

Figur 14. Super-kontinentet Gondwana-land med kulførende aflejringer (sort). Efter B. Laska.

OP OG NED EFTER ISTIDEN

af Niels Just Pedersen.

Ser man på et landskabskort over Danmark - figur 1, vil hovedstrukturene straks træde frem: et morænedomineret landskab i Østdanmark og et hedeslettelandskab med bakkeføer i den sydvestlige del af Jylland.

Går man mere i detalje vil det ses, at andre landskabstyper også optræder. En af disse er hævet havbund. Hævede marine flader er områder, der tidligere har været havdækket, men som nu er tørlagt ved en relativ hævnning af havbunden i forhold til havspejlet.

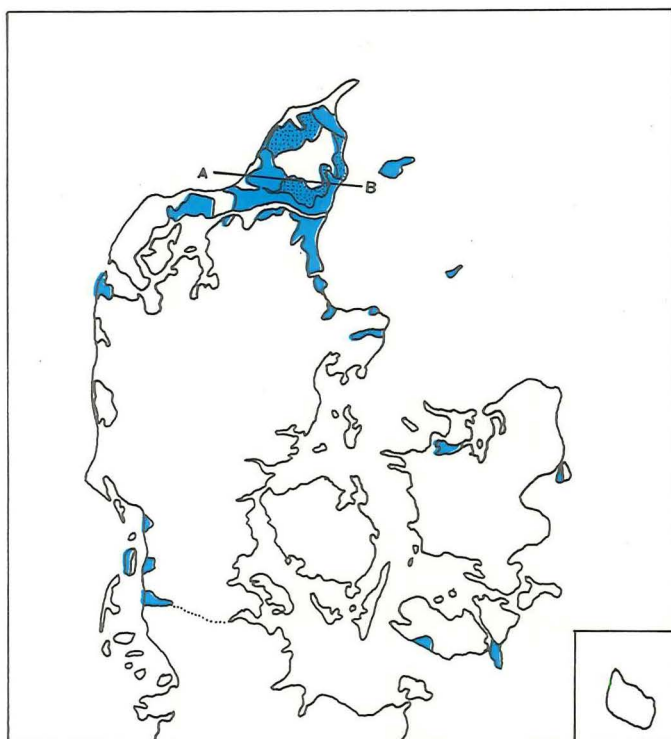
I det følgende vil der blive gjort rede for de geologiske kræfter, der er årsag til at vi idag finder tidligere havbund på tørt land.

Hævet havbund forekommer nordøst for en linie, der forløber omtrent fra Nisum Fjord til Møn - se figur 1.

Også syd for linien er der angivet tørlagt havbund. Der er imidlertid her tale om kunstigt inddæmmede arealer.

Af figuren ses endvidere, at der findes dels sen-glaciale, dels post-glaciale marine hævede flader.

Sen-glaciale marine flader er flader, der er dannet i tidsrummet fra begyndelsen af den endelige afsmeltning frem til afslutningen af sen-glacialtiden - det vil sige fra cirka 15000 til 10000 år før nu. De sen-glaciale flader findes kun nord for Limfjorden.

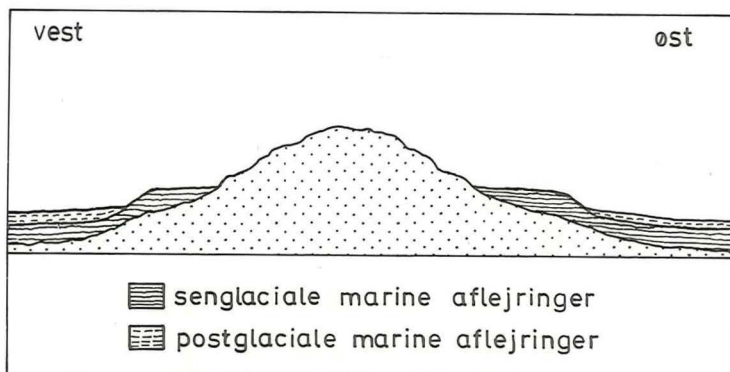


- havaflejring fra seneglacialtiden
- havaflejring fra postglacialtiden

Figur 1.

På figur 2 er vist et tværsnit af Nordjylland langs linien A - B på figur 1. Det viser skematisk opbygningen af fladerne. Det ses, at fladerne omkranser tidligere øer af opragende morænelandskab, afsat under sidste istid. På overgangen mellem flade og morænelandskab ses en fossil kystskrænt, uderoderet af det daværende seneglaciale hav. Det borteroderede materiale er med strøm og bølger ført ud i nogen afstand fra de tidligere kyster og er aflejret her, og har netop derved opbygget de seneglaciale marine flader. Foden af de fossile klinger markerer dermed selve kystlinien.

Den nuværende højde over havniveau af de seneglaciale flader varierer fra 40 m til 0 m. Fladerne er højest beliggende i det nordøstlige hjørne af området og ligger i stedse lavere højde i sydlig retning - således findes de lige over havniveau nord for Limfjorden, men under havniveau syd for. Et ganske tilsvarende sydligt fald i niveau gælder de samtidligt dannede kystskrænter. Figur 3 viser i skematisk form højdeforløbet af den seneglacial kystlinie.



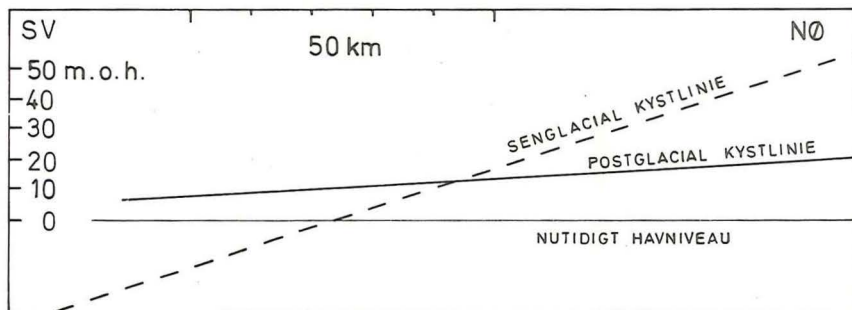
Figur 2. Øst-vestgående tværsnit af Nordjylland.

Postglaciale marine flader er mere udbredte end de senglaciale. Dannelsen af de postglaciale marine flader begyndte ved en markant klimaforbedring for cirka 10000 år siden og har fortsat til idag.

Af figur 2 fremgår, at de findes i et lavere niveau end de senglaciale flader i Vendsyssel. Derimod er de postglaciale flader højest beliggende syd for Limfjorden.

Det samme gør sig gældende for de kystskrænter, der er dannet samtidig med dannelsen af de postglaciale flader - se figur 3. Af figur 2 ses endvidere, at der er uderoderet yngre kystskrænter i de tidligere afsatte senglaciale marine lag, der således allerede på tidspunktet for udformningen af de postglaciale kystskrænter må være blevet hævet op som tørt land.

Undertiden benævnes de postglaciale marine flader som Stenalderhavbund. Udtrykket er misvisende, da der også findes hævet havbund fra bronzealder og jernalder.



Figur 3. Sen- og postglaciale kystlinier i Nordjylland.

Hvad er nu grunden til at vi idag finder forholdene som de er beskrevet her ?

Under sidste istid var området - som det øvrige Skandinavien - presset ned som følge af den overliggende ismasses tyngde (se Varv 1972, nr.3 79-81). Man har skønnet at isen i de centrale dele har været 2000 - 3000 meter tyk, faldende til 0 meter ude ved randen. Afsmeltingen af isen ved istidens slutning bevirkede straks en trykaflastning i de påvirkede områder, og landet hævedes for at genoprette den tyngdemæssige balance. Hævningen er størst i de centrale dele af det tidligere nedslingsområde, som følge af den forudgående større nedpresning her, og falder ud mod den tidligere periferi.

Sideløbende hermed er der foregået forandringer i beliggenheden af havspejlet.

Under sidste istid var en vandmængde, der svarer til et vandlag på cirka 100 meters tykkelse fordelt ud over oceanerne, bundet på land i form af is. Ved isafsmeltningen løb dette vand tilbage til oceanerne og bevirkede en jordomspændende havstigning. Fordelingen mellem hav og land i sen- og postglacial tid - det vil sige i de sidste 15000 år må derfor opfattes som et samspil af de to tendenser - en langsom landhævning og en hurtig havstigning. I varmere perioder fandt en kraftig isafsmeltning sted, dette betød en stærkere havstigning med en oversvømmelse af nogle landområder til følge. En sådan oversvømmelse kaldes en transgression. I mere kølige perioder var isafsmeltningen mindre kraftig og i nogle områder dominerede landhævningen følgelig over havstigningen resulterende i en tilbagetrækning af havet, også kaldet en regression.

Dette gælder imidlertid ikke for alle områder - nær ved den centrale del af det tidligere nedslingsområde, for eksempel ved Oslo, har landhævningen gennem hele sen- og postglacialtiden været så meget kraftigere end havstigningen, at der i dette område udelukkende har været tale om én lang periode med regression. Omvendt har der i Sydvestdanmark og endnu sydligere, hvor der ingen gletscheris fandtes under sidste istid, næsten udelukkende fundet transgression sted.

Kun i et bælte langs med og indenfor den tidligere nedslingsgrænse - som i det nordlige Danmark - kan man se, at der har været tale om skiftende perioder med trans- og regressioner.

En interessant følge af dette forløb er, at kystnære bopladsfund fra sen- og postglacialtid bedst lader sig studere i de tidligere nedslidte områder - syd herfor ligger de tidligere kystlinier på indtil adskillige meters havdybde, hvorfor adskillige bopladser nu er havdækkede.

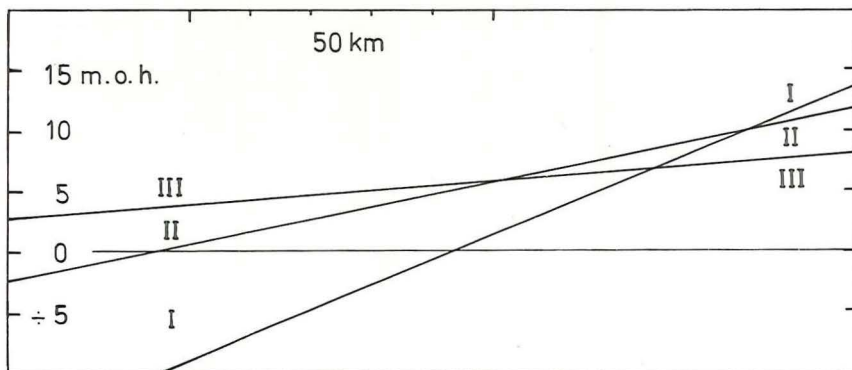
Forklaringen på forholdene, som de fremgår af figur 3, kan sammenfattes som følger.

- 1) De gamle kystlinier og marine flader befinder sig over havniveau som følge af landhævningen.

- 2) Da nedtrykningen og den efterfølgende landhævning er størst mod nord, ligger den nordlige del af en given fossil kystlinie højere end dens sydlige del.
- 3) Hævningshastigheden målt i meter per 1000 år var størst lige efter is-tiden, og er gradvist aftaget siden da. Dette, sammenholdt med at den samlede hævningsstid er størst for de ældste kystlinier, bevirker, at kystlinierne i den nordlige del af området findes i større højde end yngre kystlinier.
- 4) Den indtegnede postglaciale kystlinie i figur 3 skærer den senglaciale kystlinie længere mod syd. Den postglaciale kystlinie er afsat under en transgression, det vil sige på et tidspunkt, hvor havstigningen oversteg landhævningen. Ved den efterfølgende regression, hvor landhævningen atter fik overtaget, trak havet sig tilbage i en takt, der svarede til størrelsen af landhævningen i området, det vil sige størst tilbagetrækning mod nord, og efterlod et vidnesbyrd om den tidligere højere vandstand i form af en fossil kystlinie. I nord ligger den senglaciale kystlinie betydeligt højere end den postglaciale - i syd hvor havstigning og landhævning siden senglacial tid omtrent har været i ligevægt, og hvor kystlinien derfor falder sammen med det nuværende havniveau, vil den postglaciale transgression derimod kunne nå op til et niveau over den senglaciale kystlinie. Derved kommer de to kystlinier til at krydse hinanden.

Et tilsvarende forløb af kystlinier ses i figur 4. Men her er det imidlertid udelukkende postglaciale kystlinier, der hver svarer til en transgressionsfase. Igen ses det, at de yngste er nærmest ved at være vandrette.

Det vil være af interesse, at få fastlagt det nøjagtige forløb af kystlinierne - dels for at kunne udsige noget om områdets generelle land-



Figur 4. Principskitse af forløbet af postglaciale kystlinier i Nordjylland. (Højderne er kun omtrentlige, I er ældst og III er yngst).

hævning, dels for at kunne bestemme til hvilken tid forskellige områder var oversvømmet af havet - et forhold, der vil være af betydning i arkæologiske undersøgelser.

Af figur 4 ses endvidere, at den højeste kystlinie i et område ikke nødvendigvis behøver at være af samme alder som den højeste kystlinie i et andet område. Den højeste kystlinie er ældst i Nordjylland (senglacial) og bliver gradvist yngre mod syd.

Endelig kan nævnes, at som følge af havspejlets "følsomhed" overfor klimasvingninger er der en nær sammenhæng mellem klima og forekomsten af trans- og regressionsfaser. En datering af trans- og regressionsfaserne kan derfor give oplysninger om mindre svingninger i middeltemperaturen og kan indgå i diskussionen, om hvorvidt klimavariationerne optræder med regelmæssige mellemrum og dermed eventuelt kan forudsiges.



Figur 5. Til venstre ses en fossil postglacial kystskrænt på Fur sydøst for Lille Knudshoved udformet ved havstigningen i Stenalderen. Foran til højre ses den tilsvarende marine flade. Lignende skrænter - nu noget tilskredne, da havet ikke kan komme til angreb - kan ses mange steder inden for den nuværende kyst i det nordlige Danmark. Forøvrigt er kystveje en del steder anlagt direkte på den marine flade foran Stenalder-skrænterne. A.V.Nielsen DGU fot.

ABSOLUT ALDERSBESTEMMELSE VED HJÆLP AF URANETS NATURLIGE SPALTNING, FISSIONSSPORSMETODEN.

af Vagn Jensen.

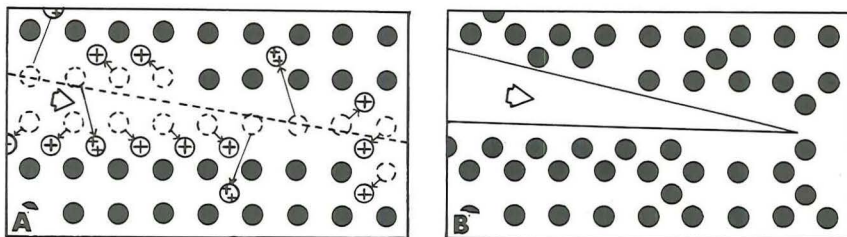
At vide alderen af dannelser og begivenheder i vores fysiske omverden har altid haft vores bevågenhed. Hvor gammel er Jorden, den enkelte bjergart, et fossil, et arkæologisk fund? Et vulkanudbrud i historisk tid frembyder ikke problemer rent aldersmæssigt, men langt ind i dette århundrede var man henvist til hovedsageligt at nøjes med relative dateringer inden for geologien. Ved relative dateringer finder man via bjergarternes lejringsforhold ud af deres dannelsesfølge, men uden at kunne sætte præcise tal på.

Atomfysikens udvikling medførte, at man fik kendskab til en række radioaktive henfaldsserier ligesom man hurtigt fik indblik i, med hvilken hastighed disse processer fandt sted. Hermed var grundlaget etableret for absolut aldersbestemmelse. I naturen findes en lang række radioaktive stoffer, hvis henfaldstid er kendt. Jo langsommere et radioaktivt stof henfalder, jo længere kan man nå tilbage i tiden og princippet er, at man måler forholdet mellem mængden af et radioaktivt stof og dets henfaldsprodukt. I det øjeblik for eksempel et magma størkner, vil det pågældende radioaktive stof være låst fast. De henfaldsprodukter, der herefter fremkommer kan blive tilbageholdt i bjergarten. I laboratoriet kan man så måle de respektive mængder og ved hjælp af henfaldslovene beregne bjergartsalderen - i dette tilfælde tidspunktet for størkningen. De mest anvendte henfaldsserier er så langsomme, at bjergarten ofte skal have en alder på flere millioner år, før der er fremkommet målelige mængder af henfaldsproduktet.

Drejer det sig om at aldersbestemme organiske materialer, har kulstof-14 metoden vist sig yderst effektiv, dog med den begrænsning, at det er vanskeligt at komme mere end 30-40000 år tilbage i tiden. Fælles for de nævnte dateringsmetoder er, at de kræver omfattende laboratorieudstyr samt en meget omhyggelig prøveforberedelse.

På det seneste er der kommet endnu en metode til absolut aldersbestemmelse, nemlig fissionssporsmetoden eller spaltningssporsmetoden, og selv om træerne heller ikke i dette tilfælde vokser ind i himlen, så byder denne metode på fordele, især med hensyn til mængden af prøvemateriale samt et beskedent laboratorieudstyr. Dertil kommer, forudsat at bjergarten er dateringsegnet, at metoden i øjeblikket kan række fra nogle snese år tilbage til mere end én milliard år.

Lidt om kærnespaltninger (fission). U-238 besidder den egenskab, at det kan spalte (fissionere) spontant. Herved deles U-238 kærnen i to dele, der farer fra hinanden i stik modsatte retninger. Energien i kærnespaltningen er meget høj, cirka 200 MeV (megaelektronvolt) og den omsættes fortrinsvis i bevægelsesenergi - det betyder, at de to kærnedele (fissionsfragmenter) kan gennemtrænge en vis distance i det materiale, de forefindes i, se figur 1.



Figur 1. En meget skematisk model af fissionssporsdannelsen. Et positivt ladet fissionsfragment passerer langs den stiplede linie gennem et krystalgitter. Herved fjernes elektroner fra atomerne langs fissionsfragmentets vej. Det bevirker, at de berørte atomer joniseres og en rørformet ødelæggelse fremkommer i krystalgitteret på grund af frastødende kræfter mellem de joniserede atomer.

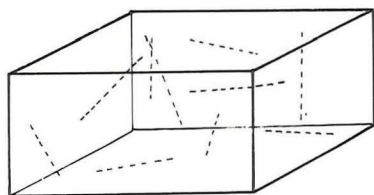
Den ødelagte del af krystalgitteret er mere modtagelig for opløsning end den ikke ødelagte del, og med passende ætsningsmidler kan sporet uddybes (B). Fissionsspor kan kun dannes i et ikke-ledende materiale.

Derved fremkommer en rørformet ødelæggelse, en "skudkanal", i krystallen inden for den distance fissionsfragmentet har tilbagelagt. Diameteren af en sådan skudkanal er cirka 100 Ångstrøm og længden er cirka 10μ . (1 Ångstrøm = $1/100\,000\,000$ cm - $1\mu = 1/1000$ mm).

Sporenes meget ringe størrelse medfører, at man kun i elektronmikroskopet kan observere skudkanalerne, og de er da også først blevet kendt fra sidst i 1950'erne. Ved et tilfælde blev det opdaget, at skudkanalerne kunne ætzes op til en diameter på få μ og derved gøres til genstand for undersøgelse i et almindeligt mikroskop. På General Electric's laboratorier skulle man bruge en kontrolleret lækage i en vakuumbeholder. En af siderne i denne beholder var lavet af glimmer, et mineral, der kan spaltes i meget tynde flager. Vakuumlækagen viste sig ikke uden videre kontrollerbar, idet man foruden at få ætset det kunstige hul også fik ætset fissionssporene op, noget man først fandt ud af efter detaljerede undersøgelser.

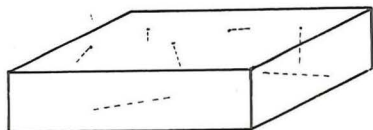
Ætsningsmidler er oftest meget stærke syrer eller baser og det gælder om at finde den ætsningstid, der er tilstrækkelig til at ætse de ødelagte krystalgitterpartier, fissionssporene, uden i for høj grad at angribe den egentlige overflade. Den overflade, man vil undersøge for fissionsspor skal være uhyre jævn og ensartet, figur 2. En sådan overflade kan opnås på to måder. Bedst er en spalteflade, men en næsten lige så god overflade kan fremskaffes ved polering, sidstnævnte metode anvendes på glasser.

Eftersom man kender fissioneringshastigheden for U-238 kan man ved at foretage en bestemmelse af uranmængden i prøven tillige med antallet af fossile fissionsspor per arealenhed få alderen. Ofte forefindes uran i meget små mængder i en tilfældig krystal eller glas. Uranmængden er så

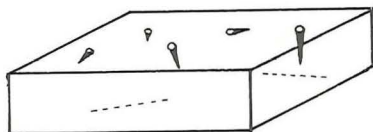


Figur 2. Præparatfremstilling.

I et mineral eller en bjergartsglas vil de fossile skudkanaler fra kærnespaltingerne i U-238 være tilfældigt orienterede - her angivet med stiplede linier.



Ved at tilvejebringe en spalte- eller polerflade vil man skære nogle skudkanaler over.

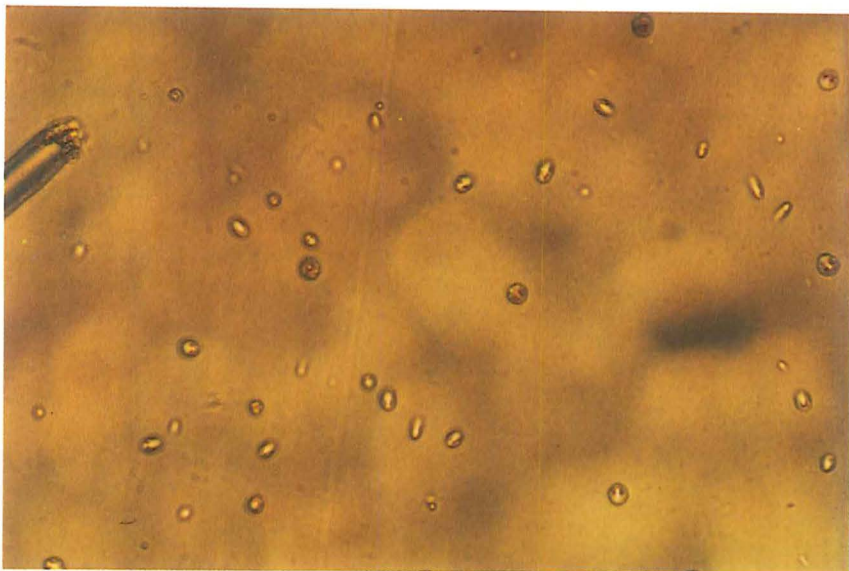


Spalte- eller polerfladen behandles for eksempel flussyre, der ætser skudkanalerne op til en diameter på $3-4 \mu$ hvilket bevirker, at de kan observeres i et lysmikroskop.

Et tilsvarende parallelpræparat opvarmes tilstrækkeligt til at de fossile fissionsspor fra U-238 heler. Prøven bestråles derefter med en kendt dosis termiske neutroner, der kun forårsager spaltning af U-235 og de herved fremkomne fissionsspor ætses frem og tælles - dette giver et mål for den totale uranmængde i præparatet, hvilket betyder, at man har grundlaget til udregningen af alderen. -----

ringe, at man i stedet for at angive den i procent, anfører den i ppm (parts per million). Hvis vi ser bort fra egentlige uranmineraliseringer, vil uranmængden typisk være på nogle få ppm og en nøjagtig angivelse af så små mængder vil kræve et detaljeret analysearbejde.

Til alt held viser det sig, at man kan undgå den direkte bestemmelse af uranmængden. Det skyldes, at uran består af forskellige isotoper (grundstoffer med samme atomnummer men forskellige atomvægte kaldes isotoper). Naturligt forekommende uran er en blanding af isotoperne U-238 og U-235, således, at der vil være 99,2830 vægtprocent U-238 og 0,7110 vægtprocent U-235 (resten udgøres af sjældne uranisotoper). U-235 fissionerer så meget langsommere end U-238, at de fossile fissionsspor i praksis udelukkende stammer fra U-238. Det forhold, der betinger, at man kan undgå en direkte mængdebestemmelse af uran er, at U-235 kan bringes til at fissionere ved bestråling med termiske neutroner - en sådan bestråling kan for eksempel foretages på atomforsøgsanlæg Risø. Ved at tælle, hvor mange nye fissionsspor, der efter bestråling med en kendt dosis termiske neutroner er fremkommet på et givet areal, har man indholdet af U-235 og i kraft af det konstante isotopforhold dermed det totale uranindhold. Ved derefter at anvende de relevante fysiske konstanter, kan man beregne alderen af det undersøgte materiale.



Figur 3. Fissionsspor i en glas fra et meteornedslag. Det ses, at de kegleformede fordybninger skærer glasoverfladen under forskellige vinkler. Diameteren af sporene er cirka 4μ .

Skal man sammenligne fissionssporsmetoden med de øvrige radiometriske aldersbestemmelsesmetoder, kan man sige, at hvor sidstnævnte måler mængden af henfaldsproduktet, måler fissionssporsmetoden det direkte resultat - nemlig skudkanalerne fra fissionen.

Fissionssporsmetoden har dog også sine begrænsninger. Den vigtigste er, at de naturlige (fossile) spor kan hele ved varmepåvirkning. De forskellige mineraler og glasser, der er egnede til denne aldersbestemmelsesmetode har forskellig modstandskraft mod opvarmning, men laboratorieforsøg viser generelt, at en opvarmning til $400 - 500^{\circ} \text{C}$ i blot en time vil slette de fossile fissionsspor, altså nulstille det radiometriske ur. På den anden side vil en ringe opvarmning, eksempelvis til 50°C ikke betyde noget, selv ikke over geologisk set meget lange tidsrum.

Forud for en fissionssporsdatering bør man derfor ved andre geologiske metoder sikre sig, at det undersøgte materiale ikke i tidens løb har været udsat for en opvarmning, der har forårsaget en eller anden grad af heling af de fossile spor. I den forbindelse er der udarbejdet korrektionstabeller, således at man ofte alligevel kan opnå en alder.

På den anden side kan man udnytte nulstillingen af uret og det gælder især arkæologiske materialer. I keramiske materialer vil man hyppigt finde det uranholdige mineral zirkon, der er fulgt med i det ler,

hvoraf produktet er fremstillet. Zirkon er overordentlig velegnet til fissionssporsdatering og ved brændingen slettes alle dens fissionsspør - uret nulstilles. Uranets naturlige fission fortsætter imidlertid uhindret og man kan således datere brændingstidspunktet for vedkommende stykke keramik eller porcelæn. Derved har man kunnet afsløre nutidige (nogle snese år gamle) efterligninger af eksempelvis gammelt kinesisk porcelæn.

For at bestemme så unge aldre, er det en forudsætning, at der er et ret højt uranindhold tilstede. Det er ofte tilfældet i keramiske produkter, idet uranforbindelser har været anvendt som farvemiddel i disse produkter. Et andet eksempel: en økse af obsidian (en sort vulkansk glas) blev fundet i resterne af et ildsted. Man kunne således gå ud fra, at de fossile fissionsspør var blevet slettede og den opnåede alder efter denne nulstilling var i overensstemmelse med andre arkæologiske dateringsmetoder på andet materiale sammesteds fra.

I tilfælde af et uranindhold på eksempelvis kun 5 - 7 ppm i et arkæologisk brændingsprodukt har fissionssporsmetoden den meget store ulempe, at man skal undersøge ret store arealer for fossile fissionsspør og derved kan der opstå det problem, at man for at få en sikker alder må gøre et kraftigt indhug på mængden og derved ødelægge fundet.

Det at fissionsspør heler ved opvarmning, betyder, at metoden har sin styrke ved bjergarter, hvor man umiddelbart kan erkende en uproblematisk geologisk baggrund for eksempel en uforstyrret lavastrøm, glasser dannet ved meteornedslag og lignende. Sedimenter lader sig normalt ikke datere ved denne metode, men for oceanbunds sedimenter forholder sagen sig anderledes. Her vil der ofte være indslag af vulkanske bjergarter eller askelag og disse indeholder i reglen både zirkoner og glas, to særdeles egnede materialer til datering, og derved kan man komme tæt på de mellemliggende sedimenters aldre og yderligere få et indtryk af sedimentationshastighederne.

Aldre bestemt ved fissionssporsmetoden udgør for tiden skønsmæssigt 6-7% af de publicerede radiometriske aldersbestemmelser, og der er derfor allerede et stort sammenligningsgrundlag mellem denne metode og de øvrige. Her viser det sig, at aldre opnået ved fissionssporsmetoden næsten altid ligger en anelse under de resultater, der er opnået ad anden vej. En af forklaringerne kunne være, at de fysiske konstanter, der anvendes ved aldersudregningen, ikke er helt så præcist bestemte. Desuden kan også andre grundstoffer fissionere, for eksempel Th-232, men fissioneringshastigheden for thorium er så meget lavere end U-238, at det kun i tilfælde af meget store mængder thorium i forhold til uran skulle have nogen indflydelse.

Skønt der ikke er helt enighed om den teoretisk-fysiske forklaring på fissionssporenes dannelsesmekanik, råder man nu over endnu en radiometrisk dateringsmetodik, der i de fleste tilfælde byder på store fordele med hensyn til laboratoriefaciliteter (bortset fra en reaktor), prøvemængder og arbejdstid, og som giver absolut anvendelige aldersresultater.