

# Tertiær hævnning og erosion i Skagerrak, Nordjylland og Kattegat

LARS N. JENSEN & OLAF MICHELSEN



Jensen, L. N. & Michelsen, O.: Tertiær hævnning og erosion i Skagerrak, Nordjylland og Kattegat. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1990-91*, side 159-168, København, 18. november 1992

Base of the Quaternary is a major erosional unconformity in the Skagerrak, northern Jylland and the Kattegat. On regional seismic profiles Mesozoic and Paleozoic strata are seen to subcrop the Base Quaternary reflector towards the Fennoscandian basement in southern Norway and Sweden. The Sorgenfrei-Tornquist Zone bisect the area, and in this zone the Late Cretaceous to Early Tertiary inversion increases in magnitude from the Farsund Basin across northern Jylland and Kattegat towards Skåne. Based on vitrinite reflectance trends and shale compaction (using sonic and density logs) from a number of wells, we calculated the magnitude of regional uplift. This uplift increases from 800-1000 m south of the inverted zone to 1200-1500 m north of the zone, and comprise the Neogene uplift of the area. This regional Neogene uplift is superimposed on the uplift caused by the Late Cretaceous to Early Tertiary inversion in the Sorgenfrei-Tornquist Zone. This explains why all wells from the inverted zone show an uplift of 1500-2000 m. In a regional iso-uplift map we have tried to separate the two components of uplift.

Lars N. Jensen, Statoil als, postboks 300, N-4001 Stavanger, Norge. Olaf Michelsen, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, 8000 Århus C. 21. november 1991.

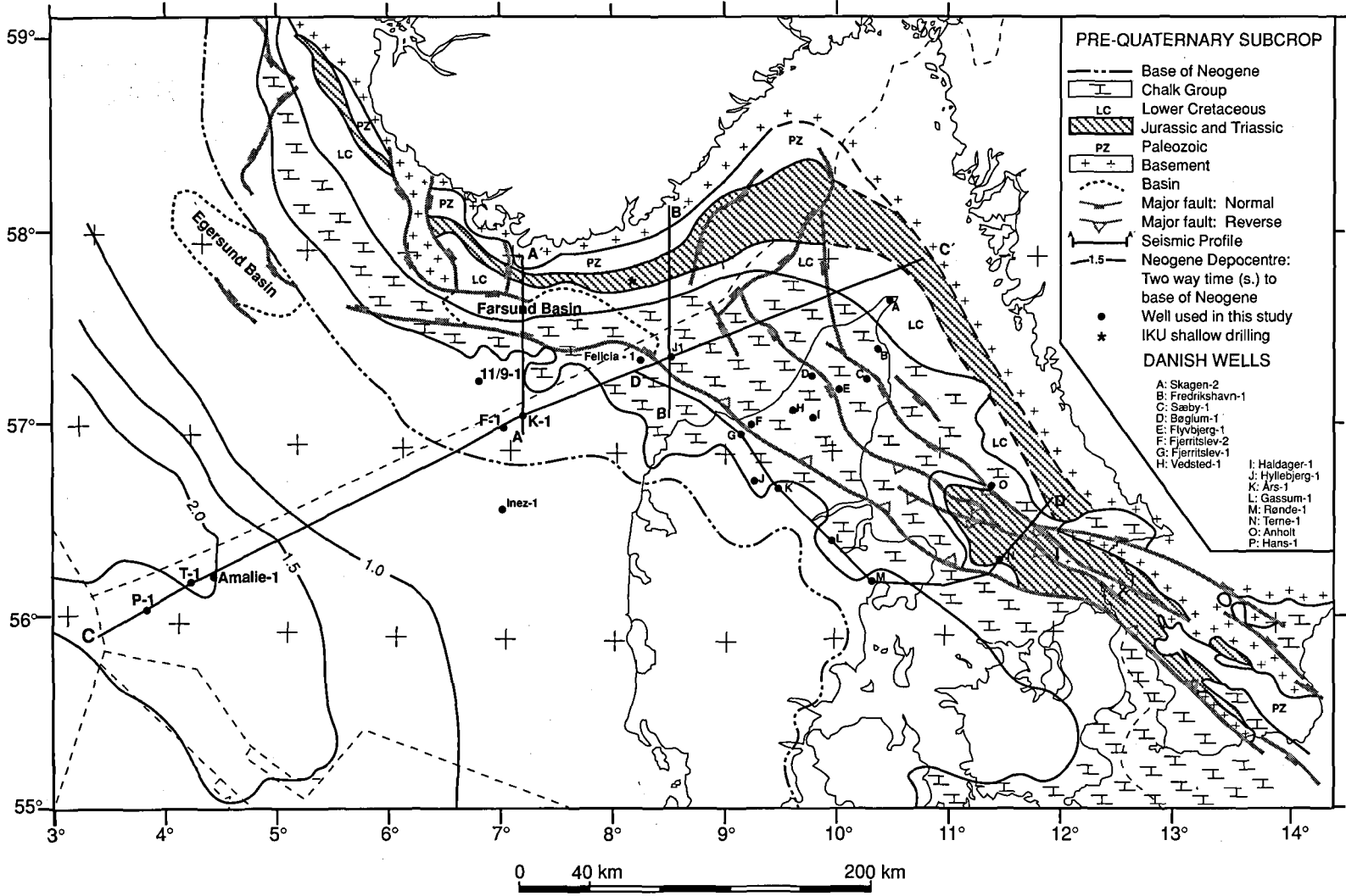
## Indledning

En række ældre geomorfologiske studier af de norske fjelde antyder, at deres nuværende topografi skyldes en Neogen hævnning (Holtedal 1960, Gjessing 1967). Dette resultat er bemærkelsesværdigt, fordi man på den tid havde ringe eller ingen kendskab til geologien langs den norske kyst. En række nyere studier har siden bekræftet, at en betydelig Neogen hævnning på 1-2 km har påvirket Svalbard (Manum & Thronsen 1977), hele Barentshavet (Nyland et al. in press) og de kystnære dele af den norske sokkel fra Finnmark til Skagerrak (Eidvin & Riis 1989, 1991, Riis & Fjeldskaar in press, Stuevold 1989, Rundberg 1989, Strømnes 1991, Doré in press, Jensen & Schmidt in press). At størstedelen af hævnningen er Neogen er bekræftet ved sekvensanalyse, datering af erosionsprodukterne og apatit fissionsspor studier i de hævdede områder. Erosionsprodukterne fra denne hævnning er afsat som 2-4 km tykke Neogene sekvenser i den centrale del af Nordsøen, Viking Graben og langs kontinentalranden fra Møre til Svalbard.

I dette studium vil vi påvise, at den sen tertiære landhævning og erosion fortsætter ind i den øst-

lige del af Skagerrak, Nordjylland og Kattegat. Vi vil desuden forsøge at adskille den regionale Neogene hævnning fra inversionen langs Sorgenfrei-Tornquist Zonen.

Det fremgår tydeligt af regionale seismiske profiler, at basis af Kvartæret i Skagerrak, Nordjylland og Kattegat er en erosions inkonformitet (fig. 1, 2, 5, 6). Her ses, hvordan palæogene, mesozoiske og palæozoiske lag eroderes ind imod den norske og svenske kyst (fig. 2, 5, 6). Dette ses også tydeligt på kort over præ-kvartæret, som f.eks. det geologiske kort over Danmark og fortsættelsen af dette kort i Kattegat og Skagerrak (fig. 1). På dette kort ses, hvordan de præ-kvartære lag ligger umiddelbart under Kvartæret i et kystparallelt mønster langs den norske og svenske kyst, og hvordan successivt ældre lag trunckeres ind imod grundfjeldet. Allerede Forchhammer (1835) påviste dette mønster og antydede, at det hang sammen med en hævnning af Skandinavien. Siden da har kun få beskæftiget sig med betydningen af inkonformiteten langs basis af Kvartæret, og først for nylig har man forsøgt at kvantificere størrelsen på hævnningen (Jensen & Schmidt in press, Michelsen & Nielsen in press, Japsen dette hæfte).



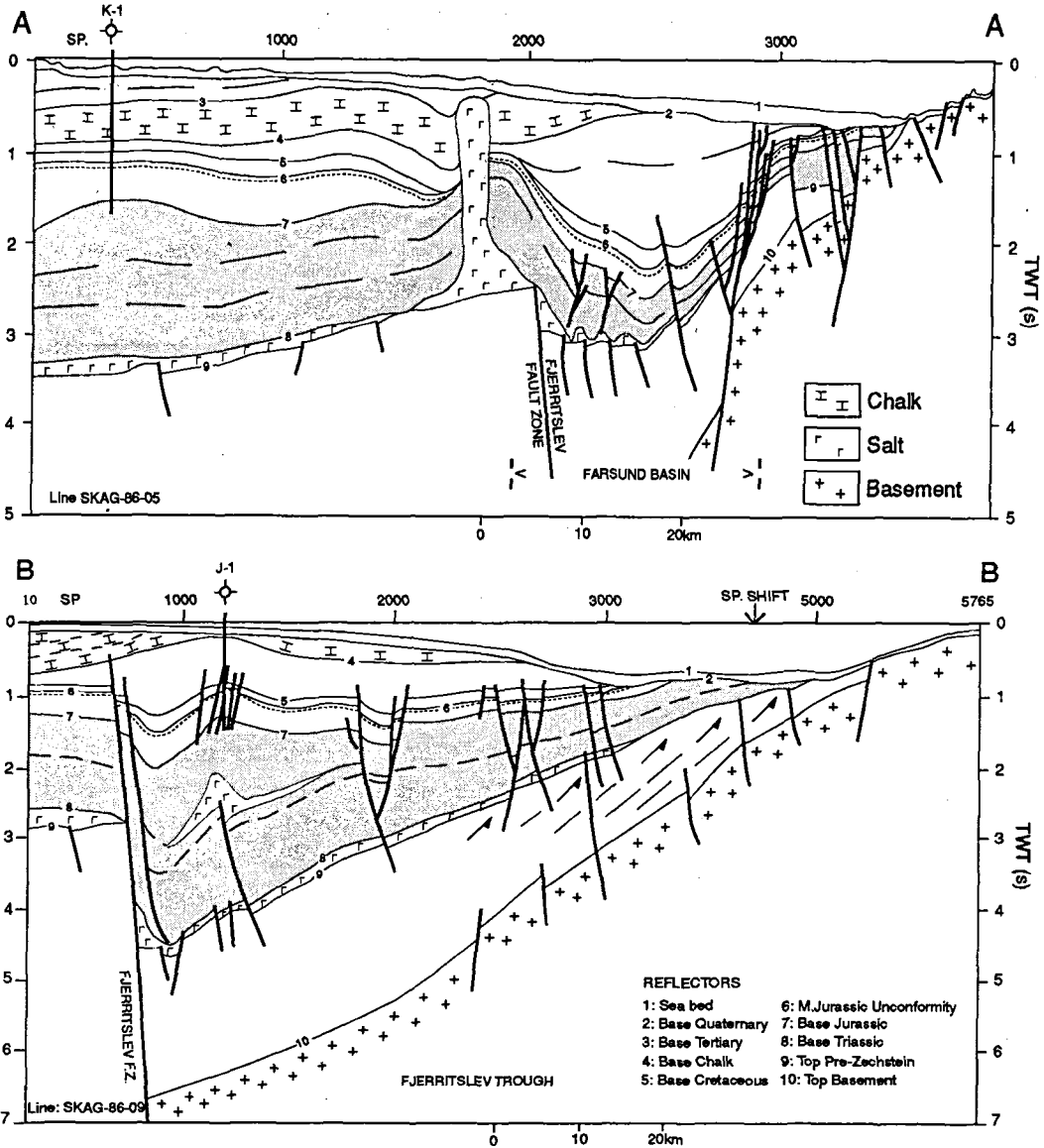


Fig. 2. Tolkede regionale seismiske profiler fra Skagerrak. Deres placering er vist på fig. 1.

Interpreted regional seismic profiles from the Skagerrak area. Their locations are shown in fig. 1.

### Metoder

En lang række metoder kan anvendes til at kvantificere størrelsen af en hævnning (tabel 1), og

Statoil har systematisk testet de fleste af disse (Skagen in press). Erfaringer fra Barentshavet (Nyland et al. in press) og Nordsøen (Strømnes 1991 Jensen & Schmidt in press) viser, at skifer-

Fig. 1. Oversigtskort som viser seismiske profiler og boreriger anvendt i dette studium. Kortet viser også den præ-kvartære geologi og området af det neogene depocenter i Central Trugtet. De vigtigste forkastninger langs Sorgenfrei-Tornquist Zonen er vist.

Map of the seismic profiles and wells used in this study. The map also show the pre-Quaternary geology of the study area, and the location of the Neogene depocentre in the central North Sea. The major faults along the Sorgenfrei-Tornquist Zone are shown.

Tabel 1: Metoder som kan bruges til at estimere hævning og erosion.

Methods that can be used to estimate uplift and erosion.

- \*Subcrop kort (Subcrop maps).
- \*Extrapolation baseret på seismiske profiler (Extrapolation from seismic profiles).
- \*Skiferkompaktions metoder vha. sonic eller density logs (Shale compaction methods using sonic or density logs).
- \*Vitrinitreflektans trends (Vitrinite reflectance trends).
- \*Lermineral diagenese (Clay mineral diagenesis).
- \*Sandstens porøsitet og diagenese (Sandstone porosity and diagenesis).
- \*Analyse af seismiske hastigheder (Seismic velocity analysis).
- \*Modellering af fissionsspor (Fission track modelling).
- \*Volumenberegninger og massebalance af erosion og afsætning (Volume calculations and mass balance of erosion and deposition).
- \*Organisk geokemi (Organic geochemistry).
- \*Boreparametre (Drilling parameters).
- \*PVT-modellering af kulbrinte forekomster (PVT-modelling of hydrocarbon accumulations).
- \*Analyser af væskeindeslutninger (Fluid inclusion analysis).
- \*Faseovergangene opal A – opal CT – kvarts (opal A – opal CT – quartz transformations).

kompaktions metoden og vitrinitreflektans målinger giver de bedste resultater. Apatit fissionsspor metoden (Green 1989) er til gengæld den eneste metode, som direkte kan sige noget om alderen på hævningen.

Skiferkompaktions metoden (Magara 1976, Sclater & Christie 1980) bygger på den irreversible kompaktion af skifer med øget dybde. Ved normalt hydrostatisk tryk kan metoden bruges på den mekaniske kompaktion af skifer indtil den dybde (ca. 3000 m), hvor diagenetiske processer begynder at dominere. Under en hævning vil skiferen beholde den porøsitet, som den fik ved den maximale sedimentære overdækning. Både sonic og density logs kan bruges til at måle kompaktionen i en boring, men for at finde størrelsen på hævningen må der etableres en referencekurve for sonic hastighed/densitet med dybden. En sådan kurve må etableres i et område, hvor skifer er kompakteret under normalt tryk, og hvor der ikke er sket hævning. I dette studium benyttes Magaras (1976) formel for sonic hastigheder versus porøsitet kombineret med Sclater & Christie's (1980) formler for porøsitet versus dybde (fig. 3). Til sammenligning er der i figur 3 også vist hastigheds/dybde relationerne fra Strømnes (1991) og Japsen (dette hæfte). Ved at sammenligne dybde og sonic-hastighed i en given boring med referencekurven, kan størrelsen af hævingen beregnes (fig. 3). Man kan enten bruge kompak-

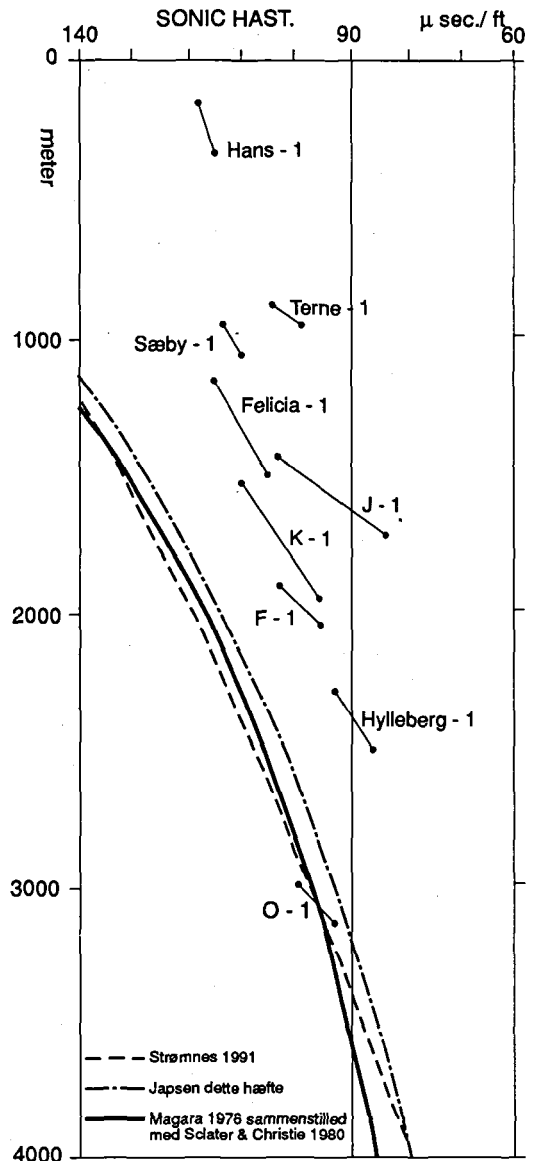


Fig. 3. Skiferkompaktion i en række udvalgte borer, vist som sonic-hastighed versus dybde. Sonic-hastigheden for de nederste to enheder i Fjerritslev Formationen er her sammenlignet med Magaras (1976) og Sclater & Christies (1980) kompaktionskurve for skifer. Til sammenligning er kompaktionskurverne fra Strømnes (1991) og Japsen (dette hæfte) også vist.

Shale compaction of selected wells from the study area shown as sonic velocity vs. depth. The sonic velocity of the lower two members of the Fjerritslev Formation is compared with the shale compaction trend from Magara (1976) and Sclater & Christie (1980). The shale compaction trends from Strømnes (1991) and Japsen (this volume) are shown for comparison.

tionsværdier fra alle rene skifer i en boring (Nyland et al. in press, Strømnes 1991, Skagen in press), eller man kan benytte kompaktionsvær-

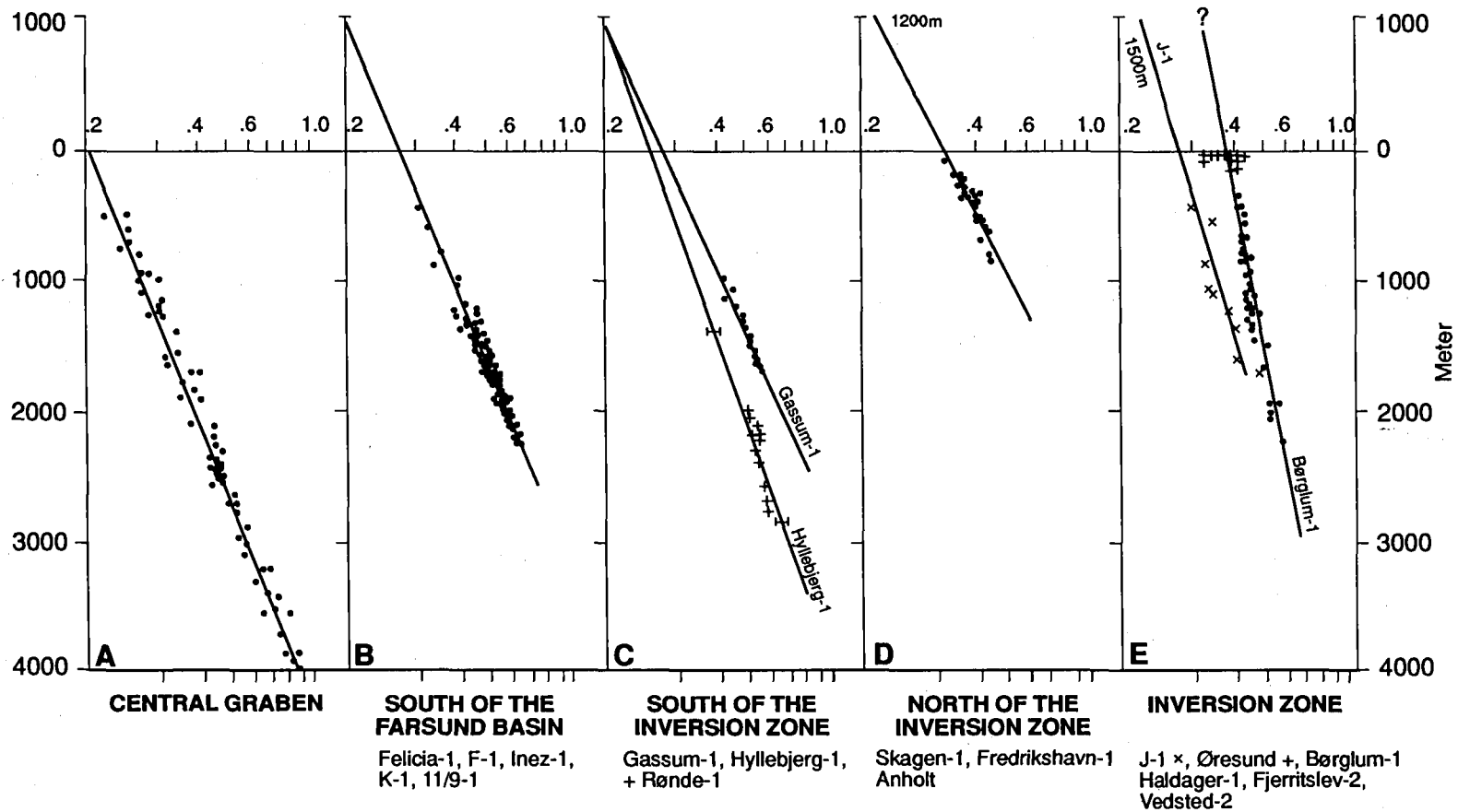
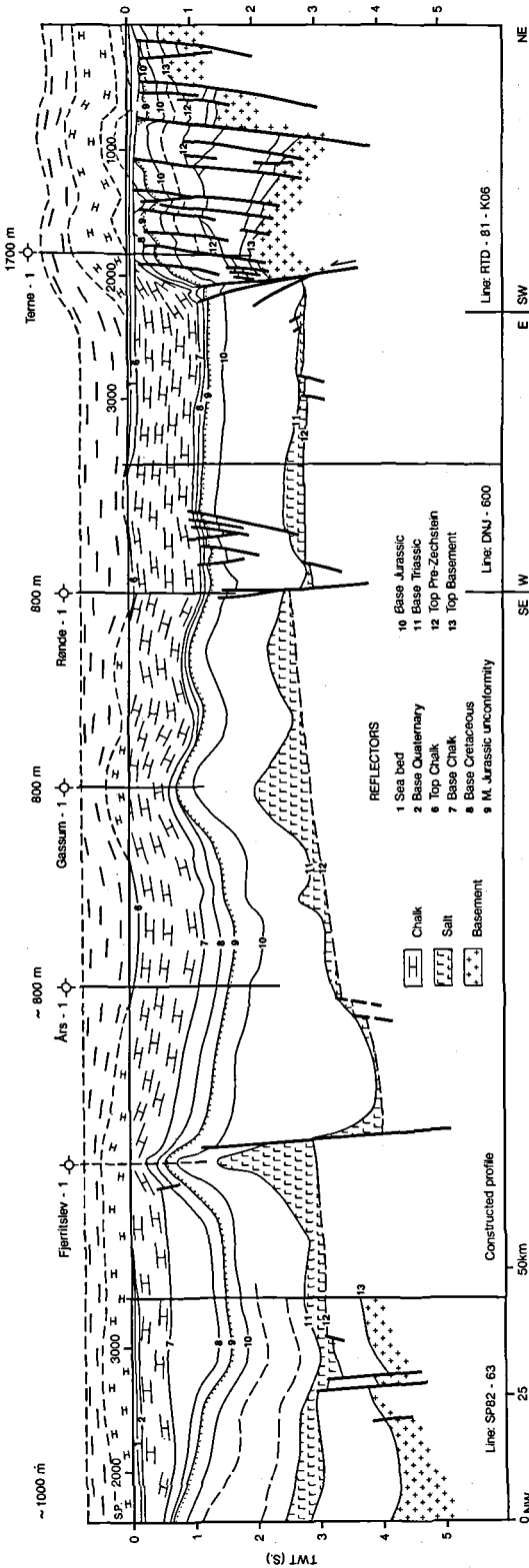


Fig. 4. Vitrinitreflektans målinger grupperet efter geografisk placering og størrelsen på hævnningen. A) The Central Graben area. B) The area south of the Farsund Basin. C) Wells located south of the inversion in the Sorgenfrei-Tornquist Zone. D) The area north of the inversion zone. E) The inversion zone.

Vitrinite reflectance trends grouped according to their geographical position and the magnitude of uplift. A) The Central Graben area. B) The area south of the inversion in the Sorgenfrei Tornquist-Zone. D) Wells located north of the inversion zone. E) The inversion zone.



A regional profile across central Jylland and the Kattegat. Along the top of the profile we have reconstructed the strata removed by the Neogene erosion. Location of the profile is shown in fig. 1 and 7.

Fig. 5. Et regionalt profil gennem det centrale Jylland og Kattegat. Langs toppen af profillet har vi forsøgt at rekonstruere de lag, som blev fjernet under den neogene erosion. Profillets placering er vist på fig. 1 og 7.

dier fra stratigrafiske horisonter med stor regional udbredelse og homogenitet (Michelsen & Nielsen in press, Japsen dette hæfte). I dette studium er sonic hastigheden af de rene skifre i de to nederste led af Fjerritslev Formationen benyttet (fig. 3). Dette giver et ensartet lithologisk grundlag for sammenligning.

Vitrinitreflektans metoden bygger på den irreversible øgning af vitriniters reflektans med voksende sedimentær overdækning (Schmidt 1989). Når et område hæves, vil en vitrinitreflektans erhvervet under den maximale sedimentære overdækning således ikke forandres. Ved overfladen har vitrinit en reflektans ( $\%R_0$ ) på  $0.2 \pm 0.02$  og denne øges (logaritmisk) med stigende temperatur. Ved at plote vitrinitreflektans mod dybden på semilogaritmisk papir får man således et lineært mønster. I et område uden hævnning vil en trendlinie tilpasset dette lineære mønster skære overfladen (0 m) ved en reflektans på 0.2 (fig. 4A). Har et område derimod været udsat for hævnning, vil trendlinien skære  $\%R_0=0.2$  over den nuværende overflade (fig. 4B-E). Forskellen mellem dette skæringspunkt og den nuværende overflade (0 m) er et direkte mål for områdets hævnning.

Begge de ovennævnte metoder angiver forskellen imellem den maximale sedimentære overdækning af et punkt i en boring og den nuværende dybde til dette punkt. Denne forskel kaldes nettohævnning (Jensen & Schmidt in press), og den udgør normalt et minimumsestimater for erosionen (fig. 5).

## Resultater

Vore beregninger over størrelsen af hævnningen i Skagerrak, Nordjylland og Kattegat fremgår af figur 3 og 4. Her ses, at hævnningen lige syd for Sorgenfrei-Tornquist Zonen er 800-1000 m, og lige nord for zonen er den ca. 1200 m. Nord for inversionen i Farsund Bassinet viser IKU's (Institutt for Kontinentalsokkel Undersøkelser, Trondheim) korte boringer (fig. 1 og 7) en hævnning på ca. 1500 m. Dette udgør den regionale tertiære hævnning, som i det undersøgte område startede i Oligocæn og for alvor tog fart i Neogen. Det regionale seismiske profil gennem området (fig. 6) viser disse progradierende oligocæne sekvenser, og det neogene depocenter centralt i

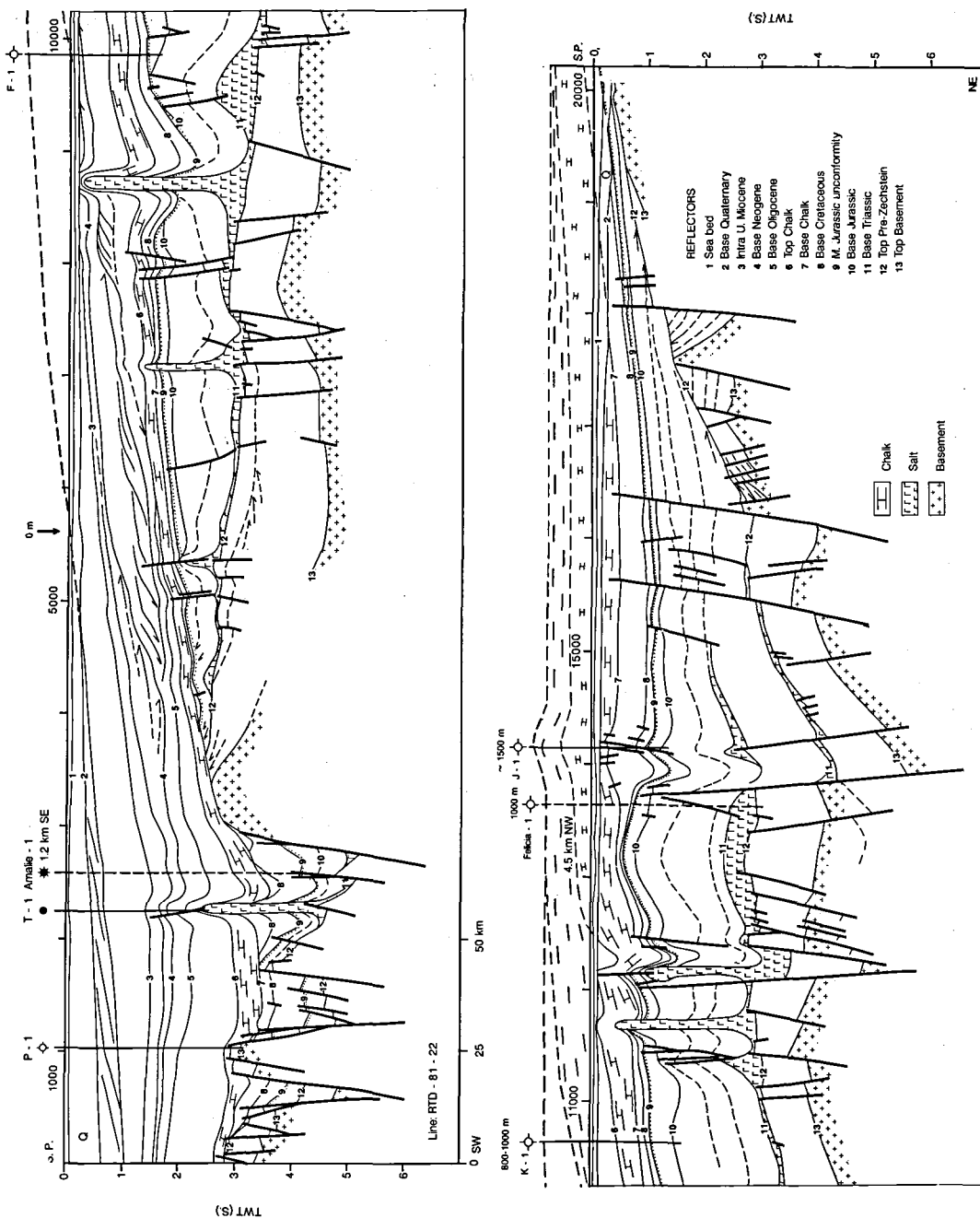


Fig. 6. Et regionalt seismisk profil fra den Fennoscandiske Randzone til Central Truget. Langs toppen af profilet er de lag som blev fjernet under den neogene erosion fosøgt rekonstrueret. Profilets placering er vist på fig. 1 og 7.

A regional seismic profile from the Fennoscandian Border Zone to the Central Graben. Along the top of the profile we have reconstructed the strata removed by the Neogene erosion. Location of the profile is shown in figs. 1 and 7.

Nordsøen. Flere detaljer om dateringen af den regionale hævnning gives af Jensen & Schmidt (in press).

I den østlige del af Kattegat og på Sjælland er

der kun få punkter til beregning af den regionale neogene hævnning. I det nævnte område er isohævnings konturene (fig. 7) baseret på vitrinitreflektans målinger fra Anholt boringen (B.

Schmidt pers. meddel.), Lavø-1 boringen (Thomson 1980) og beregninger over hævnningen i Stenlille borerne (Japsen dette hæfte).

En inversion af Sen Kridt – Tidlig Tertiær alder har påvirket hele Sorgenfrei-Tornquist Zonen fra Egersund Bassinet til Polen (Pegrum 1984). Inversionen er svag i Egersund Bassinet (Pegrum 1984), men øger i styrke i Farsund Bassinet (fig. 2 og 7) og er ganske betydelig i Nordjylland og Kattogat (Liboriussen et al. 1987). Det er denne inversion, der bevirker, at borerne i Sorgenfrei-Tornquist Zonen viser en hævnning på 1500–2000 m (fig. 3, fig. 4E).

Det er vanskeligt at kvantificere inversionen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen, fordi erosionen i Neogen har fjernet de ældre tertiære aflejringer og det meste af Kalken. Vi har dog forsøgt at bruge topografien af basis af Øvre Kridt som et mål for inversionen. I Farsund Bassinet og det centrale Skagerrak er interne Statoil kort benyttet; i Nordjylland og det vestlige Kattogat er DGU's kort (Japsen og Langtofte 1991) brugt. Vor kvantificering af inversionen fremgår af figur 7.

## Diskussion

En betydelig tertiær hævnning på 1–2 km har påvirket det vestlige Skandinavien fra Kattogat og langs den norske kyst til Barentshavet og Svalbard (Jensen & Schmidt in press Strømnes 1991, Doré in press, Rundberg 1989, Stuevold 1989, Nyland et al. in press, Manum & Throndsen 1977). Baseret på dateringer af erosionsprodukterne afsat i Central Truget (CENOS 1991), Viking Graben (Rundberg 1989) og langs shelfranden fra Møre (62°N) til Svalbard (Eidvin & Riis 1989, 1991), er der nu generel enighed om, at størstedelen af erosionen skete i Neogen og Kvartær. I hele Skandinavien øgedes erosionshastigheden specielt efter dannelsen af en regional inkonformitet af Midt til Sen Miocæn alder (Jensen & Schmidt in press, Eidvin & Riis 1989, 1991). I det undersøgte område startede hævnningen dog i Oligocæn, hvor tykke sandede se-

kvenser viser progradering mod sydvest i den vestlige del af det Norsk-Danske Bassin (fig. 6).

Størrelsen på disse neogene bevægelser er betydelig. Amplituden målt fra toppen af de norske fjelde til bunden af Neogenet i depocentrene i Central Truget og Viking Graven er ca. 4000 m (Doré in press, Jensen & Schmidt in press), og disse bevægelser har dannet en stor monoklinal næsten uden forkastningsaktivitet (fig. 2 og 6).

Hele det nordatlantiske område er påvirket af lignende tertiære hævnninger. Det gælder Østgrønland (Larsen 1984), England (Green 1989), Skotland (Lewis 1990) og Nord Irland (Parnell 1991). Den tertiære hævnning har derfor både påvirket kontinentalranden langs begge sider af Nordatlanten og de intrakratone bassiner i Nordsoen og Barentshavet. De mulige årsager til denne hævnning diskuteres af Doré (in press), Riis & Fjeldskaar (in press), Sales (in press) og Jensen & Schmidt (in press).

En landhævning, af den størrelsesorden der her er påvist, vil påvirke områdets potentiale for kulbrinteudvinding. I studieområdet vil en jurassisk kildebjergart således være mere moden end forventet ud fra den dybde og den temperatur, hvor den befinder sig i dag (fig. 4). Dette har en positiv indvirkning på kulbrintepotentialet i Farsund Bassinet (Jensen & Schmidt in press), og den dybeste del af det Norsk-Danske Bassin i Nordjylland.

## Konklusion

En Sen Kridt – Tidlig Tertiær Inversion på 0–1000 m har påvirket Sorgenfrei-Tornquist Zonen fra Farsund Bassinet til Skåne (fig. 7). Langs vestranden af det Fennoscandiske Skjold fra Stavanger til Kattogat eksisterede samtidig et sent kridt og palæogent depocenter udenfor de inverterede områder. Rester af dette depocenter er stedvist bevaret (fig. 2, 5, 6).

Derefter fulgte den regionale neogene hævnning og erosion af hele det vestlige Skandinavien fra Nordjylland til Svalbard. Hængsel-linjen for denne hævnning følger østranden af Viking Gra-

Fig. 7. Kortet viser størrelsen af den regionale neogene hævnning og inversionen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Det neogene depocenter i Central Truget er også vist.

A map of iso-uplift contours for the regional Neogene uplift and the inversion in the Sorgenfrei-Tornquist Zone. The Neogene depocentre in the central North Sea is also shown.





ven og Central Truget (fig. 6 og 7). Derfra øger hævnningen til 1200–1500 m nær den norske og svenske kyst (fig. 7). Det bemærkes, at iso-hævnings konturerne for de neogene bevægelser (fig. 7) løber parallelt med den sydnorske og svenske kyst.

I figur 7 er det forsøgt at adskille iso-hævnings konturerne fra den neogene erosion og inversionen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen, således at hævningsværdierne fra de enkelte borer passer med summen af disse værdier. I figur 5 og 6 har vi på de regionale seismiske profiler forsøgt at rekonstruere tykkelsen og stratigrafien af de lag, som forsvandt ved den neogene erosion.

## Tak

Vi takker kolleger ved Statoil Norge og Aarhus Universitet for hjælp og diskussioner i forbindelse med dette arbejde. Vi takker også Statoil for tilladelse til at publicere dele af dette studium. En særlig tak til Holger Lykke-Andersen, Liv Stuevold og Peter Japsen for deres hjælp med oplysninger og kort.

## Litteratur

- CENOS 1991: Cenozoic North Sea Study. *Preliminary report of the CENOS project*. Aarhus University, November 1991.
- Doré, A. G. in press: The Base Tertiary surface of southern Norway and the northern North Sea. In Jensen, L. N. & Riis, F. (ed.): *Post-Cretaceous uplift and sedimentation along the western Fennoscandian Shield*. *Norsk Geologisk Tidsskrift*.
- Eidvin, T. & Riis, F. 1989: Nye dateringer av de tre vestligste borehullene i Barentshavet. Resultater og konsekvenser for den Tertiære hevingen. *NPD-Contribution No. 27*, 44 p.
- Eidvin, T. & Riis, F. 1991: En biostratigrafisk analyse av Tertiære sedimenter på kontinentalmarginen av Midt-Norge, med hovedvekt på øvre Pliocene vitfavsetninger. *NPD-Contribution No. 29*, 44 p.
- Forchhammer, G. 1835: *Danmarks geognostiske forhold*. Jens Hostrup Schulz, København, 112 p.
- Gjessing, J. 1967: Norway's Paleic Surface. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 21, 69–132.
- Green, P. F. 1989: Thermal and tectonic history of the East Midlands shelf (onshore UK) and surrounding regions assessed by apatite fission track analysis. *J. Geol. Soc. London*, 146, 755–773.
- Holtedal, O. 1960: *Geology of Norway*. NGU No. 208, 540 p.
- Japsen P. 1992: Landhævnninger i Sen Kridt og Tertiær i det nordlige Danmark. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1990–91*, 169–182.
- Japsen, P. & Langtofte, C. 1991: Geologisk kort over Danmark, 1:400000. *DGU Kortserie Nr. 29*.
- Jensen, L. N. & Schmidt, B. J. in press: Neogene uplift and erosion in the northeastern North Sea; magnitude and consequences for hydrocarbon exploration in the Farsund Basin. In Spencer et al. (ed.): *Proceedings from the 3rd E.A.P.G. Conference*, Florence 1991.
- Larsen, H. C. 1984: Geology of the East Greenland Shelf. In Spencer, A. M. et al. (ed.): *Petroleum Geology of the North European Margin*. Graham & Trotman, London, 329–339.
- Lewis, C. L. E. 1990: The role of apatite fission track analysis in hydrocarbon exploration. *Abstract in: Petroleum Geology and Geophysics Research in Academia. Geological Society of London*, October 1990, 2.
- Liboriussen, J., Ashton, P. & Tygesen, T. 1987: The tectonic evolution of the Fennoscandian Border Zone in Denmark. *Tectonophysics* 137, 21–25.
- Magara, K. 1976: Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada Basin. *AAFG Bull.*, 60, 554–565.
- Manum, S. B. & Thronsen, T. 1977: Rank of coal and dispersed organic matter and its geological bearing in the Spitsbergen Tertiary. *Norsk Folarinstitutt Årbok 1977*, 159–177.
- Michelsen, O. & Nielsen, L. H. in press: Structural development of the Fennoscandian Border Zone, offshore Denmark. *Marine and Petroleum Geology*.
- Nyland, B., Jensen, L. N., Skagen, J., Skarpnes, O. and Voren, T. in press: Tertiary uplift and erosion in the Barents Sea; magnitude timing and consequences. In Larsen, R. M. et al. (ed.): *Structural and tectonic Modelling and its Application to Petroleum Geology*, Elsevier.
- Parnell, J. 1991: Hydrocarbon potential of Northern Ireland: Part 1. Burial histories and source-rock potential. *J. Petrol. Geol.*, 14, 65–78.
- Pegrum, R. M. 1984: The extension of the Tornquist Zone in Norwegian North Sea. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 64, 39–68.
- Riis, F. & Fjeldskaar, W. in press: On the magnitude of Late Tertiary and Quaternary erosion and its significance for the uplift of Scandinavia and the Barents Sea. In Larsen, R. M. et al. (ed.): *Structural and Tectonic Modelling and its Application to Petroleum Geology*. Elsevier.
- Rundberg, Y. 1989: *Tertiary sedimentary history and basin evolution of the Norwegian North Sea between 60°–62°N; an integrated approach*. Dr. Ing. Thesis, NTH Trondheim, 292 pp.
- Sales, J. K. in press: Uplift and subsidence of northwestern Europe: Causes and influence on hydrocarbon entrapment. In Jensen, L. N. & Riis, F. (ed.): *Post Cretaceous uplift and sedimentation along the western Fennoscandian Shields*. *Norsk Geologisk Tidsskrift*.
- Schmidt, B. J. 1989: *Maturity and Source Rock Evaluation of the Mesozoic Sequence in some Danish off-shore Wells outside the Central Trough*. PhD Thesis, Aarhus University, 429 p.
- Sclater, J. G. & Christie, P. A. F. 1980: Continental stretching: an explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin. *J. Geophys. Res.*, 85, No. B7, 3711–3739.
- Skagen, J. in press: Methodology applied on uplift and erosion. In Jensen, L. N. & Riis, F. (ed.): *Post-Cretaceous uplift and sedimentation along the western Fennoscandian Shield*. *Norsk Geologisk Tidsskrift*.
- Strømnes, E. 1991: *Kvantifisering av tertiær oppløst og erosion i en travers over Egersundbassenget*. Diplomoppgave, NTH Trondheim, March 1991, 72 pp.
- Stuevold, L. M. 1989: *Den tertiære fennoskandiske, landhevin i lys av vertikalbevegelser på midnorsk kontinentalmargin*. Cand. Scient. oppgave, Oslo Universitet, 160 pp.
- Thomsen, E. 1980: *Rank of coal and dispersed organic matter in Rhaetian-Jurassic-Lower Cretaceous deposits from the on-shore part of the Danish Subbasin: Interpretation and implications for the maturity of potential hydrocarbon source rocks*. PhD. Thesis, Aarhus University.