

## Molerområdets geologi

En præsentation af geologiske landvindinger  
opnået gennem studier af Fur Formationen

Stig A. Schack Pedersen & Gunver Krarup Pedersen

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR  
DANMARK OG GRØNLAND, KLIMA- OG ENERGIMINISTERIET

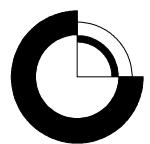


G E U S

## Molerområdets geologi

En præsentation af geologiske landvindinger  
opnået gennem studier af Fur Formationen

Stig A. Schack Pedersen & Gunver Krarup Pedersen



# Molerområdets geologi

En præsentation af geologiske landvindinger  
opnået gennem studier af Fur Formationen

Stig A. Schack Pedersen & Gunver Krarup Pedersen



# Indholdsfortegnelse

<b>FORORD .....</b>	<b>2</b>
<b>MOLER I KLINTER OG BAKKER, INDSIGT OG UDSIGT.....</b>	<b>2</b>
<b>LOKALITETERNE.....</b>	<b>6</b>
<b>MOLERETS HISTORIE - OVERSIGT OVER TIDLIGERE GEOLOGISKE ARBEJDER .....</b>	<b>9</b>
<b>MOLERETS FORMELLE STRATIGRAFISKE PLACERING .....</b>	<b>16</b>
<b>LITOSTRATIGRAFI.....</b>	<b>16</b>
<b>FUR FORMATIONEN.....</b>	<b>18</b>
<b>ØLST FORMATIONEN .....</b>	<b>19</b>
<b>Stolleklint Ler .....</b>	<b>19</b>
<b>RØSNÆS LER FORMATIONEN .....</b>	<b>20</b>
<b>FUR FORMATIONENS SEDIMENTOLOGI .....</b>	<b>21</b>
<b>Moler (diatomit).....</b>	<b>21</b>
<b>Vulkanske aske.....</b>	<b>22</b>
<b>Cementsten .....</b>	<b>23</b>
<b>Krystaller af glendonit – pseudomorfoser efter ikait? .....</b>	<b>23</b>
<b>Anoxiske perioder .....</b>	<b>24</b>
<b>FOSSILERNE I FUR FORMATIONEN .....</b>	<b>25</b>
<b>FUGLE.....</b>	<b>26</b>
<b>SKILDPADDER.....</b>	<b>27</b>
<b>FISK.....</b>	<b>28</b>
<b>INSEKTER .....</b>	<b>29</b>
<b>PLANTER .....</b>	<b>30</b>
<b>INVERTEBRATER (HVRVELLØSE DYR).....</b>	<b>31</b>
<b>DIATOMER .....</b>	<b>32</b>
<b>DINOFLAGELLATER.....</b>	<b>34</b>
<b>SPORER OG POLLEN .....</b>	<b>34</b>
<b>AFLEJRINGSMiljøET .....</b>	<b>35</b>
<b>VULKANSKE ASKELAG I FUR FORMATIONEN.....</b>	<b>38</b>
<b>Opdagelsen af askelagene .....</b>	<b>38</b>
<b>Kilden til askelagene .....</b>	<b>39</b>
<b>Korrelation ved hjælp af askelag .....</b>	<b>39</b>
<b>EN VARM HISTORIE – ET KLIMASKIFT PÅ PALEOCÆN–EOCÆN GRÆNSEN.....</b>	<b>41</b>
<b>PETM (Paleocene Eocene thermal maximum) .....</b>	<b>41</b>
<b>CIE i Danmark .....</b>	<b>42</b>
<b>MOLERKLINTERNES STRUKTURGEOLOGI - ET GLACIALTEKTONISK VÆRKSTED.....</b>	<b>44</b>
<b>KOMPARATIV ANALYSE – MOLERKLINTERNE UNIKKE VÆRDI .....</b>	<b>48</b>
<b>OPSUMMERING AF MOLERKLINTERNES GEOLOGI .....</b>	<b>48</b>
<b>KOMPARATIV ANALYSE, SAMMENLIGNING MED ANDRE LOKALITETER .....</b>	<b>49</b>
<b>DEN 60 M TYKKE FUR FORMATION FRA TIDLIG EOCÆN.....</b>	<b>50</b>
<b>FUR FORMATIONEN – ET LAGER FOR ASKE FRA DEN NORDATLANTISKE VULKANPROVINS .....</b>	<b>51</b>
<b>FUR FORMATIONEN SOM FOSSIL LAGERSTÄTTE .....</b>	<b>52</b>
<b>INSEKTERNE I FUR FORMATIONEN I INTERNATIONALT PERSPEKTIV .....</b>	<b>54</b>
<b>FOSSILE PLANTER OG KLIMAUDVIKLING .....</b>	<b>54</b>
<b>KLIMAFORANDRING VED PALEOCÆN–EOCÆN GRÆNSEN .....</b>	<b>54</b>
<b>DET GLACIALTEKTONISKE LANDSKAB VED LIMFJORDEN .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERENCER VEDRØRENDE FUR FORMATIONEN.....</b>	<b>57</b>
<b>APPENDIX .....</b>	<b>71</b>

## Forord

Denne rapport indeholder et sammendrag af de videnskabelige studier og undersøgelser, som berører Fur Formationens geologi og molerklinternes opbygning. Rapporten er blevet til på foranledning af Morslands Historiske Museum.

Sammenfatningen er baseret på forfatternes arbejde gennem 40 år og på publicerede studier af moleret. Ved sammenskrivningen har forfatterne også trukket på notater fra Niels Bonde, Claus Heilmann-Clausen, Bent Lindow, Jes Rust, Bo Pagh Schultz og Michael Strey. Deres notater er udarbejdet i 2010–2011, som bilag til ansøgningen om at optage molerklinterne på UNESCOs Verdensarvsliste. Notaterne er vedføjet denne rapport som appendix.

## Moler i klinter og bakker, indsigt og udsigt

De gule klinter langs kysten af den vestlige del af Limfjorden hører til Danmarks smukkeste landskaber. Klinterne er geologisk set en meget ung dannelse. De blev først udformet, da den globale havspejlsstigning for ca. 8 000 år siden oversvømmede det nordvestjyske dal-landskab, og bølgeerosionen begyndte at gnave i øernes kyster. Efterhånden som der aflejredes sand imellem flere af øerne og forbindelsen ud til Vesterhavet blev afsnøret af strandvolde blev Limfjorden etableret som et forgrenet fjordsystem (Gry 1979, Pedersen & Petersen 2002). I dag sørger den friske blæst over Limfjordens vande for, at bølgeerosionen langs kysten får molerklinterne til at fremstå med friske snit i de geologiske lag, der opbygger bakkelandet. Indsigten i mulerklinterne fra Ertebølle og Fur i øst til Mors og Silstrup mod vest er fyldt med geologiske fænomener, hvis sidestykke ikke findes magen noget andet sted i verden (Gry 1940, 1965; Aber, Croot & Fenton 1989; Andersen & Sjørring 1992; Pedersen, Pedersen & Noe 1994; Clint & Pedersen 1995, Larsen, Fitton & Pedersen 2003; Heilmann-Clausen & Surlyk 2006; Bonde, Andersen, Hald & Jakobsen 2008; Larsen & Sørensen 2010, Pedersen 2011).

De stejle kystklinter med deres isfoldede ler- og sandlag er en karakteristisk egenart ved det danske landskab, som kun findes meget få steder i verdenen. Det specielle ved isfoldede lag er, at det ikke blot er aflejringer fra istiden, som er skubbet op i bakkedrag, men lagserier fra millioner af år før både istid og vor egen tid er fra dybet flyttet op til overfladen, hvor man i dag kan studere dem. Hvis ikke isen havde foldet de geologiske lag op i bakkedrag, ville vi i dag kun kende de ældre geologiske lags eksistens gennem dybe boringer og ikke fra de instruktive tværsnit, der er blottet i klinterne. Så når man står på toppen af de isopskubbede bakker, har man ikke alene en storstået udsigt, det være sig fra Salgjerhøj

på Mors eller Bette Jens' Høj på Fur, men man står tillige på toppen af en geologisk sammenhæng, som strækker sig over adskillige geologiske discipliner, som rækker adskillige millioner af år tilbage i tiden, og som rummer vidnesbyrd, der giver indsigt i globale miljø-forandringer.

Hvad er det så for geologiske indsigter, man bliver præsenteret for i molerklinterne? Først og fremmest er det den geologiske hoveddisciplin stratigrafi. I hver klint ligger de geologiske lag oven på hinanden i stratigrafisk orden, hvor 180 askelag kan opmåles, og de enkelte lag kan genkendes fra klint til klint, fra den ene Limfjords-ø til den anden. Indsigtten i stratigrafisk orden og demonstration af metoden korrelation, som betyder at en lagserie et sted kan genkendes et andet sted, og at en lagserie, som ligger under en bestemt horisont på en klint, nødvendigvis må være ældre end en lagserie, som ligger over samme horisont i en anden klint. Denne indsigt kan man umiddelbart indse og forstå ved at opsøge et udvalg eller alle molerklinterne i det vestlige Limfjordsområde. Et væsentligt element i stratigrafi er opstilling af formationer, herunder tillige at navngive sammenhængende lagserier. For molerets vedkommende er dette opfyldt ved at enheden af askelagsførende leret diatomit er opkaldt efter øen Fur, altså Fur Formation, med typelokalitet på øens smukkeste klint, Knu-deklin, på øens nordvest spids (Pedersen & Surlyk 1983).

Tæt op ad læren om stratigrafi ligger læren om sedimentologi, som fokuserer på at forstå aflejringsprocesserne. Hvordan bliver de enkelte lag afsat, og hvorfor er nogle lag smukt planparallel lagdelt, mens andre forekommer at være rodet sammen? Nogen vil hævde, at palæontologi ligger lige så tæt op ad stratigrafi som sedimentologi. Især mikropalæontologien, læren om de mikroskopiske livsformer og deres udvikling gennem tiden, er tæt forbundet til stratigrafi, da forekomsten af bestemte arter kan bidrage til bestemmelse af de geologiske lags alder. For molerets vedkommende er mikropalæontologien dog lige så stærkt forbundet til sedimentologien, idet to tredjedele af moleret består af diatomeer, som er mikroskopiske alger. Moleret karakteriseres derfor geologiske set som en diatomit, altså en bjergart, hvor mere en halvdelen består af diatomeer.

Den anden del af palæontologien er makropalæontologien, der i moleret er imponerende rigt repræsenteret (Bonde et al. 2008). Man kan ligefrem sige, at moleret er en fossil lagerstätte, altså en særlig rig forekomst af fossiler (forsteninger og aftryk af fortidige dyr og planter). Det vrangler med fiskefossiler og andre havdyr, der er fundet sjældne eksemplarer af eksotiske skildpadder, adskillige rester og nogle få så godt som hele skeletter af fugle, en myriade af insekter, forstenet træ forekommer både som stammer og rodstubbe. Der er repræsenteret fossiler af samlevende livsformer, der viser at de insekter og fugle, som fløj omkring i landområdet omkring moler-havet, svarer nøje til de plantefossiler, som dokumenterer den vegetation, der eksisterede i det skandinaviske landområde for 55 mill. år siden. En økologisk sammenhæng af hele naturområdet i den tidlige eocæne periode er i

en så sjælden grad repræsenteret, at det fremstår som en miljø- og klimareference for den globale udvikling i det nordatlantiske område (Heilmann-Clausen & Surlyk 2006, Bonde et al. 2008).

Men udviklingen af det nordatlantiske område er endnu mere fascinerende repræsenteret gennem petrologien, læren om sten og deres sammensætning. Specielt er det læren om magmapetrologien, der hæver molerets vulkanske askelag op i et niveau af international agtpågivenhed. Den tidligste opbrydning af riftzonen mellem Østgrønland og shelfen ud for Norges vestkyst var en dramatisk tektonisk og vulkansk begivenhed, som gennem de seneste 25 års forskning endelig har fundet plads i en tilfredsstillende forståelsesramme. Samtidig med at man fik kortlagt oceanbunden i Nordatlanten, og gradvis kunne tilbageføre landområderne til en oprindelig position før spredningen, giver askelagene i Fur Formationen det først vidnesbyrd om udviklingsrækkefølgen ved Nordatlantens fødsel (Pedersen, Rønsbo & Engel 1975). Da den geokemiske identifikation af de vulkaner, hvorfra asken stammen, blev kortlagt, fremstod efterfølgende et imponerende billede af den Nordatlantiske vulkanprovins (Larsen et al. 2003). Dette samspil ville aldrig kunne være fremstillet, hvis ikke de velbevarede vulkanske askelag i Fur Formationen havde været tilgængelige i molerklinterne på Mors og Fur. Spekulationerne om de forskellige askelags sammensætning og relationen til de intrusive centre, de stammer fra, inddrager undersøgelser og modeller for jordens kappes udvikling og energitransport til jorden skorpe.

Tektonik og strukturgeologi er to tæt forbundne discipliner. Fra Nordatlantens udvikling bevæger vi os til den lokale salttektonik under molerklinterne, og endelig bliver strukturerne, som ses i de talrige klinter, forklaret gennem glacialtektonikken. Når man står ved Hanklit eller Skærbæk Klint på Nordmors, er det forbavsende at tænke sig, at lige ovre på den anden side af Thisted Bredning ligger der kalk og kridt i samme niveau, som moleret i klinterne. Kalk og kridt er fra Danien og Kridt tiderne, adskillige millioner af år ældre end moleret. Grunden til at det nu er hævet op i samme niveau såvel ovre ved Thisted som ved Erslev inde midt på Mors er salttektonikken (Pedersen 2000). Fra en dybde af mere end 5 kilometer er salt fra Perm tiden (270 mill. før nu) presset op i diapier og puder, hvorved kalken oven over er blevet løftet op. Selve bevægelsen af saltet i undergrunden har været aktiv både før og efter aflejringen af moleret.

Denne irregulære strukturelle udvikling overpræges så endelig af glacialtektonikken (Pedersen 2000). Molerklinterne er verdensberømte for deres fremvisning af glacialtektoniske strukturer (Gry 1940, Aber et al. 1989, Klint & Pedersen 1995, Aber & Ber 2007). På en tør sommerdag står de sorte askelag frem som grafiske mønstre på baggrund af den hvide moler. Enhver kan se at lagene er foldet i syn- og antiklinaler. Hanklits markante overskydning med en foldet næse i spidsen af en mere end 250 m lang overskydning kan sammenlignes med en nappe i Alperne. Denne og lignende strukturer gør molerklinternes glacial-

tektonik sammenlignelig med strukturer i bjergkæder, og de geometriske mønstre og 3-D modeller, som kan opstilles for deformationerne af lagene i molerklinterne kræver den samme form for opmålingsteknik og konceptuelle begrebsverden, som anvendes ved studiet af bjergkædedannelser (Gry 1940, Pedersen 1987, Aber et al. 1989, Klint & Pedersen 1995, Pedersen 2000, 2005, 2011). Men når dette er sagt, må man også tilføje at glacialtektonikken tillige indeholder nøglen til at forstå glaciationerne som har påvirket det nordlige Danmark. Ved udredningen af de strukturelle mønstre forstår man de dynamiske forhold som herskede under istiden. Sammen med de glaciale aflejringer, som overlejrer moleret, er det nu dokumenteret at under den sidste istid (Weichsel) blev molerområdet først overskredet af den Norske Is, et isfremstød der for ca. 30.000 år siden fra Hardanger Vidda skred hurtigt ned over det nordlige Danmark. Kort tid efter at isen fra dette fremstød smelte tilbage til det nordlige Kattegat gled den Svenske Is frem mod Hovedopholdslinien (Houmark-Nielsen 1999, 2003, Houmark-Nielsen et al. 2006, Pedersen 2005, 2006). De to dynamiske begivenheder medførte tillige at man i molerets foldede strukturer finder interferensmønstre, som afspejler dobbeltfoldning, altså en tidlig foldning overpræget af en senere (Pedersen 1982, 2000).

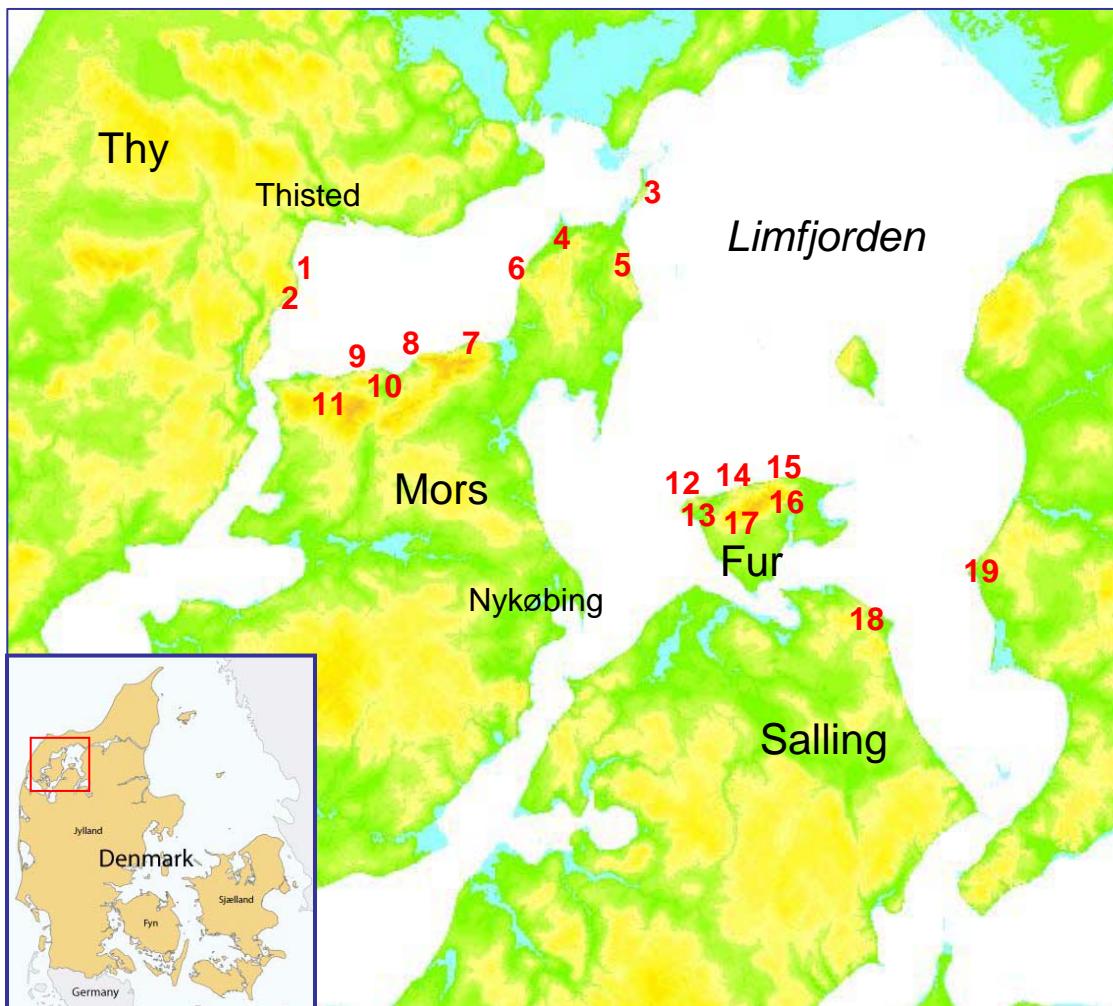
Med hele denne sammenfatning af geologiske videnskabers elementer kan det ikke undre, at moleret igennem adskillige årtier har været et yndet mål for kurser i geologi. De fleste geologer uddannet ved de danske universiteter, har fået deres indsigt i geologi igennem feltkurser til molerklinterne. Adskillige studenter har skrevet speciale eller bacheloropgaver om molerets geologi. Molerområdet er desuden velbesøgt af geologer fra universiteter i det nordlige Europa, ligesom moleret er et velkendt referenceområde for oliegeologer, der efterforsker gas- og oliefelter i Nordsøen. Molerklinterne er et geologisk skatkammer, hvor stadig nye opdagelser og fossilfund dukker op, som kaster nyt lys over Nordeuropas geologiske udvikling.



**Figur 1.** Hanklit set fra Gullerup strand. Den blottede kystklin fremviser et perfekt tværsnit gennem det glacialmorphologiske landskab, der er på Nordmors er karakteriseret af lange parallele randmorænebakker.

## Lokaliteterne

Molerområdet omfatter kystklinterne langs Limflorden fra Silstrup Hoved og Nordmors mod vest til Fur og Ertebølle mod øst (Fig.1). En systematisk oversigt over de lokaliteterne, der er omfattet af interesseområdet, er givet herunder:



**Figur 2.** Kort over beliggenheden af lokaliteterne i molerområdet. De røde numre svarer til lokalitetsnumrene anvendt i Tabel 1. Oversigtskortet i nederste venstre hjørne angiver molerområdets beliggenhed inden for den røde ramme i det nordvestlige Danmark.

Lokalitet	Nr.	Beskrevet af	Bemærkninger
Silstrup 'Firkanten'	1	Bøggild (1918) Gry (1940) Pedersen & Surlyk (1983) Møller (2010)	Østvendt kystklint i Thy. Overskydningkontakt til Bregninge Formationen (Oligocæn).
Silstrup 'Sydklint'	2	Bøggild (1918) Pedersen & Surlyk (1983) Heilmann-Clausen (1997)	Østvendt kystklint i Thy. Lokalitet med de øverste askelag. Afleringskontakt mellem Fur og Bregninge Formationerne.

Feggeklit	3	Bøggild (1918) Gry (1940, 1979) Pedersen & Surlyk (1983) Espersen (1994) Pedersen (1996) Hundahl (1997) Houmark-Nielsen (1999, 2003) Drøhse (2011)	Østvendt kystklint på nordspidsen af Mors. Typelokalitet for 'glaciotectonites'. Tæppefolder.
Skarrehage molergrave	4	Gry (1940, 1979) Pedersen & Surlyk (1983) Pedersen (1982, 1989, 2000, 2005b, 2006, 2009) Pedersen & Petersen (1986)	Molergrave på det nordvestlige Mors. Der har været gravet moler i næsten 100 år. Molergravene efterbehandles under hensyntagen til Moler-museets ønsker om formidling.
Ejerslev Molergrav og kystklint	5	Bøggild (1918) Gry (1940, 1979) Pedersen & Surlyk (1983) Pedersen (1992a, 1993, 1996, 2000b, 2002a, 2004, 205a, 2008b) Houmark-Nielsen et al. (2006: Fig. 13-15) Pedersen & Platen (2007b)	Molergrav på det nordøstlige Mors. Der har været gravet moler i næsten 100 år. Molergravene efterbehandles under hensyntagen til rekreative værdier (lystbådehavn m.m.).
Harhøj		Pedersen & Surlyk (1983) Pedersen (1998)	Efterbehandlet molergrav tæt ved Ejerslev.
Skærbæk Klint	6	Bøggild (1918) Gry (1940, 1979) Pedersen & Surlyk (1983) Korsager (2002) Houmark-Nielsen (2003)	Vestvendt kystklint på Nordmors. Klinten indeholder også sort, oligocænt ler, samt kvar-tærgelogiske lagserier tilbage til Saale.
Salgerhøj	7	Bøggild (1918) Håkansson & Sjørring (1982)	Højeste punkt på Mors. Ved kystklinnen nord for findes foldede lag, som også står frem i havbunden.
Hanklit	8	Bøggild (1918) Gry (1940) Klint & Pedersen (1995) Houmark-Nielsen (1999, 2003)	Vestvendt kystklint på Nordmors. Tværsnit gennem Salgerhøj randmorænekompleks. Største glacialtektoniske forståetning.
Svalklit	9	Pedersen & Petersen (1985)	Nordvendt kystklint.

Gullerup molergrav	10	Gry (1940) Pedersen & Platen (2007a) Pedersen (2008b)	Nedlagt molergrav på Nordmors, nu tilvokset.
Sundby, Klitgård og Stærhøj	11	Gry (1940) Pedersen & Petersen (1985) Pedersen & Platen (2007a) Pedersen (2008b)	Delvis efterbehandlede molergrave på Nordmors. Randmorænestrøg.
Fur Knudeklint	12	Bøggild (1918) Gry (1940, 1965) Pedersen & Surlyk (1983) Heilmann-Clausen (1982) Heilmann-Clausen et al. (1985)	Nordvestvendt kystklint på Fur. Omfatter 'Knudefolderne' (Gry 1940). Typelokalitet for Fur Formationen. Fundsted for skildpadder og tarponer.
Knuden, molergrave	13	Gry (1940) Pedersen & Jakobsen (1993)	Nedlagte molergrave på det nordvestlige hjørne af Fur. Efterbehandlet til rekreative formål.
Fur Stolleklint	14	Bøggild (1918) Gry (1940, 1965, 1979) Pedersen & Surlyk (1983)	Nordvendt kystklint på Fur. Typelokalitet for Stolleklint Ler, som er aflejret under PETM.
Fur Østeklint	15	Bøggild (1918) Gry (1940) Andersen & Sjørring (1992)	Nordvendt kystklint på Fur.
Færker molergrav	16	Gry (1940)	Tilgroet molergrav på østlige Fur.
Molergrave, centrale Fur	17	Gry (1979) Pedersen & Surlyk (1983) Pedersen (1992b, 2000a, 2002b)	Aktive molergrave, som efterbehandles løbende med henblik på rekreative formål. Indeholder bl.a. 'Bispehuen', eksempel på normalforkastning.
Junget	18	Pedersen & Surlyk (1983) Jakobsen et al. (1994)	Tilgroet molergrav på nordøstlige Salling.
Ertebølle	19	Bøggild (1918) Gry (1940) Pedersen & Surlyk (1983)	Vestvendt kystklint i Himmerland. Typelokalitet for køkkenmøddinger fra Ertebøllekulturen (Ældre stenalder, Mesolithikum).

**Tabel 1.** Skematisk oversigt over lokaliteterne i molerområdet. Numrene angivet efter lokalitetsnavnet svarer til numrene på kortet Fig. 1.

# Molerets historie - oversigt over tidligere geologiske arbejder (før 1975)

Den historiske oversigt over molerets geologi starter ved begyndelsen af 1800-tallet og går frem til midten af 1970-erne. Denne oversigt er ordnet kronologisk, fordi det er mere entydigt end en emnemæssig gennemgang. Konsekvensen er at emner som Fur Formationens geologiske alder, litostratigrafi, fossilindhold, vulkanske askelag m.v. kommer flere gange efter hinanden. For ikke at forveksle moleret som diatomit med formationen, der indeholder både diatomeer, ler, askelag og cementsten er der i den følgende beskrivelse brugt det formelle navn: Fur Formationen.

Den første geologiske beskrivelse af Fur Formationen gives af Forchhammer (1835), men Fur Formationen havde inden da været undersøgt for kulforekomster, idet regeringen i 1809 lod foretage borer, ligesom man i Fur Stolleklint lod krigsfanger grave en 120 fod lang stolle ind i klinten uden dog at finde kul. Forchhammer (1835) opstillede "Moeformationen" indeholdende følgende bjergarter: sort plastisk ler (nederst); hvidt skifrigt ler (moler); sort meget løs kulholdig sandsten; hydraulisk kalk; sort sandrig kalksten; løs brun sandsten (øverst). Forchhammer (1835) tolkede "Moeformationen" som en ferskvandsaflejring, idet han mente, at insektfossiler snarere forekommer i lakustrine end i marine aflejringer, og idet han bestemmer de fossile fisk som ferskvandsformer.

At moleret er opbygget af marine diatomeer fremgik af en undersøgelse af Heiberg (1863). [Dette er fortsat opfattelsen, se Fenner 1994]. Diatomefloraen blev yderligere undersøgt af Printz & van Ermengem (1883) og Printz (1885), og ved disse undersøgelser blev den sorte, kulholdige sandsten (Forchhammer 1835) endvidere for første gang korrekt identificeret som vulkansk aske. Askelagenes sammensætning og deres graderede lagdeling blev beskrevet og tolket af Printz (1885), hvis undersøgelser blev refereret af Bøggild (1903). Han mente, på grundlag af sine indledende undersøgelser, at hvert askelag repræsenterer ét vulkanudbrud (Bøggild 1903). [Dette er fortsat opfattelsen, se Larsen et al. 2003].

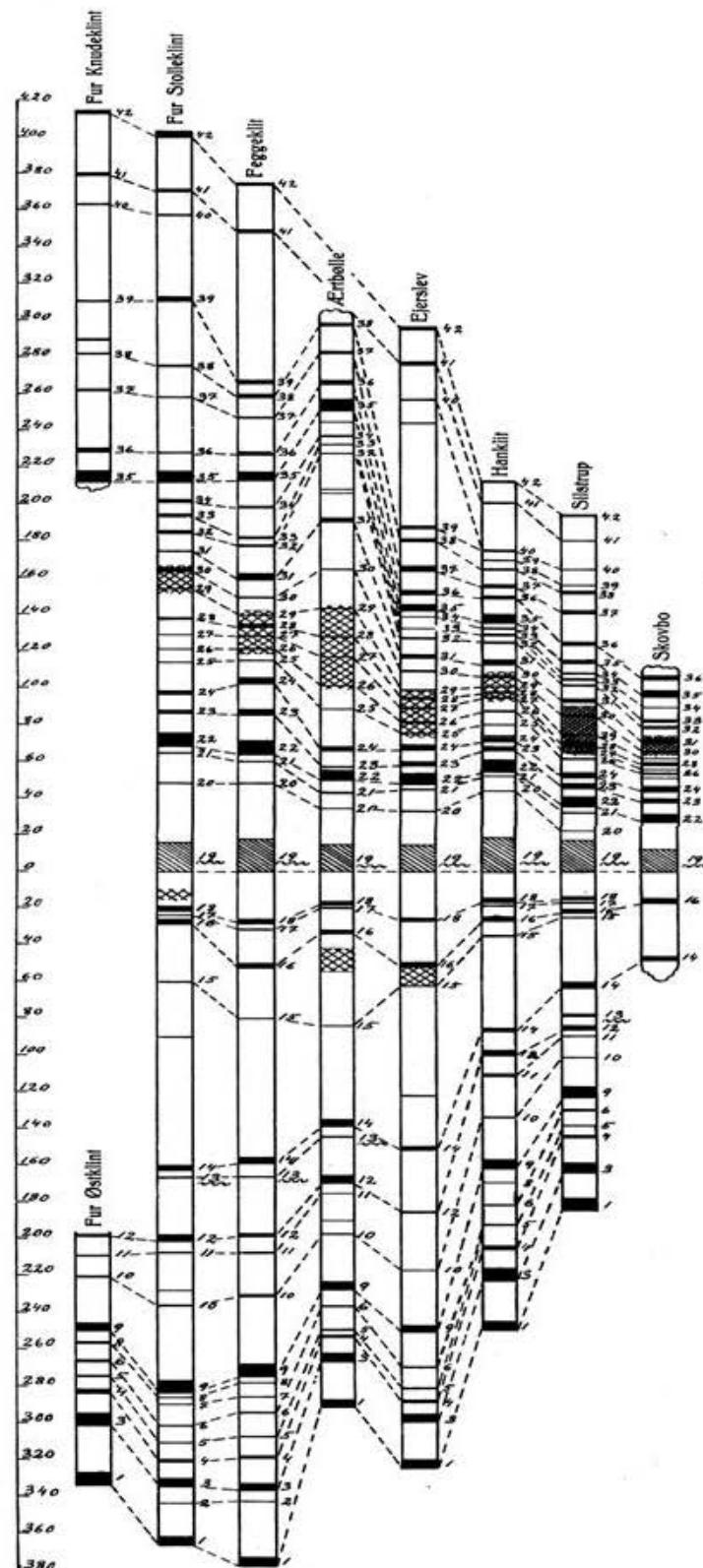
Fur Formationen korreleredes med det eocæne Londonthon af Stolley (1899) på grundlag af molerets diatomeflora samt sneglen *Cassidaria* og planten *Daphnogene Kanei* (Heer). Ravn (1897, 1906, 1907) beskæftigede sig med Fur Formationens alder og konkluderede, at den sandsynligvis er oligocæn, fordi Fur Formationen i Silstrup Sydklint overlejes af mørkt glimmerler, der inderholder oligocæne mollusker.

Bøggild (1903) mente, at Fur Formationen og "de moler lignende lag" er yngre end det plastiske ler. Dette blev fastholdt af Ussing (1904), der ligesom Ravn (1906, 1907) mente, at Fur Formationen er oligocæn.

Grönwall (1908) beskrev en boring fra Samsø, hvor gråt kalkfattigt ler overlejrer Kertemin-demergel. Han adskilte dette ler fra det plastiske ler, til hvilket det tidligere havde været henført (Ravn 1907). Da vulkansk aske endvidere på dette tidspunkt var observeret adskil-lige steder i Danmark og Nordtyskland daterede Grönwall (1908) vulkanismen til Nedre Eocæn og placerede Fur Formationen stratigrafisk mellem gråt, paleocænt ler og plastisk, eocænt ler. [Denne opfattelse er i overensstemmelse med den nyeste litostratigrafi, se Schiøler et al. 2007: Fig. 2)].

På grundlag af indledende undersøgelser af de vulkanske askelag fastslår Bøggild (1903), at hvert askelag repræsenterer et vulkanudbrud, at askelag tillige findes ved Mariager og omkring Lillebælt og at vulkanerne har ligget i nærheden af Thy, men derimod næppe i Skåne. Ussing (1904) satte vulkanismen i forbindelse med den udbredte tertiære vulkanisme i Nordatlanten og gjorde opmærksom på, at de enkelte askelag i moleret kan følges over store afstande. [Denne opfattelse er i overensstemmelse med de seneste undersøgel-ser af askelagene og den nordatlantiske vulkanprovins, se Larsen et al. 2003]. Ussing be-skrev fossilerne fra Fur Formationen og fortsatte: "Af disse forskellige organiske Levninger slutter man, at Moleret maa være aflejret ikke langt fra en Kyst og i roligt Vand, maaske i en lun Havbugt" (Ussing 1904: side 148).

I en beskrivelse af Fur Formationens flora gengav Hartz (1909) de lister over arter og varie-teter af ditomeer, som var opstillet af Heiberg (1863) og Stolley (1899). Hertil føjede han detaljerede beskrivelser af en række plante makrofossiler heriblandt flere blade af planten *Daphnogene Kanei* (Heer), som Hartz foreslog burde betegnes *Cocculites Kanei* (Heer). Dette plantefossil viser entydigt at Fur Formationener af tidlig eocæn alder (Hartz 1909).



**Figur 3.** Den ene af i alt 7 tavler som Bøggild (1918) publicerede i DGUs II Rk. Under opmålingen og laboratoriearbejdet blev han professionelt hjulpet af magister Karen Callisen, som dog kun takkes kort i indledningen. Bemærk at den her gengivne tavle viser den detaljerede opmåling og nummerering omkring askelag +19, der forståligt nok blev brugt som referencehorisont.

I monografien "Den vulkanske aske i Moleret" beskrev Bøggild (1918) askelagenes kemi-  
ske og mineralogiske sammensætning, deres farver og øvrige kendtegn. Han nummere-  
rede 179 askelag af 1–20 cm tykkelse og viste, at askelagene kan identificeres fra lokalitet  
til lokalitet i Nordjylland. En detaljeret opmåling viste, at askelagenes tykkelse er meget nær  
konstant fra lokalitet til lokalitet, mens der er nogen variation i tykkelsen af det mellemlig-  
gende moler. Bøggild påpegede, at cementstensdannelsen er knyttet til de samme niveauer  
på alle lokaliteterne, og at cementstensdannelsen derfor kan sættes i forbindelse med  
primære sedimentære forhold, muligvis med en ekstra tilførsel af kalkskallede mikrofossiler  
til sedimentet. [[Nyere undersøgelse af cementsten underbygger denne tolkning, se Pedersen & Buchardt 1996](#)].

Harder (1922) og Rosenkrantz (1924) foretog inddelinger ad Danmarks ældre Tertiær og  
begge henførte Fur Formationentil Londonien etagen, som de i overensstemmelse med  
dagældende fransk opfattelse anså for at repræsentere yngre Paleocæn. I modsætning  
hertil fremhævede Gry (1935), at de askeførende fede lerbjergarter i hele deres litologiske  
karakter snarere minder om eocæne end om Paleocæne bjergarter.

Henriksen (1922) beskrev insekterne fra Fur Formationen og fandt at de repræsenterer en  
strandeng-fauna. Han konkluderede, at det eocæne klima har været tropisk med en gen-  
nemsnitstemperatur 10° højere end i dag. [[Denne opfattelse støttes i dag og betegnes PETM, se Schmitz et al. 2004](#)]. Man anså, ligesom Ussing (1904), moleret for at være aflej-  
ret i en lagune i kort afstand fra kysten (Henriksen 1922).

Andersen (1937a) opmålte de vulkanske askelag udenfor molerområdet og viste, at aske-  
lagene kan korreleres inden for Danmark, og at de muligvis kan korreleres med askelag i  
Nordtyskland (Andersen 1938). Isopachkort for enkelte karakteristiske askelag pegede på,  
at asken stammer fra et vulkanområde i Skagerrak. Andersen (1937b) diskuterede i hvilket  
omfang diatomeproduktionen og dermed sedimentationshastigheden af moleret har været  
afhængig af den vulkanske udbrudsaktivitet. Da der ikke foreligger absolutte mål for sedi-  
mentationshastigheden af moleret foretog Andersen (1937b) en sammenligning med ler-  
sedimentationen ved Helgenæs, og han fandt, at diatomeproduktionen aftog med stigende  
udbrudshyppighed.

Norin (1940) undersøgte kornstørrelsесfordelingen i askelag +101 på Fur og på Helgenæs.  
Ved hjælp as Stoke's Lov beregnede han, at asken stammer fra en vulkan beliggende 164  
km fra Fur, sandsynligvis i Skagerrak.

Andersen (1944) diskuterede Fur Formationens placering i forhold til grænsen mellem Pa-  
leocæn og Eocæn. Han anførte, at Fur Formationen underlejres af gråt paleocænt ler og  
overlejres af plastisk eocænt ler, men Fur Formationens eocæne alder kun er bestemt af  
planten *Coccilites Kanei* (Heer) (Hartz 1909). Andersen (1944) ville gerne placere Paleo-  
cæn/Eocæn-grænsen ved askelag +1, men da dette næppe er muligt fremhævede han, at

grænsen ville være mere entydigt fastlagt ved toppen af den askeførende serie, hvor askelagene ligger tæt, i modsætning til grænsen ved begyndelsen af den askeførende serie, idet de nederste askelag er tynde og forekommer med stor afstand, således at de er svære at identificere i boringer.

Ved sammenligning med recente diatomitter fandt Andersen (1944), at moleret må være aflejret på ca. 2000 m vand, muligvis under stagnerende betingelser. Diatomefloraen var betinget af en indstrømning af næringsrigt vand fra Atlanterhavet over en undersøisk barriere i Den engelske Kanal (Andersen 1944).

Fur Formationen er blottet i dislocerede flager over- og underlejret af tertiære og kvartære aflejninger. Gry (1940, 1965, 1979) beskrev de tektoniske forhold for de enkelte lokaliteter og nævnte følgende karakteristiske træk: molerflagerne viser hyppigst asymmetriske folder med den stejleste flanke mod syd. Foldeakserne er horisontale og folderne er dannet ved et tangentielt tryk mod en vandret liggende lagserie (Gry 1940). Foldeaksernes retning er sammenfaldende med randmoræneretningerne på Fur og Nordmors, og deformationerne i Fur Formationener forårsaget af et istryk fra N-NØ (Gry 1940).

Samtidig med den tektoniske undersøgelse foretog Gry en opmåling af "skiferserien" og fandt, at den ligger i den nedre del af molerserien mellem askelag -22 og -19 (Gry 1949). Rosenkranz (1944) foretog en opmåling af Silstrup Sydklint og konkluderede, at der er en overskydningskontakt mellem Fur Formationen og det overliggende glimmerler. [Dette er delvis i overensstemmelse med den seneste analyse af klinten, se Møller 2010].

Ved Ertebølle og Fur Knudeklint findes løse blokke af en speciel cementsten, som blev betegnet "Den stribede Cementsten". Dennes udseende og fossilindhold blev beskrevet af Andersen (1948), som tolkede den som sekundært aflejret af strømmende vand. Den stribede cementsten er beskrevet som faststående 60 cm over askelag -33 (Pedersen 1960).

Koch (1960) nævnte en række plantefossiler fra Fur Formationen og advarede mod at datere formationen ud fra planten *Macclintockia Kanei* (Heer)(Seard & Conway). Skeletrester af tre skildpadder og et fiskefossil blev beskrevet af Nielsen (1959, 1960, 1963), mens en oversigt over Fur Formationens fiskefauna blev publiceret af Bonde (1966). På basis af fiskenes morfologi, samt deres nærmeste nulevende slægtninges levevis tolkede han Fur Formationens sedimentationsområde: Klimaet var tropisk til subtropisk, vanddybden 50–500 m og fiskene pelagiske, oceaniske rovfisk. Da der mangler bundlevende fisk, såvel som en bundfauna af invertebrater, har Fur Formationens aflejringsmiljø muligvis været karakteriseret af stagnerende bundforhold (Bonde 1966). Rasmussen (1972) beskrev to sørstjerner og opstillede en ny art af slægestjerner fra Fur Formationen.

Miller (1969) publicerede SEM-billeder af diatomeer fra moleret, og Benda (1972) opstillede en foreløbig liste med 90 arter og varieteter af diatomeer fra moleret. Silicoflagellaterne i moleret er beskrevet af Perch-Nielsen (1976), som henfører Fur Formationen til én silicoflagellatzone, der opdeles i fem subzoner. På grundlag heraf dateres Fur Formationen til Øvre Paleocæn–Nedre Eocæn (Perch-Nielsen 1976). Undersøgelser af dinoflagellater støttede denne datering (Hansen 1979, Heilmann-Clausen 1982, 1985).

En bundprøve af en formodet faststående basaltisk post-jurassisk bjergart blev optaget i Skagerrak (Noe-Nygaard 1967), og støttede tidligere formodninger (Bøggild 1918, Andersen 1937a, Norin 1940) om et vulkanområde i Skagerrak.

Geofysiske undersøgelser i Skagerrak har vist to anomalier syd for henholdsvis Kristianssand og Kragerø. Sharma (1970) tolkede den førstnævnte som en vulkan, der formodentlig producerede en del af den vulkanske aske, man finder i de nedre tertiære danske sedimentter. Åm (1973) tolkede begge anomalier som tertiære magma-tilførselskanaler og beskrev anomalien syd for Kristianssand som en vulkan fra Perm, der blev genaktiveret i Tertiær (Åm 1973). Geofysiske data N–NØ for Skagen blev tolket som indikationer på sills i de mesozoiske sedimentter (Flodén 1973). Målinger af den remanente magnetisme i de vulkanske askelag i Fur Formationen viser tre reverst magnetiserede niveauer (Sharma 1969). På grundlag af gennemsnitlængden af normalt og reverst magnetiserede perioder skønnede han, at aflejringen af Fur Formationener skete indenfor 3 millioner år (Sharma 1969).

Den kemiske og mineralogiske sammensætning af de vulkanske askelag er undersøgt af Pedersen, Engell & Rønsbo (1975) og Rønsbo, Pedersen & Engell (1977). De skelnede fire perioder i den vulkanske aktivitet: (1) udbrud af subalkalin rhyolitisk aske fra centralvulkaner, som tillige kan have haft udbrud af tholeittisk basaltisk sammensætning, (2) aftagende vulkansk aktivitet og udbrud fra stærkt differentierede alkaline og peralkaline Ti-rige magmaer, (3) aske fra differentierede magmaer samt fra basaltiske magmaer, og endelig (4) den mest intense vulkanske aktivitet med mere end 110 askelag af Fe-Ti rig, tholeittisk sammensætning dannet under en regional upwelling af magma. Vulkanismen i det seneste stadium blev anset for at være en mindre og eksplosiv ækvivalent til den samtidige plateau-basalt-aktivitet i den øvrige del af Den nordatlantiske Basaltprovins (Pedersen, Engell & Rønsbo 1975). Jacqué & Thouvenin (1975) korrelerede den vulkanske aske i Fur Formationen med observationer af vulkansk aske i mere end 200 borer i Nordsøen og anså det for muligt, at det er de askelag, som kendes fra Danmark, som også findes i Nordsøen. De daterede ved hjælp af phytoplankton hovedfasen i den vulkanske aktivitet til sen Paleocæn.

En samlet beskrivelse af Fur Formationen med henblik på en tolkning af dens aflejringsmiljø blev givet af Bonde (1973, 1974). Bondes model indebærer at en SV-gående, vinddrevet overfladestrøm skaber en zone med upwelling og hermed gunstige livsbetingelser for

diatomeerne. Klimaet antages at have været subtropisk med tilstrækkelig årstidsvariation til at moleret kommer til at bestå af varv: lyse, diatomerige sommerlag og mørkere, mere lerholdige vinterlag. Med en gennemsnitlig sedimentationshastighed på 1 mm/år tolkedes molersedimentationen at have strakt sig over 60.000 år (Bonde 1973, 1974). Spjeldnæs (1975) diskuterede Fur Formationens sedimentationsmiljø og understregede, at der stort set mangler terrigent materiale i moleret. Dette kunne forklares ved at en mangrovelignende vegetation har filtreret alt grovkornet klastisk materiale fra (Spjeldnæs 1975).

Moleret er aflejret i et klima, som næppe har nogen nutidig økvivalent (Hoch 1975). Klimaet synes at have haft mindre temperatursvingninger og større nedbørsmængder end det kendes fra subtropiske områder i dag. Skovene har overvejende været stedsegrønne og der har muligvis været mangrovevegetation langs kysterne (Hoch 1975).

Vertebratfossilerne i Fur Formationen omfatter foruden fisk, flere skildpadder, et patte-dyrskranium, en ryghvirvel af en slange og 14 fuglefossiler (Hoch 1975). Fuglene synes alle at være landfugle, idet ingen af fundene viser træk karakteristiske for søfugle. Patte-dyrskraniet stammer formentlig fra et landdyr, skildpadderne levede i havet og slangen er en form, som fortinsvis har levet i ferskt og brakt vand (Hoch 1975). [\[Antallet af vertebratfossiler er i de forløben 35 år blevet forøget med en faktor 10\].](#)

Fur Formationen indeholder en del fossile insekter. Af disse beskrev Heie (1970) aphiderne, og to nye slægter af ordenen Mecoptera er beskrevet af Willmann (1977). Larsson (1975) gav en samlet oversigt over insekterne fra Fur Formationen og fremhæver følgende fælles træk: "Alle insekterne er af vingede stadier, og næsten alle kan betegnes som ret store, tungtflyvende insekter, mens virkelig gode flyvere og meget små insekter er stærkt underrepræsenterede. Dette viser at transporten af dette terrestriske faunaelement ud i "Molér-havet" er foregået med vindens hjælp. Insektfundene synes at repræsentere et område med engstrækninger med langsomme vandløb og stillestående vand og med krat og buskvækst, mens egentlige skovområder ikke kan erkendes ud fra insektaunaen" (Larsson 1975, side 208–209).

Denne oversigt dækker tidligere arbejder frem til omkring 1975. Oversigten viser, at en række vigtige observationer og tolkninger har stået næsten uændret siden 1800-tallet og starten af 1900-tallet. I de efterfølgende 35–40 år er der publiceret en lang række forskningsresultater om Fur Formationen og mange opmålinger er dokumenteret i tekniske rapporter. De sidste 25 år har bidraget med ny viden om sedimentologi, dateringer, et væld af data om fremragende fossiler samt dokumentation for askelagenes placering i dannelsen af Nordatlanten. Nedenfor præsenteres de vigtigste af disse resultater tematisk, ledsaget af de nugældende tolkninger af den tidlig eocæne palæogeografi, og Fur Formationens indplacering i det globale verdensbillede.

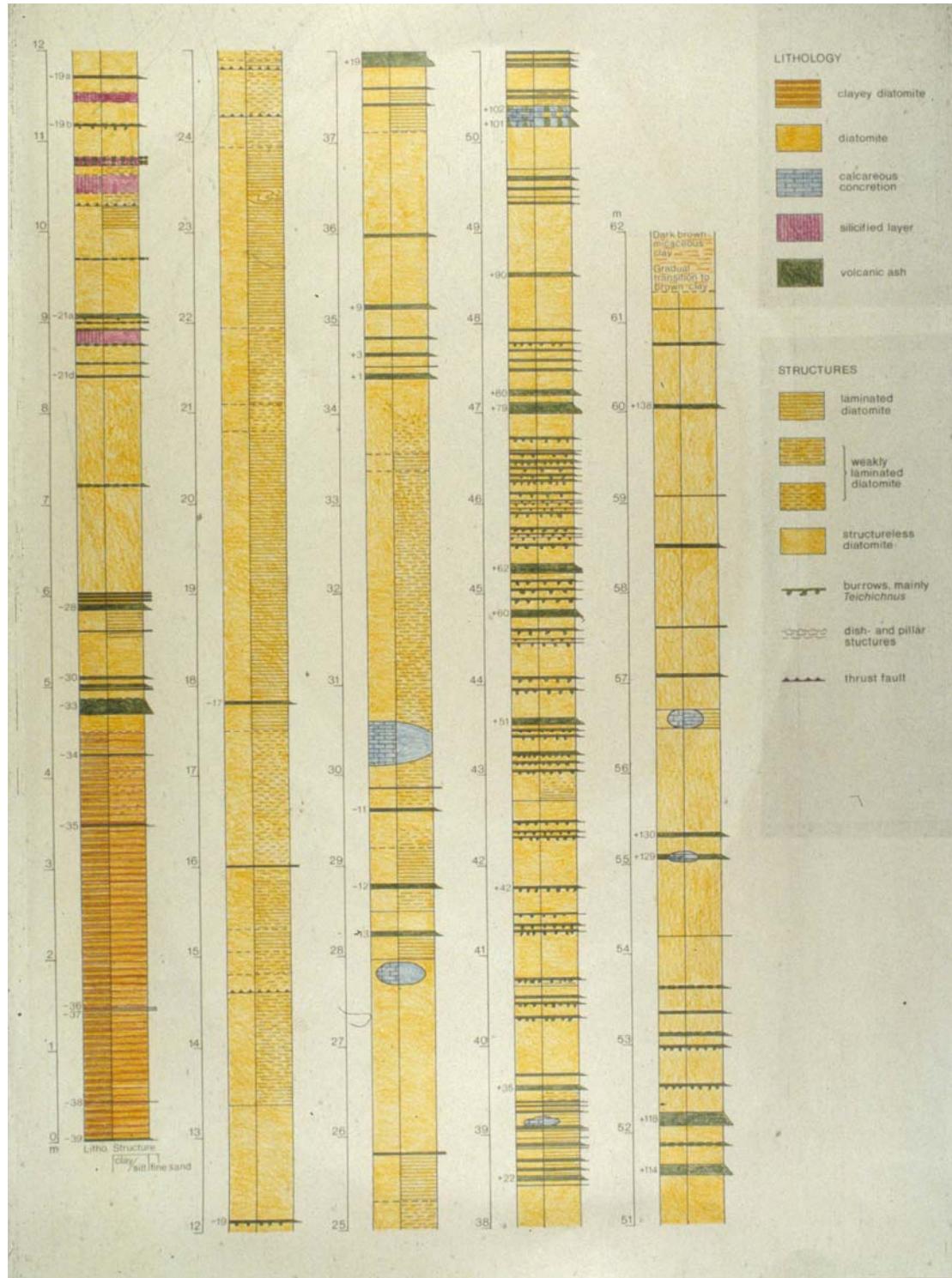
# Molerets formelle stratigrafiske placering

Den basale enhed i den litostratigrafiske klassifikation er en formation. For at opstille en formation er der et sæt spilleregler, som skal overholdes. Det vigtigste er, at formationens sedimenter er omhyggeligt beskrevet. Sedimenten kan beskrives ved deres partikler, lagdeling, sedimentære strukturer og indhold af fossiler. Sedimentære enheder fra få meter til hundreder af meters tykkelse kan formaliseres som formationer. Formationer har navn efter en geologisk lokalitet, og heri ligger implicit, at formationer har en begrænset geografisk udbredelse. Inden for en større region er det derfor forventeligt, at der til samme tid eksisterer forskellige formationer. Eksempelvis er Fur Formationen og Ølst Formationen litologisk forskellige men tidsmæssigt samtidige, hvilket ses af at de samme vulkanske askelag forekommer i dem begge.

Moler er i Danmark betegnelse for et sediment som består af diatomeer og lermineraler. Det kan derfor beskrives som en leret diatomit. I ældre litteratur bruges betegnelsen 'moler' som et uformelt formationsnavn. Dette ses eksempelvis hos Bøggild (1918), hvis monografi hedder "De vulkanske Askelag i Moleret". Der findes også eksempler på termer som 'the Mo-clay Formation' (eksempelvis Bonde 1966). I råstofmæssig sammenhæng er diatomitten (moleret) opdelt i seks enheder af forskellig råstofmæssig kvalitet: Sort leret molerserie, skiferserie, nedre molerserie (med askelag -19 til -13), øvre molerserie (med askelag -13 til +19), askelagserien (moler indeholdende askelag +19 til +118?, atlasleret (med askelag +118 til +140) (Pedersen 1989, Pedersen, Pedersen & Noe 1994).

## Litostratigrafi

De nyeste oversigter over litostratigrafien i Danmark og i den danske del af Nordsøen er skrevet af Heilmann-Clausen & Surlyk (2006) og Schiøler et al. (2007). Sidstnævnte viser, at Fur Formationen i størstedelen af den danske del af Nordsøen svarer til øverste del af Sele Formationen og nederste del af Balder Formationen (Schiøler et al. 2007: Fig. 2). De vulkanske askelag er genkendt i mange olieboringer i Nordsøen (Knox 1996a). Der er nogle askelag i Sele Formationen, men de fleste findes i Balder Formationen (Schiøler et al. 2007).



**Figur 4.** Originaltavle af opmålingen af Fur Formationen udfærdiget af G.K. Pedersen (1978). Bemærk det vandret stribede afsnit nederst til vestre, som ved opstillingen af Fur Formationen (Pedersen & Surlyk 1083) blev betegnet de molerlignende overgangslag. Denne del af lagserien henføres nu til Stolleklint Leret (Heilmann-Clausen 1995).

## Fur Formationen

Fur Formationen er en ca. 60 m tyk leret diatomit (moler), stedvis cementeret med calcit (cementsten) og mellemlejret med vulkanske askelag fra -33 til +140 (Pedersen & Surlyk 1983). Formationen har sin typelokalitet i Fur Knudeklint, og herfra stammer også navnet. Formationen er inddelt i Knudeklint Led (fra askelag -33 til basis af +1) og Silstrup Led (fra askelag +1 til og med askelag +140). Heilmann-Clausen et al. (1985) foretog en revision af Fur Formationens nedre grænse, således at det grå, diatomefattige ler under askelag -33 nu henregnes til Ølst Formationen.

Fur Formationen er geografisk begrænset til områderne omkring den vestlige del af Limfjorden: fra Ertebølle i øst over Junget, Fur og Mors til Silstrup i vest (Pedersen & Surlyk 1983). Efterfølgende har Thomsen & Danielsen (1995) og Danielsen & Thomsen (1997) fundet få meter tykke lag af diatomit i enkelte olieefterforskningssboringer (C-1, K-1, Inez-1) i Nordsøen, ligesom Fur Formationen kendes fra Harre-boringen, hvor dens tykkelse er reduceret til 28 m (Nielsen, Friis & Korsbech 1994).

Mod sydøst er der en gradvis overgang fra diatomit ved Ertebølle til 'molerlignende lag', tidligere benævnt Skovbo serien efter en lokalitet nord for Mariager Fjord (Madsen 1918), og videre til ler ved Ølst, hvor Ølst Formationen er 29 m tyk (Heilmann-Clausen et al. 1985).

Fur Formationen overlejrer Stolleklint Ler, som består af mørkegråt lamineret ler, hvis basis svarer til CIE (se nedenfor) (se kapitlet om Paleocæn-Eocæn grænsen). Fur Formationen overlejres af Knudshoved Led, som er en lokal underinddeling af Røsnæs Ler Formationen (Heilmann-Clausen et al. 1985) (se Fig.XX, nedenfor). Fur Formationen er tidlig eocæn af alder (Heilmann-Clausen & Schmitz 2000, Crouch et al. 2001, Willumsen 2004, Schiøler et al. 2007). Formationen underindeles i to led: Knudeklint Led (nederst) med askelag -33 til undergrænsen af +1, og Silstrup Led (øverst) med askelag +1 til +140 (Pedersen & Surlyk 1983). De to led har typelokaliteter på henholdsvis Fur Knudeklint og ved Silstrup Hoved. Bøggild (1918) og flere efterfølgende forfattere skelnerede mellem 'den negative serie' og 'den positive serie'.

		Dansk Nordsø	Mors og Fur	Østjylland	Referencer
Eocæn	Ypresien	Horda Fm	Røsnæs Ler Formationen		Heilmann-Clausen et al. (1985) Ravn (1906) Schiøler et al. (2007)
		Balder Fm	Knudshoved Led		Heilmann-Clausen (1982) Heilmann-Clausen et al. (1985) Schiøler et al. (2007)
			Fur Fm	Silstrup Led	Pedersen & Surlyk (1983) Heilmann-Clausen et al. (1985)
				Knudeklint Led	Schiøler et al. (2007)
		Sele Fm	Stolleklint Ler (nedre del af Haslund Led)		Heilmann-Clausen 1995 (uformelt) Schiøler et al. (2007)
Paleocæn	Thanetien	Bue Fm	Østerrende Ler		Nielsen & Heilmann-Clausen (1986) Schiøler et al. (2007)
		Lista Fm	Holmehus Formationen		Heilmann-Clausen et al. (1985) Schiøler et al. (2007)

**Tabel 2.** Litostratigrafisk oversigt over øvre Paleocæn og nedre Eocæn i det danske område.

## Ølst Formationen

Ølst Formationen er opstillet af Heilmann-Clausen et al. (1985) og omfatter finkornet marint ler, som er detaljeret undersøgt i lergravene ved Ølst og Hinge. Formationen opdeles i Haslund Led (nederst) og Værum Led (øverst). Stolleklint Clay (Stolleklint Ler eller Stolle Klint Ler) er et nyt, uformelt navn for den nederste del af Haslund Led (Heilmann-Clausen 1995). Den er udskilt som en selvstændig enhed fordi den blev aflejret under PETM (se kapitel om Paleocæn–Eocæn grænsen).

## Stolleklint Ler

Stolleklint Ler består af mørkegråt, kalkfrit, lamineret ler med et højt indhold af organisk stof og pyrit, samt en tykkelse på ca. 15 m. Dinoflagellater af slægten Apectodinium er meget hyppige. Stolleklint Ler indeholder askelagene -39 til -34. Ved Ølst er der fundet tre tynde (1–1,5 cm) askelag under askelag -39 i en afstand af 4–14 cm over basis af Stolleklint Leret (Heilmann-Clausen 1995). Basis af Stolleklint er sammenfaldende med basis af CIE (Carbon isotope excursion) en geokemisk anomali, som definerer Paleocæn–Eocæn

grænsen. Stolleklint Ler karakteriseres ved at indeholde *Apectodinium acme* zonen, lag hvor en dinoflagellat optræder i stort antal (se afsnittet om Paleocæn–Eocæn grænsen). På Fur kan askelag –34 ses i Knudeklint og i Stolleklint, og Stolleklint Ler træder frem i stranden. Selve Paleocæn–Eocæn grænsen findes tillige i Fur Knudeklint, idet askelagene ned til –39 blev beskrevet kort herfra af Pedersen (1960). Her er Stolleklint Ler dog ofte dækket af skred og bevoksning. En råstofgeologisk undersøgelse af Fur Formationens nedre overgangslag i den nordlige del af Anshede (vestlige del af Fur) viste at den ca. 3 m tykke lagserie mellem askelag –33 og –39 bestod af en finkornet, lamineret bjergart, som bedst kunne betegnes som en zeolitit (et sediment med mere end 50% zeoliter) mellemlejret af tynde, mindre end 5 mm tykke, askelag (Pedersen 2000a). Disse lags indplacering i Stolleklint Leret afventer en formel stratigrafisk opstilling af enheden.

## Røsnæs Ler Formationen

Røsnæs Ler Formationen er formelt opstillet af Heilmann-Clausen et al. (1985), men termen 'Røsnæs Ler' går tilbage til Ravn (1906) og dækker meget finkornet, rødt ler, kaldet plastisk ler. Dette ler indeholder kalkskallede mikrofossiler, og dets alder (ældre Eocæn) har været kendt i ca. hundrede år. Røsnæs Ler Formationen findes i Fur Knudeklint, men er i øvrigt ikke almindelig på Mors og Fur. I Fur Knudeklint er den nederste del af Røsnæs Ler Formationen opstillet som en særskilt enhed: Knudshoved Led (Heilmann-Clausen 1982) (Se den litostratigrafiske oversigtsfigur).



**Figur 5.** Det orangegule askelag  $\div 17$  ses tydeligt i molergraven over for Molermuseet på Mors. Her markerer det tydeligt en adskillelse af lamineret diatomit oven for askelaget, og en struktur-løs diatomit under askelaget.

# Fur Formationens sedimentologi

## Moler (diatomit)

Moler er en hvidlig, porøs bjergart med en gennemsnitsvægtfylde på  $0.8 \text{ g/cm}^3$  i lufttør tilstand. Moleret består af marine diatomeer, som varierer i størrelse fra  $20\text{--}200\mu\text{m}$ , samt af lermineraler, hvoraf smectit er dominerende. Diatomeer udgør 60–70 % af sedimentet og lermineraler samt fint vulkansk støv udgør 30–40 % (Pedersen et al. 2004). Det finkornede sediment er aflejret på vanddybder større end bølgebasis, og på grundlag af graden af lamination inddeltes moleret i tre typer (sedimentære facies): 1) lamineret moler, 2) svagt lamineret moler og 3) strukturløst moler (Pedersen 1981, Pedersen & Surlyk 1983).

Lamineret moler karakteriseres af 0.3–5 mm tykke laminæ, som veksler i farve fra hvis til lys gråbrun når sedimentet er tørt. De enkelte laminæ varierer ikke i tykkelse og er lateralt kontinuerte. Forskellen mellem de enkelte laminæ er mængdeforholdet af diatomeskaller og ler (Pedersen 1981). I lamineret moler kan man finde perfekt bevarede fossiler. Askelag som er indlejret i lamineret moler har skarpe grænser,

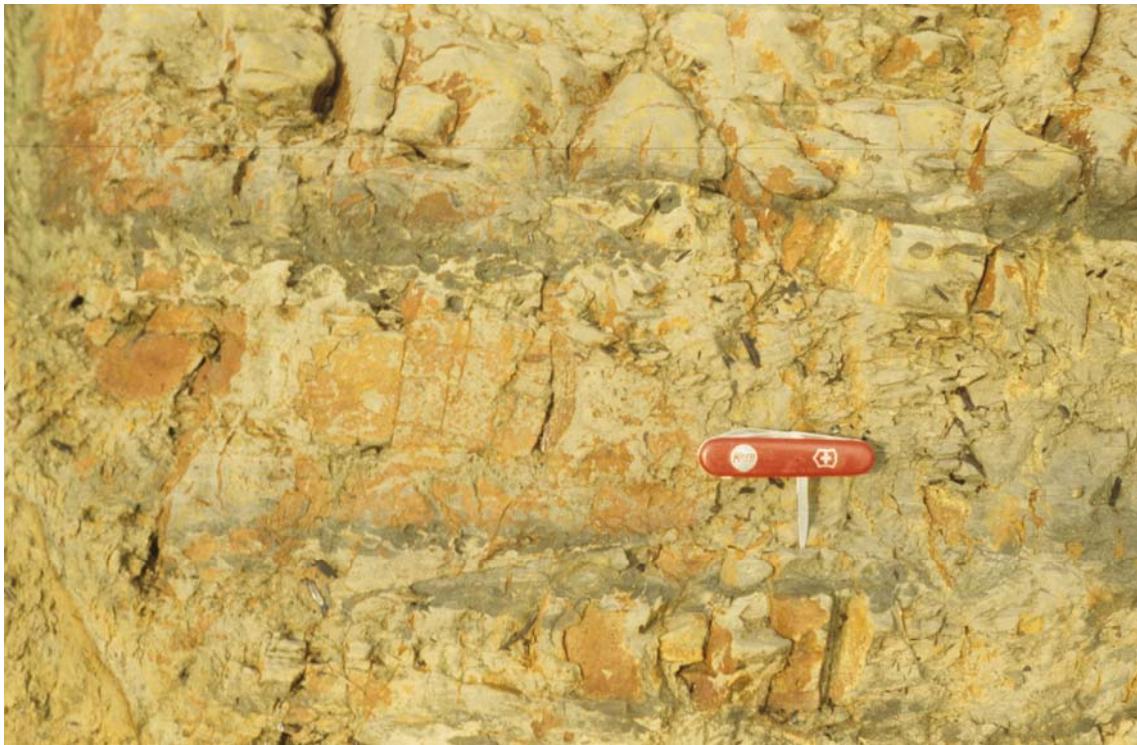
Det laminerede moler tolkes som aflejret på en havbund uden dyreliv, hvor de små forskelle i tilførslen af ler og diatomeer blev bevaret i form af laminæ at vekslende sammensætning. De perfekt bevarede fossiler understreger, at der ikke var ådselsædere på havbunden.

Svagt lamineret moler har færre og tykkere laminæ, som kan følges over kortere afstande end i det laminerede moler. Askelag har skarpe grænser. Der ses ingen tydelige gravegange. Der er fundet lagflader med slangestjerner i denne facies.

Det svagt laminerede moler tolkes som aflejret i perioder hvor havbunden har haft en fåtalig bundfauna, som muligvis kun har været til stede i kortere tidsrum. Men dyrene har alligevel forstyrret det finkornede slam, og derfor fremtræder moleret her med en svag eller diffus lamination.

Strukturløst moler karakteriseres af at mangle lamination. Endvidere ses askeudfyldte gravegange i bunden af mange askelag. De gravende organismer kendes ikke, formodentlig fordi de var bløde 'orm' eller krebsdyr, der forsvandt under forrådelsen. Gravegangene tolkes som resultat af en fødesøgningsadfærd, og henføres til sporfossilslægterne *Chondrites*, *Phycodes*, *Planolites*, *Taenidium* og *Teichichnus* (Pedersen 1981, Pedersen & Surlyk 1983). Der er fundet få marine invertebrater i strukturløst moler (se afsnit om fossiler).

Det strukturløse moler tolkes som fuldstændigt gennemgravet (bioturberet) af en bundfauna. Der er ikke grund til at tro, at gravegangene er knyttet specielt til askelagene, det er snarere den tydelige kontrast, som fremhæver de gravegange, som formodentlig var overalt i det strukturløse moler. Det strukturløse moler afspejler dermed perioder, hvor forholdeene på havbunden var sådan at en sparsom og specialiseret fauna kunne eksistere.



**Figur 6.** Strukturløst molder med to askelag, der er blevet fuldstændig gennemgravet af bunddyr i molerhavet. Sporfossilet er bestemt til *Teichichnus*, der hyppigt forekommer i denne del af lagserien med askelagene omkring +9 til +16.

### Vulkanske aske

Fur Formationen indeholder ca. 180 lag af vulkanske aske, nummereret -33 til +140 af Bøggild (1918). Hertil kommer -19b og -21a, -21b, -21c, og -21d, som blev opdaget af Gry (1940). Askelagene varierer i tykkelse fra 1–20 cm, og yderligere kan et antal meget tynde, og diskontinuerte askelag ses i gode blotninger. Askelagene består af vulkansk glas og partiklerne varierer fra finkornet sand til silt. Glasset er sort og skinnende og i mikroskop kan det let identificeres ud fra partiklernes form og andre optiske egenskaber. Adskillige askekort har indre kugleformede hulrum, som er opstået fordi lavaen indeholdt bobler af luftarter, som ikke undslap før lavaen størknede til glas. Askelagene har graderet lagdeling, det vil sige, at de største partikler ligger i bunden af lagene. Dette betyder, at hele askelaget er aflejret fra én askesky, og at askepartiklerne er sorteret på vejen ned gennem vand-søjlen. Aflejringen af et askelag har næppe varet mere end 1–2 døgn. Ganske få askelag (+14, +16, +18, +30, +90) er såkaldte 'dobbeltlag', hvilket betyder, at to graderede lag følger direkte oven på hinanden og afspejler at to store vulkanudbrud må have fundet sted kort tid efter hinanden (måske inden for samme år). I enkelte askelag (+101, +114 og +118) ses vandundvigelsesstrukturer (Pedersen & Surlyk 1977). Der kan ses askeudfyldte gravegange under askelag som er indlejret i strukturløst moler.

## Cementsten

Cementsten er lokale udfyldninger af calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) i alle sedimentets hulrum, således at det bløde og lette moler, samt eventuelle askelag, forvandles til en hård bjergart. Cementstenen har enten form af linseformede konkretioner eller sammenhængende bånd, og tykkelsen overskrides sjældent 50 cm. I Silstrup Led, hvor askelagene ligger tæt kan det vises, at cementstensdannelsen er knyttet til bestemte niveauer. I Knudeklint Led, hvor askelagene er færre og har længere indbyrdes afstand er det vanskeligere at eftervise, at konkretionerne er bundet til bestemte niveauer. Da konkretionerne imidlertid ikke er forskellige i de to led antages det, at cemenstensdannelsen overalt er knyttet til niveauer, som har adskilt sig fra det øvrige moler i sedimentologisk og geokemisk henseende. Udenfor cementstennene er moleret en kalkfri bjergart. Opmålinger viser, at cementstenene fortrinsvis er dannet i lamineret moler. Det kan vises, at den calcit, som indgår i cementstenene, stammer fra to kilder: en lille del kommer fra opløsning og genudfældning af kalkskaller, mens resten kommer fra  $\text{CO}_2$  der er dannet ved bakteriel nedbrydning af organisk stof i sedimentet (Pedersen & Buchardt 1996). Såvel de bakterielle processer, som tilstedevarelsen af fossiler der er 'indstøbt' i calcit før de blev kompakteret, viser, at udfældningen af calcit skete på en lav dybde i sedimentet relativt kort tid efter at sedimentet var aflejret (Pedersen & Buchardt 1996).

Cementstenene indeholder en del fossiler, og man kunne gætte på, at de er overrepræsenteret i forskellige samlinger, dels fordi bevaringstilstanden er allerbedst i cementsten og dels fordi fossilerne her er langt mindre skrøbelige.

## Krystaller af glendonit – pseudomorfoser efter ikait?

I cementsten, samt stedvis i ikke-cementeret moler findes nogle imponerende krystaller, som består af calcit. En mineralogisk undersøgelse af krystalfladerne viser imidlertid, at calcitten har replaceret et tidligere dannet mineral (glendonit), som formodes at være ikait  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Schultz 2011). Disse krystaller kan blive op til meter-store og danne smukke roset-lignende aggregater. Et sådant er accepteret som danekræ (Bonde et al. 2008: side 88). Væksten af disse krystaller må være sket på et tidligt tidspunkt, idet krystallerne (og replaceringen med calcit) er sket inden krystallerne er indsluttet i cementsten.

Tolkningen af krystallerne som oprindelig ikait har den udfordring, at ikait kun er stabilt ved temperaturer under 6°C. Dette rimer ikke umiddelbart med den stigning i havvandets temperatur, som kendetegner CIE og PETM (se kapitlet om Paleocæn–Eocæn grænsen).



**Figur 7.** En roset af glendonit krystaller, den længste er ca. 25 cm lang. Selvom mineralet i dag består af kalspat, viser krystalformen, at da rosetten blev dannet på havbunden bestod den af ikait, som ellers kun dannes i koldt bundvand som de grønlandske fjorde.

### Anoxiske perioder

Opmåling af lagsøjleprofiler gennem Fur Formationen viser, at lamineret moler og strukturløst moler optræder samtidigt på adskillige lokaliteter (Pedersen 1981). Det vil sige, at svingningerne i bundvandets sammensætning skete samtidigt over hele bassinet. Den faktor, som svingede, var sandsynligvis iltindholdet i havenes bundvand. Når bundvandet var iltfattigt kunne små fluktuationer i iltindholdet resultere i store ændringer for bundfaunaen. Svage stigninger i iltindhold tillod bunddyrene at indvandre og overleve på og i havbunden, mens små fald i iltkoncentrationen betød, at levevilkårene blev umulige for bundfaunaen. Dette stemmer godt overens med manglen på invertebrat-fossiler, idet man fra moderne miljøer ved, at kalkskallede bunddyr ikke findes i næsten iltfrit bundvand. De sedimentære facies (lamineret versus strukturløst moler) er derved afspejlinger af små variationer mellem svagt iltholdigt og næsten iltfrit bundvand (Pedersen 1981, Pedersen & Surlyk 1983). Hvordan opstod de anoxiske forhold? Et bidrag kom fra den store produktion af diatomeer. Når de sank til bunds blev deres organiske dele nedbrudt, og dette skete under forbrug af ilt. Hvis havstrømmene ikke sikrede en effektiv tilstrømning af iltigt vand kunne næsten iltfri forhold opstå.

# Fossilerne i Fur Formationen

Fur Formationen betegnes internationalt som et "Lagerstätte", et område hvor fossilerne er exceptionelt velbevarede. Dette gælder for en række fossiler fra Fur Formationen og er én af grundene til, at antallet af danekræ fra Fur Formationen er meget højt (se Bonde, Andersen, Hald og Jakobsen 2008, Bonde et al. 2010). Det er kun de ganske få og enestående fund, der får status som danekræ, og lovgivningen forudsætter at der er tale om 'sjældne eller usædvanligt velbevarede fossile dyr og planter' (Bonde et al. 2008). Det er en fagkynlig 'danekræ-gruppe' ved Statens Naturhistoriske Museum, der på grundlag af ekspertudtalelser træffer afgørelse om, hvorvidt et fossil er danekræ, og om hvilken godtgørelse finderne skal have for at have opfyldt sin pligt og afleveret fossilet til et statsanerkendt museum. En meget stor del af danekræ-fossilerne fra Fur Formationen er udstillet på Molermuseet på Mors (en permanent udstilling under Morsø Historiske Museum) samt på Fur Museum. Siden lovens vedtagelse i 1990 er 450 fossiler fra hele landet anerkendt som danekræ, af disse udgør insekter 31 %, fisk 29 % og fugle 12 %. Størstedelen af disse stammer fra Fur Formationen (Bonde et al. 2008).

En beskrivelse af fossilerne i Fur Formationen kan derfor fokuseres på de exceptionelle fund (enkelteksemplarer) eller skrives mere overordnet om de forskellige fossilgrupper. Nedenfor er den sidstnævnte metode anvendt. Det er dog heldigvis muligt at henvise til nye tekster, hvor de fine fossilfund beskrives og diskuteres. Bonde et al. (2008, side 72–159) gennemgår danekræ-fossiler fra Fur Formationen og det underliggende Stolleklint Ler. Forfatterne giver en systematisk beskrivelse af de enkelte fund ledsaget af fremragende fotografier og dette vil ikke kunne gøres bedre i denne rapport. Supplerende oplysninger findes i Bonde et al. (2010) som afbilder skildpadden 'Luffe', som er blandt verdens bedst bevarede skildpaddefossiler.

Overordnet kan fossilerne i Fur Formationen inddeltes i mikrofossiler, som er usynlige med det blotte øje eller lup, samt makrosossiler, der optræder som fragmenter (almindeligt) eller komplette individer (sjældent). Mikrofossilerne omfatter diatomeer, som optræder i så store mængder at de udgør ca. 60 % af moleret (heraf betegnelsen diatomit), dinoflagellaterne, som er vigtige for biostratigrafisk korrelation, sporer og pollen, samt mindre grupper som silicoflagellater og radiolarer. Makrofossilerne domineres af insekter og fisk men omfatter også planter, fugle, skildpadder, invertebrater og sjældne eksemplarer af andre fossilgrupper. Det er vigtigt at minde om, at Fur Formationen har et meget usædvanligt fossilselskab. De fossilgrupper som kendes fra Fur Formationen er ekstremt sjældne i andre marine sedimenter, og de marine, kalkskallede invertebrater (hvirvelløse dyr) er dramatisk underrepræsenteret i Fur Formationen. Dette er en del af forklaringen på, at alderen af Fur Forma-

tionen har været diskuteret så længe, idet det har været svært at sammenligne med faunaselskaber i andre, samtidige formationer. I Fur Formationen er kalkskallede fossiler (eksempelvis muslinger, havsnegle, brachiopoder, o.s.v.) meget sjældne. Dette er så påfaldende, at det må betyde, at dyrenes levesteder ikke fandtes. Dette er signifikant for tolkningen af aflejringsmiljøet (se kapitel herom).



**Figur 8.** Kraniet, rygsøjlen og et par af en fossil fugl, der levede i landområdet ved molerhavet. Fuglen er tolket som en art skrigefugl, en gruppe fugle som også isfugle og biædere tilhører (Hoch & Pedersen 1982). Det fine aftryk af store halefjer stimulerer fantasien, så man let kan forestille sig en farverig, eksotisk fugl bevæge sig rundt mellem grene og buske.

## Fugle

Fuglefossiler er ofte enkelte knogler, og velbevarede fossile fugle er en sjældenhed, også på verdensplan. I dag kender man 170 fuglefossiler fra Fur Formationen, af hvilke 40 % er løse fjer (Lindow 2011a). Fossilernes bevaringstilstand er exceptionel også i international sammenhæng, idet flere skeletter er næsten komplette, sammenhængende og bevarede i tre dimensioner (ingen kompaktion) i kalkkonkretioner (Leonard *et al.* 2005, Lindow & Dyke 2006, Bertelli *et al.* 2010, Mayr & Bertelli 2011). I tilgift er blødt væv, så som fjer, hud og skæl bevaret, hvilket er uhyre sjældent for fuglefossiler (Dyke *et al.* 2004, Lindow & Dyke 2007, Vinther *et al.* 2008). Endelig har det vist sig at fjerene og øjnene hos fuglene har bevaret selve de farvekorn (melanosomer), som har givet den oprindelige farve, således at nogle af farverne kan rekonstrueres (Vinther *et al.* 2009).

Fur Formationen repræsenterer et hidtil ukendt aflejringsmiljø, når det gælder fossile fugle: et marint, lavenergi *konservat-lagerstätte*, som tillader bevaring at både sammenhængende skeletter og blødt væv (Lindow 2007, Dyke & Lindow 2009).

Neornithes er en underklasse af fugle, som omfatter alle nulevende fugle. Neornithes opstod i den sene del af Kridttiden, og overlevede den store masseuddøen på Kridt–Tertiær grænsen, i modsætning til de 'gamle' fugle (Archaeornithes). I Paleocæn – tidlig Eocænskete der en hastig udvikling af fuglene, idet hovedgrupperne af nulevende fugle, der i dag omfatter strudse, hønsefugle, tranefugle, vade- måge- og alkefugle, papegøjer, turakoer, musefugle, trogoner, sejlere, skrigefugle med flere alle opstod i perioden fra 70–55 millioner år (Dyke & van Tuinen 2004, Ericson *et al.* 2006, Bonde *et al.* 2008, Lindow 2011a).

Bevaringen af skeletterne i tre dimensioner gør det muligt at bestemme anatomiske detaljer, som sammenkæder fossilerne med nulevende fugle-ordener. De fossile fugle fra Fur Formationen har derfor allerede nu bidraget med vigtig ny viden til forståelsen af de moderne fugles udvikling. Indtil nu har Fur Formationen leveret de tidligst kendte fossile repræsentanter for trogoner (Kristoffersen 2002); mursejlere/svaler (Dyke *et al.* 2004, Mayr, 2010), papegøjer (Waterhouse *et al.* 2008) og ibiser (Mayr & Bertelli 2001). Bonde *et al.* (2008) præsenterer en række af de betydeligste fund af fossile fugle, og ledsager de afbildede skeletter med billeder af tilsvarende nulevende fugle. Her findes skrigefugl, 'stenfugl', hønsefugl, trane, vadefugle, 'træsejler', trogon samt en spurve- eller spættefugl. Det er bemærkelsesværdigt at alle fuglene land-fugle. Ingen af dem synes at have levet ved stranden eller over havet. Disse landfugle må være blevet blæst ud af kurs under kraftige storme eller været druknet mens de var på træk. Hovedparten af de fossile fugle er fundet indenfor de seneste 30 år, og de mange fund har resulteret i landvindinger med hensyn til forståelsen af fuglenes evolution, ikke kun i Danmark men på verdensplan. Igangværende og fremtidige undersøgelser vil fortsætte med at udnytte disse fremragende fossiler til at bringe klarhed over fuglenes evolution og arts dannelse (Lindow 2011a).

## Skildpadder

Blandt Fur Formationens sjældne fossiler er krybdyrene. Fur Museum har læderskildpadden *Eosphargis breineri*, som blev fundet af museets grundlægger Magne Breiner og beskrevet af Nielsen (1959, 1960, 1963). Molermuseet udstiller 'Luffe', et komplet skelet af en havskildpadde af slægten *Glarichelys* fundet af Henrik Madsen i 2010. Dette fund er exceptionelt (danekræ nr. 567) fordi ikke alene knoglerne er bevaret, men uden om lemmernes skelet er der aftegninger af luffernes bløddele, som viser deres ydre form, og mellem rygskjoldets randplader er der bevaret en lille trekant af skjoldets hornplader. Endvidere er der fundet en ferskvandsskildpadde. Krokodiller er ikke fundet, men der kendes enkelte ryg-

hvirvler af havlevende kvælerslanger (Bonde et al. 2010). Lindow (2011b) gør opmærksom på, at skildpadderne kan underkastes detaljerede anatomiske undersøgelser, som vil gøre det let at indføje dem i moderne fylogenetiske analyser. Dette vil resultere i ny viden om havskilpaddernes udvikling og deres opsplitning i arter i en af Jordens drivhus-perioder.



**Figur 9.** Et velbevaret eksemplar af en fossil pigfinnet fisk. Bevaringstilstanden i molerets fiskefossiler er så god, at man næsten fornemmer at det er en friskfanget og nylig tilberedt fisk, man står over for. Er der nogen der har spist den øverste halvdel, eller blev modpladen også fundet?

## Fisk

Fur Formationen er kendt for en rig fauna af fossile fisk med mere end 60 arter, som i særdeleshed er blevet undersøgt af Niels Bonde i talrige publikationer siden 1966. Et stort antal fisk er danekræ, men det er vigtigt at understrege, at fiskeskæl og småknogler er så hyppige i moleret, at de findes på næsten alle lagflader i det laminerede moler.

Langt størstedelen af fiskefossilerne er benfisk, men der kendes ganske få rester (tænder) af 7–8 arter af hajer (bruskfisk). Benfiskene tilhører mange forskellige grupper (se skema i Bonde et al. 2008: side 77). Der er fundet 92 arter af fisk i Fur og Ølst Formationerne og næsten alle er rovfisk. Fiskefaunaen indeholder mange tropiske og subtropiske arter. Bortset fra trompetfisk lever ingen af fiskenes nutidige slægtninge nær kysten og ingen er typiske bundfisk (Bonde et al. 2008, Petersen 2010). Størstedelen af fiskene (sild, tarpon, makrel, hestemakrel, kulmule med flere) er pelagiske former. Næsten halvdelen af arterne er tidlige repræsentanter for aborregruppen, som i dag udgør den største gruppe af marine fisk. Fiskefaunaen er beskrevet af Bonde (1966, 1972a, b, 1973, 1974, 1979, 1982, 1987,

1992, 1997, 2008) og Bonde et al. (2008, 2010). Sidstnævnte har fine fotos af mange af de fineste fiskefossiler. Den mest almindelige fisk i moleret er en lille laksefisk, som er beslægtet med nutidens guldlaks. Den har været højst 10 cm lang og udgør ca. 90 % af alle fossile fisk i Fur Formationen. På Fur Museum findes en lagflade med et stort antal identiske fisk, som må være omkommet samtidigt. Dette peger på at laksefisken levede i store stimer i overflade, og formodentlig levede af plankton. Nogle fossile fisk har bevaret maveindholdet og her ses det tydeligt, at laksefisken har udgjort det mest basale led i fødekæden for mange af rovfiskene i datidens hav (Petersen 2010, Bonde et al. 2008, 2010).

Antallet af fossile fisk er større i Fur Formationen end i andre omrent jævnaldrende aflejninger. Muligvis var havet rigere på fisk på grund af den store planktonproduktion (diatomeer og andet), og muligvis er bevaringsforholdene bedre, således at en større del af faunaen er bevaret.

Fiskefaunaen i Fur Formationen er den ældste kendte fauna der nogenlunde ligner nutidens og dermed har et 'moderne' præg. Det betyder at Fur Formationen yder et væsentligt bidrag til forståelsen af fiskenes udviklingshistorie (Bonde et al. 2008, 2010). Bemærkelsesværdigt er det forbløffende indhold af 'knogletunger' (osteoglossomorfer), en gruppe fisk, som i dag kun findes i ferskvand på den sydlige halvkugle. Der er 4 arter i moleret og 3 i Stolleklint Ler. Den almindeligste er en stor fisk, mere end 3 m lang, og var tilpasset til at filtrere plankton. Dette gør den enestående blandt verdens mere end 20.000 arter af benfisk. De mange, marine, eocæne knogletunger har aflivet en traditionel zoogeografisk teori om knogletunger som et særligt godt eksempel på 'primære ferskvandsfisk' (Bonde 2008). Flere af fiskene er fra grupper, der i dag lever på flere hundrede m vand, og der er en enkelt, som tilhører en gruppe af rigtige dybhavsfisk, hvalfiskene.

## Insekter

Fossile insekter er ikke almindelige, og Fur Formationen udmarkes sig ved at indeholde så mange, og så velbevarede fossile insekter, at det er muligt at tegne et detaljeret billede af insektfaunaen i de landområder, som lå nær det hav, som dækkede Danmark i tidlig Eocæn. Larsson (1975) gjorde opmærksom på, at insektfaunaen domineres af vingede insekter og at 'gode flyvere' samt meget små og lette insekter er underrepræsenteret. Han konkluderede derfor, at fossilerne er blæst ud over havet, og at der er sket en sortering af insekterne i vinden. Siden 1975 er antallet af insektfossiler vokser meget kraftigt, men det er stadig de vingede former, som er altdominerende. Følgende insektgrupper er repræsenteret: Guldsmede og vandnymfer, græshopper og fårekyllinger, kakerlakker, næbmundede insekter, biller, netvinger, årevingede insekter, sommerfugle og tovingede insekter (Bonde et al. 2008). Rust (1999a) undersøgte 10.783 insekter fra Henrik Madsens samling (Molermuseet) og gav følgende fordeling af de hyppigste (her citeret fra Petersen 2010). :

Gruppe	Gruppe	Eksempler	Andel i faunaen
Tovingede insekter	Diptera	Stankelben, fluer	27 %
Næbmundede	Heteroptera	Tæger	20.4 %
	Auchenorrhyncha	Cikader	14.4 %
Sommerfugle	Amphiesmenoptera	Sommerfugle, vårfuer	8.3 %
Biller	Coleoptera	Biller	7.6 %
Græshopper og fårekyllinger	Saltatoria	Græshopper	6.7 %
Alle andre insektgrupper tilsammen udgør 16% af faunaen, og ingen udgør mere end 4 %.			

**Tabel 3.** Oversigt over de hyppigst forekommende insekter i Fur Formationen (Rust 1999a, Petersen 2010).

Insekterne blev transporteret fra det sydlige og sydvestlige Skandinavien ved aktiv flyvning, ved passiv transport med vinden eller fastsiddende på planterester (drifttømmer). Vingeløse former findes ikke. Der er nogle flader dækket af et stort antal små sommerfugle. Disse er sandsynligvis døde under træk i store flokke ud over havet – første gang noget sådant har kunnet vise fossil. Faunasammensætningen viser at insekterne altid fløj om sommeren når temperaturen var høj og nordenvinden var fremherskende. Klimaet i Nordsø-regionen havde årstidsvariationer og insektfaunaen antyder subtropiske forhold. Den store diversitet blandt insekter, der suger plantesaft, indicerer en frodig og artsrig flora i 'Skandinavien'. Faunaen tyder endvidere på, at der fandtes forskelligartede sører, damme og floder. Der er også mange fossile former, hvis nulevende slægtninge lever i moser og sumpe. Endelig er der stor diversitet blandt de insekter, som formodes at have levet i skove og mere åbne områder med busk-vegetation. Den store ret almindelige løvgræshoppe, *Pseudotettigonia*, findes bevaret så godt, at man har kunnet genskabe den lyd, som græshoppen frembragte (Rust et al. 1999, Rust 2011).

Insektaunaen fra Fur Formationen ligner den nordamerikanske fauna. Moderne slægtninge til en del af fossilerne i Fur Formationen findes i dag Sydøstasien (Rust 1999a, 2011).

## Planter

Der er fundet en del plantefossiler i Fur Formationen. Blade af planten *Macclintockia Kanei* (Heer) blev tidligt anvendt til at bestemme formationens alder som eocæn (Stolley 1899). Størstedelen af plantefossilerne er kviste, grene og stammer, som formodentlig er transpor-

teret som drætømmer med floder til havet. Blade er sjældne, hvilket kan forklares ved at de lettere nedbrydes under transporten. En 8 m lang træstamme er bestemt til at være nært beslægtet med rødtræ (*Sequoia*), som bl.a. kendes som kæmpetræer i Californien. Andre fossiler menes at repræsentere fyr og abetræ (*Araucaria*). Blade af *Macclintockia* kendes også fra aflejringer i resten af Nordvesteuropa og fra Grønland i sedimenter fra Paleocæn og Eocæn. Ud over denne type blade er der fundet lange, bambuslignende blade, blade af vandbregnene *Salvinia*, samt en del frø og frugter. Planterne tyder på, at landet har haft en bevoksning af nåletræsskove vekslende med en mere åben, steppeagtig bevoksning (Bonde et al. 2008).

Landskabet har været domineret af nåletræer (rødtræ, abetræ, fyr, gran, sumpcypres og taks), løvtræer (ask, poppel, valnød og hassel) og træer fra sæbetræfamilien (hestekastanje, ahorn). Der er også fundet blade af tempeltræ, bambus-lignende vækster, landbregner, vandbregner samt padderkokker og en del frø og frugter fra forskellige planter, hvoraf de hyppigste er små kuglerunde frugter fra palmer. Andre frø og frugter stammer fra platan, japansk judastræ, løn, hjertetræ og vin (Petersen 2010). Insekterne antyder, at der må have været mange blomsterplanter, men disse er stærkt underrepræsenteret blandt fossilerne. Selv om der er identificeret mange sporer og pollen (Willumsen 2004) er der er store vanskeligheder ved at henføre disse til bestemte planter.

Rust (1999) karakteriserede vegetationen som paratropisk. Dette dækker vegetationsformer, som opstår i lavlandet uden for troperne eller i midten af tropiske bjergområder (eksempelvis Hong Kong og Taiwan). I sen Paleocæn og tidlig Eocæn havde denne type af vegetation sin største udbredelse på den nordlige halvkugle og nåede til 60–65°N. Floraen med *Macclintockia* og visse andre planter i NV-Europa og Grønland er blevet kaldt den 'Arkto-Tertiære Flora'.

## Invertebrater (hvirvelløse dyr)

Der er fundet et lille antal invertebratfossiler i Fur Formationen, som henføres til 24 arter (Bonde et al. 2010, Petersen 2010). Dette kan ikke bortforklaries ved at dyrenes kalkskaller er opløst, idet man i det tilfælde kunne have skaller bevaret som aftryk. Mange invertebrater er 'bløde' dyr uden ydre skeletter (skaller), og sådanne dyr bevares praktisk taget aldrig som fossiler. Denne 'ukendte' fauna bestod af dyr, som gravede i havbunden. De er ikke bevaret selv, men sporene af deres aktivitet er bevaret som sporfossiler (syv sporfossilarter kendes).

Krebsdyr (Crustacea) er repræsenteret ved fire arter, alle sjældne: en reje, en krabbe, langhalse og tanglus (Bonde et al. 2008).

Pighuder (Echinodermer) er repræsentret ved fem arter, to slængestjerner og tre sørstjerner. I svagt lamineret moler omkring askelag -11 findes et stort antal slængestjerner *Ophiura furiae*. Også i nutiden er slængestjerner kendt for at kunne leve under iltfattige forhold på havbunden.

*Havsnegle* (Gastropoda) er repræsenteret ved syv arter. To af disse, en fritsvømmende vingesnegl og en konklignende snegl findes ofte i større antal (mere end 10 individer). Boresnegle, porcelænssnegle og baggældesnegle er sjældne (Petersen 2010).

*Muslinger* (Bivalvia) er repræsenteret ved fem arter. Den hyppigste er en musling, som i udseende ligner nutidens sandmusling. En art blåmusling, *Mytilus roesnaesiensis*, optræder lokalt i stort antal (mere end 10). Blåmuslingerne, har ikke levet på bunden men har været fasthæftet på drivtømmer, hvilket ses af at muslinger og drivtømmer forekommer sammen. Endvidere kendes nøddemuslinger og boremuslinger (og borer efter dem i drivtømmer).

*Brachiopoder* er kun kendt ved én art i Fur Formationen.

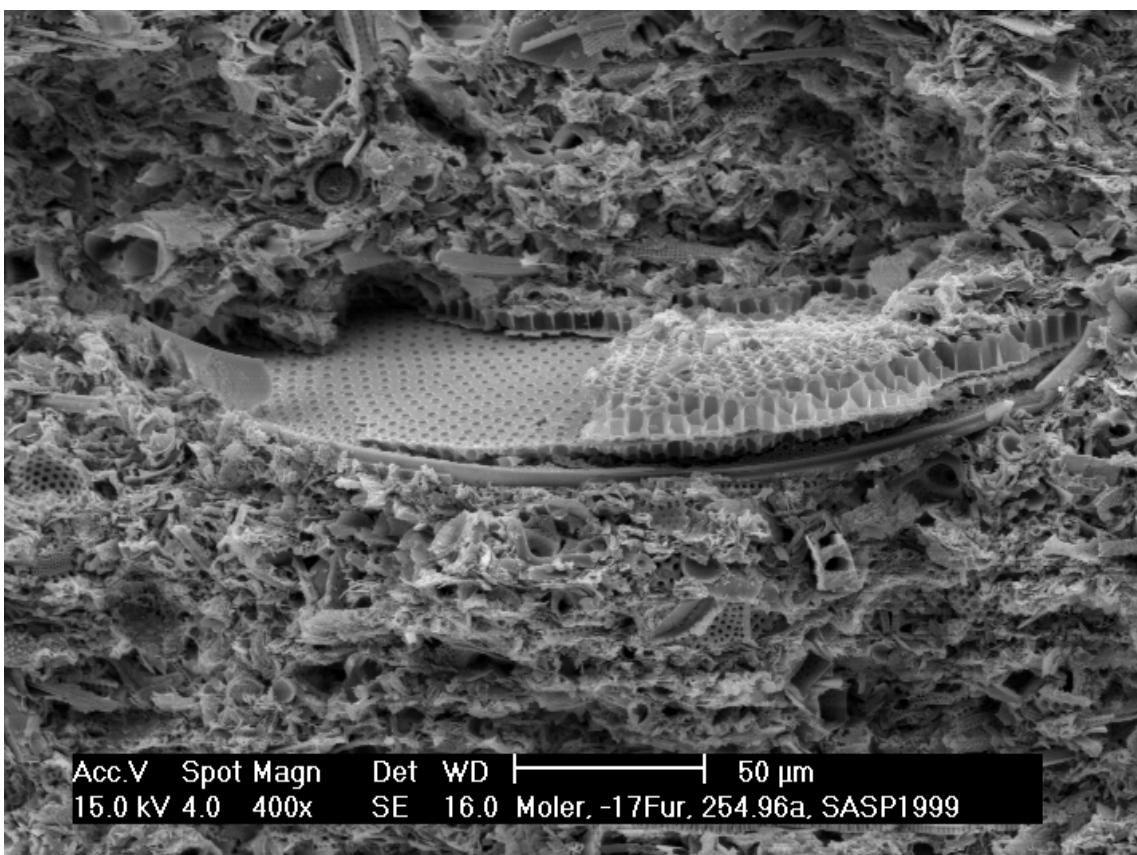
*Havsvampe* (Porifera) er repræsenteret ved to arter, som for nyligt er identificeret som *Phlinthosella* og en *Callodictyonid* (Petersen 2010).

Sporfossilerne henføres til slægterne *Chondrites*, *Phycodes*, *Planolites*, *Taenidium* og *Teichichnus*, som alle er gravegange, mens hvilespor og borer ikke er kendt (Pedersen & Surlyk 1983). For nyligt har R. Bromley verificeret et fund af *Diplocraterion* i den 'stribede cementsten'. I moleret ses kegleformede rør fra børsteorm. Rørene er opbygget af svampsespikler, diatomeskaller og sandkorn kilet sammen. Der er fundet forskellige typer og det er muligt at gangenes forskellige opbygning repræsenterer forskellige arter af børstom (Petersen 2010).

Hovedparten af de marine invertebrater, som er fundet i den laminerede del af Fur Formationen, er epifaunale mens de infaunale marine invertebrater stort set kun er fundet i det strukturløse og svagt laminerede moler (Petersen 2010).

## Diatomeer

Diatomeer er kiselskallede alger, som lever i de øvre vandmasser. I moler i Harreboringen er der ca. 10 millioner diatomeskaller i et gram prøve, hvilket understreger den enorme biologiske produktion i datidens hav. Diatomeproduktionen styredes af mængden af nærringsstoffer herunder grundstoffer silicium, der indgår i deres skaller. Skallerne opbygges af biogen opal (opal-A) og skallerne har meget delikate detaljer i deres morfologi. Derfor blev diatomeskaller i ældre tid brugt til at kvalitetsteste mikroskoper, jo flere detaljer man kunne se, jo bedre var mikroskopet. I dag kan selv de fineste detaljer illustreres ved billede taget med skanning elektronmikroskop (SEM). Undersøgelser af moderne diatomitter viser, at størstedelen af skallerne (80–90 %) opløses når de synker ned gennem vandsøjlen (Calvert 1974), men at flere diatomeskaller når havbunden, hvis de synker som klumper (faecal pellets) efter at være blevet ædt af zooplankton (Schrader 1971). Hvis den samme opløsning har gjort sig gældende for eocæne diatomeer har den biologiske produktion altså været næsten 100 gange større end den mængde diatomeskaller som i dag findes i moleret.



**Figur 10.** Diatomeerne er den vigtigste bestanddel af moleret. De to scanning elektronmikroskopi billeder viser øverst en fladtliggende *Coscinodiscus* sp., den største diatome i moleret. Neden under er samme art set i et tværsnit vinkelret på sedimentets lamination.

Tilstedeværelsen af marine diatomeer i moleret blev påpeget allerede i 1800-tallet (Heiberg 1863, Printz & van Ermengem 1883, Printz 1885). Nyere undersøgelser (Fenner 1994) fra Harre-boringen viser, at diatomeer udgør 50–80 % af de kiselkallede mikrofossiler. Den næststørste gruppe er hvilesporer af Chrysophyceae (10–40 %) og derudover findes planktoniske silicoflagellater og erbridier samt sjældne radiolarer (Fenner 1994). Der er identificeret 138 arter og varieteter af diatomeer (Fenner 1994: tabel 1), og selskabet domineres af meroplanktoniske arter, som tilbringer en del af deres livscyclus på havbunden (som benthos) og en del i havoverfladen (som plankton), og der findes et stort antal hvilesporer. Der er kun fundet én art af benthoniske diatomeer, og kun få eksemplarer af ferskvandsdiatomeer, hvilket kan indicere at der var semi-aride forhold i landområderne op til det hav, hvori moleret blev aflejret (Fenner 1994). Mitlehner (1996) undersøgte kiselkallede mikrofossiler (diatomeer, silicoflagellater, erbridier og radiolarer) i seks prøver af cementsten, som oprindeligt var udtaget af Homann (1991). Fire af prøverne er fra samme niveau (cementstenen mellem askelag -11 og +1), og to prøver er henholdsvis under (omkring -20) og over (+29). Han finder 49 arter af diatomeer, 12 silicoflagellater og to arter af radiolarer.

## Dinoflagellater

Dinoflagellater er hvilesporer af marine alger og består af sporo-pollenin, en type organiske forbindelser, som bevares godt i sedimentet. Da dinoflagellaterne optræder i stort antal i mange typer sedimenter, og da de har en relativt hurtig evolution, er de velegnede til biostratigrafisk datering og korrelation. Dinoflagellater af slægten *Apectodinium* forekommer globalt i meget stor mængde i tidligste Eocæn (en acme zone). Dinoflagellaterne i Fur Formationen er undersøgt af Hansen (1979, Heilmann-Clausen (1982, 1985, 1994, 1995), Heilmann-Clausen et al. (1985), Schmitz et al. (1996) og korreleret til lagfølgen i Nordsøen (Schiøler et al. 2007).

## Sporer og pollen

Willumsen (2004) undersøgte terrestriske sporer og pollen i 74 prøver af moler fra tre lokaliteter (Fur Stolleklint, Silstrup Firkanten og Silstrup Sydklint) samt 6 prøver fra den øverste del af Stolleklint Ler. Hun konstaterede at sporer og pollen er fint bevaret i moleret og identificerede 42 arter af sporer og 108 arter af pollen. På basis as sporer og pollen kan Fur Formationen inddeltes i fire biozoner og disse korreleres med ændringer i dinoflagellatselskabet. Den tydeligste ændring i såvel den terrestriske som den marine mikroflora indtræder omkring askelag -19 (Willumsen 2004) se også Heilmann-Clausen (1985, 1994).

## Aflejringsmiljøet

Moler (leret diatomit) er aflejret i det hav, som dækkede Danmark i Eocæn. Produktionen af diatomeer var meget stor i et afgrænset område af havet. Den præcise størrelse af området kendes ikke, men vi ved, at tykkelsen af moler aftager mod sydøst (Ølst), mod syd (Harre) og mod vest og nordvest (boringerne C-1, K-1 og Inez-1) i Nordsøen. Det vides ikke hvor stor diatomeproduktionen var, men den må have været større end de 10 millioner skaller, som nu er bevaret i hvert gram molersediment (Fenner 1994). Kalkskallet plankton er ikke bevaret. Den store produktion af diatomeer er af Bonde (1974, 1979, Bonde et al. 2010) tolket som betinget af 'upwelling', altså tilstrømning af næringsrigt bundvand på grund af en vind-drevet cirkulation i havet. Sådanne zoner med upwelling kendes i dag fra vestkysten af Nord- og Sydamerika og veskysten af Sydafrika og Australien, og danner her grundlag for store fiskebestande. De fossile fisk indicerer vanddybder på ca. 300–500 m (Bonde, pers. comm.). Vanddybden var også stor under aflejringen af Holmehus Ler Formationen og Røsnæs Ler Formationen, som ligger henholdsvis under og over Fur Formationen. Laminerede diatomitter aflejret på dybt vand med anoxiske bundforhold kendes i dag fra områder vest for Californien, hvor de aflejres med en hastighed på ca. 1 mm pr år.



**Figur 11.** En cementsten med bevaringen af en kompleks historie. Først består sedimentet af lamineret moler, altså en anoxisk periode i molerhavsbundens historie, hvorunder der også blev aflejret askesand fra to vulkanske askeskyer, som drev hen over havet. Dernæst har der været en ansamling af kalkslam, der har muliggjort kalkkonkretionsdannelsen. Denne har været så aktiv, at glendonitkyrstallerne er vokset op som en roset, der under krystalvæksten har bøjet askelagene i det laminerede sediment.

Den store produktion af diatomeer betød, at moleret havde en dobbelt så høj sedimentationshastighed som den jævnaldrende, ler-dominerede Ølst Formation. Den høje sedimentationshastighed resulterede i et stort iltforbrug ved havbunden til nedbrydning af det organiske stof og skabte derved iltfattigt bundvand. Det næsten iltfri bundvand betød, at der kun var en meget sparsom bundfauna og at der i perioder blev aflejret lamineret moler. I det laminerede moler blev fisk, insekter og fugle ikke ædt eller forstyrret af ådselsædere, og nogle fossiler blev bevaret perfekte. Samtidig betød den hurtige sedimentation også, at eventuelle fossiler på havbunden hurtigt blev dækket af slam og derved havde en øget chance for at blive bevaret.

Opmåling af sedimentologiske lagsøjleprofiler har vist, at skift mellem lamineret moler, svagt lamineret moler og strukturløst moler skete næsten på samme tid i hele bassinet (Pedersen (1981)). At miljøforandringerne var samtidige dokumenteres ved korrelation af askelagene, der kan betragtes som en 'datomærkning' for askeskyens passage. Der har derfor været svingninger mellem perioder med svagt iltet og iltfrit bundvand. Under svagt iltede forhold har en fauna af invertebrater kunnet leve i havbunden. Størstedelen kendes kun som sporfossiler. Bundvandet har overvejende været så iltfattigt at kalkskallede invertebrater ikke har kunnet eksistere. Dette er den enkleste forklaring på hvorfor der er så ekstremt få fund af kalkskallede invertebrater (muslinger m.v.).

Den nedre del af Fur Formationen (Knudeklint Led) omfatter meget lamineret moler og relativt få og tynde vulkanske askelag. Den øvre del af formationen (Silstrup Led) karakteriseres af strukturløst moler og mange, tykke og tætliggende lag af vulkansk aske. Sedimenttypen viser dermed, at de næsten anoxiske forhold blev sjældnere op gennem formationen. Dette er næppe forårsaget af askelagene. Det er mere sandsynligt, at vanddybden ændredes og at der var en bedre cirkulation i bundvandet.

Bemærk, at Stolleklin Ler, som overalt kendetegnes ved lamineret, organisk-rigt gråsort ler i opad afløses af strukturløst ler. Dette ses for eksempel ved Ølst og i borekernen fra Storbælt (Heilmann-Clausen et al. 1985, Nielsen & Heilmann-Clausen 1986). Den samme udvikling mod bedre 'ventilation' ses således alle steder.

Det er endnu ikke forklaret under hvilke omstændigheder krystallerne af glendonit voksede i sedimentet på havbunden. Såfremt de er calcit-pseudomorfer efter ikait, og ikait kun er stabilt ved temperaturer under 6°C, må det overvejes, om 'molerhavet' kan have haft en termoklin (et temperaturmæssigt springlag mellem koldt og tungt bundvand og varmt, let overfladevand. Alle fossiler og geokemiske parametre indicerer varmt overfladevand, men dette kunne være let nok til at forblive ovenpå bundvandet, hvis overfladevandet også var mindre salt end bundvandet).

En stratifieret vandsøjle kunne også støtte udviklingen af næsten anoxiske forhold. Modelnen med en kystparallel zone af upwelling vil netop involvere sådanne 'springlag', der også

kan virke som termokliner, for der er altid et springlag mellem overfladevandet, som føres væk fra kysten, og det underliggende vand som trækkes ind og op i denne 'upwelling'. Upwelling, der fastholder næringen i de øvre lag, er en mulig årsag til den store produktion af plankton i overfladen. Pedersen (1981) og Pedersen & Surlyk (1983) foreslog, at salthørste kunne have dannet et relief på havbunden, som ydede et bidrag til at begrænse cirkulationen og dermed fremmede udviklingen af næsten anoxiske forhold. Dette blev nævnt kort af Bonde (1973).

Det varme (subtropiske) klima i tidlig Eocæn kunne give inspiration til en sammenligning med de store og dybe søer i Østafrika eller med Sortehavet. I disse søer/indhave er overfladevandet lettere end bundvandet året rundt på grund af høj temperatur og opblanding med ferskvand, og der sker derfor en meget lille opblanding med det tungere og koldere bundvand. Problemet med denne model er moleret blev aflejret i et hav, hvor forholdene ikke generelt var præget af iltfattigt bundvand. En videreudvikling af en aflejringsmodel ville blive styrket, hvis det var muligt at fastslå, dannelsen af glendonitkristaller skete i alle stratigrafiske niveauer, eller om de er knyttet til bestemte niveauer i lagserien. De palæogeografiske forhold er et højaktuelt forskningsfelt, som involverer alle aspekter af molerets sedimentologi og palæontologi. Med den præcision, som molerlagserien er opmålt med og med de detaljer, der inden for en millimeters nøjagtighed kan stedfæstes, er Fur Formationen et attraktivt mål for nye landvindinger inden for miljøforskningen.



**Figur 12.** Rødstenen på nordkysten af Fur er dokumentation af en recent miljøhistorie, som også er forbundet med moleret. Oprindeligt var moleret mættet med fint fordelt svovlkis, som ses i den dybeste del af lagserien som sort moler. Da moleret blev skubbet op i bakkerne, blev svovlkisen udvasket og transporteret med grundvandet ud mod kystklinterne, hvor jernet blev udfældet som limonit og okker i Kvartærtidens smeltevandssand (Pedersen 2008a).

# Vulkanske askelag i Fur Formationen

## Opdagelsen af askelagene

Når vulkaner går i udbrud kan udstrømningen af lava ledsages at større eller mindre mængder af vulkansk aske. Vulkansk aske består væsentligst af glas, altså lavadråber som er storknet så hurtigt, at der ikke er nået at danne mineraler. Det er muligvis fordi det vulkanske glas er sort og skinnende, at det blev fejlbestemt som kulholdigt sand, selv af en fremtrædende geolog som G. Forchhammer (1835). Den vulkanske aske blev identificeret af to belgiske diatoméforskere (Printz & van Ermengem 1883, Printz 1885), men denne opdagelse nåede først i 1902 frem til de danske geologer (Bøggild 1903). Om opdagelsen af askelagene skrev Bøggild senere: "Tilstedevæselsen af et saa overordentlig ejendommeligt Led i Landets geologiske Opbygning ... kom derved... for første Gang til de danske Geologers Kendskab. Det er vel næppe for meget sagt, at ingen enkelt Opdagelse indenfor vor Geologi har vakt tilnærmedesvis saa megen Opmærksomhed som denne; man kendte ikke i Forvejen et eneste Spor af vulkansk Virksomhed her i Landet og for Skandinaviens Vedkommende i al Fald ikke særlig meget deraf, og saa blev man pludselig stillet overfor en Udbudsvirksomhed, der efter alt, hvad man kendte til Forholdene, maatte have været af ret betydelige Dimensioner, selv om det først noget senere viste sig, at Udbredelsesområdet var langt større end det forholdsvis ubetydelige egentlige Moleromraade. I Overraskelsen over det Nye blandede der sig for mange Vedkommende, som man kan tænke sig, en Del Ærgrelse over, at man ikke selv havde kunnet gøre denne, dog ret nærliggende Opdagelse" (Bøggild 1918: side 5). Efter opdagelsen af askelagene blev der hurtigt iværksat en opmåling, nummerering og petrologisk undersøgelse af askelagene (Bøggild 1903, Ussing 1904, Bøggild 1918). Navnlig Bøggilds monografi fra 1918 er så detaljeret, at senere forskere kun har fundet få 'oversete' askelag (Gry 1940), og Bøggilds værk er stadig en standardreference.

Der er tynde askelag både under og over Fur Formationen. Stolleklin Ler indeholder askelag -34 til -39, samt yderligere tre tynde askelag lige over bunden af Stolleklin Ler (Schmitz et al. 2004: deres Fig. 6). En senere fase af vulkanske udbrud er repræsenteret af 19 tyde askelag i Røsnæs Ler Formationen og den nedre del af Lilebælt Ler Formationen (Nielsen & Heilmann-Clausen 1988).

Efter erkendelsen af askelagene fulgte en langvarig diskussion af vulkanernes beliggenhed. Ussing foreslog så tidligt som i 1904 at vulkanismen kunne sættes i forbindelse med den udbredte tertiære vulkanisme i Nordatlanten og gjorde opmærksom på, at de enkelte askelag i moleret kan følges over store afstande. Denne tolkning blev efterfølgende opgivet, fordi der ikke var kendskab til moderne vulkanudbrud som havde sendt så grovkornet

aske over så store afstande. Mange forfattere pegede på, at vulkanen kunne have været beliggende i Skagerrak (Andersen 1937 a, b, 1938, 1944, Norin 1940, Noe-Nygaard 1967, Florin 1973, Åm 1973, Nielsen & Heilmann-Clausen 1988).

## Kilden til askelagene

Vulkanismen blev kædet sammen med oceanbundsdannelsen i Nordatlanten (Pedersen, Engell & Rønsbo 1975, Ziegler 1990), men det var først i 1999 at det blev vist, at lavasuccessionerne i Østgrønland og på Færøerne kan korreleres detaljeret (Larsen et al. 1999). Herefter har en petrologisk undersøgelse af de vulkanske askelags sammensætning vist, at asken er usædvanligt velbevaret og at man kan skelne fire stadier i udbrudsaktiviteten, som kan relateres til formodede udbrudssteder (Larsen, Fitton & Pedersen 2003). Stadium 1 (askelag -39 til -22) er basaltiske og rhyolitiske i saamensætning, og stammer fra udbrudscentre på den Nordvesteuropæiske sokkel. Stadium 2 (askelag -21b til -15) omfatter trachytter og rhyolitter, som kunne komme fra samme centre som (1), hvorimod stærkt alkaline askelag kan stamme fra Gardiner Complexet i Østgrønland. Stadium 3 (askelag -13 til -11) består af alkalibasalter. Stadium 4 (askelag +1 til +140) har basaltiske sammensætning og repræsenterer meget store udbrud på havbunden i et gigantisk vulkansk system, som repræsenterer de første trin i dannelsen af Island og dermed åbningen af Nordatlanten gennem dannelsen af ny havbund (Larsen, Fitton & Pedersen 2003). Denne tolkning støttes af en analyse af indholdet af det sjældne grundstof Iridium i askelagene (Schmitz & Asaro 1996, Schmitz et al. 2004).

## Korrelation ved hjælp af askelag

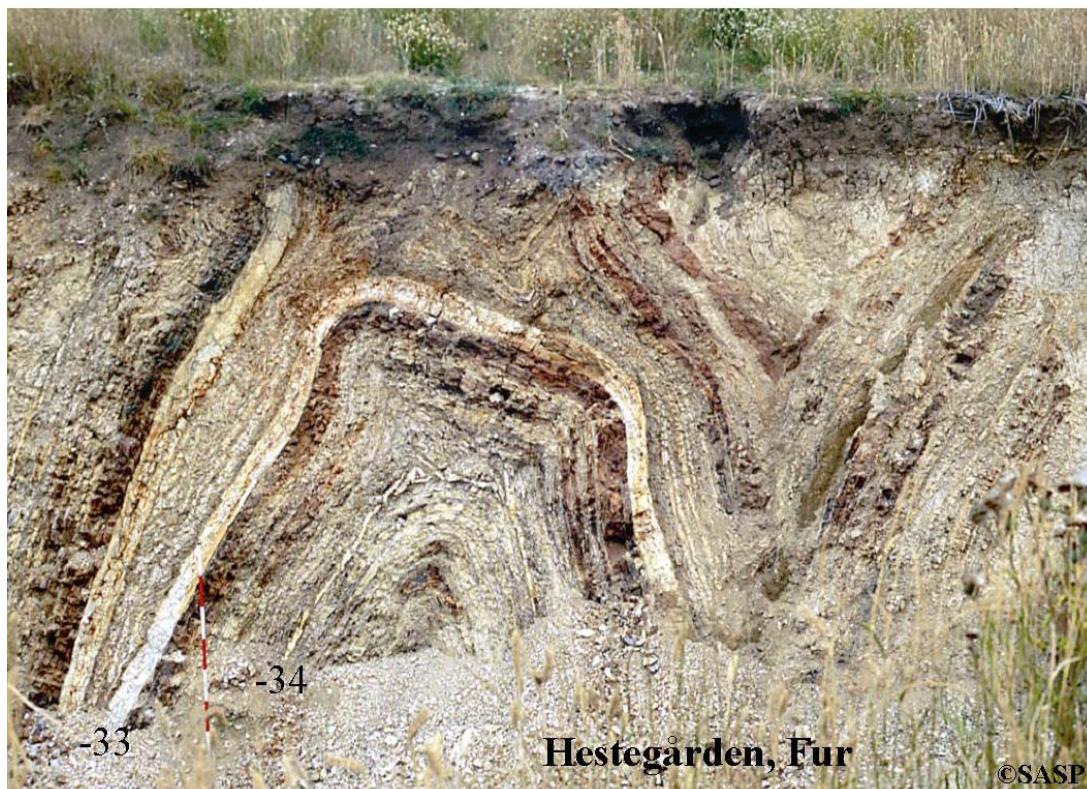
To af de vulkanske askelag (-17 og +19) har en distinkt kemisk sammensætning, som dels betyder, at de kan genkendes, dels at de ud over vulkansk glas indeholder mineraler, som kan dateres ved radiometriske metoder. Disse egenskaber betyder, at netop disse askelag har haft stor international bevågenhed. I 2007 blev askelag -17 dateret på ny og dets alder ( $55.12 \pm 0.12$  millioner år) er identisk med askelag i Skrænterne Formationen i Østgrønland (Storey et al. 2007). Skrænterne Formationen består af lavabænke, og afspejler dermed vulkanudbrud på land.

Askelag -17 er genkendt til en borekerne fra Atlanterhavet sydvest for Irland (DSDP 550), og i den samme borekerne er PETM defineret (Berggren et al. 1995, Luterbacher et al. 2004). PETM ligger her i kort afstand under -17.

I Østgrønland og på Færøerne begyndte den vulkanske aktivitet for ca. 61 millioner år siden. De første 5.5 millioner år skete vulkanudbruddene på land, og da lavaen var af basaltisk sammensætning har vulkanudbruddene kun dannet mindre askeskyer.

En intens forøgelse af magmaproduktionen i Nordatlanten skete samtidig med et skift til lavaer med en MORB-lignende sammensætning (MORB = mid-ocean ridge basalt) i Østgrønland. Ved overgangen til dannelse af oceanbund skete der en kæmpemæssig forøgelse i magmadannelsen (se Storey 2007: Fig 2). I Østgrønland blev der aflejret > 5 km lavaer på land, og samtidig skete flere vulkanudbrud under havoverfladen. Indstrømningen af vand i magmaet skabte gigantiske, eksplasive udbrud, og det er asken fra disse, som nu findes som askelag i moleret. Længere oppe i Eocæn skete udstrømningen af magma på så stor vanddybde i det 'unge' Atlanterhav, at der dannedes pudelavaer, men kun små askemængder. Det store antal gigantiske udbrud, som vi ser afspejlet i Fur Formationens askelag, repræsenterer dermed en periode på relativt kort tid, hvor lavatilstrømningen var stor, udbruddene skete på lavt vand og der derfor blev produceret enorme volumener af basaltisk vulkansk aske (askelag +1 til +140).

Skiftet til lavaer med en MORB-lignende sammensætning i Østgrønland indicerer starten på oceanbundsspredningen. Denne blev dateret til  $55.5 \pm 0.3$  millioner år før nu af Storey et al. (2007). Begyndelsen af PETM korrelerer fint med denne pladetektoniske hændelse (Storey et al. 2007), og basis PETM dateres nu til 55.9 Ma (Storey 2011). Forskellen mellem de to aldre skyldes muligvis kalibrering til forskellige standarder.



**Figur 13.** De negative askelag i Fur Formationen er hvide til lysegule. De ses her foldet i en antiklinal, og i samme lagserie opræder rustbrune chertificeret diatomitter.

# En varm historie – et bemærkelsesværdigt klimaskift på Paleocæn–Eocæn grænsen

Grænsen mellem Paleocæn og Eocæn har været diskuteret i Danmark i mere end 100 år. Der har dog altid været enighed om at det ler, som nu henregnes til Holmehus Formationen er paleocænt, og at Røsnæs Ler Formationen er eocæn. Stolley (1899) og andre forfattere placerede Fur Formationen i nedre Eocæn. Omkring 1980–1990 placeredes Fur Formationen i øverste Paleocæn (Hansen 1979, Heilmann-Clausen et al. 1985). Schmitz et al. (1996) redegjorde udmarket for, at Paleocæn–Eocæn grænsen kan placeres forskellige steder i den danske lagserie afhængigt af hvilken af de klassiske sektioner (basis af London Clay/Oldhaven Beds i Sydengland, basis af Leper Clay i Belgien eller basis af Sparnacien i Nordfrankrig) man korrelerer til. Disse forskellige korrelationer vil placere Paleocæn–Eocæn grænsen ved basis, ved toppen eller midt i Ølst Formationen (Schmitz et al. 1996).

Efterfølgende har Berggren et al. (1995), Aubry et al. (2003) og Gradstein et al. (2004) defineret undergrænsen af Eocæn ved basis af en kulstof-anomali (CIE = negative carbon isotope excursion). Den stærke, negative  $\delta^{13}\text{C}$ -anomali er registreret i både kontinentale og marine aflejringer fra alle egne af verden (Zachos et al. 2001 og referencer deri). I alle disse aflejringer ændres forholdet imellem  $^{12}\text{C}$  og  $^{13}\text{C}$  med –2 til –6‰, hvilket er et markant fald. Dette skyldes at store mængder af isotopmæssigt let CO<sub>2</sub> blev tilført til det reservoir, som udgøres af atmosfæren og vandmasserne i oceanerne. Begrundelsen for placeringen af Paleocæn–Eocæn grænsen ved CIE er, at anomalien afspejler en kortvarig, dramatisk drivhusperiode, som kan følges over det meste af Jorden. Ikke mindre vigtigt er det, at isotop-anomalien falder sammen med markante ændringer i fauna og flora (Heilmann-Clausen 2011). Denne varmeperiode har fået forskellige betegnelser PETM (Paleocene Eocene thermal maximum), LPTM (Late Paleocene thermal maximum) eller IETM (Initial Eocene Thermal Maximum). Siden PETM begivenheden blev anerkendt i 1990erne, har den og dens årsager og globale effekter været genstand for intensiv forskning. CIE-anomalien ligger under Ypresien etagen, som hidtil har defineret basis af Eocæn, og derfor genindføres Sparnacien (Schiøler et al. 2007) (Se tabel i afsnit litostratigrafi). Basis af CIE er dateret til ca. 55,9 millioner år før nu (Storey 2011).

## PETM (Paleocene Eocene thermal maximum)

PETM var en kortvarig hændelse. Forskellige forfattere anslår at den varede 150.000 – 220.000 år. Under PETM steg havenes overfladetemperatur med 5°C i troperne og mere end 6°C i ved polerne. Starten af PETM markeres af en brat ændring (CIE), hvilket peger på en hurtig frigivelse af 1500–2000 gigatons  $^{13}\text{C}$ -forarmet kulstof, i form af kultveilte eller methan til oceanerne og atmosfæren. Denne mængde er sammenlignelig med det hidtidige

og forventede fremtidige menneskeskabte udslip, såfremt dette ikke reduceres (Zachos et al. 2008 og referencer deri). Den resulterende drivhuseffekt resulterede i de højeste temperaturer på Jorden inden for Kænozoikum. Det største udslip af  $^{13}\text{C}$ -forarmet kulstof skete indenfor de første 10–20.000 år (Storey et al. 2007, Zachos et al. 2008, Heilmann-Clausen 2010).

I forbindelse med klimaændringerne blev oceanerne forsuret og 35–50 % af arterne af de bundlevende foraminiferer uddøde; der opstod nye arter af planktoniske foraminiferer og kalkskallet plankton ændredes også signifikant. Dinoflagellater af slægten *Apectodinium* fik en global opblomstring, som er konstateret i shelfaflejring i hele verden, og kan benyttes til at identificere PETM begivenheden (Crouch et al. 2001, Sluijs & Brinkhuis 2009, Sluijs et al. 2006). Økosystemerne i havet og på land ændredes dramatisk. Øget uddøen, migration og formentlig også evolution er dokumenteret (Wing et al. 2003, Sluijs et al. 2007). På land blev gamle grupper af pattedyr afløst af mere moderne former og de første primater opstod (Schmitz et al. 2004, Heilmann-Clausen & Surlyk 2006). Denne afløsning er bedst kendt og præcist dateret i kontinentale aflejringer fra Nordamerika, hvor de ældste stamfædre til bl.a. heste og primater er fundet i aflejringer fra PETM-perioden (Gingerich 2003). Bonde et al (2008) viser, at der efter PETM (i Stolleklin Leret og Fur Formationen) dukker mange nye grupper af fisk op (Figur side 77). Skønt der er enighed om at drivhusperioden på Paleocæn–Eocæn grænsen var kendtegnet af høje indhold af  $\text{CO}_2$ , er kilden til store mængder isotopisk let kulstof ikke kendt. Det er blevet foreslået at methan-hydrater på havbunden blev frigivet og efterfølgende oxideret til  $\text{CO}_2$ , eller at en komet med en diameter på 10 km ramte Jorden og frigav enorme mængder af 'let' kulstof. Det er imidlertid meget sandsynligt, at rift-dannelsen og den magmatiske aktivitet ved forgængerne for det islandske hot-spot udløste PETM, sandsynligvis ved udslip af  $^{12}\text{C}$ -beriget methan fra opvarmning af kulstof-rige sedimenter i kontakt med massive intrusioner (sills) (Storey et al. 2007). Argumentet for kometen er en lille Iridium-anomali, men denne kan overbevisende forklares ved periodens intense vulkanske aktivitet (Schmitz et al. 2004).

## CIE i Danmark

Heilmann-Clausen & Schmitz (2000) og Schmitz et al. (2004) beskrev CIE i to danske successioner: Ølst-området samt en boring fra Østerrende, Storebælt. Den negative  $\delta^{13}\text{C}$  anomali optræder tydeligt ved basis af Stolleklin Ler (se afsnit om litostratigrafi) med værdier på 6–8‰. Denne stærke anomali optræder samtidigt med et relativt højt indhold af amorft organisk stof i sedimentet, og dette kan være en medvirkende årsag til at anomalien i Danmark overstiger de typiske værdier for CIE (Heilmann-Clausen & Schmitz 2000). Samtidig med den geokemiske anomali optræder en stor opblomstring af *Apectodinium* (som udgør omkring 50% af den totale mængde af dinoflagellater) og dermed definerer en acme-zone. Denne zone er veldokumenteret fra mange profiler (Heilmann-Clausen 1985, Heilmann-Clausen et al. 1985, Nielsen et al. 1986, Willumsen 2004). *Apectodinium* acmet er

registreret fra basis af Ølst Formationen og til toppen af det nederste laminerede og næsten askefri interval, som udgør den nederste del af Haslund member. Dette karakteristiske, op til 15 m tykke laminerede lerlag med *Apectodinium* kaldes Stolleklin Ler (Heilmann-Clausen 1995, 2006). Ved Stolleklin på Fur overlejres Stolleklin leret af Fur Formationen. Her fortsætter *Apectodinium* acmet i de nederste få meter af Fur Formationen (til lidt over askelag -33), hvorefter indholdet af *Apectodinium* aftager gradvist til nær nul lidt under askelag -19b. Begge globale kriterier for PETM (og dermed Paleocæn–Eocæn grænsen) er således klart til stede i Danmark, og grænsen kan på dette grundlag placeres ved basis af Stolleklin leret (Schmitz et al. 2004). Den største, mest instruktive og eneste permanente lokalitet for PETM begivenheden i Danmark er typelokaliteten for Stolleklin Leret, Stolleklin på Fur. Her kan selve Paleocæn-Eocæn grænsen, med uforstyrret sedimentær kontakt til underliggende paleocæne lag, ses i stranden. Grænsen er blotlagt ved lavvande (og lejlighedvis blottet højere oppe på stranden). Toppen af PETM intervallet kan ses i selv klinten, hvor de øverste par meter af Stolleklin leret er i uforstyrret kontakt moler fra Fur Formationen. Højere oppe i lagserien ses askelagene -17 og +19, der danner grundlag for den radiokemiske datering af PETM begivenheden, og indgår i regionale korrelationer (Knox 1996, Storey et al. 2007, Westerhold et al. 2009, Storey 2011).



**Figur 14.** Stolleklin Leret ses her i en våd tilstand ved blotningen på typelokaliteten Stolleklin på nordkysten af Fur. Det mørkt laminerede ler under målebåndet markerer PETM grænsen.  
Foto: Bo Pagh Schultz 2005.

# Molerklinternes strukturgeologi - et glacialtektonisk værksted

"De istektoniske forhold i moleret ..." var titlen på den publikation, forfattet af dr. phil. Helge Gry, statsgeolog ved Danmarks Geologiske Undersøgelse, som lagde grundstenen til den glacialtektoniske forståelse og anvendelsen af den strukturelle analyse, ikke alene af klinterne ved Limfjorden, men generelt af de isfoldede lag i Danmark (Gry 1940, Pedersen 2006, 2008). I anledning af grundlæggelsen af det geologiske museum på Fur skrev Gry (1965) en afhandling om Furs geologi, hvori han publicerede et tværprofil af Fur Knudeklint. Nogle år senere bearbejdede stud. scient. Stig A.S. Pedersen tværprofilet og konstruerede det første balancede tværprofil af et strukturelt profil i Danmark. At konstruere et balance-  
ret tværprofil vil sige at foretage en tilbageskrivning af lagene til en position før deformatio-  
nen, og efterfølgende forklare de enkelte trin i den dynamiske udvikling. Det balancede  
tværprofil blev udstillet i 1972 på Fur Museum, hvor det til stadighed giver de besøgende  
indsigt i opfoldningen af moler og askelag.

Konstruktionen af balancede tværsnit var omkring 1970 blevet et af de mest hotte em-  
ner inden for strukturgeologien (Dahlström 1969, Suppe 1985). Inden oliegeologerne be-  
sluttede sig til at bekoste en ny omkostningsfuld, undersøgelsesboring skulle der foreligge  
et balancedet tværprofil. Hemmeligheden ved at foretage balanceringen er, at geologerne  
bliver gjort ansvarlige for hver eneste bevægelse af lagpakken: hvordan når man fra den  
udeformerede, vandretliggende lagpakke frem til slutresultatet med foldninger og forskyd-  
ninger. Sker der uforudsete delbevægelser undervejs, som måske skyldes nogle skjulte  
eller oversete strukturer i undergrunden? Konstruktionen af balancede tværprofiler har  
siden indgået i de strukturgeologiske studier af molerklinterne. Således blev det ved ud-  
redningen af den dynamiske udvikling af Hanklit opdaget, at en tidligere tolket synkinal  
(Andersen & Sjørring 1992), hvis interne struktur var dækket af sandskred i den nordlige  
ende af tværprofilet, ikke stemte overens med balanceringen (Klint & Pedersen 1995). I  
den balancede tolkning blev den bageste del af Hanklit-skiven overskudt af Salgjerhøj-  
skivens frontale del, altså en helt anderledes tolkning af opbrudte skiver, som ligger taglagt  
oven på hinanden, end den tidligere tolkning baseret på en bøjefold model. Nogle år sene-  
re blev den tolkede overskydningszonen mellem Salgjerhøj-skiven og Hanklit-skiven verifi-  
ceret ved et nyt skred i klinten.

Ved hjælp af den balancede tværprofil metode er det også muligt at tolke dybden til dé-  
collement niveauet, altså den dybde hvor forskydningsbevægelsen foregik. Dette er med  
et godt eksempel fra det 800 m lange og 25 m høj Feggeklit profil blevet demonstreret.  
Molerklinten på Feggeklit viser et snit gennem de flotteste tæppefolder. Foldernes geometri  
kan betegnes som parallelle bøjefolder, hvor de sorte askelag som blyantstriber kan følges

op og ned i antiklianer og synkinaler gennem hele profilet. Da man kan gå ud fra at deformationen er foregået ved at arealet i de opfoldede antikinaler svarer til det areal, der svarer til det forkortede areal af den sammenpressede lagserie, kan man ved beregning af forkortelsen og udmåling af antikinalernes areal beregne dybden til det basale décollement niveau. Dybden til décollement niveauet er beregnet til at være 80–100 meter, hvilket svarer til det stratigrafiske niveau, hvor man ville forvente at den bentonit-holdige Holmehus Formation skulle befinde sig. Dette svarer fortinligt til at bentonit, som er et næsten creamagtigt materiale er det oplagte smøremiddel for deformationen (Pedersen 1996).

Til den strukturelle analyse hører også beskrivelsen af folder og konstruktionen af foldeaksler. Gry (1940) demonstrerede hvordan man ved at måle hældning og strygning på moler foldernes flanker kan konstruere foldeaksens orientering i et stereografisk net (Wulff net). Gry konkluderede endvidere, at isbevægelsens retning kunne bestemmes som vinkelret på foldeaksens retning, vel at mærke hvis man vidste, fra hvilket verdenshjørne folderen var skubbet op. Dette forhold udredes ved foldens geometri i et tværsnit vinkelret på foldeaksens retning. I molerområdet vil folderne typisk være overkippet, hvilket betyder at isbevægelsen har været i samme retning som kipningen er foregået. At forstå foldernes geometri og forløbet af foldeaksens retning er som at forstå den interne opbygning af landskabet, hvor overfladens morfologi er skorpen. Den flotteste sammenhæng mellem indre opbygning og ydre form findes ved at sammenligne det geologiske tværsnit af Hanklit med de langstrakte bakker i Flade Klit. Foldeaksen på Hanklit har retningen Ø-V, og man kan let forestille sig, hvordan denne struktur fortsætter fra Hanklit hele vejen østover gennem Flade Klit, en strækning på 8-10 km (Klint & Pedersen 1995). Et så imponerende langstrakt bakkeparti kan let sammenlignes med en lille bjergkæde, dog med den forskel, at molerområdets bjergkæder er dannet ved isens skub, glacialtektonik, i modsætning til de tektoniske bjergkæder, der er dannet ved litosfærepladernes konvergerende bevægelser.

Inden for glacialtektonikken må man skelne mellem to typer af deformation: den proglaciale og den subglaciale deformation. Ved den proglaciale deformation forstås en tyngde spredningen af vægten fra den fremrykkende is. Denne form for deformation betegnes også gravity spreading, og opfoldningen af bakkelandskabet med dets interne folder og overskydninger er resultatet af denne type deformation (Pedersen 1989, 1993, 1996, 2000, Aber et al. 1989, Klint & Pedersen 1995). Den anden form for glacialtektonik er det subglaciale shear (forskydningsspænding) som foregår langs sålen af den fremrykkende is. Selvom isen har skubbet en israndsbakke op foran sig, er det ikke ensbetydende med at isbevægelsen derfor stopper. Hyppigst observerer man, at isen fortsatte op over israndsbakken, at bakkerne bliver fladtrykket og draperet med det materialer, som isens sål har høvet af. Bjergarten, som er dannet ved at materiale fra toppen af antikinalerne er blevet tværet ud over landskabet, betegnes glacitektonit (Pedersen 1988). En tektonit er en breccieret bjergart som er dannet under deformation, og når det er en glacialtektonisk deformation, er

det naturligt at resultatet bliver en glacitektonit. Molerområdet har fungeret som værkstedsområde for opstillingen af glacitektonit, og den mest perfekte moler-glacitektonit forekommer i toppen af Feggeklit, hvor den kan følges over en afstand på en halv kilometer (Pedersen 1996).

Som allerede antydet vil den ene type af glacial deformation overpræge den anden type. Faktisk har det været muligt i moleret at opstille en hel sekvens af overprægede deformationer. I den tidligste fase dannes lavvinklede overskydninger, som afløses af overskydnin- ger med større og større vinkel. Nogle af de tidligst dannede lavvinklede overskydninger er udviklet som konjugerede sæt af forkastninger, og i en senere fase blev disse medfoldet af opretstående folder. Den seneste deformationen medfører stejlthældende rampeoverskydning, inden shear deformationen med dannelsen af glacitektonit lægger låg på deformati- onsudviklingen (Pedersen 1993, 1996, 2000).

Det er ikke kun inden for glacialtektoniske deformation knyttet til et isfremstød, at man finder overpræget deformation. Da molerområdet har været overskredet af mindst to is- fremstød i sidste istid (Weichsel istiden) og tillige må formodes at have været påvirket af isfremstød under forrige istid (Saale istiden) (Houmark-Nielsen 2003, Houmark-Nielsen et al. 2006), ville det være forventeligt, at overprægede strukturer som f.eks. dobbeltfolder, ville optræde i molerområdet. Dette er da også tilfældet. Omkring 1980 blev der i Skarrehages sydlige molergrav, den der ligger lige over for Molermuseet på Mors, blotlagt det flotte- ste eksempel på en dobbeltfold (Pedersen 1982, 2000). Strukturen var markeret af de for- kiskele skiferlag mellemlejeret af askelagene –19 til – 24. Fra toppen af graven var det let at se, dobbeltfoldens geometri svarede til en pilespisstruktur, der netop dannes, hvor en overkippet foldning med et moderat hældende aksialplan bliver refoldet af opretstående folder med en foldeakse vinkelret på den første foldnings foldeakse. Afslutningsvis blev strukturen så skåret af et horisontalt plan, i dette tilfælde molergravens bund, hvorved pile- spidsstrukturen aftenes som et grafisk mønster (Pedersen 1982, 1989, 2000).

De nyeste undersøgelser inden for den glacialtektoniske forskning af moleret har kombine- ret geofysiske målinger af havbunden ud for Fegge med de balancede konstruktion af de foldede lag i klinten (ref 1994, Århus, Drøhse 2011). Ved kombinationen af disse metoder er det muligt at tolke molerlagenes strukturer 100 m under havniveau. Et andet spændende resultat af en balanceringskonstruktion er blevet udført på Silstrup Klint, hvor det har været muligt at sammenligne "Firkanten" med overskydningsstrukturen på Hanklit, bl.a. ved en konstruktion af dybden til décollement planet (Møller 2010).



**Figur 15.** En serie sorte thooleitiske askelag øverste i den positive askelagsserie er her foldet i en opretstående antiklinal. Askelagene vidner om den tidligste dannelse af Nordatlantens oce-anbunds dannelse, men foldning af lagene henføres til en deformation af lagene under det Norske Isfremstød for ca. 28.000 år siden. Foldestilen karakteriseres som bøjefoldning af parallelle lag, også kaldet tæppefoldning.

# Komparativ analyse – molerklinterne unikke værdi og potentielle som verdensarvsområde

Analysen har to afsnit. I det første summeres denne raports resultater, og giver et svar på hvorfor er molerklinterne er kandidat til at komme på UNESCOs Verdensarvsliste. I det andet afsnit sammenlignes molerklinterne med andre lokaliteter i verden, hvor tilsvarende geologiske problemstillinger kan iagttages.

## Opsummering af mulerklinternes geologi

Moleret (diatomitten) er arkiv for

- De vulkanske askelag
  - Askelagene afspejler dannelsen af Nordatlanten (overgangen til oceanbund)
  - Askelag -17 og +19 er dateret radiometrisk og bruges til storskala korrelation
  - Velbevaret glas til kemisk analyse, korrelation til magmatyper
  - Fremragende til korrelation ('dato'mærkning)
- Fossilerne
  - Et usædvanligt selskab (se også Bonde et al. 2008)
    - Terrestriske makrofossiler (fugle, skildpadder, insekter og planter)
    - Terrestriske mikrofossiler (sporer og pollen)
    - Marine mikrofossiler (diatomeer, dinoflagellater m.v.)
    - Marine makrofossiler (fisk samt sjældne invertebrater)
  - Fremragende bevaringstilstand (se også notat fra Bent Lindow 2011)
    - Perfekte skeletter, incl. maveindhold
    - 3D-bevaring i cementsten
    - Bevarede farver i fjer og insektvinger
- Anoxiske perioder

Klinterne er eksempler på

- Glacialtektonik
  -
- Paleocæn–Eocæn grænsen (se også notat fra Claus Heilmann-Clausen 2010)
  - Ses i Stolleklint (Stolle Klint?) på Fur
  - Grænsen Stolleklint Ler til Fur Formation ses
  - Klinten indeholder askelag -17 og +19 (til korrelation med fjerntliggende lokaliteter)

## Komparativ analyse, sammenligning med andre lokaliteter

Emne	Molerområdet	Andre lokaliteter
Eocæn diatomit	Diatomeerne meget velbevarede. Ikke almindeligt i så gamle sedimenter fordi skalmaterialet (biogen opal) kemisk er relativt ustabilt	I Ølst Fm findes dårligt bevarede diatomeer i leret. Der kendes en del diatomitter fra kvartærtiden i Danmark. Størstedelen af dem er lakustrine.
Lag af frisk, vulkansk aske	Bevaringstilstanden er så god at askens kemi kan bestemmes (Larsen et al. 2003)	I andre dele af Danmark er askelagene mere omdannet (Larsen et al. 2003). I Nordsøen kan askelagene genkendes som en petrofysisk anomali i de borer, hvor dette interval ikke er repræsenteret i borekerner.
Diagnostiske askelag, unikt potentielle for korrelation	Korrelation af lagserier over store afstande er altid vanskeligt. I askelag -17 og +19 er der to lag, som kan følges fra SV for Irland gennem Nordsøen til Danmark. -17 også til Østgrønland.	Askelagskorrelation kendes også i Holocæne sedimenter f.eks. 'Lacher See asken', som korrelerer øer over store områder. Vulkanudbruddene har været gigantiske. "When the sun died over northern Europe: the unique geology of Denmark's inland islands" (Brooks 2006).
Kompletter skeletter af fugle i 3D	Komplette skeletter af fugle er sjældne, og skeletter hvor bløddele er bevaret, og hvor detaljer i skelettet ikke er ødelagt af kompaktion er MEGET sjældne (se Lindow 2011). Det er sensationelt, at det er lykkedes at bestemme farver på fjær (og insekter) i Fur Fm. En art har maveindhold af fisk.	Fugle har lette knogler, som relativt let slides, hvis knoglerne transporteres eller omlejres. Dette vanskeliggør en artsbestemmelse af fossilet, især hvis knoglerne optræder enkeltvis. Endvidere er de karakteristika, som bruges til at tolke fossile fugles slægtsskab i en del tilfælde baseret på detaljer i eksempelvis kraniet.
Komplette skeletter af fisk	Som fugle, her er blot flere. Nogle bevaret med kranier i 3-D. Mange med maveindhold. Visse arter er meget store fisk.	Fossile fisk er fundet i flere danske formationer (Bonde et al. 2008), men Fur Fm er førende både med hensyn til antal individer, antal arter og bevaringstilstand, hvor denne er bedst.
En fantastisk talrig og artsrig insektfauna	Så mange individer, at der kan foretages en faunaanalyse. Insekter er en af de artsrigeste klasser i dyreriget, og er derfor anvendelige til palæoøkologiske analyser, især hvor de optræder i store antal.	Insektfossiler er kendt som fossiler flere geologiske tidsperioder og fra mange lokaliteter. Fur Formationen udmærker sig ved et meget stort antal insektfossiler, hvoraf mange individer er meget velbevarede.
CIE og PETM	I Stolle Klint på Fur ses overgangen fra Stolleklint Ler til Fur Formation (aflejret i PETM), og i samme ubrudte sektion ses askelag -17 og +19, således at disse markører er synlige og lettliggængelige.	CIE og PETM kendes også fra Ølst og Storebælt (Heilmann-Clausen & Schmitz 2000, Schmitz et al. 2004). CIE og PETM er defineret i en borekerne, materiale herfra er svært tilgængeligt. Dateringen af CIE i forhold til askelagene hviler på identifikation af astronomiske cykler (Westerhold et al. 2009).

Drivhusperiode	PETM opfattes som en drivhusperiode. I molerområdet kan askelagene -39 til -19 opdele denne periodes aflejninger i tyve 'tidsskiver'. Dette er en fremragende opløsighed, som langt overgår biostratigrafisk inddeling.	På basis af biostratigrafi er det sjældent muligt at foretage en underindeling af et tidsrum på ca. 200.000 år, når der er tale om prækuartære sedimenter. Det er selvfølgelig muligt at sammenligne to lokaliteter og at betemmmme om givne parametre ændrer sig på samme måde. Det er blot næsten aldrig muligt at bevise, om ændringerne er samtidige eller de blot kommer i samme rækkefølge. Det gør det vanskeligt at afgøre om fluktuationer
Glacialtektonik	Markante bakkestreg på Nordmors, det nordlige Fur og ved Silstrup på Thy er dannet som glacialtektoniske komplekser, hvor kvartærtidens iskapper har dannet folder og overskydninger i moler og kvartære aflejninger. Kystklinter og molergrave er vinduer til bakkernes interne strukturer, som giver oplysninger om både deformationsprocesser og temperaturforhold ved gletscherens sål.	Glacialtektonik kendes også fra mange andre klinter i Danmark (Lønstrup Klint, Møns Klint, Ristinge Klint og flere). Sammenlignet med andre danske klinter udmaerker molerklinterne sig ved foldning af de askeførende lag. Glacialtektonik kendes fra andre lande, specielt Canada, Nordamerika og Nordeuropa, men lokaliteterne er ikke så flot blottede som de danske.
Moderne kystlandskaber?	Eksemplificerer kystklinter og dannelsen af marint forland	Ikke meget forskelligt fra kystklinter i resten af Danmark og mange andre steder i verden

**Tabel 4.** Skematisk sammenstilling af unikke karakteristika ved molerområdet og sammenlignelige lokaliteter i resten af verden.

## Den 60 m tykke Fur Formation er en af de bedst bevarede diatomit-formationer fra tidlig Eocæn

Aflejninger af diatomit er velkendt over hele verden. Lige som i Danmark er de overalt eftertragtede råstof forekomster, der udnyttes til isoleringsformål og granulat. Det største antal forekomster består af søaflejninger fra Miocæn og fremefter. De lakustrine diatomitter er ofte meget lokale, og de forekommer hyppigt som fossiler vulkansøer. Myvatn på Island er et recent eksempel på en sådan diatome-rig vulkansø. Når vi går tilbage i tid bliver forekomsterne sjældnere og sjældnere, og selvom de ældste stamformer til diatomeer er kendt tilbage til Perm og Trias, begynder der ikke at optræde egentlige diatomitter førend Tertiær tiden. En af årsagerne til dette er, at diatomeeskallernes opal-A omdannes til opal C/T, som er en tæt silificeret bjergart, chert (flint), hvori de organiske mikro-strukturer ikke er bevaret. Jo ældre lagserierne er des mere omdannede bliver de, og det vil ikke være muligt at kunne bestemme, om et flintlag er en omdannelse af diatomeer eller f.eks. radiolarer. Omdannelsen til flint er også velkendt i Fur Formationen, hvor det er repræsenteret ved "Skiferla-

gene". Men generelt består Fur Formationen af velbevarede diatome-skaller. Større forekomster af chertificerede miocæne diatomitter er under oliejagten ved Færøerne fundet som stærkt reflekterende lag under havbunden. Diatomitter findes også som marine aflejringer. I de seneste år har undersøgelser af recente og subrecente marine diatomitter været stærkt i focus, da diatomeerne især er talrige omkring Ækvator, hvor overfladenvandet er lunt, og hvor de thermo-saline forhold medfører opvælling af næringsstoffer. Ved at kortlægge den recente fordeling af diatomeernes spredning under både El Nino og ikke-El Nino forhold er det muligt at studere oceanernes strømningsforhold tilbage gennem tiden ud fra dybhavs borekerne undersøgelser (Thakahashi et al. 2000). De marine diatome-aflejringer har en større regional udbredelse, og det er igen i Miocæn man finder forekomster, der i mægtighed og udbredelse kan sammenlignes med Fur Formationen. Det er især i California, at man findes disse, da den subtropiske oceankyst favoriserer opblomstringen af diatomeer, og da de aktive tektoniske bevægelser langs Skt. Andreas Forkastningen har muliggjort at de tertiære aflejringer er "løftet op på land". Den eneste kendte forekomst af en eocæn diatomit, der kan sammenlignes med moleret er den russiske Inza diatomit forekomst beliggende ved Ulyanovsk i Volga Bassinet (Pedersen et al. 2009, Mukhina 1976, Ziegler 1990). Den russiske diatomit har samme farve og lerindhold som Fur Formationens lerede diatomit. Men når dette er sagt holder al anden sammenligning op. Hele den russiske diatomit er karakteriseret ved at være strukturløs. Der er ingen lamination eller lagdeling i formationen. Afsløringsmiljøet har været noget varmere, idet der optræder diatomeer (*Melosira* sp.), som er indikator for tropiske til subtropiske havforhold. Den geologiske setting er endvidere helt forskellig fra den danske. Volga Bassinet har haft forbindelse til det Indiske Ocean, måske også til Nordsøen i en kort midlertidig "lavvandet" periode. Men de vulkanske askelag fra Nordatlanten mangler og indholdet af fossiler er slet ikke på linie med Fur Formationen.

## Fur Formationen – et lager for den perfekte lagfølge af aske fra den Nordatlantiske Vulkanprovins

Det er mere reglen end undtagelsen at diatomitter forekommer sammen med vulkanske dannelser. Der er ingen tvivl om, at den forøgede mængde af opløst Si i vandet, som forekommer, hvor vulkansk glas kommer i kontakt med havvandet eller søvandet har en gavnlig effekt på diatomeernes evne til at bygge deres opal-skelet. Men de fleste miocæne til pleistocæne diatomitter, som indeholder vulkanske produkter, afspejler kun lokale forhold relateret til et enkelt – geologisk set kortvarigt – vulkancenter. Et typisk eksempel på dette er f.eks. diatomitten, som forekommer på den centrale del af øen Aegina ud for kysten ved Athen, som er en 800.000 år gammel diatomit dannet i en sø mellem vulkanerne tilhørende den vulkan-bue, der har Santorino som sit mest recente udbrudsområde. Men en så lang og ubrudt serie af vulkanske askelag, som findes i molerområdet, er ikke kendt uden for Danmark. I Danmark findes de vulkanske askelag også i Ølst Formationen, der hovedsag-

ligt er kendt fra råstofgravene i plastisk ler ved Randers, hvor de anvendes til fremstilling af Leca-granulat. Der findes nogle få kystblotninger af eocænt plastisk ler, men det vulkanske glas i askelagene her såvel som i lergravene er devitrificeret (d.v.s. omdannet til sekundære mineraler så som zeolit og smektit) på nær nogle enkelte askelag, som er indkapslet i kalkkonkretioner (Nielsen 1974).

Påvisningen af at asken stammer fra vulkanudbrud som har ligget mindst lige så langt væk som ved Færøerne fortæller, at der har været tale om gigantiske udbrud.

Da den islandske vulkan Eyafjallajökull i 2010 lammede europæisk flytrafik med sin askesky faldt der i Danmark en askemængde der ikke var stor nok til at danne et kontinuert lag af ét korns tykkelse (Jeppe Joel Larsen, pers. comm. 2010). I en klint ville et sådant askelag være usynligt. Men de tykkeste askelag i Fur Formationen vidner om, at hele det nordatlantiske område må være gået "i sort" over flere år under sådan et udbrud. Askelag +19 med en tykkelse på næsten 20 cm har samme sammensætning som Mount Skt. Helens, og udbruddet må have været af samme eksplorative karakter. Men mængden af aske produceret fra +19 vulkanen overgår det nutidige udbrud med flere distance. Askelag +19 har en tykkelse på 3 cm i østrigske aflejringer, som ligger ca. 2000 km fra vulkankrateret. Til sammenligning dannede asken fra vulkanen Askjas udbrud i 1875 et 0.5 cm tykt lag i Stockholm, efter transport over en afstand på 1700 km (Larsen et al. 2003).

Den bedste sammenlignelige optræden af askelag, som i molerområdet, findes i olieefterforskningsboringerne fra Nordsøen. Her i Balder Formationen har man fundet den samme serie af askelag som ved Limfjorden. Men askelag i en borekerne kan nu engang aldrig sammenlignes med at stå ved en klintblotning, hvor man kan gå hen og klappe hver eneste lag og opleve lagserien i en rumlig sammenhæng.

## Fur Formationen som fossil lagerstätte

Der findes talrige fossil lagerstätte forekomster rundt omkring i verden. På Hokaido, den nordlige ø i Japan, kan man således besøge mindst 4 geologiske museer, der fremviser møllehjul-store ammonitter fra Kridttiden. Hvis man skulle fremdrage en fossil lagerstätte, der er sammenlignelig med Fur Formationen vil det være den kinesiske Shandong Geopark. Ligesom Fur Formationen består Shanwang formationen i Shandong provinsen i det østlige Kina også af en diatomit med sammenlignelig lagtykkelse. Antallet af fossiler fundet her i Shandong er i samme størrelsesorden som i moleret, men hermed hører alle ligheder også op. Godt nok forekommer der også i Shawang Bassinet vulkansk aktivitet, men denne er knyttet til det lokale miocæne søområde, der udgjorde aflejringsområdet for de berømte fossilfund, som alle kan føres tilbage til det østkinesiske landområde.

Der kendes et meget stort antal fossile fisk fra Green River Formationen, og i Fossil Syncline Basin i Wyoming er fiskefossiler blevet indsamlet siden 1870'erne, mest af kommercielle samlere. Fiskene findes i fint laminerede, varvige muddersten aflejret i en meget stor sø og er perfekt bevarede. McGrew (1975) iværksatte en systematisk undersøgelse af fossilernes bevaringstilstand og fandt, at den varierede systematisk, samt at antallet af ikke-perfekte fossiler langt overstiger antallet af perfekte. Da de ikke-perfekte fossiler bliver kasseret bliver de perfekte fund overrepræsenteret i statistikken og i samlingerne. En tilsvarende analyse foreligger ikke fra Fur Formationen, men det er dog kendt blandt museumsfolk, naturvejledere og palæontologer, at der er et meget stort antal delvis bevarede skeletter, især af de små guldlaks.

Af sammenlignelige, tidlig tertiære marine fiskefaunaer er den vigtigste fra Monte Bolca i Norditalien. Denne fauna er ca 5 mill år yngre end Fur Formationen. De fossile fisk er bevaret i laminerede kalklag og kan bl.a. ses på et fint museum i byen Bolca. Faunaen omfatter mere end 200 arter. Disse er fra relativt lavt vand, diversiteten er kolossal og fiskegrupperne er anderledes end i Fur Formationen. Lokaliteten indeholder også andre fossiler: planter, krokodille, få insektarter og nogle krebsdyr. Fiskefaunaen omfatter en del oceaniske fisk (makrelfisk, *Mene*, glansfisk etc), men grupper fra lavt og kystnært miljø dominerer (kirurgfisk, sommerfuglefisk, havruder, ål, trompetfisk, sild, fladfisk, rokker og enkelte hajer) (Bonde 2011b).

Det er relevant at sammenligne Fur Formationen med fiskelagene fra Danatski Serien i Turkmenistan, som menes at være fra det tidligste Eocæn. Den turkmenske fauna er klart oceanisk og indeholder: makrelfisk, glansfisk, *Mene*, lakstobisen *Holosteus*, en lignende sild, trompetfisk, men faunaen har væsentligt lavere diversitet end Fur Formationen, og er vanskeligere tilgængelig.

Eocæne marine aflejringer i England og Belgien indeholder meget sjældent hele skeletter og kan ikke sammenlignes med Fur Formationen. De eocæne aflejringer ved Messel i Sydtyskland er udnævnt til Verdensarvslokalitet. Her er fossiler bevaret i laminerede sedimenter i en kratersø. Ved Messel er fundet mange fisk, ligesom lokaliteten er kendt for en fantastisk bevaringstilstand med f.eks. fjer, farver, også på insekter. Bevaringen i 3-D er ikke så god, da alle fisk, fugle, krybdyr og pattedyr har kranier og knogler klemt helt flade og oftest knust (Bonde 2011b).

I Californien findes store diatomitter fra sen Miocæn, og disse indeholder flere dybhavsfisk med lysorganer og også både oceaniske og mere kystnære former i en ganske rig fauna. Mange af disse fisk er næsten magen til nulevende former. Disse diatomitter er ikke overbevisende analoger til Fur Formationen (Bonde 2011b).

Fur Formationens fauna er specielt vigtig, fordi den giver os det første indblik i den mere moderne diversitet af oceaniske faunaer efter Kridttiden (Bonde 2011b).

## Insekterne i Fur Formationen i internationalt perspektiv

Sammen med det baltiske rav udgør Fur Formationen de vigtigste Lagerstätte for teriære insekter i Norderopa (Rust 2011). Bevaringen af de fossile insekter er fremragende. I nogle tilfælde er insekterne bevaret tredimensionalt og blødt væv kan være bevaret. Mange grupper af insekter har deres første (ældste) forekomst i Fur Formationen og disse er derfor af afgørende betydning for at kortlægge insekternes evolution og fylogeni. Insektafunaen i Fur Formationen er af særlig vigtighed for rekonstruktionen af den tidlige opsplitning (radiation) af næsten alle vigtige grupper af insekter i løbet af den tidlig eocæne drivhusperiode (PETM). Endelig hr insekterne i Fur Formationen leveret unikke data til forståelsen af ændringer i insekternes geografiske udbredelse efter de store klima-ændringer for ca. 55 millioner år siden (Rust 2011).

## Fossile planter og klimaudvikling

En sammenligning mellem vegetationsændringer i Nordeuropa (baseret på sporer og pollen i Fur Formation), med tropiske og Nordamerikanske floraer kan afsløre om der er globale mønstre i ændringerne i vegetationen i løbet af PETM (Willumsen 2011). En sådan analyse vil også kaste lys over tidspunkter og ruter for planternes indvandring i Nordeuropa i denne periode (tidlig Eocæn (Willumsen 2004). Fur Formationens sporer og pollen selskab er formodentlig et af de bedste steder (global set) til at gennemføre en sådan rekonstruktion af vegetationen i en kritisk periode i Jordens historie. I løbet af PETM og senere i Eocæn måtte flora og fauna tilpasse sig til først et ekstremt varmt og senere et varmt klima. Lokaliteterne ved Limfjorden (e.g. Fur Formationen) har en stor mulighed (potentiale) for at indeholde detaljeret information om hvordan en hurtig drivhuseffekt påvirkede den nordeuropæiske vegetation. Denne forskning er vigtig, fordi der kun er meget få lokaliteter verden over hvor lagserie er tyk nok til at planternes reaktion på PETM kan studeres i detaljer.

## Klimaforandring ved Paleocæn-Eocæn grænsen

Molerklinterne huser aflejringer fra en klimatisk enestående begivenhed, en fortidig global hedebølge, som varede ca. 200.000 år og fandt sted for ca. 56 mill år siden (Storey 2011). Hedebølgen var ledsaget, og muligvis forsaget, af kuldioxidudslip som er sammenlignelige med nutidens menneskeskabte kuldioxidudslip (Heilmann-Clausen 2010). Denne dramatiske klimaforandringer definerer Paleocæn-Eocæn grænsen og genkendes geokemisk på et udsving på 2–6‰ i  $\delta^{13}\text{C}$ , en såkaldt negativ kulstof-anomali (CIE), samt på markante ændringer i fauna og flora.

Stolle Klint har en særlig kvalitet fordi Stolleklint Ler, som markerer Paleocæn–Eocæn grænsen og indeholder PETM begivenheden, overlejres direkte af moler med askelagene fra Nordatlantens åbning og de to stratigrafisk vigtige askelag –17 og +19 (Storey et al. 2007, Westerhold et al. 2009, Storey 2011). Sammenholdt med de mange fossiler fra fisk, insekter og fugle i de to formationer gør disse egenskaber Stolle Klint til en af Europas absolut vigtigste lokaliteter (Heilmann-Clausen 2010).

## Det glacialtektoniske landskab ved Limfjorden

Et helt overordnet element ved glacialtektoniske landskaber er, at de alle er dannet på land. Der findes glacialtektoniske komplekser begravet i f.eks. Nordsøen, men disse var dannet på et tidspunkt, da store mængder af havenes vand var bundet i iskapperne på den nordlige og sydlige halvkugle, og først under mellemistidens havstigning blev de oversvømmet. Opskydningen af randmorænestrøg sker under isfremstødene fra store iskappe, som er akkumuleret over bjergområder i de pol-nære områder. Således udgør Danmark den geologiske setting for glacialtektonik dannet ved den Skandinaviske Iskappes fremrykning mod syd. De største glacialtektoniske komplekser i Danmark er foruden molerområdet Lønstrup Klint, Bovbjerg, Mols Hoved, Ristinge Klint og Møns Klint (Pedersen 2005).



**Figur 16.** En flage af moler er her glacialtektonisk skudt op over en serie moræneler og issøler, en begivenhed som fandt sted i sidste del af istiden for ca. 25.000 år siden. Feggeklit her fotografieret fra havet i morgensol, er en af de smukkeste repræsentanter for de isfoldede klinter i Danmark.

De største glacialtektoniske komplekser uden for Danmark findes i den centrale del af Nordamerika, hvor Dirt Hill og Cactus Hill i det sydlige Saskatchewan på grænsen mellem Canada og USA anses for at have den største udstrækning med en dækning af ca. 1000 km<sup>2</sup> (Aber 1993). Et kompleks af tilsvarende størrelse findes i Europa på grænsen mellem Tyskland og Polen, der Muskauer Faltenbogen (Kupetz et al. 2004). Hvis man medregner inderlavningerne så som Thisted Bredning m.m. har molerområdet stort set samme udstrækning. Men til forskel for Dirt Hill og Cactus Hill komplekset, som består af opskudte sand og lersten fra Kridttiden, og Muskauer Faltenbogen komplekset, som består af delvis bortgravede miocæne brunkuls forekomster, har molerområdet det fortron, at der igennem hele kompleksets delelementer findes friske snit i kystblotningerne, hvor deformationsstrukturerne kan studeres. Tilgængeligheden af molerområdets kystklinter er en kvalitet, som påkalder sig særlig opmærksomhed.

Sammenlignet med de øvrige danske klinter med isfoldede lagserier, er det forekomsten af de bøje-foldede lag (tæppefolder) som udmærker molerområdets klinter. Både ved Lønstrup Klint og på Møns Klint findes overskydninger af samme dimension som Hanklit og Fur Knudeklin. Men foldestrukturerne i molerområdet er særlig veludviklet på grund af, at de kompetente askelag ligger indlejret i det blødere moler. Der er ingen steder i verden, hvor man finder så smukt foldede glaciatektoniske lagserier.

# Referencer vedrørende Fur Formationen

- Aber, J.S. & Ber, A. 2007: Glaciotectonism. Development in Quaternary Sciences, 6. Elsevier, Amsterdam. 246 pp.
- Aber, J.S., Croot, D. & Fenton, M.M. 1989: Glaciotectonic Landforms and Structures. Glaciology and Quaternary Geology series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 200 pp.
- Andersen, J.P. 1948: Den stribede cementsten i de danske Eocene molerlag. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 11, 189-196.
- Andersen, N.M. 1982: A fossil water measurer (Insecta, Hemiptera, Hydrometridae) from the Paleocene/ Eocene of Denmark and its phylogenetic relationships. Bulletin of the Geological Society of Denmark 30, 91-96.
- Andersen, N. M. 1998: Water striders from the Paleogene of Denmark with a review of the fossil record and evolution of semiaquatic bugs (Hemiptera, Gerrromorpha). Det Kgl. Danske Vidensk. Selskab, Biologiske Skrifter 50, 1-157.
- Andersen, S. & Sjørring, S. 1992: Geologisk set. Det nordlige Jylland. Geografforlaget, 208 pp.
- Andersen, S.A. 1937a: De vulkanske Askelag i vejgennemskæringen ved Ølst og deres udbredelse i Danmark. Danmarks geologiske Undersøgelse, Series 2, 59, 52 p.
- Andersen, S.A. 1937b: Et vulkanområdes livshistorie. Geologiska Föreningens i Stockholms Förhandlingar, 59, 317-346.
- Andersen, S.A. 1938: Die Verbreitung der Eozänen vulkanischen Ascheschichten in Dänemark und Nordwestdeutschland. Zeitschr. für Geschiebeforsch. und Flachlandsgeologie, 14, 179-207.
- Andersen, S.A. 1944: Moleret og de vulkanske askelag. In: Andersen, S.A.: Det danske Landskabs Historie, 1. Bd, 391-415.
- Archibald, S. B., Makarkin, V. N. 2006: Tertiary giant lacewings (Neuroptera: Polystoechotidae): revision and description of new taxa from western North America and Denmark. Journal of Systematic Palaeontology 4 (2), 119-155.
- Åm, K. 1973: Geophysical indications of Permian and Tertiary igneous activity in the Skagerrak. Norges geologiske Undersøkelse 287, 1-25.
- Bechly, G. 2005. A new fossil dragonfly (Anisoptera: corduliidae) from the paleocene Fur Formation (Moclay) of Denmark. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie B, Nr. 358. 7 pp.
- Benda, L. 1972: The diatoms of the Moler Formation of Denmark (Lower Eocene). A preliminary report. In: Simonsen (ed.): First symposium on recent and fossil marine diatoms. Beih. Nova Hedwigia 39, 251-266.
- Berggren, W.A., Kent, D.V., Swisher, C.C., III, & Aubry, M.-P. 1995: A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. SEPM Special Publication 54, 129-212.
- Bertelli, S., Lindow, B., Dyke, G. J., & Chiappe, L. M. 2010. A well-preserved 'Charadriiform-like' fossil bird from the early Eocene Fur Formation of Denmark. Palaeontology, 53 (3), 507-531.
- Beyer, C., Heilmann-Clausen, C. & Abrahamsen, N. 2001: Magnetostratigraphy of the Upper Paleocene – Lower Eocene deposits in Denmark. Newsletter of Stratigraphy 39, 1–19.
- Bonde, N. 1966: The fishes of the mo-clay formation (Lower Eocene). Meddelelser fra. Dansk Geologisk Forening 16, 198-201.
- Bonde, N. 1972a: Det jyske moler. Varv, 44-55.
- Bonde, N. 1972b: Et usædvanligt miljø - moleret bliver til. Varv, 119-124.
- Bonde, N. 1973: Fiskefossiler, diatomitter og vulkanske askelag. Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1972, 136-143.

- Bonde, N. 1974: Palaeoenvironment as indicated by the "Mo-clay formation" (Lowermost Eocene of Denmark). *Tertiary Times* 2, 29-36.
- Bonde, N. 1979: Palaeoenvironment in the "North Sea" as indicated by the fish bearing Mo-clay deposit (Paleocene/Eocene) Denmark. *Meded. Werkgrp Tert. Kwart. Geol.* 16, 3-16.
- Bonde, N. 1982: Teleostei (bony fish) from the Norwegian North Sea drillings. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 62, 59-65.
- Bonde, N. 1987: Moler - its origin and its fossils, especially fishes. Published by SKAMOL on the company's 75th anniversary, 52 p.
- Bonde, N. 1992: Flint-fisk, moler-fisk, tropefisk og danekræ. *Varv nr. 2*, 35-42.
- Bonde, N. 1997: A distinctive fish fauna in the basal ash series of the Fur/Ølst Formation (Upper Paleocene, Denmark). *Aarhus Geoscience* 6, 33-48.
- Bonde, N. 2008: Osteoglossomorphs of the marine Lower Eocene of Denmark – with remarks on other Eocene taxa and their importance for palaeobiogeography. In: Cavin, L., Longbottom, A. & Richter, M. 2008. *Fishes and the Break-up of Pangaea*. Geological Society of London, Special Publication 295, 253-310.
- Bonde, N., Madsen, H., Schultz, B., Sylvestersen, R. & Jakobsen, S.L. 2010: Moleret i Nordjylland – diatomitten og fossilerne. *Dansk Naturhistorisk Forenings Årsskrift* nr. 19 og 20, 25-40.
- Bonde, N. 2011a: WHS fisk fra moler. Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinterne i Limfjorden på UNESCOs Verdensarvsliste, se Appendix, 5 p.
- Bonde, N. 2011b: Fiskefaunaer, som kan sammenlignes med Fur Formationens fiskefauna. Personlig kommunikation, juli 2011, se Appendix.
- Bonde, N., Andersen, S., Hald, N., & Jakobsen, S. L. 2008a. Danekræ - Danmarks bedste fossiler. 225 pp.
- Bonde, N., Madsen, H., Schultz, B. & Sylvestersen, R. (2008) Diatomitten og askeserien fortæller historier — Moleret I. *Naturens Verden* 2008-7/8, 43-51.
- Bradley, W.H. 1948: Limnology and the Eocene lakes of the Rocky Mountain region. *Bulletin of the Geological Society of America* 59, 635–648.
- Brooks, K. 2006: When the Sun died over northern Europe: the unique geology of Denmark's inland island. *Geology Today* 22 (5), 180–186.
- Buchardt, B. 1978: Oxygen isotope palaeotemperatures from the Tertiary period in the North Sea area. *Nature* 275, 121–123.
- Buchardt, B., Düwel, L., Jenner, C., Kristensen, R.M., Kristiansen, A., Petersen, G.H., Seaman, P., Stockmann, G., Thorbjørn, L., Vous, M., Whiticar, M.J. & Wilken, U. 1997: Submarine columns of ikaite tufa. *Nature* 390, 129-130.
- Buchheim, H.P. & Surdam, R.C. 1977: Fossil catfish and the depositional environment of the Green River Formation, Wyoming. *Geology* 5, 196–198.
- Calvert, S.E. 1974: Deposition and diagenesis of silica in marine sediments. International Association of Sedimentologists special Publication 1, 273–299.
- Bøggild, O.B. 1903: Vulkansk Aske i Moleret. *Meddelelser fra Dansk geologisk Forening*, 9, 1-12.
- Bøggild, O.B. 1918: Den vulkanske Aske i Moleret. *Danmarks geologiske Undersøgelse, Series 2*, No. 33, 84 p.
- Cleve-Euler, A. & Hessland, I. 1948: Vorläufige Mitteilung über eine neu entdeckte Tertiärablagerung im Süd-Schweden. *Bull. geol. Inst. Uppsala*, 32, 155-182.
- Collins, J. S. H., Schulz, B. P., & Jakobsen, S. L. 2005. First record of brachyuran decapods (Crustacea, Decapoda) from Fur Formation (early Eocene) of Mors and Fur Island, Denmark. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 32, 17-22.
- Crouch, E.M., Heilmann-Clausen, C., Brinkhuis, H., Morgans, H.E.G., Rogers, K.M., Egger, H. & Schmitz, B. 2001: Global dinoflagellate event associated with the late Paleocene thermal maximum. *Geology* 29, 315–318.

- Danielsen, M. & Thomsen, E. 1997: Palaeocene/Eocene diatomite in wells in the eastern North Sea. In: Thomsen, E. & Pedersen, S.A.S. (eds): Geology and palaeontology of the Mo-clay. Aarhus Geoscience 6, 19-24.
- Deyu, Z. 1987: Clay mineralogy of the Upper Paleocene and Eocene clay sediments in Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 36, 249-258.
- Dinesen, A., Michelsen, O. & Lieberkind, K. 1977: A survey of the Paleocene and Eocene deposits of Jylland and Fyn. Danmarks geologiske Undersøgelse Ser. B, 1, 15 pp.
- Drøhse, T.S. 2011: Strukturgeologisk undersøgelse af Feggeklit. Sammenlignende studie af deformationsstrukturer i kystblotningen Feggeklit på Nordmors og seismiske opmålinger af strukturen i Limfjorden øst for profilet. Unpublished B.Sc. thesis, University of Copenhagen, 28 pp.
- Dyke, G. & Lindow, B. 2009. Taphonomy and abundance of birds from the Lower Eocene Fur Formation of Denmark. Geological Journal 44, 365-373.
- Dyke, G.J. & van Tuinen, M. 2004: The evolutionary radiation of modern birds (Neornithes): reconciling molecules, morphology and the fossil record. Zoological Journal of the Linnean Society 141, 153-177.
- Dyke, G.J., Waterhouse, D.M. & Kristoffersen, A.V. 2004: Three new fossil landbirds from the early Paleogene of Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 51, 77-85.
- Espersen, T.B. 1994: En refleksionsseismisk undersøgelse I den centrale del af Limfjorden. Unpublished master thesis, University of Aarhus, 109 pp. + 14 bilag med profiler og kort.
- Exley, C., Toller, A., Gray, G., Roberts, S. & Birchall, J.D. 1993: Silicon, aluminium and the biological availability of phosphorus in algae. Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences 253, 93-99?
- Fenner, J. 1994: Diatoms of the Fur Formation, their taxonomy and biostratigraphic interpretation. — Results from the Harre borehole, Denmark. Aarhus Geoscience 1, 99-163.
- Flodin, T. 1973: Notes on the bedrock of the eastern Skagerrak. Stockh. Contrib. Geol., 24, 79-102.
- Forchhammer, G. 1835: Danmarks geognostiske Forhold, forsaavidt som de ere afhængige af Dannelser, der ere sluttede, fremstillede i et Indbydelsesskrift til Reformationsfesten den 14de Novbr. 1835. Københavns Universitet, 112 p.
- Freiwald, A. 1990: Insekten aus der Fur-Formation von Dänemark (Moler, ob. Paleozän / unt. Eozän ?). 4. Tipulidae. Meyniana 42, 47-63.
- Freiwald, A. 1991: Insekten aus der Fur-Formation von Dänemark (Moler, ob. Paleozän / unt. Eozän ?). 5. Cylindrotomidae (Diptera: Tipulomorpha). Meyniana 43, 97-123.
- Freiwald, A. 1992: Insekten aus der Fur-Formation von Dänemark (Moler, ob. Paleozän / unt. Eozän ?). 7. Ptychopteridae (Diptera). Meyniana 44, 179-187.
- Garassino, A. & Jakobsen, S. L. 2005. *Morscrangon acutus* n. gen. n. sp. (Crustacea, Decapoda, Caridea) from the Fur Formation (Early Eocene) of the Islands of Mors and Fur (Denmark). Atti societa italiana di Scienze naturali, Museo civico di Storia naturale, Milano, 146, 95-107.
- Gibbard, P.L. & Lewin, J. 2003: The history of the major rivers of southern Britain during the Tertiary. Journal of the Geological Society of London 160, 829-845.
- Gingerich, P.D. 2003: Mammalian responses to climate change at the Paleocene-Eocene boundary: Polecat Bench record in the northern Bighorn Basin, Wyoming. In: Causes and consequences of globally warm climates in the Early Paleogene. Geological Society of America Special Paper 369, 551-566.
- Gingerich, P.D. 2006: Environment and evolution through the Paleocene–Eocene thermal maximum. Trends in Ecology and evolution 21 (5), 246-253.
- Greinert, J. & Derkachev, A. 2004: Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: implications of a venting-related ikaite/glendonite formation. Marine Geology 204, 129-144.

- Grønwall, K.A. 1908: Om boringen på Samsø og nogle deraf følgende slutninger om Danmarks Ældre Tertiær. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 3, 133-148.
- Gry, H. 1940: De istektoniske Forhold i Moleret. Med bemærkninger om vore dislocerede klinters dannelse og om den negative askeserie. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 9, 586-627.
- Gry, H. 1941: Diskussion om vore dislocerede klinters dannelse. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 10, 39-51.
- Gry, H. 1965: Furs Geologi. Dansk natur - dansk skole, Årsskrift 1964, 45-55.
- Gry, H. 1979: Kortbladet Løgstør. Danmarks geologiske Undersøgelse 1. Rk. nr. 26, 58 pp.
- Hansen, J.M. 1979: Age of the Mo–Clay Formation. Bulletin of the Geological Society of Denmark 27, 89–91.
- Hartz, N. 1909: Bidrag til Danmarks tertære of diluviale flora. Danmarks geologiske Undersøgelse 2. Rk., 20, 292 p + atlas.
- Heiberg, P.A.C. 1863: Conspectus criticus diatomacearum danicarum. Kritisk oversigt over de danske diatomeer.
- Heie, O.E. 1970: Lower Eocene aphids (Insecta) from Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 20, 162-168.
- Heie, O. 1987: Palaeontology and Phylogeny. In: Minks, A. K. & Harrewijn, P. (eds.): Aphids – their biology, natural enemies and control. Vol. A, S. 367-391; World Crop pests 2A, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 450 S.
- Heilmann-Clausen, C. 1982: The Paleocene-Eocene boundary in Denmark. Newslett. Stratigr., 11, 55-63.
- Heilmann-Clausen, C. 1985: Dinoflagellate stratigraphy of the uppermost Danian to Ypresian in the Viborg 1 borehole, central Jylland, Denmark. Danmarks geologiske Undersøgelse Series A, 7, 69 p.
- Heilmann-Clausen, C. 1994: Review of Paleocene dinoflagellates from the North Sea region. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar 115, 51–53.
- Heilmann-Clausen, C. 1995: Palæogene aflejringer over danskekalken. In: Nielsen, O.B. (ed) Danmarks geologi fra Kridt til i dag. Aarhus Geokompender nr. 1, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, 69-113.
- Heilmann-Clausen, C. 1997: How one diatomite led to the development of another diatomite – the Oligocene section at Silstrup, NW Denmark, Tertiary Research 18, 31–34.
- Heilmann-Clausen, C. 2000: En norsk? flintesten fra den danske askeserie. Varv 2000-1, 3-8.
- Heilmann-Clausen, C. 2001: Flere flintesten fra moleret. Varv 2001-2, 15-16.
- Heilmann-Clausen, C. 2010: Det globale thermale maksimum ved Paleocæn-Eocæn grænsen: Klimahistorie og paleobiologi, relevans for de aktuelle klimaændringer samt videnskabelig værdi af grænselokaliteten ved Stolleklint på Fur. Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinterne i Limfjorden på UNESCOS Verdensarvsliste, se Appendix.
- Heilmann-Clausen, C., Nielsen, O.B. & Gersner, F. 1985: Lithostratigraphy and depositional environments in the Upper Paleocene and Eocene of Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 33, 287–323.
- Heilmann-Clausen, C. & Schmitz, B. 2000: The late Paleocene maximum  $\delta^{13}\text{C}$  excursion in Denmark? Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar 122, p. 70.
- Heilmann-Clausen, C. & Surlyk, F. 2006: Koralrev og lerhav, Palæogen. In: Larsen, G. (ed): Naturen i Danmark – Geologien. Gyldendal, 181–226.
- Henriksen, K.L. 1922: Eocene insects from Denmark. Danmarks geologiske Undersøgelse 2. Rk., 37, 36 pp.
- Hoch, E. 1975: Amniote remnants from the eastern part of the Lower Eocene North Sea Basin. Colloque International du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris 1973: Problèmes actuels de paléontologie - Evolution des Vertébrés. No. 218, 543-562.

- Hoch, E. 1983: Fossil evidence of early Tertiary North Atlantic events viewed in European context. In: M. Bott et al. (eds) Structure and development of the Greenland - Scotland Ridge.
- Hoch, E. & Pedersen, S.S. 1983: En gammel fugl. Varv nr. 4, 99-107.
- Homann, M. 1991: Die Diatomeen der Fur Formation. Geologisches Jahrbuch Reihe A, Heft 123, 285 p + plates.
- Houmark-Nielsen, M. 1999: A lithostratigraphy of Weichselian glacial and interstadial deposits in Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 46 (1), 101–114.
- Houmark-Nielsen, M., Knudsen, K.L. & Noe-Nygaard, N. 2006: Istider og melemistider. In: Larsen, G. (ed): Naturen i Danmark– Geologien. Gyldendal, 255–302.
- Houmark-Nielsen, M. 2003: Signature and timing of the Kattegat Ice Stream: onset of the Last Glacial Maximum sequence at the southwestern margin of the Scandinavian Ice Sheet. Boreas 32, 227–241,
- Huggett, J. 1993: Petrology and diagenesis of Palaeogene clays from Ølst and Ålbækhoved, Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 40, 256–271.
- Huggett, J. M., Schultz, B. P., Shearman, D. J. & Smith, A. J. 2005: The petrology of ikaite pseudomorphs and their diagenesis, Proceedings of the Geologists' Association 116 (3–4), 207–220.
- Hundahl, M. 1997: Glacial geological investigation of the cliffs at Thisted Bredning. In: Thomsen, E. & Pedersen, S.A.S. (eds): Geology and Palaeontology of the Mo-clay. Aarhus Geoscience 6, 65–68.
- Håkansson, E., Bromley, R. & Perch-Nielsen, K. 1974: Maastrichtian chalk of north-west Europe — a pelagic shelf sediment. Special Publication International Association of Sedimentologists 1, 211–233.
- Håkansson, E. & Sjørring, S. 1982: Et molerprofil i kystklinten ved Salgerhøj, Mors. Dansk geologisk Forening, Årsskrift for 1981, 131–134.
- Iakoleva, A.I. & Heilmann-Clausen, C. 2007: *Wilsonidium pechoricum* new species—a new dinoflagellate species with unusual asymmetry from the Paleocene/Eocene transition. Journal of Paleontology 81(5), 1020–1030.
- Jacque, M. & Thouvenin, J. 1975: Lower Tertiary tuffs and volcanic activity in the North Sea. In: Woodland, A.W. (ed.): Petroleum and the continental shelf of North West Europe, 455–465.
- Japsen, P. & Langtofte, C. 1991: Geological map of Denmark. The Danish Basin. 'Base Chalk' and the Chalk Group. Danmarks geologiske Undersøgelse Map Series, 30, 2p and 4 maps.
- Jakobsen, P.R., Klint, K.E.S. & Pedersen, S.A.S. 1994: Lerundersøgelser i Junget Molerfelt. DGU Kunderapport 1994/62, 26 pp.
- Kaplan, M.E. 1979: Calcite pseudomorphs (pseudogaylussite, Jarosite, Thinolite, Glendonite, Gennoishi, White Sea Hornlets) in sedimentary rocks. Origins of the pseudomorphs. Litologiya i Poleznye Iskopaemye 5, 125–141 (in Russian). UDC 549.742.111 : 551.762, p. 623–636, Plenum Publishing Corporation 1980 (translation in English).
- Karl, H.-V. in press: *Tasbacka madseni* n. sp., a new Eocene marine turtle from Denmark (Testudines: Cheloniidae). Studia Palaeochelonilogica IV, University of Salamanca, Spain.
- Karl, H.-V. & Lindow, B.E.K. 2009: First evidence of a late Cretaceous marine turtle (Testudines: Cheloniidae) from Denmark. Studia Geologica Salmanticensa 45 (2), 175–180.
- Klint, K.E.S. & Pedersen, S.A.S. 1995: The Hanklit glaciotectonic thrust fault complex, Mors, Denmark. Danmarks Geologiske Undersøgelse Ser. A No. 35, 30 pp.
- Knox, R.W.O'B. 1984: Nannoplankton zonation and the Paleocene/Eocene boundary beds of NW Europe: an indirect correlation by means of volcanic ash layers. Journal of the Geological Society of London 141, 993–999.
- Knox, R.W.O'B. 1996a: Correlation of the early Paleogene in northwest Europe: an overview. In: Knox, R.W. O'B., Corfield, R.M. & Dunay, R.E. (eds.) Correlation of the Early Paleogene in Northwest Europe. Geological Society of London, Special Publication 101, 1–11.

- Knox, R.W.O'B 1996b: Tectonic controls on sequence development in the Paleocene and earliest Eocene of southeast England: implications for North Sea stratigraphy. In: Hesselbo, S.P. & Parkinson, D.N. (eds.) Sequence stratigraphy in British geology. Geological Society of London, Special Publication 103, 209–230.
- Knox, R.W.O'B. 1997: The late Paleocene to early Eocene ash layers of the Danish Mo-Clay (Fur Formation): stratigraphic and tectonic significance. In: Thomsen, E. & Pedersen, S.A.S. (eds.): Geology and Palaeontology of the Mo-Clay. Aarhus Geoscience 6, 7–11.
- Knox, R.W.O'B. & Ellison, R.A. 1979: A lower Eocene ash-series in S.E.England. Journal of the Geological Society of London 136, 251-253.
- Knox, R.W.O'B. & Harland, R. 1979: Stratigraphical relationships of the early Paleogene ash series of NW Europe. Journal of the Geological Society of London 136, 463-470.
- Knox, R.W.O'B. & Morton, A.C. 1988: The record of early Tertiary N Atlantic volcanism in sediments of the North Sea Basin. In: Morton, A.C. & Parson, L.M. (eds) Early Tertiary volcanism and the opening of the NE Atlantic. Geological Society of London, Special Publication 39, 407–419.
- Knox, R.W.O'B. & Morton, A.C. 1990: Geochemistry of late Palaeocene and early Eocene tephras from the North Sea Basin. Journal of the Geological Society of London 147, 425-437.
- Kock, L. 1986: Die Moler-Formation des Limfjordes. Fossilen. Z. f. Hobbypal@ont. 3 (2), 65-72.
- Konno, H. 1993: Settling and coagulation of slender type diatoms. Water Science and Technology 27, 231–240.
- Korsager, B. 2002: En strukturel og sedimentologisk undersøgelse af klinten ved Skærbæk, Nordmors. Unpublished M.Sc. thesis, University of Copenhagen, 95 pp.
- Köthe, A. 1990: Paleogene dinoflagellates from Northwest Germany, biostratigraphy and palaeoenvironment. Geologisches Jahrbuch Reihe A, Heft 118, 111 p + plates.
- Kristoffersen, A. V. 1999. Lithornithid bids (Aves, Palaeognathae) from the Lower Palaeogene of Denmark. Geologie en Mijnbouw, **78**, 375-381.
- Kristoffersen, A. V. 2002a. The avian diversity in the latest Paleocene-earliest-Eocene Fur Formation. Denmark, Geological Institute University of Copenhagen. (Unpublished Ph.D.)
- Kristoffersen, A. V. 2002b. An Early Paleogene Trogon (Aves: Trogoniformes) From the Fur Formation, Denmark. Journal of Vertebrate Paleontology 22 (3), 661-666.
- Kühne, W. 1941: A new Zeomorph fish from the Paleocene Moler of Denmark. Ann. Mag. Nat. Hist., 11, 7, 374-386.
- Larsen L. M, Fitton J. G. og Pedersen A. K. 2003: Paleogene volcanic ash layers in the Danish Basin: composition and source areas in the North Atlantic Igneous Province. Lithos 71, 47–80.
- Larsen, L.M. & Sørensen, H. 2010: Grønlands geologi som kilde til inspiration og ny forståelse af det geologiske verdensbillede. In: Nielsen, M.A. (ed.) Det fremmede som historisk drivkraft, Danmark efter 1742. Festskrift til Hendes Majestæt Dronning Margrethe II ved 70-års-fødselsdagen den 16. april 2010. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, 104–119.
- Larsen, L.M., Waagstein, R., Pedersen, A.K. & Storey, M. 1999: Trans-Atlantic correlation of the Paleogene volcanic successions in the Faeroe Islands and East Greenland. Journal of the Geological Society of London 157, 1081–1095.
- Larsson, S.G. 1975: Palaeobiology and mode of burial of the insects of the Lower Eocene Mo-clay of Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 24, 193-209.
- Leonard, L., Dyke, G. J., & Tuinen, M. V. 2005. A new specimen of the fossil palaeognath *Lithornis* from the Lower Eocene of Denmark. American Museum of Natural History, New York, Number 3491, 11 pp.
- Lindow, B. 2007. The Early Evolution of Modern Birds: Fossil Evidence from the Lower Eocene Fur Formation of Denmark. University College Dublin, Irland. (Unpublished Ph.D.)

- Lindow, B.E.K. 2011: Bird evolution across the K/T-boundary and the basal neornithine diversification, pp 338-354. In: Dyke, G.J. & Kaiser, G. (eds.): *Living Dinosaurs: The Evolutionary History of Modern Birds*. John Wiley & Sons, Oxford, 422 pp.
- Lindow, B.E.K. 2011a: The fossil birds of the Fur Formation. Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinterne i Limfjorden på UNESCOs Verdensarvsliste, se Appendix, 4p.
- Lindow, B.E.K. 2011b: The fossil sea turtles of the Fur Formation. Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinterne i Limfjorden på UNESCOs Verdensarvsliste, se Appendix, 3p.
- Lindow, B.E.K. & Dyke, G.J. 2006: Bird evolution in the Eocene: climate change in Europe and a Danish fossil fauna. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society 81, 483-499.
- Lindow, B.E.K. & Dyke, G.J. 2007: A small galliform bird from the Lower Eocene Fur Formation, northwestern Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 55, 59-63.
- Luterbacher, H.P. et al. 2004: The Paleogene Period. In: Gradstein, F.M., Ogg, J.G. & Smith, A.G. (eds): A geological time scale 2004. Cambridge University Press, 384-408.
- Madirazza, I. & Fregerslev, S. 1969: Lower Eocene tuffs at Mønsted, north Jutland. Bulletin of the Geological Society of Denmark 19, 283-318.
- Madsen, H. 2008: Luffe – en helt fantastisk skildpadde [Translated title: Flipper – an exceptional turtle]. *GeologiskNyt* 2008 (3), 8-12.
- Madsen, V. 1918: Om Tertiæret ved Mariager Fjord. Danmarks Geologiske Undersøgelse IV. Rk. 1.8, 41 pp.
- Madsen, H. & Heilmann-Clausen, C. 2001: Flere flintesten fra moleret. Varv 2001-2, 15-16.
- Madsen, H. & Nel, A. 1997: Two new fossil species of *Gomphaeschna* Selys, 1871 in the Paleocene / Eocene of Denmark (Odonata: Aeshnoidea). - Ann. Soc. Entomol. Fr. (N.S.) 33 (3), 285-293.
- Madsen, H. & Rust, J. 2000: Verdens ældste dagsommerfugl – om insekter fra moler og Stolleklint ler. Varv 2000-1, 9-18.
- Malm, O.A., Christensen, O.B., Furnes, H., Løvlie, R., Rueslætten, H. & Østby, K.L. 1983: The Lower Tertiary tuff-marker (Balder Fm.) in the Viking Graben: composition, source, deposition and age. In: North European margin symposium (NEMS '83) Trondheim, Norwegian Petroleum Society, 1p.
- Martini, E. 1974: Silicoflagellate zones in the Eocene and early Oligocene. Senckenbergiana Leth., 54, 527-532.
- Mayr, G. (2010): Reappraisal of *Eocypselus* – a stem group representative of apodiform birds from the early Eocene of Northern Europe. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments 90, 395-403.
- Mayr, G. (in press): On the osteology and phylogenetic affinities of *Morsoravis sedilis* (Aves) from the early Eocene Fur Formation of Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*.
- Mayr, G. & Bertelli, S. (2011): A record of *Rhynchaeites* (Aves, Threskiornithidae) from the early Eocene Fur Formation of Denmark, and the affinities of the alleged parrot *Mopsitta*. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments doi: 10.1007/s12549-011-0050-8
- McCrea, J.M. 1950: On the isotopic chemistry of carbonates and paleotemperature scale. Journal of Chemical Physics 18, 849-857.
- McGrew, P.O. 1975: Taphonomy of Eocene fish from Fossil Basin, Wyoming. Fieldiana Geology 33 (14), 257-270.
- Mikkelsen, J. 1989: Dansk Bentonit. Skov- og Naturstyrelsen, Miljøministeriet, Kvalitet-serien 5, 170 p.
- Mikkelsen, J. & Andreasen, F. 1985: Bentonit i Danmark? Rapport fra Fredningsstyrelsen, Råstofkontorets kvalitetsserie 1, 61 p.

- Miljøministeriet, Fredningsstyrelsen, Viborg Amtsråd, Sundsøre Kommune 1985:  
Molerindvinding på Fur, 104 pp.
- Miljøministeriet, Fredningsstyrelsen, Viborg Amtsråd, Morsø Kommune, Skamol A/S 1985:  
Molerindvinding på Mors, 91 pp.
- Mitlehner, A.G. 1996: Palaeoenvironments in the North Sea basin around the Paleocene–Eocene boundary: evidence from diatoms and other siliceous microfossils. In: Knox, R.W.O'B., Corfield, R.M. & Dunay, R.E. (eds): Correlation of the Early Paleogene in Northwest Europe. Geological Society of London, Special Publication 101, 255–273.
- Morton, A.C. & Evans, J.A. 1987: Geochemistry of basaltic ash beds from the Fur Formation, Island of Fur, Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 37, 1-9.
- Møller, D.K. 2010: Strukturgeologisk undersøgelse af den glacialtektoniske overskydningsstruktur i Silstrup klint, Thy. Unpublished B.Sc. thesis, University of Copenhagen, 32 pp.
- Nielsen, E. 1959: Eocene turtles from Denmark. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 14, 96-114.
- Nielsen, E. 1960: A new Eocene teleost from Denmark. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 14, 247-252.
- Nielsen, E. 1963: On the post-cranial skeleton of *Eosphargis breineri* Nielsen. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 15, 281-328.
- Nielsen, M.H., Lund-Hansen, L.C., Erbs-Hansen, D.R. & Andersen, T.J. 2008: Klimaets fodspor i mudderet. Aktuel Naturvidenskab 2008/5, 8–11.
- Nielsen, O.B. 1974: Sedimentation and diagenesis of Lower Eocene sediments at Ølst, Denmark. Sedimentary Geology 12, 25–44.
- Nielsen, O.B. 1998: Tertiary sediments of the North Sea: bulk- and clay mineralogy of the depositional sequences. In: Wilson, J.R. & Michelsen, O (eds) Geoscience in Aarhus. Presented in connection with the 23<sup>rd</sup> Nordic Geological Winter Meeting, Aarhus University, 41–44.
- Nielsen, O.B., Baumann, J., Deyu, Z., Heilmann-Clausen, C. & Larsen, G. 1986: Tertiary deposits in Store Bælt. The Tertiary section of borehole D.G.I. 83101, Østerrenden, Storebælt, Denmark. In: Møller, J.T. (Ed.) Twentyfive years of geology in Aarhus. Geologisk Institut Aarhus Universitet, Geoskrifter 24, 235–253.
- Nielsen, O.B., Friis, H. & Korsbech, U. 1994: Lithology and lithostratigraphy of the Harre borehole, Denmark. Aarhus Geoscience 1, 5–14.
- Nielsen, O.B. & Heilmann-Clausen, C (1986) Lithology of the Tertiary section. In: Nielsen et al. Tertiary deposits in Store Bælt. In: Møller, J.T. (ed.) Twentyfive years of Geology in Aarhus. Aarhus University, Geoskrifter 24, 235-253.
- Nielsen, O.B. & Heilmann-Clausen, C. 1988: Palaeogene volcanism: the sedimentary record in Denmark. In: Morton, A.C. & Parson, L.M. (eds) Early Tertiary volcanism and the opening of the NE Atlantic. Geological Society Special Publication 39, 395–405.
- Nielsen, O.B., Sørensen, S., Thiede, J. & Skarbø, O. 1986: Cenozoic differential subsidence of North Sea. AAPG Bull., 70, 276-298.
- Noe-Nygaard, A. 1967: Dredged basalt from Skagerrak. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 17, 285-287.
- Norin, R. 1940: Problems concerning the volcanic ash layers of the Lower Tertiary of Denmark. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar 62, 31-44.
- Palmen, E. 1944. Die Anemohydrochore Ausbreitung der Insekten als zoogeographischer Faktor, Mit besonderer berücksichtigung der Baltischen einwanderungsrichtung als ankunftswege der Fennoskandischen Käferfauna. Tom. 10, No 1.
- Parker, J.R. (ed.) 1993: Petroleum Geology of Northwest Europe: Proceedings of the 4th Conference, Vol. I+II, Geol. Soc. London, 1542 p.
- Pedersen, A.K., Engell, J. & Rønsbo, J.G. 1975: Early Tertiary volcanism in the Skagerrak: New chemical evidence from ash layers in the mo-clay of northern Denmark. Lithos 8, 255–268.

- Pedersen, A.K. & Jørgensen, K.Å. 1981: A textural study of basaltic tephras from Lower Tertiary diatomites in northern Denmark. In: S. Self & R.J. Sparks (eds) *Tephra Studies*. D. Reidel Publishing Company, 213-218.
- Pedersen, G.K. 1978: Molerets Sedimentologi. Unpublished thesis, University of Copenhagen, 156 pp.
- Pedersen, G.K. 1981: Anoxic events during sedimentation of a Palaeogene diatomite in Denmark. *Sedimentology* 28, 487–504.
- Pedersen, G.K. & Buchardt, B. 1996: The calcareous concretions (cementsten) in the Fur Formation (Palaeogene, Denmark): isotopic evidence of early diagenetic growth. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 43, 78–86.
- Pedersen, G.K., Pedersen, S.A.S., Steffensen, J. & Pedersen, C.S. 2004: Clay content of a clayey diatomite, the Early Eocene Fur Formation, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 51, 159-177.
- Pedersen, G.K. & Surlyk, F. 1977: Dish structures in Eocene volcanic ash layers, Denmark. *Sedimentology* 28, 581–590.
- Pedersen, G.K. & Surlyk, F. 1983: The Fur Formation, a late Paleocene ash-bearing diatomite from northern Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 32, 43–65.
- Pedersen, G.K., Pedersen, S.A.S.P., Lindgreen, H.B., Steffensen, J. & Pedersen, C.S. 2003: Mineralogisk sammensætning af moler. Undersøgelse af lermineralindholdet i Fur Formationen, Jylland, Danmark. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2003/97, 27 p.
- Pedersen, G.K., Pedersen, S.A.S., Steffensen, J. & Pedersen, C.S. 2004: Clay content of a clayey diatomite, the Early Eocene Fur Formation, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 51, 159-177.
- Pedersen, K.R. 1960: Moleret. Møderreferat fra Palæontologisk klub 9. november 1959. *Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening* 14, 284.
- Pedersen, S.A.S. 1982: Pilespidsstruktur. Varv 1982–4.
- Pedersen, S.A.S. 1988: Glaciotectonite: Brecciated sediments and cataclastic sedimentary rocks formed subglacially. In Goldthwait, R.P. & Matsch, C.L. (eds) *Genetic classification of glaciogenic deposits*. Balkema, Rotterdam, 89-91.
- Pedersen, S.A.S. 1989: Strukturgeologi ved Skarrehage. Strukturgeologisk undersøgelse af molerforekomsten ved Skarrehage molergrav. *Danmarks geologiske Undersøgelse, Intern rapport* 19, 1989/19, 40 pp.
- Pedersen, S.A.S. 1990: Landet omkring molerhavet. Varv 1990–2, 47-58.
- Pedersen, S.A.S. 1992a: Strukturel undersøgelse af Ejerslev Molerfelt. *DGU Kunderapport 1992/11*, 25 pp.
- Pedersen, S.A.S. 1992b: Molerundersøgelse af Helgasminde på Fur. *DGU Kunderapport 1992/59*, 18 pp.
- Pedersen, S.A.S. 1993: Molereserver nord for Ejerslev Molerfelt. *DGU Kunderapport 1993/80*, 21 pp.
- Pedersen, S.A.S. 1993: The Glaciodynamic Event and the Glaciodynamic Sequence. In Aber, J.S. (ed.): *Glaciotectonics and Mapping Glacial Deposits*. Canadian Plain Research Centre, University of Regina, 67-85.
- Pedersen, S.a.S. 1996: Den nordlige begrænsning af Ejerslev Molerfelt. *GEUS Kunderapport 1996/101*, 46 pp.
- Pedersen, S.A.S. 1996: Progressive glaciotectonic deformation in Weichselian and Palaeogene deposits at Feggeklit, northern Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 42, 153-174.
- Pedersen, S.A.S. 1998: Molerfelt ved Harhøj, Ejerslev, Mors. *Råstofgeologisk undersøgelse af molerforekomsten ved Harhøj, Ejerslev, nordlige Mors*. *GEUS Rapport 1998/111*, 37 pp.

Pedersen, S.A.S. 2000: Superimposed deformation in glaciotectonics. Bulletin of the Geological Society of Denmark 46 (2), 125–144.

Pedersen, S.A.S. 2000a: Geologisk undersøgelse af molerforekomsten på Anshede, vestlige del af Fur. Opbygningen af Anshede Molerfelt med nye beskrivelser af de nedre stratigrafiske niveauer af Fur Formationen fra Hestegård molergrav. Danmarks Geologiske Undersøgelse Rapport 2000/23, 44 pp.

Pedersen, S.A.S. 2000b: Råstofreserver i Ejerslev Molerfelt. Opmåling af molerforekomsterne på matr. nr. 17a, 18c, 12a og 23a, Ejerslev by og sogn, Mors. GEUS rapport 2000/58, 28 pp.

Pedersen, S.A.S. 2002a: Råstofgeologisk undersøgelse af den østlige begrænsning af Ejerslev Molerfelt, Mors. Vurdering af molerreserver og overjordsmængde i den østlige del af Ejerslev Molerfelt, Nordmors. GEUS Rapport 2002/90, 20 pp.

Pedersen, S.A.S. 2002b: Strukturgeologisk undersøgelse af molerforekomsten i den centrale del af bakkekronen på Fur. Opmåling af molerreserver og overjordsmængder på matr. Nr. 32k, 172a, 176a, 30aa, 174b og 135b, Fur. GEUS Rapport 2002/93, 34 pp.

Pedersen, S.A.S. 2004: Beregning af overjordsmængden på Barkærgåardsarealet i Ejerslev Molerfelt. Råstofgeologisk undersøgelse af overjordsmængderne over brydeværdigt moler på matr.nr. 12a, Ejerslev by og sogn. GEUS Rapport 2004/105, 27 pp.

Pedersen, S.A.S. 2005a: Justering af gravegrænser i Barkærarealet i Ejerslev Molerfelt. GEUS Rapport 2005/63, 19 pp.

Pedersen, S.A.S. 2005b: Strukturgeologisk undersøgelse af Lynghøj molergrav, Skarrehage syd, Mors. Opmåling af molergraven ved Lynghøj med henblik på vurdering af tilbageværende råstofmængder. GEUS rapport 2005/64, 17 pp.

Pedersen, S.A.S. 2006: Kortlægning af moler omkring Molermuseet på Mors. Boreundersøgelse vedrørende forekomsten af moler (Fur Formationens diatomit med askelag) omkring Molermuseet ved Skarrehage på det nordlige Mors. GEUS Rapport 2006/81, 19 pp.

Pedersen, S.A.S. 2008a: Palaeogene diatomite deposits in Denmark: geological investigations and applied aspects. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 15, 21–24.

Pedersen, S.A.S. 2008b: Molerforekomsten ved Stærhøj, Sundby, Mors. Opmåling af molerressourcer og overjordsmængder I Stærhøj graveområdet i Sundby Bakker molerfelt, nordvestlige Mors. GEUS rapport 2008/55, 26 pp.

Pedersen, S.A.S. 2009: Forekomst af moler omkring det Gule Hus ved Skarrehage molergrave, nordlige Mors. GEUS Rapport 2009/4, 19 pp.

Pedersen; S.A.S. & Jørgensen, Y. 1989: Erslev molerfelt III. En 100 m dyb undersøgelsesboring til kalken under Erslev molerfelt. Danmarks Geologiske Undersøgelse intern rapport 1989/4, 31 p.

Pedersen, S.A.S., Lindgreen, H., Fries, K. & Steffensen, J. et al. 1999: Clay mineralogy of diatomites. INCO-Copernicus project No. ERBIC15CT96 0712. Geological Survey of Denmark and Greenland, Rapport 1999/7, 77 p.

Pedersen, S.A.S., Lindgreen, H., Pedersen, G.K. 1998: Amorphous silica and hydrous aluminosilicates for production of construction materials. INCO-Copernicus project No. ERBIC15CT96 0712. Geological Survey of Denmark and Greenland, Rapport 1998/3, 47 p.

Pedersen, S.S., Pedersen, G.K. & Noe, P. 1994: Mo-clay on Mors. Morsø Lokalhistoriske Forlag, 48 pp.

Pedersen, S.A.S. & Petersen, K.S. 1985: Strukturgeologisk undersøgelse af Stærhøj, NW Mors. Intern rapport Danmarks Geologiske Undersøgelse, nr. 7 1985, 32 pp.

Pedersen, S.A.S. & Petersen, K.S. 1986: Lerboring i Skarrehage, undersøgelsesboringer gennem de nedre overgangslag i moleret i Skarrehage molergrav. Danmarks geologiske Undersøgelse, intern rapport nr. 16, 35 p.

Pedersen, S.A.S. & Petersen, K.S. 1988: Sand-filled frost wedges in glaciotectonically deformed mo-clay on the island of Fur, Denmark. In: Croot, D. (ed.) Glaciotectonics: Forms and Processes, Balkema, Rotterdam, 185-190.

- Pedersen, S.A.S. & Platen, F.v. 2007a: Råstofressourcer i Sundby Bakker molerfelt, nordvestlige Mors. GEUS rapport 2007/8, 29 pp.
- Pedersen, S.A.S. & Platen, F.v. 2007b: Forekomsten af sort moler i området mellem Ejerslev og Barkær molergrave, nordlige Mors. GEUS rapport 2007/63, 23 pp.
- Perch-Nielsen, K. 1976: New silicoflagellates and a silicoflagellate zonation in north European Paleocene and Eocene diatomites. Bulletin of the Geological Society of Denmark 25, 27-40.
- Petersen, J. 2010: Fauna og flora i Fur Formationen belyst ved private samlinger og museumssamlinger. Upubliceret bachelorprojekt, Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet.
- Petersen, K.S. 1990: Limfjordens geologiske udvikling set i lyset af forskningshistorien. Limfjordsprojektet, Rapport nr. 1, Århus Universitets trykkeri, 13-27.
- Petersen, K.S. & Buch, A. 1974: Dislocated tills with Paleogene and Pleistocene marine beds. Tectonics, lithology, macro- and microfossils. Danmarks geologiske Undersøgelse, Årbog 1973, 63-91.
- Petrulevivius, F. J. et al. 2007: New paleogene Epallagidae (Insecta: Odonata) recorded in North America and Europe. Biogeographic implications. Alavesia, 1, 15-25.
- Petrulevičius, J. F., Wappler, T., Wedmann, S., Rust, J. & Nel, A. 2008: New megapodagrionid damselflies (Odonata: Zygoptera) from the Paleogene of Europe. Journal of Paleontology 82(6), 1173-1181.
- Prinz, W. & Ermengem, E. van 1883: Recherches sur la structure de quelques diatomées continues dans le "Cementstein" du Jutland. Ann. Soc. Belge de Microsc., 8, 1-74.
- Prinz, W. 1885: A propos des coupes de diatomées du "Cementstein" du Jutland. Description minéralogique de cette roche. Bull. Soc. Belge de Microsc., 11, 147-194.
- Raiswell, R. 1971: The growth of Cambrian and Liassic concretions. Sedimentology 17, 147-171.
- Rasmussen, H.W. 1972: Lower Tertiary Crinoidea, Asteroidea and Ophiuroidea from Northern Europe and Greenland. Biol. Skr. Dan. Vid. Selsk., 19, 7, 83 p.
- Ravn, J.P.J. 1897: Nogle bemærkninger om danske Tertiæraflejringers alder. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 1, 1-16.
- Ravn, J.P.J. 1906: Om det saakaldte plastiske Lers Alder. Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening 2 (12), 23-28.
- Reyment, R.A. (ed.) 1980: Notes on the Mo-clay collection. 11. Catalogue Type coll. Pal. Mus: Univ. Uppsala, 4, 9-12.
- Rust, J. 1999a: Biologie der Insekten aus dem ältesten Tertiär Nordeuropas. Habilitation-Thesis: 482 p., 34 pl., University of Göttingen.
- Rust, J. 1999b: Oldest known pteroplistine cricket and other Gryllidae (Orthoptera) from the Paleogene Fur and Ølst Formations of Denmark. Entomologica Scandinavica 30, 35-45.
- Rust, J. 2000: Fossil record of mass moth migration. Nature 405, 530-531.
- Rust, J. 2011: The fossil insects of the Fur Formation. Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinterne i Limfjorden på UNESCOs Verdensarvsliste.
- Rust, J. & Andersen, N. M. 1999: Giant ants from the Paleogene of Denmark with a discussion of the fossil history and early evolution of ants (Hymenoptera: Formicidae). Zoological Journal of the Linnean Society 125, 331-348, London.
- Rust, J., Stumpner, A. & Gottwald, J. 1999: Singing and hearing in a Tertiary bushcricket. Nature 399, 650.
- Rust, J., Petrulevičius, J. F. & Nel, A. (2008: The first damselflies from the lowermost Eocene of Denmark with description of a new subfamily (Odonata, Zygoptera: Dysagrionidae). Palaeontology 51 (3), 709-713.
- Rønsbo, J.G., Pedersen, A.K. & Engell, J. 1977: Titan-aegirine from early Tertiary ash layers in northern Denmark. Lithos 10, 193-204.

- Rørdam, K. 1909: Geologi og Jordbundslære. 2. Bd.: Danmarks Geologi. Gyldendalske Boghandel Nordisk Forlag, 225 p.
- Schiøler, P. et al. 2005: A revised lithostratigraphy for the Palaeogene–lower Neogene of the Danish North Sea. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 7, 21-24.
- Schiøler, P., Andsbjerg, J., Clausen, O.R., Dam, G., Dybkjær, K., Hamberg, L., Heilmann-Clausen, C., Johannessen, E.P., Kristensen, L.E., Prince, I. & Rasmussen, J.A. 2007: Lithostratigraphy of the Palaeogene – Lower Neogene succession of the Danish North Sea. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 12, 77 pp. + 5 plates.
- Schmitz, B. 1994: The Paleocene Epoch – stratigraphy, global change and events. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 116, 39–67.
- Schmitz, B. & Asaro, F. 1996: Iridium geochemistry of volcanic ash layers from the early Eocene rifting of the northeastern North Atlantic and some other Phanerozoic events. *GSA Bulletin* 108, 489-504.
- Schmitz, B., Heilmann-Clausen, C., King, C., Steurbaut, E., Andreasson, F.P., Corfield, R.M. & Cartlidge, J.E. 1996: Stable isotope and biotic evolution in the North Sea during the early Eocene: the Albæk Hoved section, Denmark. In: Knox, R.W.O'B., Corfield, R.M. & Dunay, R.E. (eds): Correlation of the Early Paleogene in Northwest Europe. Geological Society of London, Special Publication 101, 275–306.
- Schmitz, B., Peuker-Ehrenbrink, B., Heilmann-Clausen, C., Åberg, G., Asaro, F. & Lee, C-T. A. 2004: Basaltic explosive volcanism, but not comet impact, at the Paleocene–Eocene boundary: high-resolution chemical and isotopic records from Egypt, Spain and Denmark. *Earth and Planetary Science Letters* 225, 1-17.
- Schmitz, B., Sundquist, B. & Andreasson, F.P. (Eds) 2000: Early Paleogene warm climates and biosphere dynamics. Short papers and abstracts from an international meeting in Göteborg, Sweden, June 9-13, 1999. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 122, 192 pp.
- Schrader, H.-J. 1971: Selektive Auflösung planktischer Diatomeen im Seegebiet zwischen 15-43 nördlicher Breite und 8-30 westlicher Länge. In: Farinacci (ed) Proc. 2nd Planktonic Conf. Roma 1970, 1139-1147.
- Schrader, H.-J. 1972: Anlösung und Konversation von Diatomeenschalen beim Absinken am Beispiel des Landsort-Tiefs in der Ostsee. In: Simonsen (ed): First Symposium on recent and fossil marine diatoms. Beih. Nova Hedwigia, 39, 191-216.
- Schultz, B.P. 2009: Pseudomorph after ikaite – called Glendonite, is it a geological thermometer in cold sediments or geological oddity as it occurs close to PETM in the Fur formation. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 6 (2009) 072059 doi:10.1088/1755-1307/6/7/072059
- Schultz, B.P. 2011: A note on pseudomorphs after Ikaite named Glendonite in the Moclay (Fur Formation). Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinterne i Limfjorden på UNESCO's Verdensarvsliste, se Appendix.
- Sharma, P.V. 1969: Early Tertiary field reversals recorded in volcanic ash layers of northern Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 19, 218-223.
- Sharma, P.V. 1970: Geophysical evidence for a buried volcanic mount in Skagerrak. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 19, 368-377.
- Sluijs, A. & Brinkhuis, H. 2009: A dynamic climate and ecosystem state during the Paleocene–Eocene Thermal Maximum: Inferences from dinoflagellate cyst assemblages on the New Jersey shelf. *Biogeosciences* 6, 1755–1781.
- Sluijs, A., et al. 2006: Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature* 441, 610–613.
- Sluijs, A., Bowen, G.J., Brinkhuis, H., Lourens, L.J., & Thomas, E. 2007: The Palaeocene–Eocene Thermal Maximum super greenhouse: biotic and geochemical signatures, age models and mechanisms of global change. In: Haywood, W.M., Gregory, F.J. & Schmidt, D.N. (eds) Deep time perspectives on climate change: Marrying the signal from computer models and biological proxies. The Micropalaeontological Society, Special Publications, The Geological Society of London 323–347.

- Spjeldnæs, N. 1975: Palaeogeography and facies distribution in the Tertiary of Denmark and surrounding areas. Norges geologiske Undersøkelse 316, 289-311.
- Stewart, I.J. 1987: A revised stratigraphic interpretation of the Early Palaeogene of the central North Sea. In: J. Brooks & K. Glennie (eds) Petroleum Geology of North West Europe. Graham & Trotman, London, 557-576.
- Stolley, E. 1899: Über Diluvialgeschiebe des London thons in Schleswig-Holstein und das Alter der Molerformation Jutlands sowie das baltische Eozän überhaupt. Arch. f. Antropol. Geol. Schleswig-Holstein, 3, 105-146.
- Storey, M., Duncan, R.A. & Swisher III, C.S. 2007: Paleocene-Eocene thermal maximum and the opening of the Northeast Atlantic. Science 316, 587-589.
- Storey, M. 2011: The volcanic ash layers of the Fur Formation and the timing of Paleocene and Eocene climate events. Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinterne i Limfjorden på UNESCOs Verdensarvsliste, se Appendix, 2 p.
- Suess, E., Balzer, W., Hesse, K., Muller, P.J., Ungerer, P.J. & Wefer, G. 1982: Calcium carbonate hexahydrate from organic-rich sediments of the Antarctic shelf : precursor of glendonites : Science 216, 1128-1131.
- Surlyk, F. 1980: Geology of the European countries, Denmark. Published in cooperation with the Comite National Francais de Geologie (C.N.F.G.) on the occasion of the 26th International Geological Congress. Dunod, 64 pp.
- Tank, R.W. 1963: Clay mineralogy of some Lower Tertiary (Paleogene) sediments from Denmark. Danmarks geologiske Undersøgelse, IV Series, Vol. 4 No. 9, 45 pp.
- Teichert, B.M.A. & Luppold, F.W. 2009: Glendonite formation in Early Jurassic dark shales – Evidence for methane seepage in northern Germany. 19<sup>th</sup> Annual V.M. Goldschmidt Conference, Davos/Switzerland, June, 21.-26.2009, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73 (Supplement 1), p. A1319.
- Thomsen, E. & Danielsen, M. 1994: Transitional Paleocene/Eocene ash-bearing diatomite from the eastern North Sea. Tertiary Research 15, 111-120.
- Thomsen, E. & Pedersen, S.A.S. (eds) 1997: Geology and Palaeontology of the Mo-clay. Aarhus Geoscience 6, 68 pp.
- Thomsen, J. 1992: Beskrivelse af moleret og dets termiske stabilitet. Unpublished thesis, University of Aarhus, 105 p.
- Unmack, A. 1949: X-ray investigation of some Danish clays II, montmorillonitic clays. Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole, Aarsskrift for 1948, 192-204.
- Ussing, N.V. 1904: Moler og vulkansk Aske. In: Danmarks Geologi i almenfatteligt Omrids, 2. udg. pp. 142-149.
- Vinther, J., Briggs, D.E.G., Prum, R.O. & Saranathan, V. 2008: The colour of fossil feathers. Biology Letters 4, 522-525.
- Waterhouse, D. M., Lindow, B., Zelenkov, N. V. & Dyke, G. J. 2008. Two new parrots (Psittaciformes) From the Lower Eocene Fur Formation of Denmark. Palaeontology, Vol. 51, Part 3, 575-582.
- Westerhold, T., Röhl, U., McCarren, H.K. & Zachos, J.C. 2009: Latest on the absolute age of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM): New insights from exact stratigraphic position of the key ash layers +19 and -17. Earth and Planetary Science Letters 287, 412-419.
- Willmann, R. 1977: Mecopteren aus dem untereozänen Moler des Limfjordes (Dänemark). N. Jb. Geol. Paläont. Mh. 1977 (12), 735-744.
- Willmann, R. 1990: Insekten aus der Fur-Formation von Dänemark (Moler, ob. Palaozän/unt. Eozän?). 1. Allgemeines. - Meyniana 42, 1-14.
- Willmann, R. 1993: Insekten aus der Fur-Formation von Dänemark (Moler, ob. Paleozän/unt. Eozän?). 8. Zwei neue Vertreter der Chrysopidae (Neuroptera): N. Jb. Geol. Paläont. Mh. 1993(4), 239-245.

- Willumsen, P.S. 1997: En palynologisk undersøgelse af den askeførende Fur Formation. Unpublished Cand. Scient. Thesis. Aarhus University, Denmark. 1-147.
- Willumsen, P.S. 1998: Terrestrial and marine palynomorph assemblages from the Danish Fur Formation, at the Paleocene/Eocene transition. In: Rey, J., Rochini, F. (eds.): *La limite Paléocène–Éocène en Europe: Événements et Corrélations*. Séance spécialisée. Université Paul Sabatier – Toulouse III, Laboratoire de Géologie sédimentaire et Paléontologie. Strata Série 1(9), 130–133.
- Willumsen, P.S. 2004: Palynology of the Lower Eocene deposits of northwest Jutland, Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 52, 141–157.
- Willumsen, P.S. 2011: The spore and pollen assemblages of the Fur Formation. Notat udarbejdet som bilag til ansøgning om optagelse af Molerklinerne i Limfjorden på UNESCOs Verdensarvsliste, 5 sider.
- Wing, S.L., Gingerich, P.D., Schmitz, B. & Thomas, E. (eds) 2003: Causes and consequences of globally warm climates in the Early Paleogene. Geological Society of America Special Paper 369, 614 pp.
- Woodland, A.W. (ed.) 1975: Petroleum and the continental shelf of North-West Europe. Applied Science Publ. Barking,
- Zachos, J.C., Lohmann, K.C., Walker, J.C.G. & Wise, S.W. 1993: Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: A marine perspective. Journal of Geology 101, 191–213.
- Zachos, Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E & Billups, K. 2001: Trends, rhythms and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science 292, 686–693.
- Zachos, JC., Dickens, G.R. & Zeebe, R.E. 2008: An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. Nature 451, 279–283.
- Zhang Deyu 1987: Clay mineralogy of the Upper Paleocene and Eocene clay sediments in Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark 36, 249–258.
- Ziegler, P.A. 1978: Northwestern Europe: tectonics and basin development. Geol. Mijnbouw, 57, 589–626.
- Ziegler, P.A. 1990: Geological Atlas of Western and Central Europe. 2nd Ed. Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V. and Geol. Soc. London, 239 p + 56 plates.



# Appendix

## The fossil birds of the Fur Formation

Bent Erik Kramer Lindow

The Natural History Museum of Denmark, Copenhagen

[lindow@snm.ku.dk](mailto:lindow@snm.ku.dk)

June 8th 2011

*The fossil birds of the Fur Formation are exceptional on an international scale. Their second-to-none preservation provides the earliest known geological window on a crucial period in bird evolution. Several recent and ongoing studies have used them to shed light on the first appearance of a number of modern bird lineages; phylogenetic relationships between key groups, and provide groundbreaking information on the preservation of feather colours in fossil birds and their kin.*

Birds originally evolved from small, feathered dinosaurs in the Jurassic period around 150 million years ago. Anatomically modern-looking birds (clade Neornithes), including the ancestors of living ostriches, ducks, landfowl, owls etc., evolved much later, probably at the end of the Cretaceous period around 70 million years ago. Although they existed alongside their more ‘primitive’ cousins and relatives for some time, it appears that these anatomically modern forms were the only birds to survive the great mass extinction at the end of the Cretaceous period 65 million years ago. Additionally, is now certain that the entire, broad diversity of living birds, as well as a number of now extinct bird groups, sprang solely from the survivors among the ‘modern birds’ or ~~Neornithes~~ (Gauthier et al., 2004; Dyke & van Tuinen, 2004; Lindow, 2011). Evidence, both from fossils and modern phylogenetic analyses of bird relationships, is beginning to accumulate and indicates that the great diversification among modern birds took place geologically very short time interval. The main lineages of living birds, from ostriches to swifts, mousebirds, penguins, owls and suchlike, all seem to have originated in the period between 70 and 55 million years ago; from the latest part of the Cretaceous period and into the earliest Paleogene (Dyke & van Tuinen, 2004; Ericson et al., 2006; Lindow, 2011). Unfortunately, very little is known about the exact order and details of the diversification event. This is due to the fact that fossil remains of birds are exceedingly rare. Bird bones are very fragile and easily destroyed before they have a chance to fossilise. When found, bird fossils are typically either greatly disarticulated or preserved as isolated bones, or have been flattened (or both). Thus it is difficult to get adequate anatomical information for modern phylogenetic analyses of relationships (Dyke & van Tuinen, 2004; Lindow & Dyke, 2007).

### **The exceptional fossil birds of the Fur Formation**

Currently, over 170 fossil bird specimens are known from the Fur Formation, of which 40% are isolated feathers. The fossil preservation is exceptional on an international scale, as several specimens are preserved as nearly complete, articulated and three-dimensionally preserved skeletons from within carbonate concretions (Leonard *et al.*, 2005; Lindow & Dyke, 2006; Bertelli *et al.*, 2010; Mayr & Bertelli, 2011). In addition, a number of these fossil specimens show imprints of soft tissue, such as feathers, skin and scales, which is exceedingly rarely preserved in fossils (Dyke *et al.*, 2004; Lindow & Dyke, 2007; Vinther *et al.*, 2008).

The three-dimensionally preserved specimens have allowed for detailed anatomical studies and easy incorporation into modern phylogenetic analyses of relationships. As such, the fossil birds have already contributed important information to the international research into the early evolution of modern birds. The fossils have especially provided crucial information on the precise dating of the earliest appearance of several lineages, which will give a definitive measure of both the extent and pace of the evolutionary radiation and diversification.

So far the Fur Formation has provided the earliest known fossil representatives of the following living bird groups: trogons (Kristoffersen, 2002); swifts (Dyke *et al.*, 2004; Mayr, 2010) parrots (Waterhouse *et al.*, 2008) and ibises (Mayr & Bertelli, 2001), as well as the first representatives of a number of now extinct lineages (Hoch, 1975; Leonard *et al.*, 2005; Lindow & Dyke, 2006, 2007; Bertelli *et al.*, 2010; Mayr, 2010; in press). Even so, more well-preserved bird fossils from the formation await formal publication (Lindow & Dyke, 2006; Dyke & Lindow, 2009). Additionally, the exceptional preservation afforded by a number of fossil birds from the Fur Formation have allowed them to add important information to phylogenetic analyses of relationships (Bertelli *et al.*, 2010; Mayr, 2010; in press) or have provided vital anatomical details fixing the relationships of extinct groups of birds in place (Leonard *et al.*, 2005).

### **Taphonomy – the outstanding fossil preservation in the Fur Formation**

The preservation of both fossils in the Fur Formation represents a unique environment for this crucial early part of modern bird evolution. The large and well-curated fossil collections of the Moler Museum on Mors, Fur Museum on Fur, and the Natural History Museum in Copenhagen allowed a well-supported quantitative taphonomic analysis of the fossil bird material. The study showed that the formation represents a depositional environment previously unrecorded in avian palaeontology: a low energy, marine *konervat-lagerstätte* allowing the preservation of both articulated skeletons and soft tissues (Lindow, 2007; Dyke & Lindow, 2009). Interestingly, while the Fur Formation is a strictly marine environment, all of the fossil birds described or identified from it are land-dwelling birds. None of them appear to have had a sea-going or near-shore ecology. As these land-dwelling birds are not found in their natural environment, they must have been blown out sea during heavy storms; or have ended up on the sea surface during migrations and subsequently drowned. The reason for the complete absence of seabirds and their like is not known, but this fortuitous coincidence has proven a unique insight into the bird fauna of the land areas surrounding the earliest Eocene North Sea basin (Dyke & Lindow, 2009; Mayr in press).

Finally, the preservation of soft tissue and fossil feathers provided the basis for the first study on the actual preservation of fossil feathers, namely the unique insight that they are preserved as fossil melanosome grains (pigment grains). A fossil bird head from the Fur Formation with plumage and eye pigment preserved, was one of the specimens used to support this groundbreaking insight (Vinther et al., 2008). This field of study has subsequently allowed the identification of feather colours and colour patterns in a number of extinct birds and dinosaurs.

### The Fur Formation fossil birds on an international scale

The fossil birds of the Fur Formation are unique from an international perspective due to their exceptional and literally unrivalled state of preservation. Worldwide, there are no known comparable localities or formations. Their age gives us the earliest known “hard dates” and insight into the variation and diversity within the ancestors and earliest representatives of several lineages of living birds. Ongoing and future studies will continue to utilise these outstanding fossils to elucidate the phylogenetic relationships between various bird groups, as well as their evolution and diversification during an interesting period in Earth history, which saw large-scale global climate change and emergence of new animal and plant lineages.

### References

- Bertelli, S., Lindow, B.E.K., Dyke, G.J. & Chiappe, L.M. (2010): A well-preserved ‘charadriiform-like’ fossil bird from the Early Eocene Fur Formation of Denmark. *Palaeontology* **53** (3), pp 507-531.
- Cracraft, J., Barker, F. K., Braun, M., Harshman, J., Dyke, G. J., Feinstein, J., Stanley, S., Cibois, A., Schikler, P., Beresford, P., García-Moreno, J., Sorenson, M. D., Yuri, T. & Mindell, D. P. (2004): Phylogenetic relationships among modern birds (Neornithes): towards an avian tree of life, pp. 468-489 In J. Cracraft and M. Donoghue (eds.): *Reconstructing the tree of life*, Oxford University Press, New York.
- Dyke, G.J. & Lindow, B.E.K. (2009): Taphonomy and abundance of birds from the Lower Eocene Fur Formation of Denmark. *Geological Journal* **44** (3), pp 365-373.
- Dyke, G.J. & van Tuinen, M. (2004): The evolutionary radiation of modern birds (Neornithes): reconciling molecules, morphology and the fossil record. *Zoological Journal of the Linnean Society* **141**, pp 153-177.
- Dyke, G.J., Waterhouse, D.M. & Kristoffersen, A.V. (2004): Three new fossil landbirds from the early Paleogene of Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* **51**, pp 47-56.
- Ericson, P.G.P., Anderson, C.L., Britton, T., Elzanowski, A., Johansson, U.S., Källersjö, M., Ohlson, J.I., Parson, T.J., Zuccon, D. & Mayr, G. (2006): Diversification of Neoaves: integration of molecular sequence data and fossils. *Biology Letters* **2** (4), pp 543-547.
- Hoch, E. (1975): Amniote remains from the eastern part of the Lower Eocene North Sea Basin. *Colloque International Centre National de la Recherche Scientifique (Paris 1973)* **218**, pp 543-562, pls. I-VIII.
- Kristoffersen, A.V. (2002): An early Paleogene trogon (Aves: Trogoniformes) from the Fur Formation, Denmark. *Journal of Vertebrate Paleontology* **22** (3), pp 661-666.
- Leonard, L., van Tuinen, M. & Dyke, G.J. (2005): A New Specimen of the Fossil Palaeognath *Lithornis* from the Earliest Palaeogene of Denmark. *American Museum Novitates* **3491**, pp 1-11.
- Lindow, B.E.K. (2007): En stratigrafisk og tafonomisk analyse af fossile fugle og fjer fra Fur Formationen. *Geologisk Tidsskrift* 2007, pp 15-17.

- Lindow, B.E.K. (2011): Bird evolution across the K/T-boundary and the basal neornithine diversification, pp 338-354 In: Dyke, G.J. & Kaiser, G. (eds.): *Living Dinosaurs: The Evolutionary History of Modern Birds*. John Wiley & Sons, Oxford, 422 pp.
- Lindow, B.E.K. & Dyke, G.J. (2006): Bird evolution in the Eocene: climate change in Europe and a Danish fossil fauna. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* **81**, pp 483-499.
- Lindow, B.E.K. & Dyke, G.J. (2007): A small galliform bird from the Lower Eocene Fur Formation. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* **55**, pp 59-63.
- Mayr, G. (2010): Reappraisal of *Eocypselus* – a stem group representative of apodiform birds from the early Eocene of Northern Europe. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments* **90**, pp 395-403.
- Mayr, G. (in press): On the osteology and phylogenetic affinities of *Morsoravis sedilis* (Aves) from the early Eocene Fur Formation of Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*.
- Mayr, G. & Bertelli, S. (2011): A record of *Rhynchaeites* (Aves, Threskiornithidae) from the early Eocene Fur Formation of Denmark, and the affinities of the alleged parrot *Mopsitta*. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments* doi: 10.1007/s12549-011-0050-8
- Vinther, J., Briggs, D.E.G., Prum, R.O. & Saranathan, V. (2008): The colour of fossil feathers. *Biology Letters* **4**, pp 522-525.
- Waterhouse, D. M., Lindow, B. E. K., Zelenkov, N. V. & Dyke, G.J. (2008): Two new fossil parrots (Psittaciformes) from the Lower Eocene Fur Formation of Denmark. *Palaeontology* **51**(2), pp 575-582.

## The fossil sea turtles of the Fur Formation

Bent Erik Kramer Lindow

The Natural History Museum of Denmark, Copenhagen

Several fossil sea turtles are known from the Fur Formation. A number of specimens have been published and they are currently the subject of scientific studies. The specimens are mainly characterised by the completeness of their preserved skeletons. In addition, an almost complete recently recovered specimen displayed rarely preserved scutes, while two exceptional specimens show preservation of skin and soft tissue. Turtles are among the most successful animal groups in the history of the Earth. Since they first emerged some 220 million years ago, the armoured animals have adapted to life on both land and in the sea. Their recent habitat and distribution are often closely correlated to temperature and environment, and their fossil relatives can therefore often contribute significantly to our information about prehistoric environments, climate and biogeography. The earliest known fossils of marine turtles indicate that they took to the sea some 110 million years ago (Hirayama, 1998). Furthermore, a total of three lineages of sea turtles survived the great mass extinction at the end of the Cretaceous period (Karl et al., 1998; Karl, 2002); making them one of only two groups of marine reptiles which survived this global cataclysm.

A variety of fossil turtles are known from Danish deposits (Karl & Lindow, 2009), but most of these specimens (10 in total), and arguably by far the best, derive from the Fur Formation. The large leatherback turtle *Eosphargis breineri* was originally described from a single, almost complete, specimen (Nielsen, 1959, 1964). The holotype specimen has since undergone extensive preparation and a wealth of new anatomical information has emerged, prompting need for further studies and a re-description. In addition, the preparation of the holotype of *Eosphargis breineri* recovered fossil remains of soft tissue. These are extremely rare on the fossil record, and are so far only known from two other turtle specimens worldwide; one from the Crato Formation in Brazil (Fielding et al., 2005), and the other from a complete specimen of a new species of the genus *Tasbacka* from the Fur Formation (Karl, in press). The preservation of the soft tissue mirrors that which was recently discovered in fossil bird feathers from the Fur Formation amongst others (Vinther et al., 2008). This groundbreaking study spearheaded the current research into identifying fossil colours in birds and dinosaurs. If a similar research approach can be used on the two Fur Formation turtle specimens displaying soft tissue analysis, this is likely to become the first time that fossil colour has been recovered from a fossil turtle anywhere in the world.

Some incomplete sea turtle specimens from the Fur Formation were referred to *Glarichelys knorri* by Nielsen (1959), but in light of later taxonomic revisions these specimens are in need of re-study (Hans-Volker Karl and Bent Lindow, pers. obs.). Recently, a number of exceptionally well-preserved turtle specimens have been recovered from the Fur Formation by the staff of the Moler Museum on Mors (Madsen, 2008, 2011). Two of the specimens have been studied and are referable to a completely new species of the genus *Tasbacka* (Karl, in press). One specimen consists of a three-dimensionally preserved skull and anterior carapace. The other specimen is a complete, 11 centimetres long juvenile sea turtle, and the most well-preserved fossil such in the world. The latter specimen shows traces of soft tissue, including skin around flippers and scutes at the edge of the shield. Recently, another almost complete skeleton, which

has preserves all the scutes of entire shield in situ was recovered from the Fur Formation (Madsen, 2011). This specimen appears intermediate in size and morphology between the two previously described Tasbacka specimens. This probably indicates that it is a subadult, in which case a growth series could be described for the new Tasbacka species (Lindow, pers. obs.).

## The Fur Formation fossil turtles on an international scale

The preservation of fossils in the Fur Formation represents a unique environment. A previous study on other taxonomic groups showed that the Fur Formation represents an exceptional low energy, marine konservat-lagerstätte where both articulated skeletons and soft tissues are preserved (Dyke & Lindow, 2009). The fossil preservation of the fossil turtles from the Fur Formation is excellent, as many specimens are preserved as nearly complete, three-dimensionally and often articulated skeletons from within carbonate concretions. In addition, two of the fossil specimens show imprints of soft tissue, which is rarely preserved, and may allow for the first certain identification of colour in a fossil turtle. The fossil sea turtles of the Fur Formation will allow detailed anatomical studies and easy incorporation into modern phylogenetic analyses of turtle relationships. Emerging research is beginning to shed light on this subject. In the end this will add further evidence to our understanding of sea turtle evolution and diversification during an interesting period in Earth history, which saw intense, large-scale global climate change due to greenhouse gasses.

## References

- Dyke, G.J. & Lindow, B.E.K. (2009): Taphonomy and abundance of birds from the Lower Eocene Fur Formation of Denmark. *Geological Journal* 44 (3), pp 365-373
- Fielding, S., Martill, D.M. & Naish, D. (2005): Solnhofen-style soft-tissue preservation in a new species of turtle from the Crato Formation (Early Cretaceous, Aptian) of north-east Brazil. *Palaeontology* 48 (6), pp 1301-1310
- Hirayama, R. (1998): Oldest known sea turtle. *Nature* 392, pp 705–708 Karl, H.-V. (2002): Übersicht über die fossilen marinen Schildkrötenfamilien Zentraleuropas (Reptilia, Testudines). *Mauritiana* (Altenburg) 18, pp 171-202
- Karl, H.-V. (in press): Tasbacka madseni n. sp., a new Eocene marine turtle from Denmark (Testudines: Chelonioidea). *Studia Palaeochelonilogica IV*, University of Salamanca, Spain
- Karl, H.-V., Tichy, G. & Ruschak, H. (1998): Osteopygoides priscus n. gen. n. sp. und die Taxonomie und Evolution der Osteopygidae (Testudines: Chelonioidea). *Mitteilungen Geologie und Paläontologie Landesmuseum Joanneum* 56, pp 329-350
- Karl, H.-V. & Lindow, B.E.K. (2009): First evidence of a late Cretaceous marine turtle (Testudines: Chelonioidea) from Denmark. *Studia Geologica Salmanticensa* 45 (2), pp 175-180
- Madsen, H. (2008): Luffe – en helt fantastisk skildpadde [Translated title: Flipper – an exceptional turtle]. *GeologiskNyt* 2008 (3), pp 8-12
- Madsen, H. (2011): Fossil skildpadde på Mors – nyt fund i moleret [Translated title: Fossil turtle on Mors – new discovery from the Fur Formation]. *GeologiskNyt* 2011 (1), pp 10-12
- Nielsen, E. (1959): Eocene Turtles from Denmark. *Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening* 14 (2), pp 96-114, pls. 1-6
- Nielsen, E. (1964): On the post-cranial skeleton of *Eosphargis breineri* Nielsen. *Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening* 15 (3), pp 281-313, pls. 1-13
- Vinther, J., Briggs, D.E.G., Prum, R.O. & Saranathan, V. (2008): The colour of fossil feathers. *Biology Letters* 4, pp 522-525

## Bonde, N. 2011a: WHS, fisk fra moler. Notat.

The fishfauna of the Mo-clay (Da: molér, Fur Formation) is of international scope and importance for several reasons:

Its **AGE**: Comprising the earliest of Lower Eocene (with the Stolleklin Clay) it is the earliest large fishfauna with skeletons after the Cretaceous (such faunas are very rare and very limited in the Paleocene). It therefore constitutes the 'beginning of modern type fishfaunas'.

Its **DIVERSITY**: Being the earliest Tertiary and very diverse, marine fishfauna it shows the beginning of modern oceanic life based on 'complete' animals, and as nothing comparable is known from North America, this is the only such window to the beginning of the 'modern' N-Atlantic.

Its **PALAEOECOLOGY**: Very few fishfaunas worldwide are clearly oceanic, most are from much shallower and coast near environments (in fact, the only other oceanic fauna with skeletons of that age is the much less diverse one from Turkmenistan).

Its state of **PRESERVATION**: The fishes especially in the 'cementstones' are of exquisite quality, some with skulls preserved in 3-D, some with no matrix surrounding the skeletons inside the 'flattened scale-bag' (very unusual, no preparation necessary), some with colour-spots on fins, all with pigment preserved in the eyes. Most can easily be prepared in acetic acid to expose the skeletons perfectly.

Its **ACCESSABILITY**: Having two local museums in the area with extraordinary collections and exhibitions of fishes, the fossils are easy to visit and study for both scientists and the general public.

The fishfauna of the Mo-clay (Fur Formation) is oceanic, pelagic and rich comprising about 60 species of teleosts (new ones still turn up), and these are unusually well preserved, most known from complete specimens, some with skulls preserved in 3-D, some with colour spots on fins. Preserved in two complementary ways as either very detailed imprints in the diatomite or with bones well preserved in the few levels with limestone ('cementstones'). 7-8 pelagic shark species.

[That of the underlying Stolleklin Clay (= SC) has about 30 spp., half of them also in Mo-clay, and the fauna, though 'oceanic', is from a much shallower and smaller 'North Sea Basin'.]

Earliest known fauna of 'modern' diversity with about half of species 'spiny rayed' (Acanthopterygians).

Several unusual and exceptional features of the fauna(s) making them worldwide important:

a) There are four osteoglossomorphs ('bony tongues'), largest known diversity in one locality of such fishes, which to day are confined to freshwater on southern continents. One is the only among over 20000 marine teleosts specialized as large (over 3 m long) plankton feeder. [There are three spp. in the underlying Stolleklin Clay.] 3 spp. over 2 m long.

b) Earliest diversification of Anguilliforms, ca 5 spp, of these 3 in SC:

Earliest Anguillids (common eel fam.), [SC: earliest Congrids and Muraenids].

c) Earliest diversif. of Gadiforms (codfishes), ca. 5-6 spp. with oldest Merlucciid (hake) and other families, perhaps Gadids (true cods).

d) Earliest diversif. of Lampridiforms (opah & related) 3 spp.

e) Earliest diversif. of Perciforms (perch-like fishes – dominating the marine waters today):

Scorpaenoids (dragonheads, sculpins etc): 2 spp (?), oldest known.

Percoids, ca. 6 spp., family indeterminable, but also: [Menids (*Mene*), SC] and odd *Exellia*.

- Gempylids (snake mackerels), oldest  
 Scombrids (mackerel-tunnyfish) 5-6 spp., earliest diversif.  
 Palaeorhynchids (extinct swordfish relative): 1 sp. oldest  
 Xiphiids ? (swordfish): 1 sp., 10 cm vertebra, very large, oldest.  
 Carangids (horse mackerels), oldest, 2 spp [SC 2 spp.]  
 Stromateoids: 2 spp., oldest  
 f) Probably the world's oldest **real deep sea fish**, a 'whale fish', Cetomimiform, *Rhondeletia*-like.  
 g) World's oldest (and perhaps the only fossil) Macrorhamphosid, as well as other Syngnathiforms, like Aulostomids (trumpet fish, 1 sp.) [3 spp in SC], and Pegasus-like *Ramphosus*.  
 h) World's oldest (of rather deep water) Paralepidids (....., *Holosteus*). **[common name ??]**  
 i) World's oldest true Argentinid (.....) **[insert common name]**  
 j) The most common fish (over 95%) a very primitive Argentinoid, distant relative of all the others in the group – must be last survivor of an old lineage from Early Cretaceous.  
 k) Second most common a very primitive Osmeroid (smelt like), also survivor from E. Cretaceous.  
 l) The only complete Elopiform (a tarpon) from the Tertiary, 1.2 m (reaching 2½ m), skull in 3-D.  
 k) The only Polymixiiforms species (beard fish) from Tertiary (one genus today, many Cretaceous).  
 l) Not the earliest (one in Late Cretaceous), but the two most primitive of the entire order Zeiformes (John Dories and relatives), and even four spp., the earliest diversity.  
 m) World's oldest antennaroid (.....), a group very rare as fossils. **[? Common Eng. Name]**  
 n) A large number of fishes from the Mo-clay and SC have been valuated as 'Danekræ', unique or particularly valuable fossils. And apart from Mo-clay insects, such fishes are the most frequent source of Danekræ fossils.

Environmental reconstruction: model of long coast parallel zone of wind-driven upwelling (confirmed by North Sea drillings), the earliest known; today dominating off shore continental west-coasts. Rich pelagic fauna at surface, poor or none at the anoxic (and poisonous ?) bottom, therefore well preserved fossils in sediment with primary lamination.

It is characteristic that rather few of the Mo-clay fishes can be referred directly to living families, it is possible only for Anguillids, Congrids, Muraenids, Megalopids (Tarpons), Chanids, Aulostomids, Macrorhamphosids, Polymixiids, Carangids, Menids, Scombrids (ca. 15 fam of 45 fam – same proportion in Early Eocene, pelagic in Turkmenistan: ca. 7 fam of 20). While many more living families and even living genera are recorded in 5 mill. y. younger Bolca fauna (shallow water) – only 2 or 3 living genera in Mo-clay and Turkmenistan.

#### **Crustaceans** from the Mo-clay (Fur Fm.) and Stolleklint Clay (SC).

Crustaceans are not common in these deposits, but some are very remarkable:

**Cirripeds** (goose barnacles and barnacles) are not common fossils, but now two new genera and species are under description, one of each group. Both have been found in some numbers attached to a few large trunks of drift wood. Most unexpected and remarkable

both genera have their closest living relatives only found at **deep sea hydrothermal vents and cold seeps** of the Pacific area.

**Shrimps** (*Natantia*) have 2 or more spp. of the primitive *Penaeus* in SC, and it should be possible to reconstruct growth series of one of these. The Mo-clay contains only one species of the much more advanced Crangonids, the **oldest member known** and rather a remarkable one, quite large (8 cm), with four large spines on the carapace/cephalothorax.

**Crabs**, because of the inhospitable bottom, are extremely rare, only two tiny Portunids (swimming crabs) have ever been collected. They most likely lived among seaweed at the surface of the sea.

#### **Molluscs, echinoderms, worms and environment.**

Limited to the upper part of the lower Mo-clay (Knuden Member) one species of small Buccinid snails is quite common in non-laminated sediment, and a few drilling Naticids. In the same layers are sometimes found 2 species of bivalves, both digging in the sediment, a small, fat one found *in situ* in natural position, and a rather large Garid like one (+7 cm), certainly also a burrowing type. Also one species of brittle star (Ophiurids) is extremely common in one narrow zone only weakly laminated, together with 3 sorts of much less frequent small starfishes. And in these layers are also found at least two types of tubes from polychaete worms, some of which have sponge spicules built into the wall of the tubes – the only evidence of sponges living on the bottom.

All this points to a very limited fauna, which can live in water with just a minimum of oxygen, perhaps 10% of that in normal sea water. A phenomenon also known from modern shelf seas, where such a low diversity fauna can be found in oxygen poor troughs with stagnant water, and where most of the animals dig into the superficial layers of the sediment.

There is a single case of a large Mytilid bivalve (mussels) found possibly attached to a large 'glendonite' crystal, which may have been exposed at the surface of the non-laminated bottom sediment. Otherwise these large mussels (*Mytilus*) are characteristic of an entirely different environment as they all seem concentrated around logs of drift wood, to which they must have been attached in life surfing round at the surface of the sea.

These many logs and stems of driftwood – the largest find a 9 m long stem of *Sequoia* (redwood) – are interesting, because they can be assumed to originate from hundreds or even 1000 km away up north along the 'Scandinavian' west coast. They have been transported south and away from the coast – carrying mussels and barnacles, but only in few cases being infested by shipworms (Teredinids) - by the same wind driven ocean current that created the coast parallel upwelling due to which there was such a rich pelagic life in the basin far away from the coast.

## **Environmental models, predictions and testing**

The model with upwelling created by currents driven by frequent winds from the north (evidenced by transportation of the volcanic ash clouds from the north) has implications for all of the 'North Sea Basin'. It constitutes a circulation system of so-called 'Mediterranean type' with surface current moving towards the interior of the embayment, and therefore counter-current moving out below, in this case under the upwelling at a certain depth about 300 – 500 m. But because the upwelling keeps most of the nourishment re-circulated near the surface, the bottom conditions are rather poor, and only low diversity benthic faunas are to be expected, and being poorer the further you move into the basin (like in present day Mediterranean).

And this prediction seems to be confirmed as the known contemporaneous coastal faunas in North Germany (Unter Eozän 1) and in South England (Basement Beds of the London Clay) do have rather poor, low diversity faunas, despite some large rivers must have run into the basin in both regions (say like the Nile and River Po as modern equivalents). The rich and light freshwater would probably stay at the surface on top of the nourishment depleted salt water, which has to dive at the south end of the embayment to become the still poor and north going counter-current.

This type of effects is not implied by other suggested models of the mo-clay sedimentation, so the North Sea Basin, also with its many boreholes, is a perfect place to test such large scale, global palaeoceanographic models. Today we have no exact analogue for a semi-enclosed basin with upwelling, the nearest one being perhaps the Arabic Sea, which is, however, not landlocked at one of the sides, but is totally open.

## **Bonde, N. 2011b: Fiskefaunaer, som kan sammenlignes med Fur Formationens fiskefauna. Personlig kommunikation, juli 2011.**

Af sammenlignelige, marine aflejringer fra tidlig Tertiær er den vigtigste verdens tidligst beskrevne fiskefauna fra Monte Bolca i Norditalien, som nu vides at være ca 5 mill år yngre end moleret og fra tidlig Mellem Eocæn, ca 50 mill år. Her har N. f. Verona været samlet fossile fisk fra laminerede kalklag siden 1500-tallet, og en meget stor samling blev beskrevet af Volta i 1796. Den blev kort efter af Napoleons tropper ført til Paris, hvor den stadig findes, og omkring 1840 blev hovedindholdet af L. Agassiz' beskrivelse af alle verdens da kendte fiskefaunaer. Siden har familien Cerato udgravet fisk på stedet, og der er nu etableret et fint museum i byen Bolca, og der er store samlinger i mange europæiske og enkelte amerikanske museer. Moderne revisioner ved Blot fra Paris (fex 1980) og senere og stadigt pågående ved Sorbini (Verona), Tyler (Wash DC) og Bannikov (Moskva) har fået antallet af fiskearter op over 200. Disse er fra relativt lavt vand, formodentligt i en lagune bag et rev, så diversiteten er kolossal og fiskegrupperne til dels meget anderledes end i moleret. Der er en del planter, også ret store palmer i Bolca, og en nærliggende lokalitet har mange planter, lignit og en krokodille, som spor efter landlivet, der vist er omrent samtidigt. Men selve fiskelokaliteten har ret få insektarter, nogle krebsdyr fra bunden, og synes at være et mix fra flere miljøer, der dog også indeholder en del oceaniske fisk (makrelfisk, *Mene*, glansfisk etc), men grupper fra lavt og kystnært miljø dominerer (kirurgfisk, sommerfuglefisk, havruder, ål, trompetfisk, sild, og verdens tidligste fladfisk, flere hele rokker og enkelte hajer osv.).

Denne vigtige lokalitet, også historisk, er derfor meget forskellig fra moleret og ikke alt for let at sammenligne med. Mget mere lig molerets miljø og fiskesammensætning, men kun ca. halvt så divers er fiskelagene fra Danatiski Serie i Turkmenistan, som synes præcist samtidig med moleret i det tidligste Eocæn. Det er også en klart oceanisk fauna med lignende sammensætning: makrelfisk, glansfisk, *Mene*, lakstobisen *Holosteus*, en lignende sild, trompetfisk, men altså ikke så stor artsrigdom, og ganske ringe tilgængelighed.. Andre Eocæne marine faunaer med skeletter som London Ler, Belgiens Ypresien og mange andre, hvor hele skeletter er meget sjældne og miljøet mere kystnært, kan slet ikke rimeligt sammenlignes med moleret. Dette fauna er specielt vigtig, fordi der ikke kendes rige faunaer fra Paleocæn, og moleret derfor giver os det første indblik i den mere moderne diversitet af oceaniske faunaer efter Kridttiden, hvor benfiskefaunaerne var meget mere arkæiske og ikke havde dominans af pigfinnede fisk og mange torskefisk.

Verdens største diatomitter i Californien opviser flere dybhavsfisk med lysorganer og også både oceaniske og mere kystnære former i en ganske rig fauna. Men mange af disse fisk er med den sent miocæne alder (små 10 mill år) næsten magen til nulevende former og kan kun give os en idé om mangfoldighedens opstæn på et meget lavere systematisk niveau (differentiering ml. arter). Disse kommersielle brud er altså derfor heller ikke overbevisende analogier til moleret. Af Eocæne WHS lokaliteter med mange fisk bør nævnes leraflejringerne i Messel, Sydtyskland, i en vulkanskø, hvor der også er en fantastisk beværingstilstand med f.eks. fjer, farver, også på insekter. Men fiskediversiteten er ganske ringe og bevaringen i alle tilfælde ikke lige så god angående 3-D beværing, da alle fisk, fugle, krybdyr og pattedyr har kranier og knogler klemt helt flade og oftest knust. Sammenligneligheden er derfor meget begrænset.

# **Det globale thermale maksimum ved Paleocæn-Eocæn grænsen:**

**Klimahistorie og paleobiologi, relevans for de aktuelle klimaændringer samt viden-skabelig værdi af grænselokaliteten ved Stolleklint på Fur**

Claus Heilmann-Clausen, august 2010

*Danmark huser aflejringer fra en klimatisk enestående begivenhed, en fortidig global hede-bølge, som varede 170.000 år og fandt sted for 55 mill år siden. Hedeboølgen var ledsaget, og muligvis forårsaget, af kuldioxidudslip som er sammenligneligt med nutidens menneskeskabte kuldioxidudslip*

Grænsen mellem tidsperioderne Paleocæn og Eocæn, ca 55 mill år før nu, er internationalt defineret ved begyndelsen på den første og mest markante af en række geologisk kortvarige, globale eocæne hyperthermaler, den såkaldte PETM (Paleocene-Eocene Thermal Maximum). Den danske lagserie spiller en særlig rolle for den nøjagtige aldersbestemmelse af Paleocæn-Eocæn grænsen og PETM begivenheden, idet den numeriske datering er baseret på radiometriske analyser af to danske vulkanske askelag, lagene -17 og +19, som blev aflejret kort tid efter PETM (Berggren et al. 1995, Luterbacher et al. 2004, Storey et al. 2007, Westerhold et al. 2010).

PETM varede mindre end 170.000 år, og Jordens gennemsnitstemperatur steg i starten af perioden med mindst 5°C på under 10.000 år (Zachos et al. 2008). Samtidig blev atmosfæren og oceanerne tilført mere end 2000 gigatons kuldioxid, et omfang som er sammenligneligt med det hidtidige og forventede fremtidige menneskeskabte udslip, såfremt dette ikke dæmpes (Zachos et al. 2008 og referencer deri).

Under PETM forsuredes oceanerne, nedbørsmønstre ændredes, og økosystemerne i havet og på land ændredes dramatisk. Øget uddøen, migration og formentlig også evolution er dokumenteret (Wing et al. 2003, Sluijs et al. 2007). Især kan nævnes en stor udskifting i pattedyrfaunaen, en udskiftning som allerede var erkendt i 1800-tallet fra bl. a. europæiske aflejringer. Udskiftningen er i dag bedst kendt og præcist dateret i kontinentale aflejringer fra Nordamerika, hvor de ældste repræsentanter for bl. a. heste og egentlige primater er fundet i lag fra PETM-perioden (Gingerich 2003).

Siden den blev erkendt i 1990erne, har PETM begivenheden og dens årsager og globale effekter været genstand for intensiv udforskning. Den har været hovedemne ved multidisciplinære internationale kongresser i Zaragoza 1996, Paris 1998, Göteborg 1999, Powell 2001, Luxor 2004, Bilbao 2006 og Wellington 2009.

## **Paleocæn-Eocæn grænsen i Danmark**

PETM er overalt i verden karakteriseret af markante geokemiske forandringer, nemlig forskydninger i kulstof- og iltisotopforholdet. Især er en stærk negativ  $\delta^{13}\text{C}$  anomali (i viden-skabelig litteratur ofte benævnt CIE, Carbon Isotope Excursion), registreret i såvelkontinentale som marine aflejringer fra alle egne af verden (e.g., Zachos et al. 2001 og referencer deri).

I marine sedimentter kan PETM tidsperioden, foruden af kulstofanomalien, erkendes mikropalæontologisk, blandt andet ved en pludselig og kraftig øgning i hyppigheden af dinoflagellaten *Apectodinium*, som er konstateret fra shelfaflejringer overalt i verden (Crouch et al. 2001, Sluijs & Brinkhuis 2009, Sluijs et al. 2006).

I Danmark er den stratigrafiske forekomst af dette maksimum (acme) af *Apectodinium* (som udgør omkr. 50% af det totale dinoflagellatselskab) veldokumenteret fra mange profiler (Heilmann-Clausen 1985, Heilmann-Clausen et al. 1985, Nielsen et al. 1986, Willumsen 2004). *Apectodinium* acmet er registreret fra basis af Ølst Formationen, og op til toppen af det nederste laminerede og næsten askefri interval, som udgør nederste del af Haslund Member. Dette karakteristiske, op til 15 meter tykke laminerede lerlag med *Apectodinium* er senere navngivet Stolleklint Ler (Heilmann-Clausen 1995, 2006). Ved Stolleklint på Fur overlejres Stolleklint Leret af Fur Formationen. Her fortsætter *Apectodinium* acmet i de nederste få meter af Fur Formationen (til lidt over askelag -33), hvorefter indholdet af *Apectodinium* aftager gradvist til nær nul lidt under askelag -19b.

Geokemiske analyser af danske aflejringer fra Paleocæn-Eocæn overgangen (Heilmann-Clausen & Schmitz 2000, Schmitz et al. 2004) har vist en meget stærk negativ  $\delta^{13}\text{C}$  anomali i Stolleklint Leret, som er nøje sammenfaldende med *Apectodinium* acmet. Anomalien er stærkere end den globale PETM anomali på grund af et stort indhold af amorft organisk materiale i dette interval. Den stratigrafiske placering af PETM i Danmark (og dermed Paleocæn-Eocæn grænsen) er således klart indikeret af begge globale kriterier. Paleocæn-Eocæn grænsen kan på dette grundlag placeres ved basis af Stolleklint Leret, som beskrevet af Schmitz et al. (2004).

Oversigter over lokaliteter med PETM aflejringer findes i Heilmann-Clausen et al. (1985) og Heilmann-Clausen (1995, 2006). Den største, mest instruktive og eneste permanente lokalitet for PETM intervallet er typelokaliteten for Stolleklint Leret, Stolle Klint på Fur. Her kan basis af PETM sedimenterne, og dermed selve Paleocæn-Eocæn grænsen, med uforstyrret sedimentær kontakt til underliggende paleocæne lag ses på forstranden. Grænsen er tørlagt ved stærkt lavvande (og lejlighedsvis blottet også højere oppe på stranden). Toppen af PETM intervallet kan ses i selve klinten, hvor de øverste par meter af Stolleklint Leret er i uforstyrret kontakt med overliggende diatomé-førende sedimenter af Fur Formationen. Højere oppe i lagfølgen på denne lokalitet ses askelag -17 og endnu højere oppe ses +19, der som nævnt har været grundlag for den radiometriske datering af PETM.

De eneste andre steder, hvor aflejringer fra PETM sommetider kan ses, er lergravene ved Ølst og Hinge (syd for Randers), samt små strandblotninger ved Ny Klitgård (nær Sundby, Mors). Begge steder er der tale om stærkt isforstyrrede forekomster.

På verdensplan er PETM intervallet registreret i talrige ODP borer, men der er kun få veldokumenterede blotninger af intervallet. Flere af disse indeholder dårligt blottede, kondenserede, eller stratigrafisk ukomplette lagserier. Stolleklint har en særlig kvalitet på grund af lagseriens store tykkelse, relationen mellem PETM intervallet og den overliggende aske-serie fra nordøstatlantens åbning, og lagseriens rige fossile faunaer af fisk, insekter og fugle fra sen PETM og tiden lige efter. Disse egenskaber gør den til en af Europas absolut vigtigste lokaliteter, og på verdensplan rangerer den givetvis i "top ti".

## Referencer

- Berggren, W.A., Kent, D.V., Swisher III, C.C. & Aubry, M.-P. 1995: A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In: Berggren, W.A., Kent, D.V., Aubry, M.-P. & Hardenbol, J. (eds): *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*, SEPM Special Publication No. 54, 129-212.
- Crouch, E.M., Heilmann-Clausen, C., Brinkhuis, H., Morgans, H.E.G., Rogers, K.M., Egger, H. & Schmitz, B. 2001: Global dinoflagellate event associated with the late Paleocene thermal maximum *Geology* 29, 315-318.
- Gingerich, P.D. 2003. Mammalian responses to climate change at the Paleocene-Eocene boundary: Polecat Bench record in the northern Bighorn Basin, Wyoming. In: Wing, S.L., Gingerich, P.D., Schmitz, B. & Thomas, E. (eds.), *Causes and Consequences of Globally Warm Climates in the Early Paleogene*, Geological Society of America Special Paper 369, p. 551-566.
- Heilmann-Clausen, C. 1985: Dinoflagellate stratigraphy of the Uppermost Danian to Ypresian in the Viborg 1 borehole, Central Jylland, Denmark. *DGU A7*, 1-69.
- Heilmann-Clausen, C. 1995: Palæogene aflejringer over Danskekalken. In: Nielsen, O.B. (ed.), *Aarhus Geokompendier No. 1, Danmarks geologi fra Kridt til i dag*, 69-114. Geologisk Institut, Aarhus Universitet.
- Heilmann-Clausen, C. 2006: Kapitel 10. Korallrev og lerhav (ekskl. Danien). I: G. Larsen (red.), *Heilmann-Clausen, C. Nielsen, O.B. & Gersner, F. 1985: Lithostratigraphy and depositional environments in the Upper Paleocene and Eocene of Denmark*. *Bull. geol. Soc. Denmark* 33, 287-323.
- Heilmann-Clausen, C. & Schmitz, B. 2000: The late Paleocene thermal maximum  $\delta^{13}\text{C}$  excursion in Denmark? *GFF* 122, 70.
- Luterbacher, H.P., Ali, J.R., Brinkhuis, H., Gradstein, F.M., Hooker, J.J., Monechi, S., Ogg, J.G., Powell, J., Röhl, U., Sanfilippo, A. & B.Schmitz (2004): *The Paleogene Period*. In: Gradstein, F.M., Ogg, J.G. & A.G.Smith (eds.): *A Geologic Time Scale 2004*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 384-408.
- Nielsen, O.B., Baumann, J., Zhang, D., Heilmann-Clausen, C. & Larsen G. 1986: Tertiary Deposits in Store Bælt. In: Møller J.T. (ed.) *Twentyfive Years of Geology in Aarhus*, *Geoskrifter No. 24*, 235-253.
- Schmitz, B., Peucker-Ehrenbrink, B., Heilmann-Clausen, C., Åberg, G., Asaro, F. & Lee, C.-T. A. 2004: Basaltic volcanism, but no comet impact, at the Paleocene/Eocene boundary: high-resolution chemical and isotopic records from Egypt, Spain and Denmark. - *Earth and Planetary Science Letters*, 225, 1-17.
- Sluijs, A. & Brinkhuis, H. 2009: A dynamic climate and ecosystem state during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Inferences from dinoflagellate cyst assemblages on the New Jersey Shelf. *Biogeosciences* 6, 1755-1781.
- Sluijs, A., Schouten, S., Pagani, M., Woltering, M., Brinkhuis, H., Sinninghe Damsté, J.S., Dickens, G.R., Huber, M., Reichart, G.-J., Stein, R., Matthiessen, J., Lourens, L.J., Pedentchouk, N., Backmann, J., Moran, K. & the Expedition 302 Scientists, 2006: Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum, *Nature* 441, 610-613.
- Sluijs, A., Bowen, G.J., Brinkhuis, H., Lourens, L.J. & Thomas, E. 2007: The Palaeocene-Eocene Thermal Maximum super greenhouse: biotic and geochemical signatures, age models and mechanisms of global change. In: Haywood, W.M., Gregory, F.J. & Schmidt, D.N.(eds): *Deep time perspectives on Climate Change: Marrying the Signal from Computer Models and Biological Proxies*. The Micropalaeontological Society, Special Publications, The Geological Society, London, 323-347.

- Storey, M., Duncan, R.A., Swisher III, C.C. 2007: Paleocene-Eocene Thermal Maximum and the Opening of the Northeast Atlantic. *Science* 316, 587-589.
- Westerhold, T., Röhl, U., McCarren, H.K. & Zachos, J.C. 2009. Latest on the absolute age of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM): New insights from exact stratigraphic position of the key ash layers +19 and -17. *Earth and Planetary Science Letters* 287, 412–419.
- Willumsen, P.S. 2004: Palynology of the Lower Eocene deposits of northwest Jutland, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 52, 141-157.
- Wing, S.L., Gingerich, P.D., Schmitz, B. & Thomas, E. (eds.) 2003: Causes and Consequences of Globally Warm Climates in the Early Paleogene. Geological Society of America Special Paper, 369. 614 pp.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., and Billups, K. 2001: Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292: 686-693.
- Zachos, J.C., Dickens, G.R. & Zeebe, R.E. 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *nature* 451, 279-283.

# **A note on pseudomorphs after Ikaite named Glendonite in the Moclay (Fur Formation)**

By Bo Schultz

## **Introduction**

Glendonite are preserved Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) bodies shaped after the metastabil mineral Ikaite ( $\text{CaCO}_3 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$ ). Such pseudomorphs range in size from a few millimetres to 1.6 meters and they weigh roughly 50 kilos. A pseudomorph is a mineral crystal, where the original mineral has been replaced preserving the parent minerals original build.

Worlds largest known preserved Glendonite are found in the Fur Formation. First found in 1985 by museum founder Bent Søe Mikkelsen (Pedersen et.al 1994). These pseudomorphs are among the most spectacular and are of significant scientific value.

Glendonite have been a 190 years long lived enigma to mineralogical science, as the parent mineral for Glendonite pseudomorphs long eluded the scientists. It can be noted that not many geological enigmas have been so long lived and over its unresolved span have drawn the attention of so many prominent scientist along founders of the modern mineralogical sciences principal and crystal systematic.

The unusual pseudomorph was the contemporary geological science regarded with great interest, but crystallography was such that it was not possible to determine the order. Because of their somewhat tumultuous history have these pseudomorphs been given different names: Gesternkörner =barleycorn (Freiesleben,1827) pseudogaylussites (Breithaupt, 1836)., glendonite (E. Dana, 1849)., jarowite (Browell,1860), gennoshi = hammer-stones (Wada, 1904)., fundylite (Stacey 1974) and thinolit (J.Dana, 1884).

As a long lived mineralogical enigma (1826 – 2004) this geological oddity has been reviewed by many founders of crystallography and mineralogy.

## **The Historic Legit**

The first pseudomorphs of the Glendonite type where known as Gesternkörner named by the finder Professor Freiesleben in 1827 in a newly restored mine shaft in the city Sangerhausen by Obersdorf of Thuringa (Freiesleben, 1827). Later in 1836 Professor Breithaupt named them pseudogaylussite assuming them to be pseudomorphs after Gaylussite (Breithaupt, 1836). The French chemist Des Cloizeaux suggest in 1843 that parent mineral could be on the Haüy described Celestin ( $\text{SrSO}_4$ ) variant apotome. (Des Cloizeaux, 1843), (Des Cloizeaux, 1874).

James D. Dana is natural anthropologist and counted today, as the American Darwin. He attends here in "The United States Exploring Expedition" (1838-1842). In 1838 Mrs. Robert Scott showed Mr. James D. Dana some peculiar pseudomorph, as found in the area around the town of Glendon in Hunters Valley, New South Wales, Australia. Glendon down later name for the basis of surveys in Glendonite ". (Dana, 1849).

The name Thinolite refers to very large tuff bodies found in the fossil Lake Lahontan (now Pyramid and Mono Lakes) in State of Nevada, USA. Discovered in 1844 by John C. Frémont. (King, C., 1878).

The German pseudomorph expert professor Blum marvelled at the nature of this pseudomorph when he in 1853 research in vain to find a logical explanation for Glendonite type pseudomorph.

Edward S. Dana is author to Dana's system of mineralogy and published in 1884 a detailed explanation on Thinolite as a mineralogical enigma and historic curiosum (Dana, 1884). In 1897 associated with a dam building at the City of Groningen pseudomorph recognized as pseudogaylussite (Glendonite) are found. Van Calker worked on the issues and published a fine overview on many historic outcrops and publications. (Van Calker, 1897)

In 1901, there are dredged, pseudomorphs from the mud at the bottom of the River Clyde in Scotland. Found assumed to be dislocated and origin locality is still unknown. These pseudo-morphing described by the German amateur geologist Christian Trechmann lived in Scotland. As he increasingly seemed that pseudomorphs similar to those from Sangerhausen, he looks away from the hub network Jarowite (Browell, 1860) and call them pseudogaylussite. The Scottish geologist Peter MacNair of-ends in 1905 apparently the debate with his article on the Clyde site. The problem is considered as unresolved, but work is not to resolve it. (Trechmann, 1901) (MacNair, 1905).

In 1904 describes Meunier the discovery of small pseudomorph in connection with the construction of the Paris subway at Place de la Republique. The actual link to the Sangerhausen type pseudomorphs occurs first in 1905 by Lacroix, describing them as pseudomorph after Celestit, an idea put forward by Des Cloizeaux in 1843. (Lacroix, 1905).

The German mineralogist Hintze writes a book about mineral systematic, the out-come in 1916. In this he notes the different names for pseudomorphs known pseudogaylussite. His book later becomes a master reference work for mineralogical work in Europe. (Hintze 1916). In 1923 the renowned Professor Victor Goldsmith attempts to resolve the enigma in his extensive work but ends up leaving the topics listed but unresolved as the symmetric class can not be deduced. (Goldsmith 1923).

A number of scientist like Russian M.E. Kaplan (Kaplan 1979) worked on the topic over the years but the resolving the enigma first came with correlation of deep sea discoveries, modern scientific approach and namely the Moclav Glendonite as clear crystallographic well preserved samples.

## **The modern scientific approach**

Over the next many years many new discoveries of pseudomorph outcrops where recorded but the breakthrough came in 1981 where Erwin Suess discovered true Ikaite crystals in deep sea sediment at the Bransfield Strait at Antarctica Suess et al 1982). The mineral Ikaite had been found in nature in 1963 by Hans Pauly in The Ikka Fjord of SE Greenland (Pauly 1962), but here it forms as underwater mineral columns and was more associated with Thinolite than Glendonite (Buchardt et.al 1997). Professors Douglas Shearmann and Alec Smith (Shearmann et al 1985) make the first attempts to correlate the topics (Huggett

et.al 2005). The real break through comes with the deep sea findings of Jens Greinert (Greinert 2004) in the sea of Ocromsk.

## Conclusions

*Historic: The enigma resolved with the Moclays Glendonite as the most impressive and well preserved samples.*

Correlation the modern information with the historic legit along outcrop data assimilated from the Moclay pseudomorphs resolves the enigma and states Ikaite as parent mineral to Glendonite. Where the world's most significant Glendonite outcrop and best preserved Glendonite is that of the Moclay. It can be noted that Cambro/Permian Glendonite in Jervis Bay Marine Park, New South Wales are among the attractions to be viewed there.

*Scientific: Universal Scientific value of Glendonite is indicator of sediment conditions and temperature in relation to climate and evolutionary conditions.*

Glendonite has been used as a correlation tool by Kemper in Klima der Kreide (Kemper et.al 1987) and Scortesse in Paleomap project (Scortese 1997). Einsele uses it as an indicator for glacial marine condition in Sedimentary Basins (Einsele 2000). Established that the parent mineral is Ikaite (Greinert 2004) we now can establish that it forms in specific sediment environment with methane seeps (Teichert 2009) and could be an indicator for refrigerator temperatures (Schultz 2009) a sort of geological thermometer. This regarding the Moclay outcrops suggested connected to the heavy regional volcanism (Brooks 2006). So the 2011 assumption connects the occurrence of Glendonite as pseudomorphs after Ikaite to specific sediments, properly subdued to Methane seep and holding a refrigerator like temperature.

## References

- Blum, 1843, Pseudomorphosen, 18, 1843.  
Breithaupt, 1836 : Mag. Orytk. Sachsen, No.7, 287, 1836, (citeres i Blum 1843).  
Brooks, Kent, When the Sun died over northern Europe: the unique geology of Denmark's inland island, Geology Today, Volume 22, Issue 5, pages 180–186, September 2006  
Browell, E.J.J., 1860, Description and analysis of an undescribed mineral from Jarrow Slake : Tyneside Naturalists Field Club, V, 103-4,  
Buchardt, B., Düwel, L., Jenner, C., Kristensen, R.M., Kristiansen, A., Petersen, G.H., Seaman, P., Stockmann, G., Thorbjørn, L., Vous, M., Whiticar, M.J., Wilken, U., November 1997, Submarine columns of ikaite tufa: Nature v. 390, p. 129-130.  
Dana, E.S., 1884, A crystallographic study of the thinolite of Lake Lahontan : United States Geological Survey Bulletin 12, p. 429-450,  
Dana, E.S., 1947, A textbook of Mineralogy: New York, Wiley, 851 p, 1947.  
Dana, J.D., 1849, United States Exploring Expedition, 1838-42, under the command of C. Wilkes U.S.N. Vol. X, p. 418 & 481-482 & 656, 1849.  
Des Cloizeaux, 1843, Déterminations des formes primitives et secondaires de la Gaylussite : Ann. Chim. Phys., III, vii, 489, 1843 Observations sur la calcite, ib., p 494, 1843.  
Des Cloizeaux, 1874, Minéralogie, ii, 119, 1874.  
Einsele, G. 2000. Sedimentary Basins. Evolution, Facies, and Sediment Budget, 2nd ed. xi+792 pp.  
Freiesleben. 1827. Isis, xx, pp. 333-336.

- Goldschmidt, Victor, M. Entwicklung d. Krystallformen II, Taf VIII & IX, Zeitschrift f. Krystallogr. U. Min. 28 bd. 1923.
- Greinert, J., Derkachev, A. Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: implications of aventing-related ikaite/glendonite formation. Marine Geology 204 (2004) 129-144
- Hintze, C. A.F., Handbuch der Mineralogie 1916
- Huggett, J. M.; Schultz, B. P.; Shearman, †D. J.; Smith, A. J., The petrology of ikaite pseudomorphs and their diagenesis, Proceedings of the Geologists' Association, Volume 116, Numbers 3-4, 2005 , pp. 207-220(14)
- Kaplan, M.E., 1979, Calcite pseudomorphs (pseudogaylussite, Jarowite, Thinolite, Glendonite, Gennoishi, White Sea Hornlets) in sedimentary rocks. Origins of the pseudomorphs.:{ Litologiya i Poleznye Iskopaemye, No. 5, pp. 125-141, September-October, 1979 (in Russian).}: UDC 549.742.111 : 551.762, p. 623-636, Plenum Publishing Corporation 1980 (translation in English).
- Kemper, E., et al., Das Klima der Kreide-Zeit.[Geol. Jahrb., Reihe A, 96.] Hannover, 1987. Pp. 399, numerous photos (mostly of fossils) on 57 plates, 3 tabs., 68 illus. in text, refs. Orig. stiff wrs. - The second half of the volume ist sub-titled "Beiträge zur Klima-Analyse der Kreide" with paleontological contributions by D.J. Batten, I. Harding, Li Weneben, J. Mutterlose, G., Pezer, R.A. Spicer, K. Wiedenroth, and V. Wilde.
- King, C., 1878, Report of the Geological Exploration of the Fortieth Parallel, Vol. I, p. 488, et seq.,
- LaCroix, A. Mineralogie de la France. Vol. 3, Part 1. 400 pp. ..... PSEUDOGAYLUSSITE, App., p. 55. 1905
- Macnair, Peter. 1904. On pseudogaylussite dredged from the Clyde at Cardross and other recent additions to the Mineral Collections in the Kelvingrove Museum. Proceedings of the Royal Philosophical Society of Glasgow, 35, 250-262
- Pauly, H., 1962, Ikait, nyt mineral der danner skær: Naturens Verden 168-192.
- Pedersen, S.A.S., Pedersen, G.K., Noe, P., 1994, Mo-clay on Mors, Mors kort & godt-1 Morsø Lokalhistoriske Forlag, Dueholm Kloster, 7900 Nykøbing Mors. (in english)
- Pelouse, J., 1831, Ann. Chim. Phys., 48, 311.
- Schultz, B.P., 2009: Pseudomoroh after ikaite – called Glendonite is it a geological thermometer incold sediments orgeological oddity as it occurs close to PETM in the Fur formation. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 6 (2009) 072059 doi:10.1088/1755-1307/6/7/072059
- Scotese, C.R., PALEOMAP Paleogeographic Atlas, Department of Geology, University of Texas, 1997
- Shearman, D.J., Smith, A.J., 1985, Ikaite, the parent mineral of jarowite-type pseudomorphs. Proceedings of the Geologist's Association, vol. 96. Part 4. 1985, 305-314.
- Steacy, H.R., and Grant, D.R., 1974, Tidal miuds reveal mineral curiosity.: Canadian Geographical Journal 88, p. 36-38.
- Suess, E., Balzer, W., Hesse, K., Muller, P.J., Ungerer, P.J., Wefer, G., 1982, Calcium carbonate hexahydrate from organic-rich sediments of the Antarctic shelf : precursor of glendonites : Science, v. 216, p. 1128-1131.
- Teichert, B.M.A., Luppold, F.W. (2009). Glendonite formation in Early Jurassic dark shales – Evidence for methane seepage in northern Germany. 19<sup>th</sup> Annual V.M. Goldschmidt Conference, Davos/Switzerland, June, 21.-26.2009, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73 (Supplement 1), p. A1319.
- Trechmann, Ch. O., 1901, Über einen Fund von ausgezeichneten Pseudogaylussite(Thinolite Jarowite-) Krystallen: Zeitschrift für Krystallographie, XXV, Band 3, Heft., 283-5, 1901.
- Van Calker, F.J.P., 1897, XXIX. Beitrag zur Kenntniss des Pseudo gaylussite und über dessen Vorkommen in Holland.: P.Groth, Zeitschrift fur Krystallographie und Mineralogie, p. 556-571, XXVIII .
- Wada, Tsunashiro (Author), Minerals Of Japan (1904)

# The fossil insects of the Fur Formation

Jes Rust

Steinmann Institute, Department of Palaeontology, University of Bonn

*Insects are the most common macro-fossils of the Fur Formation. Their preservation is brilliant and they are highly diverse. The insects of the Fur Formation allow deep insight into a terrestrial ecosystem during the global greenhouse climate about 54 Million years ago. They are of eminent importance for the analysis of the early development of modern insect diversity.*

Insects are the most diverse group of organisms in the history of life on Earth, and the most ecologically dominant terrestrial animals. The quality of insect's fossil record is of high quality for large periods of earth's history. The often excellent conservation enables us in many cases to perform extensive palaeobiological analyses. Based on this palaeontological record, ancient patterns of live and sometimes even specific ethological aspects of fossil faunas can be reconstructed. Fossil insects can also be used in solving questions about biogeography, climate history and development of today's biodiversity (e.g. Grimaldi & Engel 2005).

In several horizons of the Fur Formation fossiliferous calcareous cementstones occur, with insects as the most common fossils. Today, we know of at least 25.000 fossil insect specimens housed in various collections. The findings are characterised by a brilliant preservation of even the finest details. An inventory of about 200 species was identified so far. The most common insects belong to the Diptera (true flies), Heteroptera (bugs, e.g. Andersen 1998) and Auchenorrhyncha (cicadas, Rust 1999a). These are particularly diverse, and especially the Fulgoromorpha (planthoppers) are represented by higher numbers of different forms than anywhere else. Compared with all other known fossil-bearing sites worldwide the Lepidoptera (moths and butterflies) are represented by numbers high above average (more than 1700 specimen out of 6 species). For one fossil Lepidopteran species evidence of mass migrations as known for recent species was found for the first time (Rust 2000). Saltatoria (grasshoppers, locusts, crickets), Neuroptera (lacewings, e.g. Willmann 1993) and Hymenoptera (wasps, bees, ants, e.g. Rust & Andersen 1999) are also rather rich in species. For the Saltatoria the oldest known fossil evidence of Tettigoniidae, Pteroplistinae (Rust 1999b), Oecanthinae and Acrididae in Danish Paleogene sediments is presented. For the most abundant tettigoniid (*Pseudotettigonia*) it was possible to reconstruct the original singing and hearing ability (Rust et al. 1999). Other insect taxa [Odonata (dragonflies, damselflies, e.g. Madsen & Nel 1997, Rust et al. 2008, Petrulevičius et al. 2008), Mantodea (mantises), Blattoidea (cockroaches), Dermaptera (earwigs, Willmann 1990), Aphidoidea (plant lice, e.g. Heie 1987), Coleoptera (beetles), Mecoptera (scorpionflies) and Trichoptera (caddisflies)] are likewise represented in outstanding findings, some of which allow detailed statements on the habits of these species.

The insects were transported from southern and south-western Scandinavia to the former North Sea by active flight, passive wind drift or with plant remains. Flightless forms were not found. In addition the faunal composition shows that insects always flew during summers with high temperatures and prevailing northerly winds. The climate of the North Sea area was influenced by seasons and the insect fauna gives hints of subtropical conditions during the Lower Tertiary. Examples from the Danish Paleogene are known which show that climatic adaptations of some of the recent insects to moderate temperatures may have

developed as late as during the course of the Tertiary and Quaternary (Rust 1999a). The high diversity of plant-sucking insects gives evidence of lush and highly diverse vegetation on the Scandinavian mainland. A broad spectrum of freshwater insects suggests the existence of large and diverse lakes, ponds and rivers. In addition there are a lot of fossil forms whose extant relatives are inhabitants of swamplands. Especially diverse are those insects that give evidence of the former existence of forests and open areas with shrub vegetation. General faunistic correspondence has been found between the fossil insects of the Fur Formation and those from North America. Close relations to faunas which have their main distribution in South and Southeast Asia or America are found when considering recent species. In other cases the representatives of today show a Gondwana-like distribution or are cosmopolites (Rust 1999a).

The fossil insects of the Fur Formation show that the systematic and ecological basis of recent insects developed already during the Mesozoic and it is likely that these events are closely connected with the rich development of the angiosperms during the Middle and Upper Cretaceous.

### **The Fur Formation fossil insects on an international scale**

Together with the Baltic amber the sediments of the Fur Formation are the most important Lagerstätte of Tertiary insects in Northern Europe. The preservation of the fossil insects is outstanding. In some cases the preservation of specimens is three-dimensionally and even soft tissues are sometimes preserved. Many groups of insects have been recorded for the first time in their history from the deposits of the Fur Formation and therefore they are crucial for the analysis and timing of reconstructions in insect phylogeny. The material is also of special importance for the reconstruction of the early radiation of almost all important insect groups during the global greenhouse Eocene climate. Finally, the insects of the Fur Formation have provided unique data on widespread changes in geographic distributions against the background of large-scale global climate change over the last 54 Million years.

### **References**

(The record of fossil insects of the Fur Formation in the literature is extensive at least for some groups, thus only a small selection is cited here)

Andersen, N. M. (1998): Water striders from the Paleogene of Denmark with a review of the fossil record and evolution of semiaquatic bugs (Hemiptera, Gerromorpha). - Det Kgl. Danske Vidensk. Selskab, Biologiske Skrifter 50: 1-157.

Heie, O. (1987): Palaeontology and Phylogeny. - In: Minks, A. K. & Harrewijn, P. (eds.): Aphids- their biology, natural enemies and control. Vol. A, S. 367-391; World Crop pests 2A, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 450 S.

Madsen, H. & Nel, A. (1997): Two new fossil species of *Gomphaeschna* SELYS, 1871 in the Paleocene / Eocene of Denmark (Odonata: Aeshnoidea). - Ann. Soc. Entomol. Fr. (N.S.), 33 (3): 285-293.

Petrulevičius, J. F., Wappler, T., Wedmann, S., Rust, J., Nel, A. (2008): New megapodagrionid damselflies (Odonata: Zygoptera) from the Paleogene of Europe. – Journal of Paleontology, 82(6): 1173-1181.

Rust, J. (1999a): Biologie der Insekten aus dem ältesten Tertiär Nordeuropas. – Habilitation-Thesis: 482 p., 34 pl., University of Göttingen.

Rust, J. (1999b): Oldest known pteroplistine cricket and other Gryllidae (Orthoptera) from the Paleogene Fur and Ølst Formations of Denmark.- *Entomologica scandinavica*, 30: 35-45.

Rust, J. (2000): Fossil record of mass moth migration. - *Nature*, 405: 530-531.

Rust, J. & Andersen, N. M. (1999): Giant ants from the Paleogene of Denmark with a discussion of the fossil history and early evolution of ants (Hymenoptera: Formicidae). - *Zoological Journal of the Linnean Society*, 125: 331-348, London.

Rust, J., Stumpner, A. & Gottwald, J. (1999): Singing and hearing in a Tertiary bushcricket. – *Nature*, 399: 650.

Rust, J., Petrulevičius, J. F. & Nel, A. (2008): The first damselflies from the lowermost Eocene of Denmark with description of a new subfamily (Odonata, Zygoptera: Dysagrionidae). – *Palaeontology*, 51 (3): 709-713.

Willmann, R. (1990): Insekten aus der Fur-Formation von Dänemark (Moler, ob. Paleozän/unt. Eozän?). 2. Dermaptera. - *Meyniana*, 42: 15-23.

Willmann, R. (1993): Insekten aus der Fur-Formation von Dänemark (Moler, ob. Paleozän/unt. Eozän?). 8. Zwei neue Vertreter der Chrysopidae (Neuroptera): - *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, 1993(4): 239-245.

## The volcanic ash layers of the Fur Formation and the timing of Paleocene and Eocene climate events

Michael Storey

*Quaternary Dating Laboratory, Department of Environment, Society and Spatial Change, Roskilde University, P.O. Box 260, 4000 Roskilde, Denmark*

Multiple, short-lived (40-200 ky) global warming events (known as hyperthermals) punctuate the Paleocene and Eocene greenhouse climate between 62-42 Ma. The largest of the hyperthermals is the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM). These dramatic events are manifested by ocean acidification and lowering of the carbonate compensation depth, high benthic faunal turnover and an increase in deep sea temperatures of up to 6-7 °C (1). The onset of hyperthermals is characterized by an abrupt (<20 ky) decrease in marine carbonate  $\delta^{13}\text{C}$  (2, 3), requiring the release of massive amounts of  $^{13}\text{C}$ -depleted C (> 1500 Gt in the case of the PETM), in the form of carbon dioxide and/or methane, into the hydrosphere/atmosphere (4). Such events represent major perturbations of the carbon cycle. It is widely recognized that these deep-time analogues to present-day release of anthropogenic greenhouse gases can provide important lessons for future climate change, providing that the origin of hyperthermals can be better understood. Resolving between the competing theories of orbital control vs tectonic-magmatic (e.g. 5, 6, 7, 8) as the trigger mechanism for the release of the greenhouse gases requires accurate and precise dates for the hyperthermals.

Interbedded with the Fur Formation sediments that record some of the Paleocene and Eocene hyperthermals are ~ 200 basaltic and rhyolitic volcanic ash layers, varying in thickness from ~1mm to 19 cm for the rhyolite layer +19 (9). Because the ash-bearing succession of NW Denmark consists of diatomite (mo clay), formed in a local embayment (10), many of the ash layers are remarkably well preserved, despite being up to ~56 Myr old. In other locations, where they are in normal clay facies, the ash layers are completely altered and only recognizable as varicoloured stripes in the clay. In geological terms, ash layers are deposited instantaneously and they therefore constitute valuable time markers that can enable correlation of climate records between different sedimentary basins and environments. Two of the Fur Formation rhyolitic ash layers (-17 and +19) are particularly widespread and form important stratigraphic markers over a large part of the North Sea and North Atlantic region (9). Notably, Ash-17 has been correlated with a sanidine-bearing volcanic tuff near the top of the East Greenland Tertiary lava pile, on the basis of identical mineralogy (11) and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dates (7). The importance of this particular correlation is that it allows the timing of the PETM, recorded in marine sediments, to be directly compared with the terrestrial record of tectonic-magmatic events during Greenland-Europe breakup in the Early Tertiary, allowing the examination of a possible causal relationship with hyperthermals (7).

The Fur Formation ash layers are also playing an important role in the EARTHTIME community effort ([earthtime-eu.eu](http://earthtime-eu.eu)) to produce a more accurate and precise timescale for the Paleocene and Eocene (12). Rhyolite ashes -17 and +19 both contain sanidine and possibly zircon, both of which can be both dated by radioisotopic methods ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  respectively) with great precision and accuracy (c.  $\pm$  50 ky at 55 Myr ago). Radioisotopic dated ash layers such as Ash-17 (7) make it possible to obtain absolute numerical ages for the hyperthermals through the counting of the number of astronomical cycles (eccentricity and precessional) recorded in the intervening marine sediments between the ash layer and the onset of hyperthermals such as the PETM (12). This approach was recently used to refine the age of the PETM to 55.9 Ma (13). Such age information is a prerequisite

for rigorous testing of the different, previously outlined, hypotheses for the origin of these climate events.

In summary, several of the Fur Formation ash layers are important, widely distributed, time markers. Ash -17 enables correlation of the Paleocene-Eocene marine climate record with the terrestrial tectonic magmatic history of the North Atlantic region. Ongoing radioisotope dating of the Fur Formation ash layers is contributing to an effort by the EARTHTIME community to produce an accurate and precise timescale for the Paleocene and Eocene hyperthermals, information that is essential for understanding the origin of these ancient global warming events.

1. J. C. Zachos, G. R. Dickens, R. E. Zeebe, *Nature* **451**, 279 (Jan, 2008).
2. J. P. Kennett, L. D. Stott, *Nature* **353**, 225 (Sep, 1991).
3. P. L. Koch, J. C. Zachos, P. D. Gingerich, *Nature* **358**, 319 (Jul, 1992).
4. G. R. Dickens, J. R. Oneil, D. K. Rea, R. M. Owen, *Paleoceanography* **10**, 965 (Dec, 1995).
5. L. J. Lourens *et al.*, *Nature* **435**, 1083 (Jun, 2005).
6. P. F. Sexton *et al.*, *Nature* **471**, 349 (Mar, 2011).
7. M. Storey, R. A. Duncan, C. C. Swisher, *Science* **316**, 587 (Apr, 2007).
8. H. Svensen *et al.*, *Nature* **429**, 542 (Jun, 2004).
9. L. M. Larsen, J. G. Fitton, A. K. Pedersen, *Lithos* **71**, 47 (2003).
10. G. K. Pedersen, F. Surlyk, *Geological Society of Denmark* **32**, 43 (1983).
11. L. E. Heister, P. A. O'Day, C. K. Brooks, P. S. Neuhoff, D. K. Bird, *Journal of the Geological Society* **158**, 269 (2001).
12. T. Westerhold, U. Rohl, H. K. McCarren, J. C. Zachos, *Earth and Planetary Science Letters* **287**, 412 (Oct, 2009).
13. A. J. Charles *et al.*, *Geochemistry Geophysics Geosystems* **12**, (2011).