

MYSTERIET OM JORDENS KONTINENTER OG PLADETEKTONIK



Kristoffer Szilas på feltarbejde i Grønland. De gul-grønne klipper er peridotit, som er den bjergart der udgør Jordens kappe. De mørke lag er kromoxid med et meget højt indhold af det sjældne grundstof ruthenium. De lyse klipper i baggrunden er 3,8 milliarder år gammelt grundfjeld.

Foto: Tomoaki Morishita.

Forfatteren

Kristoffer Szilas er lektor i geologi ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han har tidligere været postdoc ved Columbia University og Stanford University i USA.

Kristoffer har udført feltarbejde i Grønland i 13 somre og er dermed en af de førende eksperter i verden, når det kommer til at forstå Jordens tidlige geologiske udvikling med udgangspunkt i bjergarter fra Grønland.

Hans forskning er støttet af Villum Fonden og Carlsbergfondet. Desuden fik han i 2020 en Sapere Aude-bevilling fra Danmarks Frie Forskningsfond til at undersøge, hvad bjergarten anortosit fra Sydvestgrønland kan fortælle os om pladetektonikkens opståen her på Jorden.

krsz@ign.ku.dk

Hvornår startede pladetektonikken på Jorden egentlig?

Det er et af geologiens store spørgsmål. Den nyeste forskning peger på, at for 3,0 til 2,5 milliarder år siden opstod processer, som vi i dag mener er karakteristiske for pladetektonik, og at vand spillede en afgørende rolle for dannelsen af de første kontinenter.

Vores planet er unik på mange måder: Først og fremmest myldrer det med liv, atmosfæren indeholder store mængder fri ilt, størstedelen af planetens overflade er dækket af oceaner, og vi har kontinenter, der hovedsageligt er opbygget af granit. Sidst men ikke mindst har vi pladetektonik, hvilket vil sige at Jordens yderste lag, kaldet litosfæren, er brudt op i store plader, der er i konstant bevægelse. Pladetektonikken sørger for, at Jordens overflade kontinuerligt fornyes

ved, at materiale fra undergrunden konstant kommer op til overfladen. Det medfører kemiske ulige vægte, som er drivkraften for al liv. Desuden fungerer den konstante eksponering af nye mineraler som en termostat for klimaet via erosionsprocesser, der binder mere eller mindre kuldioxid fra atmosfæren afhængigt af overfladetemperaturen og dermed reaktionshastigheden. På den måde har Jordens klima holdt sig nogenlunde stabilt på trods af Solens stigende aktivitet over geologisk tid.

Disse unikke kendetegn for Jorden er primært resultatet af to egenskaber.

Den ene er Jordens størrelse, hvilket medfører en relativt langsom afkøling af planeten sammenlignet med mindre planeter såsom Mars og Merkur. Disse har en større overflade per masse-enhed og afkølede derfor hurtigt, så de nu er tektonisk inaktive. Det er varmeafgivelsen fra Jordens indre, blandt andet fra radioaktive henfald, som driver de tektoniske processer via konvektion i Jordens kappe.

Den anden vigtige egenskab er Jordens kraftige magnetfelt, som induceres af den flydende ydre kerne. Magnetfeltet skærmer imod, at der tabes hydrogen fra atmosfæren, og dermed har Jorden undgået at miste sit vand over tid, som det for eksempel er tilfældet på Venus. Netop evnen til at fastholde vand over milliarder af år, har været afgørende for, at Jorden fremstår som den frodige planet, vi har i dag.

Et af geologiens store uløste problemer

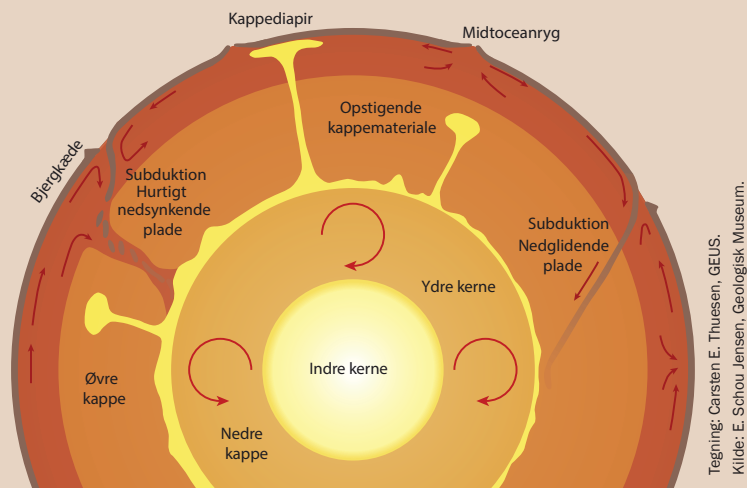
På trods af pladetektonikkens afgørende betydning for liv og Jordens udvikling samt det faktum, at denne geologiske proces, så vidt vi ved, er unik for vores planet, er der ingen konsensus om, hvornår pladetektonik opstod. Faktisk strækker estimaterne sig fra helt tilbage for over 4 milliarder år siden og frem til for omkring 1 milliard år siden.

Det må siges at være en betydelig usikkerhed, selv for geologer der er vant til at arbejde med lange tidsskalaer. Man anser derfor spørgsmålet om pladetektonikkens opståen som et af det mest fundamentale uløste problemer indenfor geologien. Interessen for at finde et præcist svar er ikke blevet mindre i takt med, at der til stadighed opdages nye planeter omkring andre stjerner i Mælkevejen. For hvordan kan vi tolke observationerne af fremmede planeter og deres geologiske evolutionstrin, når vi dårligt nok forstår vores egen planets geologiske udvikling?

Fysiske beviser er ikke bevaret

Vi ved, at der ikke kunne eksistere stabile litosfæreplader, som kunne skabe pladetektonik, i Jordens tidlige fase for 4,5 til 4,0 milliarder år siden, fordi Jordens kappe (det vil sige Jordens midterste lag) dengang var betydeligt varmere.

Jordskorpen var derfor ganske enkelt for varm og dermed deformbar, og den højere temperatur gav desuden for meget opdrift til, at litosfærepladerne kunne skubbes ind under hinanden og



Tegning: Carsten E. Thuesen, GEUS.
Kilde: E. Schou Jensen, Geologisk Museum.

Vigtige begreber indenfor pladetektonik

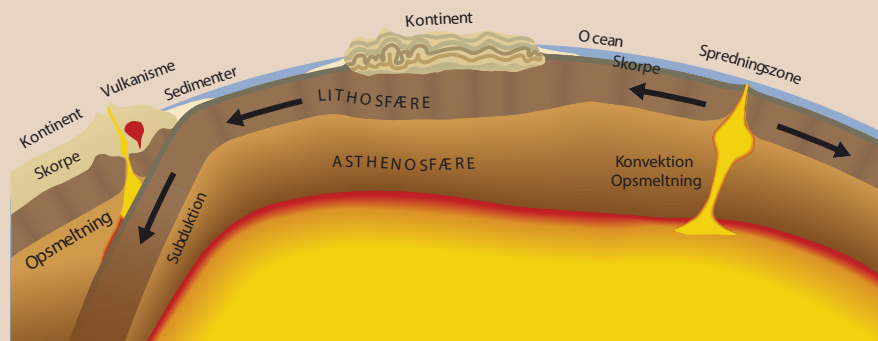
Jorden er helt overordnet opbygget af tre lag.

Kernen findes inderst i Jorden og består hovedsageligt af jern.

Kappen er Jordens midterste lag, og det udgør over 80 % af Jordens volumen. Kappen består af bjergarten peridotit, som er domineret af mineralerne olivin og pyroxen.

Skorpen er Jordens yderste lag. **Kontinentalskorpe** består primært af granit og kan have varierende indhold af mineralerne kvarts, plagioklas og alkalifeldspat. **Oceanbundsskorpe** består af bjergarten basalt, der primært er opbygget af mineralerne plagioklas, pyroxen og olivin.

Litosfæren er en samlet betegnelse for jordskorpen plus den øverste kolde del af kappen, som udgør en stabil plade, der kan bevæge sig som en samlet enhed ovenpå den varme og deformerbare kappe (kaldet astenosfæren).



Modificeret. Originaltegning: Carsten E. Thuesen, GEUS. Kilde: Niels Henriksen, Grønlands Geologiske udvikling, GEUS.

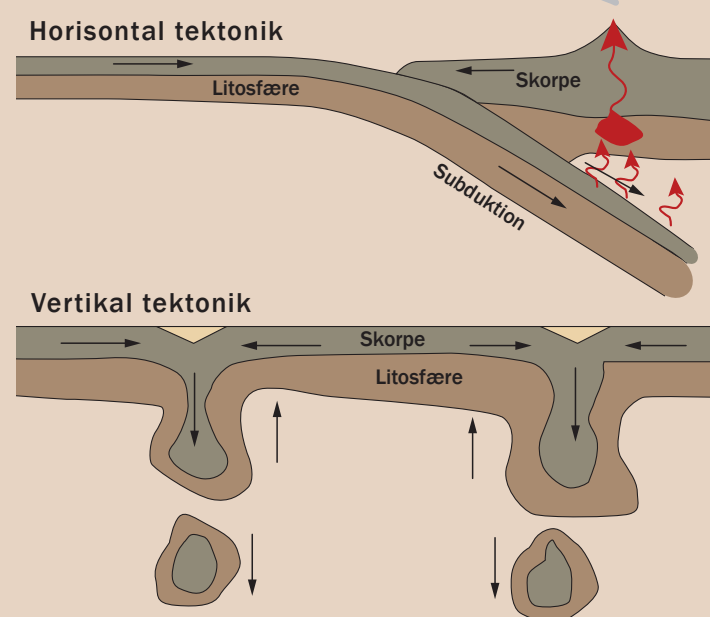
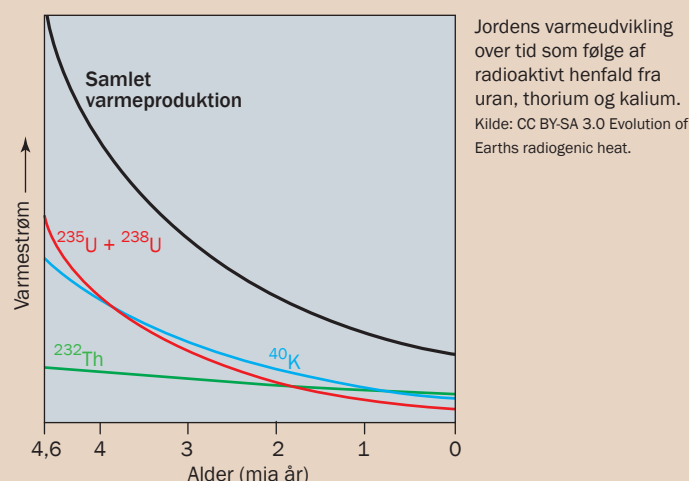
Pladetektonik er den teori, der beskriver litosfære-pladernes bevægelse imod, forbi eller bort fra hinanden.

Subduktion er den proces, hvor to litosfære-plader kolliderer og den ene plade skubbes under den anden. Dette medfører vulkanisme med en karakteristisk lava, som man kalder andesit (opkaldt efter Andesbjergene).

Basalt er den bjergart, der udgør oceanbundsskorpen. Ved subduktion af basaltisk skorpe transformeres den først til blåskifer (domineret af det blå mineral glaukofan) og derefter bliver den til eklogit (der består af mineralerne granat og pyroxen).

Arkæikum er navnet på det Arkæiske æon, der startede for 4,0 og sluttede for 2,5 milliarder år siden.

Kraton er en stabil litosfærisk enhed med tyk kontinentalskorpe og meget dyb litosfærisk kappe, der typisk er dannet tilbage i Arkæikum og kan opnå en samlet tykkelse på op til 250 km.



Figurene illustrer forskellen på vertikal tektonik i Jordens tidlige og varme fase ift. horisontal (plade)tektonik. Efter en vis grad af afkøling af Jordens kappe og skorpe, blev det muligt at have stabile litosfæriske plader og dermed subduktionszoner, hvor kolliderende plader kan forskydes under hinanden.

Figur efter <https://speakingofgeoscience.org/2013/04/28/when-did-plate-tectonics-begin-on-earth-and-what-came-before/>



Bjergarten basalt (til venstre) er den mest udbredte bjergart på Jordens overflade, og oceanbundensskorpen under lagene af sedimenter, der er aflejret i havet i tidens løb, består af basalt. Det er en mørk bjergart, der primært er opbygget af silikatminerallerne plagioklas, pyroxen og olivin. Kontinenterne består derimod primært af bjergarten granit (til højre), som kan optræde i mange forskellige farvenuancer afhængig af sammensætning af mineraler. Granit er primært opbygget af silikatminerallerne kvarts, plagioklas og alkalifeldspat.

Foto af basalt: James St. John/CC BY 2.0, Foto af granit: Colourbox.

ned i Jordens kappe, sådan som det foregår i de såkaldte subduktionszoner, som er et af de mest karakteristiske træk ved pladetektonik (se faktaboks). I stedet har der været en form for vertikal tektonik, der mindede om det, man ser i en lavalampe, hvor varme dele stiger op og relativt koldere dele synker direkte ned.

Desuden viser geodynamisk (numerisk) modellering os, at overgangen til pladetektonik var en gradvis proces, hvor svage og deformerbare plader begyndte at synke ned i kappen, men knækkede efter kort tid og lukkede ned for subduktionsprocessen igen. Usikkerheden i tidspunktet for pladetektonikkens begyndelse skyldes dog også til dels, at det ikke er helt let at finde fysisk evidens i form af diagnostiske bjergarter som eklogit og blåskifer, der kun dannes ved kombinationen af højt tryk og relativ lav temperatur, som netop er karakteristisk for subduktionszoner og dermed pladetektonik. Højtryksmineraller har nemlig et meget dårligt bevaringspotentiale i jordskorpens øvre dele og omdannes derfor let til andre mineraler, der er mere stabile ved det lavere tryk. Dette kan forklare, hvorfor man ikke finder eklogit, der er ældre end 2,1 milliarder år og kun finder blåskifer for de seneste 900 millioner år.

Dannelsen af de første kontinenter

Traditionelt har man i geologien antaget, at Jordens granitiske kontinenter blev dannet som konsekvens af pladetektonik, fordi kontinenternes kemiske sammensætning i høj grad minder om den type lava (kaldet andesit), som man finder i vulkaner over subduktionszoner, hvor de tektoniske plader kolliderer. Det har dog vist sig, at de første kontinenter på Jorden formentlig blev dannet uden involvering af overfladenære materialer og bjergarter. De blev i stedet dannet med udgangspunkt i tyk skorpe af bjergarten basalt, som delvist smeltede i en dybde af 20-35 km og dermed gav ophav



Kristoffer Szilas peger på en tre milliarder år gammel granitisk åre, som er dannet ved delvis opsmeltning af en basaltisk bjergart i forbindelse med en proces, der ikke krævede pladetektonik. Foto: Kent Pørksen.

til en smeltemasse med en anden kemisk sammensætning end den oprindelige basalt, nemlig granit. Denne form for destilleringsproces kaldes i geologien for differentiering eller fraktionering. Ved at undersøge isotopsammensætningen af ilt i mineralet zirkon fra den ældste kontinental-skorpe i Australien (det 3,45 milliarder år gamle Pilbara-kraton), er det for nyligt blevet vist, at dannelsen af granitisk materiale ikke kræver atmosfærisk ilt, havvand eller overfladenære processer. Et lignende resultat har man fundet for den ældste kontinentalskorpe i Grønland (den over 3,6 milliarder år gamle Itsaq gnejs), hvor man via isotopsammensætningen af grundstoffet bor kunne vise, at der ikke har været havvand involveret. Dermed kræves heller ingen overfladenære bjergarter i dannelsen af den tidlige granitiske skorpe i Grønland.

Granitiske kontinenter kan altså opstå uafhængigt af, om der er pla-

detektonik eller ej. Jordens tidlige varme fase var som nævnt karakteriseret af vertikal tektonik efter samme princip som en lavalampe, og det var derfor i et sådant miljø, at de første kontinenter opstod.

Påvirkede liv den geologiske udvikling?

Det kan synes oplagt, at der er en sammenhæng mellem tilstedeværelsen af liv, vand, kontinenter og pladetektonik, fordi alle disse fænomener er unikke for vores planet. Professor Minik Rosing og kolleger lancerede i 2006 i tidsskriftet *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* den idé, at liv spillede en væsentlig rolle for dannelsen af Jordens tidlige kontinenter. Argumentet lyder, at fotosyntese indfanger mere energi fra sollys end det varmetab, som genereres fra Jordens indre og må derfor have en indflydelse på den geokemiske cyklus og derigennem dannelsen af kontinenterne. Denne hypotese

nævnes ofte, når forskningsemnet præsenteres i populærvidenskabelig sammenhæng her i Danmark. Men i det internationale, videnskabelige miljø er ideen ikke slået an. Den nævnes således stort set ikke i den nyeste internationale litteratur på området og bringes aldrig på banen som en faktor for dannelsen af de tidlige kontinenter.

Evidensen fra isotopundersøgelserne nævnt ovenfor argumenterer også imod, at overfladenære materialer har været involveret i dannelsen af de tidlige kontinenter. Desuden er det vurderet, at op imod 75 % af kontinenternes nuværende volumen allerede var dannet for mere end 2,5 milliarder år siden. Dermed også sagt, at de vertikale tektoniske processer, som har fundet sted i tiden forud, tilsyneladende har været meget effektive til at opsmelte jordskorpe af basalt og herudfra danne kontinentalskorpe af granit. Det var ligeledes

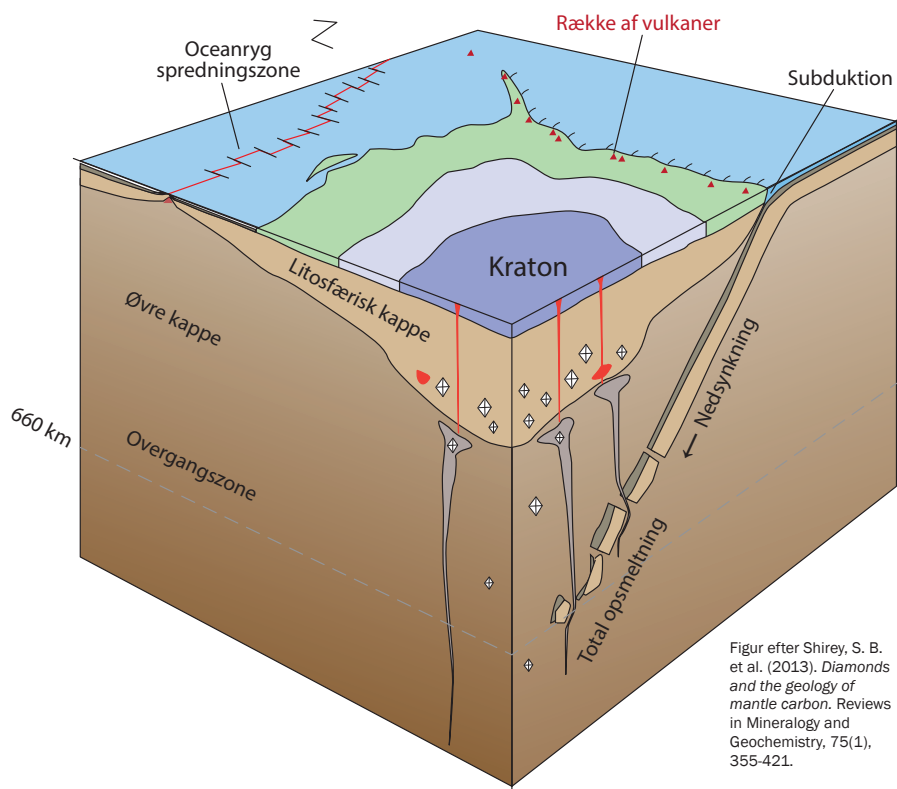


Illustration af et kraton, som udover gammel stabil granitisk kontinentalskorpe har et robust fundament af subkontinental litofærisk kappe. Den subducerende litofærisk plade viser dels den mekanisme, som har samlet og fortykket den litofærisk kappe via horisontal kompression, men det er også den måde, hvorpå eklogit og sedimentært kulstof er bragt ned under kratonet til dybder, hvor der dannes diamanter.

først efter dette tidspunkt, at der blev akkumuleret større mængde ilt i atmosfæren. Det faktum, at granitisk kontinentalskorpe allerede blev dannet fra omkring 4 milliarder år siden (Acasta-gnejsen i Canada), og dermed længe før, at der har været nævneværdigt liv eller ilt på Jorden, betyder, at liv ikke har været en afgørende ingrediens i dannelsen af kontinenter.

Hvis liv havde spillet en rolle i dannelsen af kontinenterne, vil man desuden forvente, at man kunne observere en øget rate i dannelsen af kontinenter over tid, fordi der konstant er kommet mere liv til. Det passer dårligt med, at størstedelen faktisk blev dannet før 2,5 milliarder år siden. Hypotesen om livs rolle for dannelsen af kontinenterne kan derfor efter min mening afvises, hvilket også afspejles i den nyeste litteratur på området. I stedet er det sandsynligt, at liv er en konsekvens af planetens evne til at holde på vand over lange tidsrum, og at kontinenterne og pladetekto-

nik er grundlaget for, at komplekst liv kunne udvikle sig med tiden.

Vand som forudsætning for kontinenter

I modsætning til liv eller ilt, så spiller vand en afgørende rolle for dannelsen af granitiske kontinenter. Vand findes som OH-grupper i hydrerede mineralers struktur og optræder først som frit vand ved dehydrering af disse mineraler omkring smeltepunktet for bjergarten. Vandet har den kritiske egenskab, at det sænker smeltepunktet for bjergarter betydeligt. For eksempel vil en basalt i tør tilstand først begynde at smelte ved 1100 °C, men hvis der er vand til stede, kan den smelte ved 650 °C i 30 kilometers dybde. Vand gør det dermed lettere at danne granitiske kontinenter med udgangspunkt i den oprindelige basaltiske skorpe via delvis opsmeltning. Dette er bekræftet både eksperimentelt og ved termodynamisk modellering. Man ser et markant skifte i typen og den kemiske sammensætning af granitisk

kontinentalskorpe igennem det Ar-kæiske æon (4,0 til 2,5 milliarder år før nu). Dette falder sammen med dannelsen af stabile kontinenter, der var underlagt af tyk litofærisk kappe, hvilket som enhed kaldes for kratoner.

Jeg har selv været involveret i et studie, der for nylig er publiceret i tidsskriftet *Nature*, som sammenfatter den eksisterende viden om dannelsen af den kolde litofærisk del af kappen og dens betydning for stabiliseringen af kratoner. Vi konkluderede, at denne type kappe primært blev dannet for omkring 2,5 milliarder år siden ved relativt lavt tryk og efterfølgende blev bragt til større dybde via kompressive kræfter, hvilke krævede tilstedeværelsen af horisontal tektonik. Konsekvensen af dette er derfor, at kratonerne først blev dannet, efter at pladetektonik opstod her på Jorden.

Diamanter indeholder svaret

I samme forbindelse viser det sig, at noget af den stærkeste og helt uafhængige evidens for, at pladetektonik opstod for omkring 3 milliarder år siden, kommer fra den type af mineraler, man finder som mikroskopiske indeslutninger i diamanter. Fragmenter af oceanbundsskorpe i form af bjergarten eklogit (der dannes ud fra basalt i subduktionszoner) ses ikke i diamanter før for 3 milliarder år siden.

Dette underbygges yderligere af diamanterens isotopsammensætning af kulstof, nitrogen og bor, fordi disse viser en stor variation op til for 3 milliarder år siden. Dette tolkes som et bidrag fra havvand, sedimenter og eventuelt biologisk fraktioneret kulstof, der via subduktionszoner blev bragt fra Jordens overflade og ned til dybder på omkring 200-250 km, hvor kulstoffet transformerede til diamanter, hvilket indbyggede disse kemiske signaturer. Det indebærer altså, at subduktionszoner og dermed pladetektonik opstod for omkring 3 milliarder år siden. Det understøttes desuden af et væld af forskellige geokemiske studier, der tyder på, at jordskorpens sammen-



Kristoffer Szilas og specialestuderende Will Hyde indsamler prøver af peridotit i sydvestgrønland. Foto: Kent Pørksen.

Videre læsning
Johnson, T. E., et al (2017): Earth's first stable continents did not form by subduction. *Nature*, 543(7644), 239-242.

Palin, R. M., et al (2020): Secular change and the onset of plate tectonics on Earth. *Earth-Science Reviews*, 207, 103172.

Pearson, D. G., et al (2021): Deep continental roots and cratons. *Nature*, 596(7871), 199-210.

Rosing, M. T., et al (2006): The rise of continents—an essay on the geologic consequences of photosynthesis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232(2-4), 99-113.

Shirey, S. B., & Richardson, S. H. (2011): Start of the Wilson cycle at 3 Ga shown by diamonds from subcontinental mantle. *Science*, 333(6041), 434-436.

sætning ændrede sig fra omkring dette tidspunkt og frem til for omkring 2,5 milliarder år siden.

Den nye forskning peger altså på, at der ikke krævedes ilt eller biologisk aktivitet, men derimod vand, for at danne de tidlige kontinenter. Desuden er der ingen direkte kobling mellem pladetektonik og dannelsen af kontinenterne, fordi sidstnævnte

sker som følge af delvis opsmeltning af basaltisk materiale ved tilstedeværelse af vand, uanset det tektoniske miljø.

Hvad angår spørgsmålet om, hvornår pladetektonikken helt præcis opstod, så er der som nævnt mange kilder af geologisk evidens, der tyder på, at der imod slutningen af Arkæikum for omkring 3,0

til 2,5 milliarder år siden opstod processer, der minder om den type pladetektonik, vi kender fra Himalaya og Andesbjergene i dag. Denne tektoniske overgang og stabiliseringen af kratonerne havde desuden betydning for bjergkædedannelse og erosionsrater og havde derigennem konsekvenser for atmosfærens sammensætning og livets videre udvikling. ■

FAKTA

Johanne Pontopidan Tuxen og Mikkel Vuorela: *Naturvidenskab genfortalt*. Informations forlag 2021. 422 sider, 399,95 kr.



Naturvidenskab genfortalt

I hele 2021 har dagbladet Information sat fokus på naturvidenskab i artikel- og podcastserien *Vi fortæller naturvidenskab forfra*. Serien er støttet af Carlsbergfondet, og som en del af projektet er nu også udkommet bogen *Naturvidenskab genfortalt*. Bogen er en indføring i naturvidenskab og dens erkendelsesrejse. I selskab med en lang række naturvidenskabelige forskere tilbyder de en grundlæggende forståelse af naturens komplicerede sammenhænge – og et udgangspunkt for at forstå vores tids største udfordringer.

FAKTA

Eskild Dohn, Sigurd Barrett: *Sigurd fortæller om naturvidenskab*. Illustreret ved Jørgen Eivind Hansen. Politikens forlag 2021. 352 sider, 300 kr.



Sigurd fortæller om naturvidenskab

Entertaineren Sigurd Barrett er nu aktuel med projektet *Sigurd fortæller om naturvidenskab*, som består af en bog, hvori Sigurd forklarer alt, hvad vi ved om vores verden, en aktivitetsbog med sjove opgaver og eksperimenter for hele familien samt et brætspil, der inviterer deltagerne på en spændende rejse ind i naturvidenskabens verden. Sigurd tager desuden på en omfattende turné på 100 koncerter rundt i hele landet.