

Cykliske alluvialaflejringer, Hornelen Bassinet (Devon), Vestnorge: Klimatisk kontra tektonisk styring

LARS SEIDLER & JAN K. MIKKELSEN



Seidler, L. & Mikkelsen, J. K.: Cykliske alluvialaflejringer, Hornelen Bassinet (Devon), Vestnorge: Klimatisk kontra tektonisk styring. *Geologisk Tidsskrift*, hæfte 4, pp. 11–15. København, 1996–12–05.

The Mid Devonian Hornelen Basin is located in the western part of Norway and covers an area of approximately 1250 km². The basin developed as a fast subsiding, extensional strike-slip basin after the Caledonian orogeny (Steel 1976). The basin was situated at 10°–15° N (Piper 1985) in a tropical, humid to semi arid, monsoonal climate. The sedimentary fill consists of ~25 km alluvial sediments mainly of braided fluvial and alluvial fan origin. The sediments are markedly segmented in 150–200 coarsening upwards megacycles with a thickness of ~100–200 m (Steel 1976) and in high frequent sub cycles with thicknesses of less than ~30 m. The cyclicity in part of the succession has been studied by measurement of simple sedimentary parameters (grain size, mean maximum clast size, bed thickness, number of erosional surfaces, scour depth and degree of synsedimentary deformation). Using spectral analysis the cyclicity has been decomposed. The most prominent cycles of 172.7 m and 28.7 m can be correlated between all the sedimentary parameters except the synsedimentary deformation. It is suggested that the two orders of sedimentary cycles are an outcome of orbitally induced climatic fluctuations within the Milankovitch frequency band. The mega cyclicity is the result of the eccentricity period (100 000 yrs) and the 28.7 m sub cyclicity is product of the precession period (18 355 yrs) (Berger & Loutre 1994). These orbital periods resulted in a wandering of the climatic belts and thereby in a change between humid and semi arid conditions within one Milankovitch cycle (Perlmutter & Matthews 1989). The river discharge, lake levels and as a result the sedimentary environments changed as a function of these climatic fluctuations.

Lars Seidler: Geologisk Institut, Afdeling for Almen Geologi, Øster Voldgade 10, 1350 København K. Jan K. Mikkelsen: Mobil Exploration Norway Inc., Nedre Strandgt. 41-43, 4001 Stavanger, Norge.

Indledning

Hornelen Bassinet ligger i Vestnorge og dækker et areal på ca. 1250 km². Bassinet er af Midt Devon alder dannet som et hurtigt indsynkende, ekstensionelt strike-slip bassin efter den Kaledoniske orogenese (Steel 1976). I Devon lå Hornelen Bassinet på 10–15° N (Piper 1985).

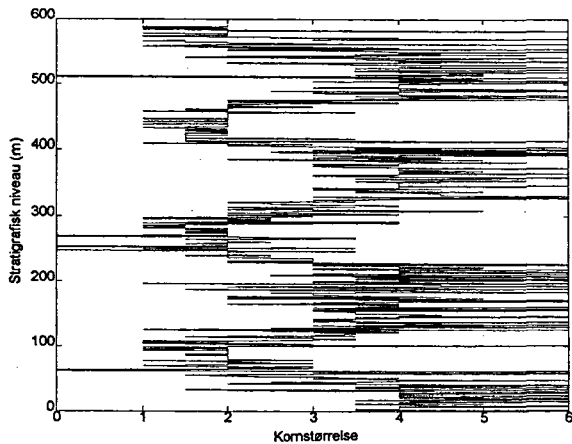
Bassinet er opfyldt af 25 km alluviale sedimenter bestående af aksiale, fluviale sandsten (90%) samt marginale, flodslette og associerede lakustrine sedimenter og alluvialviftekonglomerater (10%) (Due 1983, Olsen 1987, Pollard, Steel, Undesrud 1982). Disse sedimenter er markant opdelt i 150–200 opad grovende megacykler på hver 100–200 m tykkelse og

i mere højfrekvente subcykler på 10–40 m (Steel 1976).

Som et alternativ til en tidligere tektonisk model af bl.a. Steel et al. (1985) fremsætter vi her en tolkning baseret på klimatisk inducerede afstrømningsvariationer forårsaget af Milankovitchsvingninger.

Analysemetoder

Analysen bygger på et datasæt bestående af ~1 km opmålt lithologisk log fordelt på 600 m sammenhængende aksiale, fluviale sandsten og 353 m sammenhængende marginale, interfingerende alluvialviftekonglomerater og flodslettesedimenter. Datasættet er



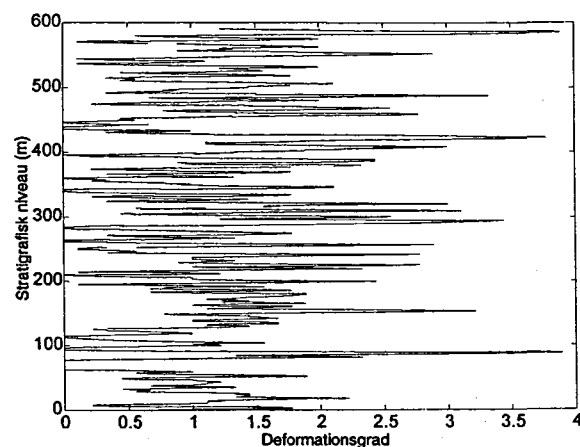
Figur 1. Plot af kornstørrelse fra de aksiale aflejringer. Numerisk inddeling af kornstørrelse, hvor 1=mudder og 6=konglomerat. Se tekst for forklaring.

Plot of grain size variations from the axial deposits. Numerical values of grain size, where 1=mud and 6=conglomerate.

opmålt i den østlige del af bassinet tæt på den nordlige margin.

De marginale, interfingerende, finkornede flodsletteder og grovkornede alluvialviftekonglomerater udgør ialt 2 megacykler på hhv. 180 m og 190 m. Flodsletteder består af 10–30 cm tykke flomenheder, mens alluvialviftesedimenterne, i størrelsesordenen ~1 m tykke enheder, hovedsageligt er aflejret af subæriske og subakvatiske debrisstrømme. Aflejringsmiljøet er ud fra faciessammensætningen tolket som repræsenterende den ydre del af alluvialviften.

De opmålte aksiale sedimenter er segmenteret i megacykler med en gennemsnitlig tykkelse på 172,7



Figur 2. Plot af deformationsgrad fra de aksiale aflejringer. Numerisk inddeling fra 0–4. Se tekst for forklaring.

Plot of degree of deformation from the axial deposits. Numerical values from 0–4.

m. Megacyklerne er opad grovende og tydeligt asymmetriske med en tynd opad finende top. Den nederste, finkornede del af en megacykel er tolket som flodsletteaflejringer domineret af flomaflejringer (sheet-floods). Den øverste, grove del af megacyklerne er tolket som domineret af amalgamerede kanalaflejringer aflejret i et braiderende flodsystem.

Til analysen af mega- og subcyklisiteten er der målt variationer i 6 forskellige simple, sedimentære parametre: kornstørrelse (numerisk skala fra 1–6, hvor 1=mudder og 6=konglomerat), maksimal klaststørrelse (MKS, målt i cm som et gennemsnit af 10 største klaster inden for 1 m på hver side af log), bænkykkelse (cm), antal erosionsflader pr. 5 m, erosionsdybde (maks. relief af erosive flader målt i cm) samt synsedimentær deformationsgrad (numerisk skala på 0–5). I de marginale sedimenter er der dog kun målt kornstørrelse, bænkykkelse og deformationsgrad.

Kornstørrelse og MKS forventes at afspejle flodens transportkapacitet og dermed vandføring og strømhastighed (Harms et al. 1975). Erosionsdybden er et mål for, hvor stor graden af erosion har været til et givent tidspunkt og afhænger af bl.a. flodtypen, vandføring og flomintensitet samt baselevel. Bænkykkelsen og antallet af erosive grænser er en funktion af sedimentationshastigheden, sedimenttilførsel, men nok vigtigst af kanalernes migrationshastighed og dermed flodens grad af amalgamerings. Med stigende grad af erosivitet må det forventes, at den gennemsnitlige bænkykkelse falder. Deformationsgraden reflekterer synsedimentære vandundvigelsesprocesser og opfattes som afspejlende dels sedimentationshastighed (og dermed mængde porevand, der fanges i sedimentet i forbindelse med aflejring) og dels tektonisk aktivitet under og kort tid efter aflejring (Fielding & Johnson 1987).

Til at dekomponere den sammensatte cyklisitet anvendes spektralanalyse, der forudsætter, at de opmålte lagserier repræsenterer kontinuerte aflejringsserier. Endvidere skal data være diskrete og indsamlet med konstant afstand. Spektralanalysen er udført i PC-programmet MatLab 4.0 og beregnes v.h.a. *fast fourier transformationer* (FFT). Denne beregningsmetode kræver, at en given cykellængde gentages mindst 6–8 gange for at identifikation kan finde sted (Davis 1986, Weedon 1993). I datasættet fra de marginale aflejringer er det således kun muligt at identificere cyklisitet statistisk på en skala mindre end ~50 m. I datasættet fra de aksiale aflejringer er det derimod muligt at identificere cyklisitet statistisk på op til ~100 m tykkelse.

Resultater

Powerspektre for MKS, bænkykkelse, antal erosionsflader pr. 5 m og erosionsdybde i de aksiale aflejringer er meget lig powerspektret for kornstørrelsen, og

Tabel 1. Tykkelse af cykler for 6 sedimentære parametre. De cykler, der korrelerer mellem parametrene står over hinanden, og for disse er gennemsnittet samt forholdet mellem cyklerne udregnet. Se tekst for yderligere forklaring.
Thickness of cycles of 6 sedimentary parameters. The cycles that correlate between the parameters are grouped in columns and the mean and ratio between these cycles are calculated.

Kornstr.	172,67	40	30,04	17,64	13,04	~10,5	8,7	7,32	
MKS.	172,67		27,29	18,74	13,05	12	8,82	7,69	5,45
Scour	172,67		27,29	21,44		11,54	8,57	7,6	
Bænkytk.	(172,67)	48,49	28,9						
Erosion	172,67		29,75		14,87				
Deform.		60,06	37,52	25	15,79		8,11		4,35
Gennemsnit	172,67		28,65		13,65	11,35	8,70	7,58	
Forh.ml.gnmsn.	1:1		1:6		1:12,6	1:15,2	1:19,8	1:22,8	

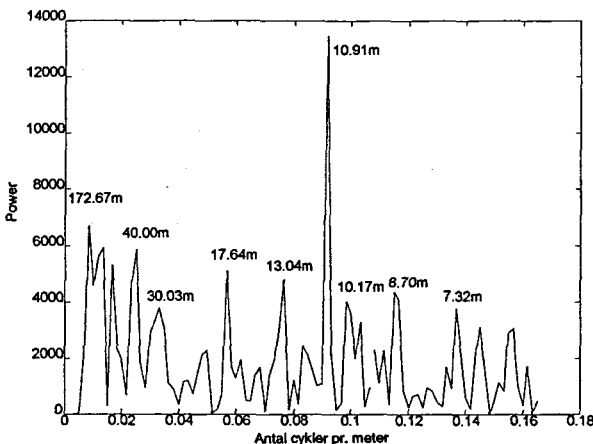
flere cykler går igen i de forskellige parametre, hvor de bedst korrelerbare er på gennemsnitligt 172,7 m og 28,7 m (Tabel 1). I kornstørrelsen ses tydeligt den markante megaskala cyklicitet på 172,7 m, der har en variabilitet på 7 m (4 %) (Fig. 1). Kornstørrelse, MKS og erosionsdybde har meget ens cykeltykkelser, og ved detaljeret analyse af de rå data er det muligt at korrelere cykler ned til ~10 m tykkelse. Bænkytkelse og antallet af erosive grænser kan ligeledes korreleres med de 3 øvrige parametre m.h.t. cyklerne på 172,7 m og 28,7 m. De rå data for de aksiale aflejringer viser tydeligt, at der ikke er korrelation mellem deformationsgraden og de øvrige parametre (kun kornstørrelsen er illustreret) (Fig. 1–2). Dette underbygges yderligere af, at der ikke er overensstemmelse mellem powerspektrene for kornstørrelse og deformationsgrad (Fig. 3–4).

Deformationsgraden er således den parameter, der

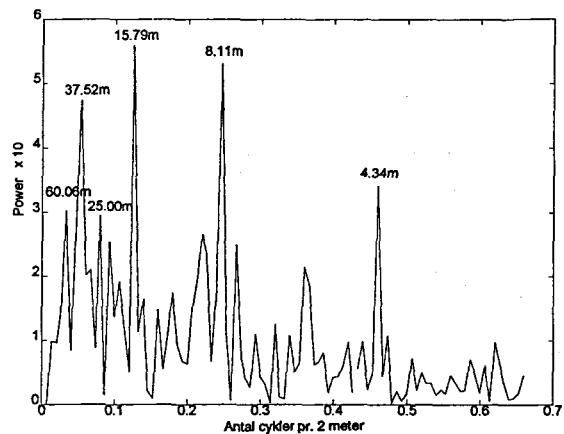
adskiller sig mest fra de øvrige. Dette er mest markant ved den manglende tilstedeværelse af megacyklicitet

Ved sammenligning af powerspektrene for hhv. kornstørrelse og bænkytkelse i de marginale aflejringer ses der et mønster, der kendetegner begge powerspektrene. Der ses en 3-delning af cyklerne fra 31,3–41,7 m i powerspektret for bænkytkelsen, der ligeledes kan genkendes i powerspektret for kornstørrelsen (her 31,3–42 m). Desuden ses en høj, tynd top omkring 24 m og 26–27 m i begge powerspektre. Ligheden mellem de to powerspektre sandsynliggør, at forholdene, der har styret sedimentationen har været ens for de to parametre.

Sedimentologisk er de tre opmålte megacykler i det aksiale system ensartede i tykkelse og faciesopbygning. Ved studier af luftbilleder er det endvidere verificeret, at megacykliciteten har lille variabilitet



Figur 3. Powerspektrum (signifikansniveau 90%) for kornstørrelse fra de aksiale aflejringer. De signifikante toppe er angivet. Se tekst for yderligere forklaring.
Power spectrum (level of significance = 90%) of grain size from the axial deposits. Significant peaks are indicated.



Figur 4. Powerspektrum (signifikansniveau 90 %) for deformationsgrad fra de aksiale aflejringer. De signifikante toppe er angivet. Se tekst for yderligere forklaring.
Power spectrum (level of significance = 90 %) of degree of deformation from the axial deposits. Significant peaks are indicated.

over betydelige vertikale (stratigrafiske) afstande. Den laterale variation i tykkelsen af megacyklerne er ligeledes lille (se Steel 1976).

På mindre skala er cyklisiteten også ganske invariabel, hvilket underbygges af spektralanalysen. Cyklisiteten på ~30 m kan også korreleres over større afstande i felten og på luftbilleder, men er ikke så markant som megacyklisiteten. Cyklisitet på mindre end ~20 m kan visse steder følges 1–2 km som fremroderede rygge.

Cyklernes genese

Ud fra de sedimentære cyklers karakteristika sluttes det, at klimatiske fluktuationer har været en overordnet faktor i genesen af cyklerne.

Megacyklernes og, mindre markant, subcyklernes konstante tykkelse både vertikalt og lateralt tyder på, at den styrende mekanisme for deres dannelse har varieret med tilsvarende konstant periodisitet, hvilket bedst kan forklares med klimatiske ændringer. Hvis sedimentationen hovedsageligt skulle have været styret af tektonisk påvirkning, måtte det forventes, at samme cykliske variationer skulle ses i deformationsgraden som i de øvrige sedimentære parametre, hvilket ikke er tilfældet. Det kan derfor sluttes, at de 5 førstnævnte parametre i større eller mindre grad har været styret af de samme genetiske processer, mens deformationsgraden har været styret af andre processer (tektonik).

At de mindste cykler ikke ses i samtlige sedimentære parametre kan tyde på, at disse ikke i samme grad har været styret direkte af klimaflyktuationer, men også var under påvirkning af autocykliske processer som lobeskift, kanalmigration og avulsion.

Regional udbredelse af sammensat cyklisitet i det vestnorske område (Steel 1976, Bryhni & Skjerlie 1975) kan være yderligere indikation på overordnet klimatisk styring af sedimentationen.

De to mest markante cykler i de aksiale aflejringer på 172,7 m og 28,7 m har et indbyrdes forhold på 1:6,0, mens forholdet mellem de markante cykler i de marginale aflejringer er på 1:5,4. Dette svarer omtrentligt til forholdet mellem eccentricitetssvingningen og precessionssvingningen i Devon, der ifølge Berger & Loutre (1994) havde varigheder på henholdsvis 100000 år og 18355 år. På lave breddegrader er det netop eccentricitetssvingningen og precessionssvingningen, der er dominerende (Fischer et al. 1990). Under antagelsen at en megacykel repræsenterer eccentricitetssvingningen på 100000 år, kan der estimeres en gennemsnitlig sedimentationsrate for det aksiale område på 1,7 m/1000 år. Da bassinet består af ~25 km sediment (Steel 1976) repræsenterer disse aflejringer således en akkumulationstid på ca. 15 mio. år.

Eccentricitetssvingningen er oftest meget markant på lave breddegrader, hvilket skyldes dennes lille va-

riabilitet (de Boer & Smith 1994). Precessionsperiodens større variabilitet (faktor 2) gør, at denne periode ikke har tilsvarende kraftig påvirkning på sedimentationen i et geologisk tidsperspektiv. Dette må siges at kunne observeres i Hornelen Bassinet, hvor megacyklisiteten er dominerende, både i felten og dermed i spektralanalysen.

Aflejringsmodel for Hornelen Bassinet

Med baggrund i et arbejde af Perlmutter & Matthews (1989) opstilles her en model, der beskriver de stratigrafiske ændringer i Hornelen Bassinet inden for en fuld Milankovitch-svingning. Klimaet i Hornelen Bassinet i Devon forventes at have varieret fra semi-aridt (klimatisk minimum) til humidt (klimatisk maksimum).

Pga. den hurtige indsykning i bassinet, og dermed relativ stigning i stratigrafisk baselevel, sker der en generel dannelse af akkumulationsplads, der antages at være forholdsvis konstant set i forhold til megacyklernes varighed. Ændringerne i facies inden for en sedimentær cykel forventes således hovedsageligt at afspejle skiftet mellem klimatisk minimum og klimatisk maksimum inden for en Milankovitchsvingning.

Klimatisk maksimum under tropisk/humidt klima: Høj afstrømning i floden med effektiv sedimenttransport. Bassinet domineres af lavenergi flodslette- og lakustrin sedimentation. Aflejringerne er overvejende af flomtype (sheetfloods) i de mest aksiale områder. Det aksiale flodsystem er relativt stabilt med få dybe kanaler, muligvis meanderende. Maksimal relativ stigning i stratigrafisk baselevel medførende maksimal dannelse af akkumulationsplads.

Overgangsfase mellem klimatisk minimum og klimatisk maksimum under tropisk, sub-humid klima: Mindre afstrømning medfører, at søernes og det aksiale flodsystems omfang mindskes. Floden antager et mere braiderende forløb. De marginale alluvialkegler udbygges som følge af øget sedimenttilførsel. Relativt fald i stratigrafisk baselevel medfører mindre dannelse af akkumulationsplads og dermed større omarbejdning af sedimentet. Finkornet sediment transporteres i større grad ud af systemet.

Klimatisk minimum under tropisk/semi-aridt klima: Afstrømningen i floden er minimal og den lille transportkapacitet medfører ophobning af sediment i kildeområdet og på bassinmarginer. Afstrømningen er ephemeral og domineret af monsunale flomafstrømninger. De marginale alluvialvifter har maksimal udbredelse. Maksimalt relativt fald i stratigrafisk baselevel medfører lille dannelse af akkumulationsplads og dermed maksimal grad af amalgamerer af sedimenterne.

Tak

Denne artikel er baseret på to specialearbejder udfærdiget i perioden 1993–1995. Vi ønsker først og fremmest at takke lektor Lars B. Clemmensen for kritisk gennemlæsning af specialerne, af manuskriptet til denne artikel samt for udbytterige diskussioner i forbindelse hermed. Endvidere takkes Professor Ron Steel og Kand. Scient. Atle Folkestad fra Universitetet i Bergen for udbytterige diskussioner omkring tolkningen af cyklisiteten i Hornelen Bassinet.

Referencer

- Berger, A. & Loutre, M. F. 1994: Astronomical forcing through geological time. *Spec. Publs Int. Ass. Sediment.* 19, 15–24.
- Bryhni, I. & Skjerlie, F. J. 1975: Syndepositional tectonism in the Kvamhesten district (Old Red Sandstone), Western Norway. *Geol. Mag.* 112 (6), 593–600.
- Davis, J. C. 1986: Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons, New York.
- De Boer, P. L. & Smith, D. G. 1994: Orbital forcing and cyclic sequences. *Spec. Publs Int. Ass. Sediment.* 19, 1–14.
- Due, P. H. 1983: Flood basin/shallow lacustrine sediments in Middle Devonian deposits, Hornelen Basin, Western Norway. 4th IAS Europ. Reg. Meet., Split, Abstr. Vol., 54–56.
- Fielding, C. R. & Johnson, G. A. L. 1987: Sedimentary structures associated with extensional fault movement from the Westphalian of NE-England. I Coward, M. P., Dewey, J. F. and Hancock, P. L. (eds.), *Continental Extensional Tectonics*. G.S.S.P. 28, 511–516.
- Fischer, A. G., Silva, I. P. & Boer, P. L. D. 1990: Cyclostratigraphy. In: R.N. Ginsburg and B. Beaudoin (eds.), *Cretaceous resources, Events and Rhythms*, 139–172.
- Harms, J. C., Southard, J. B., Spearing, D. R. & Walker, D. R. 1975: Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Short course* 2.161 pp.
- Olsen, H. 1987: Coarsening upward sequences - the products of laterally established river subsystems, M. Devonian, Hornelen Basin, Norway. *Bull. Geol. Soc. Denmark* 36, 203–219.
- Perlmutter, M. L. & Matthews, M. D. 1989: Global Cyclostratigraphy – A Model. In: *Quantitative Dynamic Stratigraphy* (ed. T.A. Cross), Prentice Hall, 233–260.
- Piper, J. D. A. 1985: Paleomagnetism in the Caledonian-Appalachian orogen: a review. I Gee, D. G. & Sturt, B. A. (ed.), 1985. *The Caledonian orogen-Scandinavia and related areas*, 35–55.
- Pollard, J. E., Steel, R. J. & Undesrud, E. 1982: Facies sequences and trace fossils i lacustrine/fan delta deposits, Hornelen Basin (M. Devonian), Western Norway. *Sedimentary Geology* 32, 63–87.
- Steel, R. J., 1976: Devonian basins of western Norway – sedimentary response to tectonism and to varying tectonic context. *Tectonophysics* 36, 207–224.
- Steel, R. J., 1988: Coarsening-upward and skewed fan bodies: symptoms of strike-slip and transfer fault movement in sedimentary basins. I Nemeč, W. & Steel R. J. (eds.): *Fan Deltas, Sedimentology and Tectonic Settings*. Blackie and Son.
- Steel, R. J., Siedlecka, A., & Roberts, D. 1985: The Old Red Sandstone basins of Norway and their deformation: a review. I Gee, D. G. & Sturt, B. A. (eds.), 1985. *The Caledonian orogen-Scandinavia and related areas*, 293–317.
- Weedon, G. P., 1993: The recognition and stratigraphic implications of orbital-forcing of climate and sedimentary cycles. I Wright, W. P., *Sed. Review/1*. Blackwell Scient. Publ., Oxford.