

2016

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 01

En krise i livets historie



En krise i livets historie – masseuddøen og samtidig vulkanisme ved Trias–Jura-grænsen

I løbet af de sidste 540 mio. år har livet på Jorden været ramt af mange kriser, både store og små. Seks meget store kriser er forbundet med masseuddøen, hvor mange organismer blev udslettet og livet på Jorden ændrede sig. Lige nu lever vi i en tid, hvor vi mennesker påvirker miljøet omkring os rigtig meget. I den industrielle tidsalder er mange dyr og planter blevet udslettet og mange forskere mener, at vores aktiviteter er ved at føre til den syvende masseuddøen. Afbrænding af fossile brændstoffer som kul og olie og andre udslip af gasser har siden den industrielle revolution tilført så store mængder af drivhusgasser til atmosfæren, at kuldioxid-indholdet er mangedoblet og gennemsnitstemperaturen på jordoverfladen er øget med 0,8 °C over de sidste 100 år.

Vulkaner er på en måde naturens egne miljø-skurke, der afgiver store mængder gasser, herunder drivhusgasser, til atmosfæren. Ved at studere de store kriser i livets historie, hvor massiv vulkanisme menes at være den primære årsag, kan vi få en fornemmelse af hvordan de oldgamle økosystemer reagerede igennem sådanne kriser. Vi kan derved se, hvor galt det kan gå, men vi kan også lære noget om, hvordan plante- og dyrelivet kommer sig efter en sådan, global krise.

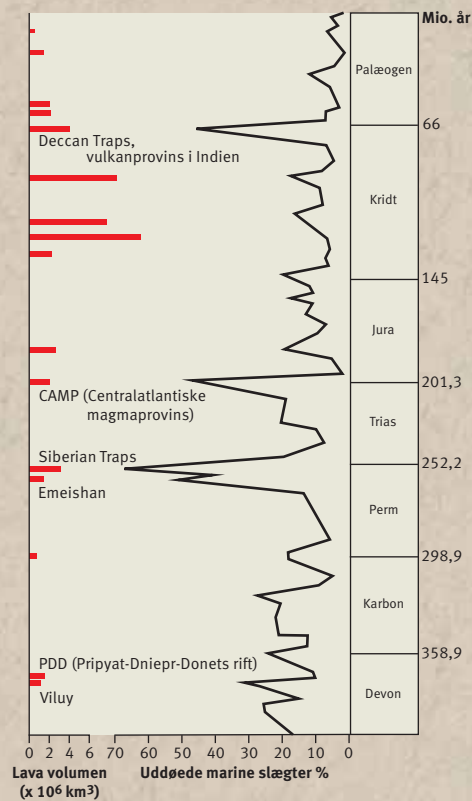
En masseuddøen, hvis primære årsag sandsynligvis var voldsom vulkansk aktivitet, fandt sted i slutningen af Trias perioden for ca. 201,5 mio. år siden. Den mest udbredte forklaring er, at kuldioxid fra vulkanerne førte til en global opvarmning. Denne skabte problemer for kalkskallede organismer i havene på grund af forsurening af de øverste lag i vandsøjlen, og samtidig svækkede det varme klima dyrelivet og plantevæksten på land. I den danske og svenske undergrund findes sedimentære lag fra grænsen mellem Trias- og Jura-perioderne, som er særligt egnede til at vise, hvordan økosystemerne på land og i relativt kystnære havområder reagerede under og efter denne krise i en region, som var domineret af aflejring af sand, silt og ler. Dette nummer af Geoviden fokuserer på Trias–Jura-lagserien på Sjælland og i Skåne. Vores undersøgelser viser en række hændelser, som indikerer en kompleks sammenhæng mellem ændringerne i atmosfæren og især de ændringer, der sker på land.

Gennem millioner af år er livet på Jorden blevet ramt af mange kriser. Man regner med at seks store kriser har resulteret i masseuddøen inden for de seneste 540 mio. år: 1) ved slutningen af Ordovicium for 443 mio. år siden (ikke med på figur 1), 2) i sen Devon, 3) i sen mellemste Perm (Capitanien), 4) ved slutningen af Perm, 5) ved slutningen af Trias, og 6) ved Kridt–Palæogen grænsen, se figur 1, og tabel 1 og 2. En masseuddøen kendetegnes ved at flertallet af de eksisterende arter og/eller slægter uddør inden for geologisk set kort tid, og at markant flere arter og/eller slægter uddør end den normale baggrundsuddøen af enkelte arter eller slægter.

Arter og slægter

I det moderne biologiske klassifikationssystem grupperes alle de forskellige organismer, der lever på Jorden i et hierarki, hvor man nederst finder arter, slægter og familier. Vi mennesker tilhører fx arten *Homo sapiens*, under slægten *Homo*, der tilhører familien *Hominidae* (menneskeaber). På samme måde er fossiler opdelt i arter, slægter og familier, ud fra hvordan vi tolker deres slægtskab. Slægtskabet imellem uddøde organismer er vanskeligt at fastslå. Hos flere mio. år gamle fossiler må man nøjes med at antage deres slægtskab ud fra (især) fællestræk i udseende.

Der er stor forskel på, om størrelsen af en masseuddøen beregnes på basis af arter, slægter eller familier. Hvis fx 95 % af arterne inden for en slægt uddør, vil det være en markant masseuddøen, beregnet på artsniveau. Men såfremt en enkelt art inden for den aktuelle slægt overlever, overlever slægten jo, og slægten vil derfor ikke anses for at være uddød.



Figur 1. Masseuddøen (sort graf) og store vulkanprovinser (røde søjler) fra Devonperioden og fremad. Jo flere slægter der uddøde i et givet tidsrum, jo større top. De seks tidsrum med masseuddøen var relativt kortvarige og flere af dem viser sammenfald med store vulkanprovinser, se figur 2. CAMP-vulkanprovinserne er vist på figur 3. 'Trap': gammelt ord for en serie af lavabænke = trapper.

Illustration efter Bond & Wignall (2014).

Sofie Lindström
Seniorforsker, GEUS
sli@geus.dk

Karen Dybkjær
Seniorforsker, GEUS
kd@geus.dk

Hans Peter Nytoft
Seniorrådgiver, GEUS
hpn@geus.dk

Christian J. Bjerrum
Lektor, IGN
cjb@ign.ku.dk

Nicolas R. Thibault
Lektor, IGN
nt@ign.ku.dk

Katrine H. Hansen
PhD-studerende, IGN
khh@ign.ku.dk

Gunver K. Pedersen
Seniorforsker, GEUS
gkp@geus.dk

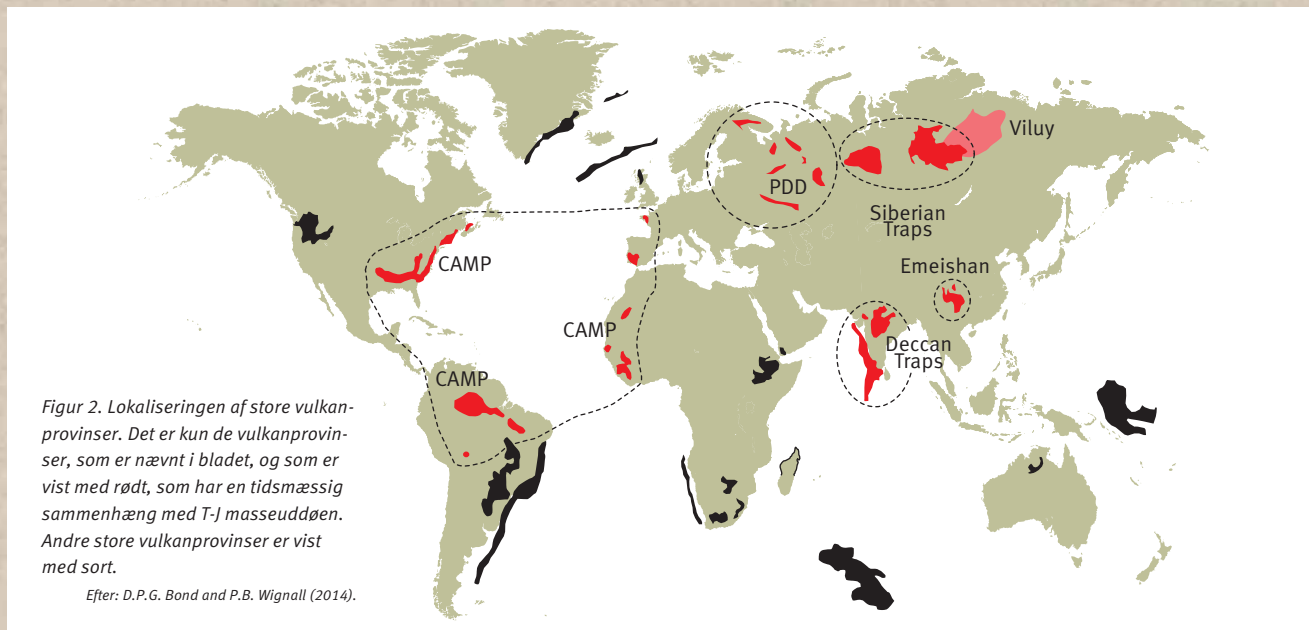
Rikke Weibel
Seniorforsker, GEUS
rwh@geus.dk

Lars Henrik Nielsen
Statsgeolog, GEUS
lhn@geus.dk

Christoph Korte
Lektor, IGN
korte@ign.ku.dk

Tod E. Waight
Professor, IGN
todw@ign.ku.dk

Christian Tegner
Professor, GI
christian.tegner@geo.au.dk



Figur 2. Lokaliseringen af store vulkanprovinser. Det er kun de vulkanprovinser, som er nævnt i bladet, og som er vist med rødt, som har en tidsmæssig sammenhæng med T-J masseuddøen. Andre store vulkanprovinser er vist med sort.

Efter: D.P.G. Bond and P.B. Wignall (2014).

Kategorier for økologisk påvirkning		Rangordning af de seks største masseuddøener							
Økologisk påvirkning	Økologisk effekt	Rangordning	Masseuddøen	% ¹	% ²	% ³	Økologisk påvirkning	Årsager	Bidragende faktorer
Kategori I	Det eksisterende økosystem kollapse og bliver erstattet af et nyt økosystem efter krisen	1	Slut Perm	-58	-57	-83	1	Siberian Traps vulkanisme	
		2	Slut Ordovicium	-49	-43	-52	6	Istid	
Kategori II	Det eksisterende økosystem bliver forstyrret, men kommer sig igen og er ikke erstattet af et nyt efter krisen	3	Capitanien (mellem Perm)	-47	-36	-25	5	Emeishan vulkanisme	
		4	Slut Trias	-40	-33	-73	3	CAMP vulkanisme	
Underkategori IIa	Forstyrrelsen forårsager permanent tab af vigtige komponenter i økosystemet	5	Slut Kridt	-39	-34	-40	2	Chixculub Meteorit nedslag	Deccan Traps vulkanisme
Underkategori IIb	Forstyrrelsen er midlertidig, økosystemet omorganiseres efter krisen	6	Frasnien-Fammenien (Sen Devon)	-35	-22	—	4	Ocean iltvind /iltmangel	Viluy Traps vulkanisme PDD system vulkanisme

Tabel 1. Økologiske impact kategorier.

Efter: McGee et al. 2004.

Tabel 2. Rangordning af de seks største masseuddøener, baseret på tre forskellige beregninger af hvor mange procent af havets slægter der uddøde (¹Sepkoski, 1996; ²Bambach et al., 2004; ³McGhee et al., 2013). Endvidere ses en afvigende rangordning efter økologisk påvirkning.

Hvor voldsom en masseuddøen er, vurderes ikke kun ud fra tabet af organismer, men også ud fra de økologiske ændringer under en sådan krise. Den økologiske 'impact factor' vurderes efter hvor store ændringer, der kan registreres i de forskellige økosystemer, når krisen er overvundet, se tabel 1 og 2.

Nutidige økosystemer kan nøje karakteriseres i modsætning til geologiske eksempler, hvor vores viden er begrænset til de dele af dyr og planter, som bevares som fossiler, eksempelvis kalkskaller af muslinger, pollen og sporer fra planter, knogler eller mere komplette skeletter o.s.v. Kun sjældent 'fast-fryses' dyr ved deres død, som det kendes fra

insekter i ravklumper eller mammutter i permafrost. Meget store dele af moderne økosystemer består af organismer, som ikke bevares som fossiler, idet deres væv bliver nedbrudt og omsat. Deres aktiviteter kan være bevaret i sedimentet som sporfossiler, men vi kender kun sjældent den organisme, som dannede sporfossilet.

Figur 3. **A:** Kuhjoch-sektionen, Østrig, litostratigrafi, $\delta^{13}C$ -kurve, samt første- og sidste optræden af vigtige fossiler. **B:** Typeprofillet for Trias–Jura-grænsen på en bjergskråning i Østrig med tre af denne artikels forfattere. **C:** Det gyldne søm, som markerer Trias–Jura-grænsen. Lagene står næsten lodret, og de ældste lag er bagest i billedet. **D:** *Psiloceras spelae*. De viste palynomorfer ses på figur 14. Palynomorfer er mikrofossiler (5–500 my) med en organisk skal, fundet i sedimentære bjergarter.

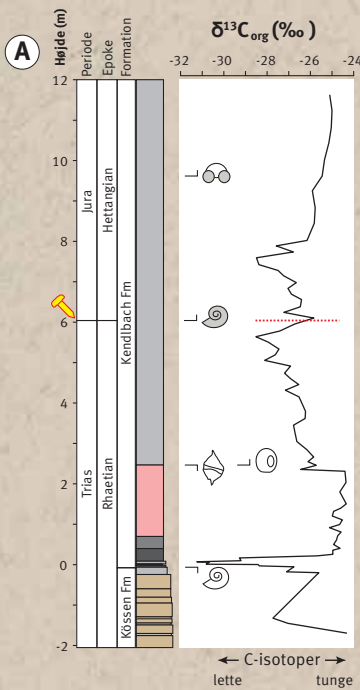
Kilder:

A: Efter: Ruhl et al. 2009, Hillebrand et al. (2013).

B: Foto: Christian Korte, IGN.

C: Foto: Christian Korte, IGN.

D: Foto: Axel von Hillebrandt, Berlin.



- Kalksten
- Kalkrig mergel
- Mergel
- Organisk-rig mergel
- Organisk-rig skifer
- Rød mergel
- 📌 Det 'gyldne søm' der markerer Trias–Jura-grænsen
- └ Første optræden
- └ Sidste optræden
- 🌀 *Psiloceras spelae*
- 🌀 *Choristoceras marshi*
- 🌀 *Pinuspollenites minimus*
- 🌀 *Cerebropollenites thiergartii*
- 🌀 *Rhaetogonyaulax rhaetica*

Ammonitter

Pollen og sporer



Den slut-triassiske krise

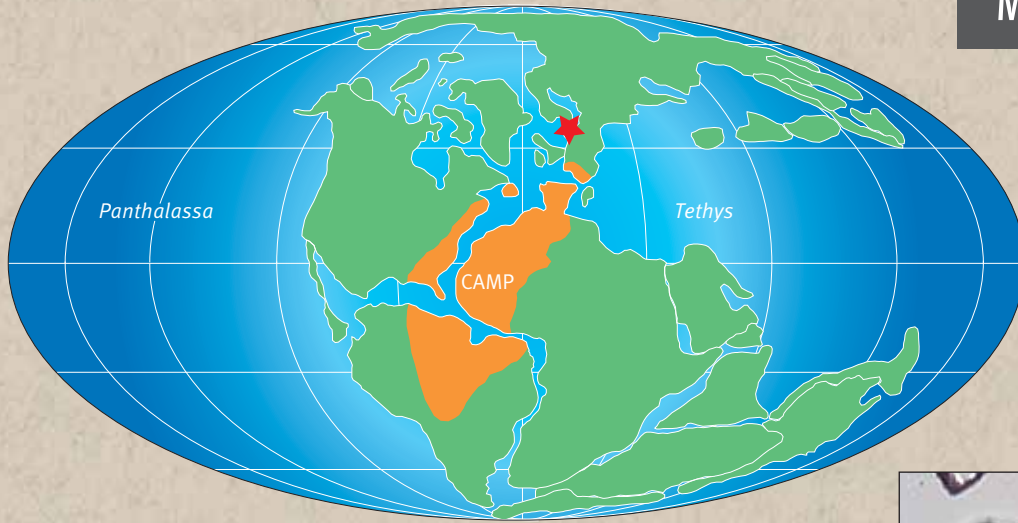
Den slut-triassiske masseuddøen kendetegnes af et stort tab af havlevende organismer. Muligvis uddøde op til 73 % af alle havlevende dyreslægter (se figur 1 og tabel 2). Krisen ramte hele 'fødekæden'. I havene uddøde mange forskellige typer af planteplankton, blandt andet mange af de dinoflagellater (se boks side 11), som trivedes i sen Trias. Kalkskallede og revbyggende organismer blev særlig hårdt ramt, deriblandt visse koraller og muslinger. Blandt de havlevende rovdyr forsvandt de sidste konodont-dyr (en slags tidlige hvirveldyr), mange ammonitter og ichtyosaurier.

På land blev mange planteslægter og -arter hårdt ramt. Ifølge arkivet for fossile makroplanter uddøde kun én plante-familie, Peltaspermaeae. Sporer og pollen har imidlertid et bedre bevaringspotentiale end andre plantedele og produceres i øvrigt i stor mængde. De fossile sporer og pollen viser imidlertid, at tabet af arter og slægter var meget større.

Grænsen mellem Trias og Jura

I meget lang tid har geologer brugt stratotyper, dvs. bestemte lagfølger som type-eksempler på de forskellige geologiske tidsafsnit. Mange af disse stratotyper er alligevel ukomplette og indeholder kun aflejringer fra en mindre del af det tidsrum, de repræsenterer. I slutningen af 1970'erne besluttede den International Stratigrafiske Kommission (ICS) sig for en ny strategi, hvor man i stedet definerer den nedre grænse for hver tidsperiode ved at udpege et 'Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP)', som i lagserien markeres med et gyldent søm (figur 3).

Det gyldne søm, figur 3C, som markerer Trias–Jura-grænsen, findes i marine aflejringer på en bjergskråning ved Kuhjoch i Tyrol, Østrig. Markeringen angiver den første optræden af ammonitten *Psiloceras spelae*. For også at have en markør i terrestriske aflejringer, valgte man at udpege første optræden af *Cerebropollenites thiergartii*, figur 14G, som en 'tillægs-markør'. I Kuhjoch optræder dette pollen ca. 3 meter under *Psiloceras spelae*, figur 3D.



★ Undersøgsområdet

Figur 4. Rekonstruktion af superkontinentet Pangea og CAMP-vulkanprovinsens maksimale udbredelse. Rester af CAMP-vulkanprovinsen findes i dag på fire kontinenter. Se også figur 2.

Kilde: Efter Tanner et al. (2004).
Rentegning: Annabeth Andersen, GEUS.

Pangeas opbrydning og CAMP-vulkanismen

I slutningen af Trias var verden meget anderledes end i dag. Alle kontinenter var samlet i et kæmpe-kontinent, Pangea, der strakte sig fra pol til pol. Øst for Pangea lå Tethys-havet, der var forbundet med oceanet Panthalassa, som dækkede resten af Jorden, se figur 4. Landmassernes placering påvirkede selvfølgelig både cirkulationsmønstrene i havene og klimazonerne. En vigtig begivenhed ved Trias-Jura-grænsen var dannelsen af den Central-Atlantiske Magmatiske Provins (CAMP). Dette enorme område med vulkansk aktivitet opstod, da Pangea begyndte at sprække op. I de riftdale, som opstod under spredningen af Nordamerika fra Afrika og Sydeuropa, strømmede enorme mængder lava ud. Denne type vulkanisme kaldes for flodbasalt vulkanisme

og områder som CAMP betegnes som Store Vulkanprovinser. Opsprækningen af Pangea førte til dannelsen af Atlanterhavet, og den ældste oceanbundskorpe findes i de centrale dele af Atlanterhavet. I nutiden findes vulkanske bjergarter fra CAMP på fire forskellige kontinenter: Nordamerika, Sydamerika, Afrika og Europa (figur 4).

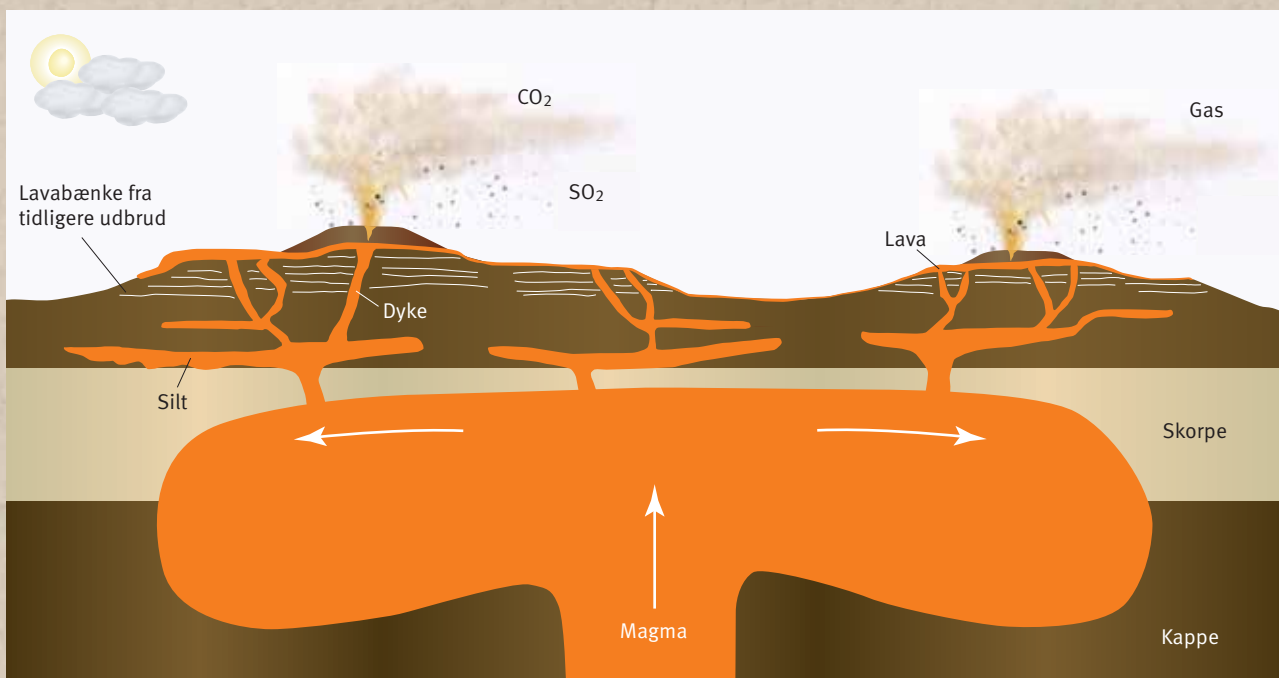
Store Vulkanprovinser, se figur 5, er karakteriseret ved udbrud af uhyre store mængder vulkansk materiale fra hundredevis af udbrud i et stort område over kort geologisk tid. CAMP provinsen dækkede et område på mindst 10 mio. km²; svarende til Europas areal mellem Uralbjergene og Atlanterhavet. Det totale volumen af CAMP vulkanitterne er estimeret til 2,3 mio. km³; det svarer til at hele området blev dækket af et 230 meter tykt lag af lava. En stor del af de magmatiske bjergar-



Figur 6. Zircon med veludviklede krystalflader. Zircon er et af de mineraler, som anvendes til radiometrisk aldersbestemmelse af vulkanske bjergarter. Den viste zircon stammer fra sedimenter fra seneste Trias. Det er omlejret og kan derfor være meget ældre.

Foto: Sofie Lindström, GEUS.

ter findes som gange og lag (intrusioner) under jordoverfladen (figur 5). Ved brug af U-Pb isotopdatering af mineralet zircon (se figur 6) kan fire korte vulkanske episoder identificeres (figur 7) inden for CAMP, der i alt strakte sig over ca. 620.000 år. De to ældste episoder var langt de mest voldsomme begivenheder, med en varighed på maksimalt 100.000 år.



Figur 5. Skematisk profil gennem en stor vulkanprovins. De magmatiske bjergarter omfatter flodbasalter og intrusive gange og lag.

Kilde: Efter Campbell (1998).
Rentegning: Annabeth Andersen, GEUS.

Laki udbruddet på Island 1783–1784

Et af de kendteste vulkanudbrud i Islands historie foregik fra juni 1783 til februar 1784. Dette udbrud regnes blandt de alvorligste i hele Holocæn (dvs. i de seneste 12.000 år). Man har beregnet, at Laki udbruddet producerede 15,1 km³ lava og forårsagede en katastrofe på Island. Vulkanen frigav store mængder gas indeholdende bl.a. svovldioxid og fluor-forbindelser, som forsurede og forgiftede land, søer og vandløb. Vulkanen tilførte i alt 122 mega ton SO₂ til atmosfæren. Mennesker og dyr blev hårdt ramt og den efterfølgende dødelighed var høj. Folk forlod deres gårde og dyrknings- og græsningsarealer, da disse blev stærkt forsurede, med misvækst som konsekvens. Mange dyr, og en fjerdedel af Islands befolkning, døde af sult, af fluor-forgiftning efter udbruddet, og af de efterfølgende sygdomme.

Udbruddet forårsagede ikke kun skade på Island. En tør svovl- og fluorholdig tåge spredte sig over den nordlige halvkugle og resulterede i en temperaturstigning på næsten 3°C i sommeren 1783. Den sure tåge og regnen gav skader på plantelivet. Historiske beskrivelser fortæller om sure-ætsede blade og frugter, sorte indskrumpne blade, udtørring, farveændringer, for tidlig løvfald, frugter der aldrig blev modne, og græs og korn uden kerner. Dette betød misvækst og sult. Den sure tåge ramte lungerne og førte til forhøjet dødelighed både hos mennesker og dyr selv et par år efter udbruddet. I en 10-års periode efter udbruddet forværredes klimaet drastisk med koldere vejr over hele Europa. Vintrene var usædvanlig strenge, men det værste var de kolde somre, der forkortede dyrkningssæsonen og bidrog til fortsat misvækst og sult. Støvskyer fra Laki-udbruddet rapporteredes også fra det nordøstlige Nordamerika, Sibirien og Centralasien i 1783.

Hypotese: Udslip af giftige forbindelser og drivhusgasser fra særlig langvarig vulkanisme medfører klima- og miljøændringer

CAMP vulkanismen menes at være den primære årsag til den masseuddøen, vi observerer i slutningen af Trias. Det kan synes mærkeligt, for vulkansk aske indeholder gode næringsstoffer, der gøder jorden, og tæt på vulkaner findes ofte frugtbare jorder. Men vulkaner kan også være naturens klimaskurke, som afgiver gasser, der skaber forsurening, forgiftning, eller støv, og ændrer atmosfæren i en periode. Vulkanske udbrudsprodukter kan derfor sammenlignes med menneskenes industrielle virksomhed. Sidstnævnte er en anerkendt miljøskurk, som har påvirket vores skove og søer gennem forsurening. Gennem årtier har Europa og Nordamerika prøvet at reducere deres industrielle udslip for at få kontrol over forsurening, men i de senere år er forsurening fra afbrænding af kul i Asien øget til samme mængde som de samlede bidrag fra Nordamerika og Europa. Vi kan således konstatere, at forsurening af naturen ikke kun er et moderne, menneskabt fænomen, men også kan relateres til vulkansk aktivitet.

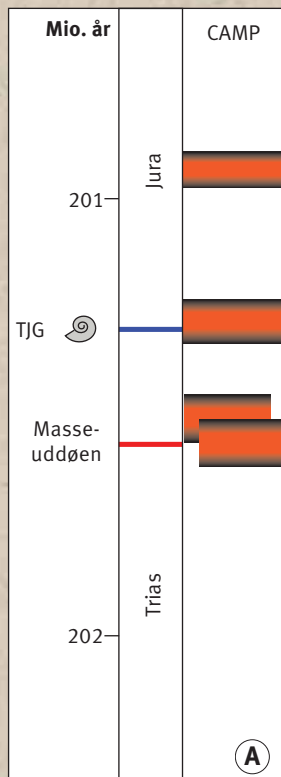
Den påvirkning, som udslip fra et stort vulkanudbrud har på et geografisk område, afhænger selvfølgelig af, hvor stort udbruddet er, hvor langt op i atmosfæren gas- og udbrudsprodukter når, hvor lang tid udbruddet varer, og af vind- og vejrforhold. Påvirkningen afhænger også af geologiske forhold. Kalkholdige jorder eller kalksten dæmper virkningen af den sure nedbør, og påvirkningen af plante- og dyrelivet bliver mindre, hvorimod

Laki-vulkanen på Island.

B

Figur 7. **A:** Tidsskala med fire tidlige faser af vulkanisme i CAMP. **B:** Høje Atlas i Marokko. Lavaer fra de to tidligste udbrudsfaser i CAMP ligger mellem røde sedimenter fra henholdsvis Trias og Jura. **C:** Pahoehoe lavaer ses på bjergvæggen, **D:** Pudelavaer, **E:** Basis af lavastrøm med vesikler (huller), som viser at der er undvejet gasser fra lavaen.

Kilder:
A: Efter: Blackburn et al. 2013.
B, C, D og E: Fotos: Christian Tegner (IG).



- Daterede CAMP vulkanitter
- Den slut-triassiske masseuddøen, beregnet alder: 201,56 mio. år
- TJG = Trias-Jura-grænsen, beregnet alder: 201,3 mio. år

effekterne kan blive både alvorlige og langvarige i syrefølsomme områder.

Et antal historisk kendte vulkanudbrud har haft en regional eller global virkning på klima og miljø, eksempelvis Kuwae-udbruddet 1452 e.Kr. (Vannatu, Stillehavet) og Tambora-udbruddet 1815 e.Kr. (Indonesien). I vores del af verden er de direkte og indirekte konsekvenser af det næsten 8 måneder lange udbrud fra vulkanen Laki på Island 1783–84 meget vel-dokumenterede i historiske kilder, se side 6.

Geologisk set har Store Vulkanprovinser haft stor betydning for klimaet og livets udvikling på Jorden. Visse store vulkanprovinser er samtidige med nogle af de store masseuddøender i Jordens historie (figur 1). Også den kendeste masseuddøen ved grænsen mellem Kridt og Palæogen for 66 mio. år siden, da dinosaurerne blev udryddet, er samtidig med flodbasalt-vulkanisme, nemlig dannelsen af Deccan Traps i Indien. Konsekvenserne af vulkanudbruddene i Indien må have været store, men de er svære at adskille fra dem der fulgte, da Jorden blev ramt af en meteorit, som skabte et krater ved Chixculub på Yucatan-halvøen i Mexico.

Jordens største masseuddøen, hvor 95 % af livet (målt på artsniveau) på Jorden blev

udryddet, skete for 252 mio. år siden i slutningen af tidsperioden Perm (figur 1 og tabel 2). Denne masseuddøen var samtidig med dannelsen af en stor vulkanprovins i Sibirien, Siberian Traps (figur 1), hvor næsten 4 mio. km³ basaltlava blev produceret inden for kort tid, muligvis kun 500.000 år. Konsekvenserne af den slut-permiske masseuddøen var alvorlige og der gik lang tid før livet i havene og på land kom sig efter kæmpe-katastrofen. Trias-perioden er særlig kendt for, at klimaet mange steder på Jorden var meget varmt og tørt. Halvtreds mio. år senere, i slutningen af Trias, indtraf en ny krise, da kæmpe-kontinentet Pangea begyndte at sprække op og CAMP dannedes. Den slut-triassiske masseuddøen er beregnet til at være lige så gammel som den ældste daterede CAMP-puls, nemlig 201,56 mio. år, figur 7A.

Den Central-Atlantiske Magmatiske Provins (CAMP)

For bedre at forstå årsagerne til denne masseuddøen har vi påbegyndt en geologisk undersøgelse af CAMP vulkanitterne i Marokko, hvor storslåede blotninger viser relationerne mel-

lem vulkanitter og de sedimentter, der ligger under og over disse (figur 7). Den store udfordring er at vurdere mængde og flux af gasser, der kan tilskrives vulkanerne (figur 7E pipe vesikler). Et sådant regnestykke er forbundet med store usikkerheder, da det kræver estimering af (i) mængden af gas der afgives, (ii) volumen af vulkansk materiale og (iii) tidsrummet for den vulkanske aktivitet. Hvis vi fokuserer på afgangningen af svovl fra CAMP vulkanerne, som har betydning for den globale miljøkrise observeret ved Trias–Jura-grænsen,

bidrager nye studier med muligheden for at lave et fornuftigt estimat.

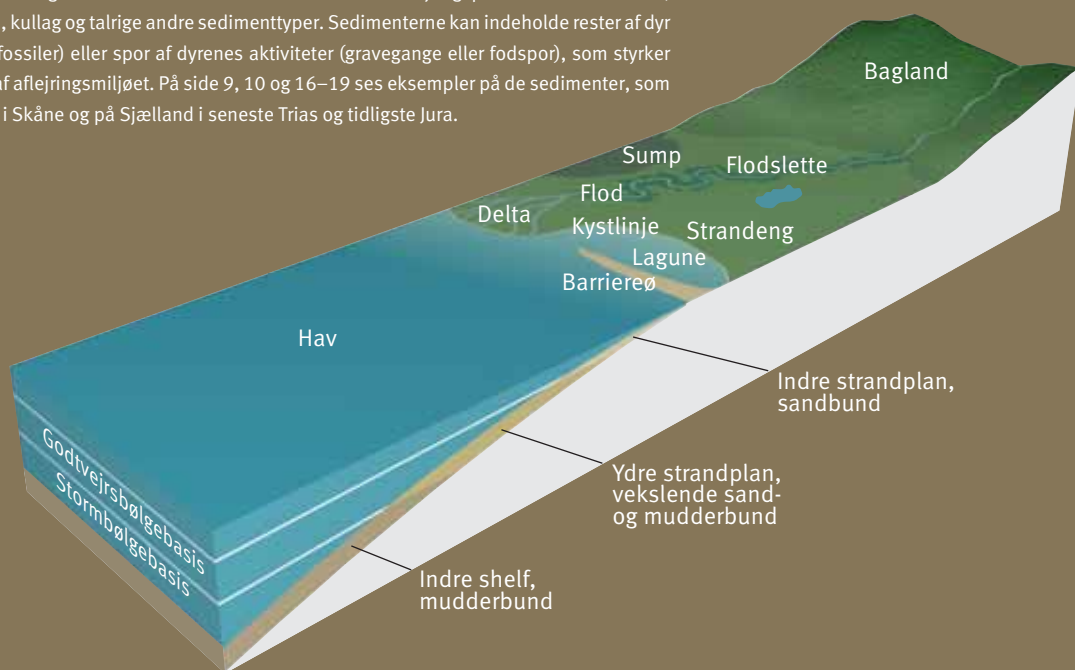
Antag at 2/3 af CAMP-vulkanerne kom til udbrud i en første 100.000 års periode og at der afgasses 8 megaton SO₂ per km³ basalt lava. Det anslås, at 120 megaton SO₂ blev frigivet til atmosfæren per år, hvilket er samme størrelsesorden som afgangningen fra Laki-udbruddet i Island (163 megaton SO₂/år). Hvis de ældste CAMP-vulkaner kom i udbrud i en jævn strøm, ville de have afgivet SO₂ svarende til Laki-udbruddet, hvert år i 100.000 år! Det er dog

mere sandsynligt, at vulkanudbruddene var episodiske og afbrudt af korte perioder med lille eller ingen aktivitet, hvori plante- og dyreliv kunne begynde at komme sig, for igen at blive forstyrret ved næste udbrud. I Marokko finder vi indikationer på sådanne pauser i den vulkanske aktivitet. Tykke sekvenser af tynde pahoehoe lavastrømme (figur 7C) er aflejret af hyppige udbrud (dage til måneder), hvorimod pudelavaer, der overlejer et kalkstenslag, tyder på en lang periode uden vulkansk aktivitet, hvor området sank ned under havniveau.

Fra land til hav

De processer, der virker på jordoverfladen, så som nedbør, vind og temperatur, forvitrer med tiden bjerge og danner sedimentpartikler, der bliver transporteret med floder og vind ned mod søer og have, hvor de bliver sorteret og aflejret af bølgeprocesser, tidevand eller havstrømme.

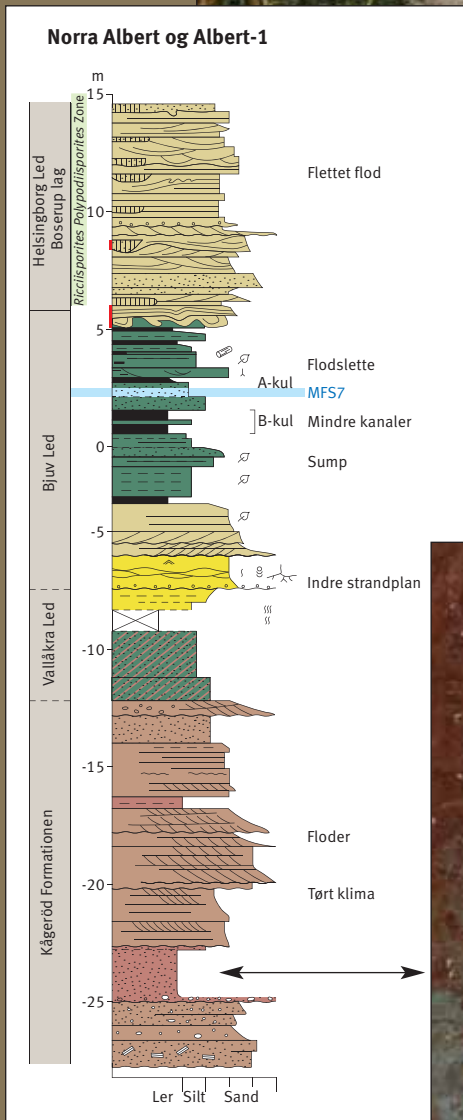
I geologiske lagserier kan man observere resultaterne af aflejningsprocesserne i sandsten, muddersten, kullag og talrige andre sedimenttyper. Sedimentterne kan indeholde rester af dyr og planter (fossiler) eller spor af dyrenes aktiviteter (gravegange eller fodspor), som styrker tolkningen af aflejningsmiljøet. På side 9, 10 og 16–19 ses eksempler på de sedimentter, som blev aflejret i Skåne og på Sjælland i seneste Trias og tidligste Jura.



Figur 8. Skematisk snit gennem et generaliseret kystprofil med angivelse af de aflejningsmiljøer, der er fundet spor af i borekerne.

Bagland: højereliggende områder, som er udsat for forvitring og erosion, og som derved har leveret de partikler, der med floder bringes mod havet. Forvittringsprocesserne er afhængige af klimaet, i et tørt klima er sedimentterne røde eller grønne (se side 9 samt rekonstruktion A, side 16). **Floder:** kan være slyngede, flettede eller lige. Sedimentet transporteres ved bunden (sand og grus) eller oppe i vandet (ler og silt). Flodaflejringer ses side 9, dels røde og grønne muddersten, dels hvidlige sandsten. **Flodslette:** lavtliggende arealer omkring en flod; oversvømmes, når floden går over sine bredder. Dette ses som lerlag, grå eller mørkerøde i figuren side 9. **Sumpskov:** lavvandede søer og spredte træer (se figur 20B). Vegetationen kan bevares som tørv, der ved begravelse kan omdannes til brunkul og senere til stenkul. Se side 9, sorte kullag på den sedimentologiske log samt billedet fra Lunno. Se også rekonstruktion B, side 17. **Delta:** lokal udbygning af kystlinjen omkring et flodudløb. **Strandeng/marint forland:** relativt fladt område dækket af vegetation, evt. med strandsøer og strandvolde. **Kystlinje:** har forskellig udformning afhængig af kysttype. **Bagstrand:** den øvre, tørre del af stranden, som er uden vegetation. **Opskylszone:** forstranden, hvor bølgeop- og tilbageskyl finder sted. **Indre strandplan:** havbunden inden for ydre revle, ofte sandbund, lokal bioturbation, marine fossiler ikke altid bevaret. Se side 9, gullige sandlag, 4–8 m i loggen. Lokalt ses bølgeribber i sandstenene fra Stenlille-området. **Ydre strandplan:** havbunden uden for revlerne, med et stigende indhold af mudder, ofte intens bioturbation, ofte marine fossiler. Ses i den geologiske lagsøjle som grålige muddersten, der dominerer i Fjerritslev Formationen. På lavere vanddybde blev der aflejret grågrønne siltsten i Stenlille-området (se figurer side 10 og 14, samt rekonstruktion 20C side 18).

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.



Figur 10A. Lagserien i stenbruddet Norra Albert, samt de underliggende lag, som kendes fra borekernen Albert-1. Farverne viser aflejningsmiljøer, jf. figur 15.



Figur 9. Feltarbejde ved nordvæggen i stenbruddet i Norra Albert ved Skåne.

Foto: Rikke Weibel, GEUS.



Figur 10B. Et stykke af en borekerne fra det sydlige Bornholm (nær Sose Bugt) med Trias-sedimenter fra Kågeröd Formationen. De røde og grønne muddersten tolkes som aflejret på flodsletter i et tørt klima.



Figur 11. Lergraven ved Lunnom i Skåne i 2005, før graven blev helt vandfyldt. I væggen ses B-kullet, som overlejres af marine heterolitter og sandsten. Udfældningen af okker skyldes iltning af pyrit i sedimenterne.

Foto: Leif Johansson.

Hvordan kan man koble CAMP-vulkanismen sammen med den slut-triassiske masseuddøen? De er beregnet til at være samtidige, inden for dateringsmetodernes nøjagtighed. Det bedste ville være, hvis man fandt vulkanske askelag i de sedimentære lag, hvor man finder masseuddøen. Særlig godt ville det

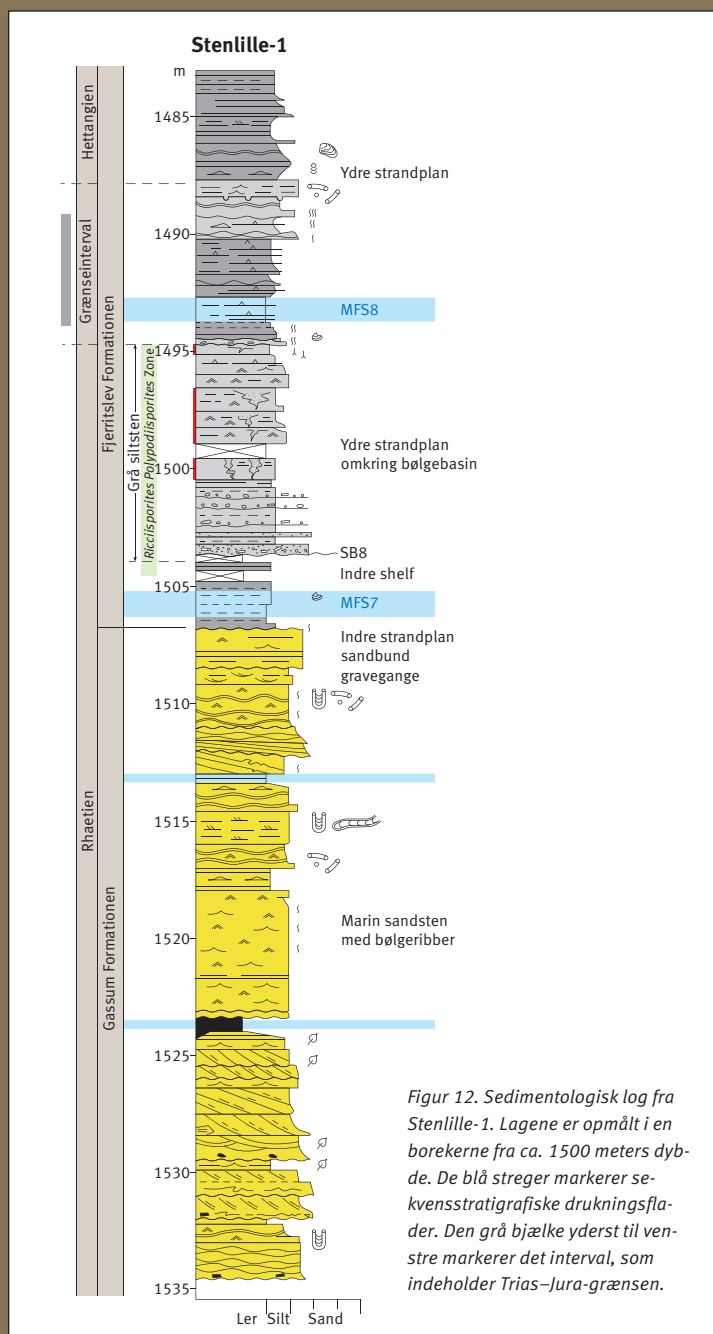
være, hvis askelagene også havde den samme geokemiske sammensætning som CAMP-vulkanitterne, samt indeholdt mineraler, der kunne isotop-dateres. Desværre er bevaringspotentialet for askelag ikke altid godt og det er heller ikke al vulkanisme, der danner store mængder aske. Man har ledt efter koblinger

mellem vulkanismen og masseuddøen ved at studere svingninger i den tunge, stabile kulstof-isotop (se side 13) $\delta^{13}C$ og forekomsten af jordskælvsstrukturer i sedimente, også kaldet seismitter (se figur 18A og B og side 14).

Stratigrafi

Ordet stratigrafi betyder beskrivelse af lag. Beskrivelsen kan fokusere på lagenes indhold af fossiler (biostratigrafi), lagenes kornstørrelse, mineralogi, sedimentære strukturer m.m. (litostratigrafi), eller identifikationen af vigtige grænseflader, som kobles til ændringer i havniveauet (sekvensstratigrafi).

Biostratigrafi er brugen af enkelte arters eller slægters tidsmæssige udbredelse, hvilket giver en relativ datering af lagene. Relativ datering betyder, at en given lagserie er ældre, yngre eller samtidig med lag på andre lokaliteter, men giver ikke en absolut alder målt i år. En del arter eller slægter er begrænset i tid og har meget tydelige første og/eller sidste optrædener i det geologiske arkiv. De kan derfor bruges som markører for tid.



Figur 12. Sedimentologisk log fra Stenlille-1. Lagene er opmålt i en borekerne fra ca. 1500 meters dybde. De blå streger markerer sekvensstratigrafiske drukningsflader. Den grå bjælke yderst til venstre markerer det interval, som indeholder Trias-Jura-grænsen.

Den slut-triassiske masseuddøen og Trias-Jura-grænsen i Danmark og Skåne

I den sene del af Trias og den tidlige del af Jura skete der store ændringer i fordelingen af land og hav i de områder, der i dag svarer til Danmark og Sydsverige, og i lagserien finder man spor af den sen-triassiske masseuddøen. Sedimenterne og katastrofen for fossilerne beskrives i det følgende.

For at kunne lokalisere grænsen mellem Trias og Jura og vurdere omfanget af masseuddøen må man studere de sedimentære lag og deres organiske indhold på flere forskellige måder. Nedenfor følger en beskrivelse af nogle metoder, der bruges, når man skal tolke de ændringer, der skete.

Sedimenterne - Litostratigrafi

Sedimenterne inddeles i overordnede enheder, formationer, som kan underinddeles i led (engelsk: member). Den ældste formation, som omtales her, er Vinding Formationen og den yngste er Fjerritslev Formationen og den tilsvarende Rya Formation, se figur 15.

Sekvensstratigrafi

Sekvensstratigrafi bygger på genkendelsen af erosionsflader, sekvensgrænser (SB), dannet som følge af fald i havniveau; transgressionsflader (TS), som dannes, når land bliver oversvømmet; samt maksimale drukningsflader (MFS) dannet ved kulminationen af et forløb med stigende havniveau og transgression. Sidstnævnte er ofte tynde lag af finkornet sediment med et relativt stort indhold af marine mikrofosser. Figur 10A, 12 og 15 viser en række drukningsflader (MFS1-MFS9), hvoraf MFS7 er særlig veludviklet og kan følges fra Det Danske Bassin til Skåne og Bornholm. MFS7-fladen er markeret på de sedimentologiske logs, og antages at have samme alder fra lokalitet til lokalitet.

Biostratigrafi

Biostratigrafi er brugen af enkelte arters eller slægters tidsmæssige udbredelse, hvilket giver en relativ datering af lagene. Den tidlige-jurassiske ammonoid *Psiloceras spelae* er en sådan markør, en type-art, hvis første optræden i marine aflejringer markerer den nedre grænse for tidsperioden Jura (figur 3A og D). I lag, der er aflejret på land, bruger man i stedet første optræden af et pollen, *Cerebropollenites thiergartii*.

Palynologi

Udtrykket palynologi blev brugt første gang af Hyde og Williams i 1944. Udtrykket er baseret på de græske ord paluno: at sprede, og pale, der betyder støv. I denne sammenhæng tænkes på blomsterstøv, altså pollen. I dag bruger man ordet palynomorfer om de fleste syre-resistente mikrofosiler, som man får frem fra sedimentet ved at bruge flussyre. De fleste palynomorfer er under 250 µm (¼ mm) i diameter, hvorfor man må bruge mikroskop for at identificerer dem. Sporer, pollen og alle andre palynomorfer består af en kulstof-ilt-brint-forbindelse, der er meget modstandsdygtig mod nedbrydning. Derfor kan vi finde sporer og pollen i aflejringer, der er flere hundrede mio. år gamle. Sporer og pollen er med til at belyse hvilket aflejringsmiljø, det givne sediment stammer fra og hvor gamle sedimenterne er.

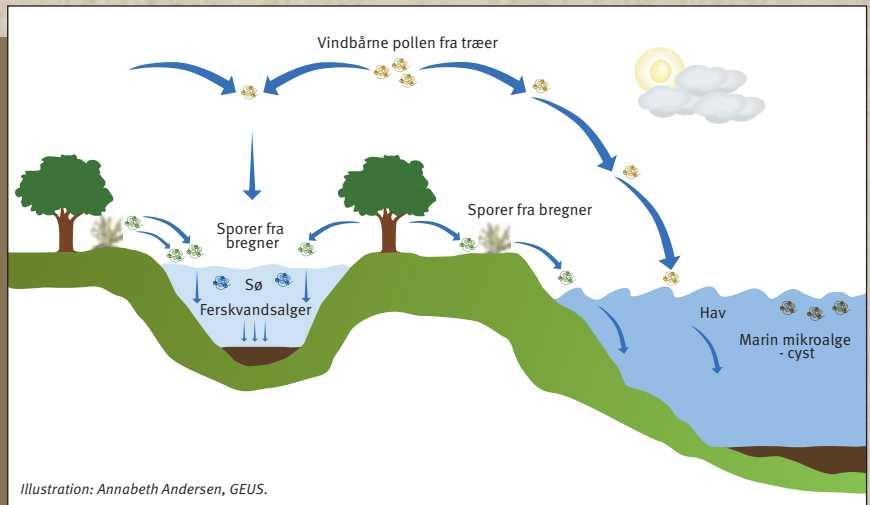
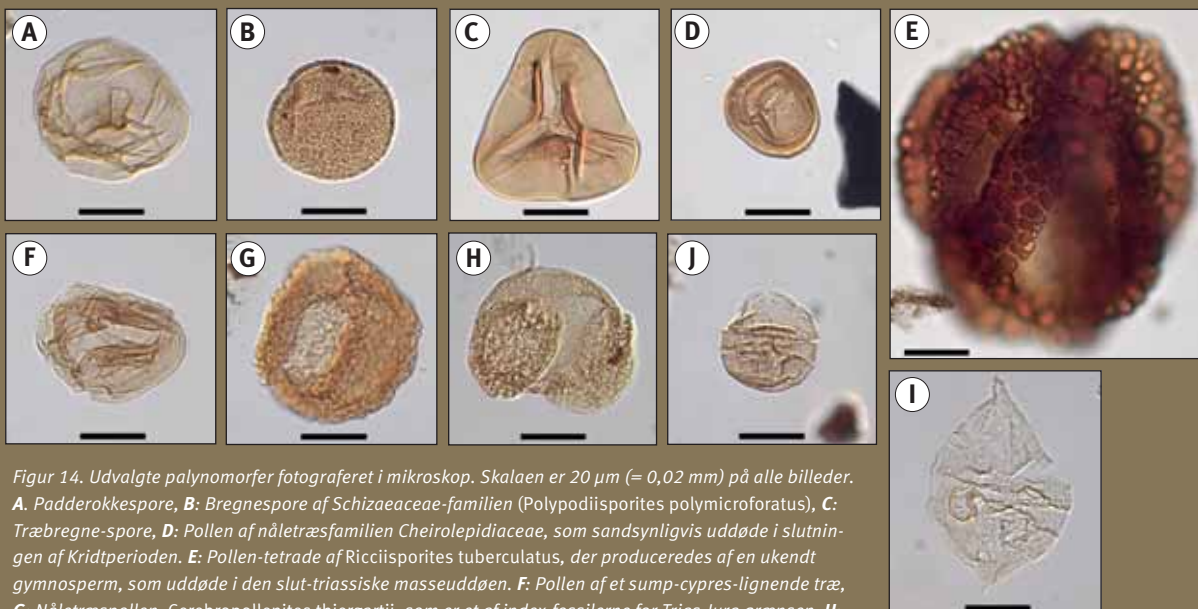


Illustration: Annabeth Andersen, GEUS.

Figur 13. Pollen og sporer fra landplanter kan bevares i søer, moser eller havet. Pollen med vindsække spredes med vinden. I havet aflejres palynomorfer fra landplanter sammen med mikroalger, fx dinoflagellatcyster. Dinoflagellater er excellede rødalger, der findes i stor mængde i havene. De bevæger sig ved hjælp af to flageller og får energi via fotosyntese eller ved at fange føde med pseudopodier. De er således hverken dyr eller planter, eller måske er de begge dele. Mange dinoflagellater danner hvilecyster – en slags kapsler de omgiver sig med, når livsbetingelserne er dårlige. Når betingelserne er gode igen, bryder de ud af cysten og fortsætter deres livscyklus. Det er cysterne, man finder som fosiler.



Figur 14. Udvalgte palynomorfer fotograferet i mikroskop. Skalaen er 20 µm (= 0,02 mm) på alle billeder. **A:** Padderokkespore, **B:** Bregnespore af Schizaeaceae-familien (Polypodiisporites polymicroforatus), **C:** Træbregne-spore, **D:** Pollen af nåletræsfamilien Cheirolepidiaceae, som sandsynligvis uddøde i slutningen af Kridtperioden. **E:** Pollen-tetrad af Ricciisporites tuberculatus, der produceredes af en ukendt gymnosperm, som uddøde i den slut-triassiske masseuddøen. **F:** Pollen af et sump-cypres-lignende træ, **G:** Nåletræspollen, Cerebropollenites thiergartii, som er et af index-fosilerne for Trias-Jura grænsen, **H:** Fyrretræspollen med typiske vindsække, Pinuspollenites minimus. **I:** dinoflagellatcysten Rhaetogonyalax rhaetica, der uddøde i den slut-triassiske masseuddøen, **J:** Dinoflagellatcysten Dapcodinium priscum, der overlevede den slut-triassiske masseuddøen.

Fotos: Sofie Lindström, GEUS.

De ler-, sand- og kullag, der blev aflejret i søer, floder og deltaer omkring overgangen mellem tidsperioderne Trias og Jura, indeholder en masse planterester, samt sporer og pollen fra de planter, der dækkede landjorden dengang. Man kan også finde ferskvandsalger fra søer og vandløb. I de lag, der blev afsat i havet, kan man desuden finde rester af marine plantealger, fytoplankton. I undersøgelsen af den geologiske udvikling omkring Trias–Jura-grænsen

i Danmark og Skåne er palynomorfer de vigtigste fosiler, dvs. dem, som giver den mest detaljerede information. Figur 16 viser variationer i plantegrupper og planteplankton over Trias–Jura-grænsen i Stenlille.

Både i GSSP sektionen i Kuhjoch i Østrig og i Stenlille er den sidste optræden af dinocysten *Rhaetogonyalax rhaetica* sammenfaldende med den første optræden af det vigtige pollen *Cerebropollenites thiergartii* samtidig

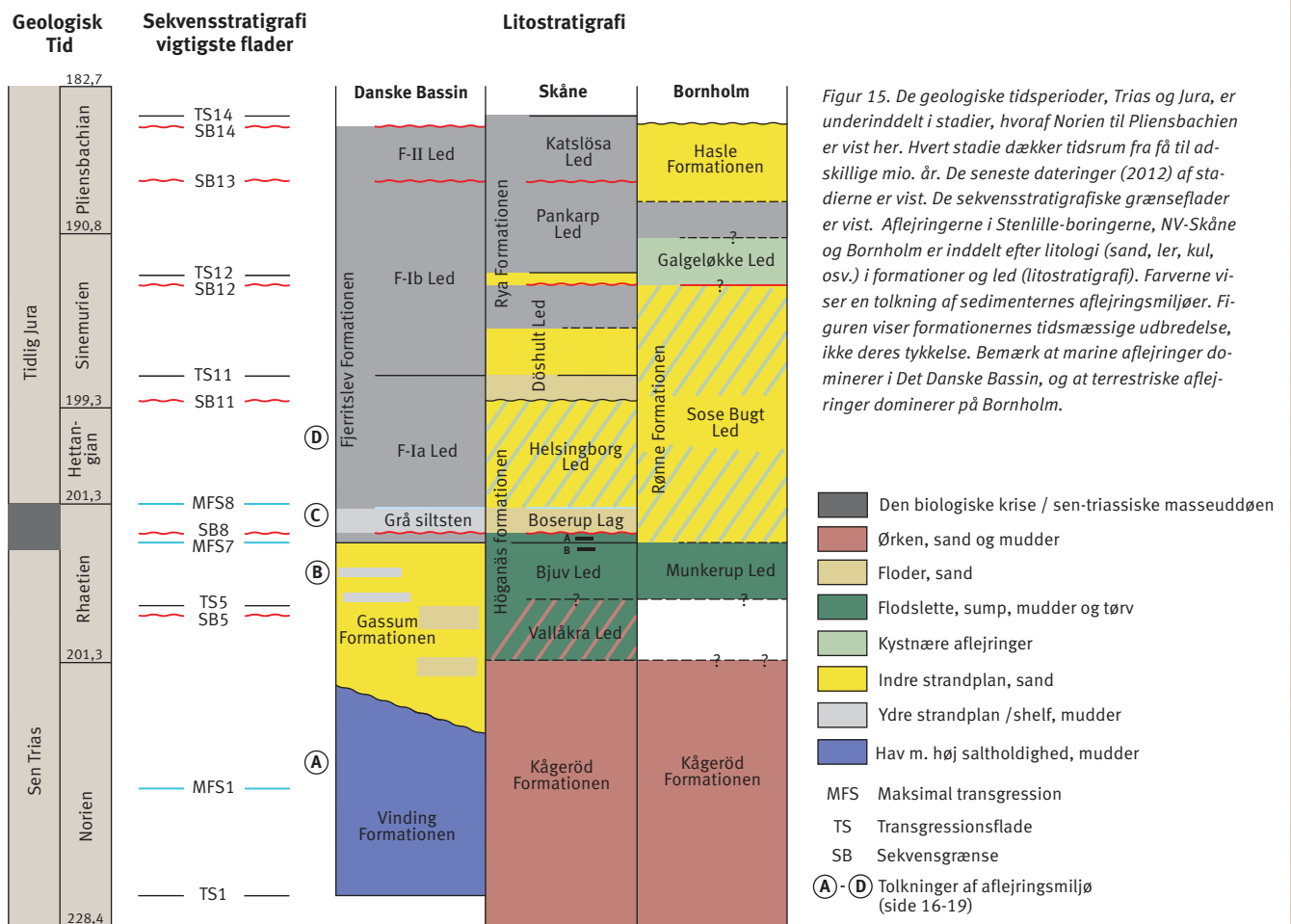
med et stort udsving på $\delta^{13}\text{C}$ -isotopkurven (figur 3A og 14G). En anden markør er den første hyppige forekomst af fyrre-pollenet *Pinuspollenites minimus*. Dette betyder, at selv hvis der ikke er nogen fund af ammonoiden *Psiloceras spelae* i Det Danske Bassin, så kan man argumentere for at Trias–Jura-grænsen i Stenlille ligger mellem den første forekomst af *Cerebropollenites thiergartii* og den første hyppige forekomst af *Pinuspollenites minimus*.

Stabile kulstofisotoper – karakteristisk af kuldioxidindholdet i atmosfæren

Mængden af kulstof-isotopen ^{13}C , målt i forhold til ^{12}C , betegnes $\delta^{13}\text{C}$. Den kan måles for kulstof, som indgår i organiske forbindelser, C_{org} eller for kulstof, som indgår i karbonatminerale (som opbygger skaller hos bl.a. muslinger, C_{carb}). En kurve over $\delta^{13}\text{C}$ -værdier kan anvendes til at kortlægge variationer inden for

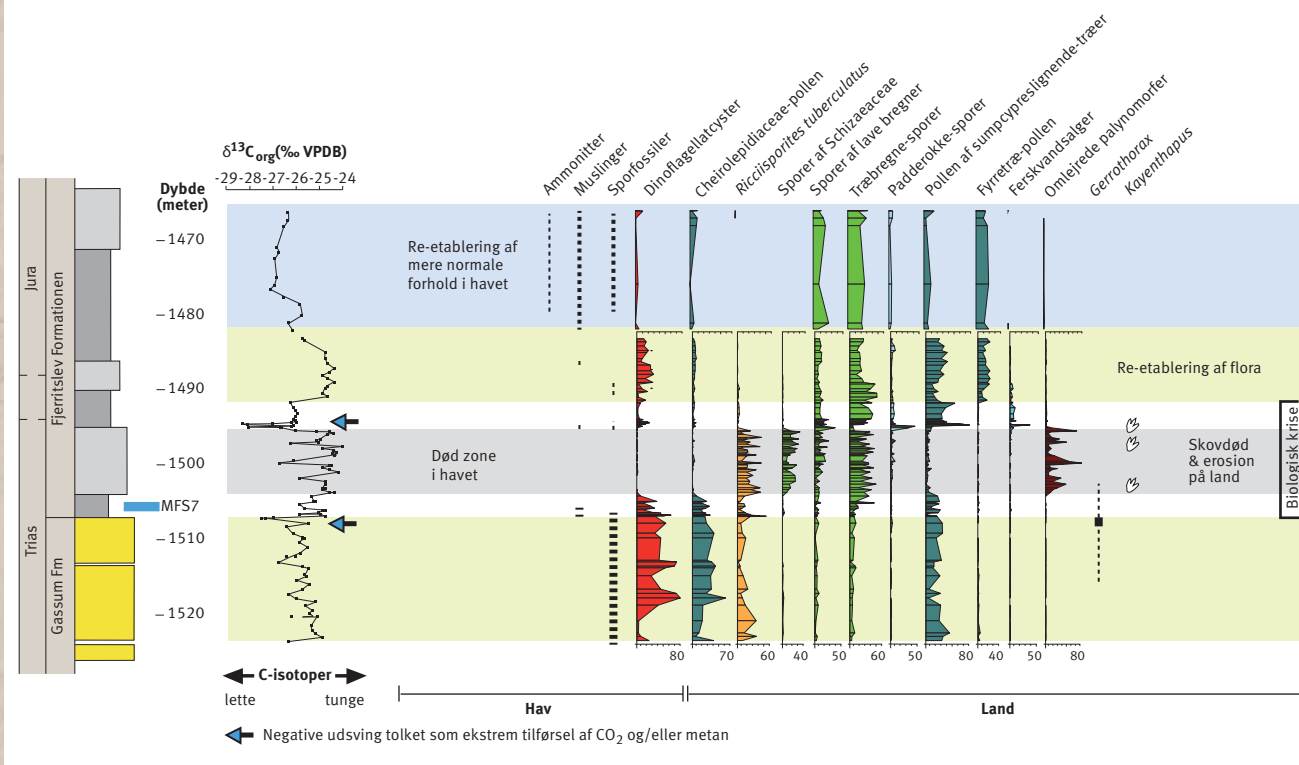
kulstofkredsløbet i en geologisk periode. Biologisk aktivitet foretrækker den lette ^{12}C -isotop frem for ^{13}C . Det vil sige, at hvis der er meget ^{12}C i atmosfæren eller i havvandet, vil organismene bruge mere af den. Store negative udsving på en $\delta^{13}\text{C}$ -isotop kurve, uanset om man måler $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ eller $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, kan forklares som tilførsel af den lette ^{12}C gennem enten vulkanske udslip af CO_2 eller udslip af metan-gas fra fx metanhydrater.

Bortset fra deres anvendelse til tolkning af vigtige forandringer i ocean-/atmosfæresystemet, er forholdet mellem de stabile kulstofisotoper ($\delta^{13}\text{C}$) et fremragende redskab til korrelation over store afstande, hvis det bruges i kombination med biostratigrafi. $\delta^{13}\text{C}$ -isotop-kurver fra talrige lokaliteter verden over viser flere negative udsving over T/J-grænsen, se figur 3A og 16.



Figur 15. De geologiske tidsperioder, Trias og Jura, er underinddelt i stadier, hvoraf Norien til Pliensbachien er vist her. Hvert stadie dækker tidsrum fra få til adskillige mio. år. De seneste dateringer (2012) af stadiene er vist. De sekvensstratigrafiske grænseflader er vist. Aflejringerne i Stenlille-boringerne, NV-Skåne og Bornholm er inddelt efter litologi (sand, ler, kul, osv.) i formationer og led (litostratigrafi). Farverne viser en tolkning af sedimenternes aflejringsmiljøer. Figuren viser formationernes tidsmæssige udbredelse, ikke deres tykkelse. Bemærk at marine aflejringer dominerer i Det Danske Bassin, og at terrestriske aflejringer dominerer på Bornholm.

Modificeret efter L.H. Nielsen (2003). Retegning: Annabeth Andersen, GEUS.



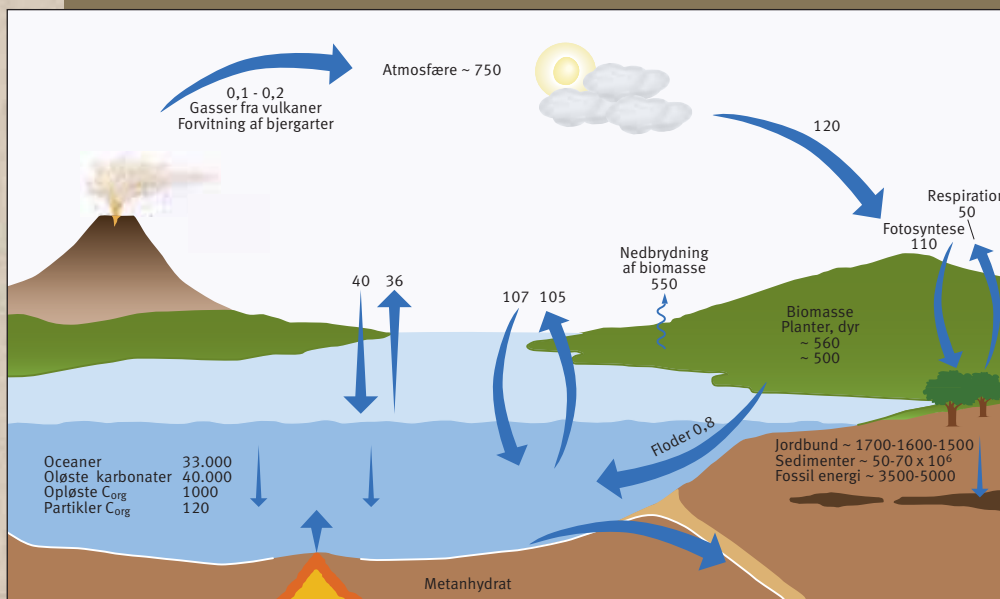
Figur 16. Økologiske og sedimentologiske ændringer i Danmark og Skåne hen over den slut-triassiske masseuddøen. Bemærk de samtidige ændringer i hav og på land ved krisen, samt at floraen på land begynder at komme sig, mens der stadig var krise i det marine økosystem. De vigtigste spore- og pollengrupper er vist i procent af den samlede mængde sporer og pollen. Dinoflagellatcyster, ferskvandsalger og omløjrede palynomorfer er vist i % af samtlige palynomorfer. Sammenlign med figur 12, side 10.

Kulstofkredsløbet

Jordklodens samlede mængde af kulstof findes i forskellige reservoirer: atmosfæren og det ferske vand, havvand, biomasse, moser og jordbund. Desuden findes meget kulstof i sedimenter, enten som kalksten, som finfordelte partikler, eller som kul og olie. Meget af kulstoffet recirkuleres mellem atmosfære, havvand og biomasse, i kulstofkredsløbet.

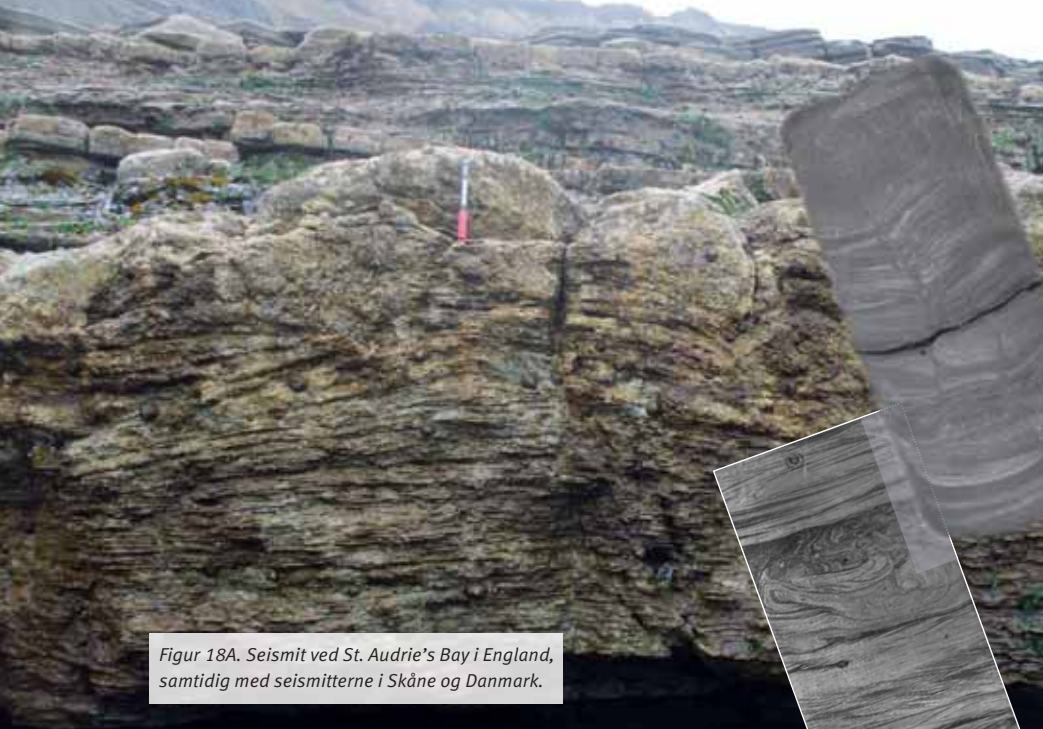
Alt liv bruger kulstof i organiske forbindelser (fx proteiner, lipid og kulhydrater som indgår i planter og væv) og eventuelt som mineraler, specielt karbonater (fx calciumkarbonat, CaCO₃), som findes i skaller hos muslinger og mange andre organismer. Alle organismer bruger kulstof fra den samme 'pool', det vil sige fra atmosfærens CO₂

eller oceanernes HCO₃⁻ (figur 17). Kulstof har to stabile isotoper, den lette ¹²C og den tunge ¹³C. Biologisk aktivitet foretrækker den lette ¹²C-isotop frem for den tunge ¹³C. Hvis atmosfæren modtager et pludseligt og stort tilskud af let kulstof, eksempelvis fra vulkanudbrud, vil dette indbygges i biomassen. Såfremt kalkskaller eller plantemateriale bevares som fossiler, kan man måle forholdet mellem de to isotoper, δ¹³C, og kortlægge variationer inden for kulstofkredsløbet i en geologisk periode. Disse variationer er afhængige af sedimentation og recirkulering (fx gennem forvitring, vulkanisme, metan-udslip) af den lette ¹²C-isotop. Udslippet kan dateres ved hjælp af biostratigrafi.



Figur 17. Skematisk illustration af hovedtrækkene i kulstofkredsløbet. Pilene illustrerer udvekslingen af kulstof mellem reservoirer som atmosfæren, vandet i oceanerne, og den eksisterende biomasse. Tilskud af let ¹²C fra vulkanske gasser vil indbygges i organisk væv og skaller, og en del af disse vil blive bevaret som fossiler. Deres δ¹³C-værdier registrerer hyppigheden af ændringer i atmosfæren og havvandet. δ¹³C-kurven kan endvidere anvendes til korrelation mellem lokaliteter. Enhederne er i milliarder ton. Se også Geoviden 2009-3.

Sammenstilling af diverse data, ved forfatterne. Rentegning: Annabeth Andersen, GEUS.



Figur 18A. Seismit ved St. Audrie's Bay i England, samtidig med seismitterne i Skåne og Danmark.

De grå siltsten og meget finkornede sandsten, som blev aflejret samtidig med den biologiske krise, ses i borekernen fra Stenlille-4. Den nederste borekerne viser, at de sedimentære strukturer (dannet af strøm og bølger) lokalt er stærkt forstyrrede. Denne deformation er sket omtrent samtidig med aflejringen, fordi de overliggende lag er uforstyrrede. Deformationen tolkes som resultat af jordskælvsrystelser. Den øverste borekerne viser at de sedimentære strukturer er forstyrret langs sprækker, der tolkes som opstået ved pludselig afgivelse af porevand, forårsaget af en jordskælvsrytelse. Borekernernes diameter er ca. 10 cm.

Kernefotos: Gunver K. Pedersen, GEUS.



Figur 18B. Seismit i Norra Albert stenbrud lige under Boserup lagene. Se teksten nedenfor om seismitter.

Foto: Rikke Weibel, GEUS.

Tegn på omfattende jordskælv

Nutidige jordskælv registreres med seismografer, som måler rystelsens størrelse og varighed. Hvis man viser alle de historisk kendte jordskælv på en globus, ligger langt det største antal langs med grænserne for de pladetektoniske plader. De største jordskælv finder sted ved subduktionszoner, hvor én plade trækkes ned under en anden, eller i zoner, hvor to plader bevæger sig sidelæns i forhold til hinanden. Der er også en del relativt mindre jordskælv langs de midt-oceaniske rygge (læs mere om pladetektonik og jordskælv i Geoviden 2011/4, 4-7).

Mange jordskælv udløses af bevægelse langs forkastninger, men da disse ofte bliver reaktiveret, er det vanskeligt at bedømme

præcis hvornår forkastningen var aktiv. Imidlertid kan der findes spor af forkastningsaktivitet i sedimentære lag i betydelig afstand fra epicentrum af store jordskælv. Hvis lagene er vandfyldte og kun svagt konsoliderede, deformerer jordskælvsrystelsen sedimentet på forskellige måder, og disse deformationsstrukturer kaldes seismitter. Adskillige lag med denne type deformationer forekommer inden for et veldefineret interval lige over MFS 7, mens de under- og overliggende lag er uforstyrrede. Seismitterne er indbyrdes adskilt af udeformerede lag, og det tyder på, at der skete flere jordskælv, mens de grå siltsten blev aflejret. På de sedimentologiske logs (figur 10 og 12) er seismitterne markeret med en lodret rød streg. Forstyrrelserne er ty-

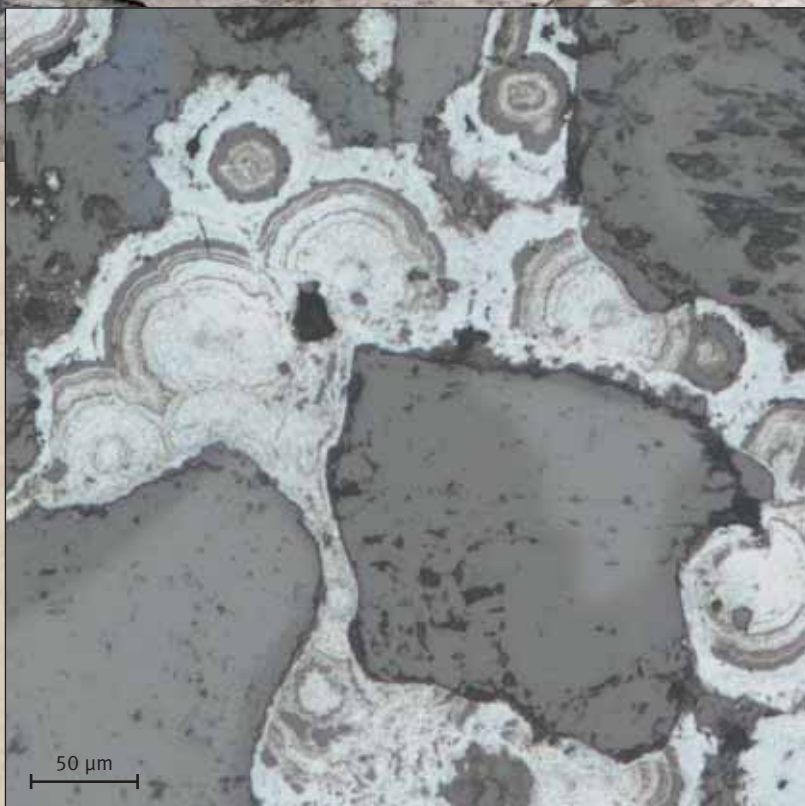
delige i de grå siltsten, fx Stenlille-4, se borekernen ovenfor og figur 12, og i Norra Albert er et sandlag meget uregelmæssigt foldet, se figur 18B.

Seismitterne er koncentreret inden for et snævert tidsinterval lige før Trias-Jura-grænsen. På samme tid dannedes også seismitter i UK (figur 18A), Tyskland, Luxemburg, og sandsynligvis også i Polen, Ungarn, Slovakiet, Italien og Frankrig. Der skete altså meget store jordskælvsrystelser i en hel region i dette tidsrum, og det mest sandsynlige er, at disse var koblet sammen med pladetektoniske bevægelser under opsprækningen af Pangea og dannelsen af CAMP.



Figur 19A. Typisk sideritkonkretion i Boserup-lagene i Norra Albert. De hårde konkretioner er mere modstandsdygtige mod erosion end det løse sand. Blyant som skala.

Foto: Karen Dybkjær, GEUS.

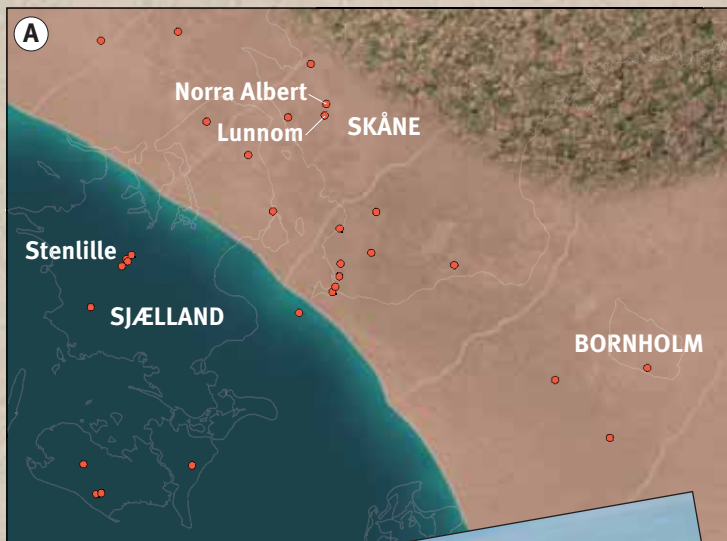


Figur 19B. Tyndslib af sideritkold fotograferet i mikroskop, med perfekt zonerede, kugleformede sfærosideriter i de grovkornede Boserup-lag i Norra Albert i Skåne.

Foto: Rikke Weibel, GEUS.

Lerjernsten

Siderit (jernspat, FeCO_3) er et forholdsvis almindeligt mineral i både hav- og landsedimenter og det dannes typisk kort tid efter aflejring af sedimentet. De sfæriske koncentrationer dannes ved opløsning og genudfældning af ler og siderit under iltfattige forhold. Hvis lerjernstenen er perfekt zoneret, består den af koncentriske ringe, se figur 19B, og kan også kaldes en sfærosiderit. I Boserup-lagene er der fundet sideritkonkretioner såvel som perfekt zoneret sfærosiderit, se figur 19A og 19B. Fund af sfærosiderit i et lag kan fortælle noget om, at sedimentet er aflejret ved iltfattige, måske skiftende grundvandsforhold, se tekst side 18, første spalte.



Figur 20A. I store dele af sen Trias gik kystlinjen gennem det nuværende Danmark, og det østlige Sjælland, hele Skåne samt Bornholm var landområder. Klimatet var tørt og ørkenagtigt med sparsom vegetation omkring midlertidige søer og vandløb.

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.



I skrænterne langs en udtørret flod ses ældre flodsedimenter, sandsten og grusrige sandsten. Sydlige Marokko nær Tissint.

Foto: Gunver K. Pedersen, GEUS.

Fire øjeblikbilleder

Omkring Trias–Jura-grænsen skete der store ændringer i klimaet og i fordelingen af aflejningsmiljøer. Disse er eksemplificeret ved fire øjeblikbilleder, se figur 20A-D. Billederne sammenfatter de tolkninger, som kan sammenstykes fra forskellige data, primært sedimentologi, palynologi og ændringer i atmosfærens sammensætning ($\delta^{13}C$). Derudover følger makrofossiler (planter, invertebrater og vertebrater) facetter til billederne, ligesom supplerende data inddrages om CAMP-vulkanismen i områder uden for Skandinavien. De palæogeografiske kort, som er vist i figur 20A-D, dækker tidsrum fra ti- til hundrede tusinder af år. De lange tidsrum afspejler også den usikkerhed, der er på dateringen af sedimenterne. Sammenlignet med nutidige geografiske kort fremstår de palæogeografiske kort

som noget generaliserede. Det skyldes også, at mange detaljer i kystlinjens udseende ikke er bevaret i den geologiske lagserie.

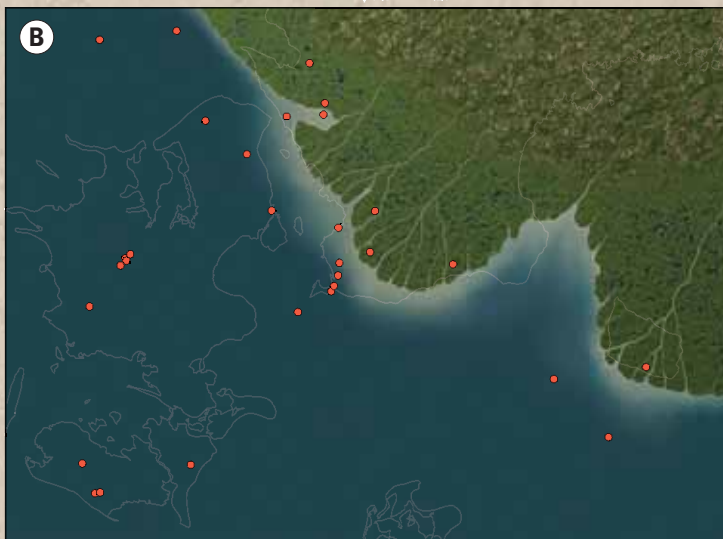
Ørken i sen Trias (Norien)

Generelt er sedimenterne fra landjorden fra sen Trias (til og med Norien) domineret af røde og grønne sandsten og lersten, som i Skåne henføres til Kågerød Formationen (figur 15). Sedimenterne blev aflejret i et ørkenmiljø. Aflejringernes røde farve kendes fra mange nutidige områder med tørt klima, og udfældningen af kalk i jorden (caliche) peger mod et aridt (tørt) eller semi-aridt klima. Den røde farve skyldes jernforbindelser, som blev iltet i det tørre og varme klima. Selv i tørre ørkner vokser der planter, men rester fra dem bevarer dårligt. Manglen på sporer og pollen betyder, at vi ikke rigtig ved, hvordan vegetationen

så ud på den tid. Nogle få pollen, der er blevet bevaret i tilfældige søer eller vandløb, antyder at vegetationen var sparsom med visse nåletræer og andre nøgenfrøede planter, der kunne klare sig med meget lidt vand (figur 20A).

Kystlinjen lå ude i Det Danske Bassin, muligvis i nærheden af Stenlille, hvor Vinding Formationen er påvist. Vinding Formationen er en marin aflejring, som stedvis indeholder dolomit og anhydrit. Disse mineraler peger på, at havvandet i perioder havde et forhøjet saltindhold pga. stor fordampning.

Tilsvarende røde sedimenter kendes fra store dele af Europa og viser, at Danmark og Skåne var en del af et regionalt klimabælte. Ændringen fra (semi)aride til humide (fugtige) klimaforhold skete omkring overgangen fra Norien til Rhaetien i sen Trias.



Figur 20B. I slutningen af Rhaetien blev klimaet fugtigere, og havniveauet i vores område steg, således at kysten rykkede mod øst, ind i det vestlige og sydlige Skåne. I lavlandet inden for kysterne dannedes sumpskove, hvor dyr (fx Gerrothorax og dinosaurer) og planter (fx ginkgoer, sumpcypresser, og bregner) kunne trives.

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

Gerrothorax.

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

Sumpskove i slutningen af Trias (Rhaetien)

I starten af Rhaetien blev klimaet pludselig fugtigere, sandsynligvis fordi Tethys-havet havde bredt sig længere nordpå og efterhånden dækkede store dele af det nordvestlige Europa med et lavvandet hav. I vores del af verden var det meste af Sverige land, medens store dele af Danmark var hav (figur 20B). Lagfølgen fra Albert-1 og Norra Albert viser forløbet af Trias-transgressionen, idet Kågeröd Formationen overlejres af Vallåkra Led (overvejende søsedimenter) og af Bjuv Led (overvejende ikke-marin, men med spor af MFS7, den regionale marine drukningsflade). En flad kyst strakte sig ned over Skåne. Floder fra nordøst transporterede eroderet materiale (grus, sand og ler) ud til havet.

Gassum Formationen (figur 15) tolkes som en sandet havaflejrning og har ingen indier for aride klimaforhold. Den større tilførsel af sand til de kystnære områder kunne pege på et klima med større nedbør og større afstrømning via floderne, og dermed øget sedimenttilførsel til kystzonen. Formationen er tolket som aflejret overvejende på øvre

strandplan (figur 8). Der er dermed sket en transgression fra Kågeröd Formationen til Gassum Formationen og en forskydning af kystlinjen mod nord og øst.

Sedimenterne fra det lavvandede hav indeholder mange forskellige typer af sporfosiler, som viser, at der var meget liv på bunden, men vi ved ikke meget om hvilke dyr, der levede i havbunden. I lagene fra Rhaetien i den danske undergrund findes flere typer af muslinger, ostrakoder (små krebsdyr), hajer og fisk bevaret som fossiler. Pollenprøverne viser, at havet var rigt på fytoplankton, såsom dinoflagellater (boks side 11) og andre mikroalger. Disse er særlig hyppige i en sort lersten, der blev aflejret da en havniveau-stigning (MFS7) druknede store områder af den flade kyst.

Det stigende havniveau fik også virkning inde på land. Her steg grundvandsspejlet og lavtliggende områder omdannedes til sumpskove (figur 20B). Her voksede træer som sumpcypres, træbregner og stedvis ginkgo og frøbregner, med en bundbeplantning af bl.a. bregner og padderokker. Ude ved kysten voksede sandsynligvis mere hårdføre nåle-

træer af familien Cheirolepidiaceae. *Gerrothorax*, som var et ca. 1 meter langt amfibie-lignende rovdyr (se ovenfor), som levede i de lavvandede søer, mens en middelstor, tre-tået, kødædende dinosaur færdedes på landjorden, hvor dens fodspor (sporene kaldes *Kayenthapus*) stedvist er bevaret se side 18. Mange planterester blev omdannet til tørv i sumpene, og disse tørvelag er senere presset sammen til brunkul og stenkul. Drivtømmer blev til tider transporteret med floderne ud til kysten og mange små stumper af forkullede planterester findes i muddersten både på land og i havet. De er med til at give sedimenterne fra denne periode en grålig farve, som adskiller sig tydeligt fra de ældre sedimenteres røde farve. De grå til sorte muddersten har gode bevaringsforhold for sporer og pollen, og ind imellem findes også plante-makrofossiler, i form af hele blade.

Omkring MFS7 er floraen karakteriseret af et aftagende indhold af træpollen, som først ses i *Ricciisporites*, derefter i Cheirolepidiaceae og sidst i sumpcypresserne (figur 16). Samtidig øges indholdet af træbregner.



Væltede træstammer, der blev transporteret med floderne, er senere blevet indkapslet i siderit. Her ses en træstamme fra Norra Albert.

Foto: Sofie Lindstrøm, GEUS.

Figur 20C. Skovdød i det allerseneste Rhaetien. Mangel på store planter, der kunne holde på jorder og sedimenter under tordenvejr og skybrud, gjorde at store mængder sediment blev transporteret i flettede floder (Boserup beds) mod havet. På en lokalitet i Skåne har man fundet fodspor af en hel flok dinosaurer. Måske flygtede de fra en skovbrand, antændt af lyn, som vist på billedet. Se også forsiden af bladet.

Illustration: Stefan Sølvberg, GEUS.

I Skåne har man fundet fodspor Kayenthapus af tretåede dinosaurer. Længden af sporene er ca. 25 cm.

Foto: Michael Erlström.



Erosion i et træløst landskab (allerseneste Rhaetien)

I allerseneste Rhaetien skete der pludselig noget dramatisk. I Norra Albert skifter aflejningsmiljøet fra de kuldannende sumpskove og lersten til grovkornet, dårligt sorteret sand aflejret af flettede floder, en enhed, der kaldes Boserup-lagene, se figur 9 og 18B. I disse findes mange sideritkonkretioner, dvs. knolde af jernkarbonat (FeCO_3) se side 15. I visse niveauer optræder sideriten som mikroskopiske kugler, sfærosideriter, der er rytmisk zonerede, se figur 19B. Zoneringen viser, at der var svingninger i grundvandsniveauet da sfærosideriterne dannedes, måske på grund af svingninger mellem tørre og våde perioder. I det sfærosideriterne er dannet stort set samtidig med seismitterne kan ændringerne i grundvandsniveau muligvis også være et resultat af jordskælvsrystelserne.

Der skete også store ændringer i vegetationen inden for Boserup-lagene og den grå siltsten. En særlig type af pollen, *Ricciisporites*,

dominerer sammen med sporer fra lave bregner af familien Schizaeaceae, og træbregner. Bortset fra de mærkelige *Ricciisporites* er pollen fra træer meget sjældne. Boserup-lagene svarer længere vestpå ved Stenlille til en grå siltsten med det samme palynologiske indhold (figur 12 og 16).

Figur 20C viser et næsten træløst landskab, hvor plantedækket ikke er tilstrækkeligt til at holde på jorden, som derfor bliver vasket ned i floderne under kraftig regn. Mange små trækulspartikler viser, at der i denne periode var en øget hyppighed af skovbrande. Disse må formodes at være antændt af lynnedslag, og man kan derfor formode, at der var hyppige tordenvejr, og derfor sikkert også kraftige regnbyger, som eroderede i jordlagene. Pollen-prøverne indeholder ind mellem palynomorfer, der er ældre end forventet. Dette skyldes, at erosion nedbryder ældre lag og deres pollen-materiale bliver så inkorporeret i de lag, der bliver aflejret samtidig med erosionen. Sædvanligvis er de om-

lejrede palynomorfer få, men lige i Boserup-lagene og i den grå siltsten er der vældig mange omløjrede palynomorfer. Dette viser tegn på en øget erosion af landjorden på denne tid. I toppen af den grå siltsten forsvinder Schizaeaceae-bregner og *Ricciisporites* pludselig, og i stedet dominerer først padderokker og efterfølgende sumpcypresser, se figur 16.

Hvorfor forsvandt næsten alle træer? Skovdøden kan måske ikke udelukkende skyldes tilførsel af CO_2 fra vulkanismen, men eksplosive vulkanudbrud kan have sendt store mængder støv og aske op i atmosfæren og øget dannelsen af skyer og dermed torden. Øget frekvens af tordenvejr med skybrud og skovbrande til følge kan have spillet en rolle i at svække vegetationen. Endvidere kan sur regn fra SO_2 , og andre giftige gasser fra vulkanismen, lige som ved Laki-udbruddet, se side 6, være en mulig forklaring på træernes tilbagegang. Såvel træbregner som Schizaeaceae-bregner agerede som pionerplanter, der invaderede 'badland'-områderne.



En moderne deltaslette (Everglades Nationalpark i Florida) med masser af vegetation og udstrakte vådområder.

Foto: Henrik Højmark Thomsen, GEUS.

Figur 20D. I tidligste Jura begyndte vegetationen at komme sig igen. I deltaområder langs Skånes kyst opstod sumpområder domineret af bregner og træbregner. Træer er igen til stede, men er ikke helt så hyppige som før katastrofen, og mange plantearter forsvandt under den biologiske krise.

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

En rothorison fra Sose Bugt overlejret af et tyndt kulag. Dette er, hvad der, geologisk set, bliver tilbage af en frodig vegetation (og endda kun, hvor forholdene er gunstige for at bevare plantematerialet).

Foto: Stig A. Schack Pedersen, GEUS.



Reetablering af vegetation i tidligste Jura

Det mærkelige er, at samtidig med det største negative udsving på C-isotopkurven begyndte et nyt plantesamfund at etablere sig (figur 16). Det ligner på en del punkter det, som fandtes før krisen (se figur 20B), med moser med bregner og træbregner, mos og enkelte sumpcypresser. I baglandet, hvor jorden var bedre drænet, voksede fyrretræer, men mange planter, der havde været vigtige i Rhaetien-tidsafsnittet forsvandt eller blev stærkt svækket (figur 16). Isotopsammensætningen af atmosfærens CO₂ normaliseres igen, efter

nogle kortvarige, ekstreme udsving. Dette betyder dog ikke, at der ikke fortsat var vulkansk aktivitet, men blot at denne må have ændret karakter.

Den nedre jurassiske transgression

Ændringen i aflejringsforhold og i kystlinjens beliggenhed fra Hettangien til ældre Pliensbachien er ikke vist på et palæogeografisk kort. Sedimenterne fra Nedre Pliensbachien viser, at kystlinjen lå længere mod øst og nordøst, da Bornholm og det vestlige Skåne blev druknet og Hasle Formationen på Born-

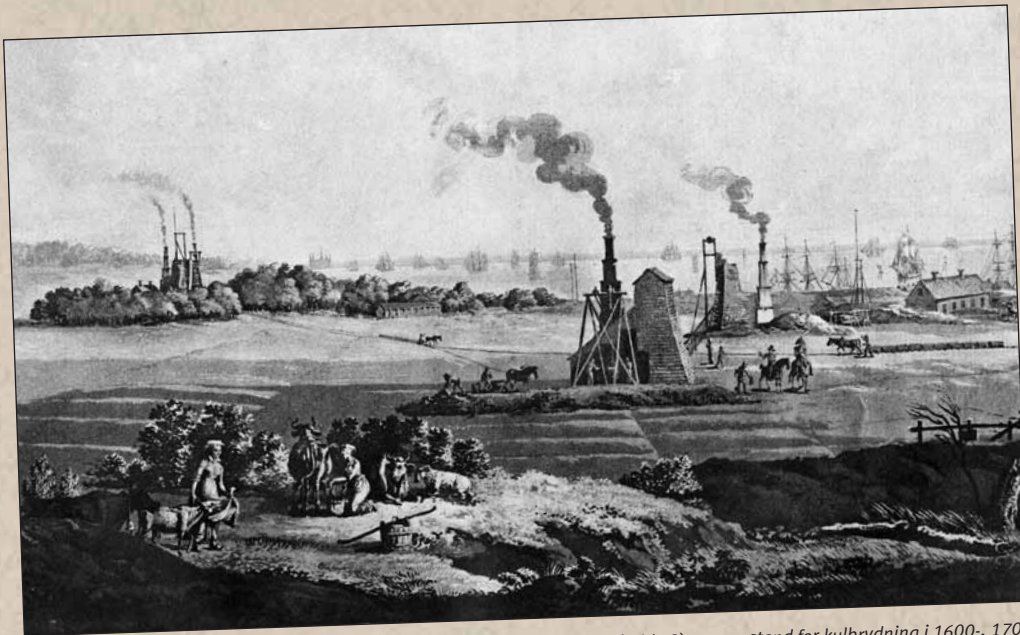
holm og Rya Formationen i det vestlige Skåne blev aflejret (figur 15).

Ammonitter (blæksprutter) i marine lersten ved Rønne viser, at forholdene på Bornholm nu var fuldt marine, og Hasle Formationen repræsenterer kulminationen af udviklingen fra landjordsforhold (Kågerød Formationen, Munckerup Led i Rønne Formationen) til havmiljøer. Også i Rya Formationen har man fundet en rig fauna af marine invertebrater (muslinger, ammonitter, ostrakoder, foraminiferer). Mange observationer peger på, at transgressionen nær basis af Pliensbachien (MFS 12, figur 15) var en regional hændelse.



Den enes død – den andens brød

Selv om en masseuddøen betyder at mange organismer forsvinder, giver den også muligheder for at nyt liv kan udvikles og brede sig. Efter enhver af de store kriser, der har været i livets og jordens historie, er livet på Jorden kommet sig igen. Måske ville vi mennesker, og mange dyr og planter med os, ikke have eksisteret, hvis der ikke havde været andre grupper, som var bukket under? Men selv hvis vi lever under trussel om at vores Jord bliver ramt af meteorit-nedslag, som ved slutningen af Kridttiden da dinosaurerne uddøde, eller massiv vulkanisme som ved slutningen af Perm- og Trias-tiden, så bør vi selv tage vare på vores verden. Det er en følsom balance at bruge Jorden og dens ressourcer og ikke forurene og skabe store sår og ubalance i naturen.



Kulbrydning ved Höganäs: De skånske kullag A og B (se figur 9, 10 og 11 på side 9) var genstand for kulbrydning i 1600-, 1700-, og 1800-talet, både i åbne brud og i minegange, og var af særlig stor betydning i den tidlige industrialisering. Billedet viser gru-beområdet ved Höganäs som det så ud i starten af 1800-tallet.

Kilde: tegning af Billqvist, samtidig gravering af M.R. Heland (1805).

GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, samt Geologisk Museum (Statens Naturhistoriske 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.

ISSN 1604-6935 (PAPIR)

ISSN 1604-8172 (ELEKTRONISK)

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 Annette Thy, tlf.: 91 33 35 03, e-mail: athy@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsideillustration: Rekonstruktion af miljøet under den Slut-triassiske masseuddød.

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.



GEUS

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



INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB OG
NATURFORVALTNING (IGN)

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 35 32 25 00

E-mail: sl@life.ku.dk



INSTITUT FOR GEOSCIENCE (IG)

Aarhus Universitet

Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670

8000 Århus C

Tlf: 89 42 94 00

E-mail: geologi@au.dk

GEOLOGISK MUSEUM (SNM)

Øster Voldgade 5-7

1350 København K

Tlf: 35 32 23 45

E-mail: rcp@snm.ku.dk

DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439

PortoService, Postboks 9490, 9490 Pandrup