

4. I hvert af disse reservoirer ændredes forholdet U/Pb kun som et resultat af radioaktivt henfald af uran til bly.

5. På det tidspunkt hvor et almindeligt blymineral dannedes (f.eks. galena) blev bly adskilt fra uran, hvilket betyder at isotopsammensætningen har været konstant siden dette tidspunkt.

Det betyder, at forholdet $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ i et uranførende system med en alder T som har været lukket (dvs. at der ikke er tilført eller fjernet uran og dette grundstofs datterisotoper) vil være:

$$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i + ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} (e^{\lambda t} - 1)$$

Trækkes der bly ud af et sådant system for t år siden vil forholdet $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ af dette bly være:

$$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_t = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i + ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} (e^{\lambda T} - e^{\lambda t})$$

hvor

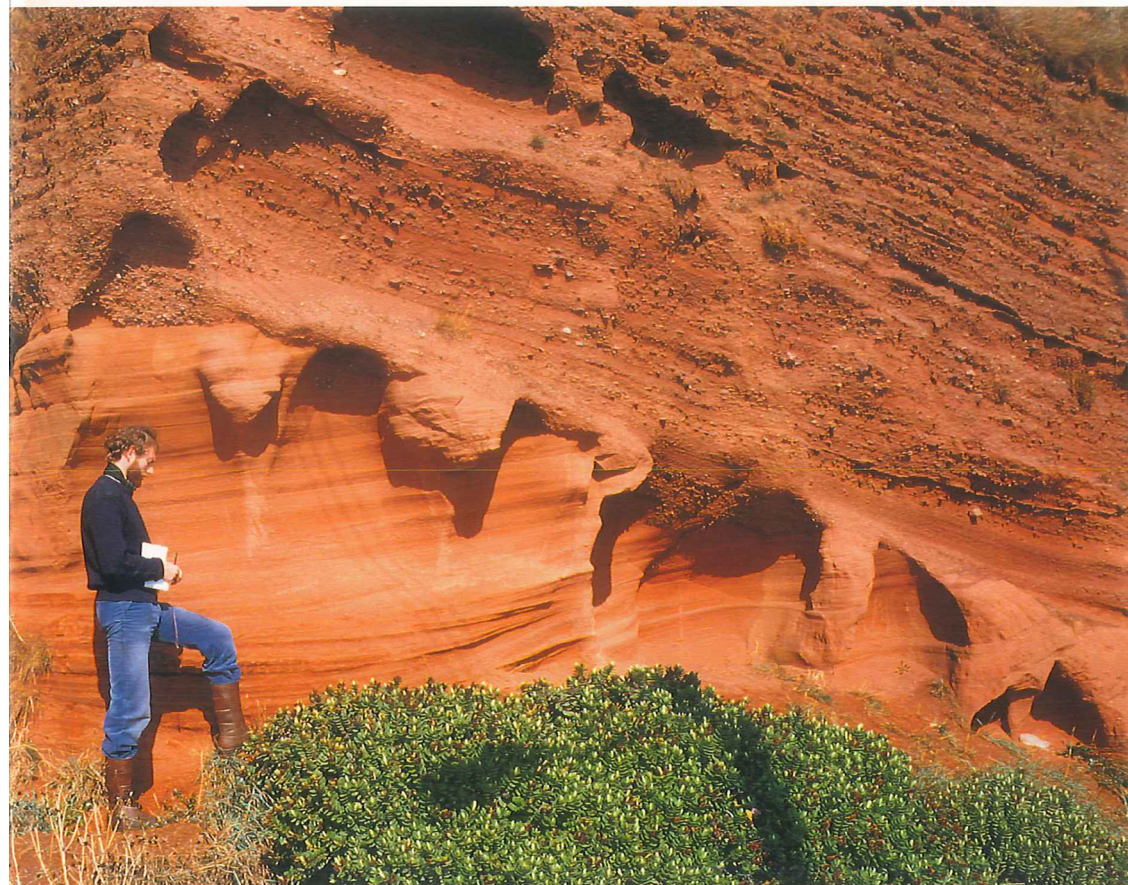
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_t$ = isotopforholdet af 'almindeligt bly' med en alder t

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$ = isotopforholdet af det oprindelige bly i Jorden for T år siden

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = forholdet mellem disse isotoper i et bestemt kildeområde for 'almindeligt bly' på nuværende tidspunkt

t = den tid der er gået siden 'almindeligt bly'-prøve blev fjernet fra dens kildeområde

T = Jordens alder



DE RØDE MILER PÅ ANHOLT

KORTLÆGNING MED GEORADAR

BLYISOTOPERS ANVENDELSE

Forsidebillede: New Red Sandstone med storskala skrålejrering (sydlige England). Den nederste enhed er æolisk (vindaflejret), mens den øverste er fluvial (aflejret af floder).

Forfatterens adresser: Mette Bjørnsen, Lars B. Clemmensen, Karsten Pedersen og Robert Frei har alle adressen: Geologisk Institut, Østervoldgade 10, 1350 Kbh. K.

VARV

Adresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350-København K. Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut.
E-Mail: SvendP@Geo.Geol.KU.DK

Redaktion: Asger Berthelsen, Knud Binzer, Bjørn Buchardt, Bjørn Hageskov, Henrik Fougst, Mikkel Hede, Arne Thorshøj Nielsen, Mikael Pedersen (webmaster) og Svend Pedersen (ansvarshav.)
Bestyrelse: Asger Berthelsen, Valdemar Poulsen, Bjørn Hageskov og Svend Pedersen.

Tekstredaktør: Svend Pedersen

Lay-out og grafik: Bjørn Hageskov

Repro og tryk: Dansk Erhvervstryk A/S

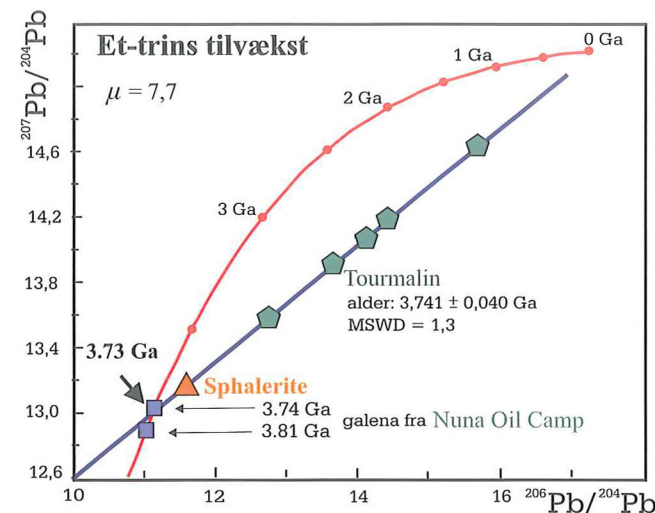
VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 140 kr i abonnement for 2003. Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80, eller 160 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 160 NOK til V VARV's norske postgiro: 7877.08.15672.

På VARV's hjemmeside www.varv.dk er det bl.a. muligt at søge i VARV'S database, hvor reference til alle artikler er lagt ind, ligesom der er et lille resume af artiklerne. Der er også oplysninger priser på gamle numre, særnumre etc. som sammen med tegning af abonnement kan bestilles on-line.

Adresseændringer bedes meddelt VARV

© VARV eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale.

Figur 10. 'Almindeligt bly' isotopdiagram med blydata på turmalin som findes sammen med zinkblende i en kvartsåre. Data er opnået ved trinvis udludning af bly. Alderen på 3,74 Ga (eller 3.741 $\pm$ 0,040 Ma) svarer til den, der blev opnået på granat (figur 9), og viser at metamorfose og bevægelser af opløsninger fandt sted på samme tid. Den rette linie (isokronen) går gennem en samling af galenadata med modelaldre omkring 3,74 Ga. Den viste blyudviklingslinie er den, der bedst forklarer de omtalte galenadata fra Isua med en μ -værdi på 7,7.

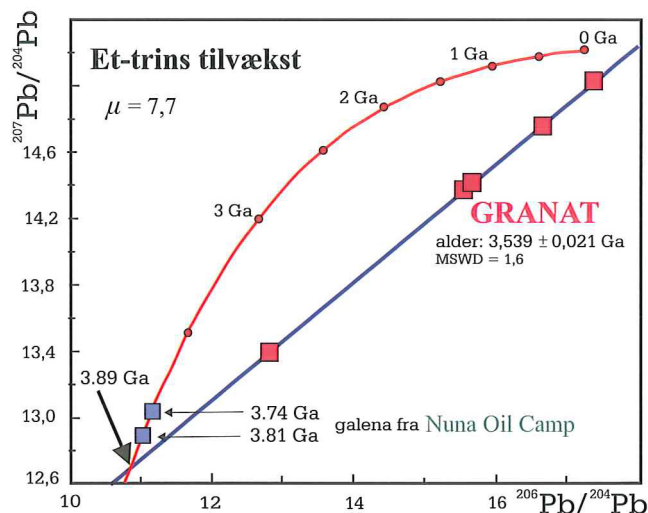


BLY-MODELALDRE

Beregninger af modelaldre er baseret på følgende forudsætninger:

1. Jorden var oprindelig homogen, og på dette tidspunkt var uran, thorium og bly jævnt fordelt.
2. Isotopsammensætningen af det oprindelige bly var alle steder den samme og antages at svare til det mindst radiogene bly, der er målt i Canyon Diablo meteoritten (VARV 2002,4).
3. Derefter begyndte der en opdeling af Jorden i forskellige enheder (reservoir) som kappe og skorpe og forholdet U/Pb udvikledes uafhængigt af hinanden i de forskellige reservoirer.

Figur 9. 'Almindeligt bly' isotopdiagram med bly-data på en granat dannet af cirkulerende opløsninger. Data er opnået ved trinvis udludning af bly. Alderen på 3,74 Ga (eller 3.739 ± 21 Ma (millioner år)) svarer til den tidlige arkæiske metamorfe påvirkning af området. Den gamle (3,896 Ga) modelalder viser, at den oprindelige bly i granaten stammede fra en skorpekilde, der er væsentligt ældre end det bly, der blev udludet af de mindst radiogene galenaer med en modelalder på 3,81 Ga.



Sidst men ikke mindst viser en modelalder på en 3,89 Ga på en 3,74 Ga gammel granat fra Isua overfladebjergarterne eksistensen af en ældre skorpekomponent i disse (figur 9). De 3,74 Ga er opnået ved den ovenfor beskrevne trinvis udludningsteknik. De 3,89 Ga bliver således alderen af kilden for det bly, der blev inkorporeret i granaten på det tidspunkt, hvor den krystalliserede i forbindelse med en 3,74 Ga gammel metamorf hændelse.

På samme måde har den trinvis udludningsteknik været anvendt på et mineralselskab der omfatter turmalin og zinkblende, som findes i en kvartsåre (figur 10). Alderen på 3,73 Ga for dette mineralselskab svarer til den tidligere nævnte alder på en granat fra Isua (figur 9), hvilket betyder at de blev dannet under den samme metamorfe hændelse. Modelalderen på 3,73 Ga for den oprindelige bly i disse åremineraller svarer endvidere til alderen af det bly, der blev målt i en galena (modelalder på 3,74 Ga). Det viser, at der var nært sammenfald mellem dannelsen af tonalitter på dette tidspunkt og de opløsninger udfra hvilke både zinkblende og turmalin krystalliserede.

I eksemplet har blyisotoper været anvendt med succes til at spore eksistensen af meget gammel ikke-bevaret kontinental skorpe i Isuaområdet, til at datere metamorfe hændelser og påvirkninger der skyldes cirkulerende opløsninger i suprakrustalerne i forbindelse med senere metamorfe og magmatiske begivenheder.

DE RØDE MILER PÅ ANHOLT

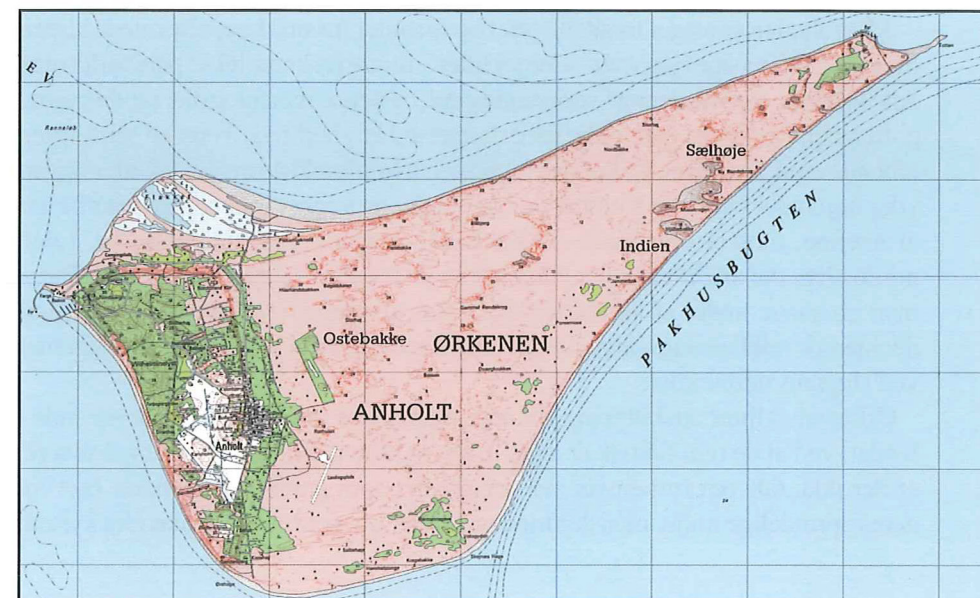
I AXEL JESSENS FODSPOR

Mette Bjørnsen og Lars B. Clemmensen

I Kattegat midt mellem Danmark og Sverige ligger Anholt, som med sit beskedne areal på 22 kvadratkilometer ikke syner af meget på landkortet (figur 1). Men øens særprægede klitlandskab Ørkenen er unikt og giver mulighed for at studere geomorfologiske og sedimentologiske forhold, som ikke kendes andre steder i Danmark. Området blev fredet i 1938-39 og dækkes af såvel stabile som mere aktive indlandsklitter, hvis højde flere steder når op til 25 meter.

Det marine forland, hvorpå Ørkenen er dannet, består af en hævet strandvoldsslette, som hovedsagelig er bygget ud i nordøstlig retning. Denne succesion af strandvolde er opstået ved gradvis nedbrydning af de ældre kvartære aflejringer, som udgør den vestlige og højst beliggende del af øen. Landskabets toppunkt er beliggende 48 meter over havet, hvilket giver en ganske stor kontrast til den flade strandvoldsslette, der kun få steder hæver sig mere end 8-9 meter over havniveau.

Grundet sin placering midt i Kattegat er Anholt frit eksponeret for både vind, strøm og bølger, og dette dynamiske miljø præger kystmorfologien. Eksempelvis ændrer den sandodde, som udgør øens nordøstspids, hyppigt udstrækning og orientering, i lighed med Grenen ved Skagen Odde.



Figur 1. Kort over Anholt (med tilladelse fra Kort og Matrikelstyrelsen)



Figur 2. Axel Jessen (1868 – 1952).
Mineralogisk Museums portrætsamling.

Statsgeolog Axel Jessen (figur 2) skrev i 1897 en særdeles grundig og detaljeret afhandling om de geologiske forhold på Anholt, med titlen 'Beskrivelse til geologisk Kort over Danmark – Kortbladene Læsø og Anholt'. Heri omtaler han Ørkenen med følgende ord: 'et saa øde og trist Udeeseende som man kun træffer det faa Steder i Landet'.

At området vitterligt gør et meget øde indtryk må man give Jessen ret i, men hvorvidt det også fortjener prædikatet trist, er nok et synspunkt som de færreste af øens mange besøgende – for ikke at tale om de fastboende – vil tilslutte sig.

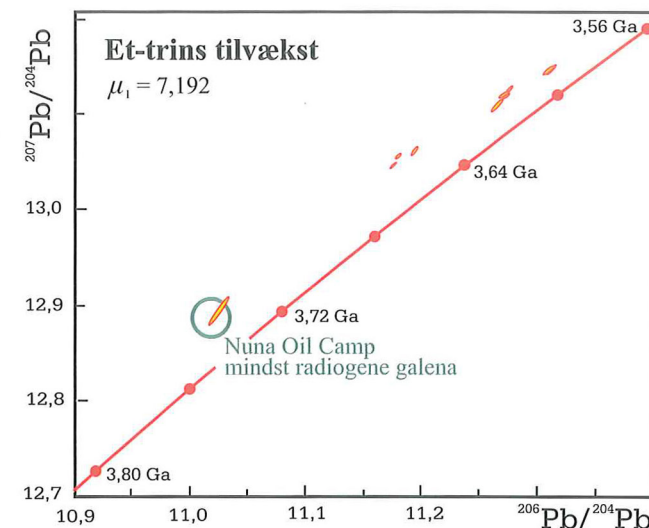
Stednavnet Ørkenen optræder ikke hos Axel Jessen, men det dukker op året efter i Ove Paulsens 'Om Vegetationen paa Anholt', og i 1935 er det at finde på officielle, topografiske kort. Selvom vi ikke har at gøre med et decideret sandhav, som det kendes fra de tropiske og subtropiske ørkenbælter, synes betegnelsen ørken alligevel at være ganske passende, for efter danske forhold er dette klitlandskab i høj grad usædvanligt (figur 3).

Morfologien er meget forskelligartet og spænder fra små kuppelformede klitter, over uregelmæssige rygge og 'stjerneklitter', til større, komplekse parabelformer. Alle klitterne er modificeret i varierende grad, og denne morfologiske modificering er tilsyneladende tæt forbundet med dannelsen af vindbrud, hvorved klitformen løbende eroderes (figur 4). Længst mod vest, hvor de ældste indlandsklitter ligger, yder højlandet læ for de fremherskende vinde, og vegetationen, som især består af hjælme, mosser og spredte enebærbuske, formår at holde på sandet. I den nordøstlige del af Ørkenen har vinden frit spil fra alle retninger, og herude finder man en større andel af aktive klitter i form af vegetationsløse vindbrud samt deciderede udblæsningsslugter, hvor der dannes nye, tungeformede sandlegemer ved slugtens udmunding.

Ørkenens klitter adskiller sig fra dem man andre steder i Danmark ser inde i landet, ved at de rent faktisk er ægte indlandsklitter. Som det vil fremgå senere, er der ikke tale om forhenværende kystklitter som gradvist er vandret bort fra deres oprindelige miljø, men derimod om klitter dannet i en vis afstand fra kysten.

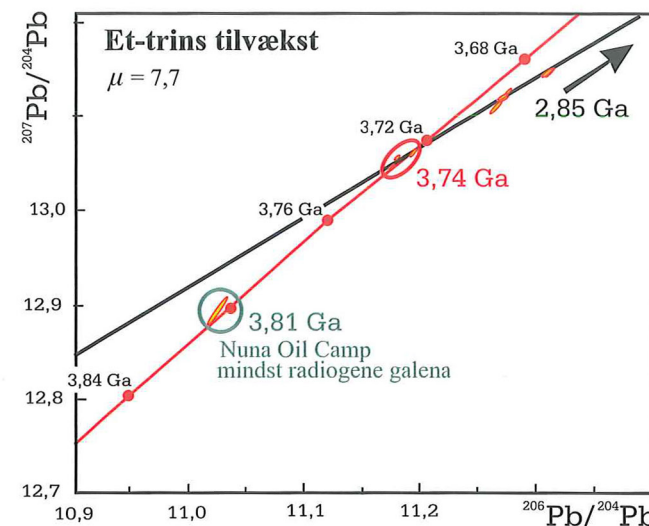
Figur 8. a: 'Almindeligt bly' isotopdiagram med galena-data fra Isua. Det mindst radiogene bly (i cirklen) blev målt i en prøve indsamlet tæt ved firmaet Nuna Oils lejr. Alle galenaværdier - afsat som aflange punkter - ligger klart over Stacey og Kramers beregnede vækstkurve, som er defineret af en μ -værdi på 7,19 (se også figur 2).

Stacey og Kramers model er bygget op omkring to et-trins vækstkurver. Resultaterne refererer til den første af disse.



Figur 8 b: 'Almindeligt bly' isotopdiagram, der svarer til figur 8. Galenadata passer her til en ny et-trins udviklingskurve med en klart højere μ -værdi på 7,7.

Modelaldre og de to mindst radiogene galenaer giver nu mening geologisk, idet de svarer til to punkter på en isokron som tidligere er opnået på tidlige tonalitter fra området. Den tykke linie er en sekundær isokron, som går gennem galenaer, der blev remobiliseret i forbindelse med de senarkæiske metamorfe hændelser i Isua området.



Vi har kombineret ovenstående data med Pb-Pb aldre på 3,74 Ga på mineraler som turmalin, zinkblende og granat, der også er dannet af cirkulerende opløsninger, men efter deformationen af området. Resultaterne viser, at aktivitet knyttet til cirkulerende opløsninger i tidlig Arkæikum tidsmæssigt ikke kan skelnes fra den tidligste metamorfe påvirkning og den væsentlige magmatiske aktivitet i form af nye tonalittiske smelters indtrængen for ca. 3,75 Ga år siden.

PROCESSER I DEN ÆLDSTE JORDSKORPE: ET EKSEMPEL FRA ISUA I VESTGRØNLAND
 For nylig har forfatteren sammen med Minik Rosing fra Geologisk Museum i København i Isuaområdet påvist den mest primitive (dvs. den mindst radiogene) blyisotopsammensætning, der nogensinde er målt på materiale fra Jorden. Blyisotopsammensætning blev målt i galena fra en mineralåre, der blev afsat af cirkulerende opløsninger. Åren er fundet i og måske genetisk knyttet til et gnejslegeme, der for 3,81 Ga siden som en smelte med en tonalittisk sammensætning trængte ind i overfladebjergarterne ved Isua. Gnejsalderen er opnået ved at aldersbestemme mineralet zirkon ved U-Pb metoden. Iagttagelsen har overordentlig stor betydning for påvisningen af en ikke-bevaret tidlig jordskorpe.

Det fundne bly afviger fra, hvad man finder i de almindeligt anvendte blyudviklingskurver for den gennemsnitlige kontinentalskorpe, idet det har for høje værdier af forholdet $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ i relation til forholdet $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (figur 8). Dette kan modelleres som en et-trins udvikling med følgende startparametre: μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$): 7,70 hvilket indebærer såkaldte modelaldre på 3,81 Ga og 3,74 Ga (se figur 8b). Modelaldre er et udtryk for den alder og den μ -værdi der fås med baggrund i et datasæts placering på en bestemt blyisotopudviklingslinie i et diagram, hvor $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ er afsat mod $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

De oprindelige begrænsninger (m og tid) viser en højere μ -værdi (7,7) i 'kilden' til de cirkulerende opløsninger, der har dannet åren, og muligvis også i den magmatiske udgangsbjergart for gnejsen. μ -værdien er således højere end den værdi på 7,19, der blev anvendt af Stacey og Kramers (figur 2) for det første trin af blyudviklingskurven for den kontinentale skorpe (se figur 8b).

De nye data er i overensstemmelse med kravet til en berigelse af uran i forhold til bly i forbindelse med den først dannede kontinentale skorpe, svarende til en fortyndet kappe i den tidlige Jords historie. Den høje værdi af forholdet $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ relativ til værdien af forholdet $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ i galena fra Isua viser således, at der blev dannet skorpereservoirer med høje U/Pb forhold tidligt i Jordens historie. De høje U/Pb forhold kan således tilskrives eksistensen af en gammel skorpe.

Der er et påfaldende sammenfald i alder mellem galenagenerationerne og de almindelige tonalittiske gnejslegemer i området. Dette og det forhold, at man finder galenaen og gnejserne sammen, understøtter tolkningen af, at dette meget lidt radiogene jordiske bly vil kunne ligne det bly, man finder i 3,75 Ga og præ-3,8 Ga gammelt tonalittiske udgangsmateriale for gnejslegemerne. Dette peger på at de tidlige arkæiske opløsninger og de magmatiske hændelser er tæt knyttet til hinanden.

Den antagne modelalder på 3,81 Ga for det mindst radiogene galena-bly passer som nævnt godt med zirkonalldre på tonalitlegernerne. Dette sætter en begrænsning på minimumalderen for Jordens ældste overfladebjergarter på Isua til 3,81 Ga.



Figur 3. Ørkenen set mod nordøst, med den karakteristiske, træbevoksede klit 'Ostebakken' i baggrunden (se også figur 1).



Figur 4. Delvis stabiliseret klitform med store, inaktive vindbrud i den centrale del af Ørkenen.

Uden nærmere undersøgelser kan det dog være vanskeligt at skelne de to typer fra hinanden, eftersom deres morfologi på langt sigt afhænger af de samme primære faktorer, deriblandt vindforhold og menneskelig påvirkning. Klitterne på Anholt er formentlig nogle af de eneste 'indlandsklitter' i Danmark – foruden Råbjerg Mile i Vendsyssel – der får lov til at følge en naturlig udvikling med aktiv sandflugt, uden at der gribes ind via plantning og lignende, for at skabe kunstig stabilisering.

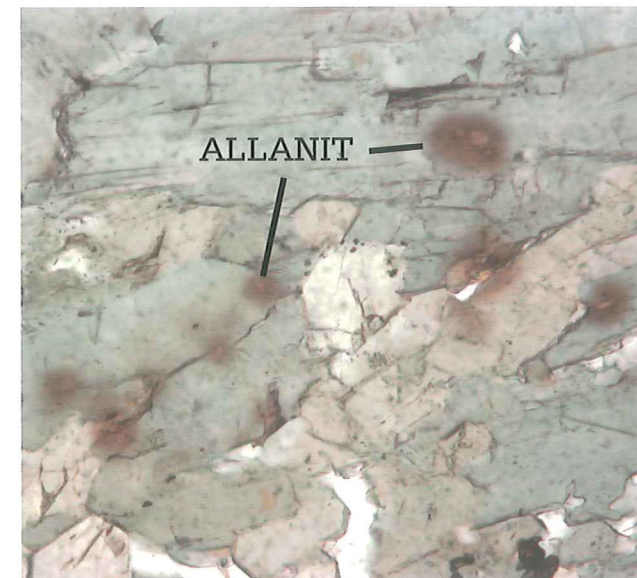
FARVE

Mange af Ørkenens klitter har i tidens løb fået navne, og ved øens sydøstkyst ligger et mindre, overvejende vegetationsløst klitområde, som går under tilnavnet De Røde Miler. Måske fordi man netop på det sted lægger særligt mærke til indlandsklitternes karakteristiske og usædvanlige gulbrune, til tider svagt rødlige farve, idet disse her gennembyrder de hvide kystklitter (figur 5). Axel Jessen kommenterer også fænomenet i sin afhandling: 'Medens Flyvesandet ved Kysterne af Anholt er hvidere end man i Almindelighed ser det, er Sandet inde i Landet af en brungul Farve, hidrørende fra et tyndt Overtræk af Jerntveiltehydrat'.

Petrografiske analyser bekræfter, at størstedelen af kvartskornene fra indlandsklitterne dækkes af brunlige belægninger, som især er koncentreret omkring fordybninger i kornenes overflade. Hvorvidt der som Jessen anfører er tale om

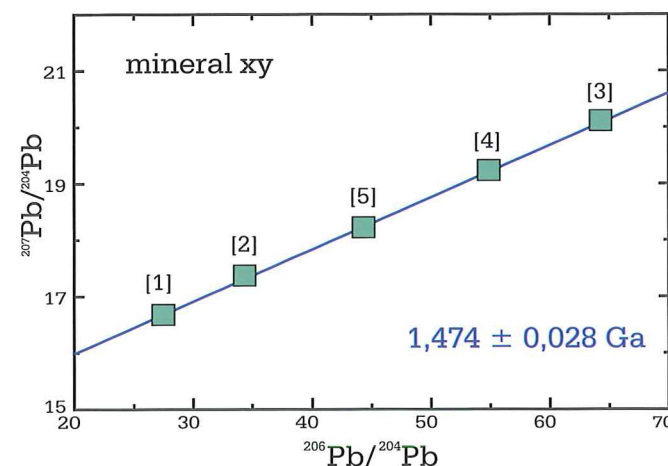


Figur 5. De Røde Miler ved Pakhusbugten mellem Indien og Sælhøjene (se figur 1).



Figur 6. Mikroskopfoto der viser adskillige små brunlige korn af mineralet allanit med en udtalt reaktionsrand dannet ved radioaktive processer. Bjergarten er en 3,8 Ga gammel amfibolit fra Vest-grønland.

flussyre, som er i stand til at nedbryde silikatstrukturen og dermed opløse mineralet - vil derefter gøre det muligt at analysere mineralets 'almindelige bly' signatur. Teoretisk og under ideelle betingelser, dvs. at mineralet efter dannelsen ikke har været udsat for påvirkninger, der har ændret forholdet U/Pb, vil de udtrukne fraktioner af radiogent bly samt den svært opløselige rest plottes langs en ret linie (en korrelationslinie) i et Pb-Pb isokronogram (figur 7). Liniens hældning er proportional med alderen, jo stejlere linien er jo højere vil alderen være, og man har derfor et udtryk for tidspunktet for dannelsen af det mineral, man har undersøgt.



Figur 7. Skematisk Pb-Pb isotopdiagram, der viser øgende mængder af radiogent bly i forskellige udtræk (vist ved numrene i kantet parentes) af et mineral. Hældningen af linien vil under ideelle betingelser være proportional med dannelsesalderen af den respektive mineralfase.

DATERING VED HJÆLP AF BLYISOTOPER: Pb-Pb DATERING

Præcise dateringer ved hjælp af uran- og blyisotoper foregår bedst ved brug af concordiametoden, som er baseret på en beregning af alderen med baggrund i forholdene $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ og $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Alternativt kan man datere ved hjælp af U-Pb og Th-Pb isokroner. Disse er baseret på f.eks. beregninger udfra forholdene $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ og $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ eller $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ og $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$. Der eksisterer kun få gode eksempler på U-Pb og Th-Pb isokronaldre i litteraturen. Med hensyn til U-Pb isokroner skyldes det, at uran let fjernes i miljøer tæt ved jordoverfladen i forbindelse med kemisk forvitring. Dette resulterer i falske, lave U/Pb-forhold.

Til sammenligning vil nutidige tab af uran ikke påvirke isokroner i diagrammer, hvor forholdet $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ er afbildet mod forholdet $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Indbygget i disse forhold er der (som beskrevet i VARV 2002,4) en mulighed for at kontrollere produktionen af datterisotoper af et enkelt grundstof - bly (^{206}Pb , ^{207}Pb) - som en funktion af det radioaktive henfald af forældreisotoper af tilsvarende et enkelt grundstof - uran (^{238}U , ^{235}U). Koblingen af de to henfaldsserier i mineraler og bjergarter giver en tidskontrol udelukkende baseret på forholdene mellem blyisotoper. En meget stor fordel ved Pb-Pb dateringsmetoden er, at det ikke er nødvendigt at bestemme forholdet mellem forældre- og datterisotoper i forbindelse med det analytiske arbejde. Man har kun brug for at måle forholdet mellem blyisotoperne.

DATERING VED TRINVIS UDLUDNING AF ISOTOPER FRA BJERGARTER OG MINERALER

Trinvis udludning af blyisotoper er en helt særlig anvendelse af den kemisk-analytiske teknik ved Pb-Pb datering og er baseret på det forhold, at de radiogene blyisotoper (dvs. blyisotoper dannet ved radioaktivt henfald af uran og thorium) findes på steder i mineralgitteret, hvor de sidder forholdsvis løst bundet. Dette skyldes, at der ved de processer, der er knyttet til de radioaktive henfald dannes defekter i mineralgitteret, og at det radiogene bly sidder i disse defekter. Figur 6 viser en reaktionsrand dannet ved radioaktive processer knyttet til det stærkt radioaktive mineral allanit i en metamorfoseret 3,8 Ga gammel pudelava fra Vestgrønland. Allanit er et thoriumførende mineral i epidotgruppen.

Det bly, der er bygget ind i mineralgitteret ved dannelsen af det respektive mineral, almindeligvis omtalt som 'almindeligt bly', sidder derimod fast bundet og er ikke nemt at få ud af gitteret.

Når et mineral angribes af syrer af variabel styrke, vil det løst bundne radiogene bly forholdsvis nemt blive udludet. Fremadskridende udludning ved hjælp af stærkere og stærkere syrer fjerner derfor mere og mere radiogen bly fra mineralstrukturen. Et sidste kraftigt angreb på mineralgitteret - oftest med

'jerntveiltehydrat' vil fremtidige undersøgelser kunne fastslå, men efter al sandsynlighed vil almindeligt forekommende jernforbindelser, som for eksempel mineralet goethit, være til stede. Dette mineral kan udtrykkes ved formelen FeOOH , og ved tilførsel af vand fås limonit, som i daglig tale også går under betegnelsen rust. I de fleste terrestriske sedimentære miljøer er FeOOH ustabil, idet det med tiden omdannes til hæmatit (Fe_2O_3), hvorved sedimentets farve skifter fra gulbrun til rødlig. De gulbrune farvenuancer som præger Ørkenens klitsand indikerer, at det endnu må indeholde forholdsvis begrænsede mængder hæmatit, og således formentlig befinder sig på et mellemstadium i omdannelsesprocessen.

Hvorfor der i det hele taget er denne farveforskel mellem indlandsklitterne og kystklitterne på Anholt, er et spørgsmål, som Axel Jessen også gjorde sig overvejelser om. Det kan sandsynligvis henføres til deres kildemateriale, idet indlandsklitterne er dannet ved afblæsning af de underliggende strandvolde, mens kystklitterne er dannet af recent, marint sand. Principielt set er strandvoldssedimentet naturligvis oprindeligt marint, men det har ligget hævet over havets påvirkning i tusinder af år, hvorved de geokemiske forhold er blevet ændret. Vind og vejr har med tiden betydet en gradvis nedbrydning af de mørke jernholdige mineraler (f.eks. amfiboler og pyroxener), og derved givet mulighed for udfældning af jernforbindelser på kvartskornenes overflade. Kystklitterne derimod er et yngre fænomen, hvis kildemateriale – marint strandsand – kontinuerligt fornyes, og derfor ikke på tilsvarende vis præges af disse overfladebelægninger.

Axel Jessen mente desuden, at den karakteristiske farve ligeledes skyldes et usædvanligt højt indhold af jernmineraler som magnetit i det sand, der findes på Anholt: såvel recent strandsand som det gamle strandvoldssand. Hvorvidt han har ret i denne antagelse får stå hen i det uvisse, indtil der foreligger sammenlignende, geokemiske undersøgelser af klitsand fra andre danske lokaliteter.

De diagenetiske processer, hvorved sedimenter gradvist bliver mere og mere rødfarvede, resulterer i dannelsen af de såkaldte 'red beds', som optræder gennem hele Jordens historie, men måske især kendes fra Devon i form af Old Red Sandstone, samt fra Perm-Trias som den yngre udgave New Red Sandstone. Sidstnævnte geologiske enhed karakteriseres mange steder af storskala klitaflejringer (se forside). Et mere nutidigt eksempel er dele af de subtropiske og tropiske ørkenområder, hvor klitsandets farve antager mere rødlige nuancer jo ældre det bliver, og jo længere det transporteres fra kilden.

Hvorvidt Anholts Ørken engang i fremtiden vil bestå af fuldstændig rødfarvede klitter er ikke til at sige med sikkerhed, idet mange faktorer spiller ind, herunder klima og havniveau. Men den naturlige diagenese som sedimenterne her gennemgår, giver en potentiel mulighed for, at De Røde Miler med tiden vil være en passende betegnelse for et område af langt større udstrækning end i dag.

KORNSTØRRELSE

Udover den karakteristiske farve er kornstørrelsesforholdene et andet punkt, hvor Anholts indlandsklitter adskiller sig fra de øvrige danske klitforekomster, idet de generelt er usædvanligt grovkornede. Dette blev første gang dokumenteret af Axel Jessen, som analyserede sediment fra 6 indlandsklitter og fandt, at kornstørrelsen udover at være meget varierende karakteriseredes af en fordeling, hvor fraktionerne over 0,5 millimeter udgjorde en væsentlig andel. Den nævnte variation eksemplificeres ved, at én af prøverne var sammensat således, at 91% af kornene havde en diameter som oversteg 2 millimeter, hvilket principielt set gør betegnelsen flyvesand lettere ukorrekt. Imidlertid er denne prøve ikke et udtryk for, at nogle af indlandsklitterne består af grus snarere end sand. Forklaringen ligger derimod i deres interne tekstur, idet Jessen anfører at: 'Det ejendommelige 'Flyvesand' -- danner ikke hele Klitten, men kun enkelte Lag i denne'.

Nye kornstørrelsesanalyser af sedimentprøver fra 19 indlandsklitter fordelt over et repræsentativt område af Ørkenen viser en gennemsnitlig kornstørrelse på 479 mmeter (mmeter = 1/1.000 millimeter), svarende til mellemkornet sand. Det er dog ganske tæt på at kunne kaldes grovkornet, idet denne betegnelse

forudsætter mindsteværdien 500 mmeter eller 0,5 millimeter. Ser man på kornstørrelsesfordelingen i det analyserede klitsand fremgår det, at fraktionen under 0,5 millimeter i gennemsnit udgør 56%, mens fraktionerne større end 0,5 millimeter udgør 44% og i visse tilfælde helt op til 83%.

Således bekræftes Jessens observationer, og desuden muliggør de nye, mere geografisk dækkende data, at der kan aflæses en overordnet tendens med aftagende kornstørrelse mod nordøst, hvilket også er forventeligt med tanke på de dominerende, vestlige vindretninger.

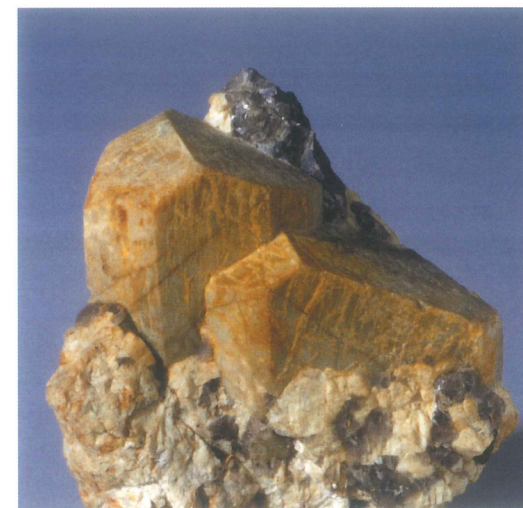
Forskellen mellem indlandsklitter og kystklitter begrænser sig ikke kun til farven, men omfatter også kornstørrelsen. Axel Jessen konstaterede dette fænomen i 1897 ved at inddrage to kystklitter i sine undersøgelser.



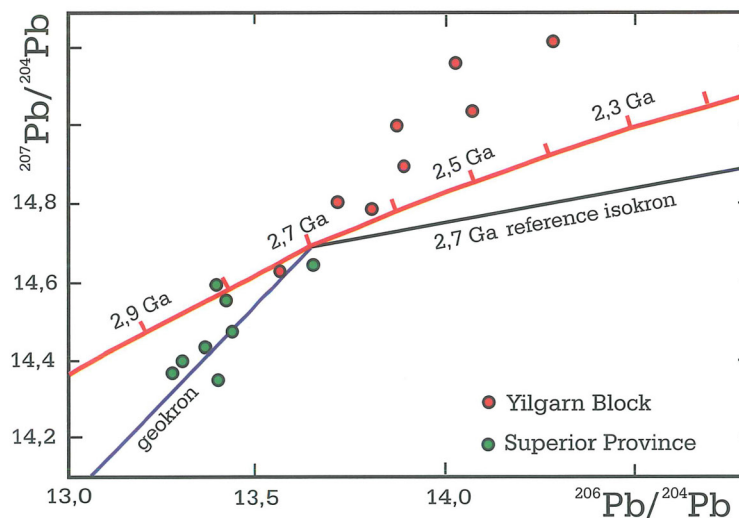
Figur 7. Sandskredstunger med korn op til 5 millimeter. De Røde Miler.

spejler (figur 2). Dette viste forskeren Oversby allerede i 1978 i et studium, hvor han sammenlignede fordelingen af blyisotoper i kalifeldspatter (figur 4) fra senarkæiske (ca. 2,7 Ga) granitoider fra henholdsvis Yilgarn blokken i Australien og den østlige del af Superior provinsen i Canada.

Kalifeldspatter er stærkt beriget med bly i forhold til uran og bliver ofte brugt til give en ide om blyisotopsammensætningen i de magmaer, hvor de er dannet. Figur 5 viser den oprindelige blyisotopsammensætning af granitoiderne fra Canada og Australien sammenlignet med en et-trins vækstkurve for den totale Jord. Granitoiderne fra Superior provinsen plotter tæt ved eller lidt under kurven for den totale Jord, mens granitoiderne fra Yilgarn blokken ligger noget over kurven. Sådanne data viser, at der allerede i Senarkæikum var udviklet markante heterogeniteter i magmaernes kildeområder i den kontinentale skorpe. De høje værdier af forholdet $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ i forhold til $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ som man finder i Yilgarn blokkens bjergarterne kan skyldes tilstedeværelsen af ældre skorpekomponenter med høje U/Pb-forhold.

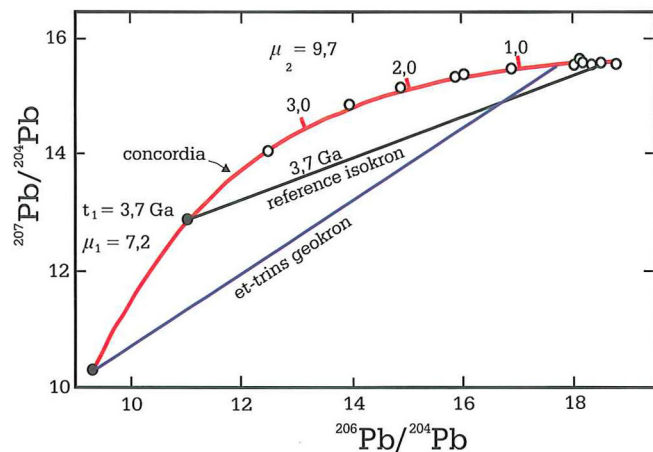


Figur 4. To kalifeldspat krystaller. Foto: O.B. Berthelsen



Figur 5. Blyisotopdiagram med data fra granitoider fra Canada, Superior Provensen (åbne cirkler) og Australien, Yilgarn blokken (udfyldte cirkler).

Blyudviklingskurven er en et-trins vækstlinie som svarer til den endelige sammensætning af bly i 'gennemsnits-Jorden'.



Figur 2. Bly-udviklingsdiagram med Stacey og Kramers to-trins vækstkurve. Modellen er i dag bredt accepteret som den, der bedst repræsenterer den gennemsnitlige skorpevækst gennem hele Jordens historie. Den totale Jords et-trins udviklingskurve (geokronen) er vist til sammenligning.

Det viser sig imidlertid, at de fleste blymalms blyisotopsammensætning er afvigende eller 'anomal', idet de ikke 'plotter' langs en et-trins vækstkurve. Forskerne Stacey og Kramers under-søgte i 1975 galena fra 13 malm-forekomster med veldokumenterede aldre rundt om i verden. De viste, at brugte de disse nye data sammen med de værdier for Jordens oprindelige blyisotopsammensætning, der var opnået på Canyon Diablo meteoritten, passede resultaterne bedre til en

to-trins udviklingsmodel (figur 2).

I følge Stacey og Kramers model udviklede bly sig i tidlig Arkæikum for mellem 4,57 Ga - 3,7 Ga siden (Ga: Giga år = milliarder år) i et reservoir, hvor forholdet mellem uran og bly udtrykt som forholdet mellem isotoperne $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ($=\mu$) havde en konstant værdi på 7,19. For 3,7 Ga siden skete der en massiv dannelse af kontinental skorpe, og μ steg til 9,74 idet uran i denne første proto-kontinentalskorpe opkoncentreredes i forhold til bly. Kappen blev tilsvarende fortyndet med hensyn til uran. Værdien på 9,74 gælder stadig som en gennemsnitsværdi for den kontinentale skorpe.

Kontinentalskorpen har dog altid været langt mere uensartet end den viste veldefinerede vækstkurve for galena af-



Figur 3. Eksempel på en sulfidforekomst, hvor sulfiderne er bundet til bestemte lag (stratabound eller stratiform).

Imidlertid er det først nu, at der foreligger eksakte tal for de gennemsnitlige kornstørrelsesværdier, og derved kan kystklitterne tilskrives en værdi på 298,5 mmeter, mens indlandsklitterne som tidligere nævnt har en middelværdi på 479 mmeter. Selvom der i begge tilfælde er tale om mellemkornet sand, er forskellen alligevel betydelig, og kan oftest erkendes med det blotte øje, uden brug af lup eller mikroskop. Som det var tilfældet i forbindelse med sandets varierende farvenuancer, skal forklaringen på denne kornstørrelsesvariation søges i kildematerialet. Med Jessens ord skyldes det, at: 'Materialet i de hævede Havstokke, hvorfra Indsandene stamme, er grovere og mere uensartet end Sandet ved de nuværende Kyster'.

Indlandsklitternes usædvanlige kornstørrelse afspejles også af de sandskredstunger (figur 7), som er almindeligt udbredte blandt de mest aktive klitter, og gerne i forbindelse med vindbrud, hvor sand let skrider ned af de stejle sider. Ved De Røde Miler er der god mulighed for at studere disse sandskredstunger, og analyse af indsamlede prøver viser, at kornstørrelsen når helt op til 5 millimeter.

Et andet fænomen som demonstrerer kornstørrelsesvariation på en mindre skala er lamination, idet klitternes interne tekstur præges af vekslende fine og grove lag, aflejret under skiftende vindenergiforhold. Afblæsning på grund af kraftige vinde vil forårsage en opkoncentrering af det groveste sediment, hvilket giver sig udslag i, at der på klitternes stødside kan dannes overfladelag med spredte klaster op til 7-8 millimeter i diameter. Det grove materiale findes meget ofte aflejret som et mønster af vindribber (figur 8a og 8b), hvis form og orientering afhænger af kornstørrelse, vindretning og klittopografi.

De geokemiske og sedimentologiske karaktertræk, som adskiller Anholts indlandsklitter og kystklitter, kan vanskeligt forklares på anden måde end Axel Jessen gjorde det for over 100 år siden: som et resultat af forskellige dannelseshistorier. Flere vægtige beviser understøtter teorien om at de to klittyper ikke har samme kildemateriale, herunder den markante farveforskel der som nævnt kan relateres til jernholdige forvittringsprodukter, samt det faktum at indlandsklitterne er mere grovkornede end kystklitterne. Var Ørkenens klitter dannet ved tilførsel af sediment fra kysten, i stedet for ved 'lokal' afblæsning af de hævede strandvolde, havde det givet ophav til den omvendte kornstørrelsesvariation med de mest finkornede klitter beliggende indlands, i størst afstand fra kilden..

UDVIKLINGSHISTORIE

Ørkenen som vi kender den i dag er ganske ung i geologisk forstand, idet den først begyndte at tage form i 1600-tallet. Før den tid var området dækket af en større fyrreskov, men i 1560 beordrede Frederik II etableringen af øens første fyr, og brændslet hertil skulle skaffes lokalt. Konsekvensen blev kraftig for-



Figur 8a. Komplekst mønster af vindribber, der er udviklet i et aktivt vindbrud under østlig kuling.

hugning af skoven, og i 1592 indskærpede Christian IV at der ikke måtte fældes yderligere af den decimerede skov, idet søfolkene beklagede sig over, at der derved forsvandt et vigtigt sømærke. I stedet skulle fyret holdes ved lige ved hjælp af importeret træ fra Norge, og i 1624 gik man endeligt over til kulfyring. Andre faktorer, så som tjærefremstilling og træ til husholdningsbrændsel, kan også have påvirket skovhugsten, men disse faktorer har højst sandsynligt været af sekundær betydning.

Da først skoven var blevet kraftigt reduceret, har sandflugt været uundgåeligt, i særdeleshed på grund af øens udsatte placering. Kilder beretter om sandflugtskader allerede i 1640'erne, og kulminationen indtraf i 1680, hvor byen var alvorligt truet af tilsanding.

Disse begivenheder omkring skovens forsvinden fra Anholt omtales kort af Axel Jessen, som desuden nævner den interessante kendsgerning, at der så sent som i begyndelsen af 1800-tallet blev observeret fyrrestubbe i klitterne. Fundene af stubbe og rødder viser, at de ældste indlandsklitter må være dannet før fyrreskoven bredte sig over den hævede strandvoldsslette, hvilket er ensbetydende med aldre på mindst 500 år. Men med arkæologernes hjælp er det faktisk muligt at spore Ørkenens første klitter endnu længere tilbage i tiden. Mange af dem, som i årenes løb har gæstet Anholt, kender utvivlsomt til det ganske betydelige antal flintværksteder, der findes spredt rundt omkring på de sparsomt

BLYISOTOPER

EKSEMPLER PÅ DERES ANVENDELSE

Robert Frei

I 2002 bragte VARV (VARV 2002,4) en artikel, der gav en introduktion til arbejdet med blyisotoper, herunder principper, begreber som fraktionering og reservoirer samt endelig Jordens oprindelige parametre. I dette nummer giver samme forfatter eksempler på anvendelsen af blyisotoper.

UDVIKLINGEN AF JORDENS SKORPE - KAPPESYSTEM

I forbindelse med arbejdet med blyisotoper fandt man på et tidligt tidspunkt ud af, at blyisotoper i galena eller blyglans (PbS , figur 1) fra nogle af de store sulfidforekomster - f.eks. bly-zink-sølv forekomsten ved Mount Isa i Australien - 'plotter' langs en såkaldt et-trins vækstkurve i blyudviklingsdiagrammet, hvor forholdet $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ er afsat mod forholdet $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (figur 2, se også VARV 2002,4). I Mount Isa forekomsten er galena stratabundet, dvs. knyttet til bestemte lag i en skiffer af prækambrisk - midtproterozoisk alder - alder (figur 3). Galenaen er endvidere dannet på samme tid som forekomsten i øvrigt.

En et-trins vækstkurve viser, at blyisotopsystemet i galenaen har haft en forholdsvis simpel historie. Man forestillede sig oprindeligt, at forekomsterne var afledt fra Jordens kappe og nedre skorpe og derefter udviklet i et lukket system, dvs. et system, hvor der ikke havde været udveksling af isotoper med omgivelserne.



Figur 1. Krystaller af galena. Galena kendes på, at mineralet er meget tungt, nemt at ride med en kniv og har en udpræget spaltelighed som en terning.

at den største mængde flyvesand er blevet aflejret i den nordlige del, mens der i den sydlige del kun findes omkring et par meter.

Op igennem hele lagserien til den moderne overflade veksler litologien af flyvesandsenheder afgrænset af jordbundshorisonter. Denne vekslen i litologi fortæller en historie om primært klimaudvikling og opbygning af klitfeltet gennem de seneste ca. 7.000 år. Optagelserne med georadaren har gjort, at de mest markante jordbundshorisonter nu med stor præcision kan korreleres ud over hele klitfeltet. De har dermed været med til at skabe et mere fuldstændigt billede af den geologiske udvikling af Hvidbjerg kystklitfelt, der viser at hele klitfeltet enten har været stabiliseret af et tykt vegetationsdække eller har været påvirket af markant sandflugt og vandreklitdannelse. Dateringer i området peger på, at perioderne med et stabilt vegetationsdække har været den normale situation, dvs. den situation der i tid har været mest almindelig, mens perioderne med sandflugt har været ekstreme eller unormale. Derudover har de også vist, at de klimatiske ændringer der er foregået forud for skiftende mellem stabilisering og sandflugt er sket relativt hurtigt, dvs. indenfor få hundrede år.

Man kan læse om kystklinten ved Lodbjerg, der ligger umiddelbart syd for Hvidbjerg kystklitfelt i VARV 1989,4, samt i artiklen 'Mens havet æder ind i det nordjyske hedelandskab' af David Liversage og David E. Robertson i Naturens Verden, nr. 7, 1988, før man selv tager derop og ser på et af landets flotteste områder.



Figur 8b. Nærbillede af vindribber (kompas som skala).

bevoksede strandvolde (figur 9) og vidner om stenalderfolkenes tilstedeværelse. Arkæologerne har foretaget adskillige undersøgelser af disse fund, som kan tidsfæstes til perioden 5.000 – 3.500 år før nu, svarende til slutningen af Atlantisk tid og et stykke ind i Subboreal tid. Set fra et geologisk synspunkt er det mest interessante imidlertid, at Ørkenens ældste boplads er fundet på en 2-3 meter høj klit. Dette er nemlig ensbetydende med, at strandvoldssletten allerede for 5.000 år siden prægedes af klitdannelse, men i hvor høj grad de oprindelige klitter er bevaret til i dag, og hvilken udstrækning de har haft, vides ikke med sikkerhed.

Trods de ubesvarede spørgsmål, tegner der sig efterhånden et nogenlunde sammenhængende billede af den udviklingshistorie, som Ørkenens særprægede landskab afspejler. Mindst to perioder af klitdannelse har påvirket den hævdede strandvoldsslette; første gang mens den var ung og sandsynligvis endnu vegetationsløs, således at intens afblæsning forholdsvis let kunne fjerne en betragtelig del af strandvoldssedimentet. Adskillige tusind år senere dækkedes området af en fyrreskov, og da denne stabiliseringsfaktor forsvandt efter 1560, havde sandflugten frit spil til at mobilisere de gamle klitter, hvorimod afblæsning af strandvoldene formentlig kun har haft begrænset betydning i denne periode.

Årsagen til den voldsomme sandflugt, som i 1600-tallet skabte grundlag for ørkendannelse, skal formentlig findes i en kombination af menneskelige og na-

turlige faktorer, idet effekten af skovhugsten efter al sandsynlighed er blevet forstærket af 'den lille istid', som bragte koldere og mere blæsende klima til størstedelen af Nordvesteuropa.

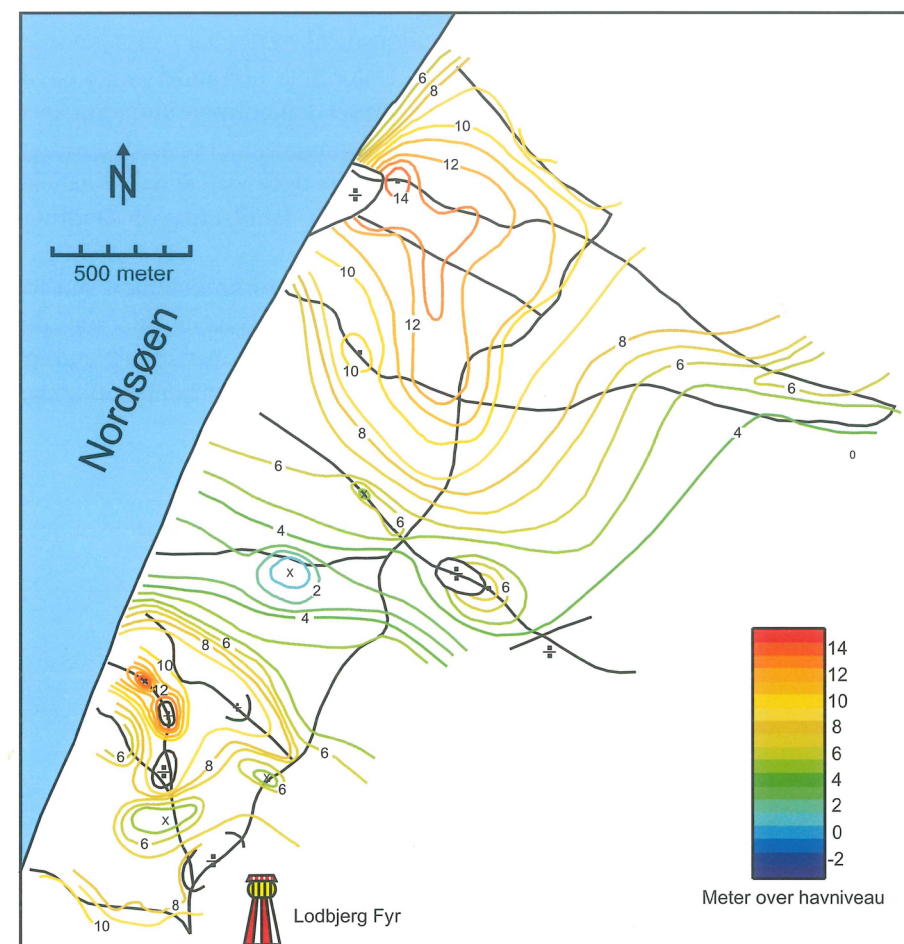
Indlandsklitterne på Anholt udgør til stadighed et geologisk set forholdsvis uudforsket område, som kun ganske få har beskæftiget sig med siden Axel Jessens grundlæggende arbejde i 1897. Fremtidige undersøgelser vil først og fremmest søge at afdække spørgsmålet om klitternes alder ved hjælp af datering, for på den måde at kortlægge udviklingshistorien og derigennem opnå en bedre forståelse for, hvordan landskabet har fået sit karakteristiske udseende. Den særprægede morfologi er endnu et punkt, hvor Ørkenens klitter adskiller sig fra klitforekomsterne i resten af landet, og måske ligger en del af forklaringen i det mulige tidsperspektiv på 5.000 år. De klittyper, som findes på Anholt, passer kun sjældent ind i en traditionel klassifikation på grund af deres komplekse, erosionsprægede morfologi, og derfor vil noget af det fremtidige arbejde også bestå i at etablere en ny klassifikation. Andre vigtige, relativt uudforskede faktorer, som i større eller mindre grad kan have betydning for klitmorfologien, er blandt andet vindklima og vegetation. Derudover ville det være interessant at undersøge, hvorvidt sedimenterne eventuelt indeholder klimasignaler, for eksempel udtrykt ved kornstørrelse eller geokemi, således at det bliver muligt at sætte Anholts klitter i relation til regionale, palæoklimatiske begivenheder.

Mange processer har haft betydning for udformningen af det klitlandskab, vi ser i dag (figur 10). Gennem adskillige tusind år har det været i kontinuerlig



Figur 9. Flintmateriale fundet i området øst for flyvepladsen. Foto: Ole B. Berthelsen.

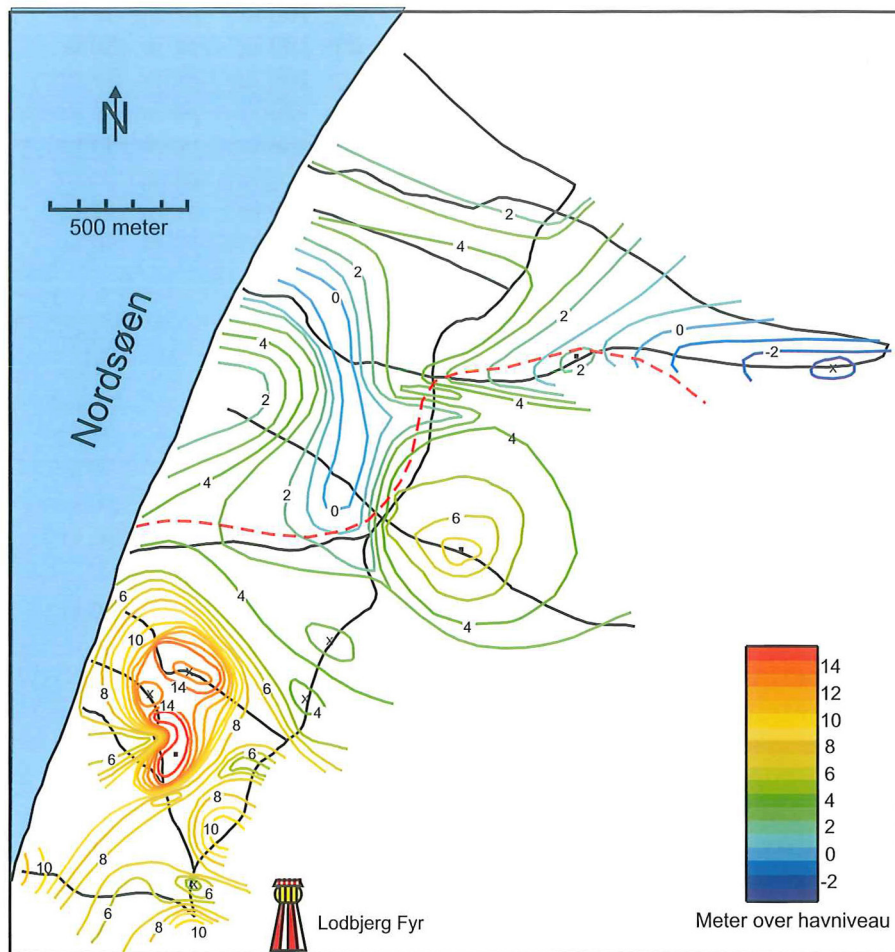
senere igen, hvilket betød, at vindhastigheden igen faldt, og at hele klitfeltet for ca. 4.500 år siden for første gang blev stabiliseret af indvandrende pioner-vegetation. Floraen blev med tiden mere varieret, og der dannedes en massiv jordbundshorisont. Denne jordbund svarer til den grønne reflektor på radargrammerne, og topografien af hele overfladen i området kan ses på figur 8. På kortet kan man se en bølgende overflade, der generelt hælder ind mod land i den nordlige del. Der ses to højdedrag, et mod syd og et mod nord. Sammenholder man dette kort med kortet over tillen og de marine sedimenter, kan man udlede,



Figur 8. Topografisk kort over den første stabiliseringsflade i klitfeltet. Det ses, at fladen generelt hælder ind mod land, og at den består af to højdedrag med et lavtliggende område imellem. Topografien i den sydlige del er styret af den underliggende till, mens flyvesandsaflejringer er styrende i den nordlige del.

bet en ca. 100 meter bred flod i en nordlig retning op igennem de to markante tillknolde og ud imellem sandbankerne. Inden denne flod forsvandt, efterlod den en lang erosionskanal, der nu kan ses på kortet.

På et tidspunkt, for ca. 5.000 - 6.000 år siden, skete der en klimatisk ændring, der blandt andet resulterede i kraftigere vinde fra vest. Denne klimatiske forværring satte den første sandflugt i området i gang og store parabelklitter, mægtige til Råbjerg Mile på Skagen, byggede sig op, bevægede sig mod øst og dækkede hele området med flyvesand i løbet af få hundrede år. Klimaet ændrede sig



Figur 7. Topografisk kort over landskabet under flyvesandet, hvor konturlinierne tydeligt viser niveauforskelle i overfladen. I den sydlige del ses en bølget tillovsflade, mens den nordlige del består af marint sand. Den røde stiplede linie illustrerer den daværende kystlinje.



Figur 10. Et nyt sandlegeme breder sig ud over det ældre klitlandskab nord for De Røde Miler. I baggrunden skimtes Anholt fyr.

forandring, under indflydelse af såvel naturlige som menneskelige faktorer, hvilket afspejles af indlandsklit-ternes særegne karakter-træk. Med Axel Jessens afhandling fra 1897 blev der første gang sat fokus på denne interessante men uudforskede del af Danmarks geologi, og vide-reførelsen af hans arbejde vil med tiden føje nye kapitler til historien om De Røde Miler på Anholt.

NOGLE SEDIMENTOLOGISKE UDTRYK

Betegnelsen **sand** bruges ofte i en ret bred betydning, men dækker principielt over et bestemt interval på kornstørrelsesskalaen. Dette interval går fra 0,06 millimeter til 2 millimeter og er yderligere underopdelt, idet man almindeligvis skelner mellem fint, mellem og groft sand. Nogle skalaer har en finere inddeling med 5 subintervaller, som tilføjer benævnelserne meget fint og meget groft til de nævnte.

Diagenese omfatter en række fysiske og kemiske processer, som et sediment gennemgår efter aflejringen. Det kan være kompaktion, opløsning, rekrySTALLISATION, replacering og cementering. Processerne foregår ved temperaturer på op til 150-200 °C, og omdanner det løse sediment til en sammenhængende sedimentær bjergart.

GEORADARKORTLÆGNING AF HVIDBJERG KYSTKLITFELT

Karsten Pedersen

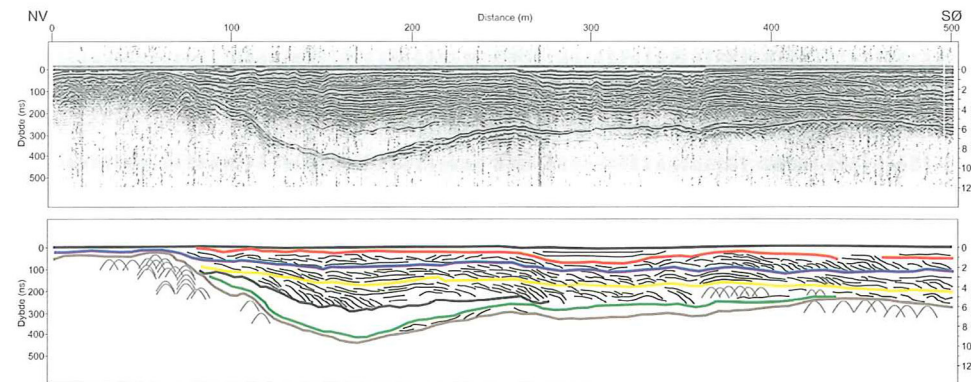
Nord for Lodbjerg Fyr i det vestligste Thy ligger Hvidbjerg kystklitfelt, der mod vest er afgrænset af en stejl kystklint (figur 1). Kystklinten har, sammen med kystklinten ved Lodbjerg der ligger umiddelbart syd for, i mange år været en klassisk lokalitet for nye geologistuderende og andre interesserede, på grund af de tydelige blotninger af både till og flyvesand (se VARV 1989,4). Flyvesandet er delt op i enheder, der er afgrænset af mere eller mindre markante jordbundshorisonter, som for de mest markantes vedkommende strækker sig flere kilometer langs kystklinten. Jordbundshorisonterne og flyvesandet er nu blevet kortlagt ind i land og korreleret til blotningerne i kystklinten ved hjælp af georadarmetoden. Kortlægningen har været med til at give et meget mere detaljeret billede af den geologiske opbygning af kystklitfeltet.



GEORADARMETODEN

Georadar er en geofysisk målemetode, der registrerer lagfølger og strukturer i de øverste jordlag ved hjælp af elektromagnetiske bølger. Georadaren består af en afsenderantenne, en modtagerantenne og en kontrolenhed (figur 2). Den virker ved, at kontrolenheden giver signal til afsenderantennen om at udsende en kugleformet, elektromagnetisk bølge med en bestemt frekvens. En del af denne bølge bevæger sig ned igennem jorden, hvor den, ved en ændring i de øvre jordlags elektromagnetiske egenskaber, vil blive re-

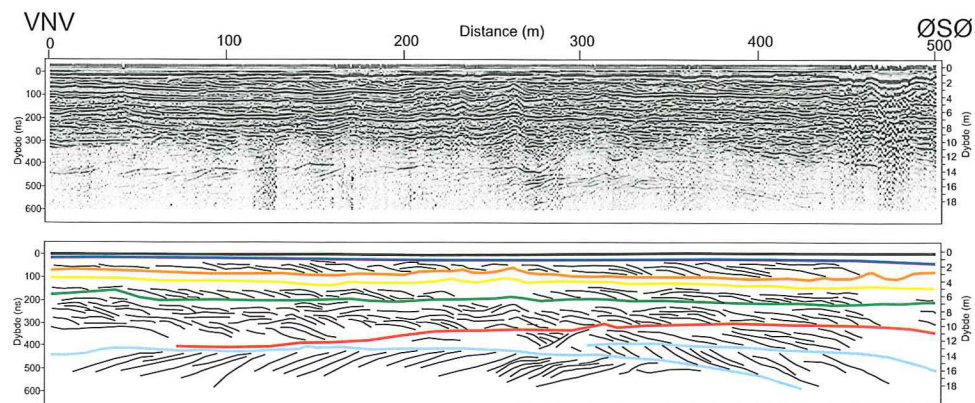
Figur 1. Oversigtskort over Hvidbjerg kystklitfelt. På kortet er samtlige georadarlinier vist med gult, mens udsnitene præsenteret her er vist med rødt.



Figur 6. Radargram optaget i den sydlige del af Hvidbjerg kystklitfelt. Nederst ses till overlejret af flyvesand, der for den nederste, centrale dels vedkommende er aflejret i en sø. De to nederste jordbundshorisonter dækker hele klitfeltet, mens den øverste kun har lokal udbredelse. Grundvandsspejlet ligger her ca. 3 meter under overfladen.

relt meget leret, så derfor er det ikke muligt at se interne strukturer i denne enhed. Man kan se, at tillooverfladen er meget bølget med et højdepunkt mod nordvest, en central fordybning og et jævnt, fladt stykke mod sydøst. I den centrale fordybning over den grønne reflektor ses en ca. 3 meter tyk enhed, hvori der ikke er optaget nogen reflektorer. Denne enhed er tolket til at være flyvesand aflejret i en sø, der har været i fordybningen i tillooverfladen. Over søaflejringen ses en lagfølge af flyvesandsenheder, der er afgrænset af jordbundshorisonter. Den grønne og den gule reflektor kan korreleres til den grønne og den gule reflektor på figur 5 og repræsenterer jordbundshorisonter der dækker hele området, mens den røde reflektor illustrerer en jordbundshorison, der kun har begrænset lateral udbredelse på nogle få hundrede meter. Grundvandsniveauet ligger i denne del af klitfeltet i ca. 3 meters dybde, hvilket betyder at det falder med ca. 2,5 meter over en strækning på 2,5 kilometer.

Ud fra tolkningen af de 16 kilometer georadarprofiler er det blevet muligt at visualisere de øverste ca. 20 meter af den geologiske lagfølge ved Hvidbjerg kystklitfelt og fremstille topografiske kort over de mest markante horisonter nær den moderne overflade. Hvis man fjernede hele flyvesandsenheden ville man kunne se, hvordan området så ud for ca. 7.000 år siden (figur 7). Overfladen ville bestå af en meget bakket tillooverflade i den sydlige del i form af store, isolerede tillknolde med dale imellem. Den daværende kystlinie ville gå i en mere nordøst-sydvestlig retning og være meget mere ujævn end den nuværende. Ud for kysten ville der være en opbygning af oddekomplekser, der i nogle tilfælde ville ligge over havoverfladen og danne mindre sandbanker. Ud fra det topografiske undergrundskort kan man også fornemme, at der muligvis har lø-

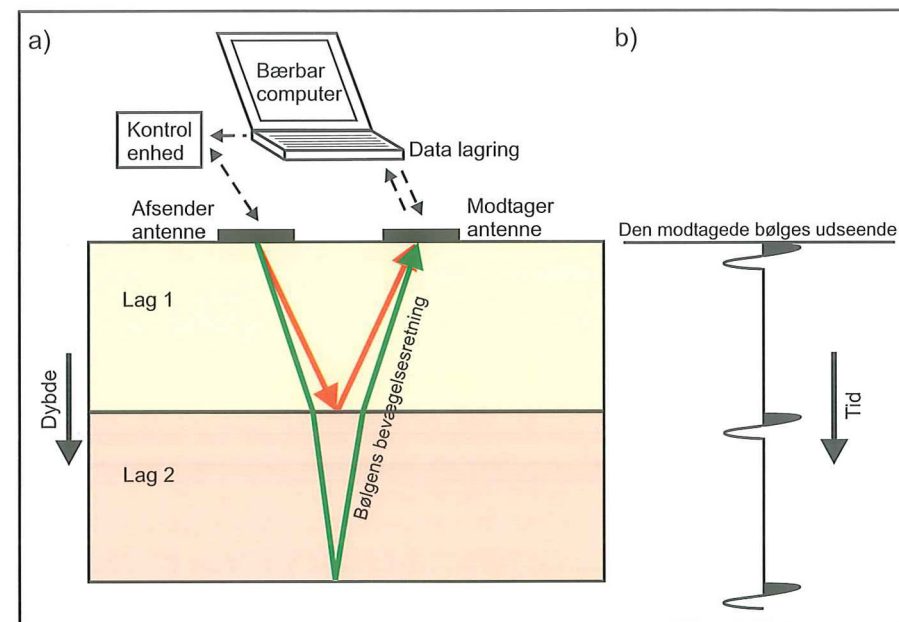


Figur 5. Radargram optaget vinkelret på den moderne kystlinje. Markante jordbundshorisonter er markeret med rød, grøn, gul og orange farve, mens grænsen mellem flyvesandet og de marine sedimenter er markeret med lyseblå. De interne strukturer ses tydeligt på det meste af profilet. Grundvandsspejlet ligger lige under overfladen og indtrængningsdybden for georadaren er her ca. 18 meter.

grænser op til Lodbjerg kystklitfelt. Litologien, markante horisonter og interne strukturer er korreleret og tolket ud fra observationer i kystklinten, hvor man tydeligt kan se jordbundshorisonterne, og fra borer udført umiddelbart ved siden af de viste radargrammer.

I den nordlige del af undersøgelsesområdet, i et strøg der går fra kystklinten og vinkelret ind i land (figur 1), kan man på radargrammet (figur 5) se fem markante og næsten horisontale reflektorer, der imellem sig har mindre, mere stejlt hældende reflektorer. De fire øverste, markante reflektorer, vist med rød, grøn, gul og orange, repræsenterer jordbundshorisonter der på dannelsesstidspunktet har stabiliseret flyvesandet og dermed forhindret videre sandflugt. De små reflektorer der ses indimellem, hælder alle mod øst og viser interne strukturer fra de bevarede vandreklitter, der i perioderne mellem stabiliseringerne bevægede sig mod øst, ind i land. Nederst på radargrammet ses både vest- og østhældende reflektorer. Disse reflektorer repræsenterer de interne strukturer i en strandvoldsopbygning, der gik forud for sandflugten. Strandvoldene er tidsbestemt til at være ca. 7.000 år gamle og dannet i forbindelse med den første Littorinatrangression. Grænsen mellem de marine sedimenter og flyvesandet er markeret med en lyseblå linie. Grundvandsniveauet lige her ligger ca. 0,5 meter under overfladen og er illustreret med en mørkeblå linie.

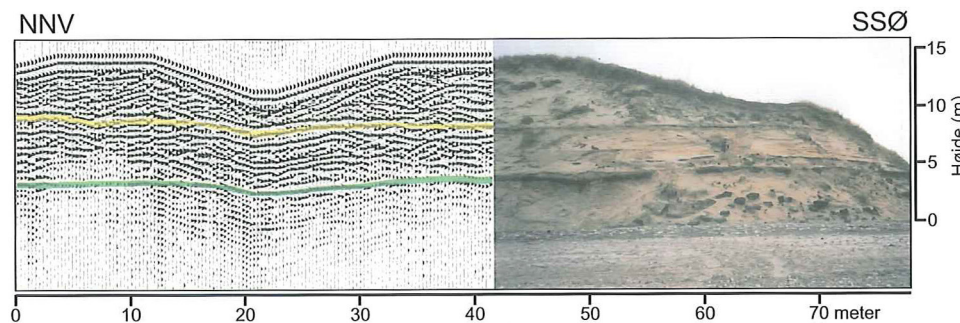
I den sydlige del af kystklitfeltet, mellem kystklinten og Lodbjerg Fyr (figur 1), ca. 2,5 kilometer syd for det sted hvor radargrammet på figur 5 er optaget, kan der på radargrammet (figur 6) ses en kraftig reflektor i bunden af billedet, markeret med en brun linie, der mod nordvest ligger tæt ved overfladen. Denne reflektor korrelerer med overfladen af tillen, der ses i kystklinten. Tillen er gene-



Figur 2. Principskitse af (a) en georadarooptagelse og (b) billedet af den registrerede elektromagnetiske bølge, hvor udsvinget på linien viser, at jordens elektromagnetiske egenskaber ændres ved grænsen mellem lag 1 og lag 2.

flekteret og igen registreret af modtagerantennen. Jo større ændringen er, jo kraftigere et signal vil modtagerantennen registrere. Modtagerantennens registreringer bliver lagret i en bærbar computer og vil umiddelbart kunne ses på skærmen som et todimensionalt profil af undergrunden. Sådan et profil kaldes et radargram, og refleksioner i form af kontinuerte linier kaldes reflektorer (figur 3). Antennerne er sat op på en vogn, der trækkes manuelt, mens kontrolenheden og den bærbare computer er monteret på et rygsækstativ (figur 4). Hele opsætningen gør, at to personer er i stand til at fremstille op til ca. 2 kilometer georadarprofil i timen, hvis terrænet og vejret tillader det. Opsætningen på trækvognen gør det også muligt at optage udenfor alment tilgængelige veje og stier.

Da det er forskelle i jordlagenes elektromagnetiske egenskaber georadaren optager, er det 'kun' et pseudo-profil af geologien i området man kan se. Grundvandsspejlet og mange ikke direkte geologiske objekter i undergrunden, såsom metal- og arkæologiske genstande, vil også kunne give ophav til refleksioner. Derudover vil også 'overjordiske objekter', f.eks. biler, træer og højspændingsledninger kunne blive optaget på radargrammet. Men da de elektromagnetiske egenskaber i jordens øverste lag generelt kan relateres til strukturelle og litologiske



Figur 3. Foto af Hvidbjerg kystklint, hvor klintestykket til venstre er blevet kortlagt af georadaren. De to mørke jordbundshorisonter, der ses på billedet, viser sig som kraftige reflektorer på radargrammet og er markeret med grønt og gult. De interne strukturer der består af krydslejret flyvesand er også meget tydelige og fremstår som skråtstillede reflektorer. Under den grønne jordbund er det modtagne signal for svagt til at kunne tolkes.

variationer imellem sedimenterne, får man tydeligt et indtryk af den geologiske opbygning af de overfladenære jordlag.

Da georadaren arbejder ved hjælp af elektromagnetiske bølger, vil jordtyper der er elektrisk ledende, dæmpe der reflekterede signal. Jo bedre elektrisk ledende jordtypen er, jo mindre del af den udsendte bølge vil trænge igennem dens overgrænse og underliggende jordlag vil være 'usynlige' for georadaren. Lerede og siltede sedimenter vil typisk være jordartstyper, som georadaren ikke kan



Figur 4. Opsætning af georadarudstyret, så det er klart til brug.

trænge igennem, mens sand- og grusforekomster ofte vil give meget fine profiler. Forskellige typer af forurening vil også kunne dæmpe det udsendte signal, hvilket også gør metoden til et effektivt værktøj ved forureningskortlægninger. Både dæmpning af signalet på grund af elektrisk ledende jordarter og den dæmpning der opstår på grund af signalsvækkel- se, jo længere væk fra senderantennen bølgen

når, gør at den største dybde georadaren kan nå ned i på almindelig landjord er begrænset til ca. 50 meter under ideelle forhold. Oftest er indtrængningsdybden dog ikke mere end ca. 20 meter. I is kan indtrængningsdybden i modsætning hertil være flere hundrede meter.

Den tid, der går fra den elektromagnetiske bølge bliver udsendt til den bliver optaget igen, måles i nanosekunder (ns), hvilket svarer til milliardtedele af et sekund. Dette betyder, at den første dybdeskala man får, er i tid, som senere skal omregnes til meter for at give større mening. Den hastighed, hvormed den elektromagnetiske bølge bevæger sig, ændrer sig afhængigt af det materiale, den bevæger sig igennem. I luft bevæger bølgen sig med lysets hastighed, hvilket er 0,3 m/ns (meter pr. nanosekund), mens den i jord er væsentlig langsommere. I tørt sand og grus er hastigheden ca. 0,13 – 0,17 m/ns, mens den i vandmættet sand og grus er ca. 0,05 – 0,07 m/ns. Dette betyder, at såvel litologien som dybden til grundvandet er af stor betydning for omregningen af dybdeskalaen fra tid til meter.

Når man har optaget et radargram og skal til at tolke resultatet, er det vigtigt at have en ide om de overfladenære jordlag i det undersøgte område, da radargrammet ikke direkte fortæller noget om litologien, men kun noget om strukturerne i undergrunden. Sådan en viden kan man få fra borer i nærheden eller fra blottede profiler f.eks. ved kystklinter eller i grusgrave. Dette gør det meget nemmere at korrelere bestemte geologiske laggrænser med markante reflektorer på radargrammet og dermed udarbejde en dannelseshistorie for området (figur 3).

GEORADARKORTLÆGNING AF HVIDBJERG KYSTKLITFELT

Hvidbjerg kystklitfelt dækker et område på ca. 35 kvadratkilometer og består af en ca. 15 meter tyk lagfølge af flyvesandsenheder, der er afgrænset af jordbundshorisonter. Hele lagfølgen er aflejret i Holocæn, dvs. perioden fra den sidste istid og til i dag. Under denne lagfølge ligger i den sydlige del en till (VARV 1989,4), der er aflejret i forbindelse med den sidste istids fremstød til hovedstilsandslinien, der ligger ca. 30 kilometer syd for Hvidbjerg kystklitfelt. Sedimenterne umiddelbart under flyvesandet i den nordlige del består af marint sand aflejret i små bugte, der blev dannet som følge af isafsmeltningen i Skandinavien og på det nordamerikanske kontinent ved afslutningen af sidste istid. I den sydlige del af Hvidbjerg kystklitfelt er der indsamlet ca. 16 kilometer radargrammer i forbindelse med et geologisk kortlægningsprojekt af området. Tolkningen af radargrammerne har dannet baggrund for fremstillingen af topografiske kort over de mest markante jordbundshorisonter. To eksempler på radargrammer fra undersøgelsen er vist på figur 5 og figur 6. Figur 5 er fra den midterste del af Hvidbjerg kystklitfelt, mens figur 6 er fra den sydlige del, der