

Landhævningerne i Sen Kridt og Tertiær i det nordlige Danmark

PETER JAPSEN



Japsen, P.: Landhævningerne i Sen Kridt og Tertiær i det nordlige Danmark. *Dansk geol. Foren., Årskrift for 1990-91*, side 169-182, København, 18. november 1992.

The apparent uplift of the two lower members of the Lower Jurassic Fjerritslev Formation is calculated for 30 wells in northern Denmark, based on measurements of the interval velocity of the two layers. The lateral variation of the apparent uplift is interpreted to be caused by three types of uplift:

Broad-scaled Neogene uplift of the entire area, inversion of the Sorgenfrei-Tornquist Zone during Late Cretaceous to Paleogene and salt movements after the Early Cretaceous.

The Neogene uplift is by extrapolation found to be zero over the Ringkøbing-Fyn High, off western Jylland, and increases northwards and eastwards to reach 1000 m in northernmost Jylland and an estimated value of 1000 m at Stevns Klint. The pre-Quaternary surface in northern and eastern Denmark is interpreted as an erosional surface, created by Neogene uplift and subsequent subaerial and glacial erosion.

In the Sorgenfrei-Tornquist Zone the total uplift is found to vary from 1300 to 1700 m. The uplift related to the Late Cretaceous-Paleogene uplift is estimated to about 750 m.

The Late Cretaceous-Danian Chalk Group and the Tertiary sequence is thus believed to have been deposited far beyond their present extension. Furthermore consequences of Neogene uplift for the source rock potential of the area are discussed.

Peter Japsen, Danmarks Geologiske Undersøgelse, Thoravej 8, DK-2400 København NV, 25. oktober 1991.

Indledning

Den nordlige del af Danmark har haft en kompleks strukturel udvikling på grund af tektoniske bevægelser i stor skala og på grund af saltbevægelser. I det følgende vil det blive prøvet at kvantificere den hævningsområdet har været udsat for, ud fra kompaktionen af nedre jurassiske lersten, bestemt ved målinger af lydastigheden i sedimenterne.

EUGENO-S Working Group (1988) inddeler det nordlige Danmark i følgende strukturelle enheder (fig. 1a):

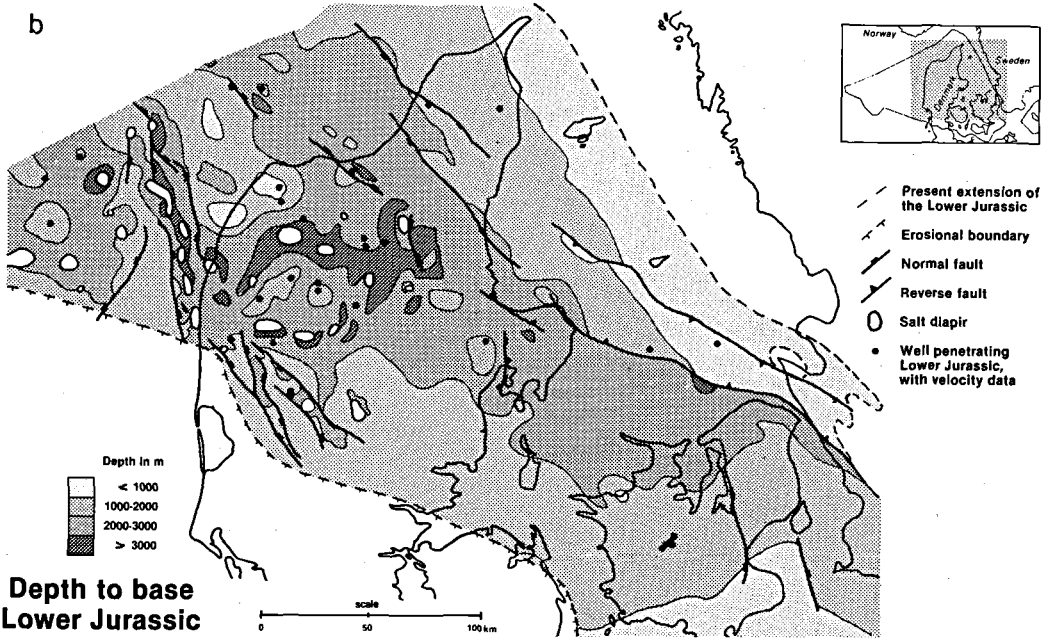
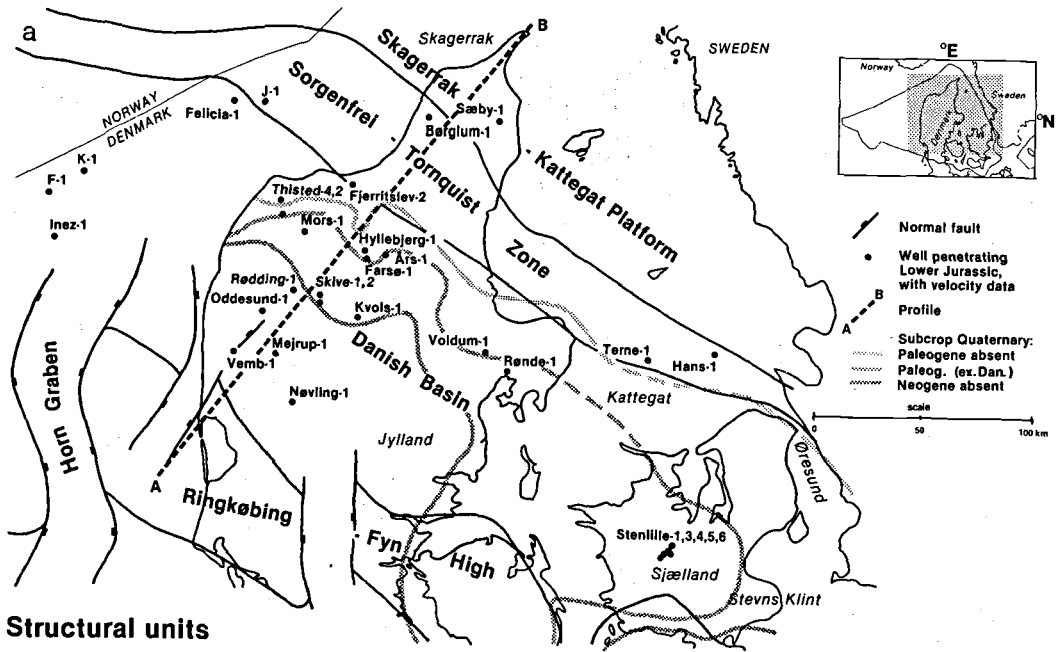
- Skagerrak-Kattegat Platformen, sydvest for det Baltiske Skjold, delvist dækket af relativt tynde og uforstyrrede mesozoiske sedimente erosivt trunkeret af kvartære aflejringer.
- Sorgenfrei-Tornquist Zonen, karakteriseret af inversion i Sen Kridt og Paleogen (det paleogene system dækker tidlig Tertiær - Paleocæn, Eocæn og Oligocæn - og det neogene system Sen Tertiær - Miocæn og Pliocæn).
- Det danske Bassin, den danske del af Det

norsk-danske Bassin, hvor bassindannelsen påbegyndtes med evaporitiske aflejringer i Zechstein. I løbet af Mesozoikum og Kænozoikum var sedimentationen overvejende klastisk, mens der blev aflejret kalk i Sen Kridt og Danien. Den strukturelle udvikling af bassinet er karakteriseret af gentagne skift i sedimentationsmønstret og af halokinetiske processer.

- Ringkøbing-Fyn Højderyggen, et højtliggende grundfjeldsområde med et reduceret dække af Mesozoisk-Kænozoiske aflejringer.

Det nordlige Danmark er påvirket af tre typer af hævningsbevægelser siden Tidlig Kridt - to af disse er velkendte, mens den neogene landhævning, som nærværende studium påpeger eksistensen af, kun har påkaldt sig mindre opmærksomhed:

- Inversion i Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Sen Kridt og Paleogen.
- Halokinetiske bevægelser i Det danske Bassin.
- Neogen hævningsområdet af Skagerrak-Kattegat Plat-



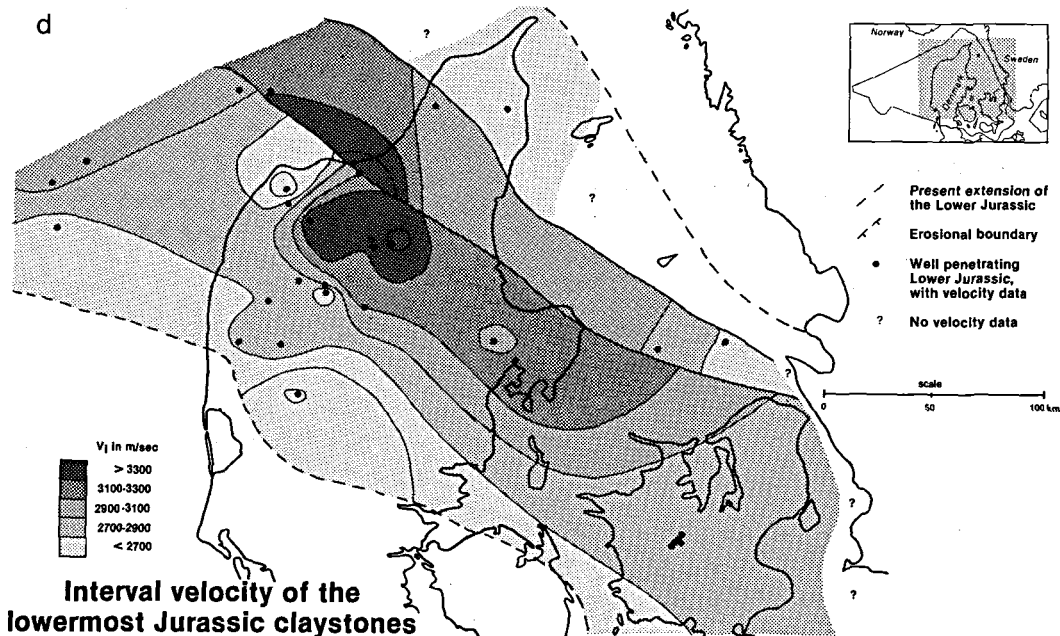
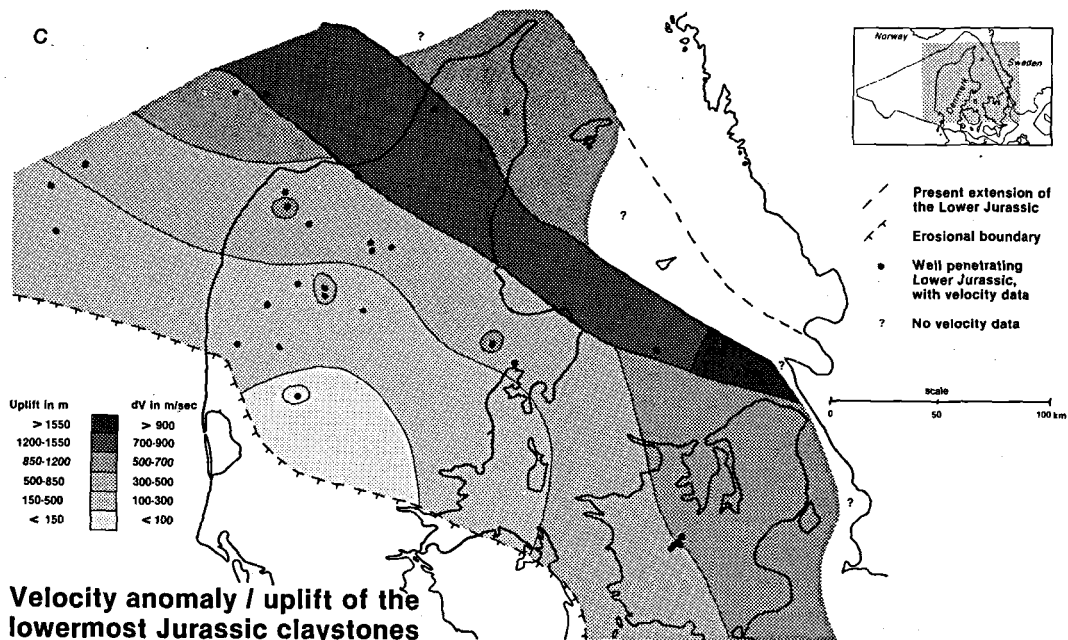


Fig. 1. Nedre Jura i det nordlige Danmark. (a) De strukturelle enheder. (b) Dybden til basis Nedre Jura modificeret efter Bertelsen (1978), Bjelm et al. (1977), Japsen & Langtofte (1991b) Michelsen (1981) og Pedersen (1985). (c) Hastigheds-anomalien og den tilsvarende landhævning for F-Ia & F-Ib Members, i forhold til $V = 1535 + 0.58 \cdot z$. (d) Interval-hastigheden for F-Ia & F-Ib Members.

The Lower Jurassic in northern Denmark. (a) Structural units. (b) Depth to base Lower Jurassic modified after from Bertelsen (1978), Bjelm et al. (1977), Japsen and Langtofte (1991b) Michelsen (1981) and Pedersen (1985). (c) Velocity anomaly and the corresponding uplift of the lower Jurassic F-Ia & F-Ib Members, relative to $V = 1535 + 0.58 \cdot z$. (d) Interval velocity of F-Ia & F-Ib Members.

formen, Sorgenfrei-Tornquist Zonen, Det danske Bassin og af dele af Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Den regionale udbredelse af den neogene landhævning og den deraf følgende erosion, gør det vanskeligt at erkende dens eksistens, og der findes derfor kun få og vage hentydninger til den i litteraturen. Larsen & Dinesen (1959: 59) antog, at »ret store dele af Fennoscandia – omfattende ikke blot grundfjeldsenheder, men også sedimentære formationer – har været denudationsfelt for Nordsøbækkenet i ungtertiær tid«. Spjeldnæs (1975) argumenterede, udfra forskellige geologiske observationer for, at en markant landhævning havde påvirket Danmark i sen Tertiær (startende i Oligocæn). Ifølge Spjeldnæs var denne bevægelse muligvis en afspejling af en hævnings af den atlantiske rand af det Fennoskandiske Skjold. Ifølge Nielsen, Sørensen, Thiede & Skarbø (1986) kunne neogen landhævning være lokaliseret i den Fennoskandiske Randzone (dvs. Skagerrak-Kattegat Platformen og Sorgenfrei-Tornquist Zonen) som resultat af en sen alpin tektonisk episode.

Jensen & Schmidt (in press) argumenterer for teorien om neogen landhævning af den nordøstlige del af Nordsø Bassinet. Jensen & Schmidt har observeret evidens for neogen erosion på seismiske sektioner fra området nordøst for Central Truget, og de noterer, at erosionen tiltager i styrke ind mod den norske kyst. Jensen og Schmidt antager, at denne prækvartære, erosive vinkeldiskordans er relateret til den neogene hævnings af de norske fjelde. Ud fra vitrinit reflektans målinger og bestemmelse af kompaktion af lersten vurderer de den neogene hævnings af det nordlige Danmark til fra 1000 til mere end 1500 m, stigende mod nord; de sonderer dog ikke imellem den neogene hævnings og inversionen i Sen Kridt-Paleogen.

Michelsen & Nielsen (in press) beregner landhævningen i det nordlige Danmark udfra sonic logs fra den nederste del af Fjerritslev Formationen i 7 borer (F-Ia & F-Ib Members). Forfatterne noterer tiltagende post tidlig jurassisk hævnings fra den centrale Nordsø mod Skagerrak-Kattegat Platformen og vurderer størrelsen af sen-kænozoiske landhævning til at være fra 600 til 1100 m. Boredata sammenlignes med et konstrueret hastigheds-dybde trend, som antages at re-

præsentere uforstyrret indsykning; trend'et tegnes som en lige linie på semilogaritmisk papir mellem sonic-målingen for O-1 boringen i det danske Central Trug i dybden 3000 m og en overfladehastighed på 200 μ sek/fod (1524 m/sek) (Magara 1976). Michelsen & Nielsen påpeger, at en forudsætning for denne anvendelse af data fra O-1 boringen er, at der ikke forekommer væsentligt overtryk ved basis af Jura. Dette er imidlertid ikke tilfældet; udfra mudder-vægt data kan overtrykket her beregnes til 1700 m vandsøjle. Dette niveau er i overensstemmelse med det overtryk, der normalt findes i nogle kilometers dybde i Central Truget (Thorne & Watts 1989).

Udfra den i det følgende beskrevne metode er den tilsyneladende hævnings i O-1 boringen beregnet til -420 m. Forklaringen på den negative værdi må søges i underkompaktering af sedimenterne, sandsynligvis forårsaget af den hurtige indsykning i Neogen og Kvartær (Nielsen *et al.* 1986). Ved at anvende O-1 boringen som reference for uforstyrret indsykning når Michelsen & Nielsen derfor til værdier for den totale landhævning, der er fra 200 til 400 m over vurderingerne i nærværende arbejde.

Metode

Porøsiteten af de fleste sedimentære bjergarter mindskes, efterhånden som sedimentets indsykningsdybde øges. Den øgede kompaktion medfører større kornkontakt i sedimentet og dermed til forøgelse af lyd hastigheden. Dette tab af porøsitet er oftest irreversibelt. En geologisk formation, der bliver hævet til en mere overfladenær position, vil således normalt have en porøsitet og en lyd hastighed, der er højere, end man ville forvente for formationen i denne dybde. Er formationens lyd hastighed kendt som funktion af dybden for normal kompaktering, kan den maksimale indsykning for formationen på en given lokalitet bestemmes udfra forskellen mellem den målte og den forventede lyd hastighed.

Den således bestemte hævnings, betegnes tilsyneladende hævnings (apparent uplift), idet andre faktorer end indsykningsdybden påvirker lyd hastigheden i sedimentet (Bulat & Stoker 1987). Af sådanne faktorer nævner Bulat & Stoker: Porevæske, matrikshastighed, lerindhold, geotermisk gradient, diagenetiske processer og

tektonisk spænding. For at mindske påvirkningen fra disse faktorer, bør bestemmelsen af landhævningen foretages for formationer, der på forhånd vides at være ensartet udviklet over et stort område. For at undersøge om den beregnede hævnning ikke blot er tilsyneladende, men også faktisk, må det afgøres, om hævnningen er fysisk og geologisk mulig. Dette kan undersøges ved at analysere den geografiske variation af den beregnede landhævning og sammenholde den med mulige geologiske mekanismer. Endvidere skal landhævningen bestemt for flere formationer, der har gennemløbet samme tektoniske udvikling, stemme overens.

For at kunne vurdere den absolutte størrelse af landhævningen, er kendskab til hastigheds-dybde funktionen for normal kompaktering for en given formation naturligvis af afgørende betydning. Dette betyder, at funktionen skal bestemmes i et område, hvor den givne formation ikke har været udsat for hævnning, og hvor den ikke er påvirket af overtryk.

Mange undersøgelser af bassiners strukturelle historie har udnyttet afvigelser fra normal kompaktering til at beregne landhævning (Bulat & Stoker, 1987, Jankowsky, 1962, John, 1975 og 1978, Jensen & Schmidt, in press, Magara, 1976, Michelsen & Nielsen, in press). Scherbaum (1982) tolker dog relativt høje hastigheder omkring en saltstruktur i det nordvestlige Tyskland som forårsaget af vægten af de pleistocæne ismasser og kompression på grund af saltbevægelser.

For mange geologiske formationer kan hastighedens tilvækst med dybden tilnærmes med en lineær funktion:

$$V = V_0 + k \cdot z$$

hvor V er hastigheden, V_0 betegnes som overfladehastigheden, k er hastighedsgradienten og z er dybden. Ud fra denne lineære approximation kan intervalhastigheden, V_i , for formationen beregnes til:

$$V_i = 2 \frac{\Delta z}{\Delta T} = \frac{2}{k\Delta T} (V_0 + kz_i) (e^{k\Delta T/2} - 1) \quad (1)$$

hvor z_i er dybden til toppen af laget, Δz er lagets tykkelse og ΔT dets tykkelse i tovejs løbetid.

Da ovenstående ligning ikke inddrager laterale

variationer i udtrykket for hastigheden, vil beregning af Δz ud fra ligning (1) afvige fra boringsdata. Den korrektion, der kalibrerer den lineære hastighedsmodel til boringsdata, defineres derfor som den ændring af overfladehastigheden, V_0 , der fører til, at den beregnede lagtykkelse svarer til den målte i en given boring. Denne kalibreringskonstant betegnes som hastighedsanomalien, dV , som beregnes i hver boring for hvert lag med givne lineære hastighedsparametre, V_0 og k , for målte værdier af tykkelse, $\Delta z'$ tovejs løbetid, $\Delta T'$, og dybde til toppen af laget, z'_i (Japsen 1990 og Japsen in press):

$$\Delta z' = \frac{1}{k} (V_0 + dV + kz'_i) (e^{k\Delta T'/2} - 1) \quad (2)$$

Hastighedsanomalien er med andre ord et udtryk for afvigelsen mellem en hastighedsmåling og en regional hastighedsfunktion. Hastighedsanomalien er derfor tæt knyttet til begrebet tilsyneladende hævnning: Hvis hastighedsanomalien skyldes landhævning, z_{up} , så skal z'_i i ligning 2 erstattes af $z'_i + z_{up}$, mens dV sættes til nul for at bestemme den dybde, der vil føre til den observerede hastighedsanomali. Efter division får vi

$$V_0 + dV + kz'_i = V_0 + k(z'_i + z_{up})$$

eller

$$dV = kz_{up}$$

På denne måde kan den tilsyneladende hævnning, z_{up} , beregnes ud fra de lineære hastighedsparametre, V_0 og k , bestemt for normal kompaktion af laget og boringsdata for lagets tykkelse, lagets tykkelse målt i løbetid og dybden til toppen af laget.

Intervalhastigheden for den nederste del af Fjerritslev Formationen

For at kunne fastlægge landhævningen i regionalt er intervalhastigheden for de to nederste members i Fjerritslev Formationen blevet undersøgt (jvf. Nielsen & Japsen 1991). F-Ia Member be-

står af lersten, med lag af siltsten eller kalksten, mens F-Ib Member domineres af lersten (Michelsen 1989). Disse to members af Fjerritslev Formationen er ensartet udviklet over hele området (Michelsen & Nielsen 1992). Hastighedsanomalierne for denne del af Fjerritslev Formationen – beregnet som afvigelsen fra et formodet uforstyrret hastigheds-dybde trend – kan derfor bruges til at vurdere landhævning.

Intervalhastigheden blev undersøgt samlet for F-Ia & F-Ib Members som et lag for at sikre, at bestemmelsen af hastigheden blev foretaget over et lag af passende tykkelse. De to members findes i borerer indenfor alle de før omtalte strukturelle enheder, på nær Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Tykkelsen af de to lag er i gennemsnit 200 m i borerne (fra 12 til 411 m); ialt 30 borerer gennemborer de to lag og har måling af intervalhastigheden (se tabel 1).

Kun i Stenlille-borerne (fig. 1a) findes der markante indslag af siltsten eller sandsten i F-Ia Member (Pedersen 1985). Dette medfører en relativt høj intervalhastighed for F-Ia & F-Ib Members. For at muliggøre en sammenligning med den relativt ensartede lersten fundet i det meste af området, er hastigheden for et lerstens-interval i toppen af F-Ib Member blevet brugt for Stenlille-borerne. Fjerritslev-1 boreren er ikke inddraget i analysen, fordi den er boret på en markant saltstruktur.

Intervalhastighederne for F-Ia & F-Ib Members viser en klar tendens til at stige med dybden (fig. 2), men data punkterne fra Sorgenfrei-Tornquist Zonen viser markant hævnings i forhold til den generelle hastigheds-dybde trend (linie *a*). Dette er i god overensstemmelse med inversionsbevægelsen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Sen Kridt-Paleogen. Kompaktionslinien *a* er bestemt ved regressionsanalyse af datapunkterne efter først at have udeladt datapunkter klart udenfor det generelle trend, samt data fra saltdiapirer. Linien *a* vil dog være påvirket af eventuel storskala neogen hævnings, der ville få selv de tilsyneladende stabilt indsynkende dele af Det danske Bassin til at være hævet.

Reference kompaktionslinien

For at fastlægge landhævningen i det nordlige Danmark absolut, er hastighedsanomalien for

den nederste del af Fjerritslev Formationen blevet bestemt i forhold til kompaktionslinien *b* ($V = 1535 + 0.58 \cdot z$). Denne linie er bestemt af Scherbaum (1982) og repræsenterer kompaktionsforholdet for formodet uafbrudt indsynkning for Nedre Jura i det nordvestlige Tyskland. Scherbaum angiver ikke lithofacies for disse sedimenter, men ifølge Ziegler (1982) er der tale om lersten. Ifølge Bertelsen (1978) var det nordvestlige Tyskland og det nordlige Danmark dele af det samme aflejringsområde i Sen Trias og Tidlig Jura. Bertelsen anfører, at der er slående lighed i både facies og faunaudviklingen på begge sider af Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Den nuværende afgrænsning af Nedre Jura mod Ringkøbing-Fyn Højderyggen tolkes derfor af Bertelsen som en erosiv grænse, dannet af den Midt Kimmeriske landhævning i slutningen af Tidlig Jura. Disse forhold gør, at en hastigheds-dybde funktion (linie *b*) baseret på Nedre Jura i det nordvestlige Tyskland må betragtes som den bedst mulige referencelinie for kompaktionen af Nedre Jura nord for Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Scherbaum anvender data fra adskillige hundrede borerer for at fastlægge en lineær hastigheds-dybde funktion for et antal geologiske enheder. Ved at vælge den mindste hastighed i hver dybde for hver enhed som reference for fastlæggelsen af de lineære funktioner, er det antaget, at disse datapunkter har den mindste sandsynlighed for ikke at være påvirket af hævnings. Antallet af borerer, der indgik i fastlæggelsen af linie *b*, angives ikke, men Scherbaum påpeger, at parametrene for denne linie er relativt usikre. Scherbaum noterer, at hastigheds-dybde trend'et kan betragtes som lineært i større dybder (dvs. dybder større end 1000 m, svarende til hastigheder over 2500 m/sek; i mindre dybder vokser hastigheden med en større gradient). I den nærværende undersøgelse er alle intervalhastigheder, på nær to, over 2500 m/sek, og antagelsen om linearitet er derfor gældende (se tabel 1 og fig. 2).

Intervalhastigheden for F-Ia & F-Ib Members er under det niveau, hvor antagelsen om linearitet er gældende i Nøvling-1 og Thisted-4 borerne (henholdsvis 2236 og 2314 m/sek). Nøvling-1 boreren ligger under linie *b* på fig. 2, mens Thisted-4 ligger over linien; anvendelse af en større hastigheds gradient for hastigheder under 2500 m/sek ville øge hastighedsanomalien (og dermed den beregnede hævnings) for begge borerer.

Tabel 1. Boringsdata for de to nederste members af den Nedre Jurassiske Fjerritslev Formation (F-Ia & F-Ib Members) i Danmark udenfor Central Truget (Nielsen & Japsen 1991). Tilsyneladende hævninng, z_{up} , og hastighedsanomali, dV , beregnet relativt til $V = 1535 + 0.58z$ (Scherbaum 1982). Nøjagtigheden af hastighedsmålingerne er reduceret for tynde lag og for lag, hvorfra der ikke er kalibrerede sonic logs (jvf. Børglum-1 og Terne-1 borerne). En indsat linie med *understregede* værdier for V_i , z_i og dV repræsenterer log aflæsninger for lerstensintervaller. »TD« markerer at boringen ikke gennembrer Jura. »*« markerer at boringen ikke har nogen kalibreret sonic log. V_i , z_i , Δz og ΔT betegner henholdsvis lagets intervalhastighed, dybden fra havniveau til toppen af laget, laget tykkelse og dets tykkelse i to-vejs løbetid.

Well data for the two lower members of the Lower Jurassic Fjerritslev Formation (F-Ia & F-Ib Members) in Denmark outside the Central Trough (Nielsen & Japsen 1991). Apparent uplift, z_{up} , and velocity anomaly, dV , calculated relative to $V = 1535 + 0.58z$ (Scherbaum 1982). The accuracy of the velocity measurements is reduced for thin sections and for sections where no calibrated sonic log is available (cf. the Børglum-1 and the Terne-1 wells). An inserted line with *underlined* values for V_i , z_i and dV represent log readings for pure shale. "TD" indicates that the well does not penetrate the Jurassic. "*" indicates that the well has no calibrated sonic log, V_i , z_i , Δz and ΔT indicates the interval velocity of the layer, depth from sea level to the top of the layer, the thickness of the layer and its thickness in two-way travel time.

Boring	z_{up} (m)	dV (m/sek)	V_i (m/sek)	z_i (m)	Δz (m)	ΔT (msek)	Kommentar
Børglum-1	1273	738	3058	1323	26	17	*
F-1	500	290	2950	1839	202	137	flad saltpude
Farsø-1	481	279	3296	2395	323	196	
Felicia-1	1018	590	2922	1244	262	179	
Fjerritslev-1	1408	816	2867	867	43	30	*, TD, markant saltpude
Fjerritslev-2	1531	888	3556	1849	208	117	*
Hans-1	1733	1005	2660	141	133	100	
Hyllebjerg-1	575	334	3266	2265	289	177	
Inez-1	335	194	2647	1532	101	76	saltpude
J-1	1493	866	3296	1393	303	184	flad saltpude
K-1	625	362	2906	1536	411	283	
Kvols-1	448	260	3123	2177	228	146	flad saltpude
Mejrup-1	327	190	2879	1808	368	256	
Mors-1	785	456	3510	2492	258	147	
Nøvling-1	-431	-250	2236	1503	275	246	*, unormalt tryk?
Oddeund-1	229	133	2698	1661	232	172	
Rødning-1	425	247	2833	1712	204	144	
Rønde-1	513	297	3264	2367	204	125	
Skive-1	595	345	3026	1860	233	154	flanke af saltpude
Skive-2	682	396	2639	1174	95	72	saltpude
Stenlille-1	940	545	2869	1257	208	145	flad saltpude
	848	492	2771				
Stenlille-3	1007	584	2903	1247	209	144	TD, flad saltpude
	839	487	2746				
Stenlille-4	1165	676	3000	1248	228	152	flad saltpude
	839	487	2746				
Stenlille-5	1143	663	3003	1282	213	142	flad saltpude
	848	492	2771				
Stenlille-6	1188	689	3046	1304	227	149	flad saltpude
	914	530	2822				
Sæby-1	997	578	2671	911	102	76	
Terne-1	1405	815	2870	863	66	46	*
Thisted-2	895	519	2676	1028	91	68	saltpude
Thisted-4	662	384	2314	622	118	102	saltpude
Vemb-1	309	179	2708	1649	130	96	*
Voldum-1	942	546	3023	1527	195	129	saltpude
Års-1	558	324	3617	2905	255	141	

Yderligere et kompaktionstrend fra det nordvestlige Tyskland (Pompeckj Højderyggen) beregnet for Nedre og Mellem Jura lersten, der antages at befinde sig i en dybde svarende til maksimal indsynkning, kan findes hos Jankowsky (1962). I dybdeintervallet fra 750 til 3500 m kan dette trend approksimeres med en ret linie ($V =$

$1800 + 0.5 \cdot z$), indenfor en afvigelse på 5%. Denne rette linie er overensstemmelse med linie b: I en dybde af 3000 m er Jankowskys estimat 25 m/sek over linie b og i 1500 m er det 145 m/sek over linie b.

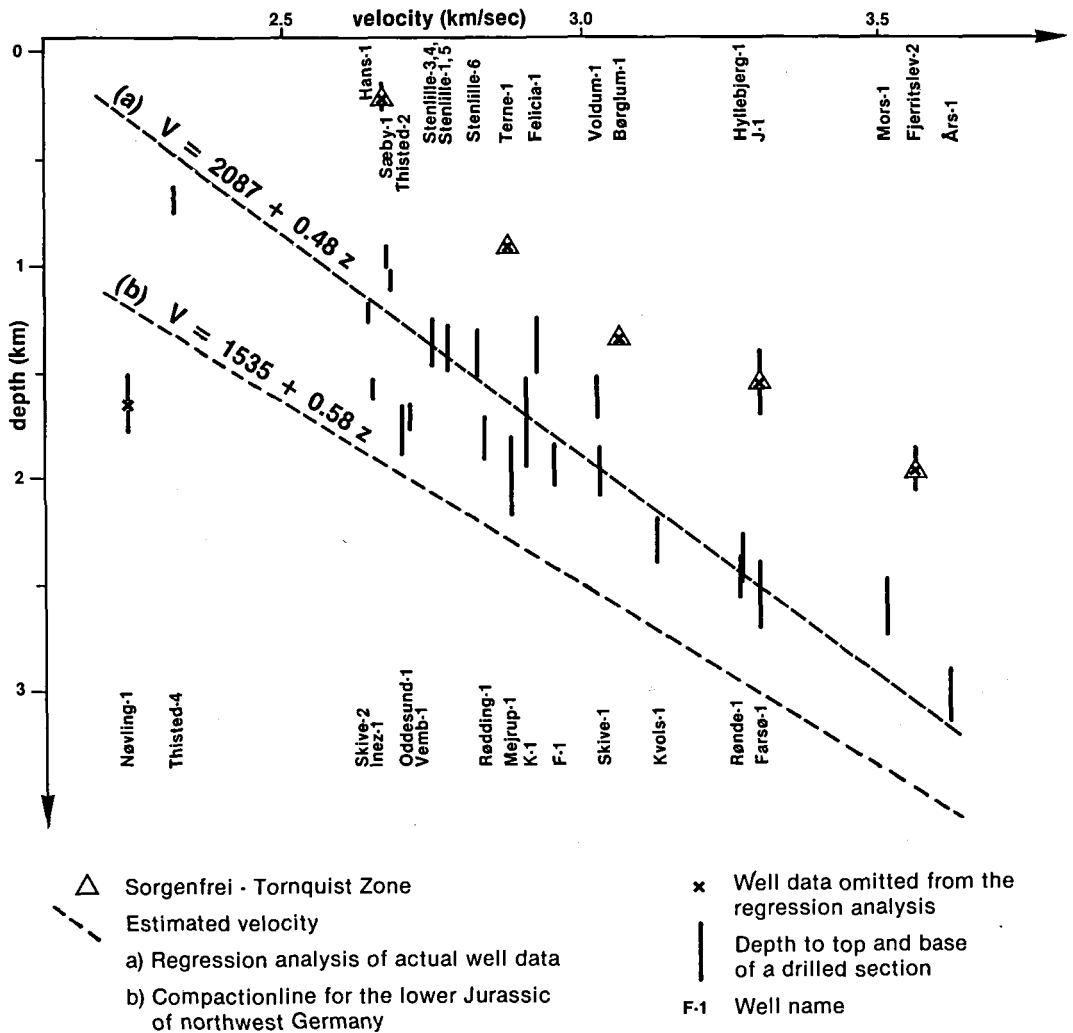


Fig. 2. Intervalhastighed for de nedre jurassiske F-Ia & F-Ib Members i det nordlige Danmark, målt i 30 borer, der gennembrer Jura.

Interval velocities of the Lower Jurassic F-Ia & F-Ib Members in northern Denmark, measured in 30 wells penetrating the Lower Jurassic.

Den neogene landhævning

Den laterale variation af intervalhastigheden for F-Ia & F-Ib Members afspejler dybden til basis Nedre Jura (fig. 1d og b): De højeste hastigheder findes i den dybeste del af Det danske Bassin, mens lave hastigheder ses langs randen af bassinet, over saltpunder, på Skagerrak-Kattegat Platformen (Sæby-1 boringen) og på den østlige del af Sorgenfrei-Tornquist Zonen.

Hvis den dydbetingede komponent af intervalhastigheden fjernes ved at beregne hastighedsanomalien i forhold til linie b, fremkommer der

et helt andet billede (fig. 1c). Hastighedsanomalien tiltager mod nord i Det danske Bassin for at nå et niveau, der modsvarer det, der er bestemt på Skagerrak-Kattegat Platformen (Sæby-1 boringen). Imellem disse to strukturelle elementer udgør Sorgenfrei-Tornquist Zonen et område med høje hastighedsanomalier. Et tilsvarende billede med stigende hastighedsanomalier mod nord og øst tegner sig tydeligt for flere formationer, der både er ældre og yngre end Tidlig Jura (Japsen 1988). Dette forhold underbygger, at der er tale om tektonisk, og ikke lithologisk, betinget variation af hastighederne. Da den kortlagte enhed,

F-Ia & F-Ib Members, er ensartet udviklet over hele området, kan variationen i hastighedsanomalien således tilskrives landhævning og det overordnede mønster, der ses i fig. 1c, må kunne tilskrives to tektoniske begivenheder: Inversionen i Sen Kridt-Paleogen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen, samt af en stor-skala landhævning af hele det nordlige Danmark i Neogen.

Den forøgede landhævning – og erosion – mod nord og øst stemmer overens med den tiltagende alder af lagene under de kvartære aflejringer i disse retninger (fig. 1 og 3b). Kun den prækvartære vinkeldiskordans har en geografisk udbredelse, der svarer til den landhævning, som fremgår af hastighedsanomalierne, der ses på fig. 1c. Alle andre vinkeldiskordanser efter Tidlig Jura påvirker ikke hele området (EUGENO-S Working Group (1988) – her er den prækvartære vinkeldiskordans imidlertid ikke omtalt). Den midt kimmeriske vinkeldiskordans, der optræder ved overgangen mellem Tidlig og Mellem Jura, er markant over store dele af det undersøgte område, men intensiteten af denne diskordans tiltager mod Rinkøbing-Fyn Højderyggen, i modsætning til den landhævning, der fremgår på fig. 1c (Ziegler 1990). Endvidere må det huskes, at i Det danske Bassin vil kun landhævning, der har fundet sted efter Tidlig Kridt, påvirke hastighedsanomalien – før aflejringen af Kalk Gruppen, der er over 1000 m tyk i det meste af bassinet, var dybden til Nedre Jura lille, og den maksimale kompaktion af disse sedimentter havde derfor endnu ikke fundet sted (jvf. Japsen & Langtofte 1991a).

Flere kendsgerninger (se Spjeldnæs 1975) tyder på, at den prækvartære erosionsflade skyldes neogen landhævning. I det danske Central Trug tiltager kornstørrelsen abrupt ved overgangen fra Paleogen til Neogen, og yderligere øges mængden af kaolinit, som tegn på tilgang af terrigene nedbrydningsprodukter, der formodentlig stammer fra det baltiske område og/eller fra landområderne ved Skotland (Nielsen 1979). I det sydlige Jylland blev paleogene sedimentter eroderet i Sen Oligocæn og Miocæn (Rasmussen og Larsen 1989). Yderligere kan det nævnes, at der over Danmark sker en generel forskydning af den *tertiære kystlinie mod vest* (EUGENO-S Working Group 1988).

Den neogene landhævning synes at være ophørt før Kvartær: Tykkelsen af Kvartæret til-

tager markant mod nord langs profilet AB på fig. 3a, og da store dele af de kvartære aflejringer i det nordlige Jylland er marine, må området have været præget af indsynkning i Kvartær tid. Denne konklusion understøttes af Fredericia og Knudsens (1990) konstatering af, at indsynkning samt tektoniske bevægelser synes at have fundet sted i Sen Kvartær i det nordligste Jylland. Den holocæne isostatisk landhævning efter sidste istid er således ikke relateret til den neogene landhævning.

Vægten af de kvartære ismasser kunne tænkes at have forårsaget den ekstra kompaktion, som idag kan konstateres i det nederste Jura. Bassinmodelleringsstudier af isens betydning for kompaktionen af de sedimentære bjergarter viser imidlertid, at varigheden af nedisningerne er alt for kort til at have nogen effekt (T. Bidstrup, pers. medd., 1991).

Det må konkluderes, at prækvartæroverfladen i det nordlige og østlige Danmark er en erosionsflade, der er dannet på grund af landhævning i Neogen og den derpå følgende subaeriske og glacial erosion.

Den retlinede tilvækst i landhævning langs profil AB er påfaldende og synes at indicere, at den neogene landhævning var en rigid bevægelse, der omfattede både Det danske Bassin, Sorgenfrei-Tornquist Zonen og Skagerrak-Kattegat Platformen (fig. 3a). Ekstrapolation langs profilet giver det resultat, at der ingen hævnings fandt sted af Rinkøbing-Fyn Højderyggen ud for det sydvestlige Jylland og at hævnings øges til 1000 m i det nordligste Jylland. Tilvæksten i hævnings mod nord er således 450 m per 100 km langs profilet. Den regionale hældning af Tertiærets basis langs profil AB er tilsyneladende direkte udtryk for den neogene landhævning (fig. 3c). På geo-profilet ses det, at Tertiærets basis har en meget veldefineret regional hældning mod syd på cirka 700 m per 100 km. Denne gradient er ganske vist noget større end den, der er bestemt ud fra jurassiske hastighedsdata, men er dog i god overensstemmelse med denne, hvis den paleogene indsynkning i Det danske Bassin antages at have været konstant langs profilet.

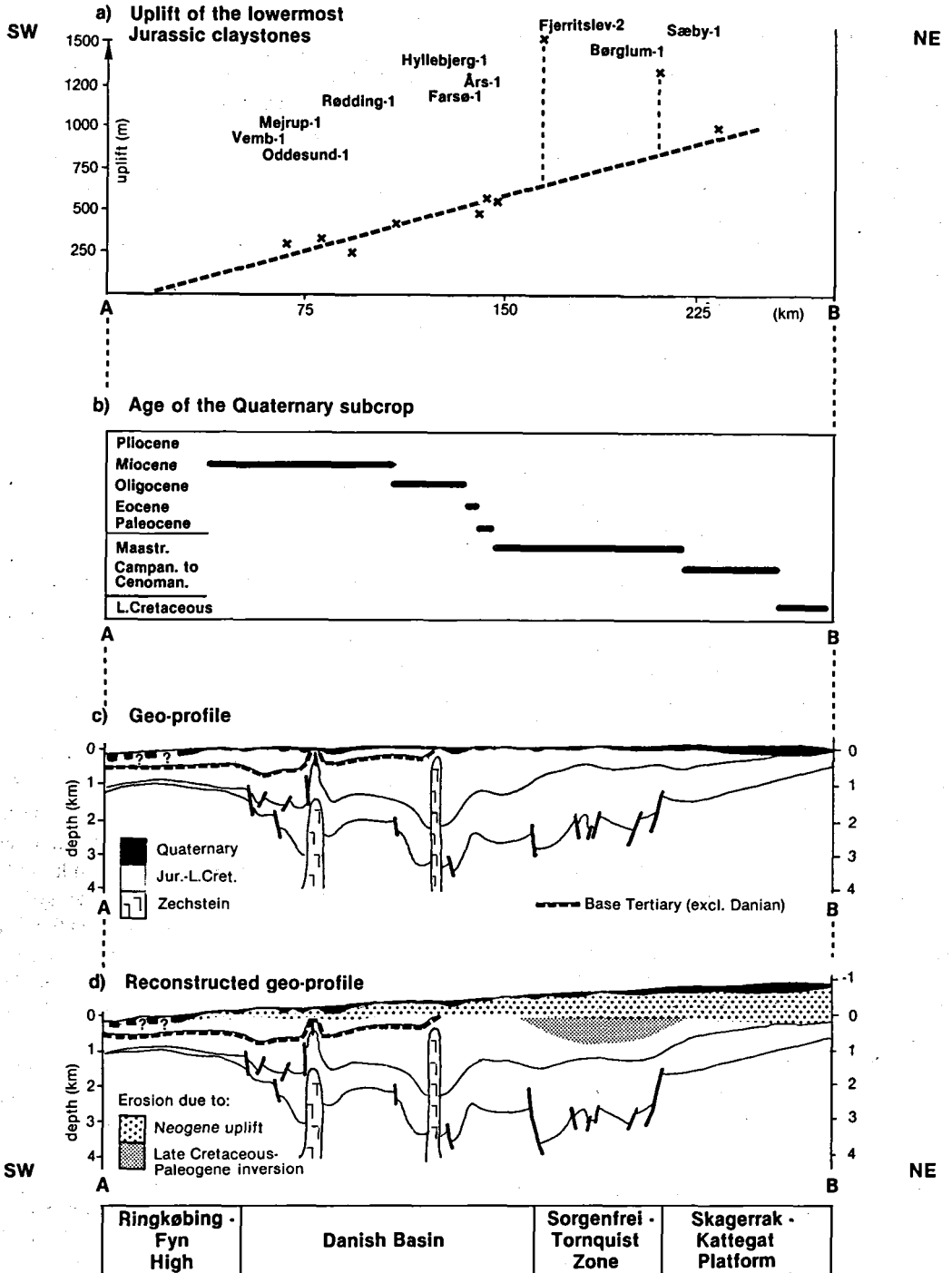


Fig. 3. Landhævning og geologi langs profil AB (se fig. 1a) (a) Hævningen bestemt for F-Ia & F-Ib Members, baseret på boreriger mindre end 20 km fra profilet (minus borerigerne på Skive strukturen). (b) Alderen af prækvartæret (minus lokale anomalier over saltstrukturer), modificeret efter Th. Sorgenfrei (Rasmussen 1970). (c) Geo-profil til basis Jura-Nedre Kridt. Sammenstillet efter Japsen & Langtofte (1991a og 1991b), Ter-Borch (1990) og K. Binzer & J. Stockmarr (1991, pers. medd.). (d) Rekonstrueret geo-profil til basis af Jura-Nedre Kridt, hvor de lagtykkelser, der skønnes at være borteroderet efter landhævning er tilføjet.

Uplift and geology along profile AB (see fig. 1a). (a) Uplift of the lower Jurassic F-Ia & F-Ib Members, based on wells within 20 km from the cross section (excluding the wells on the Skive structure). (b) Age of the Quaternary subcrop (excluding local anomalies due to salt structures), modified after Th. Sorgenfrei (Rasmussen, 1970). (c) Geo-profile to the base of the Jurassic-Lower Cretaceous. Compiled from Japsen & Langtofte (1991a and 1991b), Ter-Borch (1990), and K. Binzer & J. Stockmarr (1991, pers. comm.). (d) Reconstructed geo-profile to base of the Jurassic-Lower Cretaceous, where the estimated volumes removed after uplift have been inserted.

Inversionen i Sen Kridt og Paleogen

For at kunne vurdere størrelsen af inversionen i Sen Kridt-Paleogen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen, er det vigtigt at huske, at den beregnede hævnings er forskellen mellem sedimentets største indsynkningsdybde på noget tidspunkt og den aktuelle dybde. Hverken hævningsbevægelser før det tidspunkt, hvor indsynkningsdybden var størst, eller indsynkning mellem efterfølgende hævningsfaser påvirker kompaktionen af sedimentet.

I Fjerritslev-2 boringen er hævningsen af det nederste Jura bestemt til 1500 m. Basis af Jura må således have været begravet 1500 m dybere end idag før starten af de to hævningsbevægelser, der påvirker Sorgenfrei-Tornquist Zonen; dvs. i begyndelsen af Sen Kridt. På fig. 3a ses det, at cirka halvdelen af hævningsbeløbet, 750 m, kan forklares af den neogene landhævning. I Fjerritslev-2 boringen er der ikke bevaret tertiære sedimentter, men nogle af de sedimentter, der er fjernet efter den neogene landhævning, har dog sandsynligvis været paleogene. På fig. 3c ses det, at Tertiæret kiler ud syd for boringen, og at dets mægtighed umiddelbart syd herfor hurtigt kommer op på 500 m; et forsigtigt skøn over det borteroderede Paleogen i Fjerritslev-2 boringen er derfor 250 m. Således må 1000 m af Kalk Gruppen være blevet eroderet på grund af inversionen i Sen Kridt-Paleogen og yderligere 500 m på grund af landhævning i Neogen (se tabel 2).

I Kattegat er det svært at vurdere størrelsen af den neogene landhævning på grund af sparsom borekontrol, men ved ekstrapolation ud fra konturerne for landhævningen på fig. 1c fås, at 900 og 1200 m ikke urealistisk for henholdsvis Terne-1 og Hans-1 borerne. I analogi med den ovenstående argumentation, kan hævningsen for-

årsaget af inversionen vurderes til 750 m for begge disse borerne.

I Skagerrak er J-1 boringen boret på en lille saltpude. Den salttektonisk betingede hævnings siden Tidlig Kridt vurderes til 200 m (jvf. Japsen & Langtofte 1991a). Størrelsen af inversionen reduceres derfor i J-1 boringen med 200 m til 550 m. Disse tal skal sammenholdes med observationen gjort af Liboriussen, Ashton og Tygesen (1987), at inversionen i Sen Kridt-Paleogen aftager mod nordvest langs Sorgenfrei-Tornquist Zonen.

Saltbevægelser

Der er store positive hastighedsanomalier for F-Ia & F-Ib Members over saltpuderne Thisted, Voldum og Skive. Dette forhold kan forklares med et ekstra hævningsbidrag på grund af saltbevægelse. Størrelsen af den ekstra erosion over saltpuderne er et par hundrede meter, hvilket er i overensstemmelse med størrelsen af den strukturelle lukning på basis kalk for disse strukturer (jvf. Japsen & Langtofte 1991a). Andre af de anvendte borer er også boret på saltstrukturer (se tabel 1), men manglende boringskontrol gør det ikke muligt at vurdere, om saltpudedannelsen har forårsaget lokale variationer i hastighedsanomalien for det nederste Jura.

Diskussion

For at kunne anskueliggøre effekten af både den neogene landhævning og af inversionen i Sen

Tabel 2. Skøn over hævningsen forårsaget af inversionen i Sen Kridt-Paleogen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen.

Estimated values for the uplift caused by the Late Cretaceous to Paleogene inversion in the Sorgenfrei-Tornquist Zone.

Boring	Målt hævnings	=	Hævning i Sen Kridt-Paleogen	+	Hævning i Neogen	-	Paleogen indsynkning (skøn)	+	Sen Kridt og Tertiær salt hævn.
Børglum-1	1300	=	700	+	850	-	250	+	0
Hans-1	1700	=	750	+	1200	-	250	+	0
Terne-1	1400	=	750	+	900	-	250	+	0
Fjerritslev-2	1500	=	1000	+	750	-	250	+	0
J-1	1500	=	550	+	1000	-	250	+	200

Kridt-Paleogen viser fig. 3d en rekonstrueret geo-profil, hvor de lagmægtigheder, der skønnes borteroderet, er tilføjjet. På figuren afspejler strukturen af basis af Jura-Nedre Kridt og af basis af Kalk Gruppen i Sorgenfrei-Tornquist Zonen situationen i begyndelsen af Sen Kridt. Det ses, at Sorgenfrei-Tornquist Zonen på dette tidspunkt var et depocenter, og at basis Jura fremtrådte som en markant graben.

Når voluminet af den kalk, der er borteroderet af inversionen i Sen Kridt-Paleogen tilføjes som i fig. 3d, set det, at depocentret for Kalk Gruppen også må have dækket Sorgenfrei-Tornquist Zonen og ikke kun Det danske Bassin, således som det er tilfældet idag. Endvidere følger det af argumentationen i de forrige afsnit, at udbredelsen af såvel Kalk Gruppen, som af de tertiære aflejringer, må have strakt sig langt nord og øst for den afgrænsning, der ses idag.

Konturerne for 500 og 850 m landhævning følger parallelt med den norske kyst i den vestlige del af det kortlagte område (fig. 1c), men mod øst bøjer konturerne mod syd og følger den svenske kyst. Dette betyder, at den neogene landhævning ikke alene har påvirket Norge, men også Sverige. Orienteringen af hævnings-konturerne er i fuld overensstemmelse med den prækvartære overflades alder (fig. 1a). Hvis værdierne for landhævning ekstrapoleres mod øst, fås det interessante resultat, at der mangler 1000 m paleogene sedimenter på Stevns Klint, hvor Kridt-Tertiær grænsen idag ligger nær havniveau, og at endnu større lagpakker må være blevet borteroderet i Skåne.

En konsekvens af den neogene landhævning er, at estimater af modenheten af potentielle Nedre Jura kildebjergarterne i Nord- og Midtjylland (Thomsen et al. 1987) baseret på de aktuelle indsynkningsdybder bliver for lave. Udfra fig. 1b og c ses det, at de fleste af de områder, hvor basis Nedre Jura idag ligger dybere end 3000 m, er blevet hævet mellem 500 og 1000 m i Neogen. Det vil derfor påvirke indsynkningshistorien for disse mulige kildebjergarter markant; hvis den neogene landhævning tages med i betragtning.

I Sorgenfrei-Tornquist Zonen (i Fjerritslev Trugget, se Japsen & Langtofte 1991b) har basis Jura også befundet sig i langt større dybde end idag, i over 4 kilometers dybde (fig. 3d). Tidspunktet for hvornår denne maksimale indsynkning indtraf, ligger dog før påbegyndelsen af inversionen i

Sen Kridt-Paleogen. Dette tidspunkt må skønnes at være for tidligt i forhold til dannelse af kulbrinter, der kunne påtræffes i dag.

Udfra vitrinit reflektans data kan landhævningen i det nordlige Danmark bestemmes til værdier i samme størrelsesorden som i nærværende arbejde. I Midtjylland varierer vitrinit reflektansen fra 0.25 til 0.29 for de miocæne brunkul ved FASTERHOLT (15 km SØ for Nøvling-1 boringen, Thomsen, i Koch 1989). Dette reflektansniveau og selve tilstedeværelsen af brunkul ved jordoverfladen indebærer, at omkring 200 m sedimenter må være borteroderet (E. Thomsen, pers. medd. 1991). Længere mod nord må mindst 500 m være borteroderet at dømmes efter vitrinit data for mesozoiske sedimenter for 14 boringer, der hovedsageligt er beliggende i de centrale dele af Det danske Bassin; men også i Sorgenfrei-Tornquist Zonen og på Skagerrak-Kattegat Platformen (Thomsen, Damtoft og Andersen 1987, samt E. Thomsen, pers. medd., 1991). I Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Kattegat må erosionen for Hans-1 boringen vurderes til mindst 1500 m udfra vitrinit reflektans data fra nedre jurassiske kul. I det nordlige Øresund, stadig indenfor Sorgenfrei-Tornquist Zonen, tyder vitrinit reflektans værdier, varierende fra 0.34 til 0.44 for nedre og mellem jurassiske kul fundet nær havbunden, på en erosion på mindst 1000 m (Thomsen 1980).

Konklusion

Den tilsyneladende hævnning af de to nederste member af den Nedre Jurassiske Fjerritslev Formation, F-Ia & F-Ib Members, er beregnet i 30 boringer i det nordlige Danmark ud fra lagenes intervalhastigheder. Tilsyneladende hævnning defineres som forskellen mellem den faktiske dybde til et lag og den dybde, som hastigheds - dybde funktionen for normal kompaktion forudsiger for den observerede intervalhastighed.

Da F-Ia & F-Ib Members hovedsageligt består af lersten og er homogent udviklet over hele området, er dette lag velegnet til at vurdere landhævning ud fra. Afvigelser fra normal kompaktion skyldes derfor ikke primært lithologiske variationer. Landhævningen er blevet bestemt for hver boring i forhold til en lineær hastigheds -

dybde funktion for Nedre Jura i nordvest Tyskland: $V = 1535 + 0.58 \cdot z$, hvor V er hastighed og z dybden fra havniveau.

Den laterale variation af den beregnede landhævning må tolkes som forårsaget af tre typer landhævning: Inversion i Sorgenfrei-Tornquist Zonen i Sen Kridt-Paleogen, neogen hævning af hele det nordlige Danmark og endelig halokinetiske bevægelser i Det danske Bassin efter Tidlig Kridt.

Den neogene landhævning er ved extrapolation bestemt til nul over Ringkøbing-Fyn Højderyggen, ud for det sydvestlige Jylland, mens den stiger mod nord og øst til 1000 m i det nordligste Jylland og til en estimeret værdi på 1000 m ved Stevns Klint. Den prækvartære overflade i det nordlige og østlige Danmark er derfor et erosionssnit skabt af landhævning i Neogen med derpå følgende subaerisk og glacial erosion. Udbredelsen af Kalk Gruppen og af de tertiære aflejringer må have strakt sig længere mod nord og øst end det er tilfældet i dag.

I Sorgenfrei-Tornquist Zonen er den samlede landhævning beregnet til mellem 1300 og 1700 m. Hævningen relateret til inversionen i Sen Kridt-Paleogen er fundet til at være omkring 750 m.

Tak

Jeg vil gerne takke mine kolleger L. H. Nielsen, C. Andersen, T. Bidstrup, P. Britze, C. Langtofte og E. Skovbjerg Rasmussen for deres uvurderlige hjælp og forslag ved udarbejdelsen af dette manuskript. K. Andersen og B. Schark skal have tak for deres dygtige og engagerede arbejde med illustrationerne.

Litteratur

- Bertelsen, F., 1978: The Upper Triassic - Lower Jurassic Vinding and Gassum Formations of the Norwegian - Danish Basin, *Danm. geol. Unders.*, Ser. B, 3, 26 pp.
- Bjelm, J., Hartlén, J., Röshoff, K., Bennet, J., Buch, H., Persson P. & Wadstein, P. 1977: *Geotermisk energiutvinning i Skåne*, 64 pp og 25 bilag. Lund: Tekniska Högskolan i Lund.
- Bulat, J. & Stoker, S. J., 1987: Uplift determination from interval velocity studies, UK southern North Sea, in J. Brooks and K. Glennie, eds., *Petroleum Geology of North West Europe*, London: Graham and Trotman, 293-305.
- EUGENO-S Working Group, 1988: Crustal structure and tectonic transition between the Baltic Shield and the North German Caledonides (the EUGENO-S Project). in R. Freeman, A. Bertelsen and St. Mueller, eds., *The European Geotraverse, Part 4: Tectonophysics*, 150, 253-348.
- Fredericia, J. and Knudsen, K.L., 1990: Geological framework in the Skagen area: *Journal of coastal research, special issue no. 9*, proceedings Skagen symposium sept. 2-5, 1990, v. 2, 647-659.
- Jankowsky, W., 1962: Diagenese und Ölinhalt als Hilfsmittel für die strukturgeschichtliche Analyse des Nordwestdeutschen Beckens: *Z. Dtsch. geol. Ges.* 114, no. 2, 452-460.
- Japsen, P., 1988: Interval velocities in Denmark outside the Central Trough, *Danm. geol. Unders.*, Confidential report, 40 (nu frigivet), 29 pp og 2 appendix.
- Japsen, P., 1990: Depth conversion of regional maps and regional variations of velocity. *Eur. Ass. Expl. Geoph. 52nd meeting, Copenhagen*, Denmark. 21-22.
- Japsen, P., in press: Influence of lithology and Neogene uplift on seismic velocities in Denmark: Implications for depth conversion of maps, *AAPG Bull.*
- Japsen, P. & Langtofte, C., 1991a: Geological map of Denmark. The Danish Basin. Base Chalk and the Chalk Group. Two-way time and depth, thickness and interval velocity, *Danm. geol. Unders.*, Map Ser., 29, 1:400,000, 2 pp. og 4 kort.
- Japsen, P. & Langtofte, C., 1991b: Geological map of Denmark. The Danish Basin. Top Triassic and the Jurassic-Lower Cretaceous. Two-way time and depth, thickness and interval velocity, *Danm. geol. Unders.*, Map Ser., 30, 1:400,000, 2 pp og 4 kort.
- John, H., 1975: Hebung und Senkungsvorgänge in Nordwestdeutschland, *Erdöl und Kohle*, 28, 273-277.
- John, H., 1978: Hebung und Senkungsvorgänge in der Ostmasse, *Erdöl und Kohle* 31, 177-180.
- Jensen, L. N. & Schmidt, B. J., in press: Neogene erosion in the Farsund Basin, North Sea: Magnitude and consequences for hydrocarbon exploration, *European Association of Petroleum Geoscientists, 3rd conference, Florence, Italy.*
- Koch, B. E., 1989: Geology of the Søby-Fasterholt area (Text), *Danm. geol. Unders.*, Ser. A, 22, 171 pp.
- Larsen, G. & Dinesen, A., 1959: Vejle Fjord Formationen ved Brejning, *Danm. geol. Unders.* II række, 82, 114 pp.
- Liboriussen, J., Ashton, P. & Thygesen T., 1987: The tectonic evolution of the Fennoscandian Border Zone in Denmark, *Tectonophysics*, 137, 21-29.
- Magara, K., 1976: Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada Basin, *AAPG Bull.*, 60, no. 4, 554-565.
- Michelsen, O., 1989: Revision of the Jurassic lithostratigraphy of the Danish Subbasin, *Danm. geol. Unders.*, Ser. A, 24, 21 pp.
- Michelsen, O. (ed.), 1981: Kortlægning af potentielle geotermiske reservoirer i Danmark, *Danm. geol. Unders.*, Ser. B, 5, 96 pp.
- Michelsen, O. & Nielsen, L. H., in press: Structural development of the Fennoscandian Border Zone, offshore Denmark, *Mar. Petrol. Geol.*
- Nielsen, L. H. & Japsen, P., 1991: Deep wells in Denmark 1935-1990. Lithostratigraphic Subdivision, *Danm. geol. Unders.*, Ser. A, 31, 179 pp.
- Nielsen, O. B., 1979: A sedimentological mineralogical investigation of the Tertiary sediments from the borehole M-2X in Central Trough, North Sea, *Danm. geol. Unders.*, Årbog, 41-50.
- Nielsen, O. B., Sørensen, S., Thiede, J. & Skarbo, O., 1986: Cenozoic differential subsidence of North Sea, *AAPG Bull.*, 70, no. 3, 276-298.
- Pedersen, G. K., 1985: Thin, fine-grained storm layers in a muddy shelf sequence: an example from the Lower Juras-

- sic in the Stenlille 1 well, Denmark, *Journ. geol. Soc. Lond.*, 142, 357-374.
- Rasmussen, E. S. & Larsen, O. H., 1989: Mineralogi og geokemi af det Øvre Miocene Gram ler, *Danm. geol. Unders.*, Ser. D, 7, 80 pp.
- Rasmussen, H. W., 1970: *Danmarks geologi*, 176 pp. København: Gjellerup.
- Scherbaum, F., 1982: Seismic velocities in sedimentary rocks - indicators of subsidence and uplift?, *Geologische Rundschau* 71, no. 2, 519-536.
- Spjeldnæs, N., 1975: Paleogeography and facies distribution in the Tertiary of Denmark and surrounding areas. *Nor. geol. Unders. Bull.*, 316, 289-311.
- Ter-Borch, N., 1990: Geological map of Denmark. Structural map of top Chalk Group, *Danm. geol. Unders.*, map Ser., 7, 1:500,000, 2 pp. og 1 kort.
- Thomsen, E., 1980. Rank of coal and dispersed organic matter in Rhaetian - Jurassic - L. Cretaceous deposits from the onshore part of the Danish Subbasin: Interpretation and implications for the maturity of potential hydrocarbon source rocks (licentiat afhandling), 265 pp, Århus: Aarhus University.
- Thomsen, E, Damtoft, K., & Andersen, C., 1987: Hydrocarbon plays in Denmark outside the Central Trough, in J. Brooks & Glennie, K. (eds.), *Petroleum Geology of North West Europe*: Graham & Trotman, 375-388.
- Thorne, J. A., & Watts, A. B., 1989: Quantitative analysis of North Sea subsidence, *AAPG Bull.*, 73, no. 1, 88-116.
- Ziegler, P. A., 1990: *Geological atlas of western and central Europe*. 239 pp. og 56 bilag, Bath: Geological Society Publishing House.