2010

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 3

Danmarks geologiske udvikling fra 65 til 2,6 mio. år før nu

- Palæogen - Fra drivhus til kølehus
- Neogen - Da Danmark steg op af havet

Palæogen - Fra drivhus til Kølehus

I det meste af Palæogen (65–23 mio. år før nu) var det nuværende danske område dækket af et varmt og ret dybt hav. I den første korte tid (de første 5 mio. år) dannedes tykke kalklag, men herefter blev der aflejret en række lerlag, hver med sit særlige udseende og fossilindhold, som vidner om vekslende temperaturer, vanddybder og cirkulation i havet samt om ændringer i afstanden til omliggende landområder. En kortvarig, men intens global varmebølge satte sit præg på et af disse lag. Aske fra vulkanisme i spredningszonen af et nydannet ocean mellem Norge og Grønland samt helt usædvanlig fossilrigdom ses i et andet lag, mens et tredje lag vidner om det måske dybeste hav, som nogensinde har dækket Danmark. Det globalt ensartede, varme drivhusklima afløstes af et moderne, køligere klima i sen Palæogen for ca. 34 mio. år siden. Mægtige iskapper voksede nu op på Antarktis. Det fik stor indflydelse på danske aflejringer i de sidste 11 mio. år af Palæogen.

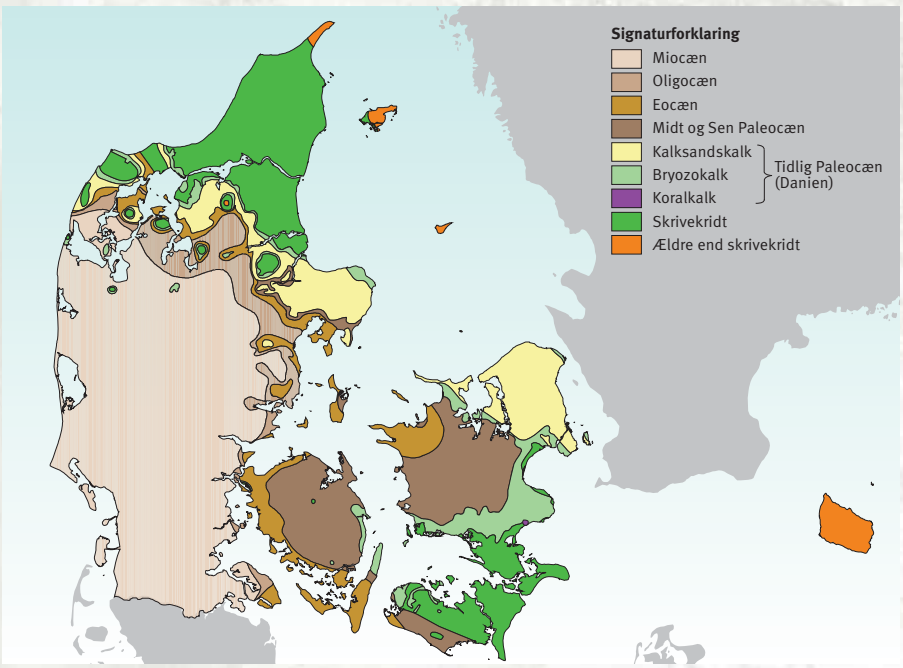


Illustration: Grafisk, GEUS.

Kort over lag ældre end Kvartær. Nordøst for bæltet med palæogene sedimenter (Paleocæn, Eocæn, Oligocæn) er lagene blevet fjernet ved senere erosion. Mod sydvest er de dækket af yngre, miocæne sedimenter.

For ca. 65 mio. år siden slog en 10–15 kilometer stor asteroide ned i Mexico og udløste en global naturkatastrofe. Nedslaget og de efterfølgende sammenbrud af økologiske systemer, hvorved ca. 75 % af verdens dyrearter (inklusive dinosaurerne) uddøde, er nærmere omtalt i Geoviden 2010 nr. 2. Katastrofen, som er uden senere sidestykke, danner grænsen mellem tidsperioderne Kridt og Palæogen. I Danmark, som de fleste andre steder på kloden, blev der i tiden lige efter nedslaget aflejret et få centimeter tykt lerlag, som er beriget på kosmisk materiale. Lerlaget ses bedst i Stevns Klint, hvor det kaldes Fiskeleret (nærmere omtalt i Geoviden 2008 nr. 4).

På dette tidspunkt befandt Danmark sig så sydligt som Norditalien, mens det bevægede sig langsomt nordover som en del af den euro-

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

Fordelingen af hav og land på 3 tidspunkter i Palæogen. Kystlinjens placering nord og øst for Danmark er meget usikker og kysten kan have ligget betydeligt længere oppe i Sverige.

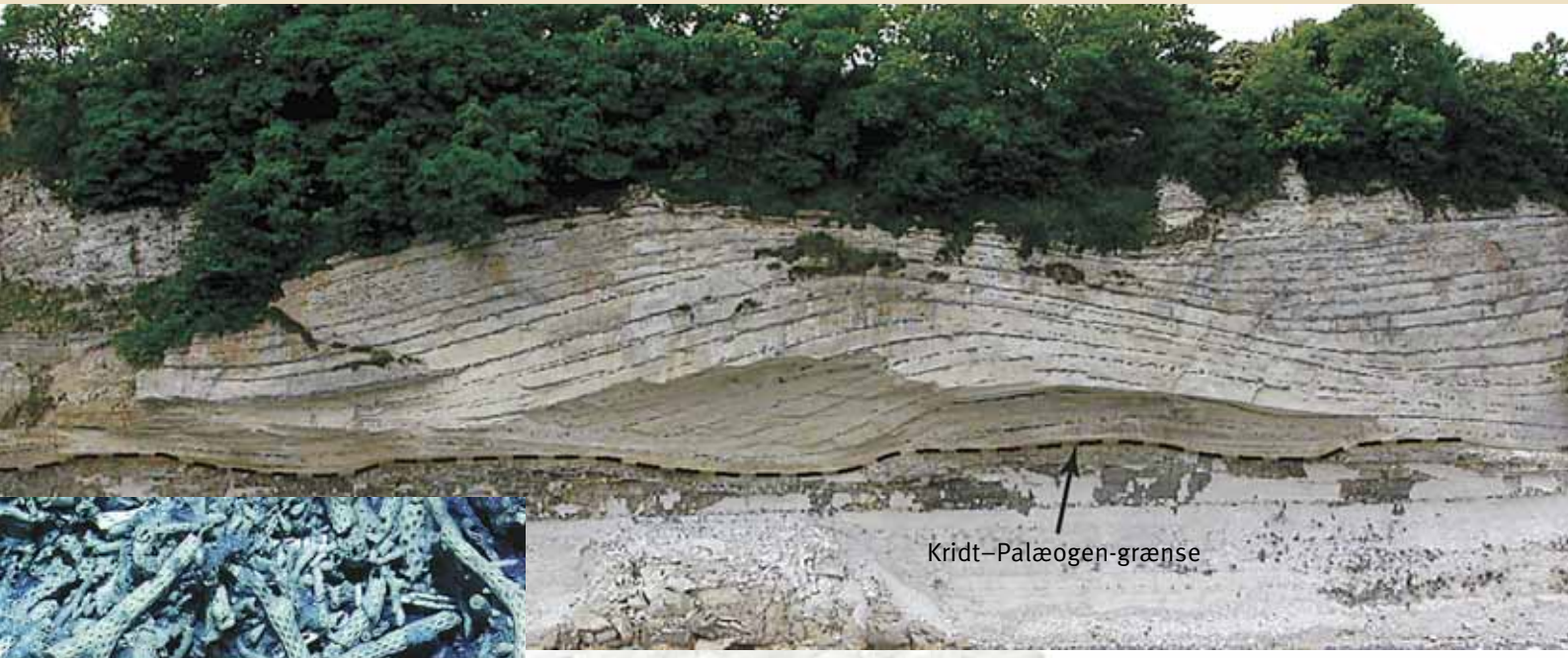


Foto: Morten Bjergager 2003, GEUS.

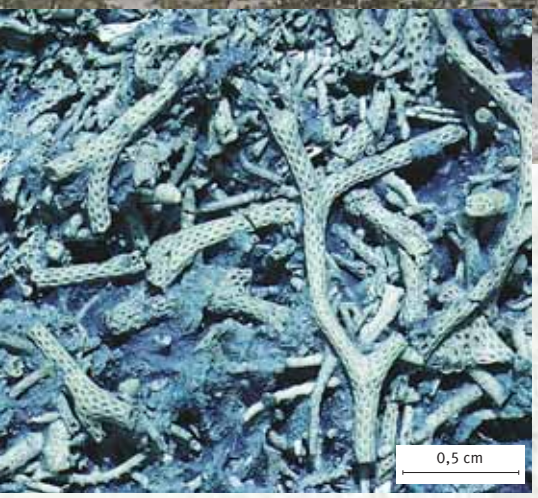


Foto: Søren Bo Andersen og Erik Thomsen, Aarhus Universitet.

Ovenfor ses Stevns Klint med bryozokalk over Kridt–Palæogen-grænsen. De mørke, buede flintlag aftegner bryozobankernes overflader og viser, hvorledes bankerne med tiden vandrede mod venstre, dvs. mod sydøst. Bankerne er opbygget af bryozokolonier, som ses i nærbillede til venstre (på et stykke kalk, som først er sandblæst og derefter farvet blåt).

asiatiske plade. Det globalt ensartede drivhusklima, som fandtes i Kridt (se forrige nummer af Geoviden 2010 nr. 2), herskede fortsat gennem det meste af Palæogen. I Danmark var klimaet subtropisk til tropisk, men i slutningen af Eocæn blev det koldt ved polerne, og de moderne klimabælter opstod.

Aflejringer fra Palæogen findes i hele Danmark på nær Nordjylland, det sydligste Sjælland, Lolland-Falster og Bornholm. I Midt- og Vestjylland er lagene dækket af yngre jordlag fra Neogen og Kvartær, men i limfjordsområdet, Østjylland, Fyn og Sjælland findes de nær overfladen. Her kan lagene ses mange steder i kystklinter og kalk- og lergrave. De palæogene sedimenter er alle marine og blev aflejret i en udvidet Nordsø, som dækkede hele det danske område.

Danien

De første 5 mio. år af Palæogen kaldes Danientiden, og er opkaldt efter Danmark. I Danien fortsatte aflejringen af kalksten som i Sen Kridttid, og naturforholdene har været omtrent uændrede. Danienkalken er op til 350 meter tyk. En stor del af kalken består af kalkskeletter af små, kolonidannende dyr, bryozoer eller mosdyr. Bryozokolonierne voksede på havbunden i et relativt dybt hav, hvor de har dannet 5–10 meter høje banker, se foto ovenfor. Buede flintlag følger bankernes oprindelige overflader og viser, at sydflankerne er stejlest. Man kan se på flintlagenes forløb, at bankerne under væksten har flyttet sig sydøstover, formentlig styret af en sydøstfra kommende, varm havstrøm. Strømretningen svarer til den havforbindelse, som, via Ukraine og Sortehavet, forbandt Nordsøen med datidens store varme Tethys Ocean længere mod sydøst. De imponerende, asymmetriske bryozobanker ses tydeligt i klinterne ved Stevns på Sjælland og Karlby på Djursland. Ved Fakse findes et fossilt koralrev som er meget rigt på fossiler af forskellige dyregrupper, der levede på og omkring revet. Danien-tidens havvand har været klart og rent, næsten uden tilførsel af ler fra de tilgrænsende landområder.

Situationen ændrede sig radikalt ved slutningen af Danien. Fra nu af begyndte ler at blive tilført havområdet, og bryozovæksten ophørte. I den 38 mio. år lange, resterende Palæogen-periode blev der næsten udelukkende aflejret ler. Tykkelsen af dette lerlag overstiger 300 meter i Midtjylland.

Geologisk tidsskala med de vigtigste danske aflejringer

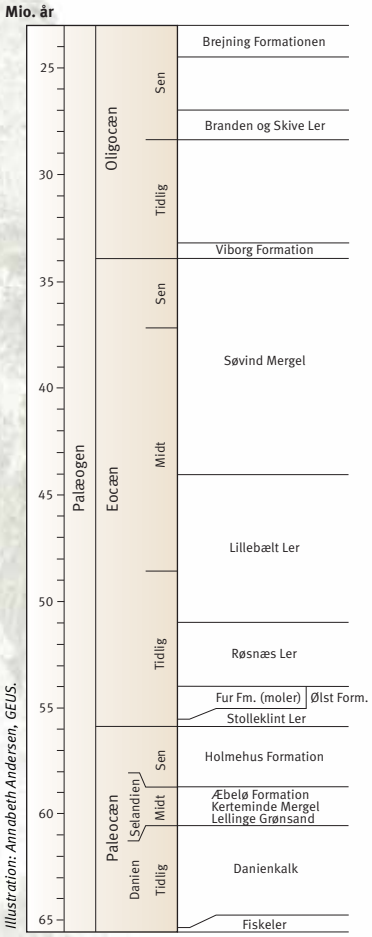


Illustration: Annabeth Andersen, GEUS.

Claus Heilmann-Clausen

Lektor, Aarhus Universitet
claus.heilmann@geo.au.dk

Fra kalk til ler

Rene kalksedimenter blev aflejret gennem hele Sen Kridt og Danien, i næsten 40 mio. år. Ophøret af dette kalkregime i slutningen af Danien afslutter et vigtigt kapitel i aflejringshistorien. Fra nu af blev sedimenterne domineret af ler. Det er ikke helt klart hvilke begivenheder, der ligger bag, men flere faktorer synes at have medvirket til ændringen. Især synes en omfattende hævning af store dele af det nordatlantiske område og vulkanisme mange steder, bl.a. i Skotland og Irland, at have spillet en vigtig rolle. Vulkanismen og hævningen formodes at skyldes opvarmning af en dybtliggende skorpe som følge af aktivitet fra en meget stor hotspot – et særligt varmt område i Jordens kappe (hotspot er nærmere beskrevet i Geoviden 2007 nr. 4). Denne hotspot ligger i dag under Island og er årsag til denne vulkanøs opståen. De hævede områder, især Skotland og Shetlands-platformen, blev udsat for forvitring og erosion, og store mængder af sand og ler blev tilført Nordsøbassinet, som Danmark var en del af.

En medvirkende årsag til at kalkaflejringen ophørte var, at de hidtil gode havforbindelser til varme oceaner mod syd var blevet indsnævret eller helt afbrudt. Derved blev miljøet mindre gunstigt for væksten af de organismer, hvis kalkskeletter kalksedimenterne består af. I det danske område var havdybden i slutningen af Danien aftaget så meget, at der nok var tørt land nogle steder. Herom vidner blandt andet forekomsten af kalkrullesten, som er rundslidt af bølger. Rullestenene kan ses på flere lokaliteter og stammer fra løsrevne stumper af kalkens overflade, se nederste foto.

Fra kalk til ler. I en tidligere mergelgrav ved Svejstrup vest for Randers ses grænsen mellem kalk fra Danien og ler fra Selandien. Selve grænsen er ved toppen af spadeskaftet. Den øverste del af kalken fremtræder stærkt 'ormædt'. Det skyldes en mængde gravegange udført af små krebsdyr i Selandien. Gravegangene er siden blevet fyldt med ler, der ses som tynde forgreninger ned i kalken.

Rullesten nederst i Selandien-leret ved Svejstrup. Rullestenene er stykker af Danienkalk, som er brækket løs af havbunden og rundslidt af bølger i havstokken i tidlig Selandien. Efter en havstigning blev de indlejret i ler.

Fotos: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Foto: Ole Heilmann-Clausen.

Hvor de bløde leraflejringer fra Palæogen forekommer nær terrænoverfladen er lagene næsten altid blevet forstyrrede af Kvartær-tidens gletsjere. På billedet ses foldede lag af Æbelø Formationen fra Selandien (Midt Paleocæn) i en klint på Æbelø ud for Nordvestfyn. Lagene har en stor udbredelse i det meste af Danmarks og den østlige Nordsøs undergrund, men de eneste steder de er blottede er hér og i en klint på Djursland. Den markante stribning skyldes, at nogle af lagene er forkislede. Vekslingen mellem forkislede og bløde lag skyldes sandsynligvis astronomisk betingede klimavariationer.

Gradvist dybere vand

Lagene over danienkalken er flere steder rige på fossiler, især snegle og muslinger. Fossiler fra disse lag, fra udgravninger i københavnsområdet, blev beskrevet omkring forrige århundredskifte. Undersøgelserne viste, at lagene repræsenterede et geologisk tidsrum, som endnu ikke havde noget navn. Tidsrummet blev derfor navngivet *Selandien*, latin for Sjælland. Selandien er i dag den internationale betegnelse for Midt Paleocæn. Lellinge Grønsand, som lagene kaldes, blev aflejret under en begyndende havstigning, som kortvarigt genskabte forbindelsen til Tethys Oceanet.

Lidt senere i Selandien skete en omfattende hævning af tidligere indsynkningsområder i Nordsøbassinets nordøstlige randzone i Kattegat, Skåne og andre steder. Store mængder af hævet skrivekridt blev eroderet og aflejret i det danske område som tykke mergellag, Kerteminde Mergel. Op til 50 % af materialet i Kerteminde Mergel kan bestå af omlejret skrivekridt.

Vanddybden over det danske område øgedes fortsat gennem resten af Midt og Sen Paleocæn samtidig med at Nordsøbassinets forbindelse til sydlige have atter blev afbrudt. Dybere, køligere og surt bundvand førte nu til, at mergellagene blev afløst af Æbelø Formationens kalkfattige lerlag. Da havet var dybest, måske 3–400 meter, blev der meget langsomt aflejret stærkt farvede og meget finkornede lerlag, som næsten kun består af lermineralet smectit. Det er Holmehus Formationen, hvis kulørte lag er udbredt i det meste af Nordsøen. Holmehus Formationen er et eksempel på, at den palæogene lagserie i Danmark har meget større lighed med den centrale Nordsø end med samtidige aflejringer i Tyskland, England og Belgien.

Den store øgning af vanddybden gennem Midt og Sen Paleocæn skyldes sandsynligvis indsynkning på grund af afkøling af dybtliggende jordlag i denne periode, hvor Den Islandske Hotspot var mindre aktiv.

I den seneste del af Paleocæn mindskedes vanddybden atter, sandsynligvis på grund af fornyet aktivitet fra Den Islandske Hotspot.

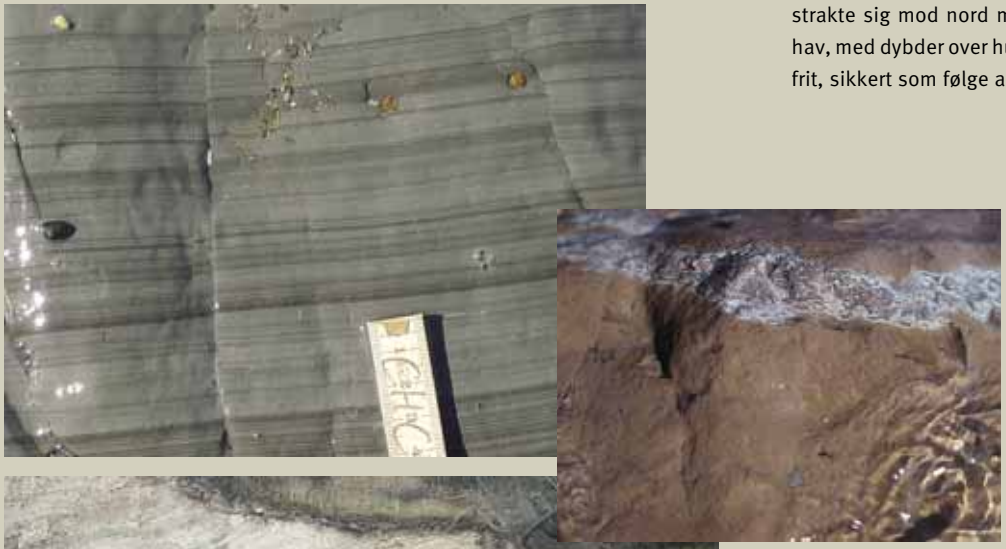
Global hedebølge, nordøstatlantisk vulkanisme og dannelsen af et nyt ocean

Ved Paleocæn–Eocæn-grænsen blev Jorden udsat for en voldsom hedebølge, som anslås at have varet ca. 170.000 år. Fra ækvator til polerne steg temperaturen mindst 5° C på under 10.000 år. En kraftig forskydning af kulstofisotoper viser, at en kolossal mængde kulstof beriget på den lette ^{12}C isotop, mindst 1.500 gigatons, blev tilført oceaner og atmosfære. Samtidig forsuredes verdenshavene som efter et gigantisk tilskud af kuldioxid. Kulstofudslippet under denne ekstraordinære klimabegivenhed var af samme størrelsesorden som den aktuelle og forventede udledning fra afbrænding af fossile brændsler. Begivenheden, som er blevet døbt PETM (Paleocene–Eocene Thermal Maximum), og dens virkninger for dyre- og planteliv er selvsagt genstand for intensiv udforskning. Den hidtil mest accepterede forklaring går ud på, at PETM-opvarmningen skyldes udslip af drivhusgasserne metan og kuldioxid stammende fra kulstoflagre, som mange steder findes nede i havbundens sedimenter i form af det isagtige stof metanhydrat. Denne forklaring forudsætter imidlertid en første opvarmning, som kunne starte smeltningen af metanhydrat fra havbunden. Nye undersøgelser tyder faktisk på, at opvarmningen begyndte få tusinde år før kulstofudslippet. Uanset hvad den udløsende årsag var, og om kulstoffet kom fra metanhydrat eller andre foreslåede kilder, er der er ingen tvivl om, at et gigantisk udslip af drivhusgas fandt sted og sandsynligvis har været afgørende for hedebølgens omfang.

PETM-begivenheden fik alvorlige følger for Jordens dyre- og planteliv. Blandt pattedyrene på landjorden skete meget store forandringer. Gamle pattedyrgrupper, som dominerede før PETM, gik nu stærkt tilbage eller forsvandt helt. I amerikanske aflejringer har man fundet de første arter af en række moderne grupper, bl.a. hovdyr (med de første heste) og egentlige primater (med abernes og menneskets forfædre) i PETM lagene. Disse nye grupper kom hurtigt til at dominere faunaerne. Dværgvækst var udbredt under PETM, muligvis en tilpasning til en atmosfære med forøget kuldioxid indhold.

I oceanerne fandt en masseuddøen af bundlevende dybvandsforaminiferer sted. Det var den mest omfattende uddøen siden midten af Kridttiden. I de kystnære havområder dominerede en enkelt alge, dinoflagellaten *Apectodinium*, som både tålte varme, brakvand og et øget næringsindhold.

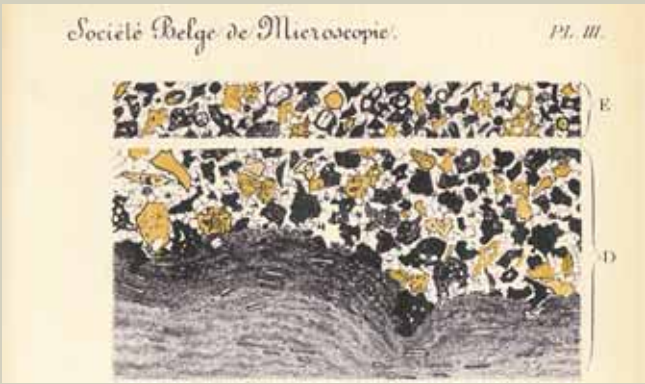
PETM er muligvis præcis samtidig med starten på en kortvarig, meget intensiv vulkansk episode i det dengang smalle bælte mellem Grønland og Nordvesteuropa. Det er derfor blevet foreslået, at den første opvarmning skyldes drivhusgasser, som blev udledt i forbindelse med vulkanismen. Vulkanismen resulterede i udstrømning af en kolossal serie af basaltiske lavaer med en samlet tykkelse på over 5 km i det centrale Østgrønland. Vulkanismen menes at stamme fra fornyet aktivitet fra Den Islandske Hotspot og var igen ledsaget af landhævninger. Nordsøen skrumpede ind til et søglignende indhav med en lang smal arm, som strakte sig mod nord mellem Grønland og Norge. I dette indelukkede hav, med dybder over hundrede meter, blev bundvandet fuldstændig iltfrit, sikkert som følge af tilstrømning af fersk flodvand, som hæmmede



Ved lavvande og stranden fri for sand kan man se fine detaljer i de palæogene sedimenter. Kontrasterende havmiljøer i begyndelsen af Eocæn illustreres af det fint lagdelte Stolleklint Ler (til venstre) aflejret i iltfrit havvand i en indskrumpet Nordsø med dårlig cirkulation. Til højre ses det lidt yngre Røsnæs Ler fra en stærkt udvidet Nordsø med god cirkulation. Gravegange og rødfarvning viser at havbunden var iltrig.

Fotos: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Ved Stolleklint (Fur) ses overgangen fra det sorte Stolleklint Ler, aflejret under den globale PETM-varmekrise, til det hvidlige moler, som er aflejret i perioden lige derefter. Ved pilen ses askelag nr. -33; et af de nederste af ca. 180 vulkanske askelag fra den nordøstatlantiske vulkanisme.



Kilde: W. Printz, 1885.

Askelagene blev identificeret af en belgisk diatoméforsker i 1885. Et udsnit af en af hans illustrationer viser et askelag (øverst) aflejret ovenpå et lag af moler med diatoméer (nederste del af D). Askepartiklerne består af skarpkantede korn fyldt med små gasblærer. Forstørret ca. 30 gange.

Foto: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Foldet moler fra molergraven ved Skarrehage på Nordmors. Den 'positive askeserie' ses som tynde sorte striber.

Et par af molerets og Stolleklint Lerets mange exceptionelle fossiler. Kæmpeskøjteløber, Palaeogerris grandis, *kropslængde 3,1 cm. Havskildpadde, danekræ nr. 567, 10,5 cm lang.*

Fotos: Henrik Madsen.

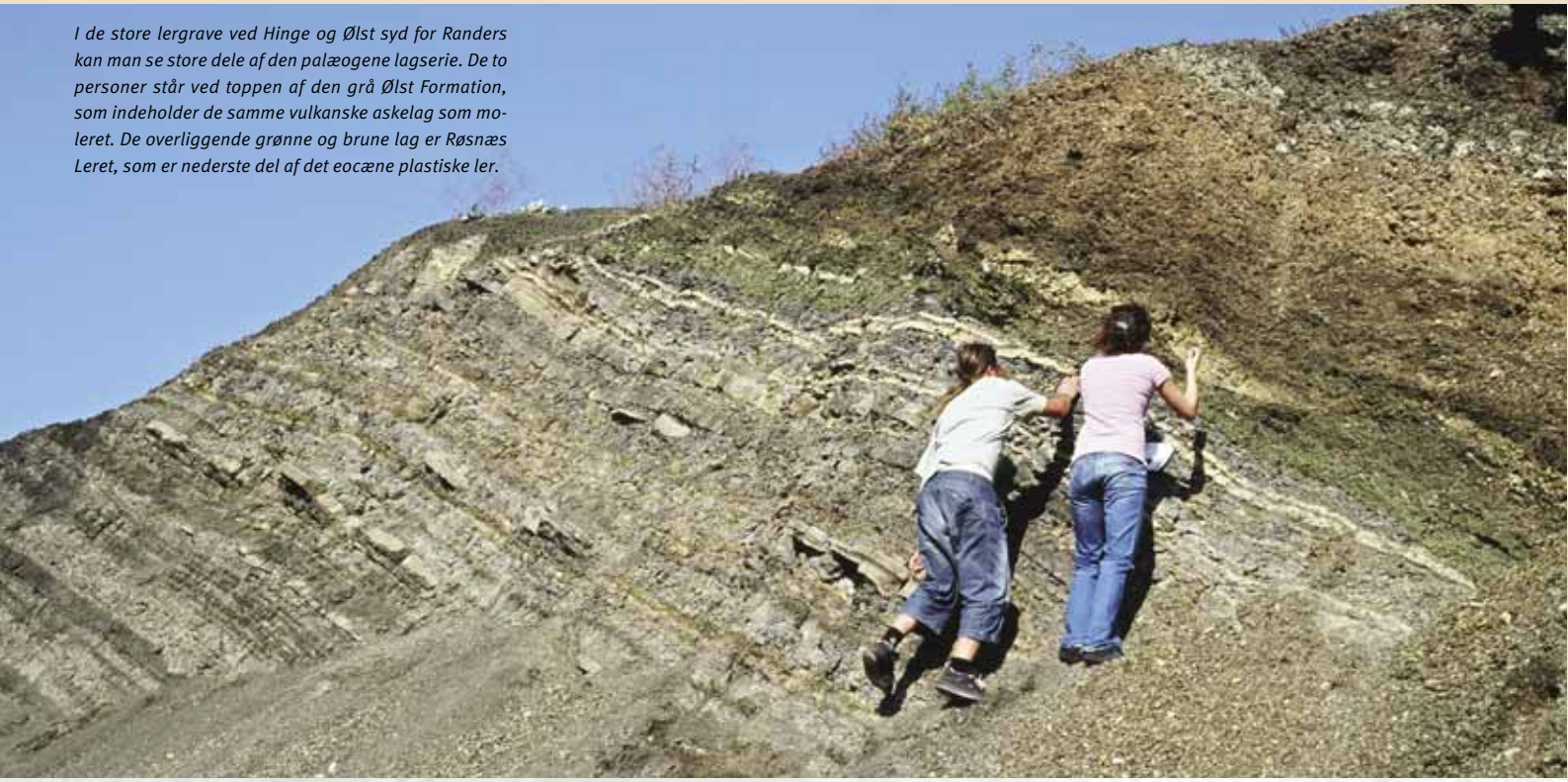
opblanding med det tungere, salte bundvand. Sedimenterne var derfor uforstyrrede af bunddyr og bølgebevægelser, og den oprindelige, meget fine lagdeling er derfor bevaret. Havet dækkede stadig dele af Danmark, og her blev det op til 14 meter tykke Stolleklint Ler med *Apectodinium* alger aflejret i løbet af PETM. Leret kan ses på Fur og Mors og i de store lergrave ved Ølst og Hinge nær Randers.

Kort tid efter PETM ændrede vulkanismen karakter og blev ekstremt eksplosiv, og der blev nu udspyet uhyre mængder vulkansk aske ved udbrud, som nok har været hyppige. Asken er basaltisk, af en oceanisk type, som også findes i Island. Noget af asken faldt ned i Tethys Oceanet 2000 km væk, i det nuværende Østrig. Det tykkeste af askelagene stammer fra et af de største vulkanske udbrud, som overhovedet er registreret i Jordens historie (i den højeste eksplosivitetsklasse, VEI 8, med over 1000 km^3 aske), og to andre udbrud skønnes at have produceret omkring 500 km^3 aske. Til sammenligning producerede det største udbrud i historisk tid, Tambora i Indonesien, 150 km^3 aske i 1815. Måske har støv og aerosol fra disse vulkaner bidraget til den globale afkøling, som indtraf efter PETM.

Askelagene er bedst kendt fra Danmark, og det er også her, de først blev opdaget. De udgør de øverste ca. 140 lag, den såkaldt *positive serie*, af i alt 179 nummererede askelag, som oprindelig blev mineralogisk beskrevet i en afhandling af den danske geolog Bøggild i 1918. De op til 20 cm tykke, sorte askelag ses allerbedst i Fur Formationens lyse moler i limfjordsområdet.

Samtidig med den vulkanske aktivitet indtraf en vigtig pladetektonisk begivenhed. En rift åbnede sig i området mellem Grønland på den nordamerikanske plade og Norge på den euroasiatiske plade. Basalt strømmede ud i riften, som udvidede sig med 4 cm om året, sank ned og blev begyndelsen på det nordøstlige Atlanterhav. Riften er nu en del af den midtatlantiske ryg, der går gennem Island. Vulkanerne lå på lavt vand i selve sprækkezonen, og måske var det nærkontakt mellem magma og vand, der var årsag til udbruddenes ekstremt eksplosive karakter.

Det lyse, lette moler med de vulkanske askelag er en såkaldt diatomit, som mest består af mikroskopiske kiselskeletter af diatomé-alger. Moleret findes kun i et smalt bælte syd og sydvest for Norge og kan ses i prægtige klinter i det vestlige limfjordsområde. Dannelsen af diatomit i dette bælte skyldes sandsynligvis fremherskende nordlige vinde, som førte til opstigende næringsrigt vand et stykke fra den norske kyst. De planktoniske diatomé-alger har kunnet formere sig så kraftigt i det næringsrige vand, at de blev bjergartsdannende. Moleret er rigt på velbevarede fossiler, især af fisk, insekter og fugle. Fuglene i moleret udgør en af verdens rigeste fossile fuglefaunaer. Faunaerne hvoraf i al fald fisk og insekter har et moderne præg er af særlig interesse, fordi de daterer sig til perioden lige efter PETM.



I de store lergrave ved Hinge og Ølst syd for Randers kan man se store dele af den palæogene lagserie. De to personer står ved toppen af den grå Ølst Formation, som indeholder de samme vulkanske askelag som moleret. De overliggende grønne og brune lag er Røsnæs Leret, som er nederste del af det eocæne plastiske ler.

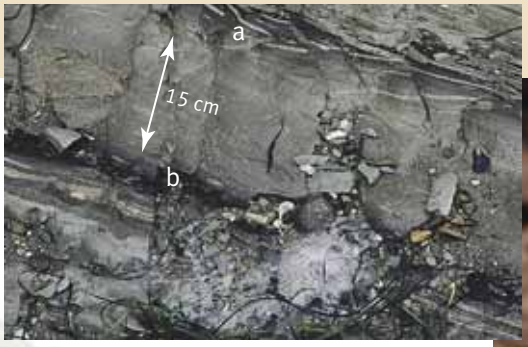
Foto: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Det finkornede plastiske ler fra Eocæn

Efter den begivenhedsrige første million år af Eocæn (se boks side 6 og 7) fortsatte riftzonen i det nordøstlige Atlanterhav med at synke ned, og aktiviteten i den underliggende hotspot synes nu også at være aftaget, med yderligere indsynkning som resultat.

Vanddybden i det danske område er muligvis øget til så meget som 600–1000 meter, måske det dybeste vand, som nogensinde har dækket Danmark. I det dybe hav blev næsten intet materiale tilført fra landområder, og der skete kun en langsom bundfældning af ekstremt finkornet, såkaldt **plastisk ler**. Miljøet har været omtrent det samme, som da Holmehusler blev aflejret i Sen Paleocæn. Det ofte stærkt farvede plastiske ler ligner aflejringer i den centrale Nordsø, og Danmark er det eneste sted, hvor disse dybvandssedimenter kan ses på land. Det globale havspejl var højt i det meste af Eocæn, og den totale mangel på sand i aflejringerne hænger sammen med den øgede afstand til landområder og de generelt rolige geologiske forhold i denne periode. Landene omkring Nordsøen har formentlig haft et ret jævnt terræn og var dækket af frodige tropiske–subtropiske skove, som hindrede erosion. Der fandtes sandsynligvis bælter af mangrove langs de sydlige kyster.

Plastisk ler fra lergraven ved Ølst. Leret er så finkornet at friske graveflader fremtræder skinnende blanke.
Foto: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.



Tynde sorte organiske lerlag (a og b) fra overgangen mellem Røsnæs Ler og Lillebælt Ler vidner om periodisk ilt-svind i Nordsøen for 50 mio. år siden. Det øverste sorte lag på fotoet er gennemkrydset af gravegange med lyst materiale. De er lavet efter at bundvandet igen var blevet iltholdigt og bunddyrene vendt tilbage.

Hajtænder er blandt de almindeligste fossiler i Lillebælt Leret. Tanden her er ca. 4 cm lang.

Fotos: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Det plastiske ler er rigt på lermineralet smectit, som er dannet ved kemisk nedbrydning af vulkansk aske og lava, der var vidt udbredt i det nordøstatlantiske område. Omdannelsen til smectit kan være sket både i havet og på land, og smectitten kan være transporteret over lange afstande med havstrømmene.

Flere gange i løbet af Eocæn skabte det høje vandspejl passage fra Nordsøen til varmere have mod syd, bl.a. gennem Den Engelske Kanal. Der er en tendens til, at lerlagene blev kalkholdige, når de sydlige forbindelser eksisterede, mens mikroorganismernes kalkskeletter blev opløst i koldere, surt bundvand, når disse forbindelser var afbrudt. Det dybe hav eksisterede gennem resten af Eocæn – i næsten 20 mio. år, og op til 200 meter plastisk ler blev aflejret i Danmark, hvilket i gennemsnit svarer til en aflejringsrate på mindre end 1 mm/100 år.

Den 6 km lange kyststrækning af Trelde Næs nord for Fredericia er Danmarks længste og mest imponerende skredkyst. De udskridende lermasser består af Lillebælt Ler, som udgør hovedmassen af det eocæne plastiske ler.

Et gådefuldt lag med ferskvandsplanter langt ude i havet

Fotos: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Vandbregnen Azolla *har et interessant sexliv. Ved den kønnede formering frigives store hunlige og små hanlige sporer til vandet, og der finder sporerne hinanden på en helt speciel måde. De hanlige sporer optræder i klumper, som er udstyret med ankerlignende kroge, der kan hægte sig fast i det filtagtige, yderste lag af den hunlige spore. Herefter sker befrugtningen.*

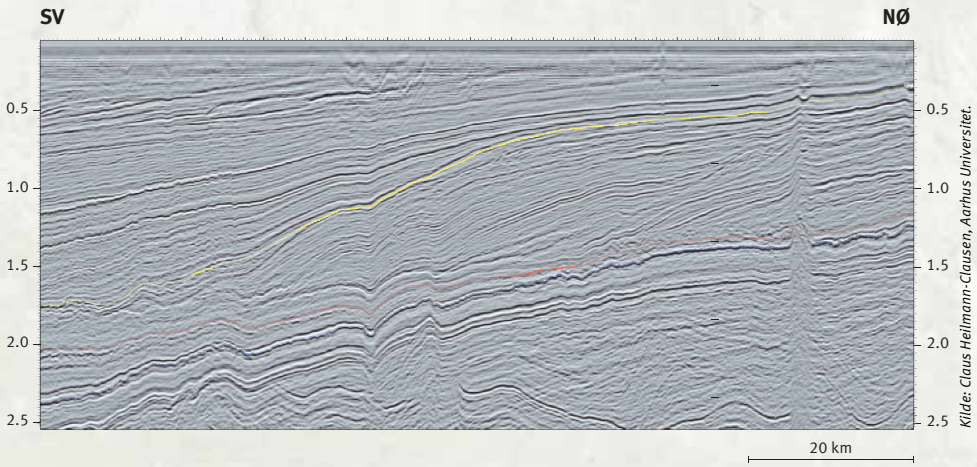
Mikrofossiler i et tyndt, 48 mio. år gammelt lag af det eocæne plastiske ler vidner om en mærkelig begivenhed i det Arktiske Ocean, tre tusinde kilometer væk. I Eocæn var Nordpolen og Jordens nordligste egne dækket af det Arktiske Ocean ligesom i dag, men i Eocæn var vandmassen i dette ocean næsten helt isoleret fra andre oceaner. Som følge af øget nedbør og et stort globalt fald i havspejlet, som yderligere afskar de snævre forbindelser til andre oceaner, blev hele polarhavet periodisk dækket af et lag af ferskvand i et geologisk kort tidsrum på omkring 1 mio. år.

Det ferske vand blev afsløret, da man fandt en kolossal mængde sporer af vandbregnen *Azolla* i den eneste dybe boring, som det er lykkedes at bore i det isdækkede ocean nær Nordpolen. Arter af *Azolla* er i dag vidt udbredt i tropiske og subtropiske områder, men de kan kun leve i ferskvand. *Azolla* er en af de hurtigst voksende organismer i verden. Det er en frit flydende vandplante der (ligesom andemad) hurtigt kan dække overfladen af søer og damme. Ved den kønnede formering frigives sporer (som kan bevares fossilt) til vandet. De eocæne *Azolla* sporer findes ikke kun i det isolerede Arktis, men også i talrige boringer fra havet mellem Grønland og Norge og helt ned til Nordsøen, hvor det dog er en anden art end i Arktis. Det sydligste sted, og samtidig det eneste sted, som i dag er på land, er Danmark. I de eocæne lag fra disse have findes *Azolla*-sporerne sammen med mikrofossiler af saltvandsalger, og de er ikke så hyppige som i Arktis. Derfor er det usandsynligt, at disse havområder også var dækket af ferskvand. Måske har planterne vokset i søer i de omkransende landområder, hvorfra deres sporer kan være ført til havs via floder. Dog ville man forvente, at floderne så også skulle have medbragt en mængde træstykker og andet plantemateriale, som så også burde findes i *Azolla*-laget, men det er ikke tilfældet! En god forklaring på det vidt udbredte fænomen savnes derfor stadig.

Afslutningen af drivhusklimaet og begyndelsen på det moderne kølehus-klima

Mod slutningen af Eocæn blev drivhusklimaet, som havde hersket på Jorden siden slutningen af Perm, afløst af den nutidige klimatype med kolde poler. Der dannedes nu iskapper, især på Antarktis, og det førte til et globalt havspejlsfald, som atter afbrød Nordsøens forbindelser til de sydlige have. Også i det danske område blev det væsentligt køligere i begyndelsen af den følgende Oligocæn periode, dog synes klimaet stadig at have været noget varmere end i dag. Kortvarige klimaændringer har lige siden ført til skiftende vækst og afsmeltning af de antarktiske iskapper, og til fald og stigninger af havspejlet.

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.



Kilde: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Seismisk profil, som viser lagserien ned til ca. 2,5 kilometers dybde langs den røde linje på kortet. Den kraftige blå reflektor viser toppen af kalk fra Kridt og Danien, den røde reflektor svarer til toppen af det eocæne plastiske ler og den gule reflektor er ca. ved toppen af Oligocæn. De Oligocæne lag er op til 1000 meter tykke og viser en kraftig øgning i materialetilførslen i forhold til Eocæn. Det er ligeledes tydeligt, at de Oligocæne lag byggede sig ud mod sydvest og at kilden for materialet lå mod nordøst. Dybdeskalaen er overhøjet for at tydeliggøre aflejringsmønsteret.

Ved Dykær i udkanten af Juelsminde kan man sommetider se den sorte fossilrige Brejning Formation fra et lavvandet hav i seneste Oligocæn. Leret hviler direkte på 20 mio. år ældre lag af Søvind Mergel fra et dybt hav i Midt Eocæn.

Fotos: Claus Heilmann-Clausen, Aarhus Universitet.

Snegl, Fusiturris selysii, *fra Brejning Formationen. Længde 64 mm.*

Et af de tykke Oligocæne mudderlag fra Midtjylland er Skive Leret, som kan ses i en lergrav ved Hesselbjerg syd for Skive. Der tages her prøver for at fastslå den nøjagtige alder.

Samtidig med klimaændringen ved overgangen fra Eocæn til Oligocæn hævedes lokale områder flere steder i Nordvesteuropa. Hævningerne skyldes pladetektoniske spændinger i forbindelse med dannelsen af Pyrenæerne. Det diskuteres blandt geologer, om den sydlige del af Norge også blev hævet på dette tidspunkt.

Klimaforandringen og den mulige norske hævning førte til en fuldstændig ændret situation i det danske område. Den hidtidige, ensartede aflejring af fint ler i Nordsøbassinet blev i Oligocæn afløst af periodiske udbygninger med tykke mudder- og sandlag i den nordøstlige del af Nordsøen, langs den norske sydkyst. Materialet stammer fra tørlagt havbund og fra det norske landområde, som nu var udsat for betydelig erosion. I de koldeste perioder blev hele det danske område sandsynligvis tørlagt og eroderet, mens der i de lidt varmere perioder blev aflejret tykke marine sedimenter i Midtjylland. Fra det meste af Tidlig Oligocæn, hvor det globale klima var koldest, findes næsten ingen danske aflejringer.

I Sen Oligocæn blev det globale klima igen midlertidigt varmere, og dele af Danmark blev atter oversvømmet. Flere til dels ganske tykke havaflejringer i Jylland og på Vestfyn stammer fra denne tid.

Her kan man læse mere: Naturen i Danmark, Geologien. Gyldendal 2006, samt: Danekræ, Danmarks bedste fossiler. Gyldendal 2008.

Neogen – Da Danmark steg op af havet

I Neogen (23–2,6 mio. år før nu) blev der land i det danske område. Det første landskab blev dannet af store deltaer, der byggede ud i Nordsøen fra de hævede bjerge i Norge og Sverige. Deltaerne var af samme type som Nildeltaet, der er karakteriseret ved en enkelt eller få flodkanaler og vidstrakte områder med odder og barriereøer med bagvedliggende laguner. Klimaet var varmt tempereret til subtropisk. I midten af perioden blev der atter hav i det danske område. Dette skete på trods af en klimaforværring og var derfor relateret til store pladetektoniske bevægelser. I den sidste del af perioden byggede deltaerne igen ud fra Skandinavien og denne gang blev hele det danske område, inklusiv Nordsøen, til land. De første sikre beviser på gletsjeraktivitet i Skandinavien ses i lag, der er 2,7 mio. år gamle.

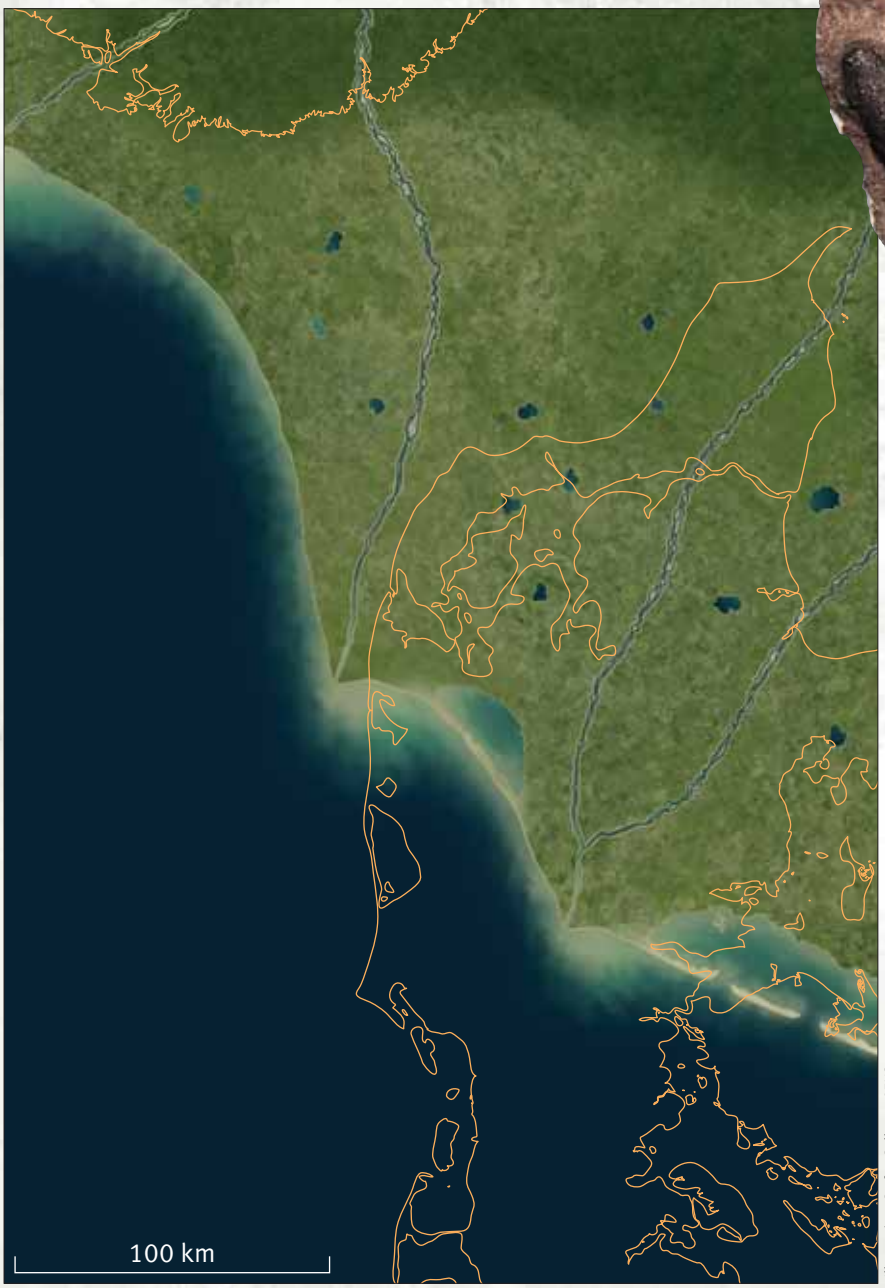
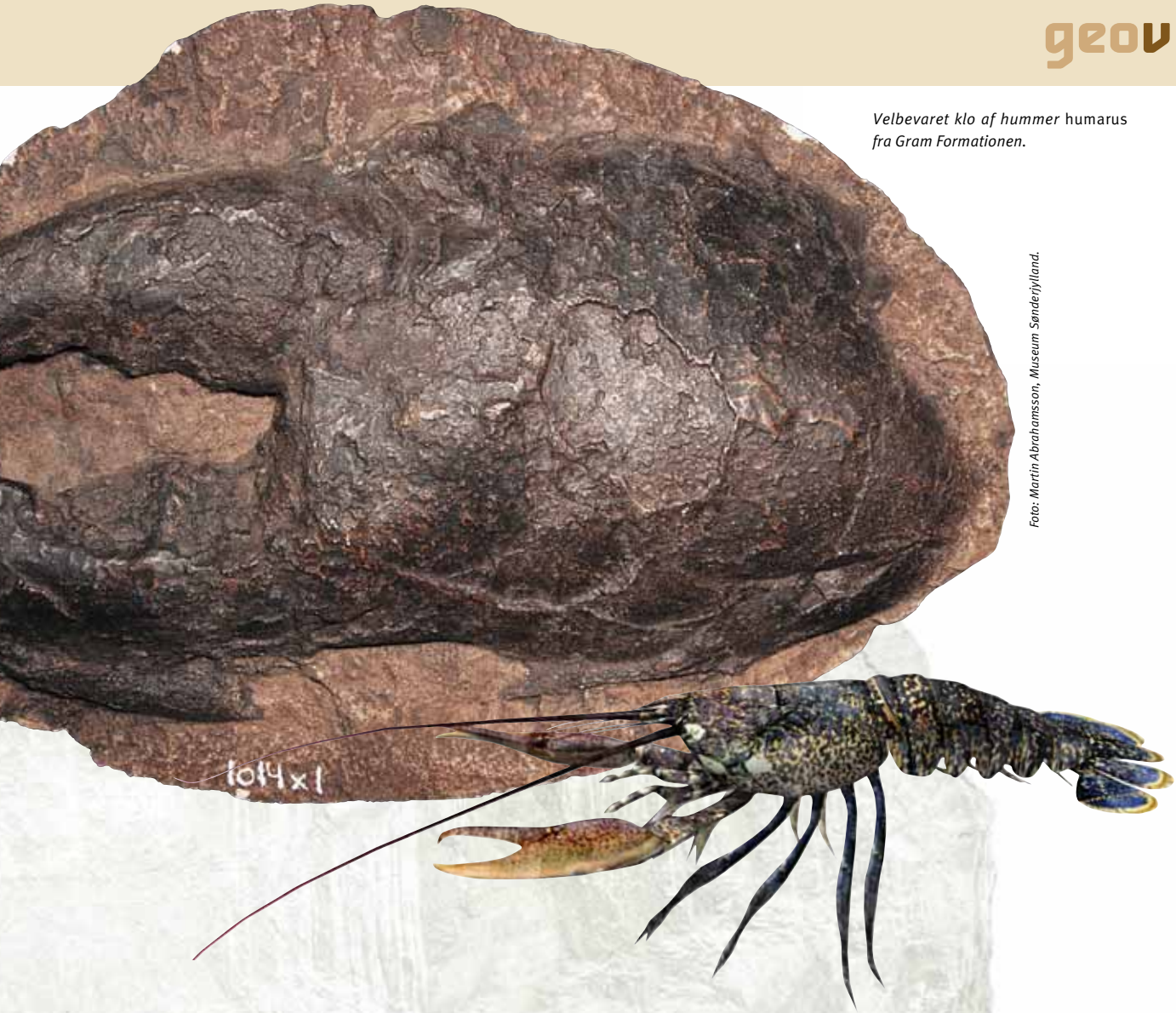


Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

Kortet viser en palæogeografisk rekonstruktion af den østlige Nordsø for 22 mio. år siden. Bemærk at kystlinjen var domineret af store deltaer med odde- og barrieresystemer øst for de store flodmundinger. På side 16 og 17 findes en detaljeret oversigt over former og sedimentstrukturer omkring et bølgedomineret delta. Danmarks nuværende udseende er vist med gult.

Overgangen mellem Palæogen og Neogen var en periode med markante jordskorpebevægelser. Det tryk, som påvirkede vores område pga. dannelsen af Alperne og åbningen af Atlanterhavet, fik randområderne af det Fennoskandiske Skjold (Sverige og Norge) til at hæve sig. Klimaet forblev varmt-tempereret til subtropisk, dog var der på overgangen mellem de to perioder en markant, men kortvarig istid, som fik havspejlet i verdenshavene til at falde. Derfor er der normalt en meget markant grænse, der adskiller lagene fra de to perioder. På land i Danmark kender vi kun til miocæne aflejringer fra Neogen Perioden, mens pliocæne aflejringer kun findes i den vestlige del af Nordsøen. Den miocæne lagserie består af sandede delta- og kystsletteaflejringer vekslende med lerede havaflejringer dannet på 50 til 100 meters vanddybde. De klimatiske svingninger, der foregik op gennem Miocæn, samt jordskorpe-bevægelser fremprovokeret af Alpedannelsen og åbningen af Nordatlanten, var stærkt styrende for udviklingen af hele den neogene lagserie i Danmark.

De miocæne deltaer, der udgør grundvandsmagasiner i store dele af Jylland, blev dannet for mellem 22 og 15 mio. år siden. Dengang blev bjergene i Norge og Sverige gradvist nedbrudt og materialer bestående af grus, sand og ler blev transporteret mod syd via store floder til Nordsøen. I floderne aflejredes store, grushol-



Velbevaret klo af hummer humarus *fra Gram Formationen.*

Foto: Martin Abrahamsson, Museum Sønderjylland.

dige sandlegemer i forbindelse med vandrende flodbarrer (se barren i floden på side 16–17). Imellem floderne, på flodsletterne, aflejredes mere lerholdige sedimenter, ofte med et meget højt indhold af organisk materiale. I visse tilfælde blev der dannet brunkul. Ud for flodudmundingerne blev mægtige sandlegemer aflejret i store deltaer. Efterhånden som der blev tilført mere materiale fra Norge og Sverige, vandrede floddeltaerne mod syd og dannede land i det vi i dag kender som Danmark. Under denne vandring af kysten mod syd, blev der aflejret skiftende sand og ler. Sandet blev afsat i henholdsvis deltaer og oddekomplekser. Leret blev overvejende afsat imellem deltaerne og på dybere vand foran dem, samt i laguner bag oddekomplekserne. Under vandringen skiftede deltaer retning fra tid til anden og derfor blev der aflejret ler imellem de enkelte deltaer. Dette medførte, at lagene blev opbygget i et meget komplekst mønster af sand og ler.

I Tidlig Miocæn var der tre perioder med deltaudbygning. Den miocæne lagpakke består derfor af tre markante enheder med sand, der til daglig kaldes henholdsvis Billund, Bastrup og Odderup formationerne. Imellem sandlagene ligger lerlag af forskellig tykkelse. Lerlagene er dog generelt gennemgående, så de danner barrierer mellem sandenhederne. Lerlagene blev aflejret i havet på relativt dybt vand i forbindelse med klimatiske ændringer, der fik havspejlet til at stige og derved oversvømme deltasletterne. Disse lerlag benævnes Vejle Fjord, Klintinghoved og Arnum formationerne.

I Mellem Miocæn, for ca. 15 mio. år siden, trængte havet langt ind over det område vi i dag kender som Danmark. Dette skete i forbindelse med en markant ændring af klimaet, med højere temperaturer og samtidig begyndte Nordsø-området at synke ind. I forbindelse med drukningen af området, blev der aflejret meget finkornede sedimenter, som er specielt udbredte i Syd- og Vestjylland. Disse lag kaldes Hodde og Ørnhøj formationerne. I slutningen af Mellem Miocæn skete der en markant forværring af klimaet. Dette burde have medført at Danmark igen blev til et landområde. Men pga. kraftig indsynkning steg havet stadigt og den største oversvømmelse skete i den sene del af Mellem Miocæn med aflejring af den glaukonitholdige Ørnhøj Formation.

I Sen Miocæn var landet præget af marine forhold med aflejring af ler, Gram Formationen. I havet svømmede nogle af de største hajer rundt, man har set på jorden. Talrige fund af hvalskeletter og andre fossiler vidner om en rig fauna i det såkaldte 'Gram Hav'. På trods af det forværrede klima, der prægede Danmark i det meste af Sen Miocæn, var området karakteriseret ved marine aflejringsforhold. Der blev formodentligt aflejret flere 100 meter sedimenter i det område vi i dag kender som Danmark.

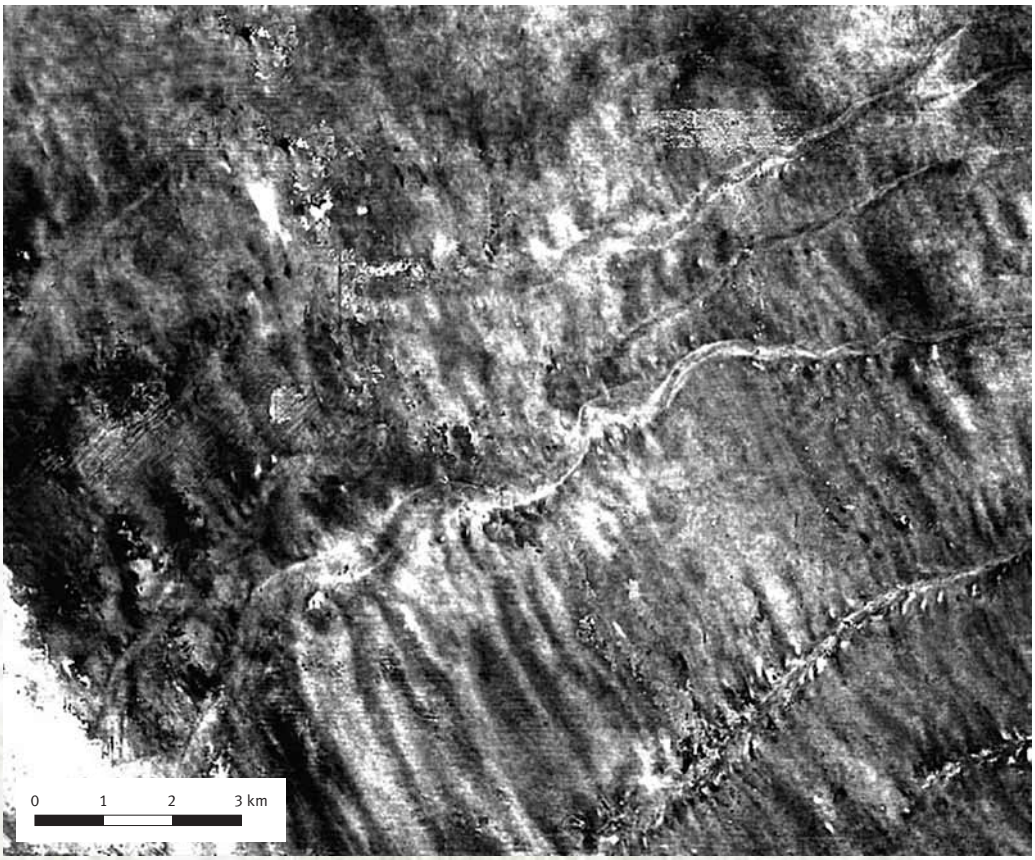
Erik Skovbjerg Rasmussen

Seniorforsker, GEUS
esr@geus.dk

Foto: Martin Abrahamsson, Museum Sønderjylland.

Hvalkranie fundet i Gram Lergrav. Bemærk hvor velbevaret fossilet er, selv om det har ligget i Gram Leret i 10 mio. år. Kraniet stammer fra hvalarten Uranocetus.

De øverste øvre miocæne og pliocæne lag findes ikke på land i Danmark, men ude i Nordsøen gemmer der sig lag fra denne tid. Udviklingen af disse lag kender vi kun fra seismiske undersøgelser og de boringer, der er lavet i forbindelse med olieefterforskning. Generelt består denne lagserie af delta- og kystslette-sedimenter, der viser en gradvis vandring mod sydvest. Både i seneste Sen Miocæn og Pliocæn nåede kystlinien langt ud i Nordsøen, helt ud til grænsen til engelsk sokkelområde. Da deltaerne lå helt ude i Nordsøen, blev der aflejret flod-sedimenter hen over Danmark. Beregninger viser, at der blev pålejret op til 400 meter sedimenter hen over Midtjylland.



Grafik: Lone Kildal Møller, Skanderborg Kommune.

Seismisk billede af undergrunden i Nordsøen. Eksemplet er fra ca. 1 km's dybde. Bemærk hvor tydeligt man kan se dalsystemer med floder i bunden. Disse dale blev dannet i forbindelse med en istid, der er dokumenteret på den sydlige halvkugle inden for tidsrummet 5,9–5,6 mio. år siden.

For 2 til 3 mio. år siden skete der en hævning af det skandinaviske område og hele den miocæne lagpakke blev vippet således at lagene i dag hælder mod vest og sydvest. I forbindelse med flere frem- og tilbagerykninger af gletsjere i Kvartær-tiden, blev flere hundrede meter af lagpakken fjernet og aflejret i den centrale Nordsø. I det område vi i dag kender som Danmark, aflejredes morænesedimenter og smeltevandsafsætninger. Det sidstnævnte specielt i Vestjylland. Under fremrykningen af gletsjerne i Jylland blev saltet i den dybere del af undergrunden påvirket og der blev dannet saltstrukturer, således at de miocæne lag ligger meget ujævnt i Øst- og Midtjylland. Derfor er forskellige enheder i den miocæne lagserie i kontakt med de kvartære lag forskellige steder i den østlige og nordlige del af Jylland. Selv de dybeste deltaaflejringer, som for eksempel ved Billund og Sunds, hvor de ligger i 200 meters dybde, er blottede flere steder i Nord- og Østjylland, eksempelvis i grusgravene syd for Silkeborg.

Eksempler på delta-miljøer i Jylland

I Jylland kan man se forskellige typer af delta-miljøer, hvis man kører langs kysten eller besøger grusgrave. På blokdiagrammet side 16 og 17 ses en rekonstruktion af området omkring et delta for 22 mio. år siden.

Skrålejret sand aflejret i en stor sandbarre i et flettet flodsystem. Denne aflejringstype er særlig udbredt i Indien foran Himalaya-bjergkæden og i det østlige Indien.

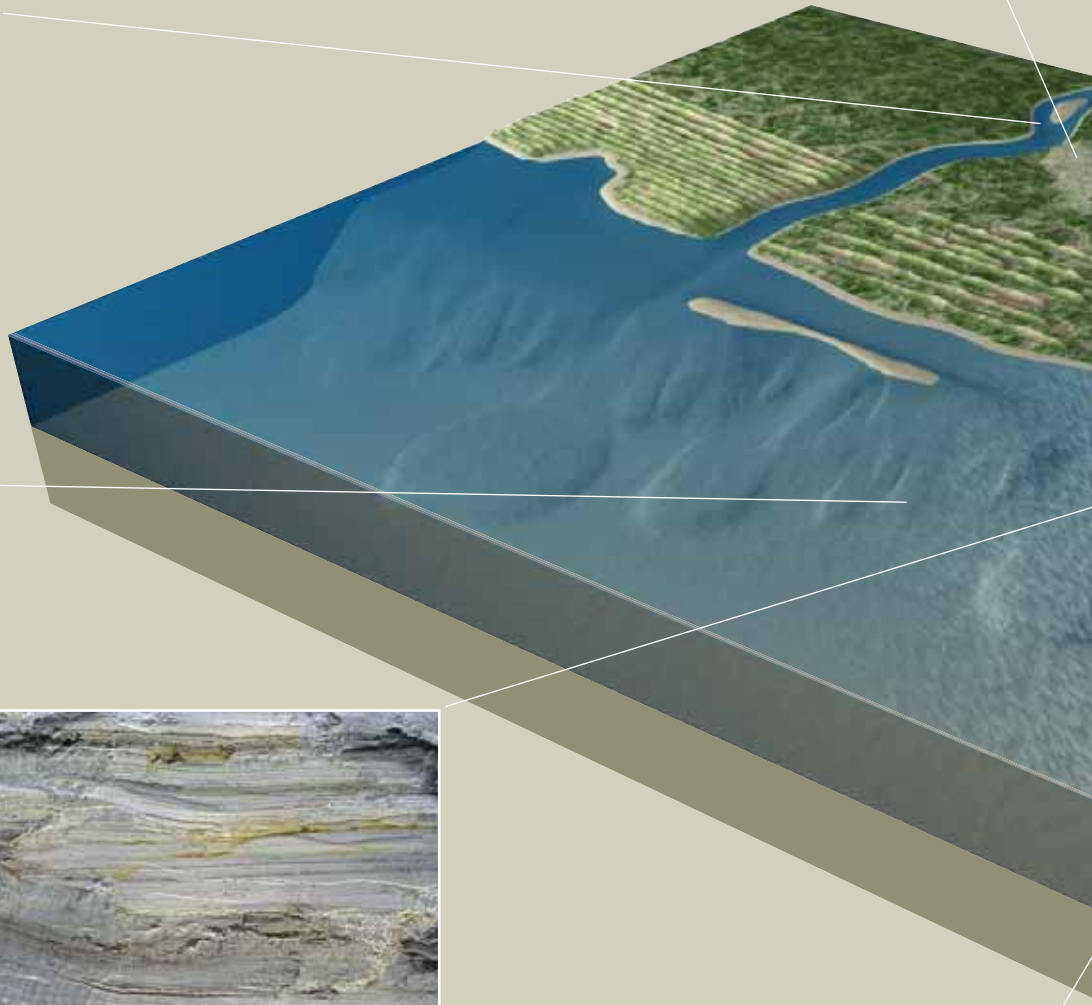
Foto: Erik Skovbjerg Rasmussen, GEUS.

Former og sedimentstrukturer omkring et bølgedomineret delta

Deltaet formes dels af sedimenttilførsel fra floden, dels af bølger og de bølgeskabte strømme, der løber langs kysten. Da den fremherskende vindretning er vestlig på vore breddegrader, er det også fra denne retning, at hovedparten af bølgerne kommer. Ved selve flodudmundingen akkumuleres store sandmængder. En del af dette sand transporteres nedstrøms og danner oddesystemer med bagvedliggende laguner. Ved kyster med tidevandspåvirkning vil man finde tidevandsrender. Sandbarrer dannet ved flodudmundingen kan også vandre søværts og skride ned ad deltaplatformen. På bølgedominerede deltaer skrider sandet dog sjældent ned på bassin-gulvet, men akkumuleres på selve deltaskråningen.

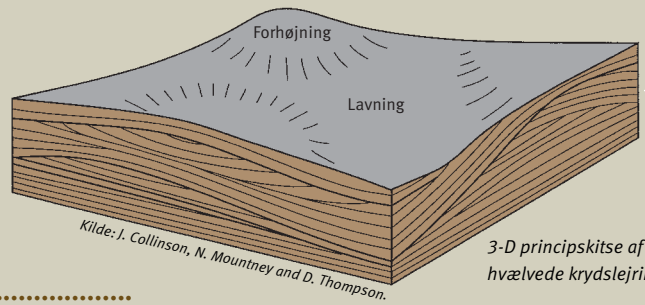
Sandlag dannet på flodsletten i forbindelse med flodbølge.

Skrålejret sand dannet af strøm i en flod.



Sand og ler aflejret på soklen.

Hvælvede krydslejringer (dannet på lavt vand).



Kilde: J. Collinson, N. Mountney and D. Thompson.

3-D principskitse af hvælvede krydslejringer.

Hvælvede krydslejringer med lerlag (dannet på større vanddybde).

Hældende sandlag skabt ved tilvækst af odden.

Ler dannet i lagunen. Sandlinser og sandlag blev dannet dels ved storm, dels af tidevand. Sandlinserne er de grå pletter og striber i den sorte masse.

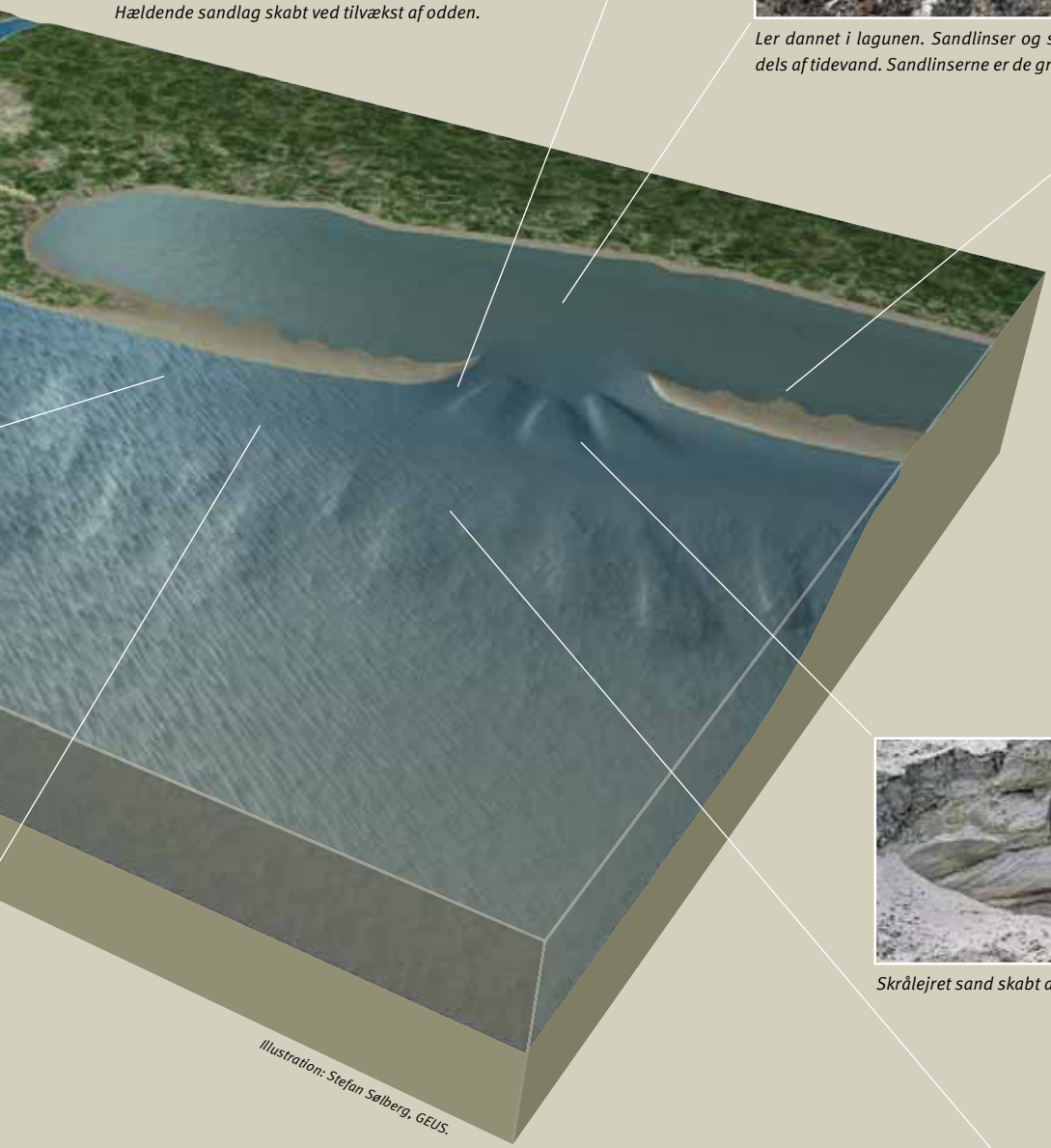


Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

Sandlag dannet ved gennembrud af barriereøen.

Fotos: Erik Skovbjerg Rasmussen, GEUS.

Skrålejret sand skabt af ebbestrøm.

Rytmiske lag dannet af tidevand. Lerlagene (de mørke lag) blev aflejret ved strømstille.

Skrålejret sand med lerdraperinger. Denne form for aflejring er karakteristisk for aflejringsmiljøer præget af tidevand.

Foto: Erik Skovbjerg Rasmussen, GEUS.

Floderne syd for Silkeborg

I grusgrave syd for Silkeborg, Addit og Voervadsbro, ses smukke eksempler på flettede floder. De sedimenter, som aflejredes i de flettede floder, der løb ned gennem Jylland for 22 mio. år siden, blev dannet af forskellige bundformer (sandbarrer), som vandrede ned ad floden pga. strømmen. Nogle af de mest markante strukturer hedder trugkrydslejringer. Disse blev dannet i kanalerne mellem de større sandbarrer midt i floden. Man kan derfor måle, hvordan hovedstrømmen løb under aflejringen af sedimenterne. I området syd for Silkeborg, løb floderne generelt mod syd. De større barrer midt i floden vandrede til gen-gæld lidt sidelæns. Det ses ved de store skrålejringer, op til 4 meter høje, der er blottet i grusgravene. Disse viser en vandring mod sydvest. Ud fra højden af de forskellige skrålejringer, som blev dannet i selve flodkanalen, og af de store barrer, kan man rekonstruere vanddybden i flodkanalerne, der har været mellem 5 og 6 meter. Ved Salten-profilet kan man se sandede flodaflejringer, men her er desuden blottet lerede lag og brunkul, afsat på flodsletterne imellem kanalerne.

Vadehavet ved Vejle Fjord

Kører man rundt langs kysten ved Vejle Fjord vil man bevæge sig rundt i et 22 mio. år gammelt vadehav. I den nordlige og sydvestlige del ser man ofte mørke lerlag med indslag af sandlag. Enkelte steder, ved Juelsminde, ses

Tidevandssedimenter fra Jensgård ved Snaptun. Bemærk den rytmiske lagdeling.

Foto: Erik Skovbjerg Rasmussen, GEUS.

Sandlag dannet i forbindelse med en odde ved Hvidbjerg Klint. Hvert enkelt sandlag blev dannet under en storm.
Foto: Karen Dybkjær, GEUS.

Fotos: Erik Skovbjerg Rasmussen, GEUS.

Eksempler på hvælvede krydslejringer (stormsandslag). I eksemplet til venstre ses hvælvede krydslejringer at være indlejret i ler. Dette er typisk på vanddybder over 15 meter. Eksemplet til højre viser stakkede stormsandslag uden mellemliggende lerlag. Disse er almindelige på lavere vanddybder.

også rytmiske lag. Lerlagene blev dannet i en lagune bag ved kysten og de rytmiske lag blev aflejret på en tidevandsflade på indersiden af lagunen. De tykkere sandlag, som specielt ses ved Skansebakke (havnen ved Brejning), repræsenterer sand, der blev skyllet ind i lagunen under storme. Barriere-øen eller odden, som adskilte lagunen fra havet, er blottet ved Hvidbjerg. Her ses 26 meter hvidt sand bestående af stakkede stormsandslag. De enkelte stormsandslag er karakteriseret ved at have en skarp undergrænse. Selve stormsandslaget er opbygget af homogent til svagt lamineret sand, der øverst består af skrålejret sand og ler dannet af bølgebevægelser. Vest for Hvidbjerg, ved Pjedsted, ses en tidevandsrende med krydslejerede sandbarrer. De skrå sandlag hælder mod sydvest og dermed indikerer de, at ebbestrømmen var dominerende her. Lerdraperingerne på sandlagene repræsenterer aflejring under rolige forhold imellem flod og ebbe.

Strandplanslag ved Lillebælt

Under den gamle Lillebæltsbro, ved Børup, Hagenør og Rønshoved findes nogle af de mest spektakulære lag, som kan ses i Danmark. De lag, som er blottet her, viser sedimenter, der er aflejret i forbindelse med storme for 22 mio. år siden. Stormsandslagene kaldes for hvælvede krydslejringer. Ved at studere disse lag detaljeret, kan man få en idé om hvor dybt havet var. Er der lerlag imellem hvert stormsandslag, ved man fra recente undersøgelser at vanddybden er ca. 15 meter. Så består lagfølgen af stakkede, hvælvede krydslejringer, har vanddybden sandsynligvis været mindre end 15 m. Ændrer lagene sig fra hvælvede krydslejringer til skrålejret sand er vi på det indre standplan med vanddybder op til 3–4 meter. Det er der, hvor der er revler og trug (bla. hestehuller).

Forfatterne på feltarbejde ved Vildsund.

Foto: Karen Dybkjær, GEUS.

PP DANMARK
Magasinpost UMM
ID-nr. 46439

GEOCENTER DANMARK

Geocenter Danmark

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Geologisk Institut ved Aarhus Universitet samt Institut for Geografi og Geologi og Geologisk Museum begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

Udgiver

Geocenter Danmark.

Redaktion

Geoviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.
Geoviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Finn Preben Johansen, tlf.: 38 14 29 31, e-mail: fpj@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

ISSN 1604-6935 (papir)
ISSN 1604-8172 (elektronisk)

NORDISK MILJØMÆRKNING
TRYKSAG
541 176

Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.
Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.
Forsidebillede: Forstenet hvalkranie.
Foto: Martin Abrahamsson.
Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.
Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)
Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 38 14 20 00
E-mail: geus@geus.dk

GEUS

Institut for Geografi og Geologi
Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 35 32 25 00
E-mail: geo@geo.ku.dk

Geologisk Museum
Øster Voldgade 5-7
1350 København K
Tlf: 35 32 23 45
E-mail: rcp@snm.ku.dk

Geologisk Institut
Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670
8000 Århus C
Tlf: 89 42 94 00
E-mail: geologi@au.dk

PortoService, Postboks 9490, 9490 Pandrup