelse af KOPA-modellen (se Fig. 1), mulighed for, at køligt vand transporteres fra Baltica til Taimyr via den nordgående del af Iapetushavets subtropiske anticyklone gyro.

Placeringen af Siberia ifølge Torsvik et al. (1995) med den sydlige, omend stadig marginal-ækvatoriale placering, tilfredsstillende ovenstående krav. For at den kølige nordgående strøm træffer Siberia i Taimyr, kræ-

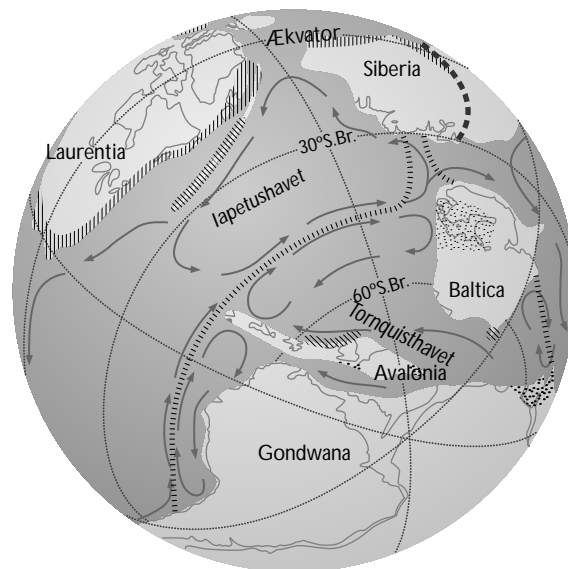
ves dog en mere østlig placering af Baltica i forhold til Siberia end vist i Torsvik et al.'s (1995) palæogeografiske rekonstruktion.

Torsvik et al. (1996) har beregnet, at oceanet mellem Siberia og Baltica var ca. 1200–1500 km bredt i tidlig Ordovicium. Dette betyder, at oceanet sandsynligvis var for stort for de ptychopygine/megalaspide trilobitter fra Baltica til at krydse dette ocean (McKerrow & Cocks 1986). Dette stemmer overens med, at de tidlige ordoviciske bentoniske trilobitter i Taimyr er bathyuride (Cocks & Fortey 1990), på trods af en mulig kølig strøm fra Baltica til Taimyr.

Avalonias placering

En placering af Avalonia syd for det tempererede oceaniske lavtryk (Fig. 1–4) vil bevirke, at Avalonia lå i koldvandsområdet, hvilket stemmer overens med udbredelsen af atlantisk graptolitfauna (Berry & Wilde

Brachiopodprovinsialisme







-  Toquima-Table Head Provinsen
-  Den Keltiske Provins
-  Den Baltiske Provins
-  Den Anglo-franske Provins

Fig. 3. Brachiopodprovinser i Arenig, baseret på data fra Williams (1973) og Neuman & Harper (1992). Palæogeografi som i Fig. 1.

Brachiopod provinces in the Arenigian based on data from Williams (1973) and Neuman & Harper (1992). Palaeogeography as in Fig. 1.

1990; Finney & Chen 1990), koldvandsadapteret conodontfauna (Bergström 1990; Bagnoli & Stouge 1991) og Calymeneaceae - Dalmanitaceae bentoniske trilobitter (Cocks & Fortey 1990) på Avalonia.

Gondwanas (Sydamerikas) placering

I de traditionelle rekonstruktioner af Gondwana (f.eks. Torsvik et al. 1992, 1995, 1996; Van der Voo 1993) synes den sydamerikanske del af Gondwana i Arenig at være placeret for langt mod nord til at forklare tilstedeværelsen af atlantisk graptolitfauna med tydelig baltisk affinitet i det nuværende Peru, Chile og det nordlige Argentina (se Berry & Wilde 1990). Inddrages KOPA-modellen gøres det problematisk af opretholde denne nordlige placering af Sydamerika. Dette skyldes, at graptolitprovincialismen sandsynligvis var et resultat af variationer i havtemperaturen (Finney & Chen 1990; Cooper et al. 1991), hvorved tilstedeværelsen af den kold-køligvandsadapterede graptolitfauna i Sydamerika, ved den traditionelle placering, forklares ved transport af køligt vand sydfra. Denne strømretning strider imidlertid mod almene fysisk-oceanografiske principper.

På Cocks & McKerrow's (1993) palæogeografiske rekonstruktion er Sydamerika placeret så meget sydligere, at graptolitfaunaen fra Sydamerika, i overensstemmelse med den primære årsag til graptolitprovincialismen (Finney & Chen 1990; Cooper et al. 1991), er placeret på omtrent samme breddegrad som Baltica. Sydamerika vil derfor udgøre den tempererede cyklone gyros vestlige begrænsning, mens Baltica vil udgøre den østlige (se Fig. 1–4). Den sydligere placering af Sydamerika harmonerer også med cephalopoddata, der viser, at cephalopoder fra den russiske platform var signifikant lig den sydamerikanske (Crick 1990).

På baggrund af palæoceanografiske overvejelser sammenholdt med palæobiogeografiske data foretrækkes det, at Sydamerika for tidlig Ordovicium placeres sydligere (Cocks & McKerrow 1993) end i de fleste palæogeografiske rekonstruktioner.

Konklusion

En ny palæogeografisk rekonstruktion for Arenig, der harmonerer med palæomagnetiske data, palæoklimatiske data, palæobiogeografiske data og KOPA-modellen, er udarbejdet (Fig. 1–4).

Laurentia er placeret på ækvatoriale breddegrader udfra Mac Niocaill & Smethurst (1994), med en afstand til BHTL-øbuen på 400–700 km (sensu Cocks & McKerrow 1993). Afstanden til Siberia er sat til 800 km, for at tillade reproduktiv kommunikation mellem bentoniske organismer fra Laurentia og Siberia (Fig. 2 & 3). Siberia er placeret på subtropiske til ækvatoriale breddegrader i henhold til Torsvik et al. (1995),

Conodontprovincialisme

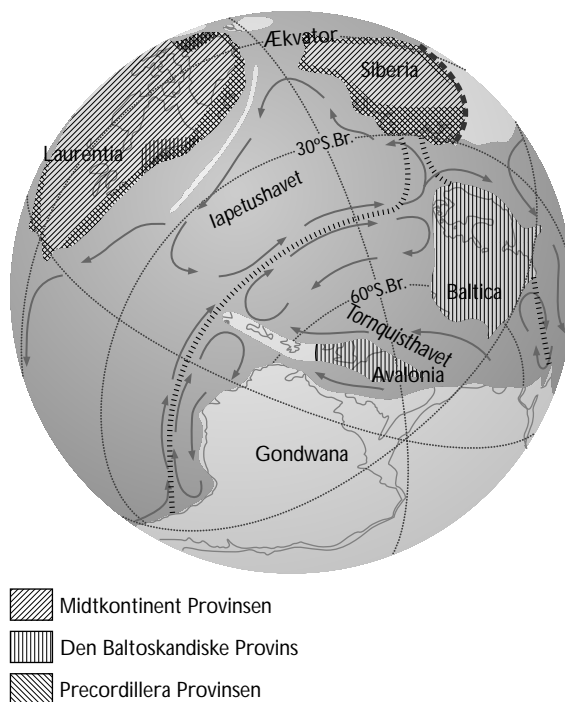


Fig. 4. Conodontprovincer i Arenig (*Prioniodus* tid) ifølge Bagnoli & Stouge (1991). Palæogeografi som i Fig. 1.

Conodont provinces in the Arenigian (Prioniodus time) according to Bagnoli & Stouge (1991). Palaeogeography as in Fig. 1.

men således at Taimyr befinder sig umiddelbart nordfor Balticas daværende vestlig margin. Dette vil muliggøre at atlantisk graptolitfauna transporteres nordpå med den subtropiske gyros kølige østlige grænsestrøm (Fig. 1). Afstanden mellem Siberia og Baltica er sat til ca. 1200 km (sensu Torsvik et al. 1995). Baltica er placeret på tempererede breddegrader og orienteret ifølge Torsvik et al. (1992), men med en svagt nordligere placering. Afstanden fra Baltica til Avalonia/Armorica/Gondwana er sat til minimum 1300 km, mens afstanden til Laurentia er ca. 5000 km. Avalonia lå ca. 300–500 km fra Gondwana (sensu Cocks & McKerrow 1993) og ca. 1400 km fra Baltica. Gondwana er placeret i henhold til Cocks & McKerrow (1993), med Sydpolen placeret nær det nuværende Sierra Leone. Afstanden mellem den sydamerikanske del af Gondwana (Argentina) og Laurentia er ca. 6000 km, hvilket ikke synes urimeligt eftersom Thomas & Astini (1996) har dokumenteret, at Precordillera i tidlig Ordovicium var et selvstændigt mikrokontinent i Iapetushavet, uden faunaimmigration fra Laurentia eller Gondwana.

Taksigelse

Nærværende artikel er baseret på forfatterens specialeafhandling fra Roskilde Universitetscenter 1997, under vejledning af docent Tommy Jørgart og seniorforsker Svend Stouge. Svend Stouge takkes for konstruktive kommentarer i forbindelse med udarbejdelsen af denne artikel. Stefan Sølberg takkes for grafisk assistance.

Referencer

- Bagnoli, G. & Stouge, S. 1991: Paleogeographic Distribution of Arenigian (Lower Ordovician) Conodonts. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 63, 171–183.
- Barron, E. J. & Peterson, W. H. 1991: The Cenozoic ocean circulation based on ocean General Circulation Model results. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 83, 1–28.
- Bergström, S. M. 1990: Relations between conodont provincialism and the changing palaeogeography during the Early Palaeozoic. In McKerrow, W. S. & Scotese, C. R. (eds.) *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*, Geological Society, London, Memoir 12, 105–121.
- Berry, W. B. & Wilde, P. 1990: Graptolite biogeography: implications for palaeogeography and palaeoceanography. In McKerrow, W. S. & Scotese, C. R. (eds.) *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. Geological Society, London, Memoir 12, 129–137.
- Boucot, A. J. & Gray, J. 1983: A Paleozoic Pangaea. *Science* 222, 571–581.
- Chandler, M. A., Rind, D. & Ruedy, R. 1992: Pangaeian climate during the Early Jurassic: GCM simulations and the sedimentary record of paleoclimate. *Geological Society of America Bulletin* 104, 543–559.
- Christiansen, J. L. 1997: Oceancirkulation i tidlig Ordoviciet. 124 pp. Roskilde: Institut for Geografi og Internationale Udviklingsstudier, Roskilde Universitetscenter. Upubliceret cand.scient.-afhandling.
- Cocks, L. R. M. & Fortey, R. A. 1982: Faunal evidence for oceanic separations in the Palaeozoic of Britain. *Journal of the Geological Society, London* 139, 465–478.
- Cocks, L. R. M. & Fortey, R. A. 1990: Biogeography of Ordovician and Silurian faunas. In McKerrow, W. S. & Scotese, C. R. (eds.) *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*, Geological Society, London, Memoir 12, 97–104.
- Cocks, L. R. M. & McKerrow, W. S. 1993: A reassessment of the early Ordovician „Celtic“ brachiopod province. *Journal of the Geological Society, London* 150, 1039–1042.
- Cooper, R. A., Fortey, R. A. & Lindholm, K. 1991: Latitudinal and depth zonation of early Ordovician graptolites. *Lethaia* 24, 199–218.
- Crick, R. E. 1990: Cambro-Devonian biogeography of nautiloid cephalopods. In McKerrow, W. S. & Scotese, C. R. (eds.) *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*, Geological Society, London, Memoir 12, 147–161.
- Finney, S. C. & Chen, X. 1990: The relationship of Ordovician graptolite provincialism to palaeogeography. In McKerrow, W. S. & Scotese, C. R. (eds.) *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*, Geological Society, London, Memoir 12, 123–128.
- Fortey, R. A., Owens, R. M. & Rushton, A. W. A. 1989: The palaeogeographic position of the Lake District in the early Ordovician. *Geological Magazine* 126, 9–17.
- Fultz, D., Long, R. R., Owens, V., Bohan, W., Kaylor, R. & Weil, J. 1959: Studies of Thermal Convection in a Rotating Cylinder with some Implications for Large Scale Atmospheric Motions. *Meteorological Monographs* 4, 21, 1–104.
- Jenkins, G. S., Marshall, H. G. & Kuhn, W. P. 1993: Precambrian Climate: The Effects of Land Area and Earth's Rotation Rate. *Journal of Geophysical Research* 98, 8785–8791.
- Kennett, J. P. 1983: Paleo-oceanography: Global Ocean Evolution. *Reviews of geophysics and Space Physics* 21, 1258–1274.
- Kutzbach, J. E., Guetter, P. J. & Washington, W. M. 1990: Simulated Circulation of an Idealized Ocean for Pangaean Time. *Paleoceanography* 5, 299–317.
- Lloyd, C. R. 1982: The Mid-Cretaceous Earth: paleogeography; ocean circulation and temperature; atmospheric circulation. *Journal of Geology* 90, 393–413.
- Lockwood, J. G. 1979: Causes of climate. 260 pp. London: Edward Arnold.
- MacNiocail, C. & Smerthurst, M. A. 1994: Palaeozoic palaeogeography of Laurentia and its margins: a reassessment of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International* 116, 715–725.
- Matthews, M. D. & Permuter, M. A. 1994: Global cyclostratigraphy: an application to the Eocene Green River Basin. In de Boer, P. L. & Smith, D. G. (eds.) *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*, International Association of Sedimentologists, Special Publication 19, 459–481.
- McKerrow, W. S. & Cocks, L. R. M. 1986: Oceans, island arcs and olistostromes: the use of fossils in distinguishing sutures, terranes and environments around the Iapetus Ocean. *Journal of the Geological Society, London* 143, 185–191.
- McKerrow, W. S., Dewey, J. F. & Scotese, C. R. 1991: The Ordovician and Silurian Development of the Iapetus Ocean. *Special Papers in Palaeontology* 44, 165–178.
- Neuman, R. B. & Harper, D. A. T. 1992: Paleogeographic significance of Arenig-Llanvirn Toquima-Table Head and Celtic brachiopod assemblages. In Webby, B. D. & Laurie, J. R. (eds.) *Global Perspective on Ordovician Geology*, 241–254. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Nikitin, I. F., Frid, N. M. & Zvontsov, V. S. 1991: Paleogeography and main features of volcanicity in the Ordovician of Kazakhstan and North Tien Shan. In Barnes, C. R. & Williams, S. H. (eds.) *Advances in Ordovician Geology*. Geological Survey of Canada, Paper 90-9, 259–270.
- Parrish, J. T. 1982: Upwelling and Petroleum Source Beds, With Reference to Paleozoic. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 66, 750–774.
- Perlmutter, M. A. & Matthews, M. D. 1990: Global Cyclostratigraphy – A Model. In Cross, T. A. (ed.) *Quantitative Dynamic Stratigraphy*, 233–260. New Jersey: Prentice Hall.
- Smerthurst, M. A. 1992: A practical suggestion regarding the use of Scandinavian and Russian palaeomagnetic data to determine the palaeo-position of Baltica in Ordovician time. *Tectonophysics* 201, 65–73.

- Stommel, H. 1948: The westward intensification of wind-driven ocean currents. *Transaction, American Geophysical Union* 29, 202–206.
- Thomas, W.A. & Astini, R. A. 1996: The Argentine Precordillera: A Traveler from the Ouachita Embayment of North American Laurentia. *Science* 273, 752–757.
- Torsvik, T. H., Smethurst, M. A., Van der Voo, R., Trench, A., Abrahamsen, N. & Halvorsen, E. 1992: Baltica. A synopsis of Vendian-Permian palaeomagnetic data and their palaeotectonic implications. *Earth-Science Reviews* 33, 133–152.
- Torsvik, T. H., Tait, J., Moralev, V. M., McKerrow, W. S., Sturt, B. A. & Roberts, D. 1995: Ordovician palaeogeography of Siberia and adjacent continents. *Journal of the Geological Society, London* 152, 279–287.
- Torsvik, T. H., Smethurst, M. A., Meert, J. G., Van der Voo, R., McKerrow, W. S., Brasier, M. D., Sturt, B. A. & Walderhaug, H. J. 1996: Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic – A tale of Baltica and Laurentia. *Earth-Science Reviews* 40, 229–258.
- Van der Voo, R. 1993: *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans*. 411 pp. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vanyo, J. P. & Awramik, S. M. 1985: Stromatolites and Earth-Sun-Moon Dynamics. *Precambrian Research* 29, 121–142.
- Webby, B. D. 1992: Global biogeography of Ordovician corals and stromatoporoids. In Webby, B. D. & Laurie, J. R. (eds.) *Global Perspective on Ordovician Geology*, 261–276. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Wells, J.W. 1963: Coral Growth and Geochronometry. *Nature* 197, 948–950.
- Wilde, P. 1991: Oceanography in the Ordovician. In Barnes, C. R. & Williams, S. H. (eds.) *Advances in Ordovician Geology*. Geological Survey of Canada, Paper 90-9, 283–298.
- Wilde, P., Quinby-Hunt, M. S., Berry, W. B. N. & Orth, C. J. 1989: Palaeo-oceanography and biogeography in the Tremadoc (Ordovician) Iapetus Ocean and the origin of the chemostratigraphy of *Dictyonema flabelliforme* black shales. *Geological Magazine* 126, 19–27.
- Williams, A. 1973: Distribution of brachiopod assemblages in relation to Ordovician palaeogeography. In Hughes, N. F. (ed.) *Organisms and Continents Through Time*, Special Papers in Palaeontology 12, 241–269.
- Witzke, B. J. 1990: Palaeoclimatic constraints for Palaeozoic Palaeolatitudes of Laurentia and Euramerica. In McKerrow, W. S. & Scotese, C. R. (eds.) *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. Geological Society, London, Memoir 12, 57–73.