

*En beretning i tre dele om mine lære- og pionérår i Risø's elektronikafdeling*

Leif Løvborg

**Del 1: Eksamensprojektet (1961), side 1 - 13**

Del 2: Isotopmåleteknik (1962-65), side 14 - 50

Del 3: Kvanefjelds-årene (1966-69), side 51 - 104



Det næsten færdiggjorte byggeri på "landdelen" af Risø.  
Elektronikafdelingen havde hjemsted i bygning 109.

Billedkilde: Side 17 i Beretning om Atomenergikommissionens virksomhed i tiden 1. april 1961 til 31. marts 1962.

## Resumé af Del 1

Eksamensprojektet var det sidste trin i min uddannelse til elektroingeniør på DTH Østervold og strakte sig over seks måneder inklusive skrivning af en fyldig rapport. Jeg valgte et projekt udbudt af elektronikafdelingen på Risø for at supplere mit speciale i radioteknik med en oplæring i teknikken til måling af radioaktive isotopers emission af gammastråling.

Jeg indleder med at fortælle, hvordan man registrerer de karakteristiske såkaldte fototoppe i et spektrum, der afspejler gammafotoners afsætning af energi i en såkaldt scintillationsdetektor.

Min projektopgave bestod i at bygge et rent visuelt fungerende gammaspektrometer, hvor en fototop skulle fremtræde som konturen af et kegleformet lysende areal på en oscillografskærm med lang efterglødstid. Elektronikken for denne måleopstilling slap jeg heldigt fra at konstruere, men kontrasten i afbildningen af en fototop var for dårlig til at gøre metoden anvendelig i praksis.

Projektet havde ikke desto mindre givet mig lyst til at videreuddanne mig i radioaktivitetsmåleteknik generelt, så jeg tog imod et tilbud om ansættelse i afdelingen, når jeg havde bestået min eksamen som civilingeniør i slutningen af januar 1962.

-----

I marts 1961, kort før jeg fyldte 24, skulle jeg som sidsteårsstuderende ved elektroingeniør-uddannelsen på DTH (Den polytekniske læreanstalt, Danmarks Tekniske Højskole, som DTU hed dengang) vælge emne for mit eksamensprojekt, der var det sidste led i studiet og talte dobbelt med i karaktergivningen ved slutprøven i januar det følgende år. Jeg gik på studieretning ET, teleteknik, et moderniseret navn, der erstattede den gamle fagbetegnelse, svagstrømselektroteknik, og havde radioteknik som specialfag. Jeg var interesseret i projektemner, der kunne supplere mine praktiske erfaringer med elektronisk måleteknik fra de omfattende og netop afsluttede øvelser i Laboratoriet for Telegrafi og Telefoni (LTT) <sup>1</sup>.

Et måleteknisk speciale, jeg godt kunne tænke mig at stifte nærmere bekendtskab med, var elektronik til måling og analyse af strålingen fra radioaktive isotoper. I Ingeniøren og andre fagtidsskrifter havde jeg læst, at mange af disse nu blev produceret i forsøgsreaktoren DR 2 på Atomenergikommissionens Forsøgsanlæg Risø nord for Roskilde til brug både i institutionens egen forskning og ved anvendelser af strålingsteknologi i industri og landbrug og på hospitalernes nuklear-medicinske afdelinger. Ved et orienteringsmøde på DTH præsenterede lederen af Risø's elektronikafdeling, civilingeniør G.K. Frölich Hansen, emnerne for årets eksamensprojekter i afdelingen, der ligesom flere andre Risø-afdelinger stillede plads og vejledning til rådighed for studerende, som fandt det attraktivt at gennemføre den afsluttende fase af deres studium på landets store nye nationallaboratorium. Jeg valgte at tegne mig for et projekt, der handlede om konstruktion af elektronik for en metode til kontinuerlig monitoring af radioaktive isotopers gammasppektrere på en oscillografskærm. Det var en rent kvalitativ metode, der måske ville være anvendelig til spektrometrisk overvågning af gammastrålingen på kritiske steder i nukleare procesanlæg.

Fra undervisningen i fysik i det andet år af civilingeniørstudiet havde jeg lært, at gammastråling ligesom lys og røntgenstråling er elektromagnetisk stråling, der udsendes i kvanter - fotoner - som udbreder sig med lysets hastighed og er bærere af energi og impuls (bevægelsesmængde). Mens lys- og røntgenfotoner udsendes fra et atom via kvantespring i henholdsvis de ydre og de indre orbitaler for elektronskyen omkring atomkernen, så har gammafotoner typisk deres oprindelse i radioaktive omdannelser af kernen.

Gammastrålingen fra radioaktive isotoper spænder over et vidt energiområde - fra langt under 100 kiloelektronvolt (keV) - den omtrentlige øvre grænse for energien af røntgenstråling - op til flere megaelektronvolt (MeV). Isotopfremstillingen i Risø's DR 2 reaktor var baseret på, at neutroner med større eller mindre tilbøjelighed lader sig absorbere af stabile isotopers atomkerner. Ved denne proces bliver en atomkerne én masse-enhed tungere og overgår samtidig fra en lavere til en højere energitilstand, som gør kernen ustabil. Det mest almindelige er, at en af dens neutroner før eller senere henfalder til en positivt ladet proton (en brintkerne), en negativt ladet betapartikel (en hurtig elektron) samt en ladningsfri og så godt som masseløs (anti-)neutrino. Den maksimalt tilgængelige energi  $E_{\max}$  udløst i dette såkaldte betahenfald (der rykker den nydannede stabile isotop en plads til højre i det periodiske system) deles mellem betapartiklen og den ikke-detektérbare neutrino efter kvantefysiske udvalgsregler, som bevirker, at betapartiklen og neutrinoen sendes ud i omgivelserne med kinetiske energier, der har summen  $E_{\max}$  og hver for sig varierer kontinuerligt mellem nul og  $E_{\max}$ . Efter betahenfaldet efterlades atomkernen ofte i en såkaldt anslået tilstand, der normalt er ekstremt kortvarig og bevirker, at der udsendes en gammafoton eller flere gammafotoner i kaskade.

Det var, hvad jeg vidste om det kernefysiske grundlag for gammasppektrometri, da jeg en morgen tidligt i april 1961 stod i portvagten på Risø og fik udskrevet en passérseddel til civilingeniør E. Mose Christiansen i bygning 109, der sammen med tre andre ét-plans bygninger stødte op til den

---

<sup>1</sup> LTT blev senere i 1961 fusioneret med ATV-instituttet Radioteknisk Forskningslaboratorium og enkelte andre elektrotekniske laboratorier ved DTH og ændrede samtidig navn til Laboratoriet for Elektronik.

nordlige side af laboratoriepladsen på forsøgsanlæggets "landdel". Jeg havde ikke før besøgt institutionen, som var blevet indviet knap tre år tidligere, og så frem til et ophold foråret og højsommeren over i behagelige omgivelser fjernt fra det monstrøse DTH-kompleks i Øster Voldgade 10 med de talrige trappeopgange og lange halvmørke korridorer.

Mose Christiansen var leder af elektronikafdelingens gruppe for nuklear måleteknik og skulle være min vejleder. Han var i midten af trediverne og havde, fortalte han, tidligere været ansat på elektronikvirksomheden Radiometer i Emdrup. Gruppen havde til huse i bygningens nordende og bestod ud over Mose (som var hans tiltalenavn i afdelingen) af fire ingeniører samt to elektronikmekanikere, som jeg kom til at dele plads med i det ene af gruppens to laboratorielokaler. Formålet med gruppen, fortalte Mose, var at yde måleteknisk bistand til fysikafdelingen og andre afdelinger på Risø, hvor forsøgsanlæggets reaktorer og andre bestrålingsfaciliteter dannede grundlag for mange af institutionens forskningsaktiviteter. Det skete gennem etablering af måleopstillinger, der var opbygget af elektronisk apparatur udviklet af gruppen eller konstrueret andetsteds i afdelingen og fremstillet på danske elektronikvirksomheder. Der blev fulgt op på disse instrumenteringsopgaver med undersøgelser af opstillingernes målenøjagtighed og stabilitet og med udvikling af forbedret teknik til optagelse af gammaspektre.

Fra et skab på sit kontor fremtog Mose en hammerlakeret cylindrisk metalgenstand og lagde den forsigtigt på skrivebordet. Den havde et bærehåndtag midtpå og en påskruet aluminiumskapsel i begge ender. "Det er en scintillationsdetektor", fortalte han og forklarede videre, at der under den forreste kapsel gemte sig en natriumjodid (NaI) krystal, 51 mm (2 tommer) i diameter og 51 mm høj. Krystallen var doperet med thallium (Tl) for at skabe såkaldte luminiserende centre i dens atomgitter og stod gennem den ene endeflade i optisk kontakt med et fotomultiplikatorrør (PM-rør) inde i detektorens metalhylster. Når en udefra kommende gammafoton trængte gennem kapslen og vekselvirkede med en elektron i krystallen, scintillerede denne, dvs. udsendte et lysglimt, som blev opfanget af PM-rørets lysfølsomme katode. På rørets anode opstod der herved en impuls, hvis højde var proportional med energien, gammafotonen havde overført til elektronen. Via et elektronrør under detektorens bagerste kapsel førtes impulsen til et koaxialstik på kapslens endeflade, hvor der også sad et stik til forsyning af PM-røret med en anodespænding på omkring 1000 volt.

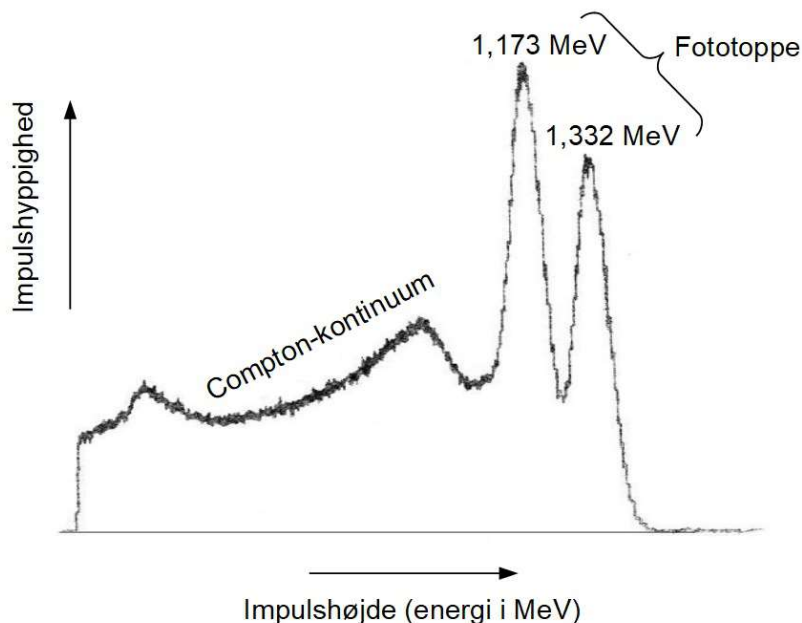
Mose tog detektoren og gik foran mig ind i laboratorielokalet, der blev benyttet til afprøvning af nukleart måleudstyr. I et hjørne stod et godt to meter højt og en halv meter bredt instrumentskab, hvor der foroven var indskruet en stor blækskriver. Lodret efter hinanden under denne sad fire elektronikmoduler, hvis forplader var bestykket med omskiftere og drejeknapper, hvoraf nogle var såkaldte helipotmetre. De var, som jeg vidste fra øvelserne på LTT, justérbare elektriske modstande, der kunne drejes 10 gange rundt og indstilles meget præcist på en findelt gradskala. Et kig gennem den ene af skabets to sidedøre afslørede, at modulerne bag deres forplader var opbygget omkring en metalramme med et påmonteret elektronik-chassis i hver side, hvor soklerne for elektronrørene vendte ind mod skakten dannet op gennem skabet. Varmen fra rørene blev bortledt af en ventilator i skabets topplade, der sugede luft ind gennem en filterplade længst nede på forsiden af skabet. Dette stod på kuglehjul, så man kunne skubbe rundt med denne store og tunge konstruktion. Skulle den ud af huset, måtte der en værkstedskran til, og til det formål var der fastsvejet et par solide øjebolte på skabets overligger.

Jeg stod her foran elektronikafdelingens nye scannings-gammaspektrometer, som Mose havde udviklet med bistand fra ingeniører i andre af afdelingens grupper. Det nederste modul, forklarede han, var en regulerbar højspændingsforsyning for PM-røret i en scintillationsdetektor. Modulet ovenover var en lineær impulsforstærker, der foruden at forstærke detektorimpulserne omformede disse til kortvarige bipolare impulser, en forholdsregel, der sikrede, at impulshøjden - defineret af

deres forreste halvpart - blev målt i forhold til en stabil nul-linje. Det næste modul var en såkaldt énkanal-impulshøjdeanalysator, som definerede et energivindue - en "kanal" - hvis position og bredde kunne indstilles med hver sit helipotmeter på modulets forplade. Den statistisk fluktuerende hyppighed af detektorimpulser, hvis højder faldt inden for kanalens nedre og øvre grænse, kunne aflæses med det fjerde modul, der var et såkaldt count rate meter. Dette gav et udslag på et viser-instrument, der var kalibreret i cps - counts per second - idet man med en omskifter kunne vælge, hvilken statistisk usikkerhed, viserudslagets fluktuationer skulle begrænses til, 1, 3 eller 10 procent. Når der skulle optages og udskrives et spektrum af god kvalitet, blev kanalbredden og den relative standardafvigelse af impulshyppigheden typisk sat til henholdsvis 30 keV og 1%. Herefter blev kontrollen af kanalens position på energiskalaen lagt over på blækskriveren via et sidestykke til et helipotmeter, hvor drejeknappen var erstattet af en forlængeraksel, der via et gear var koblet til den motordrevne aksel for papirrullen. Samtidig hermed blev count rate meteret sat til at styre udslaget på blækskriverens pen. På denne måde blev et gammaspektrum scannet automatisk og optegnet på en 17 centimeter bred papirbane. Det ville Mose nu demonstrere for mig.

Han lagde scintillationsdetektoren på et bord ved siden af det store spektrometerskab og tilsluttede den med et signalkabel og et højspændingskabel. Omkring 15 cm foran detektorhovedet placerede han en kobolt-60 kilde, der med sin lange halveringstid ( $T_{1/2}$ ) på 5,27 år var en af de med skafft forsynede "skolekilder", som blev fremstillet i Risø's isotoplaboratorium til demonstration af radioaktivitet i skolernes fysikundervisning og havde en styrke på cirka 10 mikrocurie<sup>2</sup>. Scanningstiden blev sat til 30 minutter, så der var tid til en kop kaffe, mens Mose fortalte om planerne for spektrometeret, som blandt andet var at fremvise det på en udstilling i slutningen af maj i tilknytning til en konference i Beograd om nuklear elektronik arrangeret af IAEA (International Atomic Energy Agency).

Det optagne kobolt-60 spektrum er vist i Figur 1, der stammer fra min projektrapport.



Figur 1. Kobolt-60 gammaspektrum optaget med en NaI(Tl) scintillationskrystal af størrelsen 51 mm dia. × 51 mm og udtegnet med det i elektronikafdelingen udviklede scanningsgammaspektrometer.

<sup>2</sup> Enheden curie (Ci) til angivelse af radioaktiv kildestyrke er forlængst blevet afløst af SI-enheden becquerel (Bq).  
 $1 \text{ Ci} = 37 \cdot 10^9 \text{ Bq}$  = kildestyrken af 1 gram radium.

Figuren illustrerer, hvordan gammastråling vekselvirker med elektronerne i en NaI(Tl) krystals atomer og genererer en impulshøjdefordeling med et PM-rør. Ved betahenfaldet af kobolt-60 til nikkel-60 udsender nikkel-60 atomkernen to gammafotoner i kaskade med energierne 1,173 og 1,332 MeV. Hver af disse to emissioner er ophav til en såkaldt fototop, der primært skyldes den fotoelektriske effekt, hvor en foton totalabsorberes af en elektron og overfører hele sin energi til denne. Det grafiske billede af en fototop er med god tilnærmelse en normalfordeling (en klokkeformet såkaldt Gauss-kurve) med en standardafvigelse, der blandt andet kan henføres til de statistiske variationer af PM-rørets forstærkningsfaktor <sup>3</sup>.

Men en gamma- eller røntgenfoton kan også vekselvirke med en elektron ved kun at aflevere en del af sin energi til denne og samtidig skifte retning. Hvor meget energi, der overføres til elektronen, er præcist korreleret med vinklen mellem fotonens retninger før og efter vekselvirkningen. Denne effekt - fotonspredning med partiel afgivelse af energi - blev opdaget af den engelske fysiker A.H. Compton i 1922 og er grundigt beskrevet i professor Torkild Bjerges lærebog i elektron- og atomfysik <sup>4</sup>, som jeg flittigt havde konsulteret i dagene op til mit møde med Mose. I et gamma-spektrum viser effekten sig i form af det såkaldte Compton-kontinuum. Dette strækker sig op til den såkaldte Compton-kant, hvor fotonen afbøjes 180° og dens energitab er maksimalt. I reglen iagttager man desuden - som i Figur 1 - en top nederst i spektret, som skyldes tilbagespredte fotoner fra detektorkrystallens omgivelser.

En gammafoton med en energi på mindst 1,022 MeV kan derudover - via såkaldt pardannelse i umiddelbar nærhed af en atomkerne - afføde to partikler - henholdsvis en almindelig negativ elektron og en positiv elektron (positron), begge med en hvilemasse på 0,511 MeV. Sker dette i en scintillationkrystal, vil positronen hurtigt kollidere med en af krystalgitterets elektroner, hvorved de to partikler annihilere (tilintetgøres) under omdannelse af deres hvilemasser til to modsat rettede gammafotoner, hver med en energi på 0,511 MeV, og hver med en mulighed for at undslippe krystallen uden at vekselvirke med denne. Herved opstår der to såkaldte escape-toppe i gamma-spektret henholdsvis med energierne  $E - 0,511 \text{ MeV}$  og  $E - 1,022 \text{ MeV}$ , hvor  $E$  er energien i MeV af den primære foton, inden pardannelsen fandt sted <sup>5</sup>.

Efter at jeg i de første dage af mit ophold på Risø havde fået genopfrisket mit elementære kendskab til kernefysik og radioaktivitet samt stiftet bekendtskab med komponenterne, et gammaspektrum kan opløses i, var jeg klar til at fordybe mig i det ingeniørmæssige indhold af min projektopgave. Denne lød: "Konstruér en rent elektronisk 'gråkile' impulshøjdeanalysator" - med den underforståede fortsættelse: "til kontinuerlig registrering af gammaspektre på billedskærmen i katodestrålerøret <sup>6</sup> for en laboratorieoscillograf". En oscillograf var dengang som nu et uundværligt

3 Et PM-rørs impulsforstærkning fremkommer ved, at det forholdsvis lille antal elektroner, som et lysglimt fra detektorkrystallen udløser fra rørets fotokatode, successivt multipliceres op i en elektronlavine af stigende styrke mellem rørets såkaldte dynoder på strækningen mellem katoden og rørets anode. I et typisk PM-rør er der 10-12 dynoder, som ved hjælp af en spændingsdeler holdes på et stigende elektrisk potential til acceleration af lavinens elektroner.

4 Bogen indgik sammen med to andre lærebøger skrevet af Torkild Bjerge i fysikundervisningen på andet år af civilingeniørstudiet, som jeg påbegyndte i september 1957. Kort forinden var Bjerge blevet ansat som Risø's første administrerende direktør, hvorefter hans professorat ved DTH blev overtaget af fysikeren Tage Carlsen, der kom fra en videnskabelig assistentstilling ved Danmarks farmaceutiske Højskole.

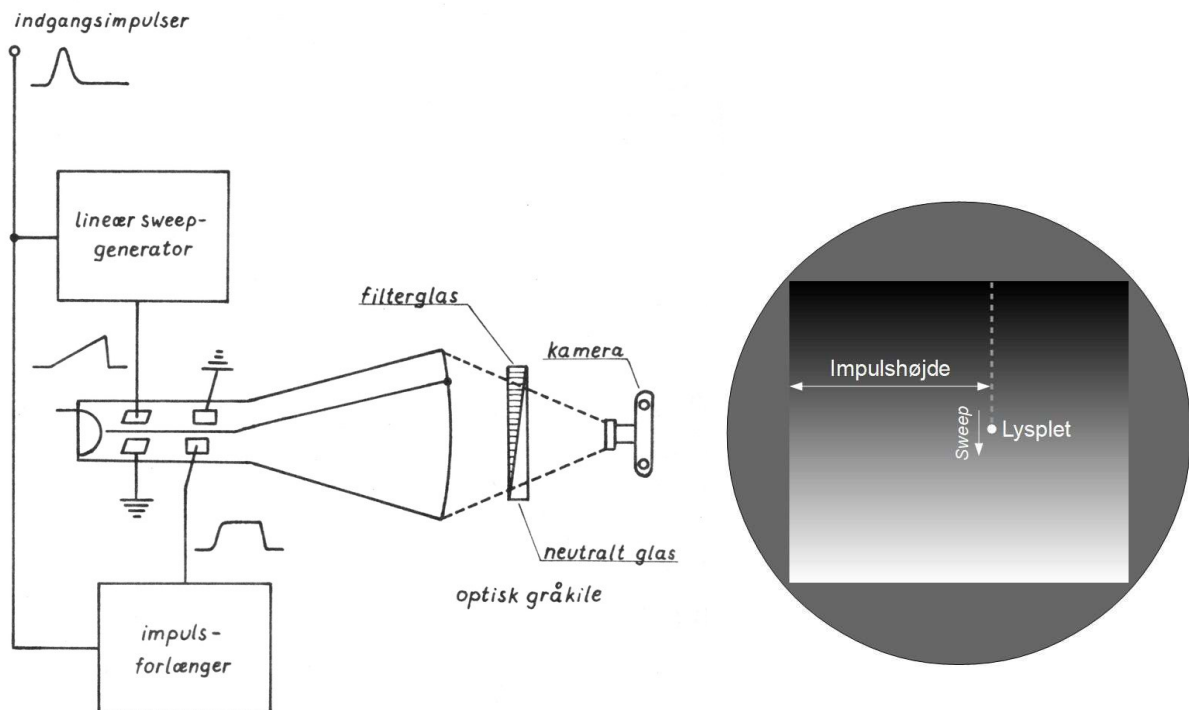
5 De to gamma-emissioner fra en kobolt-60 kilde har energi nok til at forårsage pardannelse, men de resulterende escape-toppe er ikke umiddelbart synlige i Figur 1, fordi energierne ikke overskrider tærskelværdien på 1,022 MeV ret meget. Jeg erfarede senere, at med en detektorkrystal af størrelsen 51 mm dia. × 51 mm bliver escape-toppene først markante i spektre af radioisotoper, der udsender gammafotoner med energier større end cirka 2 MeV.

6 Katodestrålerør: Elektronrør, hvori en elektronstråle fra katoden styres med et elektrisk eller magnetisk felt til afbildning af kurver eller billeder på en fluorescerende skærm i rørets endeflade. Det mest almindelige katodestrålerør er billedrøret, som tidligere blev anvendt som billedskærm i TV-apparater.

instrument til afbildning af tidsforløbet langs en vandret akse af elektriske signaler i ethvert elektroniklaboratorium, blot sker billeddannelsen nu med digitalteknik og fladskærme.

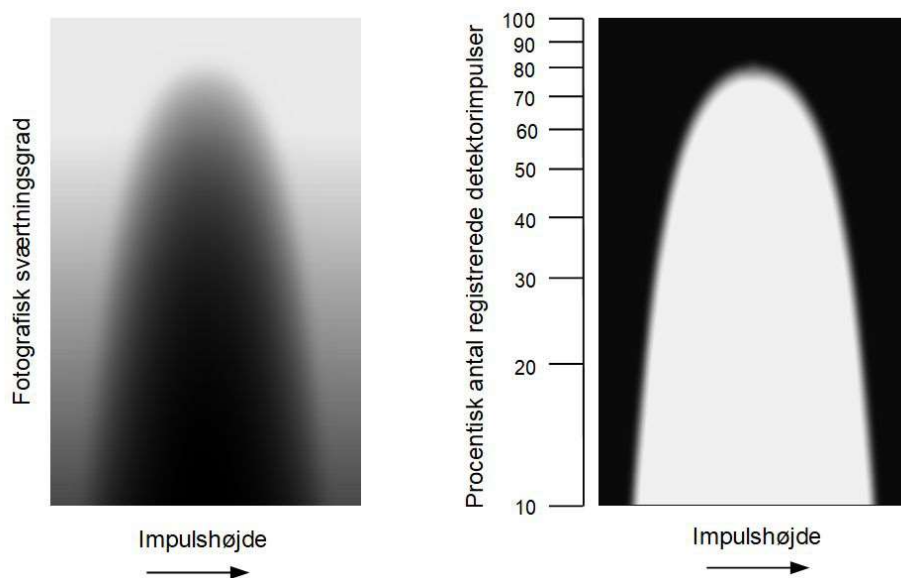
Moses inspiration til projektet var den såkaldte gråkile-metode, en fotografisk teknik udviklet i midten af 1940erne på universitetet i Basel og senere gjort kommercielt tilgængelig for gammaspæktrometri af det tyske elektronikfirma Telefunken. Metoden fik en betydelig udbredelse i nukleare forskningslaboratorier op gennem 1950erne, men var nu under afvikling til fordel for spektrometri foretaget med multikanal-analysatorer (som jeg omtaler nærmere i Del 2). Min opgave var udtænkt som et forsøg på at genoplive gråkile-metoden i en stærkt forenklet udgave, og derfor var det relevant, at jeg påbegyndte projektet med at sætte mig grundigt ind i måleprincippet ved at læse nogle af de tidsskriftsartikler, der var skrevet om emnet.

Som vist til venstre i Figur 2 - en tegning, der også stammer fra min projektrapport - var kernen i en fotografisk gråkile-impulshøjdeanalysator et katodestrålerør med en beskeden cirkulær billedskærm og en hals, hvorfra elektronstrålen blev styret af et sæt vandrette og lodrette afbøjningsplader. Mellem skærmen og kameraet var der indsat et lysfilter med glidende transparens - en såkaldt optisk gråkile - tildannet af to sammenkittede glasplader med kileformet profil, den ene bestående af mørkfarvet filterglas, den anden transparent. Med gråkilen orienteret som angivet på tegningen blev lyspletten i skærmens rektangulære fremvisningsfelt affotograferet med desto større sværtning af filmen i kameraet, jo lavere en position lyspletten blev styret ind i. Elektronikken til kontrol af plettens bevægelser sørgede nu for, at en impuls produceret af en energifølsom strålingsdetektor fik pletten til at udføre en hurtig, jævnt fejende bevægelse (et lineært *sweep*) oppefra og ned i en afstand fra skærmfeltets venstre kant, der var proportional med detektorimpulsens højde, idet denne blev fastholdt af en impulsforlænger hele sweep-tiden ud. Det har jeg illustreret med tegningen til højre i Figur 2, hvor gråkilen er set fra kameraets position med et øjebliksbillede af lyspletten bane indtegnet stiple.



Figur 2. Indretning og virkemåde af en fotografisk gråkile-impulshøjdeanalysator.

En enkelt detektorimpuls blev således aftegnet på det fotografiske negativ som en lodret stribe med en bredde, der var givet ved lyspletens diameter set gennem gråkilen og kameraets linse og udviste en serie gråtoner, som blev mørkere og mørkere oppefra og ned. Under optagelsen af et gamma-spektrum medførte den vidtstrakte fordeling af detektorimpulsernes højder, at stribene efterhånden dannede et sammenhængende hele, hvor sværtningen af filmen var størst for striber, der forekom særlig hyppigt og derfor overlappede hinanden mere eller mindre fuldstændigt et stort antal gange. Gennem eksponeringstiden opstod der følgelig på det fotografiske negativ en større eller mindre forskydning oppefter af den mørke ende af gråtone-skalaen på bekostning af den lyse ende med det resultat, at spektret aftegnede sig som blød kontur i overgangszonen mellem kraftig sværtning af filmen fornedet og svag sværtning foroven. Med en lineær optisk gråkile indtraf der proportionalitet mellem på den ene side, hvor højt den mørke del af en stribe nåede op mod filmens kant og på den anden side logaritmen til impulshyppigheden i det smalle energi-interval, som striben repræsenterede. Gauss-kurven, som en fototop kan approksimeres med, trådte derved frem på det fotografiske negativ som konturen af en parabel med nedadvendte ben <sup>7</sup>. Det har jeg her prøvet at illustrere på tegningen til venstre i Figur 3, hvor jeg med støtte fra et regneark har benyttet de øverste godt 90% af en Gauss-kuve til - ved hjælp af et billedbehandlingsprogram - at simulere en rimelig troværdig repræsentation af den parabolske fototop i et gråkile-gammaspektrum optaget med en normalfilm.



Figur 3. Simuleret fototop i logaritmisk gengivelse for et gammaspektrum optaget med en fotografisk gråkile-impulshøjdeanalysator. Til venstre: Sværtningen af filmen i kameraet. Til højre: Fototoppen med forventet udseende efter kopiering og forstørrelse af negativet på "hårdt" fotopapir.

For præcist at kunne udmåle energien af en fototop var det nødvendigt at forstørre billedet til et passende stort format, hvorved gråtoneskalaen samtidig blev inverteret, således at toppen kom til at fremstå lys på mørk baggrund. Konturen af et spektrum kunne samtidig gøres meget skarpere ved at benytte fotopapir, der gav forstørrelsen hård kontrast og gjorde baggrunden ensartet sort, som simuleret i Figur 3 til højre. Virkningen af dette vigtige trin i processen kunne forstærkes ved at udføre optagelserne med en "hård" film i kameraet.

At ordinaterne til et gammaspektrum afbildes logaritmisk er en fordel, når opgaven er at identificere svage fototoppe i nærvær af en eller flere fremherskende fototoppe, men til grafisk udmåling af

<sup>7</sup> Den simpleste repræsentation af en Gauss-kuve er funktionen  $y = \exp(-x^2)$ , hvis logaritmiske billede er parablen  $z = -x^2$ .

arealet under en fototop - et udtryk for intensiteten af den pågældende gamma-emission - er en lineær afbildning mere velegnet. Det var et incitament til, at der blev udviklet en teknik, hvor den optiske gråkile blev simuleret elektronisk ved at lade lyspletten på skærmen feje oppefra og ned med eksponentielt aftagende hastighed. Herved blev tilvæksten i filmens sværtning ned langs striberne mindre i begyndelsen af et sweep end i slutningen og det på en sådan måde - påvist både teoretisk og eksperimentelt i en af tidsskriftsartiklerne - at ordinatorerne til spektret blev afbildet på en lineær skala.

Med al denne information i baghovedet havde jeg et teknisk grundlag for at konstruere "en rent elektronisk 'gråkile' impulshøjdeanalysator", hvor den optiske gråkile blev simuleret af en eksponentiel sweep-generator (den eneste nemt realiserbare mulighed), og hvor det menneskelige øje ville træde i stedet for kameraet. Planen var at lade de lodrette striber danne sig på en oscillografskærm som såkaldt efterglødslys - fosforescens - der hendøde og blev genopfrisket ved ankomsten af nye detektorimpulser. Det kunne herved forventes, at der i striberne ville opstå en balance mellem tab og gevinst af efterglødslys, således at et gammaspektrum kom til at fremtræde som et areal, hvis lysstyrke faldt til et lavt niveau uden om og ovenover en fototop samt ovenover Compton-kontinuet. Altså et spektrum afbildet som en stærkt lysende flade med et mere eller mindre diffust omrids henover en svagt lysende baggrund - visuelt det omvendte af at lade spektret opstå ved sværtning af en fotografisk film. Mens eksponeringstiden for en fotografisk gråkile-impulshøjdeanalysator kunne gøres vilkårlig lang, så det blev muligt at optage spektre af svage gammakilder, stod det på forhånd klart, at den visuelle metode, hvor striberne skulle gendannes i rask tempo for at opnå et roligt skærmbillede, kun ville fungere efter hensigten ved ret store impulshyppigheder. Dette var imidlertid ikke en hæmsko for metodens eventuelle anvendelse til kontinuerlig spektrometrisk monitorering af forhøjede strålingsniveauer.

Inden jeg påbegyndte det elektroniske udviklingsarbejde, der bestod i at konstruere en "gråkile" elektronikforsats til en oscillograf, havde jeg brug for at skaffe mig et overblik over de såkaldte efterglødskurver for oscillografskærme. Med velvillig assistance fra de to unge assistenter i Risø's bibliotek på den anden side af laboratoriepladsen, vis-a-vis elektronikafdelingen, fandt jeg frem til publikationer relateret til den amerikanske RETMA<sup>8</sup> kategorisering af katodestrålerør efter såkaldt fosfortype. De fleste af artiklerne var tilgængelige i bibliotekets samling af nyere årgange af tidsskrifter som fx *Review of Scientific Instruments*, andre fandtes kun som mikrofiches, der kunne læses på et apparat i bibliotekets kælder.

Oscillograferne, jeg var fortrolig med fra øvelserne i elektronik på LTT, var primært beregnet til synkroniseret fremvisning af elektriske svingninger og impulser. Til den slags almindeligt forekommende opgaver i et elektroniklaboratorium egnede en RETMA P1-enkeltlagsskærm sig fortræffeligt, fordi dens efterglød aftog eksponentielt med en tidskonstant<sup>9</sup> på kun cirka 10 millisekunder, hvilket gjorde det muligt for den grønt-lysende kurve på skærmen hurtigt at tilpasse sig ændringer i signalamplituden. Til den utraditionelle anvendelse af en oscillografskærm i mit projekt krævedes der en fosfortype med en meget længerevarende efterglød, der helst skulle være eksponentielt aftagende for at opnå proportionalitet mellem middellysstyrken af de lodrette striber og impulshyppighederne, de repræsenterede.

Blandt elektronikafdelingens oscillografer var den med den længste efterglødstid en Tektronix model 535A, som Frölich Hansen havde reserveret til mig. Den var udstyret med en RETMA P7-skærm, en lysstærk dobbeltlagsskærm, der oprindeligt var udviklet til radarkonsoller. Når elektron-

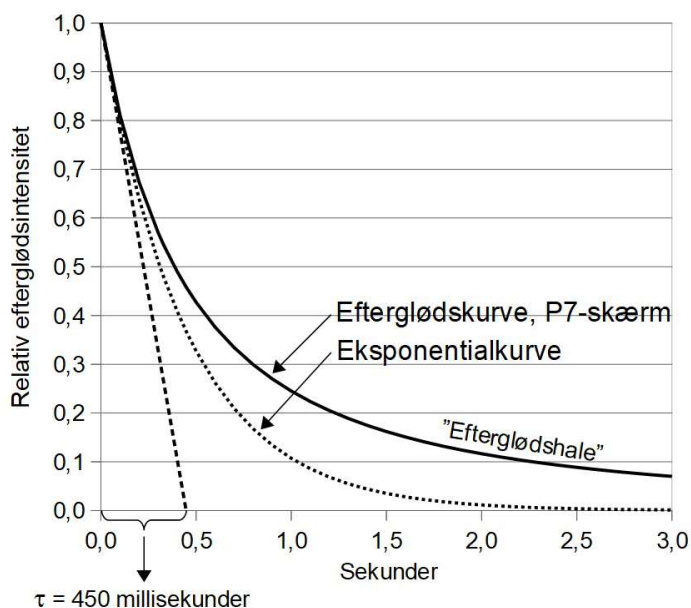
---

<sup>8</sup> RETMA: Radio Electronics Television Manufacturers' Association.

<sup>9</sup> Grundformlen for en fysisk størrelse  $x$ , der aftager eksponentielt med tiden  $t$ , er  $x = \exp(-t/\tau)$ , hvor  $\tau$  er tidskonstanten for  $x$  angivet i tidsenheden for  $t$ .

strålen i katodestrålerøret ramte et punkt af laget nærmest katoden, udsendtes der kraftigt blå og ultraviolet fluorescenslys, der fik nabopunktet i laget direkte bag rørets betragtningsflade til at udsende gult fosforescenslys, som var ene om at aftegne sig på skærmen, idet der foran denne var anbragt et gulfilter, der gjorde lyspletten fra den blå fluorescensstråling usynlig.

Den fosforescerende belægning for en P7-dobbeltlagsskærm hørte imidlertid til en klasse af såkaldte hyperbolske fosfortyper, som var designet til at have en hyperbel som asymptote, hvilket gjorde efterglødkurvens konvergens mod nul betydeligt langsommere end et eksponentielt aftagende kurveforløb. Det har jeg ud fra data indeholdt i min projektrapport illustreret i Figur 4, der viser, at fosforescenslyset fra en P7-skærm strakte sig over længere tid - udtrykt ved den såkaldte "efterglødshale" <sup>10</sup> - end en eksponentialkurve med den samme tangenthældning i begyndelsespunktet.



Figur 4. Tektronix 535A oscillograf produceret omkring 1959 (foto: [www.radiomuseum.org](http://www.radiomuseum.org)). Til højre et plot af den hyperbolske efterglødkurve for oscillografens RETMA P7-dobbeltlagsskærm, suppleret med en initialt matchende eksponentialkurve, hvis tidskonstant aflæses til  $\tau = 450$  millisekunder - omkring det 40-dobbelte af tidskonstanten for P1-enkeltlagsskærmen i en almindelig laboratorieoscillograf. Det var en fordel for mit projekt, at P7-skærmens fosforescens aftog passende langsomt og tilnærmelsesvis eksponentielt til at begynde med og en ulempe, at kurven fladede ud til en længerevarende "efterglødshale".

I brugen af denne specielle oscillograf til undersøgelser af transiente (hurtigt forbigående) elektriske spændingsforløb gjorde "efterglødshalen" nytte ved at fastholde aftrykket af et flygtigt kurvebillede i flere sekunder, men for en visuelt fungerende "gråkile" var det uheldigt, at lave impulshyppigheder - som dem langt nede på flankerne af en fototop - ville få de lodrette striber til at fremstå mere lysstærke højere oppe på skærmen, end de burde gøre. Det ville uvægerligt svække kontrasterne i skærbilledet, og det kunne der ikke laves om på. Oscillografer var beregnet til fremvisning af kurver med vandret tidsakse og egnede sig ikke til afbildning af arealer med graduerede lysintensiteter. På Tektronix 535A modellen kunne man regulere den generelle styrke af fosforescenslyset, men der var ikke en knap til kontrastregulering som den, der fandtes på datidens TV-modtagere.

<sup>10</sup> Et udtryk, der stammer fra fjernsynets barndom, hvor seerne ofte var generet af "haler" på skærmen efter objekter i hurtig bevægelse, fx en flyvende fodbold.

Så det var med ikke alt for optimistiske forventninger, at jeg i begyndelsen af maj tog fat på at bygge elektronikforsatsen til oscillografen, hvor (jf. Figur 2) forlængede indgangsimpulser var påtrykt dennes X-indgang, imens en sweep-generator tilsluttet Y-indgangen tegnede de lodrette fosforescerende striber. Fra øvelserne på LTT havde jeg et vist kendskab til elektroniske kredsløb beregnet til håndtering af impulser med fast frekvens og konstante højder, men her var der tale om elektronik for impulser med stokastisk varierende ankomsttidspunkter og højder. Det gjorde det nødvendigt at blokere impulser, der ankom, inden et igangværende sweep var tilendebragt, hvilket krævede et hurtigtvirkende port-kredsløb, en såkaldt *gate*. Kernen i en impulsforlænger er en kondensator, der lades op til spændinger proportionale med impulsernes højder. Ved udløbet af et sweep skulle denne kondensator aflades meget hurtigt samtidig med, at der blev leveret en impuls til oscillografens Z-indgang for at holde katodestrålen slukket under dens tilbageløb. Den eksponentielt aftagende sweep-hastighed var i princippet nem at realisere - det krævede blot, at hver detektorimpuls producerede en firkant-impuls, som blev integreret af en såkaldt RC-kreds bestående af modstand  $R$  i parallel med en kondensator med kapaciteten  $C$ , som tilsammen definerede en tidskonstant  $\tau = RC$ . Varigheden af firkant-impulsen satte jeg til 5 mikrosekunder, hvorefter størrelsen af  $\tau$  kunne fastlægges ud fra et ønske om at opnå et forhold på 100:1 mellem katodestrålens hastigheder henholdsvis i begyndelsen og ved afslutningen af et sweep. Ved at bruge en såkaldt trimmekondensator til RC-kredsen blev det muligt af indjustere  $\tau$  til den beregnede værdi, 1,09 mikrosekunder. Med 1 til 2 mikrosekunder sat af til afladning af kondensatorerne i impulsforlænger og RC-kredsen kunne det samlede dødtidstab <sup>11</sup> i forsatsenheden holdes under 10% ved impulshyppigheder større end 15.000 cps.

I løbet af nogle uger fik jeg tegnet et komplet kredsløbsdiagram, som blev mere kompliceret, end jeg havde regnet med. Det skyldtes især, at signalerne for oscillografens X- og Y-indgange - henholdsvis en forstærket og forlænget detektorimpuls og et voksende spændingsforløb med eksponentielt aftagende ændringshastighed - var ensidigt positive og derfor indeholdt en jævnspændingskomponent, der skulle føres med over til katodestrålerørets afbøjningsplader. Det krævede måder at forbinde elektronerør på, jeg ikke tidligere havde set, og her måtte jeg søge hjælp fra Mose og fra den yngste ingeniør i gruppen, Knud-Vilhelm Weisberg, der to år tidligere selv havde udført sit eksamensprojekt i afdelingen. Den praktiske del af arbejdet klarede jeg helt på egen hånd, både tilvirkningen i afdelingens værksted af et chassis med udboringer til soklerne for elektronerør og udførelsen af den elektriske montage. Det var færdigheder, jeg havde erhvervet mig fra radio-selvbyggeri i min tidlige ungdom.

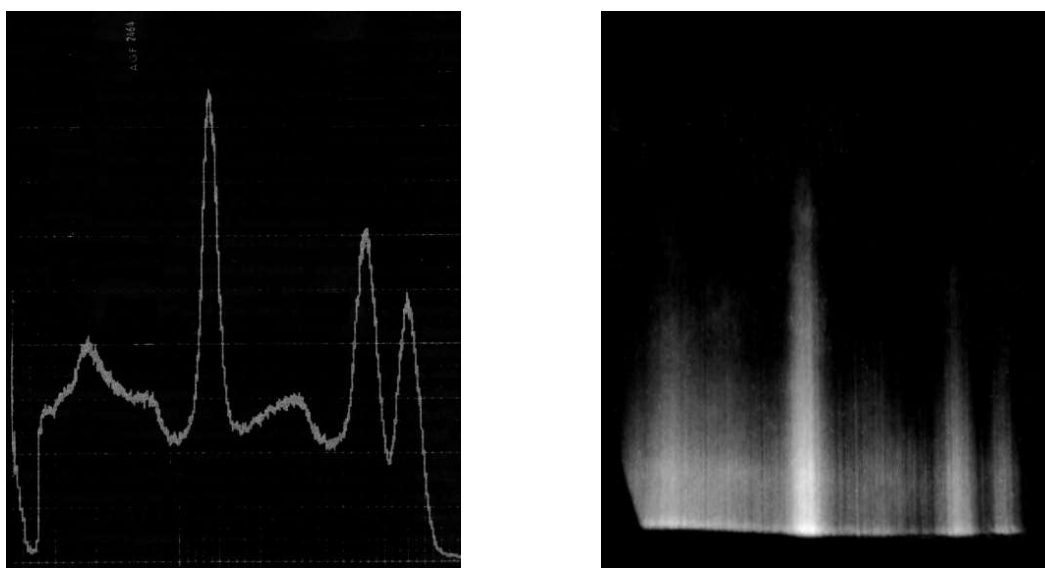
Et stykke ind i juli var jeg klar til at afprøve konstruktionen efter at have tilsluttet denne til oscillografen og NaI(Tl) scintillationsdetektoren fra demonstrationen af scannings-spektrometret et par måneder tidligere. Mose troppede op med en cæsium-137 <sup>12</sup> "skolekilde". Den udsendte monoenergetisk gammastråling med en energi på 0,662 MeV, som vi håbede ville resultere i tilsynekomsten af en gult-lysende og formentlig noget sløret, men dog genkendelig fototop. I stedet viste de lodrette lysstriber i fototoppen sig at flyde sammen til en lysbræmme, der godt nok aftog i styrke til begge sider omkring en midterlinje og fremtrådte lidt smallere og noget mindre lysende foroven end forneden, men en fototop var ikke lige det, man mest kom til at tænke på ved dette syn. Som jeg havde forudset ud fra P7-dobbeltagsskærmens efterglødskurve var den gradvise formindskelse af lysstyrken opefter på skærmen pålejret et generende residualt fosforescenslys. Mose og jeg prøvede begge at skrue langt ned for lyset og holde dagslyset ude med en skærmhætte. I hættens mørke kom der en fascinerende sitren over de nu svagt fosforescerende lysstriber frembragt af total-absorberede cæsium-137 gammafotoner i detektoren, og nu kunne man akkurat

11 Dødtiden  $t_d$  i elektronisk apparatur til registrering af impulser afgivet af nukleare strålingsdetektorer reducerer den målte impulshyppighed  $n$  i forholdet  $n/N \approx 1/(1 + nt_d)$ , hvor  $N$  betegner den sande impulshyppighed.

12 Cæsium-137 er et langlivet fissionsprodukt ( $T_{1/2} = 30,2$  år), der kan udvindes af brugt reaktorbrændsel.

ane konturen af en fototop - mere kom der ikke ud af at betragte oscillograskærmen i mørke. Vi måtte med beklagelse konstatere, at det ikke var muligt at få gråkile-metoden til at fungere tilfredsstillende visuelt med den oscillograf, der var håndplukket til opgaven, og at der i følge RETMA-fortegnelsen ikke fandtes fosfortyper, hvis efterglødsegenskaber egnede sig bedre til formålet. Mose syntes, jeg i min projektrapport skulle underbygge denne nedslående konklusion med et foto af det miserabelt udseende cæsium-137 spektrum. Han hentede polaroid-kameraet, der var tilbehør til oscillografen, og fastspændte det til skærmen. Stor var hans og min forbavselse, da vi på polaroidaftrykket så en tydelig fototop og et vellignende Compton-kontinuum på en fuldstændig sort baggrund. Smukt gaussformet var fototoppen ikke, men en "hård" polaroid film som den, der sad i kameraet og var beregnet til sort-hvid affotografering af oscillogrammer, leverede - i modsætning til det menneskelige øje - kontrasten, der skulle til for at få et spektrum til at fremstå med en pæn kontur. Fuldstændig som i et spektrum optaget med en fotografisk gråkile-impulshøjdeanalysator efter forstørret overkopiering af negativet til fotopapir, der gav hård kontrast.

For at undersøge gengivelsen af et spektrum med flere fototoppe og samtidig teste elektronikforsatsens reaktion på en kraftig forøgelse af impulshyppigheden helt op til omkring 60.000 cps lagde vi kobolt-60 "skolekilden" ved siden af cæsium-137 kilden. Med tilføjelsen af de to kobolt-60 emissioner med energierne 1,173 og 1,332 MeV fremkom der som ventet tre lysende bånd på skærmen, mens der på et polaroidfoto aftegnede sig et spektrum, der udviste store ligheder med det spektrum, Mose og jeg efterfølgende optog med scannings-gammaspektrometeret uden at ændre placeringen af de to kilder (Figur 5). De tre fototoppe på polaroidbilledet fremstod ikke så skarpt som på skriverens papirbane, men både toppenes positioner på energi-aksen og deres indbyrdes højder så meget troværdige ud. Det indikerede, at det eksponentielle sweep virkede efter hensigten også ved store impulshyppigheder, hvilket desværre ikke bidrog til at opfylde formålet med projektet.



Figur 5. Gammaspektrum af cæsium-137 (en enkelt fototop ved 0,662 MeV) plus kobolt-60 (fototoppe ved 1,173 og 1,332 MeV), til venstre optaget med afdelingens scannings-gammaspektrometer og vist i komplimentær sort-hvid gengivelse, og til højre affotograferet fra oscillograskærmen til den elektroniske "gråkile" impulshøjdeanalysator med et polaroidkamera (eksponeringstid: 0,5 sek).

Frølich Hansen kom forbi og fik forevist først de lysende bånd på skærmen og dernæst de acceptabelt udseende fototoppe på polaroidbillederne. Han var synligt skuffet over, at det visuelle gråkile-koncept viste sig at være en teknologisk blindgyde. For mig havde projektet været fagligt

udbytterigt og givet mig rigeligt at skrive om i min projektrapport. Jeg overvejede, om jeg skulle foreslå at udskifte polaroidkameraet med et TV-kamera tilsluttet en monitor med højt opskruet kontrast. Det havde måske gjort en P7-oscilloskærm anvendelig til formålet, endda med mulighed for at fremvise gammaspektre på en stor TV-skærm. Men tiden var fremskreden - jeg skulle hjem og i gang med at skrive projektrapporten, der stod til aflevering på DTH's studiekontor senest den 30. september.

I mit eksamensprojekt havde jeg på meget konkret vis erfaret det meste af det, der stod om gammastrålings partikelnatur i professor Bjerges lærebog. At gammastråling også havde en bølgenatur, havde ingen relevans i målinger bestående i analyse af impulshøjder. Anderledes forholdt det sig i den anden ende af det elektromagnetiske spektrum, hvor radio- og mikrobølger med deres enormt meget større bølgelængder var et hovedemne i undervisningen på studieretning ET. Her havde jeg i fagene elektromagnetisk feltteori, kredsløbsteori og radioteknik fået et indgående kendskab til antennesystemer, radiobølgers udbredelse og det teoretiske og praktiske grundlag for design af elektronik til trådløs kommunikation og rundspredning af radio og TV. I de fire måneder, jeg havde tilbragt på Risø med mit selvvalgte projekt, befandt jeg mig i en anden og for mig meget dragende teknisk verden, hvor periodiske signaler og impulser med faste repetitionsfrekvenser og ens højder var afløst af impulser med tilfældigt varierende indbyrdes tidsintervaller og højder. Projektet havde ikke ført til det ønskede praktiske resultat, men dette havde ikke dæmpet min fascination af de mange udfordringer, der lå i at designe elektronik til nukleare forskningsopgaver.

Inden jeg forlod Risø i begyndelsen af august for at tilbringe de næste knap otte uger med at skrive min rapport<sup>13</sup> og bagefter læse til eksamen, spurgte jeg Mose, om der var nogen mulighed for, at jeg kunne blive ansat i gruppen for nuklear måleteknik, når jeg om knap et halvt år havde afsluttet min uddannelse som civilingeniør og ikke skulle gøre militærtjeneste. Det kunne han ikke sige noget om på stående fod og opfordrede mig til at spørge igen i begyndelsen af det kommende år. En dag tidligt i januar 1962, mens jeg sad og forberedte mig til de to sidste fag, jeg skulle op i til slutprøven, ringede jeg til Mose. Han kunne fortælle, at hvis jeg ønskede det, var han rede til at anbefale mig til en stilling, der for kort tid siden var blevet oprettet i elektronikafdelingen på foranledning af fysikafdelingens dosimetrigruppe, som havde brug for bistand til undersøgelser og videreudvikling af udstyr til præcisionsmåling af radioaktive isotopers kildestyrke. Jeg behøvede ingen betænkningstid og accepterede tilbuddet med det samme.

I midten af januar kom jeg til ansættelsessamtale hos civilingeniør Jens Rasmussen, der havde overtaget posten som afdelingsleder, efter at Frølich Hansen nogle måneder tidligere havde sagt op for at tiltræde en stilling som overingeniør på telefonfabrikken Automatic. Om Jens Rasmussen vidste jeg kun, at han var den faglige drivkraft i afdelingens forskning om effektiviteten og pålideligheden af den elektroniske udrustning til sikkerhedskritiske kontrolsystemer. Han viste sig at være meget kontant og ligetil og brugte ikke tid på at spørge til mine eksamenskarakterer og forhøre sig om min interesse for netop denne stilling. "Mose vil gerne have Dem", lød det fra ham, og det var åbenbart grund nok for ham til at ansætte mig. Den 25. januar, to dage før min sidste eksamensdag modtog jeg besked fra AEK's sekretariat i København om, at jeg var ansat som ingeniør ved Atomenergikommissionen fra den 1. februar 1962. Dog under forudsætning af, at jeg bestod min eksamen som civilingeniør og med den tilføjelse, at jeg efter min tiltræden skulle vise afdelingsleder Jens Rasmussen mit eksamensbevis. Jeg fandt aldrig en naturlig anledning til at få dette gjort, og ingen hverken på Risø eller i AEK har nogensinde spurgt efter diplommet.

-----

---

<sup>13</sup> Min projektrapport kom til at fylde 105 maskinskrevne sider ledsaget af et større antal diagrammer og andet grafisk materiale, hvoraf polaroidfotoet i Figur 5 af et "gråkile" gammaspektrum var det mest spektakulære eksempel.

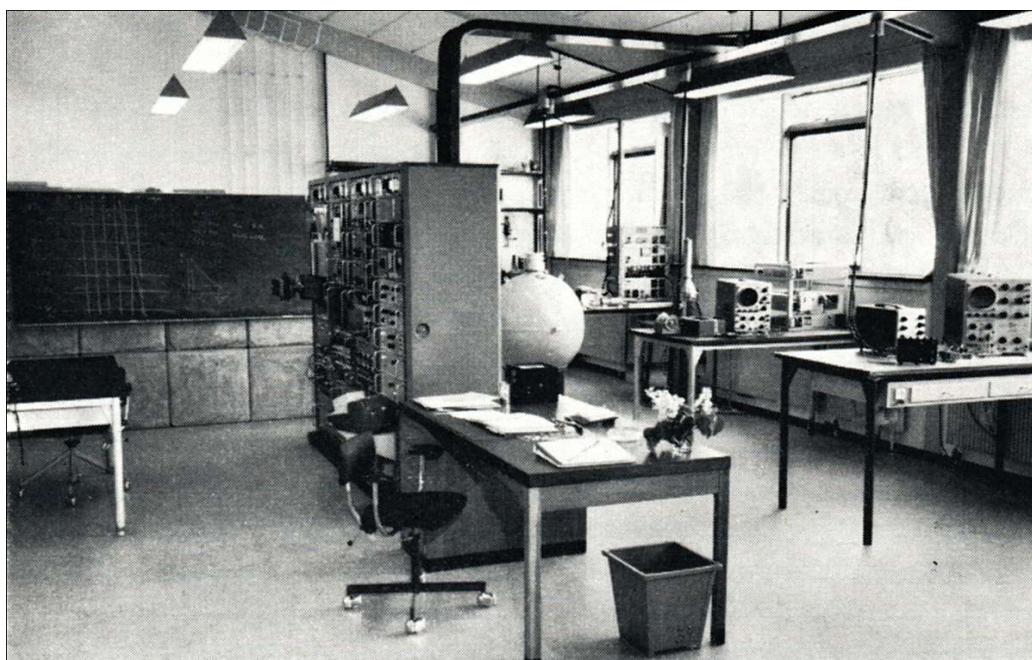
*En beretning i tre dele om mine lære- og pionérår i Risø's elektronikafdeling*

Leif Løvborg

Del 1: Eksamensprojektet (1961), side 1 - 13

**Del 2: Isotopmåleteknik** (1962-65), side 14 - 50

Del 3: Kvanefjelds-årene (1962-65), side 51 - 104



Elektronikafdelingens tæller- og udviklingslaboratorium i nordenden af bygning 110.

Billedkilde: Side 23 i Beretning om Atomenergikommissionens virksomhed i tiden 1. april 1963 til 31. marts 1964.

## Resumé af Del 2

Ved min tiltræden som ingeniør i elektronikafdelingen på Risø kom jeg til at arbejde sammen med fysikafdelingens dosimetrigruppe om præcisionsmåling af radioaktive isotopers kildestyrke. Herved blev jeg aktivt inddraget i en vigtig anvendelse af nuklear måleteknik samtidig med, at jeg fik udbygget mit kendskab til atomkernefysik og radioaktivitet fra førstedelsstudiet på DTH Østervold.

Et år senere blev der i afdelingen oprettet en gruppe for isotopmåleteknik, der fik min samarbejdspartner fra dosimetrigruppen som leder, og som udover ham og mig kom til at bestå af en tekniker og en laborant. I tomme lokaler, vi fik stillet til rådighed i nabobygningen mod vest til elektronikafdelingen, forestod jeg opbygningen af et moderne tællerlaboratorium, der ikke alene blev hjemsted for såkaldt standardisering af radioisotoper, men også for anvendelser af gammaspektrometri udført med en nyanskaffet multikanalanalysator.

Gruppen kom herved til at indgå i Risø's strålingsberedskab for en periode, hvor vi bistod afdelingen for strålingskontrol med at identificere gamma-emitterne i kontamineret materiale indsamlet fra lokaler på Risø, hvor der blev arbejdet med radioaktive materialer. Senere fik jeg lejlighed til at forbedre elektronikken til et specielt gammaspektrometer, der udnyttede den såkaldte Mössbauer-effekt til analyse af jernholdige mineraler.

Adgangen til Risø's nyanskaffede centrale cifferregnemaskine GIER betegnede et nybrud i udmålingen af fototoppene i gammaspektre optaget med multikanalanalysatoren, idet kanal-tællertallene kunne udskrives på hulstrimmel til indlæsning og efterfølgende databehandling i GIER med programmeringssproget Algol.

Et nyt indsatsområde tegnede sig, da vi af Grønlands Geologiske Undersøgelse (GGU) blev tilskyndet til at udvikle et nukleart måleinstrument til detektering af et værdifuldt metal - beryllium - fundet i mineraler i det sydvestlige Grønland, tæt ved forekomsterne af uran i Kvanefjeld. På tidspunktet for ibrugtagningen af dette såkaldte 'beryllometer' havde gruppelederen og laboranten forladt Risø.

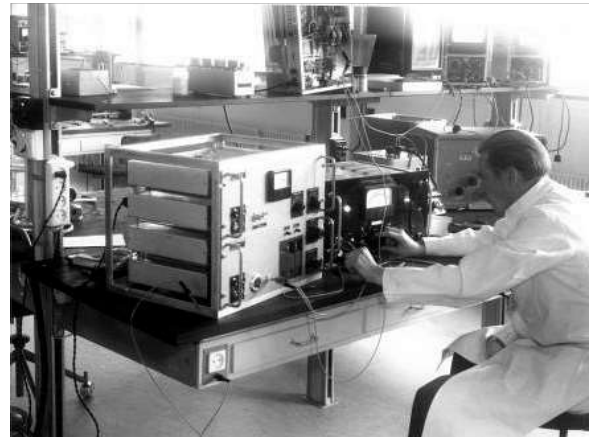
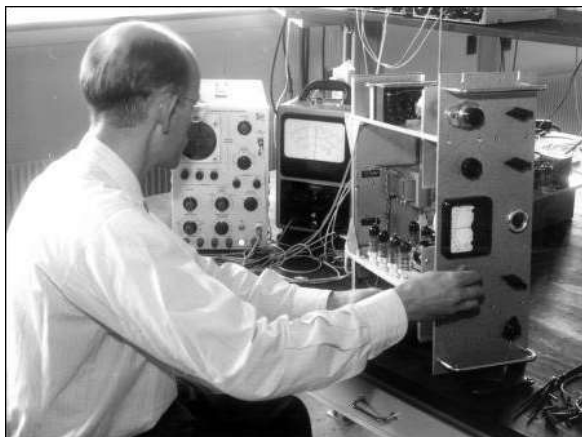
Gruppen blev herefter reetableret med mig som leder og en nyansat fysiker som videnskabelig medarbejder og fik under navnet 'gruppen for nuklear geofysik' til opgave at bistå GGU med udvikling af radiometriske målemetoder og instrumenter til brug ved efterforskningen af mineralske råstoffer i Grønland, specielt uran.

-----

Fire dage havde jeg haft til at slappe af i som nybagt civilingeniør, da jeg om morgenen den 1. februar 1962 ankom til Risø og meldte mig hos Mose på min første arbejdsdag i gruppen for nuklear måleteknik. Fra mit eksamensprojekt med ham som vejleder vidste jeg allerede, at elektronikafdelingen var en stor og diversificeret afdeling, hvor adskillige personalekategorier var repræsenteret. At afdelingen var i vækst, fremgik af, at der samme dag blev ansat yderligere tre civilingeniører i nogle af de andre udviklingsgrupper. Den samlede stab af civil- og teknikumingeniører nåede herved op på 19. Personalet omfattede desuden 23 ingeniørassistenter og elektronikmekanikere, en laboratoriemester, fem tekniske tegnere, fire kontorassistenter og to lærlinge <sup>1</sup>. I gruppen for nuklear måleteknik var en af ingeniørerne rejst nogle måneder tidligere, så efter min tiltræden disponerede Mose uændret over fire ingeniører: Weisberg, Eldov, Sloth og mig. Hertil kom gruppens to elektronikmekanikere samt en nylig tiltrådt sydkoreansk gæsteingeniør på et IAEA stipendium. Udvikling af enkeltapparatur såvel som større instrumenteringer til eksperimentalvirksomheden på Risø og driften af de tre reaktorer blev varetaget af faggrupperne forsøgsinstrumentering, reaktorinstrumentering og industriel (ikke-nuklear) instrumentering. Udover nuklear måleteknik og sikkerheds- og pålidelighedsanalyse omfattede afdelingens egenforskning simulering af reaktordynamik med en elektronisk analog-regnemaskine bygget af afdelingen.

Det var ikke så underligt, at det kneb med pladsen i bygning 109, der foruden kontorer og laboratorielokaler rummede et mekanisk værksted og et arbejdsrum, hvor der blev fremstillet apparatur, som der ikke var behov for at sætte i serieproduktion på en industrivirksomhed. Analogregnemaskinen med samt de tre tilknyttede medarbejdere var placeret i kælderen under kantinen på den anden side af laboratoriepladsen, og servicegruppen, der stod for reparation og vedligeholdelse af de elektroniske instrumenter på Risø, havde hjemsted i pavillonen mellem bygningerne 109 (elektronikafdelingen) og 110 (reaktorafdelingen).

De to fotos i Figur 1 giver et indtryk af de elektroniske moduler, der blev udviklet og serviceret i elektronikafdelingen omkring tidspunktet for min ansættelse.



Figur 1. Afprøvning af elektronikmoduler konstrueret i elektronikafdelingen i årene omkring 1960. På billedet til højre er ingeniør Arne Sloth i færd med at gennemmåle en to-moduls elektronisk udrustning indbygget i et lavt rack.

Grundstammen i konstruktionerne var de kompakte og glødestrømsbesparende elektronrør, der fremkom i midten af 1950'erne, og som for nogle rørtypers vedkommende gav plads for to uafhængige funktioner i samme glaskolbe. Den mekaniske udformning af elektronikmoduler i en forsøgs- eller driftsinstrumentering fulgte den amerikanske breddestandard på 19 tommer (48,3 cm).

<sup>1</sup> Beretning om AEK's virksomhed i tiden 1. april 1961 til 31. marts 1962.

Modulerne var beregnet til indbyrdes kabling på deres bagsider og blev oftest indskruet i et åbent såkaldt *rack* af større eller mindre højde eller - mere luksuriøst - i et lukket, ventileret stålskab som det, der rummede scanningsgammaskpektrometeret, jeg præsenterede i Del 1.

Ved etableringen af en måleopstilling konstrueret i gruppen for nuklear måleteknik deltog en af ingeniørerne aktivt i indkøringen af udstyret, og det var i første omgang ham, der blev hidkaldt, hvis noget skulle tilrettes, efter at opstillingen var taget i brug. Arne Sloth (som var teknikumingeniør, og som jeg kom til at dele kontor med) havde således opsynet med gammaskpektrometrisk og andet måleudstyr i kemiafdelingens isotoplaboratorium ved DR 2 og i afdelingen for landbrugsforsøg længst mod syd på Risø's areal. Rutinemæssige servicebesøg "ude på isotopen" eller "ovre på landbruget" tog de to elektronikmekanikere sig af.

I den ingeniørstilling, jeg tiltrådte - oprettet på anmodning af fysikafdelingens dosimetrigruppe - blev jeg tilknyttet mag.scient. Jørgen Thomas, som var omkring de tredive og varetog Risø's udvikling af metoder og udstyr til måling af radioaktive isotopers kildestyrke. Det var et internationalt speciale, der gik under navnet *standardization of radionuclides*, fortalte han mig, da jeg første gang mødte ham på hans kontor i bygning 108 (fysikafdelingen). Opgaven, der lå parat til mig, bestod i at foretage en grundig teknisk gennemgang af detektorsystemet og elektronikken for en tælleropstilling til absolutmåling af beta-radioaktivitet, der var placeret i kælderlaboratoriet på DR 1 - Risø's første og mindste forsøgsreaktor beliggende ved centralvejen på overgangen mellem forsøgsanlæggets landdel og selve halvøen. Opstillingen dannede grundlag for certificeringen af industrielt og medicinsk vigtige radioisotoper fremstillet på Risø og for Risø's deltagelse i såkaldte interkalibreringer organiseret af Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) i Sèvres vest for Paris. En anden vigtig anvendelse af opstillingen var bestemmelse af neutronflux i forsøgsrørene til Risø's reaktorer gennem bestråling af små cirkelrunde guldfolier og efterfølgende måling af den herved inducerede beta-radioaktivitet i disse.

Jørgen Thomas stod også for kalibreringen af de meget kraftige kobolt-60 gammakilder, der indgik i bestrålingsanlægget til forsøg med planteforædling og strålingskonservering af fødevarer i afdelingen for landbrugsforsøg. Det skete med to store såkaldte balancerede ioniseringskamre af brøndtypen i et lokale på den lineære elektronaccelerator, der stod færdigbygget i 1960 på arealet mellem Risø's administrationsbygning og afdelingen for landbrugsforsøg. I et kemirum på acceleratoren, der ligesom DR 1 hørte under fysikafdelingen, fandtes udstyret til fremstilling af tynde betakilder fra neutronbestrålede opløsninger, hvis indhold af en radioisotop skulle absolut bestemmes med opstillingen i kælderen på DR 1.

Dér kom jeg til at tilbringe mange timer i selskab med civilingeniør Jørgen Olsen, som bestyrede kælderlaboratoriet og varetog de praktiske øvelser i reaktorfysik og radioaktivitetsmåleteknik sammesteds for blandt andre de studerende på studieretning EF, elektrofysik, ved elektroingeniør-uddannelsen på DTH. Han var selv elektrofysiker og bidrog i mine samtaler med ham meget til, at jeg som svagstrømsingeniør fik udbygget min viden om atomkerneprocesser og radioaktivitet, der hidtil havde begrænset sig til stoffet præsenteret i professor Bjerges lærebog i elektron- og atomfysik. Jeg fulgte op med supplerende læsning i fagbøger som R.D. Evans: *The Atomic Nucleus* fra 1955 og Kai Siegbahn: *Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy* udgivet samme år.

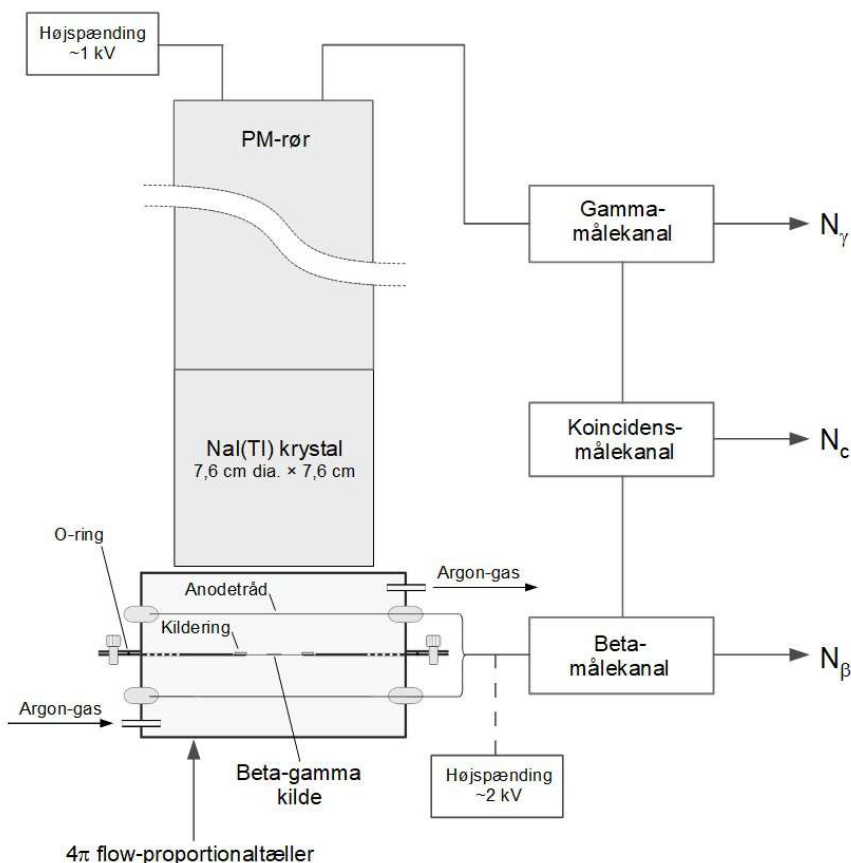
I Del 1 nævnte jeg, at den maksimalt tilgængelige energi  $E_{\max}$  udløst i et betahenfald deles mellem betapartiklen og den ledsagende ikke-detektérbare (anti-)neutrino. Herved bliver energispektrene for beta-emittere kontinuerte kurver af varierende former i intervallet fra nul til  $E_{\max}$  på energiaksen. Ved måling af absolut beta-kildestyrke er det et problem, at et ikke uvæsentligt antal betapartikler forlader atomkernen med en energi så tæt på nul, at de ikke kan undslippe kilden,

heller ikke selvom denne er tilvirket i form af et meget tyndt præparat. Kildens selvabsorption kan imidlertid overvindes indirekte ved hjælp af den såkaldte beta-gamma koincidensmetode, der beror på, at mange teknisk vigtige radioisotoper udsender gammafotoner i (næsten) perfekt synkronisme med betapartiklerne (jf. Del 1). Metoden forklarede Jørgen Thomas for mig på følgende måde:

Lad  $N$  betegne antallet af radioaktive henfald i kilden gennem en vis tælleperiode  $T$ . Så kan sandsynlighederne for at detektere en betapartikel - subsidiært en gammafoton - udtrykkes ved brøkerne  $N_\beta/N$  og  $N_\gamma/N$ , hvor  $N_\beta$  og  $N_\gamma$  står for antallet af betapartikler og gammafotoner registreret i tiden  $T$ . Sandsynligheden for at detektere en betapartikel og en gammafoton samtidigt er givet ved produktet af disse to af hinanden uafhængige sandsynligheder, som også kan udtrykkes ved brøken  $N_c/N$ , hvor  $N_c$  står for antallet af koincident registrerede betapartikler og gammafotoner. Altså:  $N_\beta/N \times N_\gamma/N = N_c/N$ , hvoraf følger, at

$$N = N_\beta \times N_\gamma / N_c \quad (1)$$

Jeg husker stadig Thomas' triumferende blik, da han præsenterede denne enkle formel for mig på tavlen i hans kontor. Anvendelsen af formelen beroede på, at dividerer man  $N$  med tælleperioden  $T$  angivet i sekunder, får man kildens absolutte styrke udtrykt som antal radioaktive henfald pr. sekund, der kan omregnes til fx nanocurie ( $10^{-9}$  curie) ved division af  $N/T$  med 37 (jf. Del 1, Note 2). Figur 2 er et principdiagram af beta-gamma koincidensopstillingen på DR 1, hvor jeg efter hukommelsen har indtegnet et snit gennem  $4\pi$  flow-proportionaltælleren benyttet til registrering af  $N_\beta$ .



Figur 2. Schematisk tegning af beta-gamma koincidensopstillingen i kælderlaboratoriet på DR 1. Den ufarlige argon-gas forlod  $4\pi$  proportionaltælleren gennem en tynd plasticslange og blev udledt til luften via en såkaldt bobleflaske, der fremkaldte et svagt overtryk i de to tællerkamre og sikrede et konstant flow.

En proportionaltæller er en strålingsdetektor, som er fyldt med en gas, i hvilken der dannes elektron-ion par, når en ladet atomar partikel gennemtrænger gassen. Elektronerne tiltrækkes af en anodetråd påtrykt en høj positiv spænding, som tæt ved tråden fører til dannelsen af en elektron-lavine. Denne bevirker, at der fra tråden kan aftages en impuls, hvis højde - ligesom det gælder for en NaI(Tl) scintillationsdetektor - er proportional med strålingsenergien afsat i detektormediet. I opstillingen på DR 1 var den radioaktive kilde, der skulle absolutmåles, placeret midt mellem to sammenskruede cylindriske detektorkamre, hvert med en diameter på omkring 8 cm og en højde på cirka 3 cm. Dem havde en af ingeniørassistenterne ved DR 1 fremstillet af akrylplade med kammervæggene gjort elektrisk ledende med et pådampet lag sølv. De to kamre fungerede som proportionaltællere med langsomt strømmende argon-gas som detektormedium, og tilsammen udgjorde de en detektor, der var følsom for betapartikler over hele rumvinklen  $4\pi$  steradianer<sup>2</sup>. Eller med andre ord: Sandsynligheden for at detektere en betapartikel - ækvivalent med detektorens effektivitet angivet i procent - var ikke begrænset af nogen geometrisk faktor, men afhang stort set udelukkende af kildens selvabsorption og af, hvor lavt det elektroniske diskriminatorsniveau (tærskel-impulshøjden) i beta-målekanalen kunne sættes, uden at der kom et signifikant bidrag til tællingerne fra såkaldt sekundær ionisering af tællergassen.

Præpareringen af de radioaktive kilder, der skulle absolutmåles, blev med stor akkuratessse varetaget af laborant Lis Vinther Kristensen i kemirummet på acceleratoren, hvor jeg aflagde besøg for at sætte mig ind i denne vigtige del af målemetoden. Arbejdet i et kemilaboratorium havde jeg stiftet et overfladisk bekendtskab med på det obligatoriske kursus i kvalitativ kemisk analyse for de førsteårsstuderende på studieretning B, M og E, som blev afholdt på den gamle polytekniske læreanstalt ved Sølvtorvet.

Holderne for kilderne var flade aluminiumsringe, som passede ned i en reces i hullet på midten af metalpladen, der adskilte  $4\pi$  tællerens to kamre og var forsynet med gennemboringer, der gav passage for argon-gassen fra det nedre kammer til det øvre (Figur 2). Til undersiden af kilderne fæstnede Lis en tynd membran dannet af huden på en opløsning af VYNS (en vinylklorid/vinylacetat polymer) og gjorde den elektrisk ledende på undersiden med et ultratyndt lag guld påført i dosimetrigruppens fordampningskammer. Når radioisotopen forelå på væskeform i en ampul, som det oftest var tilfældet, udtog Lis et lille præcist afmålt volumen af opløsningen med en mikropipette og pådroppede væsken til oversiden af membranen, hvor den resulterende dråbe blev indtørret under en infrarød lampe. Med en således præpareret supertynd kilde kunne der med opstillingen på DR 1 opnås en beta-detekteringseffektivitet på over 90%<sup>3</sup>, afhængigt af beta-partiklernes maksimalenergi  $E_{\max}$  og mængden af *carrier*<sup>4</sup> indeholdt i den radioaktive opløsning.

Som vist i Figur 2 blev detekteringen af gammafotonerne fra kilden foretaget med en scintillationsdetektor, hvor endefluden af en 76 mm dia.  $\times$  76 mm NaI(Tl) krystal (den største, jeg endnu havde set) dækkede  $4\pi$  tællerens overside. Hele detektorarrangementet, inklusiv fotomultiplikatorrøret (PM-røret) for scintillationsdetektoren, var omsluttet til alle sider af en baggrundsafskærmning

- 
- 2 En rumvinkel er et sidestykke til en vinkel i planen. I fysikken angives planvinkler normalt ikke i grader, men i radianer =  $2\pi/360 \times$  grader. Rumvinkler angives tilsvarende i steradianer (sr), som er tal mellem nul og  $4\pi$ .
  - 3 Det fremgår af formel (1), at sandsynligheden for at detektere en betapartikel i anvendelsen af koincidensmetoden er givet ved forholdet mellem koincidenstællertallet og gammataællertallet, svarende til en beta-detekteringseffektivitet på  $100 \times N_c/N_\gamma$  %. Når denne størrelse beløber sig til omkring 90% eller mere, er det muligt at absolutmåle kilder, for hvilke nogle af betahenfaldene sker direkte til datterkernens grundtilstand, dvs. uden emission af gammafotoner. Det gøres ved at indføre en korrektion til formel (1) baseret på kendskabet til radioisopens såkaldte henfaldsskema.
  - 4 Carrier: En kemisk forbindelse af grundstoffet, der danner udgangspunkt for produktionen af en radioisotop, og som bliver tilsat opløsningen efter bestrålingen af denne med neutroner for at sikre, at isotopen fysisk og kemisk opfører sig på samme måde som den kemiske forbindelse ved, eksempelvis, anvendelser af isotopen som radioaktivt sporstof i plantebiologiske og hydrologiske undersøgelser.

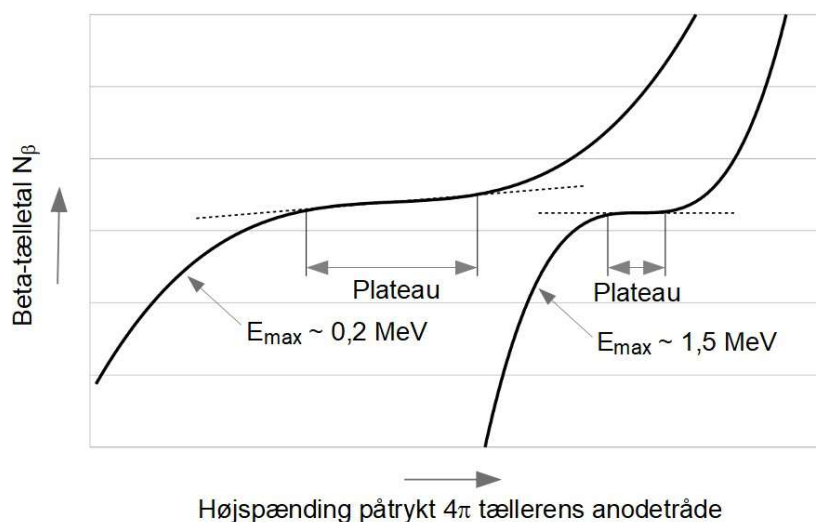
opbygget af blyklodser, hvoraf en af de forreste kunne skubbes til side, så  $4\pi$  tælleren kunne trækkes ud og åbnes for indsætning og udtagning af en kilde. Trods nærværet af reaktoren ovenover var baggrundsstrålingen i kælderens ikke unormalt høj, men voksede markant, når der i reaktorhallen blev udført forsøg med den såkaldte expo-opstilling på toppen af DR 1. På disse dage blev der ikke foretaget målinger med opstillingen.

Beta- og gamma-målekanalen var hver for sig opbygget af de samme moduler, som indgik i elektronikafdelingens scanningsgammaskpektrometer fraregnet dettes count rate meter og blækskriver (jf. Del 1): En højspændingsforsyning, en lineær impulsforstærker, der gjorde detektorimpulserne bipolare, og en én-kanal impulshøjdeanalysator. Hertil kom et koincidensmodul specialfremstillet i elektronikafdelingen. Tællingen af impulser blev foretaget med tre sammenkoblede såkaldte scalere af udenlandsk fabrikat, idet der til start og stop af en tælling blev benyttet et stopur. Scalerne fremviste tællertallene  $N_\beta$ ,  $N_\gamma$  og  $N_c$  som fircifrede tal, hvis cifre skulle aflæses succesivt på fire separate lyspaneler - flercifrede LED lyspaneler hørte fremtiden til. Elektronikmodulerne og de tre scalere var indsat i to *rags*, der fyldte godt op på laboratoriebordet.

Indstillingen af én-kanal analysatoren i gamma-målekanalen blev foretaget ved at indkredse fototoppen (eller den mest markante fototop) i radioisotopens gammaskpektrum med et smalt energivindue. Herefter blev der skruet op for vinduesbredden, indtil energivinduet omsluttede hele fototoppen. Ved at indskrænke tællingerne i gamma-målekanalen til kun at omfatte en fototop opnåede man en betydelig reduktion af baggrundstællehastigheden på bekostning af en nedgang i gamma-detekteringseffektiviteten.

I beta-målekanalen var én-kanal analysatoren omkoblet til integraltælling, dvs. den øvre grænse af energivinduet var sat ud af funktion med den nedre vinduesgrænse indstillet til et fast, lavt diskriminatorniveau, hvorved praktisk talt alle beta-impulser afgivet af  $4\pi$  tælleren blev registreret. Derved kom der uundgåeligt et lille bidrag til tællingerne fra sekundær ionisering af tællergassen, når de positive argon-ioner med en forsinkelse ramte detektorkamrenes væg og løsrev lavenergi elektroner. De bevirkede, at der på tællerens to anodetråde opstod små impulser, der ikke kunne bortdiskrimineres fuldstændigt, uden at det gik ud over beta-detekteringseffektiviteten. Det bedste man kunne gøre for at begrænse denne uønskede effekt, fortalte Jørgen Olsen, var at plote en såkaldt plateaukurve for den pågældende radioisotop. Først reducerede man højspændingen for tælleren, til tællertallet var mærkbart aftaget. Derpå øgede man højspændingen trinvis, indtil den manuelt optegnede kurve fladede ud for sluttelig at udvise en markant stigning (Figur 3 på næste side). Højspændingen blev derpå indreguleret til værdien aflæst i midtpunktet af det fremkomne plateau.

Mine anbefalinger om tekniske forbedringer af opstillingen brændte jeg inde med, selvom meget talte for en udskiftning af scalerne med moderne typer, hvor tællertiden blev styret af en *timer* med automatisk udskrivning af tællertallene på en papirstrimmel. Det burde endvidere være en overkommelig opgave at konstruere en ny  $4\pi$  tæller, der ikke krævede brug af en umbrakonøgle for at adskille og samle dens to kamre, hver gang der skulle skiftes kilde. Jørgen Thomas mente imidlertid ikke, det hastede med at gøre opstillingen mere brugervenlig. Han ville hellere have mig til at komme med en forklaring på det tilsyneladende paradoks, at den gennemsnitlige højde af impulserne i beta-målekanalen, således som afspejlet i plateaukurverne og ligeledes iagttaget på en oscillograf, aftog kendeligt, når man udskiftede betakilden med én, der havde et større  $E_{\max}$ . Det kunne jeg passende prøve at gøre ved at undersøge, hvad der fandtes af litteratur om hurtige elektroner energitab og rækkevidde ved deres passage gennem en tællergas.



Figur 3. Plateaukurver skitseret for to radioisoper med henholdsvis en lav og en høj maksimalenergi  $E_{\max}$  for de udsendte betapartikler. Figuren illustrerer, at når højspændingen og dermed gasforstærkningsfaktoren for en  $4\pi$  proportionaltæller gøres større, danner de resulterende tælleletal en kurve, der udviser et plateau, som er desto mere forskudt mod større højspænding, jo højere  $E_{\max}$ , samtidig med at plateauet bliver kortere og mere fladt.

Thomas syntes i den forbindelse, at jeg burde erhverve mig et elementært kendskab til beta-partiklers vekselvirkning med gasatomer og arrangerede et møde for mig med lederen af fysikafdelingen og professor i reaktor fysik ved DTH, Otto Koefoed-Hansen. Han var Risø's førende ekspert i beta-radioaktivitet og havde i sit tidligere virke som fysiker ved UITF<sup>5</sup> opnået international anerkendelse for sammen med fysikeren J.C. Jacobsen eksperimentelt at have påvist rigtigheden af Wolfgang Paulis hypotese fra 1930, at der ved en atomkernes betahenfald udsendes en neutral og masseløs neutrino, og at det er grunden til, at betastråling, i modsætning til gamma- og alfastråling, udviser et kontinuert energispektrum. Han havde personligt stået i spidsen for etableringen af specialet 'standardisering af radioaktiv kildestyrke' på Risø og forstod udmærket mit behov for en dybere indsigt i det fysiske grundlag for præcisionsmåling af beta-radioaktivitet. Mit møde med Koefoed-Hansen tog form af et par effektive manuduktionstimer, som takket være hans højt udviklede sans for formidling af tunge videnskabelige emner var en inspirerende optakt til det litteraturstudium, jeg efterfølgende gik i gang med i det komfortable læselokale på Risø's bibliotek.

Af flere tabelværker fremgik det, at for stigende værdier af betapartiklers  $E_{\max}$  fra 0,1 MeV til 1 MeV vokser partiklernes maksimale rækkevidde i argon ved atmosfæretryk fra cirka 8 centimeter til godt 2 meter. Det betød, at betapartiklerne fra en radioisotop som kobolt-60 med et  $E_{\max}$  på 0,31 MeV under deres flugt gennem et cylindrisk tællerkammer med en diameter på godt 8 centimeter i middel ikke afgav al deres energi men dog en forholdsvis stor brøkdelen af denne til tællergassen. Brøkdelen af totalt nedbremsede betapartikler var langt mindre for guld-198, som har et  $E_{\max}$  på 0,96 MeV. Det stemte med, at højspændingen på  $4\pi$  tællerens anodestråde - og dermed omsætningsfaktoren fra afsat strålingsenergi til impuls højde - skulle forøges betragteligt for at matche midtpunktet af tællerens plateau kurve, når en kobolt-60 kilde blev udskiftet med et bestrålet guldfolie.

At der i fysikafdelingens dosimetrigruppe var iværksat et studium af impulsdannelsen i en proportionaltæller til højeffektiv detektering af betapartikler, kom den hollandske fysiker J.H. Kramers for øre. Han var søn af H.A. Kramers - Niels Bohrs første elev og tidligere nære

<sup>5</sup> UITF: Universitetets Institut for Teoretisk Fysik, senere omdøbt til Niels Bohr Institutet, NBI.

medarbejder på UITF - og var blevet tilknyttet Risø's metallurgisektion (der senere blev en selvstændig afdeling), hvor han havde skaffet sig frirum til at undersøge, vistnok rent *con amore*, impulsdannelsen i geiger-müller tællerrør ("geigertællere"), der ligesom proportionaltællere er gasfyldte strålingsdetektorer. Han var interesseret i at se plateaukurverne, jeg havde optaget med  $4\pi$  tælleren og gjorde mig opmærksom på, at stigningen i tællertallene til højre for de mere eller mindre flade plateauer (Figur 2) var et forvarsel om, at elektronlavinen til opnåelse af gasforstærkning i feltet omkring tællerenes anodetråde var tæt på at løbe løbsk og ville give anledning til elektriske udladninger i tællergassen, hvis man prøvede at gøre højspændingen endnu større. Gassers elektriske egenskaber var jeg godt inde i fra lektor Helge Jørsboes undervisning i almindelig elektroteknik på ingeniørstudiets anden del. Men jeg blev alligevel overrasket, da Kramers fortalte mig, at  $4\pi$  tælleren i så fald, absolut uønsket selvfølgelig, ville komme til at virke som et geiger-müller tællerrør, der har som kendetegn, at ioniseringen af tællergassen spreder sig over et større område af tællerenes indre. Det gør, at impulserne bliver meget kraftige med næsten ens højder samtidig med, at tiden, der medgår til rekombination af ionerne og elektronerne, forlænges kraftigt.

I elektronikafdelingen var det kutyme, at ingeniørerne skrev arbejdsrapporter om de foreløbige resultater og konklusioner, de var nået frem til i deres faglige engagementer. Disse rapporter blev renskrevet af afdelingens kontordamer og uddelt i kopi til Jens Rasmussen og grupelederne. Min redegørelse for en  $4\pi$  proportionaltællers virkemåde - suppleret med elementære oplysninger om beta-radioaktivitet og betapartiklers ioniserende egenskaber - blev en ret omfangsrig arbejdsrapport, som var præget af den lettere studentikose skrivemåde i min eksamensprojektrapport - en afspejling af, at jeg i mit første år på Risø havde fået min uddannelse til svagstrømsingeniør suppleret med en uformel efteruddannelse i noget af det pensum, der var særegent for elektrofysik-studiet på DTH.

\*\*\*

Min undersøgelse af beta-gamma koincidensopstillingen på DR 1 havde nu nået en foreløbig afslutning. Det gav mig tid til at interessere mig for en opgave, som Mose ønskede, at jeg påtog mig: At få klarlagt behovet for multikanalanalysatorer på Risø. Han var, gættede jeg, formentlig kommet til erkendelse af, at scanningsgammaspæktrometeret, som han havde lagt mange kræfter i at udvikle, ikke havde nogen fremtid for sig ude blandt forsøgsanlæggets eksperimentalfysikere. Det hang sammen med, at nok fik man med denne modulært opbyggede instrumentkonstruktion et gammaspektrum optegnet automatisk med et count rate meter koblet til en blækskriver, men for det første var der tale om tidskrævende målinger, og for det andet var det til stor gene for efterbehandlingen af spektrene, at disse blev registreret analogt og ikke digitalt som en serie ækvidistante tælletal, der kunne udføres regneoperationer på.

Multikanalanalysatorer fandtes der endnu kun få af på Risø. En af dem stod i et hjørne af kælderlaboratoriet på DR 1. Det var en nogle år gammel Philips 100-kanal analysator, der var opbygget som en indad buet konsol, der stod på en sokkel og husede 100 scalere, som var arrangeret i 10 rækker og 10 søjler og nummereret fra 0 til 99. Hver scaler bestod af en dekatron<sup>6</sup> til visning af kanaltællertallets mindst betydende ciffer og et elektromekanisk register til visning af de øvrige cifre. I hver af kanalerne 1 til 99 blev de forstærkede detektorimpulser ledt til et elektronisk kredsløb som det, en én-kanal analysator er opbygget af, dvs. en nedre og en øvre impulshøjde-diskriminator koblet i anti-koincidens<sup>7</sup>. Det var her en teknisk komplikation, at bredden af det således fremkomne energivindue skulle være nøjagtig den samme i alle kanalerne. Tælleperioden

---

6 Dekatron: Et neon-fyldt dekadetællerrør, som under glaskolbens endeflade huser en cirkel af ti elektroder, der lyser op én efter én i takt med de modtagne impulser, og som afgiver et signal for hver tiende af disse.

7 Et simpelt (bipolart) elektronisk anti-koincidens-kredsløb har ligesom et tilsvarende koincidens-kredsløb to indgange og én udgang, men virker lige omvendt. Ankommer der således en impuls til den ene indgang af et anti-koincidens-kredsløb, men ikke til den anden, afleveres der en udgangsimpuls. En sådan opstår derimod ikke, når der samtidig ankommer en impuls til begge indgange.

kunne forvælges med tælleregisteret hørende til kanal 0, som blev påtrykt impulser leveret af en *clock generator*. Denne i for sig logisk opbyggede men ikke just brugervenlige multikanalanalysator blev nu udelukkende benyttet til øvelser i gammaspektrometri på kurserne for fysikstuderende ved DTH-Elektro og Aarhus Universitet. Jeg overværede nogle gange de røde lyspletter i dekatronerne snurre rundt - med særlig stor fart omkring en kraftig fototop i spektret og med en lyd fra de klikkende tælleregistre som hagl på et bliktag. Efter hver spektrumoptagelse skulle de studerende møjsommeligt aflæse de 99 kanaltælletal og nedskrive dem i deres notesbøger samt bagefter - inden de kunne optage et nyt spektrum - nulstille samtlige elektromekaniske registre ved at nedtrykke en tap på dem, helst flere tappe ad gangen, så det gik hurtigere, hvilket krævede ikke så lidt finger-ekvilibrisme.

Et andet eksemplar af Philips analysatoren havde hjemsted i afdelingen for strålingskontrol (i daglig tale kaldet helsefysikafdelingen), hvor den stadig blev anvendt til spektrometri af gamma-emitterende fissionsprodukter - *fallout*, herunder langlivet cæsium-137 - fra de vedvarende sovjetiske atmosfæriske kernevåbenforsøg i Novaya Zemlya nær polarcirklen. Der var her tale om analyser af jord- og græsprøver og af fødevarer samt om jævnlige udført *whole-body counting* af frivillige testpersoner i afdelingen. Det var gammaspektrometri, der krævede lange tælletider, som civilingeniør og helsefysiker Jørgen Lippert reducerede ved at indspille impulserne fra scintillationsdetektoren analogt på magnetbånd og derpå overspille dem i hurtigt tempo til Philips analysatoren. Ganske smart fundet på!

Konceptet for en transistoriseret ny og stærkt forbedret type multikanalanalysator, i det følgende betegnet en MCA, blev i anden halvdel af 1950'erne udviklet på Argonne National Laboratory i Illinois, USA, som et tidligt eksempel på digitale (eller som man dengang sagde, "ciffertekniske") instrumenter, med hvilke analoge måledata blev konverteret til tal, der kunne gemmes i en ferrithukommelse og gøres tilgængelige for indlæsning og bearbejdning i en elektronisk regnemaskine. I dette nye MCA koncept - her eksemplificeret ved en typisk 256-kanal analysator fra omkring 1960 - skete konverteringen af impulshøjde til en adresse i ferritlageret med en såkaldt Wilkinson analog-til-ciffer omsætter, hvor hver indgangsimpuls opladede en kondensator. I det øjeblik impulsen havde nået sin maksimumshøjde, begyndte et elektronisk kredsløb at aflade kondensatoren lineært med tiden og satte samtidig hermed en 8-bit binær scaler i gang med at tælle hurtige *clock* impulser genereret af en krystalstyret oscillator. Tællingen stoppede nøjagtigt på tidspunktet, hvor ladningen på kondensatoren var aftaget til nul, således at højden af impulsen blev registreret som et binært tælletal, der kunne afkodes som et decimalt kanalnummer i intervallet fra  $2^0 = 1$  til  $2^8 - 1 = 255$  (kanal 0 var ligesom i Philips analysatoren reserveret registrering af tiden for en spektrumoptagelse). I lagercellen for kanalnummeret udpeget af impulsen blev der sluttelig lagt én til det tal, der stod akkumuleret fra forudgående impulser tildelt den samme adresse. På denne måde blev der opbygget en heltalsrepræsentation af et impulshøjdespektrum i ferritlageret.

Den første moderne MCA på Risø - en 256-kanal analysator udviklet af det amerikanske firma Technical Measurement Cooperation (TMC) - blev i efteråret 1960 anskaffet til kemiafdelingens "kerne kemi" gruppe, der bestod af kemiingeniør, senere dr.phil. og professor ved Aarhus Universitet P. Gregers Hansen og hans dengang to nyansatte videnskabelige medarbejdere, kemiingeniør Henrik Loft Nielsen og elektrofysik-ingeniør, Kai Wilsky<sup>8</sup>. Bag etiketten "kerne kemi" gemte sig ordet *kernestrukturforskning*, dvs. udforskning af de rumlige fordelinger og bevægelsesmønstre for atomkernerne grundbestanddele, protoner og neutroner. Hertil krævedes der præcise spektrometriske

---

<sup>8</sup> Henrik Loft Nielsen kom til Risø fra en videnskabelig stilling ved UITE, hvorfra han kendte den uhensigtsmæssigt opbyggede Philips 100-kanal analysator. Kai Wilsky var tidligere ansat i elektronikafdelingen, som han kom til fra en stilling ved Finseninstitutet, hvor han bistod civilingeniør og senere professor ved DTH i impuls- og cifferteknik Per Gert Jensen med at bygge en 100-kanal MCA til brug ved medicinsk organ-scanning.

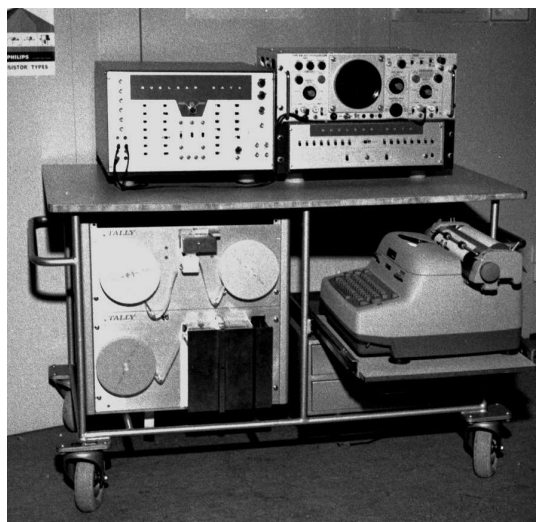
målinger af energier og forekomsthypigheder for anslåede kernetilstande opstået ved den radioaktive omdannelse af en neutron til en proton, altså et betahenfald. Det var her særlig interessant - ud fra spektrene af de udsendte gammafotoner - at undersøge rotations- og vibrations-egenskaberne af kerner, der afveg fra kugleformen.

Nu, to år senere, havde Gregers Hansens gruppe til overmål demonstreret det kraftige skub fremad, anskaffelsen af en MCA havde givet den kernefysiske grundforskning på Risø. Men hvad med de Risø-forskere, der gik med planer om projekter, i hvilke anvendelsen af gammaspektrometri indtog en nøgleposition? Det gjaldt Jørgen Olsen, der syslede med tanker om at bygge apparatur til såkaldt Mössbauer-spektrometri - en opgave, jeg senere blev aktivt involveret i og vil omtale længere fremme. Forudsætningen for at iværksætte dette projekt var tilgængeligheden af en tidssvarende MCA. En sådan var også påkrævet i et forsøgsprogram under planlægning i afdelingen for landbrugsforsøg - med kemiingeniør Birte Gregers Hansen som en af initiativtagerne - til undersøgelse af planters optagelse af mikronæringsstoffer ved hjælp af neutronaktiveringsanalyse<sup>9</sup>. Jeg spurgte Mose, om ikke det ville være en god idé, at elektronikafdelingen påtog sig udgiften til at anskaffe en MCA, forsyne den med digitale udlæsningsfaciliteter og gøre dette sammenstykkede apparatur til en mobil enhed, som kunne lånes af forskere i andre afdelinger, hvor der periodevis var behov for at optage gammaspektre. Forinden havde jeg på eget initiativ kontaktet lederen af helsefysikafdelingen, civilingeniør Henry Gjørup, og antydet over for ham, at et sådant lånearrangement kunne være et incitament til at sende Philips analysatoren på pension. For Gjørup var det mere afgørende, at en mobil MCA var højst ønskværdig i den fortsatte opbygning af Risø's nukleare beredskab.

Mose viderebragte mit forslag til Jens Rasmussen, som fik det godkendt i AEK's forretningsudvalg, hvorefter det faldt i min lod at vælge en egnet MCA og de relevante perifere enheder. Jeg kontaktede den danske repræsentant, Hans Christiansen, for det ligeledes USA-baserede firma Nuclear Data, hvis MCA-modeller var beregnet til fremvisning af de optagne spektre på en oscillografskærm, der var større end det lille display, som en TMC analysator var forsynet med. På en visit med nattog til Hamborg sammen med ham - min første Risø-tjenesterejse - fik jeg på årets *Physiker Tagung* demonstreret en nyudviklet Nuclear Data 512-kanal analysator, som Mose ved min hjemkomst afgav ordre på. Hvad denne avancerede MCA kostede, erindrer jeg ikke, men den har givetvis været dyr. Den bestod af to enheder, selve analysatoren og en mindre enhed til forskellige måder at opkoble denne på, der sammen med en Tektronix oscillograf blev monteret på et rullebord (Figur 4 på næste side). Under bordpladen blev der installeret en hulstrimmelperforator og en hulstrimmellæser til henholdsvis permanent lagring af spektre og eventuel genindlæsning af disse i analysatorens ferrithukommelse, og på en udtræksplade ved siden af blev der fastskruet en elektrisk skrivemaskine til udskrivning af spektre på tabelform. Denne komplette mobile enhed kunne nemt læses ind i ladrummet på en af serviceafdelingens store biler og transporteres ud til afdelingen, der ønskede den til låns under en ordning, der blev administreret af Arne Sloth.

---

9 Neutronaktiveringsanalyse: En meget følsom metode til grundstofanalyse baseret på gammaspektrometri af radioisotoper dannet ved bestråling af prøvemateriale med neutroner eller andre nukleare partikler. På Risø blev der i 1965 under ledelse af civilingeniør, senere dr.techn. K. Heydorn etableret en aktiveringsanalytisk service i kemiafdelingens isotoplaboratorium, hvorfra der udgik et rørpostsystem til hurtig transport af prøver til og fra en bestrålingsposition i DR 2.



Figur 4. Den mobile Nuclear Data 512-kanal analysator med tilhørende perifere enheder.

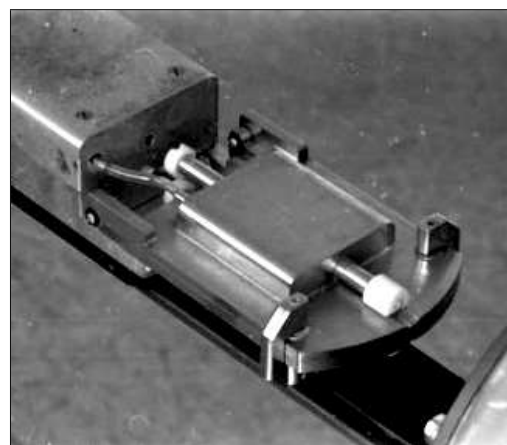
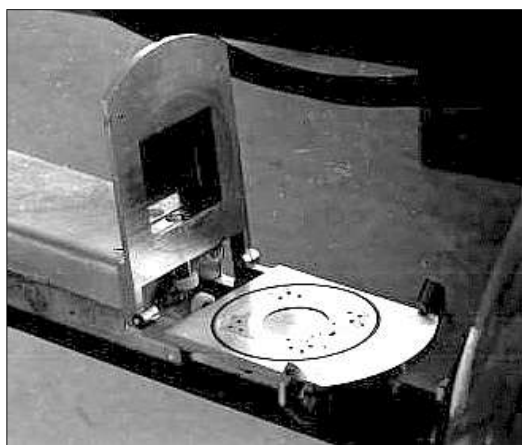
\*\*\*

En dag i efteråret 1962 gjorde Jørgen Thomas mig opmærksom på, at der gennem et stykke tid havde stået lokaler tomme i nordenden af bygning 110 - to kontormoduler plus fire sammenhængende moduler, hvor reaktorafdelingens konstruktionsgruppe tidligere havde haft tegnestue. Baggrunden var den, at konstruktionsgruppen i løbet af sommeren var flyttet ind på en nyetableret førstesal i bygning 125 beliggende langs vejen fra portvagten til laboratoriepladsen (jf. forsidebilledet til Del 1), hvilket samtidig gav plads for en udvidelse af helsefysikafdelingen i stueetagen. Den resterende del af bygning 110 husede fortsat Risø's reaktorfysiksektion og nu også den nyoprettede regnemaskinegruppe, der stod for driften af GIER, Risø's nyligt anskaffede elektroniske regnemaskine, til hvilken der var oprettet en maskinstue tæt på indgangen til bygningen i dennes sydende. De tomme lokaler i nordenden havde hos Thomas vakt den tanke, at de ville egne sig fortrinligt til indretning af et tællerlaboratorium i stil med dem, der længe havde eksisteret på nukleare forskningsinstitutioner i udlandet, eksempelvis Centre d'Études Nucléaires de Saclay i Frankrig og ved Atomic Energy of Canada Ltd., Chalk River. Jeg forstod nu, hvorfor han havde forholdt sig nølende til mit tidligere forslag om en modernisering af beta-gamma koincidensoptstillingen i kælderens til DR 1, som langtfra var et ideelt hjemsted for et laboratorium, hvor målingerne ofte måtte stilles i bero enten på grund af den forhøjede baggrundsstråling fra reaktorforsøgene i hallen ovenover, eller fordi opstillingen var stillet til rådighed for studerende, der deltog i Jørgen Olsens kurser.

Men Jørgen Thomas havde, uden at sige noget om det tidligere, samtidig gjort sig mere vidtgående tanker, der gik ud på at etablere et nyt forskningsområde på Risø - generel isotopmåleteknik - hvor absolutmåling af radioaktiv kildestyrke fortsat skulle være et centralt emne, men hvor der parallelt hermed blev satset på udvikling af nuklear teknik til kvantitativ måling af ikke-radioaktive stoffkoncentrationer. Som eksempel på den slags måleudstyr nævnte han en neutronsonde til måling af vandindholdet i jord, som lic.agro. Vagn Haahr havde stået for udviklingen af i afdelingen for landbrugsforsøg. Et andet relevant indsatsområde kunne være gammaspektrometri til støtte for Risø's beredskab og interne strålingskontrol. Nok så radikalt var det, at Thomas havde fulgt op på disse ideer med et forslag om, at der i elektronikafdelingen - med base i bygning 110 parallelt med hovedkvarteret i bygning 109 - blev oprettet en ny gruppe, som udover at overtage en vigtig del af de måleopgaver, der hidtil havde påhvilet fysikafdelingens dosimetrigruppe, skulle danne grobund for metodeudvikling og tjenester til supplerende af opgaverne, der blev varetaget af gruppen for nuklear måleteknik. Det syntes jeg, alt sammen lød vældig spændende.

Forslaget faldt i god jord hos Jens Rasmussen, som i min ansættelsessamtale i begyndelsen af året havde antydnet, at han med den stilling, jeg havde fået, ønskede at styrke elektronikafdelingens forskningsprofil ved blandt andet at gøre metodeudvikling til fundament for afdelingens indsats på det måletekniske område <sup>10</sup>. Jørgen Thomas ramte plet ved at foreslå et tiltag, der både fagligt og organisatorisk passede som fod i hose til Jens Rasmussens strategiske overvejelser. Resultatet blev, at direktionen stillede de ledige lokaler til rådighed for afdelingen, og at der i denne blev dannet en gruppe for isotopmåleteknik med Jørgen Thomas som leder og mig som ingeniør. Mose tog det pænt, da jeg forlod hans gruppe mindre end et år efter, at han havde fået mig ansat i den. Fra den lineære accelerator kom Lis Vinther Kristensen med over som gruppens laborant, og det lykkedes mig at overtale Mose til at afgive elektronikmekaniker Erling Johannsen, som i Forsvaret havde fået et grundigt kendskab til transistorteknik under et uddannelsesophold i USA og var blevet ansat i gruppen for nuklear måleteknik et par måneder efter mig. I det ledige modul, der kom først nede ad gangen i bygning 110, blev der indrettet et kemirum til Lis Vinther, og i det tilstødende modul fik Thomas og jeg kontor. Herfra førte en dør direkte ind til et rummeligt laboratorielokale. Vi begyndte med at indrette dette ved at rekvirere en mand fra serviceafdelingen til at komme med en gaffeltruck og bygge en vinkelmur af store betonklodser i det nordlige hjørne ud mod gangen. Dermed fik vi et udadtil strålingsafskærmet indelukke til eventuel håndtering af stærke gamma-kilder. Fordampningskammeret på den lineære accelerator blev placeret i den modsatte ende af laboratoriet.

I god tid inden vi flyttede ind tidligt i foråret 1963, gik Thomas og jeg i gang med at planlægge den fysiske udformning af en splinterny  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstilling. Fra Søværnets depot fik Thomas fremskaffet en tom sømine, og i den blev der på Risø værksted indsvejet et øvre og et nedre lodret rør til placering af to 76 mm dia.  $\times$  76 mm NaI(Tl) scintillationsdetektorer af integral-line typen <sup>11</sup>, den ene modstillet den anden, så der i mellemrummet mellem de to detektorkrystaller blev plads til indføring af en  $4\pi$  flow-proportionaltæller (Figur 5), som jeg designede i samarbejde med værkføreren i afdelingens mekaniske værksted, Alfred Peiding.



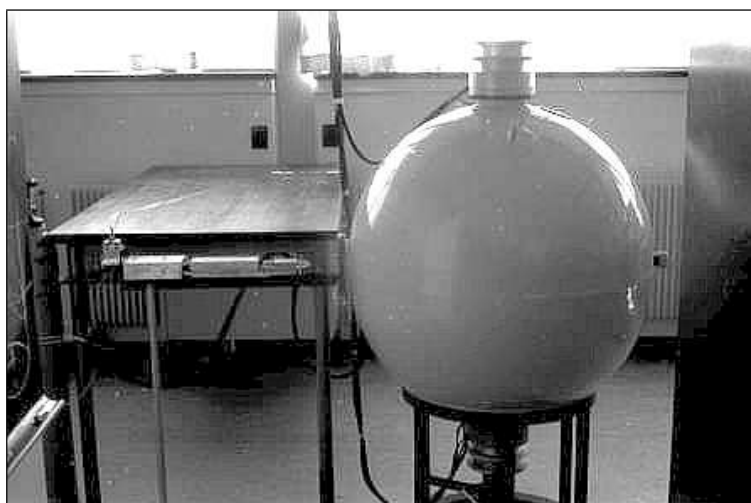
Figur 5.  $4\pi$  flow-proportionaltælleren i beta-gamma koincidensopstillingen i det nye tællerlaboratorium i bygning 110. Bemærk skillepladen med huller til fremføring af argon fra det nedre tællerkammer til det øvre og O-ringen, der gjorde tælleren lufttæt, når den blev spændt sammen med de to fingertappe fortil.

<sup>10</sup> Senere tog Jens Rasmussen initiativ til, at der i elektronikafdelingen blev oprettet en gruppe, der forskede i lasermåleteknik under ledelse af civilingeniør Lars Lading.

<sup>11</sup> I en integral-line scintillationsdetektor (i min tid normalt leveret af Harshaw Chemical Company i Cleveland, Ohio) er NaI(Tl) krystallen sammenkittet med PM-rørets endeflade. Derved får man en lidt bedre energiopløsning end opnået ved selv at samle de to komponenter.

Tællerens to kamre blev med stor præcision fremstillet i messing af værkstedsmekaniker Kaj Sørensen og efterfølgende forgyldt til sikring af deres overfladebestandighed<sup>12</sup>. Det nye i designet var, at det øverste tællekammer ved hjælp af to fingertappe kunne frakobles det nedre kammer og drejes op i lodret stilling, hvorved det blev nemt at udskifte den radioaktive kilde med en anden. Til forskel fra  $4\pi$  tælleren i måleopstillingen på DR 1 (Figur 2) var de to detektorkamre rektangulære og ikke cylindriske med en fælles lodret akse. Derved blev den elektriske feltstyrke mere ensartet på langs af de vandrette anodetråde.

Figur 6 viser den færdige beta-gamma koincidensopstilling og måden,  $4\pi$  tælleren indgik i den på, efter at "Minen", som vi navngav opstillingen, var blevet malet citrongul og placeret på et solidt stativ ud for det sidste vindue i laboratorielokalet. Den blev gennem en aftagelig klap foroven fyldt op med stålhagl, der fungerede som afskærmning mod baggrundsstrålingen i lokalet, og som ved en eventuel flytning af opstillingen kunne aftømmes gennem en tilvarende klap forneden.



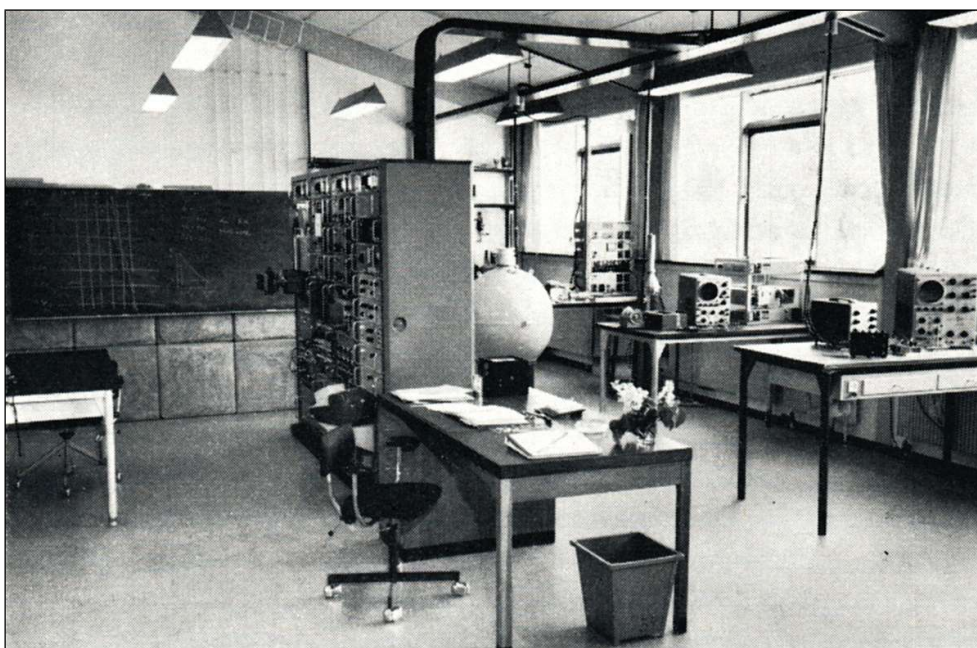
Figur 6. "Minen"- efterfølgeren af  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstillingen på DR 1. På en slæde i venstre halvdel af billedet ses fra højre mod venstre  $4\pi$  flow-proportionaltælleren, en transistoriseret for-forstærker for impulserne afgivet af denne samt en blyklods, der skærmede mod vandret indfaldende baggrundsstråling, når tælleren blev skubbet ind mellem de to NaI(Tl) detektorkrystaller inde i opstillingen. Yderst til venstre på slæden ses boblekammeret for argon-tællergassen, som (med en tilsætning af 2% methan til stabilisering af tællerens gasforstærkningsfaktor) blev leveret på stålflaske fra Risø's serviceafdeling. Øverst og nederst var "Minen" forsynet med blyskiver til afskærmning mod henholdsvis kosmisk stråling og den svage gammastråling fra betongulvets små indhold af naturligt forekommende radioaktive grundstoffer.

I stedet for at bygge et separat elektronikudstyr til registrering af tællertallene fra koincidensopstillingen fik vi Jens Rasmussens tilslutning til at opbygge en central instrumentering beregnet til dataopsamling fra målesystemer, som ikke alene omfattede "Minen", men også fremtidige detektoropstillinger beregnet til andre formål end bestemmelse af radioaktiv kildestyrke, herunder gammaspektrometri af prøver med ukendt isotopsammensætning. For mig var det en velkommen opgave til at studere katalogerne over de nyeste kommercielt tilgængelige produkter af transistoriseret nukleart måleudstyr og i samarbejde med Risø's indkøbskontor indhente tilbud fra firmaernes danske agenter. Valget faldt på et sæt kompakte lineære impulsforstærkere og én-kanal analysatorer af amerikansk fabrikat, hvortil kom et nyudviklet Philips scaler-timer system, hvor måletiden i sekunder og de registrerede tællertal blev udskrevet på papirstrimmel af en medfølgende printer. En såkaldt *controller* gjorde det muligt at indstille udstyret til at gentage tællingerne med

<sup>12</sup> Ved at vælge messing som konstruktionsmateriale accepterede vi, at et ikke uvæsentligt antal gammafotoner fra den radioaktive kilde i centrum af  $4\pi$  tælleren blev absorberet i dennes vægge.

faste mellemrum og få tiderne forløbet siden starten af den første tælling skrevet med ud. At der ingen lyspaneler var til fremvisning af tælleallene, vænnede vi os hurtigt til. De eneste elektronikmoduler, der ikke blev anskaffet udefra, var nogle eksemplarer af elektronikafdelingens rørbestykkede højspændingsgenerator, der udmærkede sig ved at være meget stabil, samt et transistoriseret koincidensmodul for detektorarrangementet i "Minen", som Erling byggede på grundlag af et design fra mig, hvor jeg støttede mig på min rapport fra en af studietidens øvelser på Laboratoriet for Telefoni og Telegrafi.

Som det fremgår af Figur 7 - et foto, jeg har valgt som forsidebillede til Del 2 - var det et flot laboratorium, der stod færdigt et halvt års tid efter vores indflytning i bygning 110. Den største anskaffelse til instrumenteringen var en Nuclear Data 1024-kanal MCA, der ligesom den mobile MCA i Figur 4 blev forsynet med en Tektronix oscillograf anvendt som billedskærm og udbygget med en hulstrimmelperforator og en hulstrimmellæser. Den nye analysators hukommelse kunne opdeles i fire kvadranter, hvorved det blev muligt at foretage en visuel sammenligning af et 256-kanal spektrum med op til tre andre optagne 256-kanal spektre.



Figur 7. Tæller- og udviklingslaboratoriet i bygning 110. I de fire stålskabe i midten af lokalet var der indbygget en 1024-kanal analysator og et transistoriseret, automatisk virkende tællerudstyr til registrering af forstærkede detektorimpulser i prædefinerede energivinduer. "Minen", der husede  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstillingen, samt måleopstillingerne på bordene langs vinduerne blev tilsluttet og kunne forsynes med højspænding via et koblingspanel i et af skabene, hvorfra kablerne blev ført frem på kabelbakker fastgjort til loftet. Betonklodserne i baggrunden dannede mur for et indelukke beregnet til håndtering af stærke gammakilder.

Når Jens Rasmussen havde gæster i afdelingen, tog han dem ofte med over til os for at fremvise det spektakulære opbud af avanceret elektronik i de fire stålskabe. Jeg fik efterhånden en vis øvelse i at forklare gæsterne indretningen af "Minen" og virkemåden af  $4\pi$  beta-gamma koincidensmetoden. Internt på Risø blev de transistoriserede impulsforstærkere, én-kanal analysatorer og scalere lidt af et tilløbsstykke især for eksperimentalfysikerne ved DR 3, når de kom for at få målt et sæt bestrålede guldfolier til bestemmelse af neutronflux. Instrumenteringen for forsøgsopstillingerne i reaktorhallen byggede stadig helt overvejende på elektronikafdelingens rørbestykkede standardmoduler, som kørte i døgndrift i de tre uger mellem reaktorens nedlukningsperioder og var indsat i høje rags, der lagde beslag på kostbar plads. Vores transistoriserede forsøgsinstrumentering fik

civilingeniør, senere professor i eksperimentel teknik ved Københavns Universitet, Jens Als-Nielsen, til at henvende sig til Jens Rasmussen med en opfordring til ham om at give fysikerne på DR 3 mulighed for at få erstattet elektronikafdelingens selvkonstruerede instrumentmoduler med nye, der var bedre tilpasset de snævre pladsforhold og ikke krævede servicering så ofte. Hverken Als-Nielsen eller jeg var klar over, at en modernisering af det elektroniske udstyr til fysikforsøgene på DR 3 havde afdelingen en langsigtet plan for, som det af økonomiske grunde ville tage et godt stykke tid at gennemføre.

\*\*\*

Risø's engagement i det internationale forskningsområde *standardization of radionuclides* var nu henlagt til det nye laboratorium i elektronikafdelingen, hvormed vi var forpligtet til at kunne måle beta-gamma emitteres kildestyrker med et minimum af usikkerhed. Måleusikkerhed var et emne, jeg var fortrolig med fra Fysisk Fælleskursus, der var obligatorisk på førstedelsstudiet for bygnings-, maskin- og elektroingeniører og omfattede tolv øvelser afholdt på Laboratoriet for Teknisk Fysik, hvis leder var professor R.E.H. Rasmussen, der ud over sin lærergerning repræsenterede DTH i udvalget for tilsyn med de danske rigsprototyper af normalmeteren og normalkilogrammet. Øvelserne omfattede et diversificeret udvalg af eksperimentelle opgaver inden for den tekniske fysik, eksempelvis vands strømning i rør og jerns magnetiske egenskaber. Som vejleder på mit hold havde vi cand.mag., senere dr.techn., Niels Jonassen, som lærte os at vurdere de optrædende måleusikkerheder og sammenfatte dem til en resulterende standardafvigelse på måleresultatet. Det var først senere, jeg hørte om distinktionen målepræcision versus målenøjagtighed (eng. *accuracy*). Hvor præcist en måling kan udføres, afslører sig ved, hvor godt måleresultatet kan reproduceres, mens målenøjagtighed har med kalibreringsusikkerhed at gøre. Eller sagt på en anden måde: Præcision er et udtryk for tilfældig variation af de registrerede måleværdier, nøjagtighed refererer til systematisk afvigelse af disses gennemsnit fra en vedtagne værdi defineret gennem en alment accepteret kalibreringsstandard.

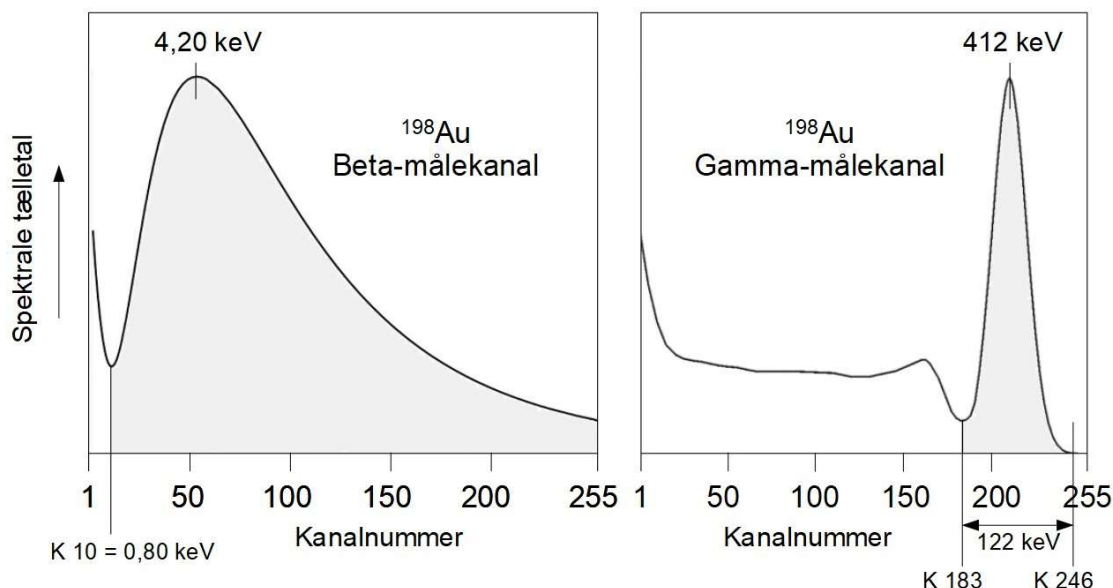
Ved måling af radioaktiv kildestyrke er det såkaldt Poisson-tællestatistik, der i reglen udgør det altdominerende bidrag til målepræcisionen. Her bærer et registreret tælleantal  $N$  information i sig om sin egen reproducerbarhed i form af en varians med forventningsværdien  $N$  og en dertil svarende standardafvigelse lig med  $\sqrt{N}$ . Præcisionen af en tælling, opgivet som en procentisk relativ standardafvigelse, har følgelig estimeret  $100/\sqrt{N}$ . Det sad i rygmarven på mig, at vil man gøre en tælling mindst 1% præcis, så skal der akkumuleres mindst 10.000 *counts*, ligegyldigt om det sker i ét stræk eller ved at opdele måletiden i flere på hinanden følgende intervaller.

En afdækning af nøjagtigheden af en målt kildestyrke er mere kompliceret og i praksis kun mulig ved, at flere laboratorier går sammen om hver især at give et bud på aktiviteten pr. volumen- eller vægtenhed af stoffet, der er mærket med den pågældende radioisotop. Det er baggrunden for, at Risø deltog i de tidligere nævnte interkalibreringsmålinger organiseret af Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Senere trådte to andre forskningsinstitutioner til som arrangører af interkalibreringsforsøg, henholdsvis IAEAs nukleare laboratorium i Seibersdorf, Østrig, og National Physical Laboratory i Teddington, UK. Disse bestræbelser på at bistå tællerlaboratorier rundt omkring i verden med at vurdere nøjagtigheden af deres målemetoder blev effektueret ved, at der med luftpost blev rundsendt tilfældigt valgte ampuller med udtag fra en opløsning, hvis radioaktivitet pr. milliliter væske - omregnet til et specificeret GMT tidspunkt - skulle bestemmes. Fra en liste over måleresultaterne kunne man så på det enkelte laboratorium vurdere, om man lå tilfredsstillende tæt på gennemsnittet af disse.

Forretningsgangen var den, at Lis Vinther præparerede et lille antal supertynde kilder fra væsken i den modtagne ampul, hvorefter disse blev målt hver for sig i "Minen" gennem en serie automatisk gentagne tællinger, som Erling Johannsen stod for efter ved påbegyndelsen af den første tælling at

have noteret klokkeslettet på et skibskronometer. Dette havde Jørgen Thomas anskaffet, fordi centraluret, der styrede vægurene i Risø's laboratorielokaler af og til gik i stå, hvilket jo ikke duede, når det til enhver tid skulle være muligt at knytte en tidsreference til starten af en måleserie. Bearbejdningen af tallene på papirstrimlen fra Philips printeren, herunder korrektion for radioisotopens eksponentielle henfald, siden ampullerne blev sendt ud til deltagerne i interkalibreringen, tog Jørgen Thomas sig af på en elektromekanisk Facit bordregnemaskine, der støjede uhyrligt, navnlig når den blev sat til at dividere. Hvor godt vores måleresultater stemte overens med resultaterne rapporteret af de andre laboratorier har jeg glemt - havde der hos os forekommet iøjnefaldende systematiske afvigelser fra gennemsnittet, ville jeg nok have husket det.

Mit bidrag til den fortsatte udvikling af  $4\pi$  beta-gamma koincidensmetoden var at bruge vores Nuclear Data MCA til indstilling af de to én-kanal analysatorer af amerikansk fabrikat i henholdsvis beta- og gamma-målekanalen for "Minen". Formålet med en MCA-baseret indstillingsmetode var for det første at eliminere det besværlige og tidsrøvende arbejde med at udplotte plateaukurver for  $4\pi$  tælleren og for det andet at gøre det nemt at opsætte et energivindue omkring en fototop i gammaspektret fra de to parallelforbundne scintillationsdetektorer i "Minen".



Figur 8. Impulshøjdespektre i henholdsvis beta- og gamma-målekanalen for "Minen" frembragt af en guld-198 ( $^{198}\text{Au}$ ) kilde indsat i  $4\pi$  tælleren. I absolutbestemmelsen af kildens radioaktivitet blev diskriminatorniveauet for integraltælling med én-kanal analysatoren i beta-målekanalen bragt til sammenfald med det spektrale minimum i kanal 10. Én-kanal analysatoren i gamma-målekanalen blev efterfølgende indstillet til at fungere som et energivindue fokuseret på fototoppen i kildens gammaspektrum.

I Figur 8 har jeg til venstre skitseret udseendet af et 256-kanal impulshøjdespektrum registreret med en guld-198 kilde (et bestrålet guldfolie) indsat i den nye  $4\pi$  tæller og til højre det ledsagende 256-kanal gammaspektrum. Det karakteristiske ved impulserne dannet ved betapartiklers ionisering af en tællergas er, som det fremgår af dette eksempel, at deres højder er bredt og skævt fordelt omkring en mest sandsynlig absorberet beta-energi, der her beløber sig til kun 4,20 keV<sup>13</sup> svarende til mindre end en halv procent af maksimalenergien  $E_{\text{max}} = 961$  keV for guld-198 betapartikler. Denne observation konkretiserede de oplysninger, jeg havde bragt i min tidligere arbejdsrapport om

<sup>13</sup> Energikalibreringen af en  $4\pi$  proportionaltæller udføres nemt ved at indsætte en jern-55 kilde, som ved såkaldt elektronindfangning henfalder til mangan-55 og derved udsender røntgenfotoner med energien 5,89 keV, der fremtræder som en fototop i tællerenes impulshøjdespektrum.

virkemåden af en  $4\pi$  flow-proportionaltæller. Nok så væsentligt var det, at de sekundære ioniseringsfænomener i en tællergas fremtræder som et stejlt aftagende initialt kurveforløb, der overlejrer bidraget fra de mest lavenergetiske beta-partikler og derved genererer et lokalt minimum nederst i spektret. MCA-tællertallene registreret i og omkring minimummet, der i eksemplet med guld-198 forekommer ved 0,80 keV på energiskalaen, udgjorde et differentielt, let aflæseligt sidestykke til de integrale tællertal observeret med en gasfyldt beta-detektor henover dennes plateau.

Fremgangsmåden ved indjusteringen af diskriminatorniveauet i beta-målekanalen forud for en måling med  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstillingen var nu den, at der med højspændingen for  $4\pi$  tælleren sat et par hundrede volt under den kritiske værdi, hvor elektriske udladninger i tællergassen begyndte at manifestere sig, blev optaget et 256-kanal spektrum af kilden, hvis aktivitet skulle absolut bestemmes. Det tog normalt kun et kvarters tid. Dernæst blev  $4\pi$  tælleren frakoblet og erstattet af en impulsgenerator, med hvilken højden af de således frembragte simulerede detektorimpulser kunne varieres trinløst op eller ned, indtil de blev registreret i kanalnummeret for minimummet i kildens impulshøjdespektrum. Herefter blev helipotmeteret til indstilling af én-kanal analysatorens integrale tærskelimpulshøjde drejet mod uret fra sin yderstilling på 10,00 skaladele, til der fremkom tællinger på en midlertidigt tilsluttet count rate meter. Herefter blev impuls-generatoren frakoblet og  $4\pi$  tælleren genindkoblet. Forholdet mellem tællertallene fra henholdsvis sekundær og primær ionisering af tællergassen var herefter reduceret til det mindst mulige.

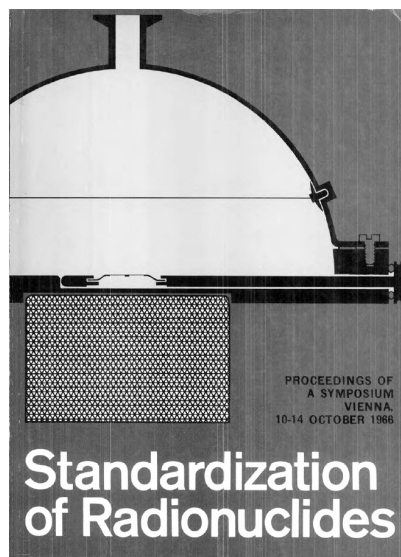
I gamma-målekanalen var det fodpunkterne for en fototop - 412 keV fototoppen fra guld-198 i Figur 8 - der skulle identificeres med vores MCA og benyttes til indstilling af energivinduet for den anden én-kanal analysator i  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstillingen. Teknikken hertil var den samme som i beta-målekanalen, blot skulle der efter indjusteringen af det nedre diskriminatorniveau foretages en indstilling af vinduesbredden, der udstak et øvre diskriminatorniveau.

Jørgen Thomas syntes, at min anvendelse af en MCA til optimal indstilling af tærskelimpulshøjderne for  $4\pi$  tælleren egnede sig til at blive præsenteret på et internationalt symposium. Han havde sammen med Kofoed-Hansen og den senere leder af bestrålingsanlægget på den lineære accelerator, Ari Brynjólfson, deltaget i IAEA-symposiet *Metrology of Radionuclides* afholdt i Wien i oktober 1959 og havde fået nys om, at IAEA planlagde et opfølgende symposium, som jeg burde bidrage til med et *paper*. Selv mente jeg, at det ville være lidt tyndt at præsentere indstillings-metoden uden at komme ind på, hvorledes impulshøjdespektret aftaget på en  $4\pi$  flow-proportionaltællers anodetråde ændrede sig i afhængighed af betapartiklernes maksimalenergi  $E_{\max}$ . Jeg besluttede derfor at udnytte tiden, inden IAEA fremkom med annonceringen af symposiet, til at foretage en empirisk undersøgelse, der eksemplificerede denne afhængighed.

Det blev til mit første rigtige personlige forskningsprojekt, der med afbrydelser kom til at strække sig over adskillige måneder, hvor Lis forsynede mig med tynde kilder tilvirket af neutronbestrålede opløsninger, som kemiingeniør Børge Kruse på isotoplaboratoriet med stor beredvillighed fremstillede. Kilderne omfattede syv beta-gamma emittere og otte rene beta-emittere, hvis  $E_{\max}$  varierede fra 167 keV til 1704 keV. Deres 256-kanal impulshøjdespektre registreret med  $4\pi$  tælleren udviste alle de samme karakteristiske træk som spektret til venstre i Figur 8: De spektrale tællertal fra kanal 1 og opefter startede med at dykke ned til et minimum og udviste derpå en mere eller mindre stejl stigning, der kulminerede i et maksimum, hvorefter tællertallene langsomt klingede af og nærmede sig nul hinsides kanalnummer 255. Hovedresultatet af undersøgelsen var, at for isotoper med et  $E_{\max}$  på over 200 keV aftog betapartiklernes mest sandsynlige energitab i  $4\pi$  tælleren med god tilnærmelse som en potensfunktion af  $E_{\max}$  med eksponenten -0,36, dvs. lidt kraftigere end omvendt proportionalt med kubikroden af  $E_{\max}$ . Det viste sig desuden, at det for

samtlige isotoper gjaldt, at energitabet i det spektrale minimum udgjorde  $16 \pm 1$  procent af det mest sandsynlige energitab. I hvor høj grad disse to empiriske sammenhænge afhang af dimensionerne og den geometriske udformning af en  $4\pi$  tællers to kamre havde jeg ikke noget bud på, og jeg kunne heller ikke være sikker på, at betapartikler var entydigt karakteriseret ved deres maksimalenergi i et eksperiment som dette - formerne af deres kontinuerte energispektre, som Koefoed-Hansen havde belært mig om, måtte selvsagt også betyde noget. Det afgørende var, at jeg nu kunne præsentere en kvantativ beskrivelse af den grundlæggende mekanisme i omsætningen af beta-energi til impulshøjde.

Mit færdige konferencebidrag lå i min skrivebordsskuffe i næsten to år, inden IAEA omsider indkaldte *papers* til symposiet *Standardization of Radionuclides*, der i oktober 1966 blev afholdt med 135 deltagere og 68 foredrag i det tidligere og senere genåbnede Grand Hotel på Kärtner Ring i Wien, hvor IAEA dengang havde sit hovedkvarter og sekretariat (Figur 9).



Figur 9. IAEAs hovedkvarter på Kärtner Ring i Wien inden udflytningen til FN-byen ved Donau i 1979 samt forsiden til *proceedings* fra symposiet *Standardization of Radionuclides* - en bog på 767 sider publiceret i marts 1967.

På det tidspunkt var gruppens aktiviteter drejet ind på det geologiske område, hvilket gjorde symposiets emnekreds mindre relevant for mig, men til gengæld fik jeg nu for første gang lejlighed til at stå på en talerstol foran en forsamling af internationale fagspecialister. Det befandt jeg mig ikke særlig godt ved, ukendt som jeg var for dem og endnu uden rutine i at holde foredrag på engelsk, hvortil kom, at jeg havde overvurderet, hvor meget jeg kunne nå at sige, inden taletiden udløb. Måske var det medvirkende årsager til, at mine resultater tilsyneladende ikke vakte ret megen opmærksomhed - der var i hvert fald ingen substantielle spørgsmål eller kommentarer til mig efter foredraget, heller ikke i pausen efter sessionen, det var indlagt i. At dømme efter de lysbilleder, adskillige af foredragsholderne fremviste af deres hjemlaboratorier, var det elektroniske måleudstyr tydeligvis af ældre dato selv på nogle af de toneangivende forskningsinstitutioner, der var repræsenteret på symposiet. Brug af en multikanalanalysator som indstillingsværktøj ved integraltælling af betapartikler blev muligvis anset for en unødigt lukus af veteranerne på området.

\*\*\*

Jeg har nu berettet udførligt om mit engagement i absolutmåling af beta-gamma radioaktivitet gennem de første to år af min ansættelse på Risø og har gjort det for at gøre læseren bekendt med det anvendte apparatur (som jeg formoder har en vis teknologihistorisk interesse) og de særlige udfordringer, tælling af betapartikler frembyder. Nu går jeg så over til at skrive om mine første bidrag til udviklingen af gammaspektrometrisk analyseteknik - en disciplin, jeg havde erhvervet mig et elementært kendskab til i mit eksamensprojekt, men ikke havde indhøstet praktiske erfaringer med udover opsætningen af et energivindue omkring en fototop i et gammaspektrum. Dette ændrede sig i sommeren 1963, da vi i gruppen for isotopmåleteknik påtog os - helt på linje med de præmisser, der lå til grund for oprettelsen af gruppen et halvt år tidligere - at bidrage med gammaspektrometri til den interne strålingskontrol på Risø. Det drejede sig her om opsporing af kilderne til radioaktiv kontamination påvist ved helsefysikernes rutinemæssige kontrol af strålingsniveauet på overflader i lokaler på Risø, hvor der blev arbejdet med radioaktive stoffer eller - som i fysikafdelingens eksperimentalvirksomhed på DR 3 - med neutronstråler.

Når det af og til skete, at en aftøringsprøve (en såkaldt *smear test*) afslørede radioaktiv forurening af et arbejdsbord eller en bestanddel af en forsøgsopstilling, ville helsefysikerne gerne hurtigt have foretaget en gammaspektrometrisk identifikation af, hvilke radioisotoper, der var stede i prøven. Her var deres forældede Philips 100-kanal analysator ingen nytte til, fordi den krævede tidsrøvende manuel udplotning af de aflæste kanal-tælletal. Med vores MCA blev spektrene afbildet på en oscillograskærm, hvor man ved at regulere på skaleringen af kanal-tælletalene ret præcist kunne bestemme kanalnumrene for fototoppe af meget forskellig intensitet ud fra en tænkt lodret linje, der delte billedet af en fototop op i to symmetriske halvparter.

Vores kontaktperson i helsefysikafdelingen var civilingeniør Ole Walmod Larsen. Han kom typisk ind ad døren til laboratoriet med en plastpose holdt ud fra sig i strakt arm, stod et par sekunder i denne positur, og udbrød så med høj stemme: ”Hvad er det her?”. Posen indeholdt sædvanligvis en serviet fra en *smear test*, men prøven kunne også være en metalgenstand eller en gummihandske brugt ved optørringen af spildt væske. Vi optog med det samme et gammaspektrum af prøven med en 76 mm dia.  $\times$  76 mm NaI(Tl) scintillationsdetektor fastgjort til et bordstativ, selvsagt uden at åbne plastposen, og gik derpå i gang med det i reglen omstændelige arbejde bestående i at finde et henfaldsskema, der matchede energierne og de relative intensiteter af de fremherskende fototoppe i spektret<sup>14</sup>. Her var *Table of Isotopes* udgivet af Strominger, Hollander og Seaborg i 1958 til uvurderlig hjælp, ligeledes den seneste udgave af *The Gamma Ray Spectrum Catalogue* udarbejdet af R.L. Heath på vegne af U.S. Atomic Energy Commission. Det var lidt af en sport at få udpeget kilden til den radioaktive kontamination så hurtigt, at Thomas eller jeg kunne ringe til Walmod inden fyraften og fortælle ham resultatet. Disse jævnligt forekommende måleopgaver varede, indtil helsefysikafdelingen et par år senere selv anskaffede en moderne MCA.

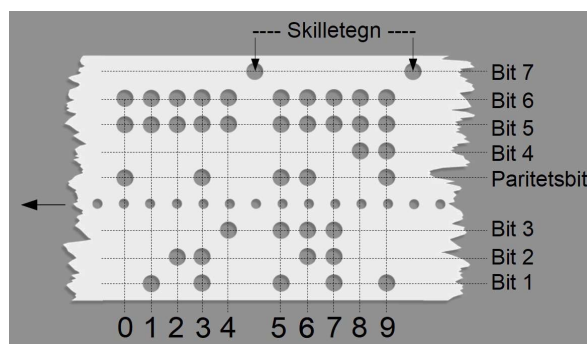
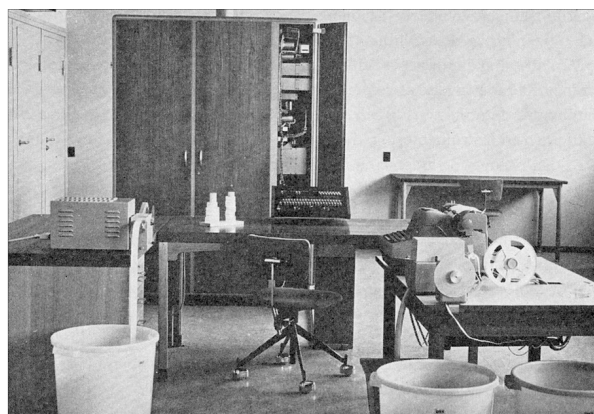
Bag anskaffelsen til os selv af en 1024-kanal analysator straks efter oprettelsen af gruppen lå der en forskningsmæssig interesse i at få undersøgt, hvilket potentiale digital beregningsteknik havde for at gøre efterbehandling og analyse af gammaspektre til et objektivt anliggende, hvor skærm-billederne af spektrene kun blev benyttet til at vælge en nedre og en øvre kanalgrænse for eksternt udført numerisk bearbejdning af kanal-tælletalene. Det var baggrunden for, at vi havde forsynet analysatoren med en hulstrimmelperforator og en hulstrimmellæser - moduler, jeg som tidligere omtalt havde sørget for at få indbygget i elektronikafdelingens mobile 512-kanal analysator (Figur 4) med tanke på at give brugerne mulighed for at lagre og genindlæse spektre - en mulighed, vi ofte selv benyttede os af. Med installeringen af elektronregnemaskinen GIER i bygning 110 året

---

14 Energikalibreringen af spektret (bestemmelse af den lineære relation mellem kanalnumrene og den afsatte strålingsenergi i detektorkrystallen) blev foretaget med en kobolt-60 kilde ( $E_\gamma = 1,1732$  og  $1,3325$  MeV) og en americium-241 kilde ( $E_\gamma = 0,0595$  MeV).

før, vi flyttede ind i de nye lokaler, havde vi nu regnekraft for hånden længere oppe ad gangen på en maskine, der foruden at blive programmeret via hulstrimmel også havde hulstrimmel som sit primære medium for ind- og udlæsning af data.

GIER (Figur 10) blev udviklet af Regnecentralen i Valby i 1960 og var efter datidens forhold en middelstor datamaskine, som var forsynet med et ferritarbejdslager på 1024 celler og et magnettromlelager på 12800 celler, begge akkommoderende en såkaldt ordlængde på 42 bit <sup>15</sup>. Med sine additions- og multiplikationstider for regning med flydende tal på henholdsvis cirka 80 og 150 mikrosekunder blev maskinen primært anskaffet til Risø med henblik på komplicerede numeriske beregninger af neutronflux og andre fysiske størrelser karakteristiske for kædeprocessen i en reaktor. Disse beregninger havde reaktorfysikerne tidligere fået udført hos Regnecentralen på GIERs forgænger, DASK, den første danskbyggede elektroniske cifferregnemaskine <sup>16</sup>. Vores gruppe var blandt de første på Risø, der satsede på at benytte GIER til numerisk bearbejdning af tal udskrivet på hulstrimmel af digitalt registrerende måleapparatur.



Figur 10. Risø's GIER installation etableret i februar 1962 og en tegning, der viser den binære kodning af de femcifrede tælle tal leveret af vores Nuclear Data multikanalanalysator ved udlæsning af gamma-spektre på hulstrimmel. Det særlige paritetsbit gjorde, at tegnkoderne - som påkrævet af GIER - blev udstemplet med et ulige antal huller.

I foråret 1963 deltog jeg i et af de kurser, hvor regnemaskinegruppens første leder, civilingeniør Helge Vilstrup, underviste i GIERs programmeringssprog, Algol. Privat anskaffede jeg en fortræffelig lærebog i Algol skrevet af chefen for Regnecentralens afdeling i Aarhus og senere professor ved Aarhus Universitet, Christian Andersen, der som tidligere amanuensis ved Matematisk Laboratorium på DTH lejlighedsvis havde optrådt som medlærer ved professor Fabricius-Bjerrers undervisning i differentialgeometri på førstedelen af civilingeniøruddannelsen, studieretning B, M og E. Et Algol-program var opbygget af sætninger, hvis betydning for manges vedkommende var umiddelbart indlysende og derfor nemme at tilegne sig - det gjaldt fx den hyppigt anvendte konstruktion if-then-else. Som i andre programmeringssprog, herunder det af IBM udviklede Fortran, skulle alle variable indgående i et program deklareres, dvs. navngives og specificeres efter type. Algol var specielt derved, at deklARATIONERNE og programsætningerne blev afsluttet med et semikolon, samt at tildelingen af en værdi til en variabel blev effektueret med det såkaldte dynamiske lighedstegn ':='. En markant forskel fra Fortran lå i, at den internationale

<sup>15</sup> I moderne terminologi er disse lagerstørrelser ækvivalente med 5,38 kilobyte RAM og 67,2 kilobyte diskplads.

<sup>16</sup> DASK - "Dansk Aritmetisk Sekvens Kalkulator" var opbygget med elektronrør og blev taget i brug i februar 1958. Under anførsel af den af de studerende velanskrevne matematikprofessor ved DTH, Richard Petersen, som havde været hoveddrivkraften i etableringen af DASK, aflagde mit hold i efteråret 1958 besøg på Regnecentralen i Valby. Her fik vi demonstreret løsningen af 20 ligninger med 20 ubekendte med en maskinkode udviklet til DASK, hvilket "kun" varede nogle få minutter. Risø var den tredje aftager af Regnecentralens nye transistoriserede GIER - "Geodædisk Instituts Elektroniske Regnemaskine".

Algol-60 rapport <sup>17</sup> ingen forskrifter indeholdt for læsning af tal fra inputmediet. Den mangel havde Regnecentralen afhjulpet ved til GIER at udvikle en såkaldt procedure kaldet *inone*, som bevirkede, at et tal på hulstrimlen blev indlæst uanset, hvilket format, det forelå i - heltals eller decimalt eventuelt ledsaget af en eksponentdel. Den binære talkode skulle blot være afsluttet med et gyldigt skilletegn. Nuklear Data analysatoren var fabriksindstillet til at benytte tegnet med de syv binære cifre '100 0000' som skilletegn (Figur 10). Som det fremgår af følgende rudimentære program, kunne indlæsningen af et 256-kanal spektrum og lagringen af dette som en talfølge (et såkaldt *array*) i GIERs hukommelse bekvemt foretages med en enkelt Algol-sætning efter deklARATIONerne i første linje:

```
begin integer i; array n[0:255];  
  for i := 0 step 1 until 255 do n[i] := inone;  
  ....  
end
```

Her er kanalnumrene og kanal-tællertallene henholdsvis repræsenteret af heltalsvariablen 'i' og det tilhørende array-element n[i] (med måletiden indeholdt i n[0]), mens prikkerne står for sætninger, der specificerer, hvilke regneoperationer, der skal udføres på spektret.

Jeg blev hurtigt fortrolig med at skrive små programmer til elementær numerisk bearbejdning af gammaspektre som fx subtraktion af et baggrundsspektrum eller omregning af spektre registreret med forskellig energikalibrering til en fælles energiskala. Man indtastede programsætningerne med en af de solide flexowritere, som lignede datidens elektromekaniske fjernskrivere og stod til rådighed for brugerne af GIER i et lokale overfor maskinstuen. Med en flexowriter blev tastningerne simultant udskrevet i klartekst på papir og som tegn på hulstrimmel. Tegnsættet var stort set identisk med tegnene i den såkaldte ASCII standard <sup>18</sup>.

En kørsel af et program begyndte for mit vedkommende med, at jeg i laboratoriet med et hurtigt kørende opspolingsapparat - et uundværligt tilbehør ved håndteringen af hulstrimmel - spolede strimlen med gammaspektre på en papring og tog rullen, der kunne være ret diger, med op til maskinstuen. Her hentede jeg strimmelrullen med mit program fra et hyldeskab, hvor brugernes programmer blev opbevaret under låg i flade glasskåle. Når det blev min tur til at få adgang til GIER, gav jeg mine to strimmelruller til operatøren, som derpå startede GIERs hurtige hulstimmellæser, hvorved først programstrimlen og dernæst strimlen med spektre beskrev en elegant bue gennem luften og landede i en tøjkurv, hvorfra operatøren genopspolede strimlerne og rakte dem tilbage til mig. Hvor længe en programkørsel varede, afhang selvsagt af, hvor mange spektre, der skulle regnes på. Normalt tog det kun GIER få øjeblikke at udføre de forholdsvis enkle beregninger involveret i behandlingen af et spektrum og få resultaterne udlæst med GIERs hulstrimmelperforator. Resultatstrimlen kom også en tur gennem opspolingsapparatet, så jeg kunne tage den med over i flexowriter-rummet og lave en udskrift af den.

Ved afprøvningen af et nyudviklet program skete det som regel for mig og andre brugere af GIER, at programmet ikke kunne eksekveres, fordi det var behæftet med en eller flere syntaksfejl, hvoraf en af de mest drilske var et manglende end til sidst i en længere begin-end programblok eller sætningsparentes. Andre programmeringsfejl kunne være en manglende variabeldeklARATION, et glemmt semikolon eller bare en banal slåfejl. GIERs maskinelle Algol-oversætter reagerede så ved at udspye en hulstrimmel indeholdende en liste over fejlene, som man derpå udskrev på en flexowriter

---

17 Algol-60 rapporten havde den senere professor i datalogi ved KU, dr.phil. Peter Naur, som redaktør og medforfatter.

18 ASCII (American Standard Code for Information Interchange) specificerer talkoder for grafiktegn (bogstaver, tal og symboler) og et antal såkaldte kontroltegn. ASCII tegnsættet bestod ved oprettelsen i 1963 af 128 tegn, der uheldigvis ikke omfattede de tre dansk-norske bogstaver 'æ', 'ø' og 'å' og deres versaler. Disse seks tegn blev først alment tilgængelige for udskrivning af edb-tekster, da ASCII standarden i 1981 blev udvidet til 256 tegn.

og med denne fremstillede en rettet kopi af programmet - en proces, der typisk måtte gentages nogle gange og resulterede i betydelige mængder kasseret hulstrimmel, hvoraf en del fandt anvendelse hjemme i børnefamilierne som serpentiner eller - ved juletid - som råmateriale for foldning af stjerner. GIER kunne også utilsigtet bringes til standsning under indlæsningen af et program, når strimlerne efterhånden blev knastørre og undertiden knækkede, når de løb gennem strimmellæseren. Men det var der råd for: De to sammenhørende ender af den overrevne strimmel førte man tæt sammen, satte et stykke klar tape over brudstedet og genoprettede de tildækkede huller med en stempelpind, en såkaldt håndpuncher.

\*\*\*

En opgave, jeg stillede mig selv, var at benytte GIER til at foretage en præcis bestemmelse af de tre karakteristiske kendetegn for en fototop i et gammaspektrum optaget med en NaI(Tl) scintillationsdetektor: Toppens kanalposition, toppens højde (intensitet) angivet som den gennemsnitlige kanal-tællehastighed i dens toppunkt, samt toppens bredde halvvejs nede ad flankerne - et mål for, hvor godt to nærliggende fototoppe kan skelnes fra hinanden. Det var ikke, fordi vi i gruppen havde brug for en bedre metode til identifikation af de fremherskende fototoppe i spektrene af de kontaminerede prøver, Ole Walmod kom med - til det formål var den hurtige visuelle metode god nok. Jeg var blot opsat på at prøve, om det ved hjælp af regressionsanalyse lod sig gøre at bestemme attributterne for en baggrundskorrigeret, fritstående fototop <sup>19</sup> rent maskinelt.

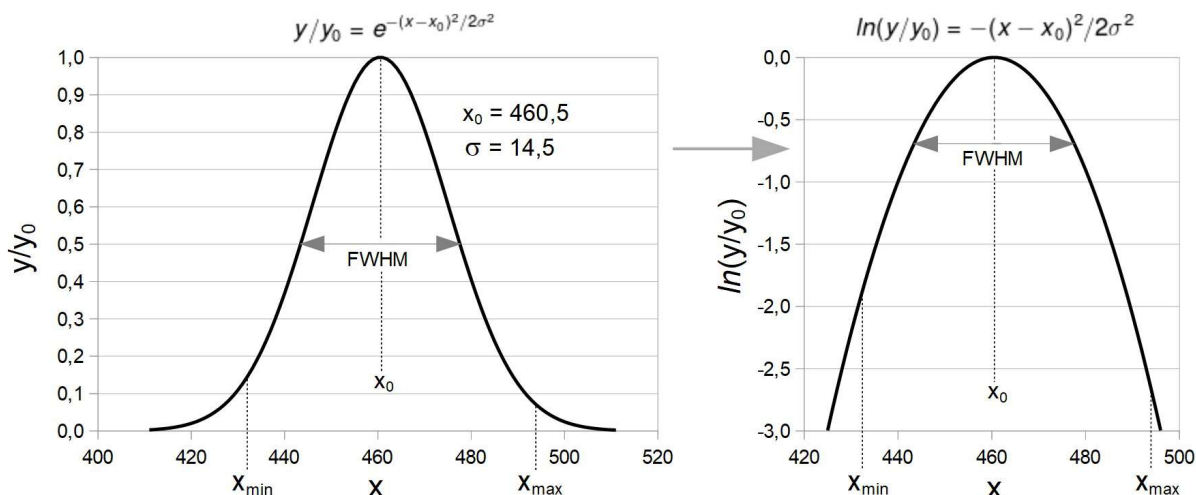
Regressionsanalyse er en statistisk metode til aritmetisk behandling af et antal eksperimentelle datasæt  $\{x, y\}$ , der repræsenterer en veldefineret uafhængig variabel  $x$  og en afhængig variabel  $y$ , som er behæftet med måleusikkerhed. Grundlaget for metoden er en matematisk model af den teoretiske relation mellem  $x$  og  $y$  i form af et funktionsudtryk, hvis såkaldte parametre det er formålet at afdække. Fremgangsmåden illustreres bekvemt af lineær regressionsanalyse, som jeg havde kendskab til fra en vejledning skrevet af professor R.E.H. Rasmussen til øvelserne på Fysisk Fælleskursus i sin tid. I dette drejede det sig om ud fra  $n$  målepunkter  $\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}, \dots, \{x_n, y_n\}$  at bestemme parametrene  $a$  og  $b$  i førstegradspolynomiet  $y = ax + b$ , hvis grafiske billede er en ret linje med hældningskoefficienten  $a$  og skæringspunktet  $\{0, b\}$  med  $y$ -aksen. I det lille hæfte blev det vist, hvordan  $a$  og  $b$  kan udledes gennem anvendelse af MKM - Mindste Kvadraters Metode - der består i at kvadrere og summere målepunkternes lodrette afstande  $y_i - (ax_i + b)$  til den rette linje og derpå minimere den fremkomne kvadratsum  $S = \sum [y_i - (ax_i + b)]^2, i = 1, 2, \dots, n$ . Ved kvadreringen af de tre led i den kantede parentes opsplittes  $S$  i delsummer, der tilsammen beskriver  $S$  som funktioner af  $a$  og  $b$ , således at  $S$  kan minimeres ved at sætte de to såkaldte partielle differentialkoefficienter  $\partial S/\partial a$  og  $\partial S/\partial b$  lig med nul. Det fører til to sammenhørende lineære regressionsligninger, hvis løsning er  $a$  og  $b$ . På Fysisk Fælleskursus skulle der eksempelvis i en af øvelserne foretages en halv snes observationer af en skålvægts lineært aftagende følsomhed med stigende belastning af vægtskålene, men selv med adgang til en bordregnemaskine (som der ingen var af i øvelseslokalet) ville det i et forsøg som dette, der byggede på et beskedent antal målepunkter, have krævet mange indtastninger at udregne  $a$  og  $b$ . Vi studerende måtte nøjes med at plote punkterne ind på millimeterpapir og derefter indtegne en ret linje, som de fordelte sig nogenlunde ligeligt om, hvorefter  $a$  og  $b$  blev aflæst grafisk.

Jørgen Thomas, som var velbevandret i matematisk statistik, fortalte mig, at lineær regression er et specialtilfælde af polynomisk regression, hvor den matematiske model er et polynomium af vilkårlig høj grad i den uafhængige variable, således at metoden gør det muligt at *fitte* en mere eller

---

<sup>19</sup> En fritstående fototop er en fototop frembragt af en gamma-emitter, der enten er monoenergetisk eller har sine øvrige emissioner beliggende i et lavere energiområde, således at toppen ikke kommer til at 'ride' på Compton-kontinuet genereret af gamma-emissioner med højere energier.

mindre kompleks kurve til de eksperimentelle data. I Del 1 nævnte jeg, at en (fritstående) fototop med god tilnærmelse afbildes som en klokkeformet såkaldt Gauss-kurve, som er det grafiske billede af en normalfordeling<sup>20</sup>, samt at en logaritmisk transformation af en Gauss-kurve fører denne over i det grafiske billede af et andengradspolynomium, altså en parabel. Med sin oplysende bemærkning havde Thomas givet mig ideen til, at jeg ved at erstatte kanaltællertallene i en fototop med deres naturlige logaritmer ville være i stand til at bestemme toppens kanalposition, højde og bredde ved hjælp af parabolisk regressionsanalyse. Transformationen af en fototop fra Gauss-kurve til parabel har jeg illustreret med eksemplet i Figur 11.



Figur 11. Lineær og logaritmisk afbildning af en normalfordeling benyttet som matematisk model for en enkeltstående fototop med decimaltals-repræsentation af toppens kanalposition  $x_0$ , højde  $y_0$  og halvværdibredde FWHM (*Full Width at Half Maximum*) lig med 2,355 gange normalfordelingens spredningsparameter  $\sigma$ . Eksemplet illustrerer grundlaget for regressionsanalyse af tællertallene for de heltallige kanalnumre på tværs af fototoppen i et hypotetisk 512-kanals gammaspektrum optaget med en NaI(Tl) scintillationsdetektor. Modellens forventede gyldighedsområde omfatter her de 63 kanalnumre fra  $x_{min} = 432$  til  $x_{max} = 494$ <sup>21</sup>.

Formlerne for parabolisk regressionsanalyse kunne jeg måske med bistand fra Risø's bibliotek have fundet i en eller anden (udenlandsk) statistikhåndbog, men for mig gav det en god føling med matematikken bag metoden at udføre regningerne selv. Sådan var det jo med os elektroingeniører dengang: Havde vi brug for en formel, vi ikke lige kunne på rygmarven, så udledte vi den gerne selv, hvis ikke det var alt for indviklet at gøre det. Forbilledet var her professor Jørgen Rybner, der i sine forelæsninger over svagstrømsteknik såkaldt firpol-teori formåede - uden manuskript - at fylde tavlen i auditoriet fra det øverste venstre hjørne til det nederste højre med udledning af formler.

For at opstille formlerne til estimering af parametrene  $\{x_0, y_0, \sigma\}$  i Figur 11 med et Algol-program omskrev jeg den komprimerede logaritmiske repræsentation af normalfordelingsmodellen til det velkendte udtryk for et andengradspolynomium,  $y = ax^2 + bx + c$ . Parametrene, der indgik i regressionsanalysen, blev herved  $a = -1/(2\sigma^2)$ ,  $b = -2ax_0$  og  $c = ax_0^2 + \ln(y_0)$ . Kvadratsummen, der skulle minimeres, var således  $S = \sum [\ln(y_i) - (ax_i^2 + bx_i + c)]^2$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . MKM-kriteriet ( $\partial S/\partial a = \partial S/\partial b = \partial S/\partial c = 0$ ) førte gennem nogle trivielle men lange udregninger til tre indbyrdes

20 Normalfordelingen såvel som andre teknisk vigtige fordelingsfunktioner (deriblandt poissonfordelingen - nøglen til estimering af standardafvigelsen på tællertallene registreret ved måling af radioaktivitet) - underviste professor Richard Petersen os elektroingeniørstuderende i på et kursus i anvendt matematik og sandsynlighedsregning. Dette kursus, hvori indgik opgaveregning, var efter en mindre revision af studieplanen sammen med andre ingeniør-relevante kurser henlagt til de første tre måneder af det såkaldte værkstedsår mellem studiets første og anden del.

21 Grænserne  $x_{min}$  og  $x_{max}$  indførte jeg på slup for at undgå, at de lave tællertal nederst på fototoppens flanker kom til at indgå med uforholdsmæssig stor vægt i regressionsanalysen.

uafhængige regressionsligninger, som jeg kunne have løst ved at betjene mig af såkaldt matrix-algebra, der er den universelle metode til løsning af et vilkårligt antal sammenhørende lineære ligninger og var detaljeret beskrevet i bind I af bogen, der i min studietid var hovedhjørnestenen i matematikundervisningen på DTH: A.F. Andersen, Harald Bohr og Richard Petersen, *Lærebog i Matematisk Analyse*, I - IV. Med kun tre ligninger og tre ubekendte involveret var det imidlertid nemmest at ty til den klassiske substitutionsmetode, som jeg i 4. mellemskoleklasse (Folkeskolens nuværende 9. klasse) havde lært at bruge til løsning af to ligninger med to ubekendte. Det sidste trin i processen var at omregne det fundne talsæt  $\{a, b, c\}$  til det søgte talsæt  $\{x_0, y_0, \sigma\}$ <sup>22</sup>. Hermed var formelapparatet til konstruktion af et Algol-program på plads<sup>23</sup>.

De naturlige logaritmer af tælle-tallene  $y_1, y_2, \dots, y_n$  i et gammaspektrum registreret på hulstrimmel med Nuclear Data analysatoren blev i programmet lagret i et *array* indekseret fra  $x_{\min}$  til  $x_{\max}$ , de to kanalnumre valgt til at afgrænse fototoppen, der skulle analyseres. Antallet af målepunkter, der indgik i regressionsanalysen, var således  $n = x_{\max} - x_{\min} + 1$ . Indlæsningen af de to kanalgrænser i GIER blev foretaget ved, at jeg skrev dem ned på en lap papir, som jeg afleverede i maskinstuen sammen med programrullen og rullen med spektret. Operatøren indtastede så de to tal på GIERs skrivepult i pausen, hvor spektrumrullen blev gjort klar til indlæsning.

At programmet virkede, som det skulle, dokumenterede jeg ved at bruge GIERs strimmelperforator til at udlæse den regressionsanalytisk fundne Gauss-kurve som en kunstig fototop i et 256- eller 512-kanals spektrum, der kunne indlæses i et tomt kvadrant af Nuclear Data analysatorens hukommelse ved siden af kvadrantet, som det eksperimentelle spektrum var lagret i. Når jeg skiftevis afbildede de to spektre på analysatorens oscillografskærm, fremtrådte Gauss-kurven nydeligt som en glat forløbende kæde af lysprikker, der virkede som en troværdig udjævning af lysprikkerne fra fototoppen i det eksperimentelle spektrum. Det viste sig, at de beregnede parametre for en fototop var robuste - de ændrede sig ikke mærkbart, hvis kanalgrænserne  $x_{\min}$  og  $x_{\max}$  ikke var præcis de samme i gentagne kørsler af programmet med ét og samme input-spektrum. Alt i alt var der tale om en succesoplevelse, der stadig står lyslevende for mig.

En anvendelse af programmet, jeg tydeligt husker, bestod i præcisionsmåling af en NaI(Tl) scintillationsdetektors opløsningsevne defineret som den procentiske halvverdibredde RWHM<sup>24</sup> af den singulære fototop med energien 0,6617 MeV i gammaspektret af isotopen cæsium-137. I det nukleare måleudstyr, som i Moses' gruppe blev opbygget til brug i afdelingen for landbrugsforsøg og andre af Risø's afdelinger, indgik ofte en scintillationsdetektor, der var magen til den, Mose havde vist mig på den første dag af mit eksamensprojekt i afdelingen, og som blev samlet af en af gruppens elektronikmekanikere. Det foregik ved, at der med PM-røret holdt lodret påførtes rørets plane glas-ende flade en klat silikoneolie, hvorefter NaI(Tl) krystallens transparente bundflade blev presset mod fladen og forsigtigt drejet rundt flere gange frem og tilbage, inden den ydre metalhætte for krystallen blev skruet på. Det var af stor betydning for detektorens opløsningsevne, at der herefter ingen luftbobler var i silikoneolie-laget, hvilket viovre hos os havde fået mulighed for at verificere med den meget nøjagtige regressionsanalytiske metode. For en detektor forsynet med en 51 mm dia.  $\times$  51 mm NaI(Tl) krystal skulle opløsningsevnen helst ikke være ringere end cirka 7%.

\*\*\*

---

22  $x_0 = -b/2a$ ,  $y_0 = \exp(c - a)$ ,  $\sigma = \sqrt{-1/2a}$  ( $a < 0$ ).

23 Logaritmefunktionen 'ln' såvel som eksponentialfunktionen 'exp' indgik i programmeringssproget Algol-60 som en såkaldt *real procedure*, hvor talværdien af en funktionen for et givet argument blev indlejret i funktionens navn.

24 Med reference til Figur 11: RWHM (*Relative Width at Half Maximum*) =  $100 \times \text{FWHM}/x_0 = 235,5 \times \sigma/x_0$  (%).

I sommeren 1963 konstruerede Erling Johannsen og jeg et elektronisk *interface* til Philips tællerudstyret hørende til "Minen", hvorved vi banede vej for endnu en måleteknisk orienteret anvendelse af GIER baseret på udskrivning af tælleletal med vores hulstrimmelperforator. Til brug i målingerne udført med  $4\pi$  beta-gamma koincidensmetoden skrev jeg et Algol-program, med hvilket prøvernes absolutte aktiviteter på et givet referencetidspunkt blev beregnet. Jørgen Thomas var dermed fri for besværet med at foretage udregningerne på den elektromekaniske bordregnemaskine i vores fælles kontor, og jeg slap for at flygte ind i laboratoriet på grund af larmen fra den. Den nye leder af regnemaskinegruppen, civilingeniør Leif Hansson, udviste stor interesse for min anvendelse af GIER til processering af data genereret med vores MCA og det automatiserede scaler-udstyr. Ved et kollokvium holdt i det store auditorium (senere navngivet Niels Bohr auditoriet), hvor Leif Hansson fortalte om den service, gruppen ydede Risø's forskere ved udarbejdelsen af deres Algol-programmer. Med nogle af mine programmer brugt som eksempler gjorde han tilhørerne opmærksom på, at GIER var som skræddersyet til numerisk behandling af eksperimentelle digitale data opsamlet med apparatur, der var forsynet med en hulstrimmelperforator.

\*\*\*

Senere i 1963 blev jeg kontaktet af Jørgen Olsen, som efter at have overdraget sit tidligere engagement i absolutmåling af radioaktiv kildestyrke til vores gruppe havde fået mere tid til forskning i kælderlaboratoriet på DR 1. Han kaldte mig over for at vise mig en måleopstilling, der udnyttede Mössbauer-effekten<sup>25</sup> i jern-57 ( $^{57}\text{Fe}$ ) til at skelne mellem de kemiske forbindelser af jern til stede i jernholdige mineraler, og som han - tilskyndet af en henvendelse fra Mineralogisk Museum - havde bygget med bistand fra en engelsk gæsteforsker og de to ingeniørassistenter ved DR 1. Det første jeg noterede mig, da jeg så opstillingen, var rullebordet med elektronikafdelingens mobile 512-kanal analysator, som Jørgen havde skaffet sig i lån for en længere periode. Den selvkonstruerede del af opstillingen, som stod på laboratoriebordet presset ind ved siden af den gamle  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstilling (der fortsat indgik i kursusvirksomheden på DR 1) frembød et usædvanligt syn i et fysiklaboratorium, nemlig to ens højttalere, der var monteret på linje med svingspolerne for deres lydmembraner mekanisk sammenkoblet af et aksialt gennemgående aluminiumsrør.

Det var et såkaldt *velocity drive*, forklarede Jørgen, hvor der til den ene ende af aluminiumsrøret var fæstnet en kobolt-57 bestrålingskilde, i hvilken kildeatomerne var indlejret i en matrix af platin. Den bagerste højttaler fungerede som en vibrator for kilden drevet af en Hewlett Packard *waveform* generator. Denne var indstillet til at afgive et jævnt stigende og faldende periodisk spændingsforløb med en frekvens på 15,5 cps (her i betydningen *cycles per second*). Det fik kilden til at bevæge sig frem og tilbage med jævnt voksende og aftagende hastighed gennem et udsving på plus-minus nogle tiendedele millimeter. Den forreste højttaler blev benyttet som en såkaldt transducer, der omsatte vekselspændingen induceret i svingspolen i højttalermagnetens luftgab til et elektronisk hastighedssignal for bestrålingskildens vibrationer.

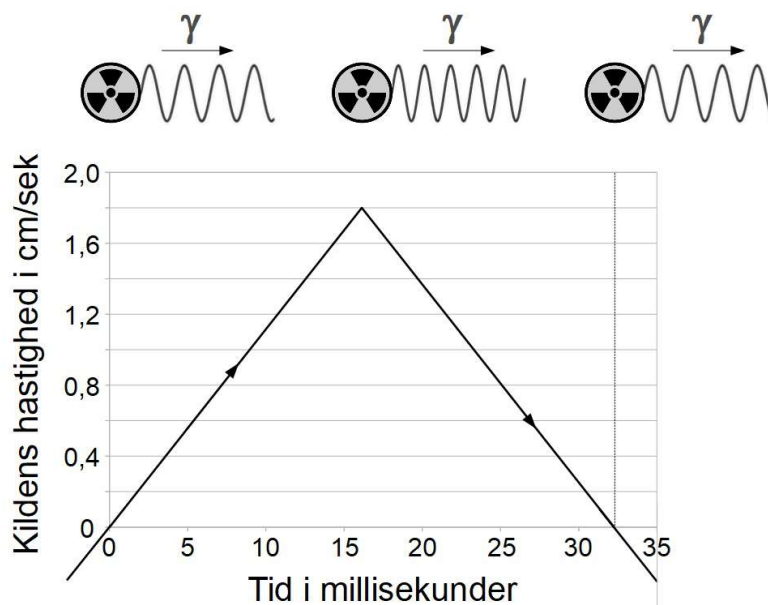
For at gøre mig bekendt med fysikken bag denne særprægede måleopstilling fortalte Jørgen Olsen følgende frit gengivet efter hukommelsen:

Kobolt-57 ( $^{57}\text{Co}$ ,  $T_{1/2} = 272$  dage) henfalder ved indfangning af en indre orbital elektron til jern-57, som i den resulterende anslåede kernetilstand udsender gammafotoner, deriblandt nogle med energien 14,4 keV. Mössbauer-effekten bevirker så, at en vis brøkdel af disse fotoner undslipper deres  $^{57}\text{Fe}$  moderatomer, uden at kernen rekylerer, som den normalt ville gøre. Dermed sker der ingen overførsel af energi til krystalgitteret, som kildeatomerne er indlejret i, således at 14,4 MeV fotonerne bliver perfekt monoenergetiske.  $^{57}\text{Fe}$  er udover at være et henfaldsprodukt af  $^{57}\text{Co}$ , en

<sup>25</sup> Mössbauer-effekt: Rekylfri emission og resonant absorption af gammastråling i atomkerner indlejret i faste stoffer.

isotop med en naturlig forekomsthypighed på 2% i jern. Det udgør grundlaget for at udnytte det andet aspekt af Mössbauer-effekten i  $^{57}\text{Fe}$ : Resonant ("genklangs") absorption af gammastråling i en  $^{57}\text{Fe}$  atomkerne. Ideen med et *velocity drive* for bestrålingskilden er cyklisk at variere den rekylfri 14,4 MeV gammastrålings skarpt definerede energi en ganske lille smule op og ned, nok til at bestryge og anslå ekstremt tætliggende absorptions-resonanser i de passive  $^{57}\text{Fe}$  atomkerner indeholdt i en tynd prøve af et jernholdigt materiale. Det lader sig gøre ved at udnytte gammastrålings bølgeegenskaber til at variere strålingsfrekvensen og dermed strålingsenergien ved hjælp af Doppler-effekten<sup>26</sup>, der indtræffer, når kilden til strålingen sættes i frem- og tilbagegående bevægelse med jævnt varierende hastighed. I Mössbauer-spektre optaget med en multikanal-analysator fremtræder resonanserne som spektrale dyk, der er karakteristiske for måden, jern i prøven er repræsenteret på kemisk og fysisk. Det er disse kendetegn ved spektrene, der betinger anvendelsen af Mössbauer-effekten til analyse af jerns forskelligartede optræden i faste stoffer, herunder mineraler og legeringer.

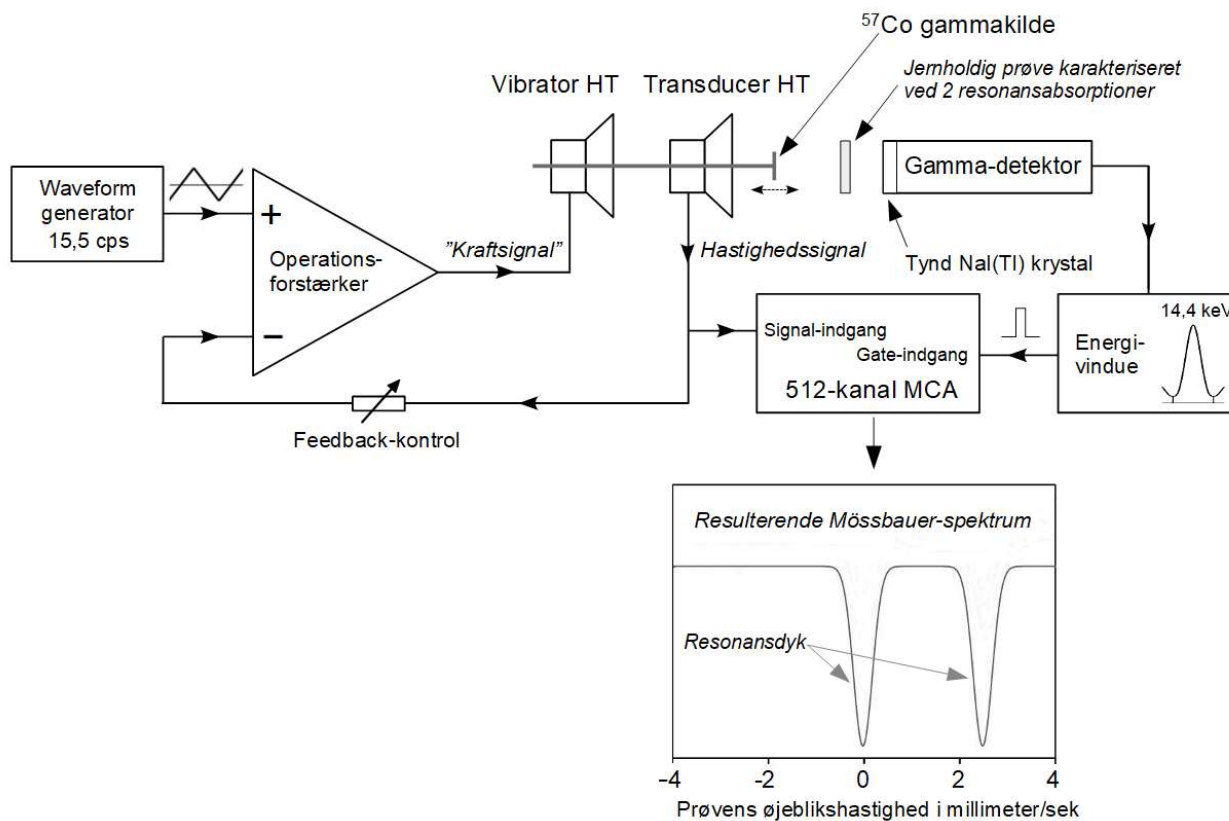
Denne summariske forklaring var ikke helt nem at kapere på stående fod, og så var det nyt for mig, at gammastråling ligesom radiobølger kan frekvensmoduleres, selvsagt ikke som i FM radio, men ved hjælp af Doppler-effekten, som illustreret i Figur 12. Man får et indtryk af den uhyre lille modulationsgrad involveret i optagelsen af Mössbauer-spektre med opstillingen på DR 1 ved at sammenholde den maksimale kildehastighed på  $\pm 1,8$  cm/sek med hastigheden, fotoner bevæger sig med, dvs. lyshastigheden lig med  $3,0 \times 10^{10}$  cm/sek.



Figur 12. Lidt mere end en halvcyklus af et tilstræbt lineært varierende hastighedsforløb på  $\pm 1,8$  cm/sek for den vibrerende  $^{57}\text{Co}$  bestrålingskilde i Mössbauer-måleopstillingen i kælderen på DR 1, samt (illustreret ovenover grafen) udnyttelsen af Doppler-effekten til at sammenpresse og strække bølgelængden af den af kilden udsendte 14,4 keV rekylfrit emitterede gammastråling, svarende til, at strålingen frekvensmoduleres, hvorved dens energi bringes til at variere cyklisk i takt med kildes øjeblikshastighed.

26 Doppler-effekten kender mange fra fra skiftet i tonehøjde, der opleves, når et udrykningskøretøj med stor fart og hylende sirene passerer forbi én. Fænomenet skyldes, at lydbølgen fra sirenen presses sammen i kørselsretningen og udvides i retningen bagud, hvorved bølgens frekvens skifter fra højere til lavere i passageøjeblikket. Effekten forekommer også, når en kilde til elektromagnetisk stråling, herunder lys og gammastråling, er i bevægelse hen imod eller bort fra stedet, hvor strålingen detekteres. Skiftet i strålingsfrekvensen  $\nu$  er ækvivalent med et skift i strålingsenergien  $E$ , jf. den kvantefysiske relation  $E = h\nu$ , hvor  $h$  er Plancks konstant.

I måleopstillingen blev prøven indsat i en position mellem transducer-højttaleren og scintillationsdetektor, der var forsynet med en NaI(Tl) krystal, som kun var et par millimeter tyk for at reducere antallet af baggrundstællinger under bibeholdelse af høj effektivitet ved detekteringen af lavenergetisk gammastråling. Hver gang detektoren registrerede en 14,4 MeV gammafoton, som passerede prøven uden at blive absorberet, blev Nuclear Data analysatorens såkaldte *gate* anordning åbnet for tilførsel af en enkelt standardimpuls i det kanalnummer, der korresponderede med kildens øjeblikshastighed. Resonansdykkene i det resulterende spektrum kom herved til at udgå fra en vandret basislinje. Det har jeg illustreret i Figur 13, som er et diagram af opstillingen, hvor jeg som et hypotetisk eksempel har indtegnet et Mössbauer-spektrum frembragt af en jernholdig prøve, der er karakteriseret ved fremkomsten af to resonansdyk.



Figur 13. Diagram af Mössbauer-måleopstillingen og et eksempel, der viser fremkomsten af et Mössbauer-spektrum, som er karakteriseret ved to resonansabsorptions-dyk. "Kraftsignalet" for vibrator-højttaleren blev leveret af et udgangstrin påbygget operationsforstærkeren, der modtog justerbart negativ feedback fra transducer-højttaleren med henblik på at linearisere hastighedssignalet.

Men, beredte Jørgen - og det var derfor, han havde kaldt mig over - basislinjen i de Mössbauer-spektre, han hidtil havde optaget, udviste en kedelig krumning ledsaget af såkaldt *ripple* et stykke før, endepunkterne af hastighedsintervallet gennemløbet af  $^{57}\text{Co}$  kilden blev nået. Med en oscillograf viste han mig, at det hang sammen med, at hastighedssignalet fra transducer-højttaleren ikke, som i Figur 12, bevarede sit retlinede forløb hele vejen henimod punktet, hvor hastigheden toppede i den ene eller den anden af de to retninger. Det var, som om vibrator-højttaleren tabte pusten noget før, accelerationen af dens svingspole tvangsmæssigt skiftede fortegn. Dette burde ikke ske, fordi kurveformen af den mekaniske drivkraft i systemet i princippet automatisk tilpassede sig hastighedssignalet via feedback af dette til forstærkeren for vibrator-højttaleren, som var en såkaldt operationsforstærker. En sådan har to indgange, en plus-indgang og en minus-indgang, og forstærker spændingsforskellen mellem disse meget kraftigt. I operationsforstærkeren, der indgik i Mössbauer-opstillingen og var påbygget et udgangstrin, som kunne levere den nødvendige

elektriske effekt, var plus-indgangen tilsluttet *waveform* generatoren, mens minus-indgangen modtog sit input fra transducer-højttaleren. Herved opstod der på forstærkerens udgangsterminal et signal, som var en kopi af det trekantformede spændingsforløb produceret af *waveform* generatoren. Forskellen mellem dette signal og hastighedssignalet blev i princippet tvunget til at være tæt på nul, når bare der var skruet højt nok op for feedback-styrken.

Som jeg fik demonstreret, var virkningen af at give mere negativ feedback lige før, hastighedssignalet begyndte at se næsten rigtigt ud på oscillografen, at systemet gik i selvsving - den såkaldte fasevinkel mellem vekselspændingerne på operationsforstærkerens to indgange havde abrupt ændret sig fra 180 grader til nul. "Hvad kan man gøre ved det?", lød Jørgen Olsens spørgsmål til mig. Han mente, at jeg som elektronikingeniør og deltager i aktiviteterne i kælderen på DR 1 i en periode var den rette at henvende sig til for at få løst problemet.

Et par dage senere kom jeg til at sidde ved siden af Jens Rasmussen ved frokosten i kantinen. Han havde, inden han i 1956 kom til AEK for at deltage i opbygningen af en elektronikafdeling på Risø, været tilknyttet Radioteknisk Forskningslaboratorium, en ATV-institution, hvorfra han havde erfaring med design og afprøvning af elektroakustisk udstyr. Jeg benyttede lejligheden til at fortælle ham, at jeg var på vej til at engagere mig i forbedring af en måleopstilling på DR 1, hvor der blev anvendt en højttaler til at bevæge et mekanisk system frem og tilbage med konstant acceleration i begge retninger. Jens Rasmussen kunne fortælle mig, at man for at forhindre basgengivelsen af store biographøjttalere i at lyde rumlende, såkaldt basresonans, ofte bruger det kunstgreb at gøre forstærkeranlæggets elektriske udgangsimpedans<sup>27</sup> negativ, hvorved indvirkningen af højttalerens mekaniske impedans<sup>28</sup> på lydbilledet blev kraftigt reduceret. Det var et trick, jeg formentlig kunne drage nytte af. Mekanisk impedans vidste jeg, hvad var fra forelæsningerne i elektroakustik på andendelsstudiet holdt af dr.techn. Fritz Ingerslev, som dengang var ekstraordinær professor i svagstrøms elektronik ved DTH foruden at være leder af Lydteknisk Laboratorium, også en ATV-institution. Men det var nyt for mig, at en højttalerforstærkers rent ohmske udgangsimpedans (jf. Note 27) kunne forvandles til et negativt tal, og at dette kunne indjusteres til næsten helt at ophæve indflydelsen af højttalerens mekaniske impedans på bevægelsen af svingspolen.

Gennem Risø's bibliotek fik jeg fra DTB (Damarks Tekniske Bibliotek på DTH) fremskaffet en artikel fra 1958 i *IRE Transactions on Audio*<sup>29</sup>, hvor der fandtes et diagram af en elektrorør-forstærker til *high-fidelity* gengivelse af de lave frekvenser i musik og tale, hvilket skete gennem indførelsen af to feedbacksløjfer: En positiv, hvor en del af strømmen gennem højttalerens svingspole blev ledt tilbage til katoden af forstærkerens udgangsrør i medfase med dettes anodestrøm, og en negativ i modfase med spændingen på gitteret af forstærkerens indgangsrør. Forklaringen på, hvorfor dette arrangement gjorde forstærkerens udgangsimpedans negativ og derved (næsten) neutraliserede højttalerens mekaniske impedans ved lave frekvenser, kræver lidt matematik, som jeg vil skåne læseren for at få fremvist.

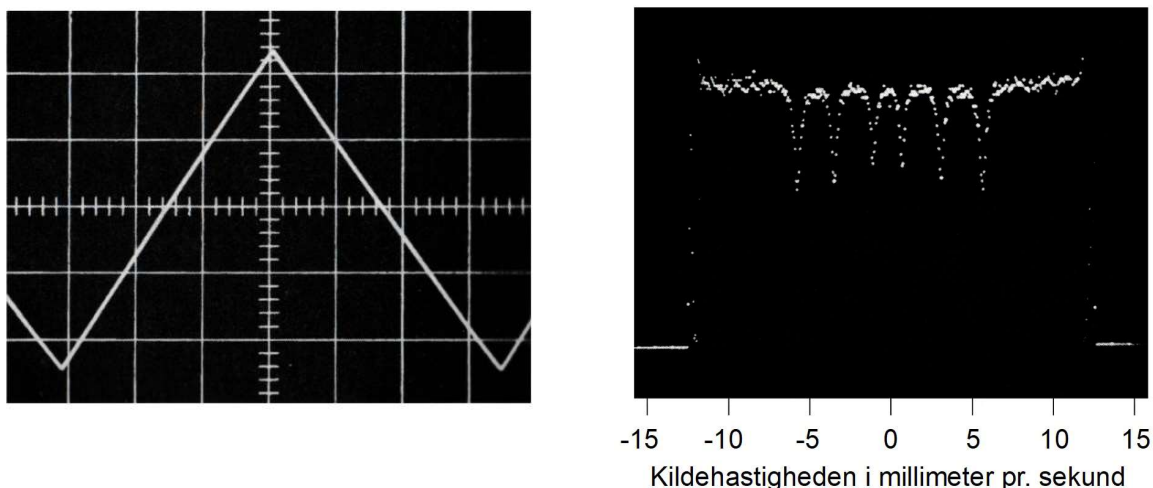
---

27 Elektrisk impedans: Forholdet mellem vekselspændingen mellem to punkter i et elektrisk kredsløb og den herved forårsagede vekselstrøm fra det ene punkt til det andet. Dette forhold er generelt et såkaldt komplekst tal, som beskriver dels forholdet  $R = V/I$  mellem amplituderne  $V$  og  $I$  af henholdsvis spændingen og strømmen, hvilket er bidraget fra Ohms lov til impedansen, dels faseforskydningen mellem strøm og spænding, som optræder, når der i kredsløbet indgår elektriske kondensatorer og spoler (selvinduktioner). Udgangsimpedansen af en højttalerforstærker er normalt rent ohmsk, dvs. givet ved et positivt almindeligt tal.

28 Mekanisk impedans: Forholdet mellem kraften, der holder et mekanisk system i cyklisk bevægelse, og systemets hastighed. Dette forhold er matematisk set ækvivalent med elektrisk impedans. En højttalers mekaniske impedans kan således ækvivaleres med et elektrisk kredsløb bestående af en kondensator, en selvinduktion og en modstand koblet i serie, hvor disse tre komponenter henholdsvis repræsenterer massen af det bevægelige system, stivheden af den fjedrende membran, højttalerens svingspole er fæstnet til, samt gnidningsmodstanden i systemet.

29 IRE: Institute of Radio Engineers, USA, i 1963 omdannet til Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE.

Ud fra diagrammet i artiklen konstruerede Erling og jeg et nyt transistoriseret udgangstrin til operationsforstærkeren i Mössbauer-opstillingen. Det hjalp! Nu kunne feedback-signalet fra transducer-højtaleren gøres betydeligt kraftigere, uden at der opstod oscillationer i systemet. Herefter var billedet af hastighedssignalet på oscillografen praktisk talt identisk med det lineært varierende output fra *waveform* generatoren. Figur 14 viser henholdsvis tidsforløbet af det lineariserede hastighedssignal og det resulterende Mössbauer-spektrum af en prøve bestående af rent  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (mineralet hæmatit), der er karakteriseret ved seks veldokumenterede, parvis symmetriske resonansdyk, som Jørgen Olsen benyttede til kalibrering af hastighedsskalaen ved optagelsen af Mössbauer-spektre for andre jernminerale.



Figur 14. Oscillografbillede af det elektronisk lineariserede hastighedssignal fra transducer-højtaleren med spidsværdierne  $\pm 12,5$  mm/sek benyttet til optagelse af det viste Mössbauer-spektrum for en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  absorber <sup>30</sup>.

\*\*\*

Om elektronikken, jeg havde konstrueret til Mössbauer-opstillingen på DR 1 skrev jeg en artikel til fagtidsskriftet *Nuclear Instruments & Methods*, hvor den udkom på tryk i foråret 1965 som min første internationale publikation <sup>31</sup>. At jeg ikke nøjedes med at beskrive dette udviklingsarbejde i form af et bidrag til den nummererede serie af engelsksprogede *Risø-Reports* med de karakteristiske gule omslag, hang sammen med, at jeg fra min lejlighedsvis kontakt med fremtrædende repræsentanter for Risø's eksperimentalfysikere, deriblandt P. Gregers Hansen og Jens Als-Nielsen, var blevet klar over, hvor vigtigt det var for såvel Risø's videnskabelige renommé som for den enkelte forskers publikationsliste at få antaget artikler til offentliggørelse i internationale tidsskrifter, hvor manuskriptet blev fagligt bedømt og muligvis pålagt tilretning i et såkaldt *peer review*, inden det slap igennem dette nåleøje. Men denne maksime vakte dengang stort set ingen genklang i elektronikafdelingen, hvor de fleste ingeniører kom fra stillinger i industrien (det gjaldt eksempelvis Mose) og generelt ikke var motiverede for at tilpasse sig universitære publikationsstandarder. Jens Rasmussen og de relativt få andre skrivende personer i afdelingen - det gjaldt også Jørgen Thomas - foretrak at præsentere resultaterne af deres arbejde på konferencer og symposier og ellers gøre brug af de gule Risø-rapporter som publikations-

30 Måletiden for dette 512-kanal Mössbauer-spektrum beløb sig til 16 timer, hvor der blev opsamlet  $\sim 1,85 \times 10^4$  tællinger pr. kanal i basislinjen for de seks resonante absorptionsdyk. For at forstørre disse blev Nuclear Data analysatoren indstillet til kun at vise cifrene efter decimalkommaet i den eksponentielle notation af kanal-tællertallene, hvilket giver basislinjens ender et lettere krøllet udseende på fotoet.

31 Som nævnt i underteksten til Figur 9 blev mit bidrag til IAEA symposiet *Standardization of Radionuclides* først publiceret i marts 1967 i bogen af samme navn.

medium<sup>32</sup>. En amerikansk elektroingeniør, Joseph Diamond, der senere blev professor ved et teknisk universitet i USA, var hidtil den eneste i afdelingen, der havde meriteret sig med tidsskriftsartikler. Nu fulgte jeg så trop i sporet, han havde betrådt.

I artiklen havde jeg krediteret Jens Rasmussen med et *acknowledgement* for at have givet mig ideen til at levere drivkraften i Mössbauer-opstillingen fra en forstærker med negativ udgangs-impedans. Jeg tog et af særtryk af artiklen med over til ham, hvilket fik ham til at komme med denne bemærkning (vi var stadig De's med hinanden): "Hvorfor vil De gå fysikerne i bedene i deres jagt på prestige, det passer ikke med den måde, vi publicerer på her i afdelingen". Det skal tilføjes, at Jens Rasmussen en halv snes år senere kom til at høste megen international anerkendelse for artikler, han var begyndt at publicere i fine fagtidsskrifter om sin forskning i sikkerheds- og uheldsanalyse og menneske-maskine interaktion.

Prestigejagt eller ej - jeg indsendte også en artikel til det velanskrevne engelske *Journal of Scientific Instruments* og fik den accepteret efter en enkelt forklarende tilføjelse til teksten. Jeg beskrev her en elektronisk termometersonde, som vi havde udviklet til monitoring af temperaturen af de to scintillationsdetektorer i "Minen". Vi havde nemlig observeret, at tælleallene i gamma-målekanalen varierede ikke så lidt i forsinket takt med temperaturen i laboratorielokalet. Denne ulempe, som måtte tilskrives temperaturfølsomheden af detektorimpulsernes højder på de to sammenkoblede PM-rørs anoder, havde især manifesteret sig den foregående sommer, hvor solindfaldet i de tidlige morgentimer gennem de tynde gardiner for de store vinduesfag gjorde lokalet kvælende varmt, inden Erling som den først ankomne fik vinduerne åbnet på vid gab.

Ideen til at konstruere en termometersonde, der kunne indsættes i "Minen" gennem et hidtil ubrugt indføringsrør, som var modstillet det større rør,  $4\pi$  tælleren blev indført gennem, fik jeg i en bog, *Orienterende elektroteknik*, skrevet af professor ved stærkstrømsafdelingen på DTH, dr.techn. Georg Weber, og udgivet af DTH i 1955. I den var der et afsnit om fjernmåling af ikke-elektriske størrelser implementeret med den teknologi, som dengang stod til rådighed for elektroingeniører. Fjernmåling af eksempelvis omløbstallet for en roterende aksel kunne således udføres ved at forsyne akslen med en kontakt, der konverterede omløbstallet til en impulsfrekvens, som let lod sig måle for enden af et kabel trukket frem til modtagerstedet. Dette måleprincip benyttede jeg mig af ved som grundelement for termometersonden at anvende en NTC termistor<sup>33</sup>, som blev indsat i den lukkede og afrundede ende af et tyndvægget, ti centimeter langt stålør af blyantstykkelse, som derpå blev forsejlet og kom til at indgå som den frekvensbestemmende elektriske modstand i en RC oscillator<sup>34</sup>, der var eksternt placeret i en lille metalboks og koblet til termistoren med et tyndt koaxialkabel. Tanken var så at føre det sinusformede signal fra oscillatoren hen til en ekstra Philips

32 Jens Rasmussen hørte til dem, der mente, at de gule Risø-rapporter var for konforme og i højere grad tegnede Risø end afdelingen udadtil, samt at det tog for lang tid at få dem udgivet. Han havde længe prøvet at overbevise direktionen og biblioteket om, at Risø også burde stå for mindre ambitiøse rapportudgivelser, der i stil med elektronikafdelingens interne arbejdsrapporter kunne indeholde ideer og resultater, som endnu ikke var fuldt gennemarbejdede, og som forfatterne kunne sende direkte til fagfæller i udlandet. Det lykkedes ham omsider at komme igennem med sit forslag med opbakning fra de andre afdelingsledere. De nye engelsksprogede Risø-M rapporter, der fik grønne omslag og var påført den pågældende afdelings navn på forsiden, figurerede første gang på publikationslisten i AEKs beretning for 1965-66 og blev efterhånden meget anvendte udgivelser, som jeg lejlighedsvis selv betjente mig af.

33 En NTC (Negative Temperature Coefficient) termistor er opbygget af sintrede metaloxider, som gør, at dens elektriske modstand falder tilnærmelsesvis eksponentielt med stigende forskel mellem dens temperatur og en referencetemperatur, som for termistoren valgt til termometersonden blev sat til 25 °C.

34 RC oscillator: En forstærker, der sættes i stabilt selvsving ved hjælp af positiv feedback tilført via et modstandskondensator netværk, som er bestemmende for oscillatorfrekvensen. Netværket, som termistoren i termometersonden indgik i, lineariserede frekvensens afhængighed af sondetemperaturen og var designet til at frembringe en frekvens på 500 Hz (herz) ved referencetemperaturen 25 °C. Ved sondetemperaturer i intervallet fra 5 til 45 °C udviste oscillatorfrekvensen en positiv temperaturkoefficient på 0,99% pr. grad.

scaler i instrumenteringen for "Minen" og lade den udskrive de registrerede tælleletal på hulstrimmel synkront med de tre andre scalere. Dermed burde det være muligt - via en udvidelse af mit GIER program til databehandling af tælleletal - at benytte tælleallene genereret af termometersonden til temperaturkorrigerings af tælleallene i gamma-målekanalen.

Så langt kom jeg dog aldrig, og den påtænkte anvendelse af termometersonden omtalte jeg slet ikke i min artikel. Jeg skrev den, fordi sonden formentlig havde mange andre potentielle anvendelser til frekvensbåret fjernmåling og digitalisering af temperaturer. Det fik jeg bekræftet gennem de mange postkort med et *request for reprint*, som jeg modtog i ugerne efter publiceringen af artiklen. Kortene, videresendt til mig af sekretæren på biblioteket, kom overvejende fra udenlandske forskningslaboratorier og elektronikvirksomheder men også fra astronomiske observatorier, hvor det sikkert var vigtigt at overvåge temperaturen af de følsomme optiske instrumenter.

\*\*\*

I midten af september 1964 fik Jørgen Thomas ved Jens Rasmussens mellemkomst besøg af professor i geologi ved Københavns Universitet, dr.phil. Henning Sørensen, og hans yngre nære medarbejder, mag.scient. i geologi, John Rose-Hansen. De var tilknyttet Institut for Petrologi<sup>35</sup> ved KU og havde et tæt samarbejde med Grønlands Geologiske Undersøgelse (GGU) om den geologiske udforskning af et stort bjergartskompleks i Sydgrønland, der rummer betydelige forekomster af sjældne grundstoffer. Her stod forekomsterne af uran i Kvanefjeld otte kilometer nordøst for byen Narssaq i centrum som en potentiel energiressource ved den eventuelle indførelse af kernekraft i Danmark. Det var baggrunden for, at GGU gennem flere år havde modtaget bevillinger fra AEK til prøveboringer på Kvanefjeld, og - i sommeren 1962 - sprængning af en mindre skakt ind i siden af fjeldet, hvorfra der blev hjemtaget 200 tons uranholdig bjergart til udvindingsforsøg i Risø's kemifdeling. Disse ting kunne man læse om i AEK's årlige beretninger, ligeledes at Kvanefjeld var skønnet at rumme næsten tre gange så meget thorium<sup>36</sup> som uran. Elektronikafdelingen havde for sit vedkommende ydet GGU måleteknisk assistance ved vurderingen af de radioaktive bjergarters geografiske udstrækning. Det skete gennem måleflyvninger foretaget med et gamma-følsomt såkaldt scintillometer udviklet af vores kollega i afdelingen, civilingeniør K.E. Neisig, og installeret i en helikopter af en laboratoriemekaniker, som deltog i GGU's ekspeditioner til Sydgrønland i 1961 og 1962.

Baggrunden for de to geologers henvendelse til afdelingen var et større fund af beryllium-holdige mineral-årer<sup>37</sup> gjort i sommerens feltarbejde på Taseq skråningen, et fjeldterræn vis-a-vis Kvanefjeld, på den anden side af Narssaq elvdal. De tillagde det høj prioritet at få udviklet et nukleart måleinstrument - et 'beryllometer' - til detektering af beryllium i felten. Måleprincippet var enkelt nok, bestående i, at man punktvis bombarderer det geologiske terræn med strålingen fra en kraftig antimon-124 gammakilde og registrerer de derved fraspaltede såkaldte fotoneutroner fra isotopen beryllium-9 (<sup>9</sup>Be)<sup>38</sup>. At metoden virkede, var påvist af engelske geologer, som havde fået konstrueret et beryllometer på et af de nukleare forsøgsanlæg i Storbritannien. Dette instrument var godt nok transportabelt men svært at bære, fordi den biologiske blyafskærmning for bestrålskilden gav det en vægt på 60 kilo. Henning Sørensens håb og forventning var, at vi i

35 Petrologi: En gren af geologien, der især omfatter studiet af såkaldte magmabjergarter og metamorfoserede bjergarter.

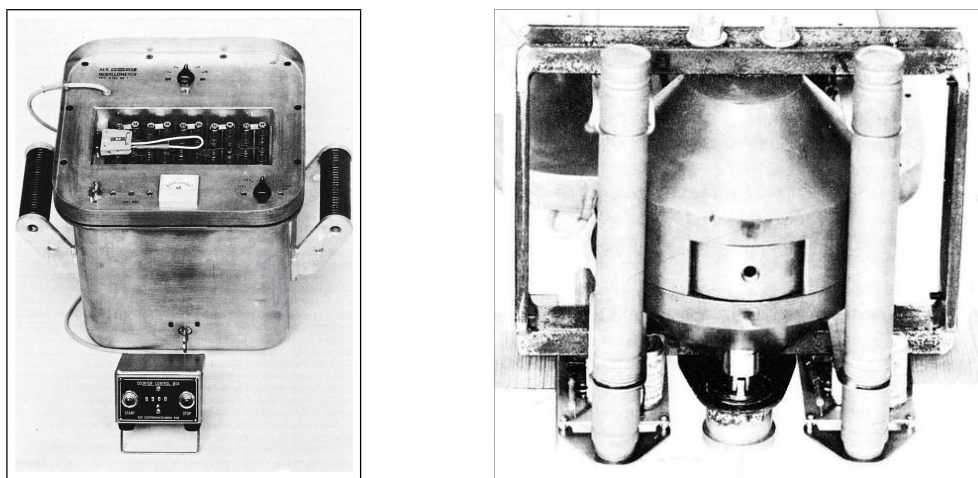
36 Thorium er ligesom uran et radioaktivt grundstof, som i en såkaldt formeringsreaktor kan omdannes til uran-233, der på samme måde som uran-235 let lader sig spalte med termiske (langsomme) neutroner. Kernekraft baseret på den samtidige udnyttelse af uran og thorium som energiråstoffer har indtil videre kun vundet beskedent udbredelse.

37 Beryllium: Et værdifuldt metal med mange tekniske anvendelser, deriblandt at fungere som reflektor for neutronerne frigjort ved spaltningen af uran i atomreaktorer.

38 Det udnyttes her, at antimon-124 (<sup>124</sup>Sb, T<sub>1/2</sub> = 60 dage) udsender gammafotoner med energien 1,691 MeV, hvilket er tilstrækkeligt til at spalte en <sup>9</sup>Be atomkerne i to helium-kerner (dvs. alfapartikler) og en hurtig neutron.

gruppen for isotopmåleteknik - i forlængelse af afdelingens tidligere engagement i luftbåren uranprospektering i omegnen af Kvanefjeld - kunne påtage os, i løbet af de kommende otte-ni måneder, at udvikle et beryllometer, der vejede betydeligt mindre end englændernes, så det kunne transporteres til fods på en ret vanskelig passabel fjeldskråning. John Rose fandt det desuden ønskeligt, at gruppens tekniske assistent tog med på ekspeditionen til Sydgrønland planlagt for sommeren 1965 som instruktør i betjeningen af instrumentet og som aktiv deltager i målearbejdet. "Der er du vel nok heldig", bemærkede Thomas henvendt til Erling i sin efterfølgende orientering af os andre i gruppen om denne nye opgave.

Det var oplagt, at Jørgen Thomas påtog sig at designe den mekaniske udformning af Risø-beryllometeret. Fra sit tidligere arbejde i fysikafdelingens dosimetrigruppe besad han viden om dimensioneringen af biologiske afskærmninger for stærke gammakilder og var fra eksperimenterne i reaktorhallen på DR 1 fortrolig med detektering af neutroner. Han udviste stor opfindsomhed ved som beholder for beryllometerets indre dele at anskaffe en rustfri 'madspand' magen til dem, frøken Thingstrup øste varme retter op af bag disken i Risø's kantine. På afdelingens værksted fik han fremstillet en strålingsafskærmning af bly <sup>39</sup> for en 100 millicurie (mCi) antimon-124 kilde, som isotoplaboratoriet leverede. Kilden var beregnet til indsætning i periferien af en cirkulær blyskive, der var excentrisk placeret inde i en konisk afrettet stationær blok af bly og kunne drejes 180° fra en afskærmende, aflåselig midterposition til en bestrålingsposition lige over instrument-beholderens bund. På siderne af beholderen blev der indskruet to bærehåndtag, til hvilke der kunne fæstnes et par 1 meter lange bærestænger til forskydning af beryllometeret mellem tætliggende målepunkter. De hurtige fotoneutroner fra spaltningen af beryllium-9 blev detekteret med to BF<sub>3</sub> proportionaltællere <sup>40</sup> anbragt på hver sin side af afskærmningsanordningen efter indstøbning af dem i et flere centimeter tykt lag paraffin, som gjorde neutronerne tilnærmelsesvis termiske ('modererede' dem). Udseendet af instrumentet og dets indre er vist i Figur 15.



Figur 15. Risø-beryllometeret med beskyttelseslåget aftaget og til højre instrument-beholderens komponenter set nedefra, henholdsvis den biologiske blyafskærmning med udboringshul i den drejelige del af denne for antimon-124 gammakilden og de to BF<sub>3</sub> proportionaltællere benyttet til registrering af fotoneutroner produceret med beholderen stående på en mineralisering af beryllium (billedet er taget inden tællerrørene blev omstøbt med paraffin som moderator for neutronerne).

39 Med 'bly' mener jeg antimonbly, en hård legering af 84% bly, 12% antimon og 4% tin, der i modsætning til rent bly lader sig bearbejde med spåntagende værktøjer og var meget anvendt på Risø til formgivning af afskærmningsanordninger.

40 I en BF<sub>3</sub> proportionaltæller er tællergassen borttrifluorid højt beriget i bor-10, der uhyre let absorberer termiske neutroner og derved spaltes en atomkerne af denne isotop i en lithium-7 kerne og en alfapartikel, som begge ioniserer tællergassen.

Da Erling var velbevandret i transistorteknik både fra sin oplæring i Forsvaret og fra de efterhånden mange elektronikkonstruktioner, han og jeg havde samarbejdet om at udvikle, overlod Thomas det til ham at konstruere den batteridrevne elektronik til forstærkning og tælling af impulserne fra BF<sub>3</sub> tællerrørene. Det var her af stor vigtighed for det første at forsyne instrumentet med en simpel impulshøjdediskriminator, der forhindrede den intense flux af gammafotoner fra bestrålskilden i at bidrage til tællingerne, og for det andet at fugtbeskytte de elektroniske komponenter med lak påført de færdige printkort på begge sider. Skulle der blive brug for at udskifte en komponent under brugen af beryllometeret i Grønland, var det en fordel, at Erling hjemmefra kendte instrumentets elektronik til mindste detalje. Thomas lagde stor vægt på, at beryllometeret skulle være nemt at betjene for GGU's geologer og satte Erling i gang med at fremstille en betjeningsboks, hvorfra man via et 2 meter langt kabel og brug af et stopur kunne starte og stoppe tællingerne og få dem akkumuleret i et fircifret elektromekanisk register. Selvom blyafskærmningen var formgivet til at veje så lidt som muligt, blev det et tungt instrument - 40 kilo kom det til at veje - og alligevel var der med gammakilden i afskærmningsposition et ret højt strålningsniveau på 100 millirøntgen i timen <sup>41</sup> på instrumentbeholderens overflade.

Afprøvningen af beryllometeret bidrog jeg til ved at registrere neutrontællingerne fra en lille forsegle metalcylinder fyldt med berylliumoxid (BeO), som jeg placerede i en serie målepunkter på instrumentbeholderens bundflade i forskellige vertikale afstande fra denne <sup>42</sup>. Målingerne viste, at instrumentet havde et cirkulært følsomt areal på cirka 40 cm<sup>2</sup>, og at tællehastigheden aftog til det halve med 14 mm luft mellem prøven og bundfladen. Denne skulle derfor så vidt muligt være i tæt kontakt med de beryllium-mineraliserede årer på Taseq skråningen. Til kalibrering af tællingerne registreret i felten fik Thomas tilvirket tre 20 × 20 × 5 cm armerede betonfliser indeholdende henholdsvis 0,1%, 0,5% og 1,0% BeO.



Figur 16. Erling Johannsen assisteret af to geologistuderende ved en måling med beryllometeret på Taseq skråningen overfor Kvanefjeld (foto: Torkild Lundgaard).

Beryllometeret blev af Statens Institut for Strålehygiejne godkendt til feltbrug i Grønland og sendt til Narssaq med skib i slutningen af maj 1965 sammen med en kasse reservedele og GGU's omfattende grej til sommerens geologiske aktiviteter i Sydgrønland. Årets felthold med John Rose

41 Måleenheden røntgen (roentgen, R) er et mål for strålingseksposering - et begreb, der ikke finder anvendelse længere og er blevet erstattet af begrebet strålingsdosis, hvortil er knyttet måleenheden Sievert (Sv, 1 Sv = 100 R).

42 Disse målinger foretog jeg med beryllometeret stillet med bunden i vejret på et bord bag muren af betonklodser, der ved indflytningen i bygning 110 var blevet etableret bagerst til venstre i laboratorielokalet (Figur 7), og som vi nu høstede gavn af til rumafskærmning af en kraftig gammakilde.

som leder og Erling som den teknisk ansvarlige for målingerne rejste sidst i juni til GGU's baraklejr i Dyrnæs ved kysten af Davisstrædet, godt seks kilometer nord for Narssaq. Ved sin tilbagekomst til Risø i slutningen af august kunne Erling berette, at der med bistand fra ekspeditionens geologistuderende var foretaget over tusind beryllometer-målinger på Taseq skråningen (Figur 16). Beryllometeret havde fungeret efter hensigten bortset fra, at Erling en enkelt gang måtte ty til sin beholdning af værktøj og reservedele for at udskifte en defekt transistor.

Med udviklingen af dette instrument havde gruppen for isotopmåleteknik for første gang leveret et konkret eksempel på opfyldelsen af det punkt i dens program, der handlede om konstruktion og anvendelse af "nukleare sonder" - en betegnelse for kernefysiske feltmåleinstrumenter foreslået af lederen af reaktorfysiksektionen og senere arvtager af Kofoed-Hansens professorat i reaktorfysik ved DTH, Poul L. Ølgaard.

\*\*\*

Kort før Erling rejste til Grønland, forlod Jørgen Thomas Risø og blev ansat hos professor K.H. Særmærk ved Fysisk Laboratorium I på DTH i Lundtofte, som under fagbetegnelsen "Fundamental metrologi" var dansk normallaboratorium for måling af fysiske størrelser og hjemsted for de danske kopier af normalmeteren og normalkilogrammet hos BIPM i Sèvres. At skulle sige farvel til Thomas, var vi andre tre oprigtigt kede af. For mit eget vedkommende havde jeg haft stort fagligt udbytte af det nære samarbejde med ham i lidt over tre år, først i fysikafdelingens daværende dosimetrigruppe og bagefter i den nye gruppe for isotopmåleteknik i elektronikafdelingen oprettet på hans initiativ og med ham som en leder, der havde givet mig stor frihed til selv at tilrettelægge mit arbejde. Hans videnskabelige indsats var i begyndelsen af denne periode rettet mod anvendelsen af bayesiansk statistik<sup>43</sup> til estimation af eksperimentelle størrelser, dvs. vurdering af den teoretiske nedre og øvre grænse for den "sande" numeriske værdi af et måleresultat. Denne statistiske metode gav et mere realistisk estimat af konfidensintervallet for små tællelæsninger frembragt af svage radioaktive kilder - såkaldt *low level counting* - end konventionel tællestatistik gjorde. Til præsentation på symposiet *Standardization of Radionuclides* havde han udarbejdet et *paper* om den komplicerede tællestatistik ved absolutmåling af radioaktiv kildestyrke foretaget med en  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstilling<sup>44</sup>. At Thomas også var en praktisk orienteret fysiker havde han vist ved sine uortodokse anskaffelser til laboratoriet - en sømine, et skibskronometer, en 'madspand' anvendt som instrumentbeholder.

Lis Vinther, der havde haft Thomas som sparringspartner siden deres tid sammen på den lineære accelerator, valgte kort tid efter hans fratræden at flytte til en ansættelse hos professor Hoffman-Bang ved Kemisk Laboratorium A på DTH<sup>45</sup>.

Da Jens Rasmussen efter Thomas' fratræden udpegede mig som leder af den decimerede gruppe, var det med et løfte om, at der hurtigst muligt ville blive oprettet en ny fysikerstilling i afdelingen. En genbesættelse af laborantstillingen kom ikke på tale, eftersom absolutmåling af radioaktiv kildestyrke næppe ville kunne fastholdes som forskningsemne efter tabet af det internationale forskernetværk, Thomas var med i. Behovet for, at Risø deltog i interkalibreringsmålinger, var

---

43 Bayesiansk statistik: Metode til estimering af de såkaldte parametre i en statistisk model under udnyttelse af den eventuelle forhåndsviden om værdierne, disse størrelser kan antage. Ved måling af radioaktiv kildestyrke vides det på forhånd, at estimatet for dennes nedre konfidensgrænse skal være et positivt tal eller nul.

44 Som deltager i symposiet fulgte Thomas og jeg ad på togrejsen til Wien i oktober 1966. Han fortalte mig, at han tidligere dette år - med en politimand som rejseledsager - var rejst med tog til Paris medbringende den danske meter-rigsprototype for at få denne genkalibreret mod den internationale normalmeter hos BIPM.

45 Efter nogle år vendte Lis Vinther tilbage til Risø og fik ansættelse i kemiafdelingen meriteret af en prisopgave om et kemihistorisk emne, hun havde besvaret og fået guldmedalje for.

desuden ikke så påtrængende længere, idet certificerede strålingskilder efterhånden var blevet kommercielt tilgængelige i udlandet med UKEA Amersham Laboratory og AB Atomenergi i Studsvik som to vigtige leverandører. Rent praktisk fik jeg i løbet af sommeren 1965 omdannet kemilokalet til kontor for den kommende nye fysiker i gruppen. Udstyret til præparering af tynde betakilder, herunder vakuumkammeret til pådampning af guld på undersiden af disse, blev overført til isotoplaboratoriet, og vores beholdning af glas og kemikalier returnerede jeg til kemiafdelingen.

\*\*\*

I begyndelsen af juli 1965 meddelte Jens Rasmussen mig, at han så perspektiver for afdelingen i at bygge videre på det samarbejde med GGU, der blev indledt med scintillometer-flyvningerne i kvanefjeldsområdet og genoptaget med udviklingen af beryllometeret. Han havde derfor skaffet sig en invitation fra GGU til at tilbringe en uge i Dyrnæs for ved selvsyn at opleve det geologiske terræn, som var genstand for AEKs engagement i udforskningen af det hidtil eneste fund af uran i Grønland. Med John Rose som guide aflagde han besøg på Kvanefjeld, hvor han traf Erling i færd med at foretage supplerende målinger med beryllometeret og fik demonstreret geologernes brug af primitive geigertællere i den løbende kortlægning af strålingsniveauerne på overfladen af bjergarterne. Ved sin tilbagekomst til Risø var han fuld af lovord om feltholdenes entusiasme for deres opgaver og den systematiske måde, de arbejdede på under ledelse af John Rose. Ved sin hjemkomst kvitterede Jens Rasmussen for GGU's gæstfrihed ved prompte at sende et antal Storno radiotelefoner op til Dyrnæs, så geologerne, der ofte befandt sig langt fra hinanden på Kvanefjeld, blev sat i stand til at kommunikere effektivt. Det var især vigtigt, havde han iagttaget, når det trak op til dårligt vejr og var på tide at komme ned fra fjeldet i samlet flok.

Fra det, Jens Rasmussen berettede om sine samtaler med John Rose i Grønland, forstod jeg, at GGU i høj grad savnede et feltgammaspæktrometer, som - i modsætning til, hvad en geigertæller formåede - kunne skelne mellem bidragene fra henholdsvis uran og thorium til gammastrålingen på overfladen af en radioaktiv bjergart. At opnå dette var særdeles ønskeligt, fordi forholdet mellem koncentrationerne af de to grundstoffer i kvanefjeldsbjergarterne kunne variere meget over korte afstande. Jens Rasmussen syntes, at afdelingen skulle imødekomme GGU ved at Erling og jeg påtog os at udvikle et batteridrevet bærbart gammaspæktrometer, hvilket burde være teknisk muligt, mente han, nu hvor transistorer havde afløst elektronrør i afdelingens elektronikkonstruktioner.

En anden opgave, der lå John Rose stærkt på sinde, fortalte Jens Rasmussen, var at få konstrueret en målesonde til logning af den totale gammastråling i borehullerne på Kvanefjeld, som aldrig var blevet logget, siden de blev lavet for adskillige år siden. Det var et par krævende udviklingsopgaver, især den første, som Jens Rasmussen forventede, at Erling og jeg ville tage fat på, så snart jeg var blevet enig med John Rose om designgrundlaget for de to nye måleinstrumenter efter sin tilbagekomst fra Grønland i begyndelsen af september. For underdirektør, dr.phil. C.F. Jacobsen, der som tidligere afdelingsleder i kemiafdelingen havde iværksat forsøgene med udvinding af uran fra Kvanefjeld, var det givetvis godt nyt, at Jens Rasmussen efter sin rejse til Grønland havde besluttet at inddrage elektronikafdelingen i de fortsatte feltundersøgelser af uranressourcerne. At de to udviklingsopgaver for mig blev begyndelsen til tyve års teknisk-videnskabelig indsats på det geologisk/geofysiske område, havde jeg ikke fantasi til at forestille mig.

-----

### Benyttede skriftlige informationskilder

- Løvborg, L. (1965). Velocity drive for Mössbauer experiments using an amplifier with negative output impedance. *Nucl. Inst. Meth.* **34** 307-310.
- Løvborg, L. (1965). Linear temperature-to-frequency converter. *J. Sci. Inst.* **42** 611-614.
- Løvborg, L. (1967). Accurate determination of the stability of  $\beta$ -proportional gas counters against variations in the energy threshold. *Standardization of Radionuclides* (IAEA, Vienna) p. 103-113.
- Hansen, J. & Løvborg, L. (1966). På spor af sjældne metaller i Sydgrønland. IV. Beryllium-  
efterforskning. *Tidsskriftet Grønland*, juli 1966, 243-256.
- AEK's årlige beretninger.

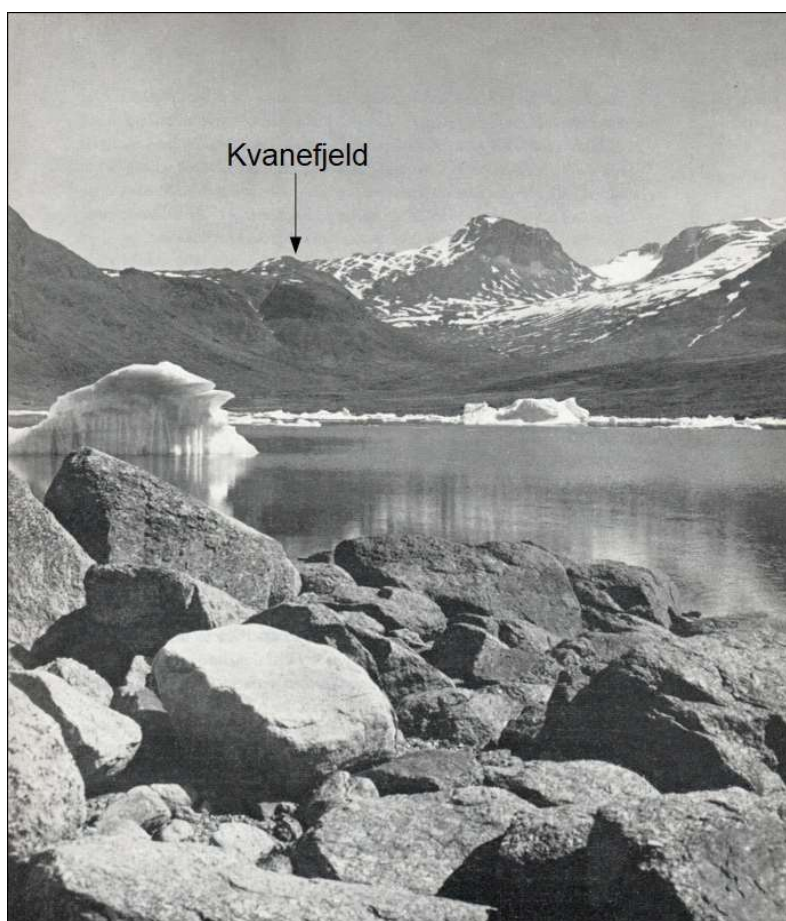
*En beretning i tre dele om mine lære- og pionérår i Risø's elektronikafdeling*

Leif Løvborg

Del 1: Eksamensprojektet (1961), side 1 - 13

Del 2: Isotopmåleteknik (1962-65), side 14 - 50

**Del 3: Kvanefjelds-årene (1966-69), side 51 - 104**



Uranforekomsten Kvanefjeld set henover Dyrnæs-bugten få kilometer nord for Narssaq (gl. stavemåde).

Billedkilde: Side 15 i Beretning om Atomenergikommissionens virksomhed i tiden 1. april 1971 til 31. marts 1972. Foto: Bjarne Leth Nielsen.

## Resumé af Del 3

Min første opgave i den nydannede gruppe for nuklear geofysik, som gruppen kom til at hedde, blev at udvikle et bærbart gammaspektrometer til støtte for GGU's kortlægning af uranforekomsterne i Kvanefjeld, der har som kendetegn, at de gennemsnitligt indeholder næsten tre gange mere thorium end uran. Disse to grundstoffer er begge radioaktive og frembringer hver for sig et gammaspektrum indeholdende karakteristiske fototoppe, som kan bruges til at skelne bjergarters indhold af uran fra deres indhold af thorium. I mit designkoncept for et gammaspektrometer beregnet til geologisk feltarbejde gjorde jeg som den første i afdelingen brug af analoge og digitale integrerede kredsløbskomponenter, der netop var sendt på markedet af et halvlederfirma i USA.

De indledende forsøg udført med instrumentet på Kvanefjeld viste, at det var nødvendigt at indsnævre gammadetektorens synsfelt betragteligt for at forhindre, at der i tællehastighederne på målestederne kom til at indgå et strålingsbidrag fra det omgivende terræn. Derved blev det samtidig muligt at bestemme instrumentets respons til enhedskoncentrationer af uran og thorium via målinger på to Risø-placerede beton-kalibreringsplatforme, der var tilvirket af cement iblandet kendte mængder uran og thorium og havde en diameter på 1 meter.

I den sidste feltsæson, jeg medvirkede i, blev der på Kvanefjeld udført over 1600 kalibrerede enkeltanalyser af uran og thorium. De gode erfaringer med integrerede halvlederkomponenter førte til konstruktion af to andre digitalt registrerende feltinstrumenter, henholdsvis en geigertæller, som fandt anvendelse i en statistisk undersøgelse af radioaktiviteten på Kvanefjeld, og et nyt 'beryllometer', der havde et betydeligt større detekteringsareal end det gamle.

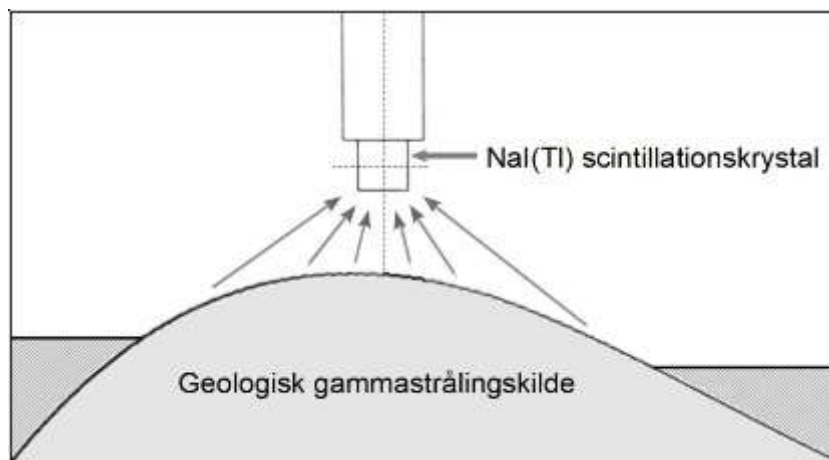
En særlig indsats i gruppen for nuklear geofysik blev rettet mod de mange prøveboringer udført på Kvanefjeld. Til måling af gammastrålingen i borehullerne udviklede vi en slank målesonde og byggede dernæst et laboratorie-gammaspektrometer til automatisk scanning af mere end fem kilometer indvundet borekerne. Derigennem blev der fremskaffet et omfattende datamateriale, der indgik i vurderingen af uranressourcernes størrelse, lødighed og rumlige fordeling.

I bjergartskomplekset, som Kvanefjeld er en del af, findes der andre værdifulde grundstoffer end uran, thorium og beryllium, deriblandt zirconium, niobium og rækken af sjældne jordarter i det periodiske system. Feltmålinger udført på mineraliseringer af disse metaller blev foretaget med en detektorprobe påmonteret en radioaktiv kilde, der exciterede fluorescensrøntgenstråling karakteristisk for metallernes atomnumre. Ved hjælp af en særlig teknik til filtrering af røntgenstråling blev proben gjort skarpt selektiv for et metal ad gangen.

-----

Jeg vil benytte de første 4½ sider af denne afsluttende Del 3 af min beretning til at give læseren et indblik i det strålingsfysiske grundlag for den geologiske anvendelse af gammaspektrometri til kortlægning af bjergarters indhold af naturligt forekommende radioaktive grundstoffer, de såkaldte radioelementer. Dem er der tre af: Uran, thorium og kalium. Mens det sidstnævnte grundstof udgør en væsentlig kemisk bestanddel af almindeligt forekommende bjergarter som fx granit, så optræder de to førstnævnte normalt i meget små koncentrationer, med mindre der er tale om bjergarter indeholdende mineraliseringer af uran og/eller thorium. Formålet med det bærbare gamma-spektrometer, som det faldt i min lod at konstruere, var som omtalt i slutningen af Del 2 at sætte GGU's feltgeologer i stand til kortlægge koncentrationerne af uran og thorium i overfladen af Kvanefjeld, den eneste faktuelle uranforekomst i Grønland. Her 'overdøver' strålingen fra disse to radioelementer strålingen fra kalium, som imidlertid har en naturlig plads i den følgende oversigt:

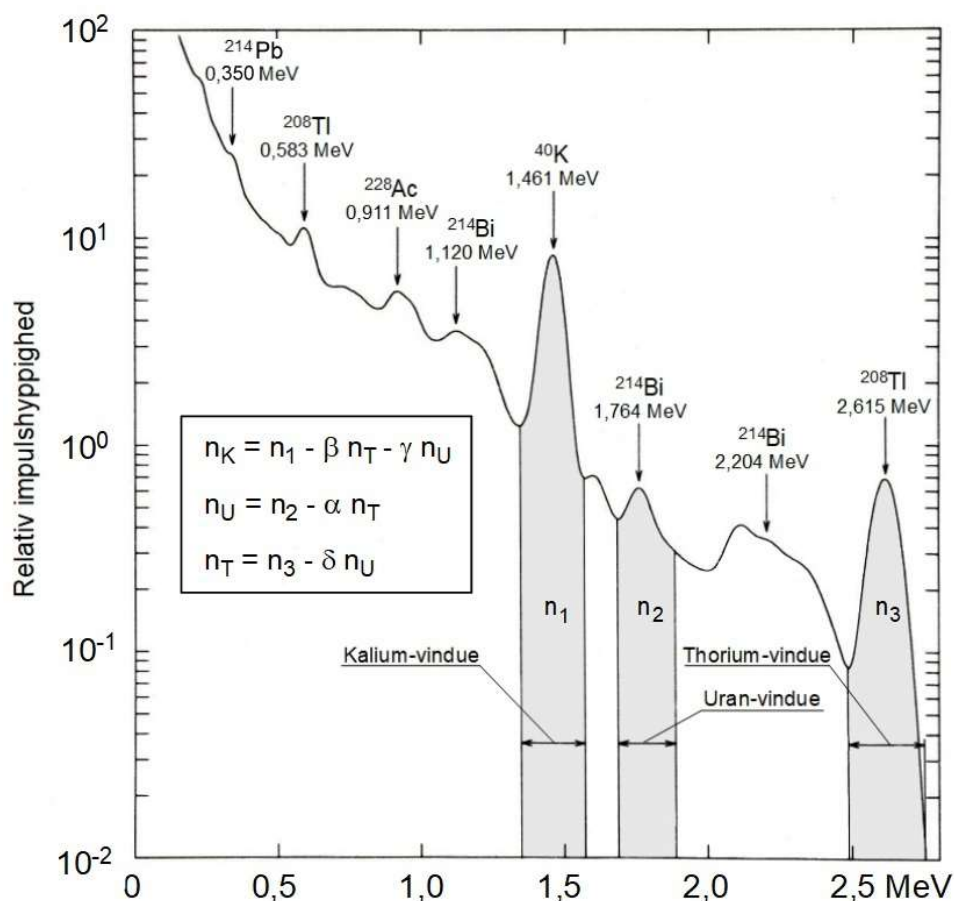
Kalium-40 ( $^{40}\text{K}$ ) udsender via sit henfald til argon-40 med halveringstiden  $T_{1/2} = 1,25 \times 10^9$  år gammafotoner med energien 1,461 MeV. Gammastrålingen fra uran og thorium har en meget mere kompleks oprindelse, nemlig som ledsageeffekter til den radioaktive omdannelse af uran-238 ( $^{238}\text{U}$ ,  $T_{1/2} = 4,47 \times 10^9$  år) og thorium (som er isotop-rent  $^{232}\text{Th}$ ,  $T_{1/2} = 1,41 \times 10^{10}$  år) til stabile blyisotoper gennem hver sin kæde af alfa- og beta-henfald <sup>1</sup>. I uran-238 henfaldskæden er isotopen bismuth-214 ( $^{214}\text{Bi}$ ) kilde til en stribe gamma-emissioner, hvoraf de fleste er relativt svage, hvortil kommer et strålingsbidrag fra bly-214 ( $^{214}\text{Pb}$ ) i den lave ende af energispektret. En af de mere intense  $^{214}\text{Bi}$  emittere er kendetegnet ved sin høje energi af 1,764 MeV. Denne emission har derfor stor gennemtrængningsevne, ligesom det gælder for 1,461-MeV emissionen fra  $^{40}\text{K}$ . Thorium henfaldskæden er hjemsted for to markante gamma-emittere, actinium-228 ( $^{228}\text{Ac}$ ) og thallium-208 ( $^{208}\text{Tl}$ ), hvoraf den sidstnævnte isotop bidrager med den højeste og dermed mest gennemtrængende fotonenergi repræsenteret i den terrestriske gammastråling, 2,615 MeV.



Figur 1. Målegeometri i NaI(Tl) spektrometri af den terrestriske gammastråling fra en bjergart, der bryder op gennem et dække af ikke-radioaktivt materiale.

I Figur 1 antages det, at den geologiske strålingskilde er en homogen bjergart indeholdende 3,4% kalium, 3 ppm (parts per million) uran og 12 ppm thorium, samt at den træder i dagen over et areal på 10-15 m<sup>2</sup> gennem et dække af materiale med forsvindende små radioelementkoncentrationer. Ved hjælp af en trefod, der ikke er vist i figuren, fastholdes midtpunktet af detektorkrystallen for en bærbar impulshøjdeanalysator i en position 10-15 cm over blotningens højeste punkt <sup>2</sup>.

- 1 Uran-235 er som uran-238 ophav til en henfaldskæde, men da uran-235 kun udgør 0,7% af naturligt uran og ikke giver anledning til gamma-emissioner med energier i MeV-området, bidrager denne isotop ikke mærkbart til strålingen fra geologiske kilder.
- 2 Af pladsmæssige grunde har jeg tegnet snittet gennem bjergarten i et målestoksforhold, der er betydeligt mindre end det, jeg har benyttet til skitsering af detektorkrystallen og hylstret for dens fotomultiplikatorrør (PM rør). Pilene repræsenterer den ringe del af strålingen, der tilfældigvis har retning mod krystallen.



Figur 2. Teoretisk eksempel på et spektrum af terrestrisk gammastråling. Fra de indrammede ligninger beregnes nettotællehastighederne  $\{n_K, n_U, n_T\}$  tilskrevet henholdsvis kalium ( $^{40}\text{K}$ ), uran ( $^{214}\text{Bi}$ ), og thorium ( $^{208}\text{Tl}$ ) ud fra vinduestællehastighederne  $\{n_1, n_2, n_3\}$ , der i princippet antages at være korrigeret for kosmisk og atmosfærisk baggrundsstråling.

Det resulterende gammaspektrum er vist i Figur 2<sup>3</sup>, hvor jeg har nummereret energivinduerne for fototoppene med energierne 1,461, 1,764 og 2,615 MeV i rækkefølgen 1, 2, 3.

I relationen mellem vinduestællehastighederne  $\{n_1, n_2, n_3\}$  og de resulterende nettotællehastigheder  $\{n_K, n_U, n_T\}$  indgår fire såkaldte stripfaktorer (*stripping factors*) betegnet  $\alpha, \beta, \gamma$  og  $\delta$  til bortskaffelse af interfererende strålingsbidrag. De vigtigste af disse og stripfaktorerne, de forårsager, er: (1) spredt  $^{208}\text{Tl}$  stråling detekteret i uran- og kalium-vinduet (henholdsvis  $\alpha$  og  $\beta$ ), (2) spredt og direkte  $^{214}\text{Bi}$  stråling detekteret i kalium-vinduet ( $\gamma$ ) og (3) en svag  $^{214}\text{Bi}$  emission detekteret i thorium-vinduet [ $\delta$ ]. Løsningen af de tre resulterende ligninger med hensyn til  $\{n_K, n_U, n_T\}$  er trivial, hvorefter de fundne talværdier kan konverteres til dermed ækvivalente radioelementkoncentrationer pr. vægtenhed af den geologiske kilde. Gammaspektrometrisk *in situ* analyse af bjergarters indhold af uran, thorium og kalium kræver altså kendskab til syv kalibreringskonstanter - fire stripfaktorer og tre konverteringsfaktorer for de "strippede" vinduestællehastigheder. Det samme gælder for gammaspektrometrisk kortlægning af større landområder med fly, hvor der imidlertid ikke kan ses bort fra dæmpningen i luften af gammastrålingen fra terrænet, og hvor der følgelig er behov for at påmontere luftfartøjet et radar-altimeter, som gør det muligt at korrigere vinduestællehastighederne registreret langs flyve-linjerne for variationer i afstanden til jordoverfladen.

<sup>3</sup> Figuren stammer fra en 13 sider lang artikel, "Response of 3"× 3" NaI(Tl) detectors to terrestrial gamma radiation", som lic.techn. Peter Kirkegaard fra Risø's regnemaskinegruppe og jeg publicerede i 1974.

De fleste bjergarter er hovedsageligt opbygget af grundstoffer i den lave ende af det periodiske system, eksempelvis silicium, aluminium, kalium og calcium samt oxygen, der næsten altid indgår i den molekyllære sammensætning af bjergartsdannende mineraler. Som følge heraf Compton-sprede de tre radioelementers primærfotoner langt hyppigere i en bjergart, end de bliver absorberet ved fotoelektrisk effekt og pardannelse <sup>4</sup>. Overalt i en geologisk kilde er der en eksponentielt aftagende sandsynlighed  $s = 1 - \exp(-\mu x)$  for, at en udsendt foton når at gennemløbe strækningen  $x$  centimeter, inden den absorberes eller støder på en elektron, der via Compton-effekten sender fotonen ind i en ny retning og samtidig fratager den noget af dens energi. Herved forhindres fotonen i at bidrage til den såkaldte ukolliderede gammaflux i luften over kilden, der betinger fremkomsten af fototoppe i dennes spektrum <sup>5</sup>. I sandsynligheden  $s$  indgår bjergartens lineære dæmpningskoefficient  $\mu$ , som aftager med godt 25% henover energiområdet fra 1,461 til 2,615 MeV. I en bjergart med vægtfylde 2,7 g/cm<sup>3</sup> er middelvejlængden  $1/\mu = 9,5$  cm for 2,615-MeV fotoner, hvoraf følger, at der skal knap 30 cm bjergart til for at slå 95% af disse ud af kurs og miste energi eller blive absorberet. Groft sagt ”kigger” man med et feltgammaskpektrometer nogle få decimeter ind i bjergarten.

Det er et karakteristisk træk ved geologiske kilder, at gammafotonerne emitteret i deres indre har stor sandsynlighed for at blive Compton-spredt adskillige gange i træk. Multipelt spredte fotoner, der når op til kildens overflade og fortsætter deres færd gennem luften, udgør en gammaflux, som i sig bærer et kontinuum af energier af samme karakter som Compton-kontinuet dannet i en NaI(Tl) detektor af en punktkilde. Blot sker det i langt større omfang og med en stærkt stigende intensitet nedefter i energi, således som det tydeligt fremgår af spektret i Figur 2. Den spredte gammaflux, der også omfatter fotoner tilbagekastet fra luften - såkaldt 'skyshine' - bidrager kraftigt til de totale tællehastigheder registreret med geigertællere og håndholdte NaI(Tl) scintillometre og er uheldigvis med til at forøge talværdierne af de tre stripfaktorer  $\alpha$ ,  $\beta$  og  $\gamma$  for et feltgammaskpektrometer.

Det kan ad matematisk vej vises, at de ukolliderede fluxkomponenter pr. vægtkonzentration radioelement til stede i en bjergart forholder sig omvendt proportionalt til bjergartens såkaldte massedæmpningskoefficient  $\mu_m$ , som er den lineære dæmpningskoefficient  $\mu$  divideret med bjergartens vægtfylde, og som afspejler antallet af orbitale elektroner pr. gram af bjergarten. Dette antal er definerende for en bjergarts foton-spredende egenskaber og er for et mix af forholdsvis lette grundstoffer indirekte givet ved, at for disse er der et næsten konstant forhold på 0,5 mellem deres atomnumre  $Z$  og deres atomvægte  $A$  <sup>6</sup>. Det bevirker, at  $\mu_m$  er omtrent den samme for langt de fleste bjergarter, hvilket gør, at gammafluxen i luften over en geologisk kilde praktisk talt ikke afhænger af dennes kemiske sammensætning. Kildens vægtfylde optræder ikke i kalibreringsligningerne for et feltgammaskpektrometer, idet der refereres til radioelement vægt-konzentrationer, ikke til de modsvarende volumen-konzentrationer.

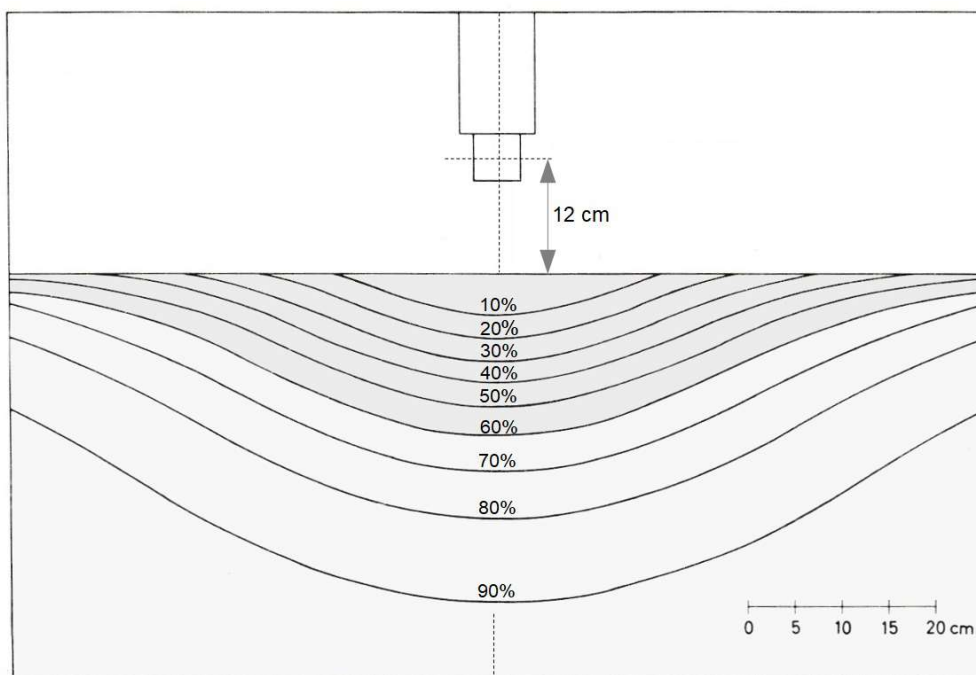
4 De tre grundlæggende mekanismer for gammafotoners vekselvirkning med et medium, fotonerne gennemtrænger - fotoelektrisk effekt, Compton-spredning og pardannelse - forklarede jeg i Del 1 i tilknytning til min introduktion af komponenterne i et NaI(Tl) impulshøjdespektrum af en monoenergetisk gamma-emitter: En fototop, et Compton-kontinuum og (for gamma-energieer større end 1,022 MeV) en eller to såkaldte escape-toppe.

5 Flux: Antallet af partikler (fotoner, neutroner, osv.), der i et sekund passerer gennem et areal på 1 kvadratcentimeter vinkelret på stråleretningen. Den såkaldte c-g-s måleenhed for flux er  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

6 Atomnummeret  $Z$  for et grundstof angiver, som alle fysikinteresserede vil vide, antallet af protoner i grundstoffets atomkerner. Den positive elektriske ladning af disse opvejes af den negative ladning bibragt af atomets orbitale elektroner, hvis antal derfor ligeledes er lig med  $Z$ . At forholdet mellem  $Z$  og atomvægten  $A$  meget nær er lig med 0,5 for lette grundstoffer ( $Z$  mellem 2 og ~30) skyldes, at deres atomkerner stort set indeholder lige mange protoner og neutroner, dvs.  $A \approx Z \times (1 + 1)$ . Undtagelsen fra denne regel er hydrogen (brint), hvis atomkerne er en enkelt proton, svarende til  $Z/A = 1$ . Det gør, at  $Z/A = 0,555$  for vand, hvilket er en 11% forøgelse af  $\mu_m$  relativt til  $\mu_m$  for et mineral som kvarts ( $\text{SiO}_2$ ).

I proportionaliteten mellem netto-vinduestællehastighederne  $\{n_K, n_U, n_T\}$  (Figur 2) og de respektive vægtekonzentrationer af kalium, uran og thorium i den geologiske kilde indgår faktoren  $\Omega/2\pi$ , hvor  $\Omega$  er rumvinklen <sup>7</sup>, som en bjergartsblotning 'ses' under fra midtpunktet af NaI(Tl) detektorkrystallen. Ved at indlægge et såkaldt sfærisk koordinatsystem i dette referencepunkt og matematisk integrere bidragene til den ukolliderede gammaflux fra det område af bjergarten, der afgrænses af rumvinklen  $\Omega$ , kan det vises, at  $n_K$ ,  $n_U$  og  $n_T$  ikke influeres af områdets relief og overfladeruhed, når blot målepunktet ligger over det omgivende areals højeste punkt. I praksis er der stor usikkerhed forbundet med at skønne  $\Omega$ , der afhænger af det indkredsede areals størrelse og facon. Dette kan der rådes bod på ved at påmontere detektorkrystallen en krave af bly, der fungerer som en såkaldt kollimator til opnåelse af en fast rumvinkel på bekostning af en nedgang i vinduestællehastighederne.

I den centrale del af et flere hundrede kvadratmeter stort sammenhængende blotningsområde holder den ukolliderede gammaflux sig konstant i højder op til flere meter over terrænoverfladen og kan ækvivaleres med fluxen over et plant, homogent og halvuendeligt kildemedium, der grænser op til et lufttomt halvuendeligt rum. Strålingen ind i dette er isotrop, dvs. ens i alle retninger, hvilket i den virkelige verden svarer til, at kilden detekteres i en målegeometri, hvor rumvinklen  $\Omega$  med god tilnærmelse kan sættes til  $2\pi$ . Figur 3 viser resultatet af fluxberegninger, jeg i sin tid udførte for et detektorpunkt placeret 12 cm over et hypotetisk thorium-kildemedium med vægtfylden  $2,85 \text{ g/cm}^3$ . De indtegnede skålførmede kurver er rotationssymmetriske omkring den lodrette akse gennem detektorpunktet og afgrænser sammen med kildemediets overflade de volumener i mediet, der henholdsvis bidrager 10, 20, 30,... 90 procent af 2,615-MeV gammafluxen i punktet.



Figur 3. Relative bidrag til 2,615 MeV gammafluxen i et detektorpunkt over et hypotetisk halvuendeligt og homogent kildemedium.

Hvis det mere realistisk antages, at antallet af thorium-atomer pr.  $\text{cm}^3$  af kildemediet varierer tilfældigt omkring en konstant middelværdi, kan det vises, at den relative standardafvigelse af gammafluxen er den samme som den relative standardafvigelse af antallet af thorium-atomer i voluminet, der afgrænses af 60% kurven i figuren og har en masse på flere hundrede kilogram. Det effektive kildevolumen i radioelement-analyse foretaget *in situ* er således langt større og dermed

<sup>7</sup> Det geometriske begreb rumvinkel er forklaret i Del 2, Note 2.

mere repræsentativt end vægten af de håndstykker, som geologer udkløver med deres hamre fra en bjergart og hjemtager til laboratorieanalyse. Fysisk prøvetagning i begrænset omfang efterfulgt af knusning, tørring, og kemisk analyse for U, Th og K af det indsamlede materiale er imidlertid altid på sin plads i brugen af *in situ* gammasppektrometri, og det er der især to grunde til:

(1) Radioelementkoncentrationerne målt i felten er i princippet "våde" koncentrationer, som er relateret til nedgangen i ukollideret gammaflux forårsaget af vand i mere eller mindre porøse bjergarters indre, jf. Note 6. Derfor er det kutyme at tørre de nedknuste prøver ved 105 °C, inden de analyseres og eventuelt anvendes til kalibrering af et feltgammasppektrometers vinduestælle-hastigheder.

(2) En kalibrering af uran-vinduestællehastigheden i cpm (*counts per minute*) pr. ppm U i bjergarten beror på antagelsen af, at der i denne er radiometrisk ligevægt mellem bismuth-214 og denne gamma-emitters initiale moderisotop, uran-238, dvs. at der i hver tidsenhed tilgår bjergarten lige så megen <sup>214</sup>Bi radioaktivitet, som der tabes ved den radioaktive omdannelse til den næste isotop i <sup>238</sup>U henfaldskæden, polonium-214. Opretholdelse af ligevægten afhænger især af, hvad der sker tre led tidligere i henfaldskæden, hvor mellemproduktet er radon-222 (<sup>222</sup>Rn), som er en isotop af ædelgassen radon med halveringstiden 3,82 dage. I porøse bjergarter og i bjergarter gennemtrængt af revner og sprækker er der risiko for, at nogle af radonatomerne diffunderer væk fra deres fødselspositioner og gennem overfladen af den geologiske kilde slipper ud i luften, som de opblandes i. Herved opstår der et underskud af <sup>214</sup>Bi i kildens øverste lag, dvs. den gammasppektrometrisk målte koncentration af uran bliver et tal, der er for lavt. Derfor er der tradition for at benytte skrivemåden 'ppm eU' for koncentrationer af uran målt *in situ*, hvor 'e' står for *equivalent*. En sidevirkning af radon-afgasning til atmosfæren er, at <sup>222</sup>Rn henfaldsprodukterne vedhæfter sig til aerosoler, hvorved svævende <sup>214</sup>Bi eller <sup>214</sup>Pb udvasket på jordoverfladen af regn er en potentiel kilde til øget baggrundsstråling på målelokaliteterne eller, for luftbårne gammasppektrometre, langs flyvelinjerne.

\*\*\*

Jeg tager nu tråden op fra slutningen af Del 2 og er dermed tilbage i august 1965, hvor jeg stødte på en bogtitel, der virkede appellerende på mig: *The Natural Radiation Environment*. Bogen, som Risø's bibliotek anskaffede i fast lån til mig, viste sig at dække over en omfattende samling *papers* fra et symposium afholdt i Houston to år tidligere om de geologiske og biologiske aspekter af naturlig radioaktivitet og stråling. I et af kapitlerne præsenterede geologiprofessor John Adams ved William Marsh Rice University i Houston og hans tekniske medarbejder Glenn Fryer et portabelt gammasppektrometer, formentlig det først publicerede af sin art. Med dette feltinstrument blev der foretaget en radiometrisk kortlægning af den såkaldte Conway granit i staten New Hampshire, som er karakteriseret ved at indeholde omkring 60 ppm thorium. Detektorkrystallen, der havde dimensionerne 76 mm dia. × 76 mm og var påsat en blyring, der forhindrede detekteringsrumvinklen i at overstige 2π i det kuperede terræn, befandt sig i hoftehøjde nederst i et rygsækstativ. Til dette var fæstnet en brystsele til fastgørelse af en transistoriseret én-kanal analysator, hvor målekanalen successivt kunne indskydes på de tre karakteristiske fototoppe fra <sup>208</sup>Tl, <sup>214</sup>Bi og <sup>40</sup>K med visning af tællertallene på et elektromekanisk register. Geologen, der bar denne oppakning, udførte tællingerne på feltlokaliteterne i stående stilling, og tællehastighederne blev efterfølgende omregnet til radioelementkoncentrationer gennem indsamling af stenprøver og efterfølgende kemisk analyse af disse i et improviseret feltlaboratorium. Der var her tale om et pionérarbejde, der viste, at gammasppektrometrisk *in situ* analyse udført til fods faktisk lod sig gøre.

For mig blev det et incitament til at konstruere et feltgammasppektrometer til overflademåling af de betydeligt større koncentrationer af både thorium og uran i kvanefjeldsbjergarterne. Eftersom de ledsagende stærkt forhøjede strålingsniveauer måtte påregnes at maskere fototoppen fra <sup>40</sup>K, skulle instrumentet i princippet fungere som et to-vindues U-Th sppektrometer, hvilket reducerede antallet af

kalibreringsligninger fra 3 til 2. Jeg regnede med, at en standard NaI(Tl) detektorkrystal af dimensionerne 51 mm dia. × 51 mm ville være stor nok til at levere passende høje vindues-tællehastigheder og gik ud fra - noget letsindigt som det senere skulle vise sig - at man kunne spare en tung blyring indsat omkring krystallen ved at holde denne placeret tæt på terrænoverfladen, som i Figur 3. En særlig ting at tage i betragtning var de vejræssige forhold på Kvanefjeld. Erling Johannsen havde ved sin nylige hjemkomst fra Grønland berettet, at lufttemperaturen oppe på plateauet kunne ændre sig ti grader i løbet af en arbejdsdag i felten, og det ville med en scintillationsdetektor frit eksponeret til vind og vejr givetvis resultere i, at 2,615 og 1,764 MeV fototoppene ville forskubbe sig i forhold til et thorium- og et uran-vindue med fast indstillede elektroniske grænser. Herved ville der opstå målefejl, som ikke uden videre lod sig opdage.

Derfor valgte jeg at designe en én-kanal analysator, der kunne bruges i et manuelt betjent scanningspektrometer (eng. *scaler spectrometer*) til gradvis forskydning af en smal målekanal nedefter i gammaspæktret i lige store trin fra en position til højre for den næsten fritstående 2,615 MeV fototop til en position til venstre for 1,764 MeV fototoppen (jf. Figur 2). Over bjergarter beriget i thorium ville der herved fremkomme et spektrum, hvis energiskala er fastlagt ud fra kanalpositionen for 2,615 MeV toppen. Gennem den således opnåede energikalibrering af hvert spektrum for sig kan der i spektrene, ræsonnerede jeg, indlægges to tællevinduer med faste energigrænser udtrykt i MeV, ét for thorium og ét for uran. Derved skulle det i princippet lade sig gøre at kompensere for temperaturfølsomheden af detektorens fotomultiplikatorrør (PM-rør). Jeg glemte helt, at jeg i mit første år som ingeniør i afdelingen havde overbevist min daværende chef (Mose) om, at scanningspektrometri er besværlig og tidsrøvende, og at fremtiden lå i anvendelsen af multikanalanalysatorer til optagelse af spektre. Men den betragtning havde dengang ikke noget teknisk grundlag at bygge på uden for laboratoriets fire vægge, og så var der kun scanningsmetoden at falde tilbage på ved spektrometri foretaget under åben himmel.

I mit designkoncept for én-kanal analysatoren støttede jeg mig i udstrakt grad på en serie analoge og digitale integrerede kredsløbs-elementer, der for nylig var blevet sendt på markedet af Fairchild Semiconductor International i USA. En særlig relevant komponent var spændingskomparatoren  $\mu\text{A} 710$ , en DC (*direct current*) forstærker, der afgav et signal, når spændingsforskellen mellem de to indgangsterminaler oversteg nul inden for en tolerance på nogle få millivolt, den såkaldte offset-spænding. At elementet var monolitisk<sup>8</sup> indebar den fordel, at følsomheden af begge signalindgange udviste ens temperaturafhængighed, således at offset-spændingen ikke varierede med omgivelsestemperaturen. Et  $\mu\text{A} 710$  element åbnede derfor mulighed for at bygge en meget stabil impulshøjdediskriminator. Ved at forbinde to sådanne i anti-koincidens med hinanden<sup>9</sup> ved hjælp af et  $\mu\text{L} 914$  såkaldt *gate* element fremkom en meget enkel og traditionelt fungerende basal én-kanal analysator. Ved kun at indkoble dennes nedre diskriminator i impulstællingerne og indstille den til en lav tærskelenergi på omkring 0,1 MeV ville det færdige instrument også kunne tjene som data-registreringsenhed for borehulssonden, som Erling og jeg også havde påtaget os at konstruere med forventet bistand fra afdelingens mekaniske værksted i bygning 109.

\*\*\*

Da jeg i september som aftalt med Jens Rasmussen ringede til John Rose, inviterede han mig til at mødes med ham i Institut for Petrologi på Mineralogisk Museum i Øster Voldgade. Det var første gang, jeg fik lejlighed til at indlede et nærmere samarbejde med en forsker ved en universitetsinstitution, endda på et fagområde og med et virkefelt, der adskilte sig meget fra mine hidtidige engagementer på Risø. John og jeg var lige gamle på nær en måned og kommunikerede godt

8 Monolitisk: Ordet refererer til den fælles silicium-chip, som de enkelte transistorer i de integrerede Fairchild kredsløbs-elementer var udfældet på, og som var indkapslet i et 8,9 mm dia. × 6,3 mm såkaldt TO-5 metalhus, hvorfra der udgik et sæt ledningstråde til fastlodning af elementerne på et printkort.

9 Jf. Del 2, Note 7.

sammen, hvilket jeg allerede havde erfaret fra min kontakt med ham under den afsluttende laboratorieafprøvning af beryllometeret beskrevet i Del 2. John indledte vores møde med at præsentere mig for et geologisk oversigtskort over det såkaldte Ilímaussaq kompleks, navngivet efter det højeste fjeld i området (1390 meter) og mod nord afgrænset af Kvanefjeld. Kortet er vist i Figur 4 på næste side ledsaget af en forklarende tekst, hvor jeg efter bedste evne har sammenfattet, hvad der står om områdets særprægede geologi i publikationer, jeg har været medforfatter af sammen med John og andre geologer.

Om de radioaktive mineraler fortalte John, at de omfatter steenstrupin (opkaldt efter geologen K.J.V. Steenstrup, 1842-1913), uranberiget monazit samt thorit, og at de sammen med uran udfældet som pigment udgør kilderne til radioaktiviteten af lujavrit, værtsbjergarten for uranressourcerne i Kvanefjeld. I kemiafdelingen på Risø var der i Emil Sørensen's gruppe, som stod for forsøgene med at ekstrahere uran fra lujavrit, udført et stort antal uran-thorium analyser af de 200 tons lujavrit, der som nævnt i Del 2 blev hjemtaget i 1962 fra etableringen af en kort horisontal mineskakt øverst på sydskråningen af Kvanefjeld. Den store mængde materiale udsprængt fra skakten havde i middel vist sig at indeholde 575 ppm uran og 1920 ppm thorium<sup>10</sup>. Det tilgrænsende markant radioaktive område af kvanefjeldsplateauet, af geologerne kaldet "Mineområdet", dækker et areal på omkring 50.000 m<sup>2</sup>. De største koncentrationer her - cirka 3000 ppm U og 13000 ppm Th - er fundet i migmatit<sup>11</sup> dannet på steder, hvor hurtigt størknet lujavrit er i kontakt med vulkanske bjergarter og sandsten, der udgør resterne af den oprindelige dækflade over de smeltede stenmasser, jf. underteksten til Figur 4.

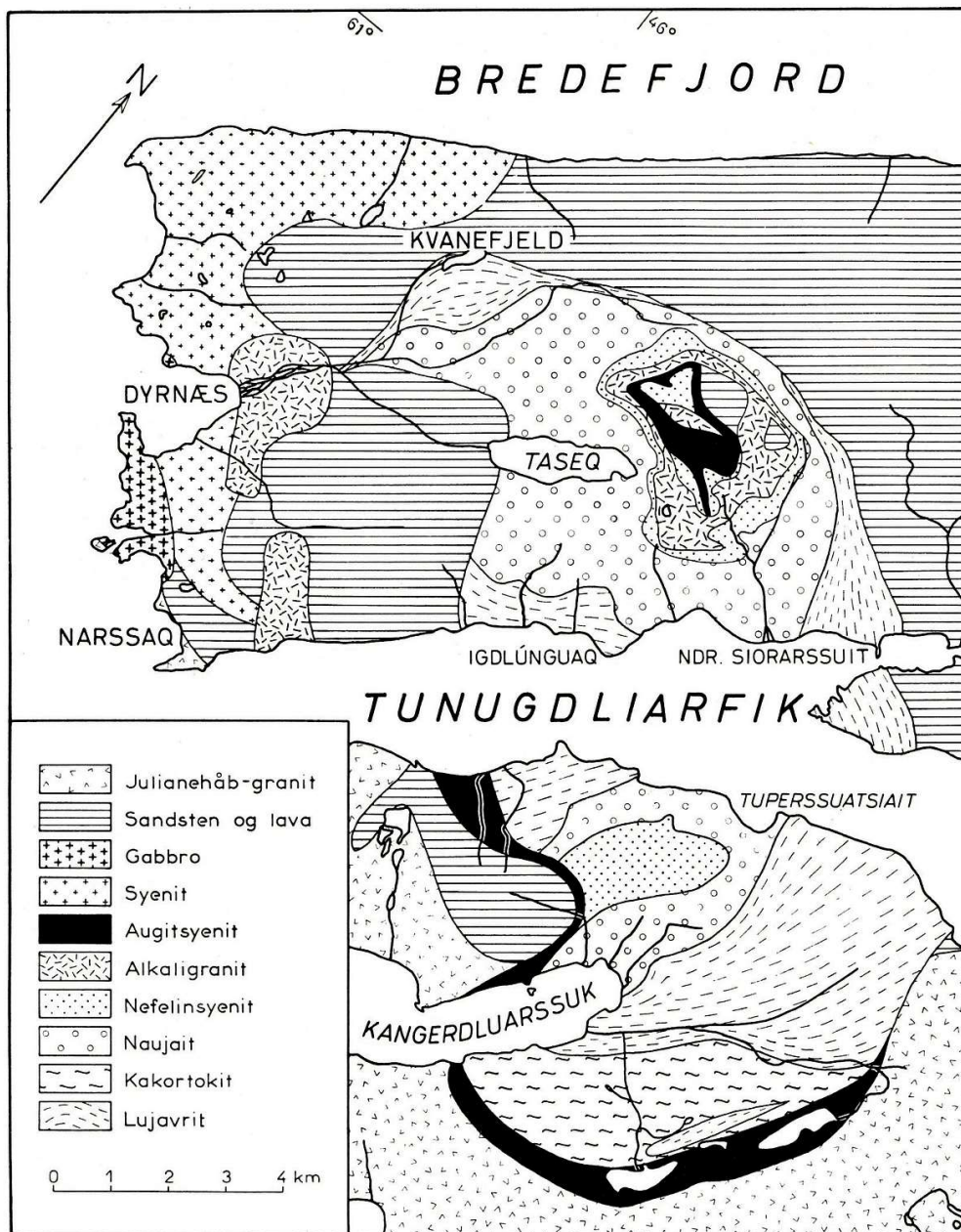
Johns vision var at benytte det feltgammaspæktrometer, der var ved at tage form i mit hoved, til fremstilling af radiometriske kort af de geografiske fordelinger af uran og thorium i udvalgte arealer på kvanefjeldsplateauet samt at jævnføre disse kort med geologiske kort af arealerne. Brugen af scanningsgammaspæktrometri havde John ingen indvendinger imod, selvom målingerne ville blive tidskrævende, og at der ville behøves studentermedhjælp til det omfattende regnearbejde involveret i efterbehandlingen af spektrene. Dette ville bestå i individuel energikalibrering af spektrene efterfulgt af numerisk integration af kanal-tælle tallene udgrænset af 2,615 og 1,764 MeV fototoppene.

Baggrunden for GGU's ønske om at få udviklet en borehulssonde, forklarede John, var de geologiske profiler, som professor Henning Sørensen og han var i gang med at opstille for de mere end 4000 meter borekerne indvundet ved prøveboringerne på Kvanefjeld og flere andre steder i Ilímaussaq komplekset. Borekernerne lå nedskåret til én-meter lange sektioner i flade kasser, der stod opmagasineret i en garage ved siden af Risø's brandstation. Dybderne i borehullerne, som kerne-sektionerne stammede fra, var med mellemrum påskrevet skillerummene i kasserne, men det var ikke altid godt nok til præcist at lokalisere stederne, hvor diamantboret havde gennemskåret to hinanden tilgrænsende bjergarter med hvert sit karakteristiske indhold af uran og thorium. Johns tanke med borehulssonden var at identificere ændringer i strålingsniveauet henover sådanne geologiske kontakter og fastlægge afstanden ned til dem ud fra længden af sondekabel ført ned i borehullerne. Jeg foreslog, at vi til dette enkle formål passende kunne forsyne den bærbare én-kanal analysator med et count rate meter og bruge dette til at vise tællehastighederne i hullerne. De fleste af de 36 borehuller var 50 mm i diameter og fra 100 til over 200 meter dybe, mens nogle få kun var 28 mm i diameter og 35 meter dybe. Hullerne var i reglen vandfyldte, og et stykke nede var de ofte tilstoppet af is eller nedfaldne sten. John syntes, vi skulle gribe opgaven forsøgsvis an og i første omgang nøjes med at konstruere en sonde, hvis kabel var cirka 80 meter langt.

---

10 Det samlede Mineområde er senere anslået til gennemsnitligt at indeholde 310 ppm U og cirka 800 ppm Th.

11 En geologisk fællesbetegnelse for blandingsbjergarter.



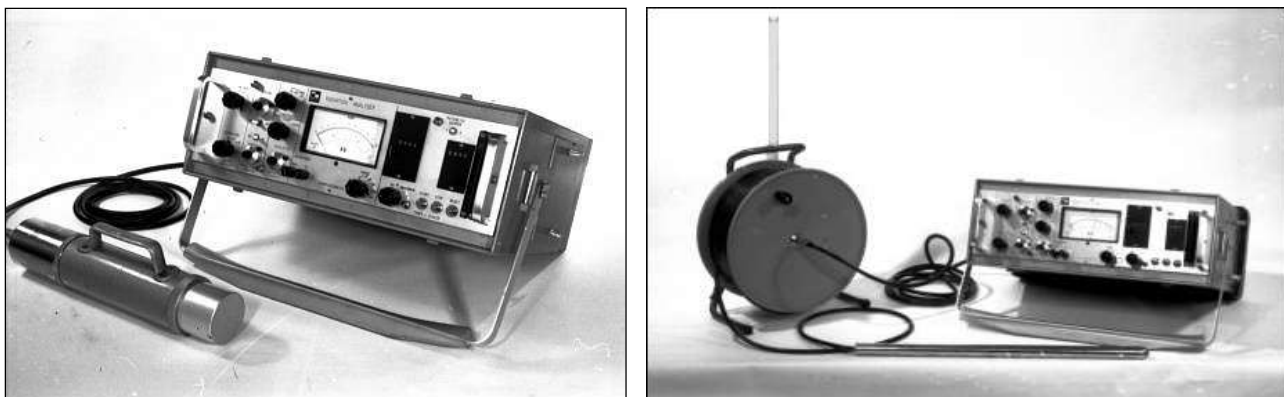
Figur 4. Ilímaussaq komplekset i Sydgrønland blev dannet af smeltede stenmasser (magma), der trængte op i jordskorpen for omkring en milliard år siden. På overfladen størknede magmaet som lava, der sammen med sandsten dannede et tag over magmaet dybere nede. Dette størknede i løbet af årmillioner til bjergarter, bl.a. naujait og kakortokit, med et stort indhold af alkalimetaller og et lavt indhold af kvarts. De efterlod en restsmelte, der var beriget i sjældne grundstoffer. Værtsbjergarten for uranforekomsten i Kvanefjeld, lujavrit, er opstået af denne restsmelte, som i tilgift til sit indhold af uran og thorium er gennemtrængt af mineraliseringer af de såkaldte sjældne jordarters metaller. På skråningen mellem Narssaq elvdal og Taseq søen findes mineral-årer, der udfylder revner og sprækker i sidebjergarten naujait og er beriget i beryllium-mineralet chkalovit, som er bærer af 11-13% ækvivalent berylliumoxid (BeO). I den sydlige del af komplekset er kakortokit værtsbjergart for store forekomster af mineralet eudialyt, der indeholder omkring 10% zirconium og 0,5% niobium.

Kilde: GGU.

Det sidste emne, John bragte på bane, var sommerens erfaringer med beryllometeret, i det følgende kaldet beryllometer I. Han kunne godt tænke sig at få konstrueret et beryllometer II, hvor der blev taget hensyn til, at beryllium-mineralet chkalovit er hvidt og dermed vanskelig at skelne visuelt fra den lyse sidebjergart, naujait (jf. underteksten til Figur 4). Det var et incitament til at gøre beryllometer II følsomt til fotoneutroner over det meste af dets bundflade, således at påvisningen af chkalovit-krystaller ikke var kritisk afhængig af instrumentets nøjagtige placering ved scanning for beryllium i de mineraliserede årer på Taseq skråningen. Dette kunne opnås ved at erstatte den punktformede gamma-bestrålskilde i beryllometer I med en lineært udstrakt kilde og brug af længere neutron-tællerrør. Det var endvidere ønskeligt at få vægten af blyafskærmningen for bestrålingsanordningen bragt ned, også selvom strålingsniveauet på instrumentbeholderens sideflader derved ville stige noget. Så her forelå der endnu en udviklingsopgave. John forventede dog ikke, at vi på Risø allerede i den næste feltsæson kunne stå klar med pålideligt fungerende prototyper af henholdsvis et feltgammaspæktrometer, en borehulssonde og et beryllometer II. Vi aftalte, at der i august 1966 afsattes et par uger til afprøvning af de nye instrumenter i Grønland, og at der bagefter blev afsat tid til eventuelle forbedringer af dem, inden de blev taget i brug til systematisk målearbejde i feltsæsonen for 1967.

\*\*\*

Når det på godt trekvart år lykkedes Erling Johannsen og mig at konstruere en kompakt én-kanal impulshøjdeanalysator udstyret med højspændingsgenerator, lineær impulsforstærker, regulerbar kanalposition og -bredde, elektronisk/elektromekanisk dekadetæller og timer samt count rate meter, var det ikke alene, fordi jeg i vidt omfang baserede konstruktionen på de nye Fairchild integrerede kredsløbs-elementer og derved opnåede en markant reduktion af udviklingstiden og en stor besparelse i forbruget af transistorer og passive elektroniske komponenter, især modstande. Det talte i høj grad med, at Jens Rasmussen sørgede for, at fremstillingen af printkort og et kabinet med betjeningspanel blev overdraget A/S Danfysik i Jyllinge, som modtog ordre på at bygge to eksemplarer af instrumentet. Figur 5 viser den færdige analysator tilsluttet henholdsvis spektrometridetektoren udstyret med en 51 mm dia.  $\times$  51 mm NaI(Tl) krystal og sonden til gammalogning af borehuller, sidstnævnte konstrueret i samarbejde med værkfører Peiding på det mekaniske værksted.



Figur 5. Én-kanal analysatoren konfigureret som henholdsvis et bærbart scanningsgammaspæktrometer og som dataregistreringsenhed for borehulssonden, der via et mellemkabel kunne forbindes med 80 meter sondekabel oplagret på en tromle, som det skulle afvikles fra, inden sonden blev nedsænket i et borehul. Et lodret plastrør påmonteret tromlen blev benyttet til parkering af sonden. Spændingskilden for analysatoren og de to detektorenheder var en Ni-Cd batteripakke, der vejede 4,6 kg og kunne udtages til genopladning fra sin plads i højre side af analysatorens kabinet. Med batteripakken indsat vejede analysatoren 23,5 kg. Til transport af udstyret i felten fremstillede afdelingens værksted et sæt rygsækstativer.

Til venstre for det centralt placerede viserinstrumentet på analysatorens forplade var der over hinanden monteret to mini-helipotmetre <sup>12</sup>, hvoraf det nederste var til indstilling af målekanalens position. Det øverste definerede den faste kanalbredde valgt til trinvis scanning af spektre. Et tredje helipotmeter blev benyttet til indregulering af højspændingen for den tilsluttede strålingsdetektor. Viserinstrumentet skulle primært fungere som et count rate meter, men det kunne også bruges til fremvisning af højspændingen. Ellers var analysatoren grundlæggende et digitalt måleinstrument baseret på to serielt forbundne éncifrede scalere til registrering af et tællertals to mindst betydende cifre. Disse blev fremvist i de to sektioner af et lodret lysdisplay, der sad yderst til højre på analysatorens forplade og var forsynet med ti små glødelamper, hver repræsenterende et ciffer. Når ciffervisningen under en tælling skiftede fra 99 til 00, blev den resulterende mente på 1 overført til et elektromekanisk tælleregister til venstre for lysdisplayet, således at tællertallene blev aflæst som en kombination af seks cifre, de forreste fire synliggjort på det elektromekaniske registers cifferhjul og de bagerste to vist som lysende tal.



Figur 6. Printkort med komponenterne for den ene af analysatorens to éncifrede scalere (dekadetællere), som var opbygget af Fairchild integrerede *Micrologic* kredsløbelementer, henholdsvis den såkaldte flip-flop  $\mu$ L 926 (med ti ben) og *gate* elementet  $\mu$ L 914 (med otte ben). De ti transistorer i den forreste række styrede tændingen og slukningen af glødelamperne i lysdisplayet på analysatorens forplade.

Start, stop og reset af impulstællingerne blev udført med tre trykknapper nederst til højre på analysatorens forplade. Efter udløbet af en tælling blev lampedisplayet tændt automatisk, og det blev slukket igen for at spare strøm, når man trykkede på reset-knappen, der samtidig bevirkede, at det elektromekaniske tælleregister blev nulstillet via et relæ. Indstillingen af analysatorens timer blev foretaget ved at dreje på cifferhjulene i et elektromekanisk nedtællingsregister, som var tilsluttet en frekvensdeler, der omformede sinussignalet fra en 100 Hz oscillator til sekund-impulser. Frekvensdeleren var ligesom de to elektroniske scalere opbygget af de integrerede kredsløbs-elementer  $\mu$ L 926 og  $\mu$ L 914 (Figur 6), hvilket gik nemt takket være diagramanvisningerne i Fairchild's *Micrologic Handbook*.

Det gik knap så nemt at designe og fremstille et prøveeksemplar af analysatorens højspændings-generator. Vi udnyttede her Erlings erfaring fra beryllometer I med en højspændingstransformator, hvor vindingerne på primær- og sekundærsiden var opspolet på en ferritkerne. Sekundærsiden af transformatoren for analysatoren krævede mange hundrede vindinger af tynd, lakisoleret kobbertråd, hvorfra der med en 1 kHz oscillator tilsluttet primærsiden kunne udtages en vekselspænding på

12



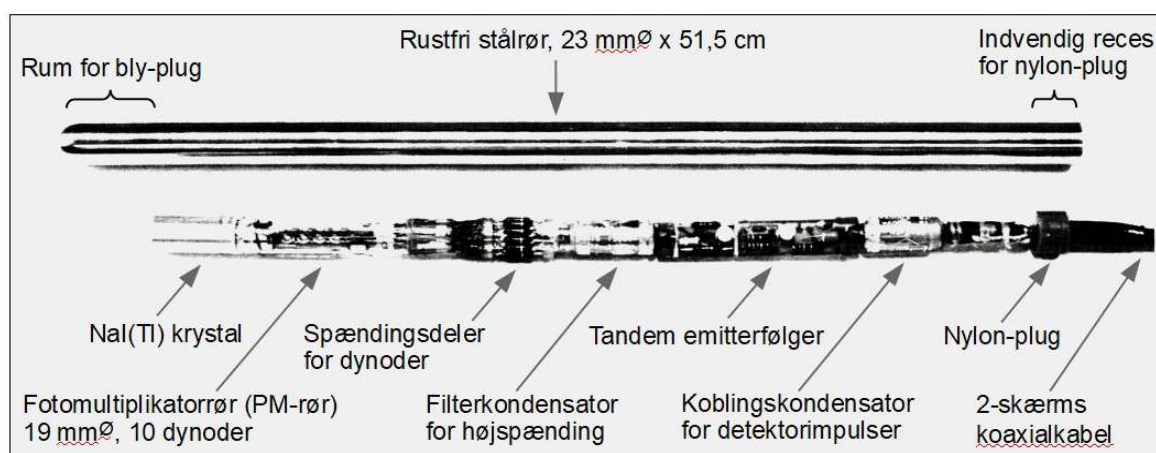
Som nævnt i Del 1 er et helipotmeter (forkortelse af helipotentiometer, eng. *rotary potentiometer*) en variabel elektrisk modstand lagt op som en spiral i kontakt med en forskydelig metalarm, som er styret af en låsbar skrueknop. Denne kan drejes op til 10 gange rundt og indstilles meget præcist på en findelt stregskala. Illustrationen viser forsiden af et helipotmeter til indbygning i elektroniske laboratorieinstrumenter. Det er her indstillet til 1,52 såkaldte skaladele ud af 10,00 mulige. I miniatureudgaven af én-kanal analysatorens tre helipotmetre var afstanden mellem delestregerne sat op fra 0,01 til 0,02 skaladele. Billede: RS Components Danmark.

op til 2 kilovolt (kV), som blev ensrettet med en diode og udglattet med et elektrisk filter. Forstærkningen i PM-røret for en NaI(Tl) detektorkrystal var imidlertid langt mere følsom for små variationer i højspændingen end de to BF<sub>3</sub> proportionaltællere i beryllometer I. Udover at give mulighed for justering af højspændingen til en stabil værdi i området fra 0,5 til 2 kV skulle højspændingsgeneratoren levere en effekt på omkring 100 mW til spændingsdeleren for PM-rørets dynoder<sup>13</sup>. Løsningen var at bestykke transformatorens primærside med to krafttransistorer koblet i tandem og styre strømmen gennem dem med et feedback kredsløb, hvor referencespændingen blev leveret af en såkaldt zenerdiode.

Alt i alt endte analysatoren med at blive en kompliceret elektronisk konstruktion, som havde været dyr at udvikle i forbrug af komponenter og arbejdsindsats hos Danfysik. Jens Rasmussen indrømmede senere, at han på et tidspunkt havde været urolig for, om det med min store satsning på et design baseret på helt nye halvlederkomponenter udviklet af Fairchild<sup>14</sup> ville lykkes at få instrumentet til at fungere efter hensigten. Heldigvis viste det først færdiggjorte eksemplar af analysatoren sig at virke upåklageligt. Det konstaterede jeg blandt andet ved at placere en kobolt-60 kilde foran spektrometridetektoren og scanne det resulterende spektrum. De to 1.173 og 1.332 MeV fototoppe (jf. Del 1, Figur 1) så fuldstændig rigtige ud, da jeg udplottede spektret på millimeterpapir.

\*\*\*

Ved konstruktionen af borehulssonden var det noget af en udfordring, at nogle af borehullerne på Kvanefjeld havde en diameter på kun 28 millimeter. For at forhindre sonden i at sætte sig fast under logningen blev der valgt et 23 millimeter stålør til at huse dens komponenter, der tilsammen udgjorde en miniatureudgave af spektrometridetektorens indre dele bortset fra en bly-plug i rørets lukkede bund til at holde sonden lodret i 50 mm borehullerne. NaI(Tl) detektorkrystallen havde størrelsen 13 mm dia. × 25 mm og en hættediameter på 19 mm, og den var optisk koblet til et 19 mm PM-rør med løse tilledninger. Figur 7 viser i detaljer, hvordan sonden var konstrueret og kablet.



Figur 7. Den langstrakte montage af borehulssondens komponenter og indføringen af sondekablet.

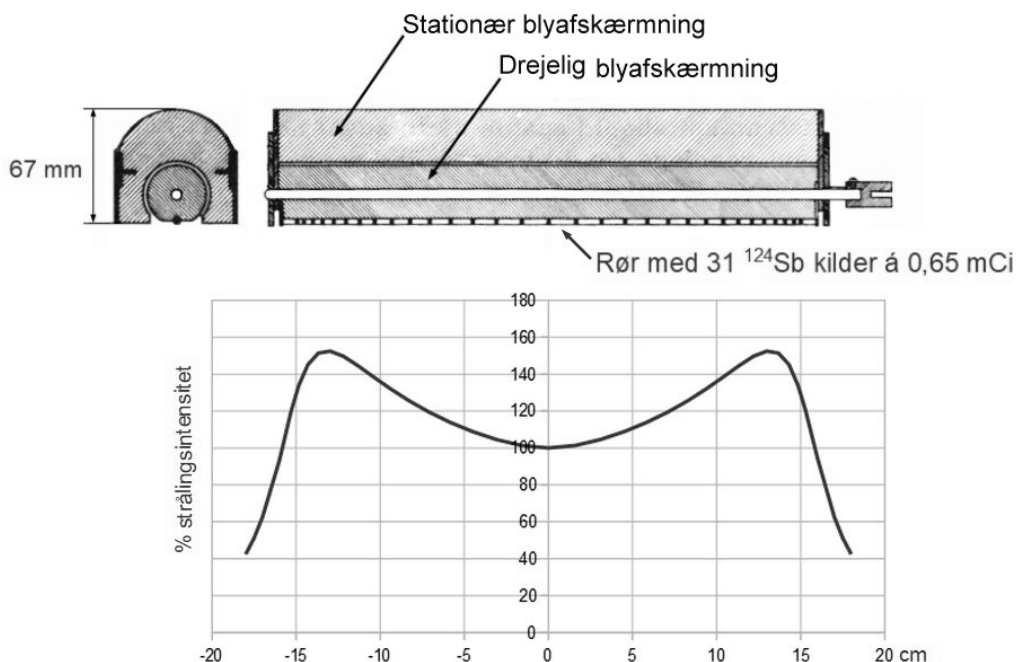
13 Opbygningen og virkemåden af et PM-rør er forklaret i Del 1.

14 Da vi påbegyndte arbejdet med at konstruere analysatoren i efteråret 1965, var den vitale komponent, spændingskomparatoren  $\mu\text{A} 710$ , endnu ikke kommet på lager hos den danske eneforhandler af Fairchild halvlederprodukter. Det klagede jeg over, hvilket fik indehaveren af agenturet til at ringe til moderselskabet i USA. Få dage senere dukkede han op i laboratoriet med en luftpostkuvert, der viste sig at indeholde en halv snes eksemplarer af  $\mu\text{A} 710$  elementet leveret kvit og frit som de første af slagsen ankommet til Danmark. Da analysatoren stod færdig og var taget i anvendelse i Grønland, opfordrede han mig til at skrive om den i Fairchilds internationale nyhedsbrev, *Planar News*. Det gjorde jeg gerne i betragtning af den succes, jeg havde haft med brugen af firmaets integrerede kredsløbs-elementer. Min artikel blev bragt i nyhedsbrevets augustnummer for 1967 under overskriften "Integrated circuits in nuclear gamma-ray spectroscopy".

Såvel de 80 meter sondekabel som det 2 meter lange kabel, der med et stik i hver ende forbandt analysatoren med spektrometridetektoren eller lagertromlen for sondekablet, var 2-skærms koaxialkabel, hvor centerlederen foruden at overføre detektorimpulser blev benyttet til fremføring af højspænding fra analysatoren. Det krævede brug af en koblingskondensator og en filter-kondensator med høje prøvespændinger, sidstnævnte med det formål at dæmpe transienten, der opstod, når højspændingen blev tilkoblet. Den ydre skærm bag kablets PVC kappe fremførte en spænding på 6 volt for en såkaldt tandem emitterfølger, der var tilpasset kablets karakteristiske impedans på 75 ohm. Det kritiske punkt i konstruktionen af borehulssonden var at sætte kablets passage ud af sonderøret i stand til at modstå et vandtryk på op til 8 atm. Det blev i værkstedet søgt opnået med en gennemboret nylon-plug, som kablet og kraven på dets aflastningsmuffe blev trukket igennem og fæstnet til med epoxylim, hvorefter pluggen blev påsmurt epoxylim på ydersiden og presset ind i en reces indfældet i sonderørets hals. Som afstandsmærker på sondekablet blev der for hver femte meter regnet fra midten af detektorkrystallen påklisteret ringe af isolerbånd, hvis farver matchede den ringformede farvekodning af talværdierne for elektriske modstande.

\*\*\*

Omsider lykkedes det at få bevilget og opslået den nye fysikerstilling, som Jens Rasmussen lovede at oprette, da Jørgen Thomas forlod Risø. Stillingen blev den 1. marts 1966 besat med Helmar Kunzendorf, der som nyuddannet diplomfysiker fra Technische Hochschule (TH) Aachen var flyttet til Danmark kort efter sin afgangseksamen. Han var suverænt den bedste af de to ansøgere, der havde været til stillingen, og det talte stærkt med i hans kvalifikationer, at han ud over at have en solid grunduddannelse i atom- og kernefysik var fortrolig med indretningen af nuklear-elektronisk måleudstyr. Det gjorde det oplagt at inddrage Helmar i konstruktionen af beryllometer II, som jeg på tidspunktet for hans ansættelse havde fået bygget en 33 centimeter lang bestrålingsanordning til i afdelingens værksted (Figur 8).



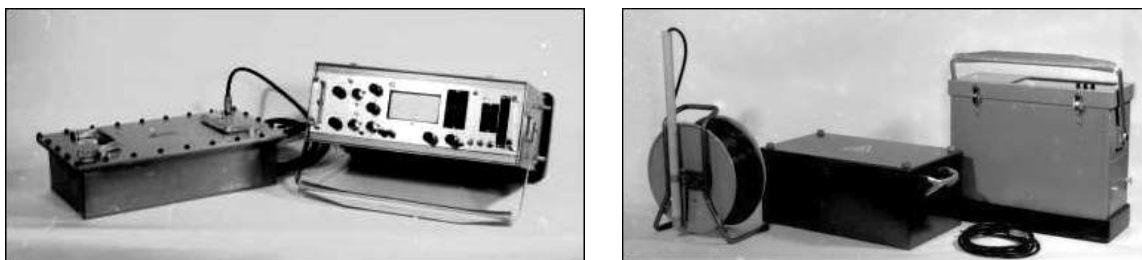
Figur 8. Bestrålingsanordningen for beryllometer II. De 31 identiske antimon-124 punktkilder havde en samlet kildestyrke på 20 mCi og var placeret i et smalt rør med jævnt aftagende indbyrdes afstande fra midten og udefter til begge sider, hvorved kilderne kom til at simulere en linjekilde med stigende udstråling fra midten mod endepunkterne. Kurven viser den beregnede relative gammastrålingsintensitet i luft to centimeter under kilderøret.

Ligesom i beryllometer I kunne gammakilden drejes 180 grader fra en position, hvor den var afskærmet af bly <sup>15</sup> i alle retninger, til en bestrålingsposition over en mineralisering af beryllium. Forskellen var den, at bestrålingsarealet for beryllometer II var omkring 30 cm langt, og at styrken af kilden var nedsat fra 100 til 20 millicurie for at reducere vægten af blyafskærmningen. Det kompenserede vi for ved at bestyke instrumentet med to Texas Nuclear helium-3 (<sup>3</sup>He) proportionaltællere, som var 30 cm lange og oppumpet til et gstryk på 4 atm, hvilket gjorde dem fem gange mere følsomme for neutroner end de to BF<sub>3</sub> tællere i beryllometer I.

Sent på foråret 1966 indså Helmar og jeg, at vi ikke ville kunne nå at udvikle beryllometer II til et selvstændigt fungerende instrument i løbet af de få uger, der var tilbage, inden det nye feltmåleudstyr skulle afskibes til Narssaq sammen med GGU's omfattende ekspeditionsrejse for at stå parat i Dyrnæs til afprøvningsarbejdet i august, som jeg ville tage mig af sammen med Erling. Vi valgte derfor en midlertidig løsning, hvor bestrålingsanordningen og de to <sup>3</sup>He-tællere kom til at fungere som en beryllometer-forsats til én-kanal analysatoren med denne indstillet til integraltælling af fotoneutron-impulser og samtidig bortdiskriminering af de svage, men talrige gamma-impulser genereret af bestrålingskilden. I værkstedet blev der fremstillet en midlertidig beholder af rustfri stål, som bestrålingsanordningen blev nedsænket i og fastgjort til beholderens endevægge med vinkler. Gaffelgrebet på akslen for den rotérbare blycylinder (Figur 8) blev herefter gennem et hul i den ene endevæg, der var foret med en pakning, koblet til et lille drejhåndtag. <sup>3</sup>He tællerne fæstnede vi med bøjler til undersiden af beholderens topdæksel, således at de ville befinde sig 1 cm over beholderens bund, når dækslet blev påskruet.

Planen var, at når beryllometer-forsatsen var blevet afprøvet i Grønland, ville vi få lavet en ny og mindre tung instrumentbeholder med plads til en højspændingsgenerator og erstatning af analysatoren med en kontrolboks som den, Erling havde fremstillet til beryllometer I. Derfor valgte vi at udsætte indstøbningen af de dyre <sup>3</sup>He tællere i paraffin, indtil de sammen med bestrålingsanordningen blev flyttet over i den nye beholder. For at moderere de hurtige fotoneutroner, der trængte gennem dennes bundflade, fyldte vi beholderen til randen med transformatorolie, der formentlig var en lige så god moderator som paraffin og let kunne tappes af igen. Herefter blev dækslet påklæbet en gummipakning langs kanten og spændt fast med umbraco-skruer.

Figur 9 viser beryllometer-forsatsen tilkoblet analysatoren samt klargjort til forsendelse til Dyrnæs i en aflåselig transportkasse sammen med borehulssonden og det først fremstillede eksemplar af analysatoren med låg sat på til beskyttelse af dens forplade.



Figur 9. Beryllometer II i den midlertidige udgave, hvor analysatoren blev benyttet til tælling af fotoneutroner, og det samlede måleudstyr ekskl. spektrometridetektoren klargjort til forsendelse til Dyrnæs. Låget for analysatoren var forsynet med tre trykknapper til betjening udefra af start-, stop- og resetknapperne, og det indeholdt desuden en rude til aflæsning af tællertallene. Herved kunne der udføres borehulslogning og beryllometermålinger, selvom det regnede.

\*\*\*

15 I form af antimonbly, jf. Del 2, Note 39).

I begyndelsen af august 1966 rejste jeg til Dyrnæs (Figur 10 og 11). Sejlturen fra den spartanske lufthavn i Narssarsuaq til Narssaq med passagerskibet m/s Kununguak tilbragte jeg på agterdækket, hvor der var en enestående udsigt til de nøgne fjelde, der i smukke farvenuancer rejser sig stejlt langs siderne af Tunugdliarfik fjorden (Figur 4), og hvor skibet gled forbi spektakulære isskoser, som det efterlod vuggende i bovbølgen. Det var en helt ny verden for mig at dumpe ned i.

På kajen i Narssaq blev jeg mødt af ekspeditionens altmuligmand, som hed Kring til efternavn. Han sejlede mig til Dyrnæs i GGU's kutter "Hartz", opkaldt efter botanikeren og geologen Nikolaj Hartz (1867-1937). Her blev jeg modtaget af John, som jeg for første gang mødte i hans arbejde som feltgeolog og organisator af GGU's aktiviteter i Ilímaussaqa komplekset.



Figur 10. Dyrnæslejren i midten af 1960'erne med vejen op til foden af Kvanefjeld, der ses i baggrunden lige over barakkernes tage. Længere borte fremtræder det karakteristiske Ilímaussaqa fjeld. Det jævnt stigende terræn over for Kvanefjeld, på den anden side af Narssaq elvdal, er Taseq skråningen. Foto: Henning Sørensen.



Figur 11. Udsigt fra Dyrnæs mod sydvest. Foruden en Landrover fandtes der en jeep i lejren. Begge biler blev benyttet til transport frem og tilbage af de geologiske felthold, der arbejdede på Kvanefjeld. Foto: Henning Sørensen.

Ekspeditionsdeltagerne fyldte godt op i sovebarakken, så jeg blev indkvarteret i et rum i lejrens værkstedsbarak, der også tjente som opbevaringssted for geologiske kort og kasser med stenprøver. Da jeg flyttede ind med min sovepose, stod de nye Risø-instrumenter nydeligt opmarcheret på gulvet, udpakket af Erling og klar til at blive afprøvet i felten.

Dagen efter min ankomst satte John, Erling og jeg os i Landroveren medbringende én-kanal analysatoren og spektrometridetektoren og blev af Kring kørt op til foden af Kvanefjeld ad den fem kilometer lange grusvej, som AEK havde anlagt i 1957, da eftersøgningen af uran i Ilímaussaq komplekset blev koncentreret om kvanefjeldsforekomsten. Dér, hvor vejen sluttede, stod masten til en tovbane, som blev benyttet til ophejsning af det tunge grej til de tidligere udførte prospekteringsboringer og etableringen af en mineskakt i fjeldsiden. Under vores opstigning langs den snoede og stejle sti til plateauet 300 meter oppe bar Erling analysatoren på ryggen i dens bærestativ, mens John medbragte spektrometridetektoren i rygsækken sammen med sin geologhammer og geigertæller. Jeg bar ingenting ud over min notesbog og en madpakke og havde alligevel svært ved følge trop med de to andre, uvant som jeg var med bestigning af fjelde.

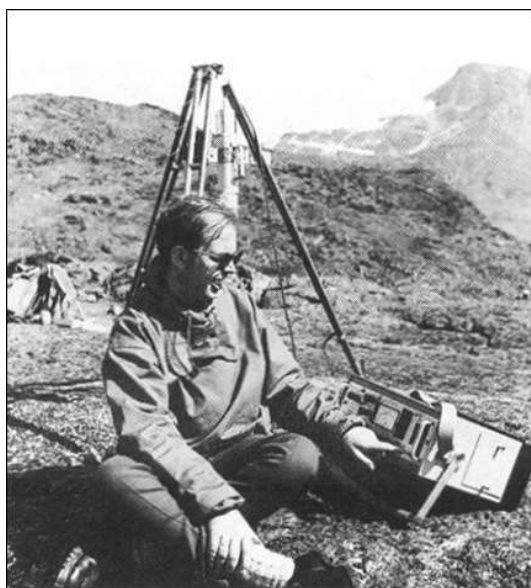
Da jeg omsider nåede helt til tops, åbnede der sig et storslået panorama mod vest ud over øerne og isskosserne i farvandet mellem Narssaq-halvøen og Davisstrædet. I den modsatte retning dannede indlandsisen i det fjerne baggrund for Ilímaussaq fjeldet. Lidt længere fremme på plateauet stod John og Erling og ventede på mig. John oplyste, at vi befandt os i den sydvestlige del af Mineområdet, som er domineret af veleksponeret mellemkornet lujavrit. Med sin geigertæller demonstrerede han, at radioaktiviteten var særlig kraftig over en af de migmatit inklusioner, om hvilke han på vores møde på Mineralogisk Museum året før havde fortalt, at de ofte var bærere af omkring fem gange så meget thorium som uran. John valgte en sådan lokalitet til at prøvescane et gammaspektrum ved at iagttage udslaget på analysatorens count rate meter, når kanalpositionen gradvis blev flyttet nedad gennem spektret. Fra et opbevaringssted i nærheden fremskaffede Erling et landmålerstativ, som detektoren blev ophængt i med scintillationskrystallen placeret cirka en meter over terræn for at opnå et repræsentativt billede af strålings sammensætningen i et forholdsvis stort område omkring detektorens akse.

Det således konfigurerede feltgammaspæktrometer fungerede upåklageligt efter de to måneder, der var gået, siden udstyret blev afskibet til Grønland, og nu ville jeg i første omgang vise John, hvordan man klargjorde analysatoren til gammaspæktrometrisk scanning efter at have forklaret ham virkemåden af de tre helipotmetre på analysatorens forplade til indstilling af henholdsvis højspændingen for detektoren, scanningskanalbredden og den forskydelige kanalposition, de to sidste angivet i skaladele som forklaret i Note 12. Kanalpositionen for 2,615 MeV emissionen fra  $^{208}\text{Tl}$  (thorium) indstillede jeg til 8,7 skaladele, hvorved de disponible 10 skaladele kom til at definere en øvre grænse for et scanningsinterval på 3 MeV. Dernæst reducerede jeg detektorens højspænding, indtil udslaget på analysatorens count rate meter næsten forsvandt, hvorefter jeg gradvis skruede op for højspændingen, hvorved viserudslaget først voksede og derpå aftog igen. Det således registrerede maksimum fastlagde højspændingen, der tildelte 2,615 MeV toppen positionen 8,7 skaladele, svarende til en energikalibrering af måleopstillingen lig med 3,33 skaladele pr. MeV.

Vi var alle tre spændt på, om jeg ved at flytte kanalpositionen ned i omegnen af 5,9 skaladele kunne påvise, at her var der en fototop i spektret frembragt af 1,764 MeV emissionen fra  $^{214}\text{Bi}$  (uran). Det var der tilsyneladende ikke - denne strålingskomponent syntes at drukne i Compton-spredt  $^{208}\text{Tl}$  gammastråling. Hermed var det påvist, at strålingen fra terrænet under og omkring målepunktet i overvejende grad måtte tilskrives thorium. Jeg fortsatte med gradvis at mindske kanalpositionen, hvilket flere gange undervejs gjorde det nødvendigt at gå et trin op i skaleringen af tællehastigheden for at forhindre viseren i count rate meteret i at blive hængende i sin yderposition. Det var første

gang, jeg stiftede konkret bekendtskab med den iøjnefaldende stigning i tællehastighed, der er karakteristisk for et terrestrisk gammaspektrum i energiområdet fra omkring 1 MeV og nedefter (jf. Figur 2), og som dels skyldes de intense lavenergetiske gamma-emissioner i uran- og thorium henfaldskæderne, dels (som jeg forklarede i det indledende afsnit) multipel spredt gammastråling. Tællehastigheden kulminerede ved 0,3 skaladele (90 keV), hvor den oversteg viserudslaget fra 2,615 MeV fototoppen med en faktor 100. Det kraftige udslag på Johns geigertæller kunne ligeledes henføres til den intense og komplekse lavenergi-stråling på målelokaliteten.

Efter denne demonstration af scanning aflæst med analysatorens count rate meter forlod John og Erling stedet for at tage fat på deres feltarbejde andetsteds på plateauet, som for Erlings vedkommende bestod i anvendelse af beryllometer I til identifikation af beryllium-mineraler udfældet i kvanefjeldsbjergarterne. Jeg kunne nu i ro og mag gå i gang med at undersøge, hvor stabilt tælle-tallet leveret af detektorens PM-rør holdt sig gennem resten af dagen. Det gjorde jeg ved at indstille analysatoren til tælling med dens scaler-timer udrustning i et bredt energivindue omkring 2,615 MeV fototoppen og derpå registrere tælle-tallet hvert kvarter (Figur 12).



Figur 12. Jeg i færd med at monitere den elektroniske stabilitet af spektrometridetektoren med denne ophængt over kvanefjeldslokaliteten, som blev valgt til afprøvning af måleudstyret.  
Foto: Erling Johannsen.

Særlig mageligt var det ikke at sidde på en hård klippeoverflade og notere tællingerne, men solen skinnede og udsigten var betagende. I de første par timer ændrede aflæsningerne sig ikke mærkbart inden for grænserne sat af tællestatistikken, selvom det efterhånden blev noget køligere. Men ude over Davidsstrædet lå der en mørk skybræmme, som kom stadigt nærmere og til sidst lagde sig over Kvanefjeld som en frysende kold og klam tåge. Jeg nåede lige endnu en aflæsning, der afveg noget fra de foregående, inden John dukkede frem af tågen og meddelte, at vi hellere måtte pakke sammen og se at komme ned til lejren, inden vejret slog over i regn og slud. Vi bragte udstyret i ly under en presenning holdt på plads af sten langs kanten, og Erling lod analysatorbatteriet glide ned i sin rygsæk for at tage det til genopladning i Dyrnæs. Jeg sendte en venlig tanke til Jens Rasmussen for hans initiativ året før til at udstyre feltholdene med radiotelefoner, så John kunne kalde Kring og få ham til at hente os tidligere end aftalt. Landroveren stod parat, da jeg velbeholden var kommet ned ad fjeldskråningen efter de to andre.

Den følgende morgen var vejret klaret op, så vi vendte tilbage til Kvanefjeld, jeg for at genoptage monitoringen af tælle-tallene i analysatorens midlertidigt indstillede thorium-vindue. Denne gang gik det lidt nemmere for mig at bestige fjeldsiden. Til min store fortrydelse virkede analysatoren ikke, da jeg tændte for den - der kom ingen højspænding fra den. Jeg fik hidkaldt Erling, der befandt sig i nærheden. Sammen afskruede vi forpladen, hvis bagside dannede befæstelse for monteringsrammen, som instrumentets ti printkort var indsat i. Da vi forsigtigt tippede analysatoren fremover, kom der en pæn sjat vand ud af instrumentkassen. Under det kraftige temperaturfald, der fulgte med tågen dagen før, var der øjensynligt dannet kondensvand i kassen, og det havde sat højspændingsgeneratoren ud af spillet. Vi blev nødt til at returnere til Dyrnæs og få gennemtørret printkortene og stikforbindelserne til dem. Efter sin tilbagekomst til Risø i slutningen af måneden indstøbte Erling højspændingstransformatoren i begge eksemplarer af analysatoren i epoxy, og ikke blot kortet, som transformatoren sad på, men samtlige printkort, der kun var fugtbeskyttet med lak, blev på begge sider påført et tykt lag "Silcoset" - et to-komponent silikone-produkt fra ICI, der stivnede til en gummiagtig, vandtæt belægning.

\*\*\*

Det næste punkt på programmet under mit ophold i Dyrnæs var afprøvning af borehulssonden. Uden for kvanefjeldsplateauet fandtes der syv 200 meter dybe prospekteringshuller. Det nærmeste af dem var placeret et stykke oppe i Narssaq elvdal, og det valgte Erling og jeg at nedsænke sonden i. Vejret var solrigt, og der var smukt i elvdalen med dens bevoksning af kvan og frodigt græs. Vi så frem til at tilbringe nogle behagelige timer på den store blotning af isskuret, snehvid naujait, som hullet var nedboret i få meter fra den brusende elv. Den glatte og næsten plane klippeoverflade var ideel til udlægning af det 80 meter lange sondekabel i store cirkulære vindinger omkring borehullet, der var vandfyldt til randen.

Men vores ophold på dette idylliske sted blev kortvarigt. Da vi havde sænket sonden ned i hullet til den fulde kabellængde af 80 meter og skulle til at logge nedefra og op med analysatoren indstillet til totaltælling, forsvandt udslaget på count rate meteret brat, og ved omkobling af viserinstrumentet til kontrol af højspændingen gjorde nålen kun et svagt udslag. Denne gang var det ikke analysatorens højspændingstransformator, der svigtede, idet visningen blev normal igen, da vi frakoblede mellemkablet til stikket på tromlen. Vi trak sonden op til overfladen og konstaterede, at kablet kunne rykkes en smule ind og ud af aflastningshætten for enden af sonderøret. Vedhæftningen af epoxylimen til kablets pvc-kappe inde i nylon-pluggen, der tjente som gennemføring for kablet (Figur 7), var øjensynlig ikke stærk nok til at forhindre, at der sivede vand ind i sonden, når denne blev udsat for et vandtryk på 8 atm. Erling og jeg følte os ret slukørede over, at borehulssonden var gjort ubrugelig i resten af feltsæsonen. Efter hjemkomsten til Risø blev der på værkstedet fremstillet en attrap, hvor en stump kabel indført i et tomt sonderør havde fået kappen skåret væk på det korte stykke i hullet gennem nylon-pluggen. Forventningen var, at epoxylim ville hæfte sig bedre til trådene i den yderste af kablets to metalskærme end til den glatte pvc-kappe, og det viste sig at holde stik. Resultatet af en tryktest af attrappen udført på Teknologisk Institut var, at kabelgennemføringen holdt tæt ved vandtryk på over 20 atm. Så der var gode udsigter til, at loggeprogrammet kunne gennemføres i feltsæsonen for 1967.

Tilbage stod at få afprøvet den midlertidige beryllometerforsats til analysatoren indeholdende bestrålingsanordningen, jeg havde designet til det planlagte beryllometer II. Det blev gjort på Taseq skråningen (Figur 10) med de beryllium-mineraliserede årer udfældet i sprækker af naujaitten, som her er mere eller mindre forvitret og frembyder et terræn præget af mange løsblokke. Erling og de to studenterassistenter på beryllometerholdet var vant til at gå i dette ujævne terræn med det 40 kilo tunge beryllometer I fastspændt på ryggen. Det midlertidige beryllometer II vejede kun halvt så meget, men til gengæld var det til stor gene, at de seks liter moderator-olie i instrumentbeholderen skvulpede og derved virkede bremsende på bærerens kropsbevægelser, når han gesvindt skiftede

retning for at komme udenom en løsblok eller undgå at træde ned i en fordybning. Selvom Erling og de to hjælpere skiftedes til at bære instrumentet, var det med stor forsinkelse, vi nåede frem til det målested, John havde udpeget til afprøvning af udstyret. Her fandtes en forholdsvis bred og et par meter lang åre, der tidligere på sommeren var blevet opmålt punktvis med beryllometer I. Med bærestængerne påmonteret beryllometerforsatsen og med analysatoren indstillet til tælling af fotoneutron-impulser via et to meter langt kabel styrede de to hjælpere kassens langsides vinkelret ind på en centralt udstykket scanningslinje for åren og skubbede kassen nogle centimeter fremad langs linjen, hver gang Erling havde fuldført en tælling med analysatoren.

Vi konstaterede med tilfredshed, at det nemt lod sig gøre at detektere chkalovit-krystaller lokaliseret op til 15-20 centimeter til venstre eller til højre for scanningslinjen. Det var god evidens for, at den 30 centimeter lange antimon-124 bestrålingskilde og de to højfølsomme, ligeledes 30 cm lange helium-3 neutrondetektorer fungerede efter hensigten, og det opvejede i nogen grad fiaskoen med instrumentkassens dårlige bæreegenskaber, som Helmar og jeg ikke havde forudset. Da holdet vendte tilbage til Dyrnæs sent om eftermiddagen, besluttede jeg, at det måtte være nok med denne ene afprøvning af grundkomponenterne for beryllometer II. Jeg udnyttede i stedet et par dage af mit ophold i lejren til at opmåle form og udstrækning af det forøgede detekteringsareal. Hjemmefra havde jeg medbragt kapslen med BeO-pulver, som jeg i laboratoriet havde benyttet til at opmåle det cirkelformede detekteringsareal på omkring 40 cm<sup>2</sup> for beryllometer I. Jeg anbragte den oliefyldte instrumentbeholder med dens bærehåndtag hvilende på to taburetter og brugte et laboratoriestativ til at presse kapslens endeflade op mod kassens bundflade i et større antal jævnt fordelte målepunkter (Figur 14). Eksperimentet var nøjagtigt nok til at fastslå, at området af bundfladen, hvor tællehastigheden udgjorde mindst 20% af tællehastigheden under den lineære gammakildes midtpunkt, stort set var en 34 cm lang og 18 cm bred ellipse, svarende til et følsomt areal på cirka 480 cm<sup>2</sup>.

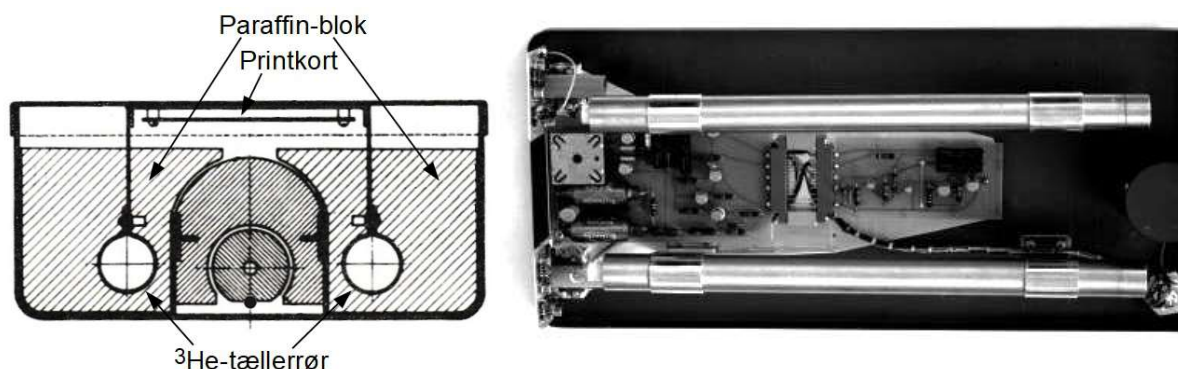


Figur 14. Opmåling af detekteringsarealet for den midlertidige udgave af beryllometer II i mit logi i Dyrnæs. Foto: Erling Johannsen.

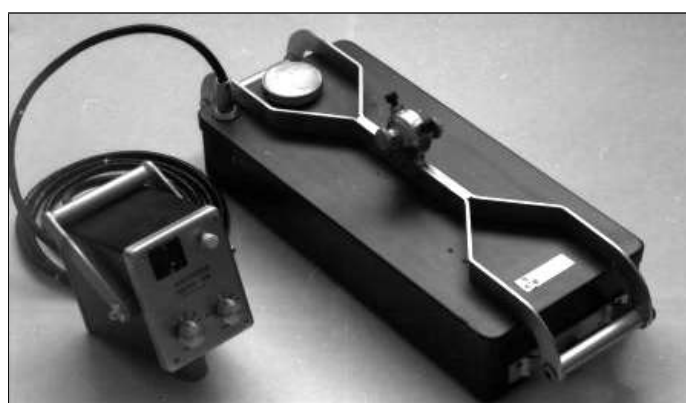
\*\*\*

Jeg springer nu frem til årsskiftet 1966/67, hvor vi i gruppen stod klar med geologiske felt-instrumenter, som nu skulle være befriet for de skavanker, Erling og jeg i august havde afsløret under afprøvningen af prototyperne i Grønland. Jeg har allerede omtalt den gennemgribende fugtbeskyttelse af printkortene til de to eksemplarer af én-kanal analysatoren, ligeledes den stærkt forbedrede tætning af kabelgennemføringen for borehulssonden, som vi i mellemtiden havde fået fremstillet et ekstra eksemplar af. Beholderen for beryllometer II forelå nu i sin oprindeligt tiltænkte udformning med en neutron-moderator af paraffin og med instrumentbetjeningen og aflæsningen af

tælleallene henlagt til en separat kontrolboks. Begge dele var fremstillet af 2 mm hærde aluminium, der var eloxeret rød, som var GGU's farve - geologernes vindjakker var røde, ligesom skafterne på deres hamre var det. Figur 15 viser et snit gennem beholderen samt et foto af komponenterne på undersiden af dækslet taget, inden tællerrørene blev indstøbt i hver sin blok paraffin. Udseendet af det komplette beryllometer II fremgår af Figur 16.



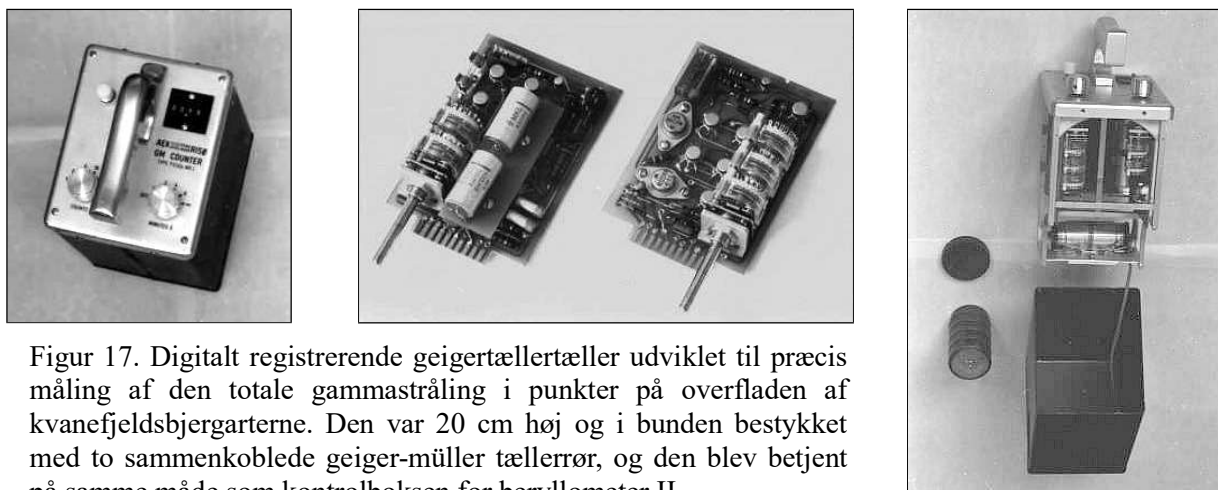
Figur 15. Tværsnit af instrumentkassen for beryllometer II med strålingsafskærmningen for den drejelige lineære antimon-124 bestrålskilde (jf. Figur 8), samt befæstelsen på dækslets underside af de to  $^3\text{He}$ -tællerrør med tilhørende printkort, der genererede 1,2 kV højspænding for rørenes anodetråde og forstærkede de afgivne impulser, som blev overført til kontrolboksen via et to meter langt 2-skærms koaxialkabel. Med bestrålskilden drejet i måleposition steg strålingsniveauet midt på instrumentkassens langsider til omkring 200 millirøntgen i timen (mR/h).



Figur 16. Beryllometer II med kontrolboksen tilkoblet. Et elegant træk ved konstruktionen var, at instrumentdækslet blev holdt på plads af en aluminiumsbøjle med et gaffelgreb i begge ender, der var indskruet i kassens bærehåndtag, som dermed optog den fulde vægt på 20 kg af kassen, når denne blev løftet. På midten var bøjlen forsynet med et kuglehoved til påsætning af to 1,8 meter lange bærestænger af fiberglas. Det gav mulighed for at fastlåse stængerne i vinkler, som i ujævnt og skrånende terræn tillod instrumentets operatører at dreje kassen om dens lodrette midterakse.

På kontrolboksens forside blev tælleallene vist på et fircifret elektromekanisk register, der kunne klare tællehastigheder på op til 25 cps (counts per second). For ikke at komme i nærheden af denne grænse kunne man med en drejeknap nedskalere impulshyppigheden med en faktor 2, 4, 10, 20 eller 40. En anden drejeknap blev benyttet til forvalg af en tælleperiode på 1, 2, 4 eller 8 minutter. Scaler-timer elektronikken var næsten udelukkende opbygget af integrerede kredsløbskomponenter i Fairchild's *Micrologic* serie, deriblandt den nytilkomne  $\text{C}\mu\text{L} 958$ , som var en komplet dekadetæller. Denne kredsløbsbrik indgik i frekvensdeleren for kontrolboksens timer-impulser og blev også benyttet til generering af de tre tocifrede nedskaleringsfaktorer.

Jeg erindrer ikke, om det var John eller mig, der fik ideen, men vi syntes begge, det var oplagt at udnytte designet af kontrolboksen for beryllometer II til at konstruere en digitalt fungerende geigertæller. Lomme-geigertællerne, som GGU's geologer benyttede til måling af strålingsintensiteterne på overfladen af kvanefjeldsbjergarterne, fremviste tællehastighederne som et viserudslag på et lille count rate meter, der havde en forholdsvis kort tidskonstant, hvorved visningerne hurtigt tilpassede sig variationer i bjergarternes indhold af uran og thorium. At foretage et pålideligt subjektivt skøn af middeltællehastigheden, som visernålens betragtelige statistiske svingninger grupperede sig omkring, krævede øvelse, mens der med en digital geigertæller blot skulle aflæses et akkumuleret tælleantal, der efter division med måletiden ikke alene var et korrekt estimat af middeltællehastigheden, men også var et estimat af, hvor præcist denne var bestemt, jf. diskussionen i Del 2 af præcisionen ved impulstælling af radioaktivitet. Udseendet og opbygningen af den nye geigertæller fremgår af Figur 17.



Figur 17. Digitalt registrerende geigertællertæller udviklet til præcis måling af den totale gammastråling i punkter på overfladen af kvanefjeldsbjergarterne. Den var 20 cm høj og i bunden bestykket med to sammenkoblede geiger-müller tællerrør, og den blev betjent på samme måde som kontrolboksen for beryllometer II.

Til konstruktionen valgte Helmar og jeg et Philips geiger-müller rør (GM rør), der var 45 mm langt og 15 mm i diameter og blev leveret med en aluminiumshætte til afdækning af et tyndt endevindue beregnet til detektering af alfa- og betastråling. To af disse tællerrør blev parallelforbundet og fastgjort i forlængelse af hinanden i bunden af instrumentet. Deres fælles driftsspænding på 500 volt blev leveret af en simpel DC spændingskonverter, og instrumentets genopladelige 6 V batteri var magen til det, der sad under dækslet for beryllometer II. Printkortene i kontrolboksen for dette blev direkte kopieret. Dåsen for denne geigertæller, som vi foreløbig fik fremstillet to eksemplarer af, var tilsvarende udført i rød-eloxeret aluminium. Den var velegnet til at stå på en klippeoverflade, mens den akkumulerede tællinger, hvorved geologen havde hænderne fri til at notere målestedets koordinater og bjergartstype i sin logbog. Ophør af klikkene fra tælleregisteret tilkendegav, at den indstillede tælleperiode var udløbet.

\*\*\*

Med tilkomsten af den avancerede geigertæller kunne vi i gruppen stille en ganske omfattende radiometrisk feltinstrumentering til rådighed for GGU. Det meste af det elektroniske udviklingsarbejde havde Erling og jeg - under senere medvirken af Helmar - klaret på egen hånd i vores lokaler i bygning 110 på afstand af den øvrige elektronikafdeling. Men vi havde også i betydelig grad trukket på ressourcerne i afdelingens produktionsgruppe, som ingeniør H.C. Sørensen var leder af med ansvar for afdelingens værksted og dens tegnestue, hvor vi fik rentegnet kredsløbsdiagrammerne. Som omtalt i Del 2 begyndte mit samarbejde med værkfører Peiding og finmekaniker Kaj Sørensen i foråret 1963 med indretningen af "Minen" og konstruktion af den tilhørende  $4\pi$  beta proportionaltæller, og nu var det foreløbig kulmineret med et innovativt mekanisk design som beryllometer II og tilvirkning af en slank borehulssonde. I produktionsgruppen hentede

vi også bistand med fremstilling af printkort og anskaffelse af specialkomponenter som dobbelt-transistorer og metalfilmmodstande, ligesom ladeapparatet for batteripakken til én-kanal analysatoren blev konstrueret af en af produktionsgruppens ingeniører.

Jens Rasmussen så vi ikke meget til ovre hos os, efter at han havde aflagt sin tidligere bekymring for, om det ville lykkes os at udvikle en bærbar og fleksibel impulshøjdeanalysator, som var baseret på anvendelsen af analoge og digitale integrerede kredsløbs-elementer, der endnu ikke havde vundet indpas i andre af afdelingens elektronikkonstruktioner. Til gengæld fik jeg på mit kontor jævnligt besøg af underdirektør C.F. Jacobsen, for hvem udforskningen af uranressourcerne i Kvanefjeld var et hjerteanliggende. Første gang det skete, var umiddelbart inden min rejse til Dyrnæs i august 1966, hvor han udover at berette om de danske forsyningsmæssige og økonomiske perspektiver af uranminedrift på Kvanefjeld gav udtryk for sin betagelse af naturen i kvanefjeldsområdet, som han havde besøgt flere gange. Han anbefalede mig at benytte mit ophold hos geologerne til en vandring i den frodige Narssaq elvdal, som jeg kort efter kom til at opleve ved det mislykkede forsøg på at logge et borehul placeret lige op ad elven. Dr. Jacobsen delte dengang plads med underdirektøren for reaktorteknologi, civilingeniør M. Møller-Madsen, i pavillonen mellem bygning 108 og 109. Når dr. Jacobsen følte trang til at blive orienteret om, hvor langt vi var kommet med forberedelserne til feltsæsonen for 1967, spadserede han ned til mig i nordenden af bygning 110. ”Dav, dav - hvordan går det?”, lød det fra ham, når han trådte ind ad døren med hængende butterfly og en tændt cigaret mellem fingrene, altid beredvillig til at lytte og selv fortælle.

\*\*\*

Planen for gruppens deltagelse i feltsæson 1967 var, at Helmar og jeg ville rejse til Dyrnæs på skift, jeg med ankomst i begyndelsen af juli og han knap tre uger senere, nogle dage inden jeg rejste hjem. Erling blev hjemme denne sommer efter at have været ankermand på målingerne med beryllometer I to år i træk. I stedet kom laboratoriemekaniker Aage Christensen fra afdelingens servicegruppe med på ekspeditionen som tekniker. Han var noget ældre end os andre og skulle især assistere ved det tålmodighedskrævende arbejde med logning af borehuller, hvortil der krævedes stor påpasselighed ved udlægningen af kablet fra tromlen og opmålingen af sondens nedsænkingsdybder ved hjælp af mærkerne på kablet og et målebånd. Jeg ankom til Narssaq en uge efter ekspeditionsholdet og blev modtaget af Kring. Det var lavvande, så han kørte mig til Dyrnæs ad den hurtigere vej gennem elvdeltaet i stedet for - som i det foregående år - at bringe mig derud med GGU's kutter efter at have provianteret i Brugsen i Narssaq. Da udsigten op gennem elvdalen åbnede sig, blev jeg overrasket over, at Taseq skråningen nærmest lignede et skiterræn, så megen sne lå der. Kring oplyste, at vinteren i Sydgrønland havde været usædvanlig streng og mente at sneen næppe ville smelte bort inden afslutningen af feltsæsonen. Det var også Johns vurdering, så der var ikke andet at gøre end at henstille det strålingsintense beryllometer II for resten af sommeren i et aflåseligt skab i lejren og håbe på, at målingerne med dette instrument, som der var lagt så mange kræfter i at udvikle, ville kunne gennemføres til næste år. Den kolde vinter var også skyld i, at kun 15 af borehullerne på Kvanefjeld viste sig at være fri for is ned til den maksimale logningsdybde på 80 meter. Det var heldigt, at vi havde dubleret loggeudstyret, for det ene eksemplar af borehulssonden holdt op med at fungere, da den blev nedsænket i det iskolde vand i et af borehullerne. Derved var en ledning knækket i dens tillodningspunkt på det smalle printkortet inde i sonden.

\*\*\*

Det gammaspektrometriske måleprogram på kvanefjeldsplateauet havde John, Helmar og jeg tilrettelagt som et større anlagt eksperiment udført med de to identiske én-kanal analysatorer. Eksperimentet bestod i at scanne spektre på et antal målelokaliteter udpeget af John og derpå - hjemme i laboratoriet - indlægge et thorium- og et uran-vindue i spektrene med henblik på at undersøge, om det med rimelig nøjagtighed lod sig gøre via analyse af stenprøver indsamlet på målelokaliteterne at bestemme de tre kalibreringskonstanter for et således simuleret to-vindues

gammaspæktrometer: Stripfaktoren  $\alpha$  for uran-vinduet (jf. ligningerne i Figur 2) og de to såkaldte følsomhedsfaktorer (*sensitivity factors*)  $s_T$  og  $s_U$  til omregning af thorium-tællehastigheden  $n_T$  til ppm Th og den 'strippede' uran-tællehastighed  $n_U$  til ppm eU<sup>16</sup>. Det var som tidligere omtalt den metode, Adams & Fryer havde benyttet til kalibrering af deres rygbarne tre-vindues spektrometer i et strålingsmiljø, der var meget svagere end det på Kvanefjeld, og som derved gjorde det muligt at bibeholde kalibreringsligningen for kalium.

Målelokaliteterne, 67 i alt, fordelte John over et større areal dækkende et repræsentativt udvalg af områdets bjergarter: Mellemkornet og finkornet lujavrit, migmatit-indslutninger af foldede og rekrystalliserede vulkanske bjergarter i kontakt med finkornet lujavrit samt naujait og oprindelig lava og sandsten som eksempler på svagt radioaktive bjergarter. Forrige sommer havde John med sin geigertæller demonstreret, at migmatit-prøvelokaliteten, som detektoren var ophængt over i én meters højde (Figur 12), var en kilde til markante ændringer i strålingsniveauet over afstande på kun 10-20 cm. Det var en konkret begrundelse for, at spektrene blev scannet tæt på klippeoverfladen, dog ikke så tæt på, at målegeometrien kom til at overstige  $2\pi$  forårsaget af nærliggende forhøjninger i terrænet. Som kompromis vedtog vi at placere midtpunktet af detektorkrystallen i 12 centimeters højde. Jeg havde i forvejen fået værkstedet til at fremstille et par 40 cm høje, justerbare trefodstativer, som de to detektorer kunne fastspændes i.

Til at udføre scanningen af spektrene udpegede John to geologistuderende, Jørgen Liboriussen og Poul Sørensen. De syntes, det var spændende at stifte bekendtskab med gammaspæktrometri og blev hurtigt fortrolige med betjeningen af analysatoren, herunder - som i demonstrationsforsøget året før - at indstille kanalpositionen til 8,7 skaladele<sup>17</sup> og derpå indfange 2,615 MeV fototoppen ved gradvis at forøge højspændingen for detektoren, indtil analysatorens count rate meter gav maksimalt udslag. Den resulterende energikalibrering af analysatoren på 3,33 skaladele pr. MeV inden optagelsen af dagens første spektrum blev gentaget efter behov afhængigt af, hvor meget lufttemperaturen ændrede sig i løbet af dagen<sup>18</sup>. Med kanalbredden indstillet til 0,4 skaladele (120 keV) blev spektrene scannet i lige store trin på 0,10 skaladele (30 keV) fra en startposition på 10 skaladele (3,0 MeV) til en slutposition på 5,2 skaladele (1,56 MeV). Spektrene fra de mest radioaktive bjergarter blev scannet med en tælle tid på 30 sekunder pr. kanalposition svarende til et samlet tidsforbrug på godt en halv time pr. spektrum medregnet tiderne, der behøvedes til at aflæse og notere cifrene fremvist af analysatorens tællepanel og flytte tællekanalen et trin ned til den næste position. For at opnå acceptabel tællestatistik for spektrene af de mindst radioaktive bjergarter blev tælle tiden øget til 90 sekunder pr. kanalposition, således at det på disse lokaliteter varede næsten halvanden time at scanne et spektrum, hvilket kun var retfærdiggjort af, at der var tale om et videnskabeligt eksperiment. På halvvåde dage holdt Poul Sørensen siderne i sin notesbog tørre ved at nedskrive tælle tallene inde i en klar plastpose, mens Jørgen Liboriussen foretrak at radio-telefonere sine aflæsninger til mig, der som det laboratoriemenneske, jeg var, holdt mig nede i Dyrnæs, når der lå nedbørsskyer over Kvanefjeld.

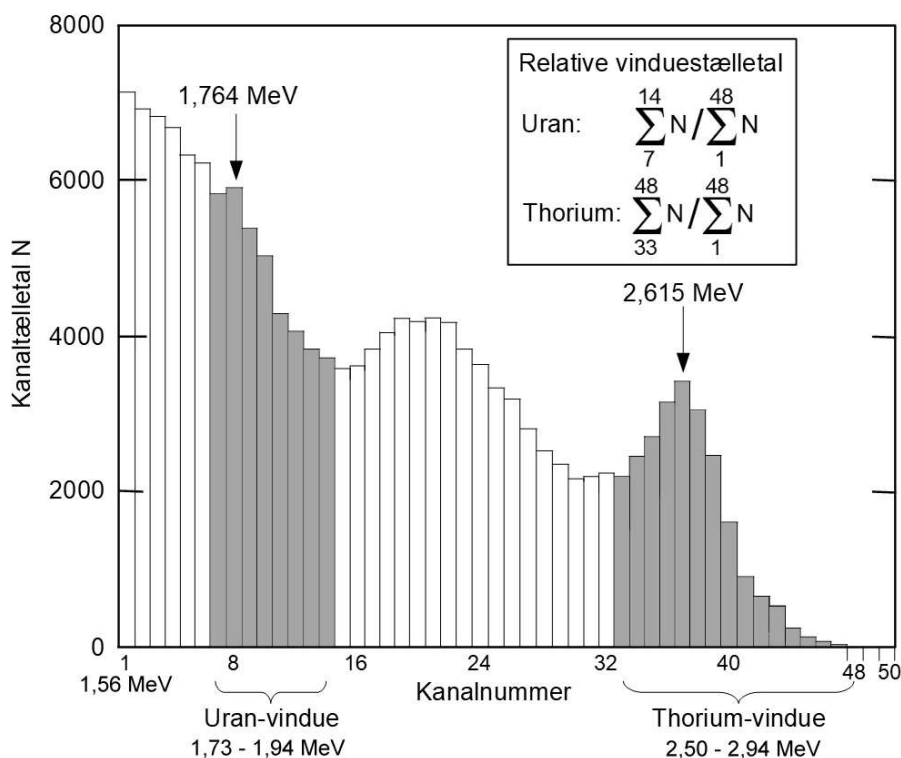
---

16 I kalibreringsligningerne i Figur 2 undlod vi at medtage stripfaktoren  $\delta$  - det relative bidrag fra uran i thorium-vinduet, der skyldes en svag <sup>214</sup>Bi gamma-emission med energien 2,204 MeV.

17 Over de svagt radioaktive bjergarter forhindrede de statistiske fluktuationer af udslaget på count rate meteret en rimelig præcis bestemmelse af detektorhøjspændingen, der gjorde udslaget maksimalt. Denne vanskelighed blev overvundet ved at benytte en indkapslet radium-226 (<sup>226</sup>Ra) energikalibreringskilde. <sup>226</sup>Ra ( $T_{1/2} = 1600$  år) er som den femte isotop i uranhenfaldskæden kilden til dannelsen af radon-222 (radon-gas, jf. det indledende afsnit), som for sit vedkommende er kilden til 1,764 MeV gammastrålingen fra <sup>214</sup>Bi. Kanalpositionen under indstillingen af højspændingen skulle følgelig reduceres fra 8,7 skaladele til  $8,7 \times (1,764/2,615) = 5,87$  skaladele.

18 I PM røret for detektoren, et EMI 9536B, blev der til opfangning af lysglimtene udsendt ved absorption og spredning af gammafotoner i NaI(Tl) krystallen anvendt en antimon-cæsium (Sb-Cs) fotokatode, der typisk bibringer et rør af denne type en temperaturfølsomhed på -0,5% pr. °C.

Inden jeg rejste hjem, efter at Helmar var ankommet for at afløse mig, traf jeg aftale med de to geologistuderende om, at de efter feltæsonen hver for sig ville komme et par uger til Risø som studentermedhjælpere. Opgaven, de fik, var i første omgang at energikalibrere de spektre, og det var de fleste, der ikke var blevet energikalibreret i felten, og den klarede de ved at udplotte 2,615 MeV fototoppen, subsidiært 1,764 MeV fototoppen, på millimeterpapir og aflæse toppens kanalposition. Dernæst overførte de listerne med deres håndskrevne kanaltællital og måletider til hulstrimmel, så vi kunne benytte GIER til beregning af tællehastighederne i et thorium- og et uran-vindue med faste energigrænser. Det var her praktisk at behandle spektrene som multikanalspektre tilvejebragt ved at nummerere de godt 50 scanningspunkter i omvendt orden af deres tidslige rækkefølge med den sidste position tilskrevet kanalnummer 1. Et således transformeret spektrum er vist i Figur 18. Det stammer fra prøvelokaliteten fra det foregående år med den stærke dominans af thorium over uran - i år optaget med NaI(Tl) krystallen placeret i 12 centimeters højde - og det benyttede vi til at fastlægge de to energi-intervaller indtegnet på figuren til simulering af et thorium- og et uran-vindue for de to eksemplarer af feltgammaskpektromeret. Med den særegne asymmetriske placering af uran-vinduet i forhold til 1,764 MeV fortoppen var der taget hensyn til, at dennes venstre flanke var maskeret af Compton-spredt  $^{208}\text{Tl}$  gammastråling, hvilket viste sig generelt at være tilfældet i spektre optaget over bjergarter karakteriseret ved et højt Th/U koncentrationsforhold <sup>19</sup>.



Figur 18. Scanningsgammaskpektrum afbildet som et multikanalspektrum til beregning af tællehastighederne i thorium- og uran-vinduet simuleret med feltgammaskpektromeret.

Til beregning af vinduestællehastighederne via integration af kanaltællingerne i de to vinduer og efterfølgende division med måletiden pr. vindue benyttede vi den såkaldte trapezformel, hvor de to ydergrænser af et integrationsinterval tillægges den halve vægt af de mellemliggende integrationspunkter, hvilket jeg for simpelhedens skyld har undladt at vise i de to summationsformler præsenteret i Figur 18. Der skulle her tages hensyn til, at spektrene var blevet scannet med en målekanal, der var fire gange bredere end den konstante afstand mellem scanningspunkterne (120 keV versus 30 keV).

<sup>19</sup> Uden energikalibrering af hvert spektrum for sig havde tællertallet i et uran-vindue med denne placering været ekstra følsomt for variationer i lufttemperaturen, fordi vinduets nedre energigrænse ikke som i thorium-vinduet faldt i et spektralt minimum.

Derved indtraf der under scanningen en ønskværdig statistisk udjævning af tælle-tallene. Overlappningen af gennemsnitligt fire på hinanden følgende scanningspositioner kunne med rimelig nøjagtighed neutraliseres ved at relatere vinduestælle-tallene til tælle-tallet integreret over hele spektret. De to brøker i Figur 18 skabte her forbindelsen mellem på den ene side de absolutte vinduestælle-hastigheder og på den anden side tælle-hastigheden i hele spektret målt på feltlokaliteten med analysatoren omkoblet til integraltælling i det sidste scanningspunkt (1,56 MeV)<sup>20</sup>. Dette afsluttende trin i scanningen af et spektrum omtaler jeg først nu, hvor der er brug for at gøre det - de to assistenter var fra begyndelsen af eksperimentet instrueret om at huske dette afsluttende trin i måleproceduren.

\*\*\*

Eksperimentet bestod som allerede nævnt i at korrelere vinduestælle-hastighederne udregnet for de 67 målelokaliteter med koncentrationerne af uran og thorium påvist i indsamlede stenprøver. Sprængningerne til fremskaffelse af disse foretog John. Der hvor stativet med detektoren havde stået, udborede Kring et cirka 15 centimeter dybt hul med GGU's Atlas Copco borehammer, som var drevet af en totakts-benzinmotor og blev båret i en skuldersæle. John lod herefter forsigtigt en dynamitstav glide ned i hullet, antændte luntten og gav os andre ordre til sammen med ham at fjerne os uden at løbe og derpå lægge os fladt ned i behørig afstand af sprængningsstedet. Eksplosionen, der gav buldrende genlyde nede fra elvdalen, frembragte et konisk krater, godt en halv meter i diameter foroven og 30 centimeter dybt. Af sprængstykkerne, der lå spredt omkring eksplosionsstedet og var op til ti centimeter store, indsamlede John godt to kilo prøvemateriale, som blev lagt i en plastpose sammen med en seddel påskrevet lokalitetens identifikationsnummer. Kasserne med stenprøver blev i september 1967 afleveret til Emil Sørensen's gruppe i kemiafdelingen, hvor de enkelte portioner udsprængt materiale blev grovknust i en kæbeknuser og dernæst pulveriseret og grundigt opblandet i en formalingsmølle. Prøvernes gennemsnitlige koncentrationer af uran og thorium blev bestemt ved hjælp af gruppens rutinemæssigt anvendte metode, spektrofotometri, der bestod i opløsning af en spatelfuld bjergartspulver i syre og måling af opløsningens såkaldte absorbans for lys med en bestemt bølgelængde. Som forventet ud fra de mange bjergartstyper inkluderet i eksperimentet, udviste analysetallene et stort variationsområde, fra cirka 40 til 1550 ppm U og fra cirka 15 til 4500 ppm Th.

Med den tidligere anførte indeksering af tælle-vinduerne for et geologisk gammaspektrometer: 1 for kalium (ikke relevant her), 2 for uran og 3 for thorium, og med udeladelse af den ubetydelige stripfaktor  $\delta$  for thorium-vinduet, kan ligningerne i Figur 2 for tælle-hastighederne  $n_2$  og  $n_3$  i uran- og thorium-vinduet omformes til kalibreringsligningerne

$$n_2 = s_U \times c_U + \alpha n_3$$

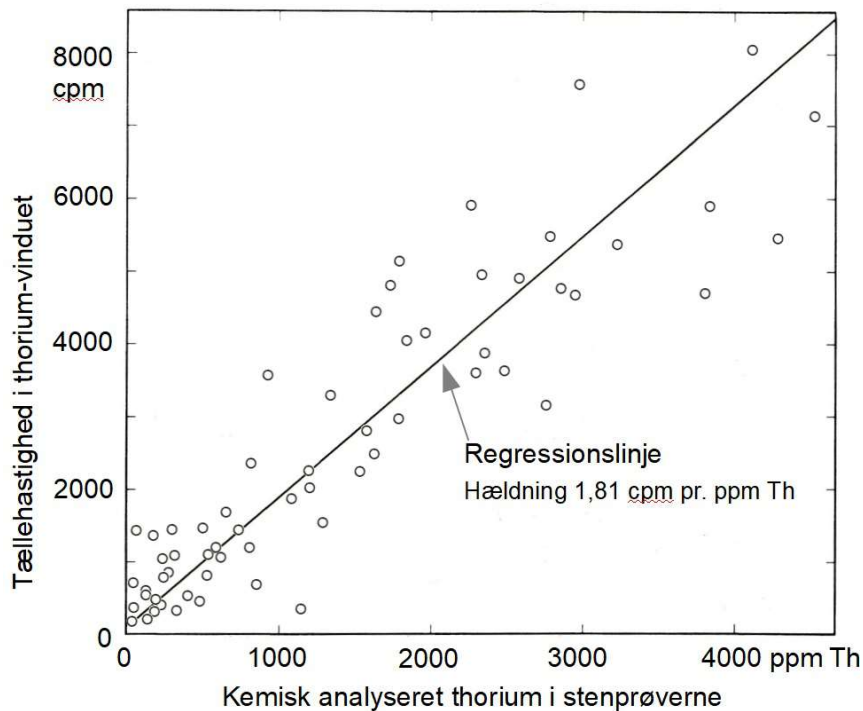
$$n_3 = s_T \times c_T,$$

hvor  $\{c_U, c_T\}$  repræsenterer koncentrationerne af U og Th i terrænoverfladen<sup>21</sup>. Opgaven bestod herefter i at bestemme stripfaktoren  $\alpha$  og de to følsomhedsfaktorer  $\{s_U, s_T\}$  ved hjælp af to-trins linerær regressionsanalyse<sup>22</sup>. I Figur 19 har jeg plottet de sammenhørende værdier af thorium vinduestælle-hastigheden i cpm og kemisk analyseret thorium tilskrevet målestederne. Den resulterende regressionslinje går praktisk talt igennem koordinatsystemets nulpunkt som en bekræftelse af, at baggrundstælle-hastigheden i thorium-vinduet var forsvindende lille og ikke behøvede medtages på højresiden i ligningen for  $n_3$ .

20 Sagt på en anden måde: Vinduestælle-tallene repræsenteret af de to grå arealer i Figur 18 blev relateret til det samlede antal tællinger i spektret, dvs. arealet under dette, som dernæst blev relateret til den integrale tælle-hastighed målt på feltlokaliteten i det sidste scanningspunkt.

21 I anvendelsen af et gammaspektrometer til *in situ* analyse af U og Th betjener man sig selvsagt af ligningerne løst med hensyn til  $\{c_U, c_T\}$ .

22 Matematisk regressionsanalyse er forklaret i Del 2.



Figur 19. Regressionslinjen, hvis hældning var et statistisk estimat af felt-gammaspæktrometerets følsomhedsfaktor  $s_T$  i thorium-vinduet.

Nok så iøjnefaldende er det, at datapunkterne ligger ret kraftigt spredt omkring regressionslinjen. Det kan forklares med, at de indsamlede stenprøver ikke var tilstrækkeligt repræsentative for måle-lokaliteterne, fordi detektorkrystallen ikke var afskærmet med en blyring mod stråling kommende fra områder hinsides det lille areal under detektoren, som prøverne var udsprængt fra. Det var kun takket være målingernes store antal og spændvidde, at linjens hældning kunne godtages som et nogenlunde brugbart estimat af  $s_T$ .

Ved estimeringen af kalibreringskonstanterne  $s_U$  og  $\alpha$  for uran-vinduet var det hensigtsmæssigt at dividere ligningen for  $n_2$  med ligningen for  $n_3$ :

$$n_2/n_3 = \alpha + (s_U/s_T) \times (c_U/c_T).$$

I denne regressionsformel er den uafhængige variabel repræsenteret af brøken  $c_U/c_T$ , som er den reciproke værdi af Th/U koncentrationsforholdet, der varierede mellem 0,31 og 4,74 omkring et gennemsnit på 2,42. I det resulterende plot spredte målepunkterne sig endnu kraftigere omkring regressionslinjen, end de gjorde i regressionen af  $n_3$  versus  $c_T$ , hvilket selvsagt resulterede i øget usikkerhed på estimererne af forholdet  $s_U/s_T$  (regressionslinjens hældningskoefficient) og stripfaktoren  $\alpha$  (ordinaten til linjens skæringspunkt med den lodrette akse). Ved multiplikationen af  $s_U/s_T$  med værdien af  $s_T$  fundet i den første regressionsanalyse kom der endvidere et bidrag til den relative usikkerhed på  $s_U$  fra den relative usikkerhed på  $s_T$ .

Resultatet af det omfattende eksperiment på kvanefjeldsplateauet i sommeren 1967 kunne sluttelig koges ned til følgende estimater af de tre instrumentelle kalibreringskonstanter og deres standard-afvigelser i simuleringen af et to-vindues geologisk U-Th gammaspæktrometer forsynet med en uafskærmet 51 mm dia.  $\times$  51 mm NaI(Tl) placeret i lav højde over terrænoverfladen:

$$s_T = 1,81 \pm 0,08 \text{ cpm pr. ppm Th}$$

$$s_U = 3,2 \pm 1,3 \text{ cpm pr. ppm eU}$$

$$\alpha = 1,5 \pm 0,2.$$

Vi (John, Helmar og jeg) hæftede os især ved, at den relative måleusikkerhed på  $s_U$  beløb sig til hele 40% og dermed oversteg den relative usikkerhed af  $s_T$  med en faktor 9. Det var alt for meget til, at instrumentet ville kunne benyttes til rimelig nøjagtig *in situ* analyse af kvanefjeldsbjergarternes indhold af uran, hvilket jo havde været hovedformålet med at bygge én-kanal analysatoren. Det faldt os ikke ind, at en ikke uvæsentlig del af usikkerheden på  $s_U$  måske kunne tilskrives tid- og stedvarierende afgasning af radon i grænselaget mellem de mest radioaktive bjergarter og atmosfæren - et fænomen, som jeg kort gjorde rede for i det indledende strålingsgeofysiske afsnit, og som er et grundvilkår i radiometrisk uranprospektering.

\*\*\*

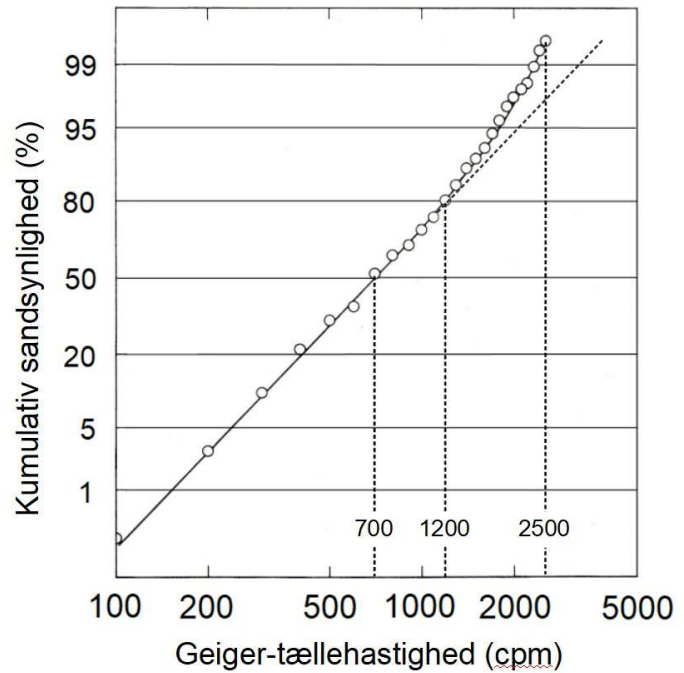
Med opgivelsen af ibrugtagningen af beryllometer II i feltsæson 1967 var der geologistuderende til rådighed i Dyrnæs for, at John parallelt med det gammaspektrometriske kalibreringseksperiment kunne iværksætte en systematisk kortlægning af intensiteten af gammastrålingen i Mineområdet. Målingerne blev foretaget med de to nye digitale geigertællere successivt placeret i 1400 knudepunkter af et virtuelt geodætisk gitter med en maskestørrelse på  $5 \times 5$  meter, der blev udlagt over et cirka 35.000 kvadratmeter stort område ved hjælp af kompas og målebånd. Formålet med denne feltundersøgelse var at fremstille et radiometrisk konturkort, hvor der optegnes hinanden omsluttende lukkede kurver, som er analoge med højdekurverne på et landkort. Det var en opgave, John tog sig af. Han opfordrede Helmar og mig med vores kendskab til programmering af GIER til at undersøge, hvordan observationsmaterialet fordelte sig rent statistisk, når radioaktivitetens afhængighed af bjergartstypen blev ladet ude af betragtning.

Til at udskrive de 1400 geigermålinger på hulstrimmel fik vi ansat Poul Sørensen som studentermedhjælper for endnu en periode<sup>23</sup>. Variationen af de registrerede tællehastigheder var som forventet ret omfattende, fra mindre end 100 cpm til 2500 cpm. Med et Algol-program optalte vi antallet af målinger i et interval, hvis længde blev forøget i spring på 100 cpm, indtil intervallet kom til at indeholde det samlede antal målinger. På denne måde fik vi generet 25 eksperimentelle x-y punkter, der tilsammen dannede grundlag for en estimering af tællehastighedernes såkaldte kumulative frekvensfordeling. Den fik vi frem ved at plote punkterne på sandsynlighedspapir og dernæst matche en kurve til dem som vist på grafen i Figur 20.

Sandsynlighedspapir er karakteriseret ved, at afstandene mellem delestregerne på y-aksen er fordelt på en sådan måde, at den klokkeformede kurve for en normalfordeling kumulativt afbildes som en ret linje. Inden for nogle videnskabsgrene, deriblandt geologi og biologi, viser det sig ofte, at det er logaritmen af observationerne og ikke observationerne selv, der er normalfordelte, hvilket man påviser ud fra den rette linje, der kan tegnes gennem målepunkterne på sandsynlighedspapir, hvor delestregerne på x-aksen danner en logaritmisk skala. Det grafiske billede af en lognormal sandsynlighedsfordeling adskiller sig fra Gauss-kurven ved at være asymmetrisk med en skævhed, der favoriserer forekomsten af store positive afvigelser fra middelværdien af den stokastiske variabel.

---

23 For Poul Sørensen blev hans to midlertidige ansættelser i efteråret 1967 som studentermedhjælper i elektronikafdelingen begyndelsen til adskillige tilsvarende periodevise ansættelser gennem de følgende år, hvor han gjorde god fyldest som måleteknisk assistent på Kvanefjeld og i laboratoriet og som administrator af edb-opgaver i relation hertil. På et tidspunkt meddelte Poul, at han havde opgivet sit geologistudium i håb om at blive fast tilknyttet gruppen. Det kom Risø's administrationschef, Niels Bundgaard, for øre. Han så gerne, at Risø gav plads for ansættelse af personer, der besad kompetencer, som institutionen havde brug for, men som ikke umiddelbart passede ind i det statslige system af personalegrupper. Med denne støtte ovenfra lykkedes det at skaffe Poul en fast stilling som geologisk kyndig teknisk assistent i afdelingen.



Figur 20. John Rose holder hvil i den radiometriske opmåling af Mineområdet på kvanefjeldsplateauet foretaget med Risø's to digitale geigertællere (foto: Bjarne Leth Nielsen). Grafen viser måleværdiernes kumulative frekvensfordeling visualiseret på logaritmisk sandsynlighedspapir. Fordelingen har medianen 700 cpm og udviser et lineært forløb op til cirka 1200 cpm

Det karakteristiske ved den logaritmisk afbildede kumulative frekvensfordeling er, at cirka 80% af tællehastighederne er lokaliseret til intervallet fra 100 til 1200 cpm, og at deres kumulative frekvens (sandsynlighed) i dette interval grupperer sig pænt om en ret linje. Lige så karakteristisk er det, at den kumulative frekvens for de 20% af tællehastighederne, der overstiger 1200 cpm, udviser en vækst, der er større end indikeret af den rette linje efter ekstrapolation af denne til 2500 cpm. Disse observationer kunne tyde på, at radioaktiviteten i Mineområdet i geostatistisk henseende kan beskrives som en overlejring af mindst to sandsynlighedsfordelinger, hvoraf den ene - muligvis relevant for adskillige af bjergarterne i Mineområdet undtagen de mest radioaktive - er en lognormal fordeling. Vi havde ikke tid til at undersøge denne formodning nærmere, hvilket formentlig kunne være gjort ved at foretage den statistiske analyse med observationsmaterialet udsorteret på bjergarterne i Mineområdet, hvoraf den dominerende er mellemkornet lujavrit.

\*\*\*

Sent i 1967 kom der et nyt aspekt ind i samarbejdet mellem GGU og Risø om udforskningen af kvanefjeldsbjergarterne: Anvendelsen af laboratorie-gammaspektrometri til uran-thorium analyse af materiale i form af pulveriserede stenprøver, borekernesmuld samt hele borekerner. Hensigten hermed var at supplere de ret omstændelige spektrofotometriske analyser i Emil Sørensen's gruppe med en bekvem analysemetodik, som var baseret på det permanente udstyr i vores laboratorielokale til tælling af detektorimpulser i flere energivinduer samtidigt. Her forelå der ikke et brydsomt kalibreringsproblem som det, vi havde forsøgt at løse i feltmålinger udført med det bærbare gamma-spektrometer, idet geologisk pulvermateriale med certificerede koncentrationer af U og Th var kommercielt tilgængeligt hos den amerikanske atomenergikommission's New Brunswick Laboratory (NBL) i New Jersey<sup>24</sup>. Derfra indkøbte vi rigelige portioner af to referencematerialer, hvis certifikater lød på henholdsvis 1000 ppm U og 1010 ppm Th plus 40 ppm U. Fra vinduestællehastighederne målt med det sidstnævnte materiale blev der trukket brøkdelen 40/1000 af vinduestællehastighederne målt med det thoriumfri uran-referencemateriale.

<sup>24</sup> NBL uran- og thorium-referencematerialerne blev fremstillet gennem opblanding af præcist afmålte mængder findelt og kemisk analyseret radioaktiv bjergart i pulveriseret dunit, en ikke-radioaktiv såkaldt ultramafisk bjergart.

I felten gælder det som nævnt i det indledende afsnit, at et gammaspektrometers nettovindues-tællehastigheder er proportionale med de respektive radioelementkoncentrationer i bjergarten, hvilket hænger sammen med geologiske kilders store dimensioner udtrykt i middelvejlængder for gammafotoners passage gennem kildemediet. Sagen forholder sig anderledes ved gamma-spektrometrisk laboratorieanalyse af en mange gange mindre geologisk prøve, som kun i beskedent omfang absorberer og spreder højenergetiske fotoner. Her er det i princippet den absolutte vægtmængde af et radioelement, som er den bestemmende faktor for dets nettotællehastighed i et energivindue. Det gælder også tællehastigheden frembragt af et referencemateriale præpareret som en kalibreringsstandard af samme form og størrelse som prøven. Mens vægten af en kalibreringsstandard er bestemt én gang for alle, hører det altså med til gammaspektrometri i laboratoriet at veje de geologiske prøver for at kunne angive deres radioelementindhold som koncentrationer pr. vægtenhed prøvemateriale.

Det første U-Th gammaspektrometer, vi fik bygget fra grunden af i afdelingens værksted, er vist i Figur 21. Det var beregnet til analyse i  $4\pi$  geometri af 10-15 gram bjergartspulver hældt på en lille glasflaske med tryklåg, hvis rand blev forseget med lim, hvorefter flasken fik lov at henstå i tre uger til genvinding af radon undvejet ved knusningen og formalingen af prøvematerialet. Detekteringen af gammastrålingen fra prøverne skete med to modsat rettede 76 mm dia.  $\times$  38 mm NaI(Tl) krystaller, begge forsynet med en cirkulær brønd i endefladen, hvoraf den nederste var til indsætning af en prøve med glasflasken ragende halvvejs op.



Figur 21. Laboratorie-gammaspektrometer til uran-thorium analyse i  $4\pi$  målegeometri af 10-15 gram pulveriseret bjergart. I baggrunden på fotoet til venstre skimtes "Minen" ombygget til et gammaspektrometer, der akkommoderede en pulvermængde på 220 til 240 gram.

En måling begyndte med, at operatøren (som oftest Poul Sørensen) sænkede bæreskinneerne for den øverste krystal og dens PM-rør, indtil de to krystallers endeflader mødtes, hvorved prøven blev fuldstændigt indkapslet i hulrummet dannet af de to hinanden tilstødende brønde. Dernæst lukkede han sikkerhedsskjoldet og trykkede på startknappen for en el-motor, der trak detektorarrangementet ned i en omfangsrig ståltønde, der - ligesom det gjaldt for "Minen" beskrevet i Del 2 - var fyldt op med stålhagl til skærmning mod baggrundsstrålingen i lokalet, som i hovedsagen skyldtes små mængder thorium i betonen under laboratoriets vinylgulv. En svær blyplug øverst i det motordrevne system, der automatisk stoppede i sin bundstilling, fuldendte strålingsafskærmningen.

Den simultane tælling af impulser blev udført med to af gruppens Philips scalere (jf. Del 2) tilsluttet hver sit én-kanal analysatormodul, som henholdsvis definerede et 1,764 MeV og et 2,615 MeV energivindue. Selvom målingerne blev udført i  $4\pi$  geometri, var denne opstilling det af gruppens laboratorie-gammaspektrometre, der krævede de længste tællertider. Fra et gram uran i radiometrisk ligevægt udsendes der  $1,90 \times 10^3$  1.764-MeV fotoner pr. sekund, mens emissionen af 2,615 MeV fotoner fra et gram thorium er lidt mindre,  $1,45 \times 10^3$  fotoner pr. sekund. For en 10 grams prøve af en lavradioaktiv Ilímaussaq bjergart som naujait med et typisk indhold af omkring 10 ppm U og 25 ppm Th beløb udbyttet af de primære  $^{214}\text{Bi}$  og  $^{208}\text{Tl}$  fotoner sig således kun til henholdsvis 11 og 22 fotoner pr. minut, hvilket var tæt på de respektive detekteringsgrænser sat af baggrundsstrålingen. Den første anvendelse af  $4\pi$  gammaspektrometeret tog sigte på at analysere de nedknuste stenprøver fra det afsluttede gammaspektrometriske kalibreringseksperiment på Kvanefjeld. De spektrometriske laboratorieanalyser, kalibreret mod de to NBL uran- og thorium referencematerialer, udviste en perfekt 1:1 korrespondance med de kemiske analyser udført i kemiafdelingen.

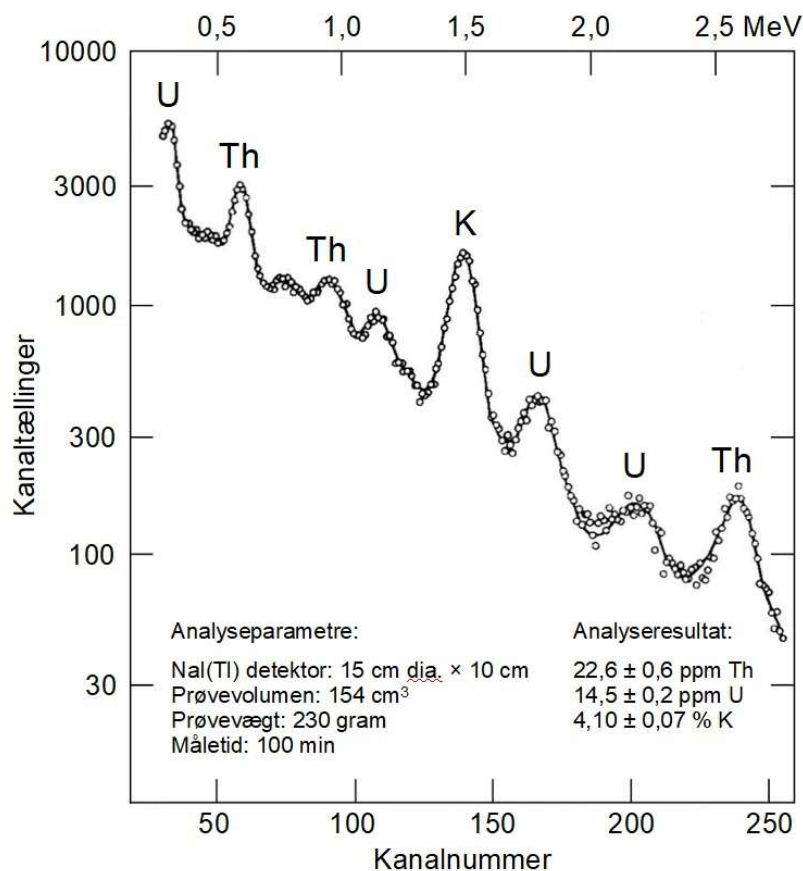
Et andet laboratorie-gammaspektrometer havde vi allerede til disposition i skikkelse af "Minen", som var den centrale bestanddel af  $4\pi$  beta-gamma koincidensopstillingen til absolutmåling af kunstigt fremstillede radioisotopers kildestyrke. Opstillingen havde stået ubenyttet hen gennem lang tid og kom næppe igen til at tjene sine oprindelige formål, herunder neutrondosimetri for fysikafdelingen baseret på bestrålede guldfolier. Vi demonterede følgelig  $4\pi$  beta proportional-tælleren og slæden til indføring af denne i det 45 millimeter høje frirum mellem de to modsat rettede 76 mm dia.  $\times$  76 mm NaI(Tl) integral-line detektorer inde i "Minen". I søgningen efter en egnet container for en passende stor portion bjergartspulver fandt vi frem til en kosmetikdåse af hård plast, som Roskilde-virksomheden NUNC producerede, og som vi anskaffede en lagerbeholdning af. Dåsen var 70 mm i tværmål og var med låget påskruet 40 mm høj, så den passede akkurat til at kunne glide ind mellem detektorkrystallerne på en indføringssslæde, der var forsynet med en cirkulær fordybning, som dåsen hvilede i. Efter påfyldning af de 220 til 240 gram pulverformige materiale, som dåserne typisk rummede, blev dåserne forsejlet med lim påsmurt lågenes skruegang hele vejen rundt og sat i tre ugers venteposition til etablering af radon-ligevægt i uran-238 henfaldskæden.<sup>25</sup> Prøvematerialet stammede overvejende fra udhamrede håndstykker, som GGU's geologer hjembragte til Dyrnæs i deres rygsække ikke blot fra Kvanefjeld, men også fra lokaliteter andre steder i Ilímaussaq komplekset. Her var bjergarternes indhold af uran og thorium normalt ret beskedne og gav derved mulighed for at medtage kalium i analyserne<sup>26</sup>. Tællersystemet blev følgelig udbygget med endnu et én-kanal analysatormodul og en tilhørende scaler til impulstælling i et kalium-vindue med centerenergien 1.461 MeV, hvormed antallet af kalibreringsligninger blev forøget fra to til tre. Som referencemateriale ved konverteringen af nettotællehastigheden i kalium-vinduet til vægtprocent kalium brugte vi kaliumklorid (KCl), der indeholder 52,45% K.

Det varede imidlertid ikke længe, inden Helmar og jeg fandt ud af at droppe tre-vindues konceptet til fordel for optagelsen af spektre i analogi med, hvad vi havde gjort i felten med det bærbare gammaspektrometer i energi-intervallet fra cirka 1,6 til 3 MeV. I laboratoriet havde vi Nuclear Data multikanalanalysatoren ved hånden, og med fraværet af den i felten fremherskende intense spredte gammaflux fik vi mulighed for at udnytte den forbedrede tællestatistik, som blev opnået ved i spektrene at medtage markante gamma-emissioner i uran og thorium henfaldskæderne, hvis energier faldt under 1,461-MeV emissionen fra kalium-40. Metoden bestod i at *fitte* tællehastighederne i et

25 Seniorforsker ved DTU Risø Campus, civilingeniør, ph.d. Sven P. Nielsen, har venligst gjort mig opmærksom på, at det ikke er trivielt at opnå radon-tæt forsejling af plastdåser. Selv erindrer jeg ikke at have oplevet signifikante uoverensstemmelser i lejlighedsvis foretaget stikprøvekontrol, hvor vi sammenlignede uran-analysetalene fremskaffet henholdsvis gammaspektrometriske og kemiske. I det i Note 27 omtalte automatisk virkende gammaspektrometer, der afløste "Minen", gik vi i øvrigt over til at bruge metalprøvedåser, som lettere end plastdåser, der bar rillet i kanten af låget, lod sig rulle ned ad en skrånstillet indføringssslidsk for dåserne.

26 Et gram kalium udsender  $3,3 \times 10^3$  1,461 MeV fotoner pr. sekund.

256-kanal spektrum af prøvematerialet med en linearkombination af spektrene af Th, U og K referencematerialerne. I denne matematiske proces fremkom de tre koefficienter i linearkombinationen som prøvens vægtindhold af de tre radioelementer. Hjælpe midlet var her Mindste Kvadraters Metode (MKM), ikke baseret på en matematisk model, men på kanaltællertallene i kalibreringsspektrene målt med ekstra god Poisson tællestatistik.



Figur 22. Th-U-K laboratorieanalyse udført ved at *fitte* prøvens gamma-spektrum (cirklerne) med en linearkombination af tre standardspektre (den optrukne kurve) genereret af referencematerialer med kendte koncentrationer af henholdsvis thorium, uran og kalium.

Figur 22 viser et eksempel på en anvendelse af metoden <sup>27</sup>, hvor jeg i spektret af den analyserede prøve har markeret de mest fremtrædende fototoppe ved at påskrive, hvilke radioelementer de repræsenterer. Isotoperne, der er kilder til toppene, fremgår af Figur 2.

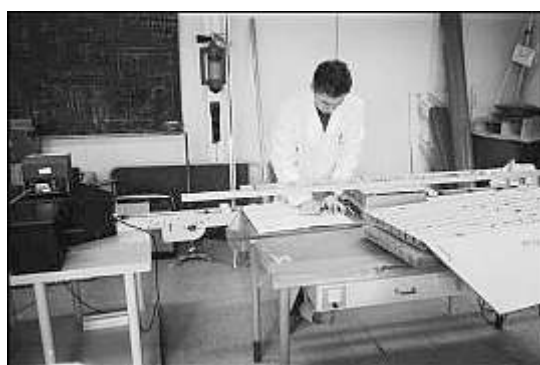
\*\*\*

Det mest spektakulære gammaspektrometer, vi udviklede i samarbejde med afdelingens værksted, var beregnet til scanning af uran og thorium i hovedparten af de 3728 meter borekerne med diametre på 42 eller 32 millimeter indvundet i de 36 diamantboringer på Kvanefjeld. Det primære formål med

<sup>27</sup> Spektret i Figur 22 stammer fra en analyse udført med et gammaspektrometer, som efter et par år afløste ”Minen” med henblik på at øge analysekapaciteten ved at forsyne måleopstillingen med en automatisk prøveskifter. Magasinet for denne var opbygget som en slidsk opdelt i skråtstillede sektioner ovenover hinanden, som prøvedåserne kunne rulle nedad og successivt blive ført til og fra en måleposition inde i en baggrundsafskærmning, der var udformet som en vandret liggende tykvægget lukket tønde af antimonbly fremstillet i Risø's centralværksted. Gammastrålingen fra en prøve blev detekteret med låget af dåsen anbragt tæt på endefladen af en horisontalt placeret 150 mm dia. × 100 mm NaI(Tl) krystal, som var foranstillet en lysleder bestående af rent NaI til undertrykkelse af <sup>40</sup>K baggrundsstrålingen fra PM-rørets glas. Opstillingen blev især anvendt til analyse af elv-sedimenter indsamlet af GGU's geologer i tilknytning til et regionalt geokemisk måleprogram i Grønland.

opstillingen var at fremskaffe et solidt datagrundlag til et forbedret estimat af uran-tonnagen i fjeldet, et måleprogram, der med yderligere scanning af 1621 meter kerne fra syv supplerende boringer i 1969 sammenlagt kom til at vare syv måneder.

Borekernescanneren (Figur 23) var opbygget omkring et stålbord, der bar opstillingens tunge afskærmningsblokke af antimonbly. Den midterste af disse var 60 cm lang og gennemskåret af en cirka 50 mm høj og bred tunnel, der i bunden var udstyret med et transportbånd til kontinuert eller trinvis fremføring af borekerne og var afskærmet mod nedefra kommende baggrundsstråling af en tyk plade af antimonbly fæstnet til undersiden af stålbordet. 256-kanal gammaspektre af borekerne blev optaget med to parallelt fungerende 51 mm dia. × 76 mm NaI(Tl) detektorer, som i deres respektive afskærmningsblokke pegede mod kernematerialet fra hver sin side via en gennemgående udboring af tunnelvæggen. I forberedelsen af et scanningsforløb blev der fra kasserne med borekerne udtaget en kernesektion typisk bestående af både sammenhængende og fraktioneret materiale, som i ordnet rækkefølge blev lagt på kanterne af en 2,5 meter lang U-vinkelprofil af aluminium. Denne var på undersiden pålimet smergellærred, så den kunne trækkes fremad som en slæde på transportbåndet i måletunnelen. Opstillingen var på begge sider vedhæftet en ligeledes 2,5 meter lang indløbs- og udløbsrende, der flugtede med tunnelen og holdt slæden ligeud rettet mellem fire par letløbende nylonhjul. Det eneste sted i laboratorielokalet, hvor der var plads til den i alt syv meter lange måleopstilling, var langs væggen ud mod gangen. Betonklodserne for vinkelmuren i hjørnet af lokalet (Del 2, Figur 7) sørgede serviceafdelingen for at tage retur (monteringen af strålingskilderne for de to beryllometre kunne lige så godt henlægges til isotoplaboratoriet), og ”Minen” fik en ny plads i den modsatte ende af lokalet.



Figur 23. Gammaspektrometer til scanning af borekerne i mellemrummet mellem to modsat rettede NaI(Tl) detektorer afskærmet med blokke af antimonbly. På fotoet øverst til højre foretager Erling Johannsen en tareret vejning af en borekernesektion, der skulle scannes kontinuerligt for at bestemme dens gennemsnitlige indhold af uran og thorium. Nederst får Erling enden af slæden, som borekernen hviler på, til at fange transportbåndet inde i opstillingen.

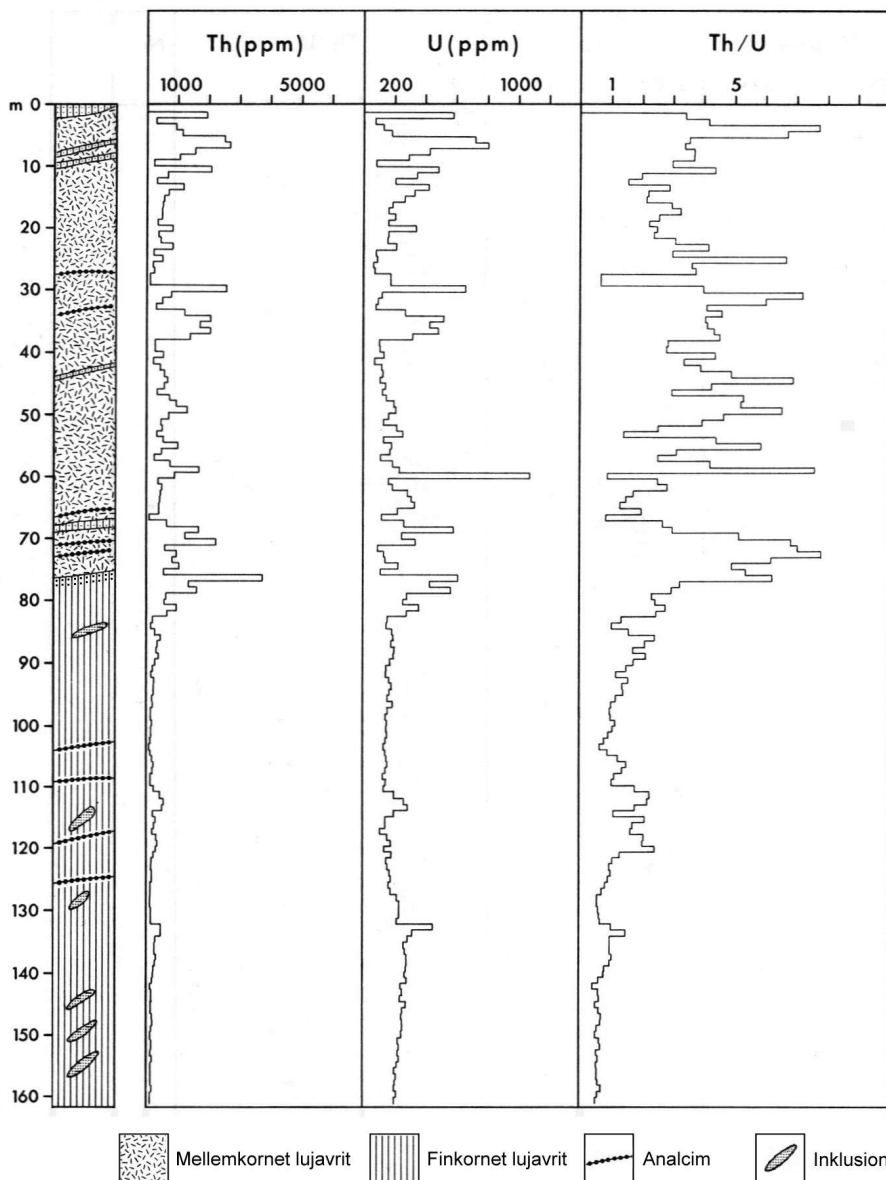
Langs de lodrette sider af slæden fandtes der to rækker modstående huller med indbyrdes afstande på fem centimeter. De blev benyttet til udvælgelse af en scanningslængde, der udgjorde et multiplum af 5 cm. Før og efter dette interval blev slæden pålagt 20-30 cm ekstra kernemateriale, som forhindrede baggrundsstråling i at trænge ind i tunnelen ved begyndelsen og slutningen af et scanningsforløb. Inde i opstillingen sad der i højde med hullerne en lyskilde på den ene side af slæden og en fotocelle på den modsatte side. Dette optiske arrangement blev benyttet til automatisk start og stop af transportbåndet. Ved trinvis scanning stod dette stille under optagelsen af spektret fra den lille del af borekernen, der befandt sig i kløften mellem de to detektorkrystaller. På et signal fra multikanalanalysatoren om at måletiden, typisk 20 eller 40 minutter, var udløbet og spektret udskrevet på hulstrimmel, startede en el-motor til hurtig fremføring af transportbåndet og stoppede igen, når fotocellen reagerede på lyset gennem det næste sæt huller i rækken, hvorved der samtidig blev sendt et signal til multikanalanalysatoren om at påbegynde en spektrumoptagelse med borekernen placeret i den nye position 5 cm længere fremme.

Kontinuert scanning blev som standard udført med borekernen indeholdt i de én meter lange rum i opbevaringskasserne. Transportbåndet blev her drevet af en jævnstrømsmotor, som førte slæden fremad med en konstant hastighed på mellem 1 og 5 centimeter pr. minut, mens spektret blev optaget. Spektret repræsenterede således kernematerialets vægtindhold af U og Th integreret over en afstand på 1 meter i borehullet, det stammede fra. Start og stop af transportbåndet med synkron påbegyndelse og afslutning af en spektrumoptagelse blev her styret af henholdsvis det første og det sidste af 21 fortløbende hul-par i fremføringsslæden med de mellemliggende huller på slædens ene side tildækket af sort tape. På den centrale afskærmningsblok stod der en blækskriver tilsluttet et count rate meter, der under fremføringen af slæden kontinuerligt registrerede den totale gamma-tællehastighed leveret af kernematerialet. Kurverne optegnet på skriverrullen benyttede Henning Sørensen og John til at udvælge borekerne i længder på op til 2,5 meter til trinvis scanning i spring på 5 centimeter for dermed at opnå et skarpt billede af uran- og thorium-koncentrationernes variationer på en skala, der understøttede opstillingen af detaljerede geologiske profiler for borehullerne. Det førte til nogle lange måletider, hvor vi lod kernescanneren køre natten over.

Th-U-K referencematerialerne benyttet til kalibrering af scanneren var de samme som i de gammaspektrometriske analyser af geologisk pulvermateriale. For at simulere borekerne med kendte radioelementkoncentrationer blev kalibreringsmaterialerne presset sammen i 25 centimeter lange tyndvæggede aluminiumsrør af samme diameter som borekernerne. Ved kontinuert scanning af en én meter lang kernesektion, der var mere eller mindre fraktioneret, blev eventuelt manglende kernemateriale taget i betragtning gennem en tareret vejning af sektionen, inden slæden blev ført ind på transportbåndet (Figur 23). Herved kunne vægten af kernematerialet omregnes til gram borekerne pr. løbende meter. Ved én gang for alle at ekstrapolere vægtene af referencematerialerne i deres metalhylstre til en længde af én meter havde vi et grundlag for at kunne opløse en kernesektionens gammaspektrum i ækvivalente gennemsnitlige radioelementkoncentrationer, kalium indbefattet som et biprodukt af MKM datareduktionsteknikken. I trinvis scanning blev kernevægten pr. meter estimeret gennem vejning af et eller flere stykker hel borekerne med udeladelse af intervaller, hvor der manglede kernemateriale eller dette var smuldret. Disse intervaller blev sprunget over i scanningen ved at sætte tape over de respektive huller i transportsælens ene side.

Så godt som alle borekerne fra Kvanefjeld blev scannet kontinuert, hvilket satte lederen af en nyetableret urangeologi-gruppe på GGU, cand.scient. Bjarne Leth Nielsen, i stand til at opstille en malmgeologisk model, som jeg beskrev i form af et Algol-program. Med dette blev kernescanningsprofilerne for urankoncentrationerne ned gennem borehullerne, hvoraf nogle af de nye var skråtstillede, projiceret ind på lodrette akser gennem borestederne, som definerede kanterne af en

serie prisme dannet ved at samle borehullerne tre og tre. Hvert prisme blev derpå tilskrevet et gennemsnitligt uranindhold ud fra koncentrationerne af uran bestemt for prismets kanter. Herefter kunne der etableres et opdateret estimat af uranressourcernes størrelse, lødighed og rumlige fordeling i et bjergartslegeme afgrænset af i alt 50 sammenhængende prisme. Inden Bjarne og jeg nåede så langt et godt stykke ind i 1970, benyttede jeg GIERs digitale plotter til fremstilling af diagrammer, der kombinerede borekernernes geologiske profiler med deres U- og Th-profiler og de deraf afledte profiler af Th/U koncentrations-forholdet. I Figur 24 viser jeg et eksempel, hvor den geologiske profil for et borehul i den nordlige del af kvanefjeldsplateauet (som blev vurderet til at indeholde fjeldets næststørste uranreserve efter Mineområdet) er nogenlunde overskuelig.



Figur 24. Geologisk profil for et borehul i den nordlige del af kvanefjeldsplateauet og de tilhørende U-Th profiler bestemt ved kontinuert gammaspektrometrisk scanning af borekernen indvundet fra hullet. Analcim: Se teksten til Figur 35.

Værtsbjergarterne for uran og thorium forekommer her i nogle særlige varianter, hvoraf den øverst liggende mellemkornede lujavrit i eksemplet strækker sig ned til en dybde af cirka 75 meter og giver anledning til store svingninger i Th/U forholdet. I overgangszonen til den underliggende finkornede lujavrit når dette op på over 7 samtidig med, at den geologiske profil udviser en stærk akkumulering

af radioaktive mineraler (markeret ved små prikker). Den finkornede lujavrit, der er præget af inklusioner af U- og Th-fattige bjergarter (naujait og oprindelig lava), er til gengæld karakteriseret ved forholdsvis lave Th/U forhold, som aftager ujævnt nedefter fra cirka 2 til under 1.

\*\*\*

Selvom det tidligere tællerlaboratorium beskrevet i Del 2 var genopstået som et geologisk analyselaboratorium baseret på gammaspektrometri af de tre naturligt forekommende radioelementer, var det anvendelsen af nuklear måleteknik i felten, der var det mest spændende for mig i gruppens samarbejde med GGU. Problemerne med at gøre de bærbare feltinstrumenter, vi havde udviklet, robuste og vandtætte var løst, men de sæsonmæssige svingninger i det sydgrønlandske vejr kunne vi ikke gardere os imod. Vinteren 1967-68 havde ligesom den foregående været ekstra kold og ledsaget af betydelige mængder sne, hvilket for andet år i træk resulterede i, at Taseq skråningen henlå dækket af udstrakte snefaner sommeren over. Så vi måtte endnu engang opgive at scanne de beryllium-mineraliserede årer på skråningen med beryllometer II. Dette sofistikerede instrument blev desværre aldrig taget systematisk i brug blandt andet fordi, der ikke var mandskab til det i de efterfølgende feltsæsoner. Erling fandt dog i sommeren 1968 et mindre snefrit område højt oppe på skråningen, hvor han tidligere sammen med to geologistuderende havde foretaget målinger med beryllometer I. Fra denne lokalitet stammer fotoet i Figur 25.

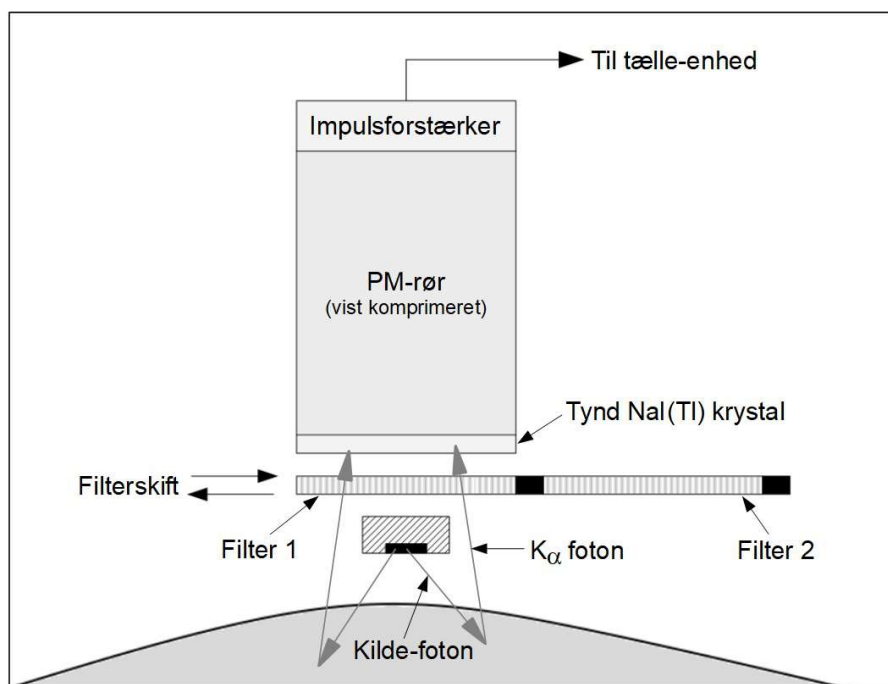


Figur 25. Prøvescanning med beryllometer II øverst på Taseq skråningen foretaget i sommeren 1968 af Erling Johannsen (bagerst) og kemiingeniør Gert Asmund, som på vegne af GGU foretog miljømæssige vurderinger af eventuel fremtidig minedrift på Kvanefjeld, der ses i baggrunden. Bemærk sneen til venstre i billedet, der ligesom i feltsæsonen for 1967 forhindrede os i at scanne langt de fleste af beryllium-mineraliseringerne på skråningen. Foto: Bjarne Leth Nielsen.

\*\*\*

Som et plaster på såret, som de forgæves bestræbelser på at tage beryllometer II i brug til andet end demonstrationsformål efterlod sig, havde vi i feltsæson 1968 held med at eftervise anvendeligheden af en målemetode til detektering af andre sjældne grundstoffer i Ilímaussaq komplekset end uran, thorium og beryllium: Udnyttelse af røntgenfluorescens (*X-ray Fluorescence*, XRF) til analyse af mineralforekomsters indhold af værdifulde metaller ved hjælp af et bærbart instrument, der måler intensiteten af den karakteristiske røntgenstråling udsendt fra et metal, når dette bestråles med røntgen- eller gammafotoner fra en radioaktiv kilde. XRF analyse var dengang først og fremmest en eksklusiv laboratoriemetode, hvor flere metaller i en geologisk prøve blev analyseret samtidigt ved

at bestråle prøven med røntgenstrålingen fra anoden i et højspændingsrør og udmåle bølglængderne af den resulterende XRF stråling med en røntgenspektrograf. Med den nye forenklede XRF målemetode, som blev udviklet af britiske geologer i begyndelsen af 1960'erne til brug ved geologisk feltarbejde, begrænser man sig til at analysere for ét specifikt metal ad gangen med en XRF probe, der exciterer og detekterer metallets hovedbidrag til dets resulterende røntgenenergisppektrum,  $K_{\alpha}$  emissionen <sup>28</sup>, hvis energi  $E_{\alpha}$  entydigt er relateret til metallets atomnummer  $Z$  <sup>29</sup>. I Figur 26 har jeg skitseret bestanddelene af en XRF probe, som vi anskaffede fra firmaet Nuclear Enterprises i Edinburgh i foråret 1968 og forsynede med nye stik, så den kunne tilsluttes den bærbare én-kanal analysator.

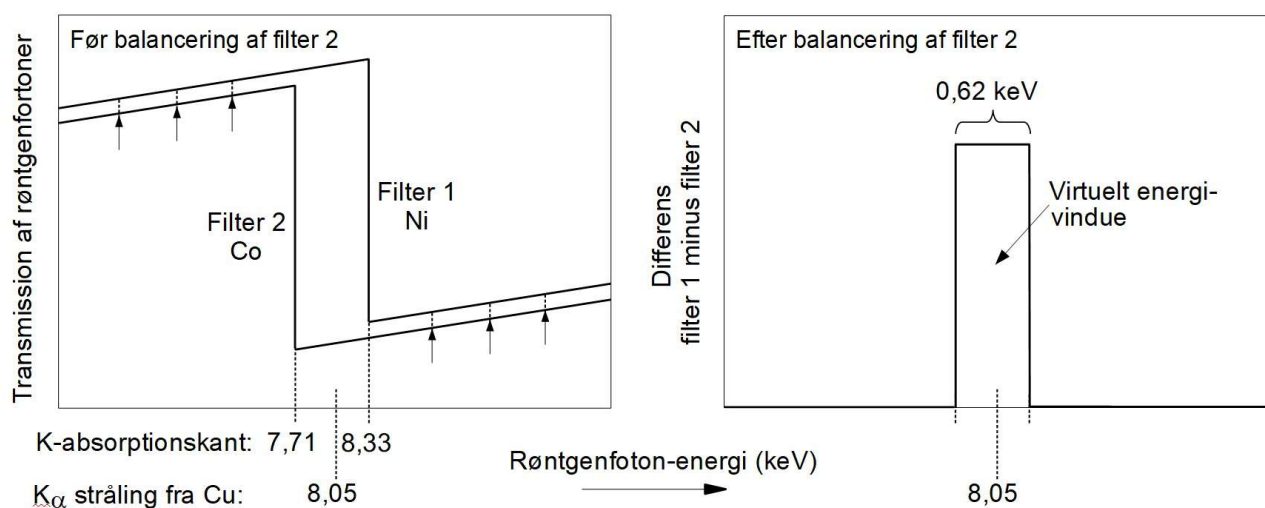


Figur 26. Principskitse af en probe til røntgenfluorescensanalyse (XRF analyse) af en bjergarts indhold af et specifikt metal med  $Z \geq$  cirka 24 gennem excitation af metallets karakteristiske  $K_{\alpha}$  røntgenstråling. Proben er beregnet til at blive presset ind mod en klippeoverflade med bestrålingskilden placeret i en metalkapsel, der forhindrer kildefotonerne i at nå direkte frem til røntgendektoren. Denne er en Na(Tl) krystal, der gennem sin tykkelse af nogle få millimeter er tilpasset detektering af røntgenfotoners lave energier. Med proben tilsluttet en ekstern scaler tælles der røntgenfoton-impulser med først det ene og så det andet af to såkaldte balancerede røntgenfiltre, 1 og 2, indskudt foran detektorkrystallen. Differensen mellem de to resulterende tællelister er et selektivt mål for intensiteten af metallets  $K_{\alpha}$  fluorescensstråling og afspejler dermed metallets koncentration i en mineralforekomst. Proben kan også vendes på hovedet og anvendes til analyse for et metal i en geologisk pulverprøve udhældt i en beholder, der har en plastfilm som bund.

28 De orbitale elektroner af grundstofferne i det periodiske system er som bekendt arrangeret i 'skaller', hvoraf den inderste, K-skallen, er hjemsted for to elektroner. Overstiger energien af fotonerne fra en bestrålingskilde bindingsenergien for en K-elektron, kastes denne med en vis sandsynlighed ud af atomet gennem den fotoelektriske effekt og efterlader dermed et 'hul' i K-skallen. Dette udfyldes straks af en af de 8 elektroner i den omkringliggende L-skalle eller, mindre sandsynligt, en af de op til 18 elektroner i den næstfølgende M-skalle. Herved udsendes der energi i form af henholdsvis såkaldt  $K_{\alpha}$  og  $K_{\beta}$  røntgenstråling, hvoraf  $K_{\alpha}$  strålingen er den mest intense og samtidig den mindst energetiske, da elektronens kvantespring fra L-skallen til K-skallen udløser mindre energi end kvantespringet fra M-skallen til K-skallen.

29  $E_{\alpha}$  øges cirka i takt med  $(Z - 1)^2$  (Moseley's lov) og er fx 5,4 keV for chrom ( $Z = 24$ ) og 75,0 keV for bly ( $Z = 82$ ).

Kendetegnet for de to røntgen-filtre i en XRF probe er deres respektive K-absorptionskanter, hvormed man forstår den pludselige forøgelse af et grundstofs massedæmpningskoefficient  $\mu_m$  for røntgenfotoner med en energi, der akkurat overskrider bindingsenergien for en K-elektron i et atom af metallet, der analyseres for (jf. Note 28). De to skitser i Figur 27 illustrerer transmissionen af røntgenfotoner gennem filter 1 og filter 2 i en XRF probe, som er opkoblet til detektering af 8,05 keV  $K_\alpha$  strålingen fra kobber (Cu) exciteret med røntgenstrålingen fra en plutonium-238 kilde. Filtrene 1 og 2 består her af tynde metalfolier af henholdsvis nikkel (Ni) og kobolt (Co), der har de respektive K-absorptionskanter 8,33 og 7,71 keV og derved tilsammen omslutter energien af  $K_\alpha$  strålingen fra kobber.



Figur 27. Transmission af røntgenfotoner gennem et nikkel og et kobolt røntgenfilter før og efter en afbalancering af kobolt-filterets tykkelse med tykkelsen af nikkel-filteret, her illustreret med de små lodrette pile. Differensen mellem antallet af fotoner, som slipper igennem filtrene hver for sig, er nul undtagen i et smalt virtuelt energivindue, der omslutter 8,05 keV  $K_\alpha$  strålingen fra kobber og dermed danner grundlag for selektiv analyse af dette metal med en XRF probe.

Da Ni ( $Z = 28$ ) og Co ( $Z = 27$ ) er nabogrundstoffer i det periodiske system, forløber kurverne, der viser stigningen i de to filters transmission af fotoner med stigende strålingsenergi, meget nær parallelt. Balanceringen af filtrene består i at bringe de to kurver til sammenfald udenfor energi-intervallet defineret af de to absorptionskanter, hvilket i dette tilfælde tænkes udført ved at ætse foliet for filter 2 ned til en mindre tykkelse. Resultatet af at balancere filter 2 mod filter 1 er, at differensen mellem de registrerede tællinger virker som en enkelttælling udført med et uhyre smalt virtuelt energivindue, her af bredden 0,62 keV og omsluttende  $K_\alpha$  strålingen fra kobber. Uden for dette interval elimineres i princippet alle  $K_\alpha$  og  $K_\beta$  emissioner exciteret af bestrålingskilden i andre metaller til stede i bjergarten, det samme gælder kildefotoner tilbagespredt fra probens omgivelser.

Medbringende den nye XRF feltinstrumentering blev Helmar med kutteren "Hartz" sejlet den lange vej fra Dyrnæs ud til den indre del af Kangerdluarssuk fjorden i det sydøstlige hjørne af Ilímaussaq komplekset (Figur 4), et kuperet klippeterræn dannet af kakortokit, der som nævnt i underteksten til Figur 4 er værtsbjergart for store forekomster af eudialyt, som er et mineral indeholdende omkring 10% zirconium og 0,5% niobium. Det er to sjældne metaller med de respektive atomnumre 40 og 41. De finder blandt andet anvendelse til fremstilling af højtemperatur-legeringer og, for zirconiums vedkommende, til indkapsling af brændselselementer for atomreaktorer. Formålet med Helmars ekskursion til området var at indsamle data til vurdering af korrelationen mellem XRF feltmålinger og kemiske analyser af de to metaller i prøvemateriale indsamlet på målelokaliteterne. Til at hjælpe sig havde Helmar en ældre geologistuderende, Henning Bohse, med speciale i områdets geologi.

Til XRF *in situ* analyse af zirconium og niobium var proben udstyret med en 1 millicurie cadmium-109 bestrålingskilde, som er en emitter af 22 keV røntgenstråling<sup>30</sup>. Det balancerede filterpar til differenzstilling af  $K_{\alpha}$  røntgenfotoner fra de to metaller var tilvirket af et specialfirma i London, der var underleverandør til Nuclear Enterprises. Til eftervisning af zirconium bestod filter 1 og filter 2 af en kemisk forbindelse af henholdsvis strontium og rubidium med K-absorptionskanterne 16,2 og 15,1 keV, der omslutter zirconium  $K_{\alpha}$  stråling med energien 15,8 keV. I filterparret for niobium med  $K_{\alpha}$  energien 16,6 keV, var filter 1 tildannet af yttrium med K-absorptionskanten 17,0 keV, mens materialet for filter 2 var strontium ligesom i filter 1 i filterparret for zirconium.

Ved sin tilbagekomst til Dyrnæs fra eudialyt-forekomsterne tog Helmar med bistand fra Erling XRF proben og én-kanal analysatoren i brug på Kvanefjeld til en afprøvning af filter-metoden anvendt til eftervisning af metaller tilhørende rækken af sjældne jordarter, der foruden lanthan med atomnummeret  $Z = 57$  omfatter 14 metaller, lanthanoiderne, med atomnumre fra  $Z = 58$  (cerium) til  $Z = 71$  (lutetium). Flere af disse metaller har unikke fysiske og kemiske egenskaber, der eksempelvis gør dem velegnede som katalysatorer og som additiver ved fremstillingen af optisk specialglas og af luminiserende materialer for elektroniske billedskærme. Bærerne af lanthan og lanthanoider i Ilímaussaq komplekset omfatter blandt andre de radioaktive mineraler steenstrupin og monazit. I kemiafdelingens forsøg med udvinding af uran fra den mellemkornede lujavrit i Kvanefjeld ved hjælp af den såkaldte flotationsmetode blev der i det resulterende koncentrat påvist et samlet indhold på 8% af syv sjældne jordarter, deriblandt lanthan og den første lanthanoide, cerium. Det geokemiske indhold af disse to metaller foreslog leverandøren af balancerede XRF filtre benyttet som et mål for en bjergarts samlede indhold af sjældne jordarter. Den anbefaling fulgte vi og fik ud over filtersættene for zirconium og niobium proben leveret med et filtersæt for lanthan + cerium. Det var tilvirket af en kemisk forbindelse af henholdsvis cæsium (filter 1, K-absorptionskant 36,0 keV) og jod (filter 2, K-absorptionskant 33,2 keV). Ved indsætning i XRF proben af en 3 millicurie americium-241 gammakilde ( $E_{\gamma} = 59,5$  keV,  $T_{1/2} = 458$  år) kunne vi herefter excitere og selektivt detektere den samlede  $K_{\alpha}$  stråling fra lanthan og cerium, der har de respektive  $K_{\alpha}$  energier 33,4 og 34,7 keV.

XRF målingerne i de to i malmgeologisk henseende mest interessante dele af Ilímaussaq komplekset, Kvanefjeld længst mod nord, hvor målingerne er illustreret i Figur 28, og det kuperede terræn i kakortokit-området længst mod syd, viste sig at korrelere godt med kemiske analyser af det indsamlede prøvematerialers indhold af henholdsvis de sjældne jordarters metaller og zirconium plus niobium. Det var imidlertid en betydelig ulempe, at der for hver måling skulle foretages to aflæsninger af analysatorens scalerpanel efterfulgt af en subtraktion af det andet tælleantal fra det første. Vi besluttede derfor at anskaffe et eksemplar af en "Mineral Analyser", som et engelsk elektronikfirma, ECKO Instruments Ltd., for nylig var begyndt at markedsføre. Den medfølgende XRF probe var identisk med den, vi besad i forvejen og havde forbundet til analysatoren, og tælle-enheden for proben udmærkede sig ved, at når tællingen med filter 1 var afsluttet og filter 2 derpå blev skudt ind foran detektorkrystallen, bevirkede et gentaget tryk på startknappen, at der blev talt baglæns, således at det afsluttende tælleantal var lig med den søgte tælleantals-differens. Dertil kom, at tælle-enheden kun vejede 3,7 kg og kunne bæres i skulderstrop under udførelsen af målingerne på de stejle klippevægge i kakortokit-området.

---

30 Cadmium-109 omdannes med en halveringstid på 1,3 år til sølv-109 gennem indfangning i atomkernen af en K-elektron. Ved denne kernefysiske proces udsender det nydannede sølvatom i analogi med røntgenfluorescens en  $K_{\alpha}$  foton med energien 22 keV, nogle få keV over K-absorptionskanten for såvel zirconium som for niobium.



Figur 28. Erling Johannsen i færd med måle den karakteristiske røntgenfluorescensstråling exciteret i de sjældne jordarters metaller lanthan og cerium i en mineral-åre på kvane fjeldsplateauet. Foto: GGU.

Til kalibrering af både den oprindelige og den nye XRF feltinstrumentering fik vi med bistand fra Institut for Petrologi og kemiafdelingen fremstillet en lille serie polerede fliser af dimensionerne  $10 \times 10 \times 1,5$  cm tildannet af værtsbjergarterne for mineraliseringerne og udrustet med kemiske estimater af deres indhold af metallerne, der blevet analyseret for i felten.



Figur 29. Landsætning inderst i Kangerdluarssuk fjorden i sommeren 1969 af nyt måleudstyr til *in situ* røntgenfluorescensanalyse af mineraliseringerne af zirconium- og niobium i det kuperede fjeldterræn i den sydlige del af Ilímaussaq komplekset. Civilingeniør Torkild Lundgaard fra kemiafdelingen bærer den engelske Mineral Analyser på sin skulder, Helmar Kundendorf har kassen med kalibreringsfliser i favnen. Foto: Bjarne Leth Nielsen.

ECKO måleudstyret blev taget i brug i kakortokit-området i feltsæson 1969 (Figur 29). På det tidspunkt havde Helmar allerede indledt en større undersøgelse, hvor dette udstyr blev benyttet til laboratorieanalyse for en stribe metaller i pulveriserede geologiske prøvematerialer med oprindelse i malmforekomster både i Grønland og andre steder i verden og stillet til rådighed af blandt andre GGU, Nordisk Mineselskab <sup>31</sup> og afdelingen for geologi ved universitetet, hvor Helmar erhvervede sin kandidatgrad i fysik, Technische Hochschule Aachen. Metallerne, der blev analyseret for i

<sup>31</sup> Nordisk Mineselskab åbnede i begyndelsen af 1950'erne en mine ved Mestersvig i det centrale Østgrønland, hvorfra der frem til 1963 blev udvundet bly, zink og molybdæn.

laboratoriet var udover zirconium, niobium og lanthan + cerium henholdsvis chrom, nikkel, kobber, zink, molybdæn og bly, hvortil der blev anskaffet seks nye filtersæt og to nye excitationsskilder<sup>32</sup>. Undersøgelsen viste, at man med dette enkle apparatur kunne bestemme malmlødheder på ned til 0,1% (1000 ppm)<sup>33</sup>.

\*\*\*

Sent på foråret 1968 indkaldte IAEA *abstracts of papers* til symposiet *The Use of Nuclear Techniques in the Prospecting and Development of Mineral Resources* til afholdelse i Buenos Aires i dagene 5. - 9. november samme år. Det var en oplagt anledning for vores gruppe, der nu havde skiftet navn til Gruppen for nuklear geofysik, at præsentere nogle af de hidtidige resultater opnået i samarbejdet med John Rose for en international forsamling af fagfæller. Kort før iværksættelsen af årets feltsæson i Dyrnæs fik vi skrevet og indsendt abstracts af to conferencebidrag med mig som førsteforfatter og John og Helmar som medforfattere. De blev begge accepteret af IAEA, således at vi efter Johns hjemkomst fra Grønland kunne gå i gang med at skrive de to *papers*. Det ene var en teknisk beskrivelse af beryllometer II, det andet omfattede en redegørelse for resultaterne af det gammaspektrometriske kalibreringseksperiment på kvanefjeldsplateauet i sommeren 1967.

Den argentinske hovedstad var et fjernt rejsemål, hvilket medførte, at vi måtte nøjes med at lade os repræsentere på symposiet af John og mig. I vores fælles rejseansøgning argumenterede vi for, at vi rejste til Buenos Aires via USA med det formål at mødes med tre amerikanske geologer. Den ene var professor John Adams ved William Marsh Rice University i Houston, hvis pionérintsats i brugen af feltgammaspektrometri havde tilskyndet mig til at konstruere en bærbar én-kanal analysator. Ham satsede vi på at mødes med sammen, de to andre forskere planlagde vi at besøge hver for sig. Det var for Johns vedkommende en geologiprofessor i Washington D.C., mens jeg lagde an på at møde en strålingsfysisk orienteret geolog ved Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) i Californien<sup>34</sup>. Harold Wollenberg hed han. Hans forskningsfelt kendte jeg fra den tidligere omtalte bog *The Natural Radiation Environment*, som han sammen med sin fysikerkollega Alan Smith havde bidraget til med et særdeles læseværdigt kapitel, "Studies in terrestrial gamma radioactivity". Det rummede en detaljeret gennemgang af almindeligt forekommende bjergarters og mineralers radioelementgeologi, hvortil kom en beskrivelse af et omfattende feltarbejde, som især var rettet mod de generelt svagt radioaktive bjergarter i området omkring San Fransisco bugten og blev udført med støtte fra et højfølsomt håndholdt scintillometer og indsamling af prøver. Analysen af prøvernes indhold af thorium, uran og kalium blev foretaget med et laboratoriegammaspektrometer, der foruden at være afskærmet med bly var omgivet af betonblokke fabrikeret af serpentinit, et ekstremt lavradioaktivt geologisk materiale tilgængeligt i området. Denne måleopstilling, hvis detekteringsgrænser var meget lave, ville jeg gerne se.

32 De to nye excitationsskilder var (1) 10 mCi plutonium-238 (alfahenfald med  $T_{1/2} = 88$  år til uran-234 ledsaget af 11 og 17 keV uran røntgenstråling) til analyse for Cr, Ni, Cu og Zn og (2) kobolt-57 ( $T_{1/2} = 272$  dage, 122 og 136 keV gammastråling) til analyse for Pb. Kilden til analyse for Mo var den samme (cadmium-109) som blev benyttet til analyse for Zr og Nb.

33 Til den fortsatte udvikling af røntgenfluorescensanalyse i laboratoriet anskaffede vi senere to halvleder-røntgendetektorer med høj energiopløsning, der gjorde det muligt ved hjælp af en ny multikanalanalysator anskaffet til formålet at bestemme intensiteterne af  $K_{\alpha}$  og  $K_{\beta}$  emissionerne fra flere samtidigt exciterede metaller i et geologisk pulvermateriale eller i et planslebet snit gennem en stenprøve. Den ene detektor bestod af en skive lithium-doperet silicium, Si(Li), og var beregnet til røntgenspektrometri af metaller med forholdsvis lave atomnumre. Den anden havde lithium-doperet germanium, Ge(Li), som detektormedium og var velegnet til XRF analyse af metaller højere oppe i det periodiske system. De krævede begge stærk nedkøling og var derfor monteret i en kryostat nedsænket i en beholder med flydende kvælstof. Disse to røntgenspektrometre blev omdrejningspunkt for Helmar Kundendorfs samarbejde med GGU og med den geologiske afdeling ved TH Aachen, hvor han i 1973 blev Dr.rer.nat. på afhandlingen "Die Isotop-Röntgenfluoreszenz Analyse und ihre Anwendung bei geochemischen Untersuchungen in Grønland" (Risø-M-1610).

34 LBL, grundlagt i 1931 af opfinderen af cyklotronen, Ernest Lawrence, er et højt estimeret overvejende fysik-orienteret amerikansk nationallaboratorium, der til dato (2024) har fostret ikke mindre end 16 nobelpristagere.

Dr. Jacobsen kom selv ned på mit kontor og meddelte mig, at AEK's forretningsudvalg havde godkendt de to rejser til Nord- og Sydamerika. Helt uventet opfordrede han mig til at udnytte forskerbesøgene i USA til at finde en amerikansk geolog til en gæsteforskerstilling, som direktionen med tilslutning fra Jens Rasmussen havde besluttet at tildele gruppen. Det faldt mig straks ind, at John Adams var den rette person at søge hjælp hos med at udpege nogle kvalificerede kandidater til stillingen.

I begyndelsen af den sidste uge af september fløj John og jeg til Washington og jeg derfra videre til San Francisco. I Berkeley på den anden side af bugten tog Harold Wollenberg imod mig på LBL som aftalt pr. telex. Han indledte med at fortælle om sit arbejde i de senere år, deriblandt undersøgelser af mikrofordelingerne af uran og thorium i radioaktive mineraler ved hjælp af fissionsspor-analyse (se Note 41), og bagefter demonstrerede han gammaspektrometeret med de lave baggrundstælle for mig. Herefter var det min tur til at fortælle om vores gruppe og dens engagement i brugen af gammaspektrometri i laboratoriet og i felten. Harold (vi var kommet på fornavn med det samme) syntes, det lød interessant, at Risø ligesom LBL var et national-laboratorium, der havde geologisk prospektering på sit forskningsprogram, og det fascinerede ham øjensynligt, at vores indsats var rettet mod radioaktive bjergarter, hvis lige man ikke finder mange steder i verden. Det fik mig spontant til at fortælle ham, at jeg var på udkig efter en amerikansk gæsteforsker. Efter nogle sekunders tavshed undskyldte han, at han lige måtte ringe og gik ind i lokalet ved siden af. Han vendte tilbage med en invitation til mig fra ham og hans hustru Jackie om at komme til middag samme aften hjemme hos dem i deres hus i Berkeley. Her afslørede Harold, at han var interesseret i gæsteforskerstillingen, og at han efter rådslagning med Jackie og med begejstret tilslutning fra deres to teenage-sønner og mindreårige datter meget gerne modtog et tilbud fra Risø om et ét-årigt danmarksophold for familien med begyndelse kort efter årsskiftet 1969/70. Det sørgede Risø's personalekontoret for, at han gjorde straks efter min tilbagekomst til Risø.

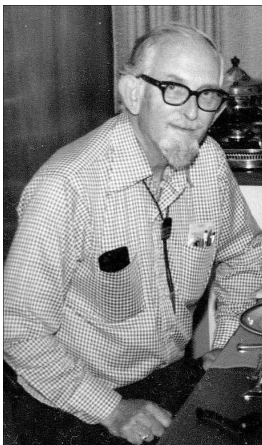
Dagen efter rejste jeg til Houston, hvor jeg fandt John på hotellet og kunne fortælle ham, at jeg i Harold Wollenberg havde fundet en gæsteforsker, som også han og GGU kunne få fagligt udbytte af at samarbejde med. Så det emne var ikke på dagsordenen ved vores fremmøde på Rice University, hvor vi i professor Adams fandt en person, der ikke lagde skjul på, at vi stod over for en prominent forsker i radioelementgeologi med et geokemisk sigte. Men han var også meget gemytlig og viste sin velvilje over for sine to skandinaviske gæster ved at krydre sine udtalelser med norske gloser, han havde erhvervet sig under geologisk feltarbejde i Norge i sine yngre dage. Jeg havde hjemmefra sendt ham en kopi af vores conferencebidrag om eksperimentet med *in situ* gammaspektrometri, så han vidste, at vores besøg var en afstikker undervejs til Buenos Aires. "We'll meet again down there" meddelte han og benyttede lejligheden til at vise os det *paper*, han ville præsentere på symposiet. Det handlede om et måleprogram udført med et gammaspektrometer, der afløste det rygbårne instrument beskrevet i *The Natural Radiation Environment* og var installeret i en helikopter, som blev fløjet i lav højde over de vidtstrakte strande langs kysten af Texas, blandt andet med henblik på påvisning af radioaktive tungsand-forekomster (*placer deposits*). Han var glad for at høre, at vi havde ladet os inspirere af hans og og Glen Fryers' foranstaltede spektrometriske kortlægning til fods af New Hampshire granitten og var tilsyneladende imponeret over, at jeg havde konstrueret en multifunktionel bærbar én-kanalanalysator bestykket med moderne integrerede kredsløbselementer. Han kunne fortælle, at han lige akkurat havde nået at få en reference med til vores kalibreringsforsøg på Kvanefjeld i en bog, *Gamma-Ray Spectrometry of Rocks*, som han havde skrevet sammen med en italiensk geolog, Paolo Gasparini.

\*\*\*

Til symposiet i Buenos Aires var der tilmeldt 63 deltagere fra 20 lande, og der var indkommet 30 skriftlige bidrag til det. Danmark var udover John og mig repræsenteret af Povl Ølgaard, der tidligere på året var blevet professor ved DTH men stadig varetog ledelsen af reaktor fysik-

afdelingen på Risø. Hans bidrag til symposiet handlede om det teoretiske grundlag for neutronsonder til måling af fugtigheden af jord. Min præsentation af beryllometer II ledsaget af lysbilleder fra Grønland var af rent teknisk karakter og forløb glat nok. Jeg vidste heldigvis endnu ikke, at instrumentet aldrig ville taget i brug som planlagt, først på grund af sne på Taseq skråningen to somre i træk, og siden fordi mere presserende opgaver kom i vejen. John havde bedt mig om også at påtage mig præsentationen af vores andet bidrag til symposiet, som var programsat under overskriften "Uranium Exploration", der var et højaktuelt emne i IAEA's støtte til medlemslandene, på symposiet markeret ved, at der var afsat tid til en paneldiskussion om uraneftersøgningsteknik.

Det satte mig på noget af en uriaspost at skulle indlede dette foredrag med en omtale af kvanefjeldsplateauets komplekse geologi, hvilket jeg imidlertid slap nogenlunde godt fra ved at holde øjenkontakt med John nede på første række i auditoriet. Det faldt mig heller ikke nemt at retfærdiggøre anvendelsen af tidskrævende scanningsteknik i kalibreringseksperimentet på Kvanefjeld, idet vi ikke havde udførlig dokumentation for, at temperaturfølsomheden af detektorens PM-rør var et alvorligt problem, der krævede energikalibrering af spektrene hver for sig. Jeg koncentrerede mig om at vise, med Figur 19 som eksempel, hvor svært det er i et udpræget heterogent geologisk miljø at foretage en nøjagtig kalibrering af et gammaspektrometers vinduestællehastigheder ved at måle dem over bjergarter, hvis U-Th koncentrationer søges estimeret ud fra laboratorieanalyse af stenprøver. Selvom jeg ikke fik spørgsmål efter foredraget, fornemmede jeg, at forsamlingen havde lyttet interesseret til, hvad jeg berettede om en speciel og for de fleste udenlandske geologer ukendt uranorium forekomst og om de logistiske og vejrsmæssige udfordringer forbundet med feltarbejde i Grønland.



Det fik jeg bekræftet aftenen efter paneldiskussionen under en sejltur på La Plata floden arrangeret af symposiets argentinske værter, da en amerikaner, Philip H. Dodd (privatfoto), der havde gjort sig stærkt gældende som debattør på symposiet, kom hen til mig og klappede mig på skulderen ledsaget af ordene "Congratulations, you did what nobody did before with a portable spectrometer." Dermed mente han øjensynligt, at vi havde været de første til at gøre forsøg på at bruge *in situ* gammaspektrometri til kortlægning af en uranforekomst med et dominerende indhold af thorium. Phil Dodd var ledende geolog ved den amerikanske atomenergikommissions *Field Office* i Grand Junction, Colorado, hvor han havde været ansat siden 1948 og indtog en central position i eftersøgningen af uran i det vestlige USA. Han var interesseret i, erklærede han, at indlede et samarbejde med en yngre forsker som mig, der havde praktisk erfaring med konstruktion og anvendelse af

alsidigt og robust radiometrisk feltmåleudstyr. Resultatet af Phil Dodds henvendelse til mig i Buenos Aires blev et mangeårigt fagligt makkerskab og personligt venskab, hvor vi skrev sammen og jævnligt mødtes mange steder i verden, foruden i Grand Junction og på Risø ved konferencer navnlig i USA og på ekspertmøder hos IAEA i Wien.

En anden markant bidragsyder til symposiet, som jeg her mødte for første gang og siden kom til at arbejde sammen med i IAEA regi, var dr. A.G. Darnley fra Geological Survey of Canada (GSC). Hans faglige domæne var luftbåren uranprospektering, som han i sit foredrag illustrerede med de første erfaringer gjort med et gammaspektrometer, der var udstyret med et samlet NaI(Tl) detektorvolumen på ikke mindre end 50 liter og blev fløjet i et fastvinget fly i 120 meters højde med en jordhastighed på 190 km/h. I 1968 var regional uraneftersøgning i Grønland foretaget med fastvingede fly endnu ikke aktuelt, det blev det først flere år senere under ledelse af Bjarne Leth Nielsen med vores gruppe som den teknisk ansvarlige instans. De velargumenterede betragtninger fremsat af dr. Darnley om det tællestatistiske og geologiske grundlag for design af højfølsomme

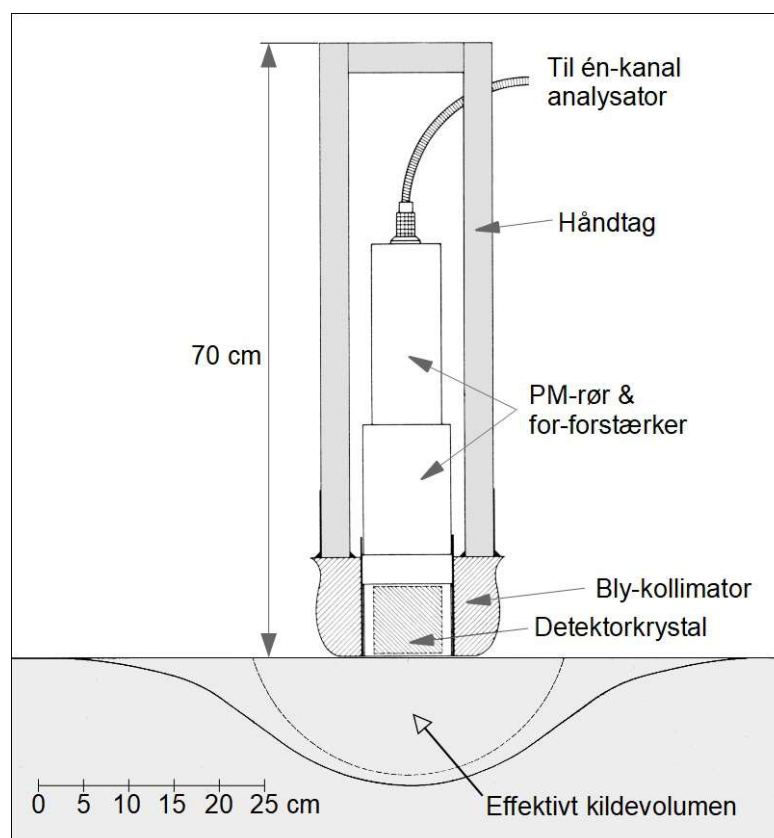
flyspektrometre virkede meget overbevisende, og der var især én ting i hans foredrag, som fik mig til at spærre øjnene op: Bestemmelse af et gammaspektrometers strip- og følsomhedsfaktorer udført på de plane overflader af kunstige geologiske kilder i form af beton-kalibreringsplatforme (*concrete calibration pads*) fremstillet af sand-cementblandinger, der var tilsat homogent fordelte radioaktive mineraler, som forsynede blandingerne med kendte koncentrationer af uran, thorium og kalium. Til kalibrering af det canadiske flyspektrometers vinduestællehastigheder i ppm eU, ppm Th og % K for det overfløjne terræn havde GSC i Uplands Airport nær Ottawa etableret fem  $7,6 \times 7,6$  meter store og 50 centimeter tykke betonplatforme. Med flyet parkeret successivt på disse kunne der ud fra vinduestællene foretages en udregning af spektrometerets kalibreringskonstanter i jordhøjde. Den under flyvningerne optrædende spredning og absorption af den terrestriske gammastråling i luften under flyet blev der kompenseret for ved at udnytte, at tællertallene med rimelig god tilnærmelse havde vist sig at aftage eksponentielt med flyets højde over terrænet målt med et radar-altimeter. For John og mig var det en interessant nyhed, at GSC også rådede over industrielt fremstillede prototyper af bærbare vinduesspektrometre. Disse blev kalibreret på betonplatforme, hvis tværmål var reduceret til 3 meter, og anvendt til kontrol af radioelementkoncentrationerne målt i flyvninger over udvalgte såkaldte *test strips*. Det slog mig straks, at det var den slags relativt små kalibreringsplatforme, vi behøvede for at kunne udføre rimeligt nøjagtige *in situ* analyser af U og Th i kvanefjeldsbjergarterne. Hvordan den opgave skulle løses, talte John og jeg en del om på flyrejsen hjem fra Buenos Aires.

\*\*\*

I kalibreringsligningerne på side 24 for vores eget bærbare gammaspektrometer var det imidlertid ikke tilstrækkeligt at forbedre nøjagtigheden af stripfaktoren  $\alpha$  og de to følsomhedsfaktorer  $\{s_U, s_T\}$ , hvis vi ikke samtidig reducerede rumvinklen  $\Omega = 2\pi$ , som gammafotonerne blev detekteret med i det nu afrapporterede kalibreringeksperiment. I dette havde de stærkt varierende strålingsintensiteter på kvanefjeldsplateauet i uacceptabel grad svækket korrelationen på målestederne mellem på den ene side de kemiske koncentrationer af U og Th i bjergarterne og på den anden side nettotællertallene navnlig i uran-vinduet men også i thorium-vinduet (Figur 19). Der var ingen vej udenom: Vi blev nødt til at forsyne NaI(Tl) detektorkrystallen med en ringformet kollimator af bly. Dermed ville vi opnå en ønskværdig indsnævring af arealet under detektoren, der leverede den overvejende del af vinduestællingerne, til gengæld ville detektoren blive tung at bære rundt med. Indretningen af den nye detektor, som Erling og jeg konstruerede i samarbejde med værkstedet, er vist i Figur 30 på næste side, der også forklarer virkemåden af blykollimatoren med reference til begrebet 'effektivt kildevolumen' (voluminet under detektoren, som er geostatistisk ækvivalent med en fysisk prøve af kildematerialet, der udfylder dette volumen, jf. det indledende afsnit om *in situ* gammaspektrometri, herunder Figur 7).

Grundlaget for konstruktionen var en almindelig køkkengryde af rustfri stål, som i bunden blev påsvejet et lodret metalrør til indsætning af en 76 mm dia.  $\times$  76 mm NaI(Tl) scintillationsdetektor af integralline typen (jf. Del 2, Note 11). Den kompenserede for tabet i tællehastighed forårsaget af blykollimatoren og havde en bedre energiopløsning end 51 mm dia.  $\times$  51 mm NaI(Tl) detektoren i førsteversionen af feltgammaspektrometeret. Kollimatoren fremstillede vi ved at hælde flydende bly i det cirka 5 cm brede mellemrum mellem indsætningsrøret for detektoren og grydens indervæg. Til kanten af gryden blev der svejset et 70 cm højt stålhåndtag, der gjorde det nemt at flytte den 36 kg tunge konstruktion med et beskedent løft og holde den i måleposition på en skrå klippeoverflade.

Det var en selvfølge, at måleprogrammet for felt sæsonen i 1969 ikke som i kalibreringseksperimentet skulle baseres på tidsrøvende scanningspektrometri begrundet i muligheden for hjemme i laboratoriet at kunne opdage og neutralisere temperaturdrift af målesystemet. I stedet udbyggede Erling og jeg analysatoren med et 300 keV bredt elektronisk energivindue, som ved



Figur 30. Den kollimerede spektrometri-detektor vist i kontakt med et hypotetisk plant og homogent bjergartsmedium indeholdende jævnt fordelt thorium. Det resulterende effektive kildevolumen afgrænses stort set af en kugleflade, der har centrum i midtpunktet af detektorkrystallen og afsnører et cirkelformet måleareal med en diameter på cirka 35 cm. Uden kollimatoren ville det effektive kildevolumen afgrænses af den skålformede kurve, som berører mediets grænseflade i en cirkel med et tværmål på omkring 75 cm. Kollimatoren bevirkede således, at målearealet blev gjort knap 5 gange mindre til forbedring af feltgammaspktrometerets longitudinale opløsningsevne.

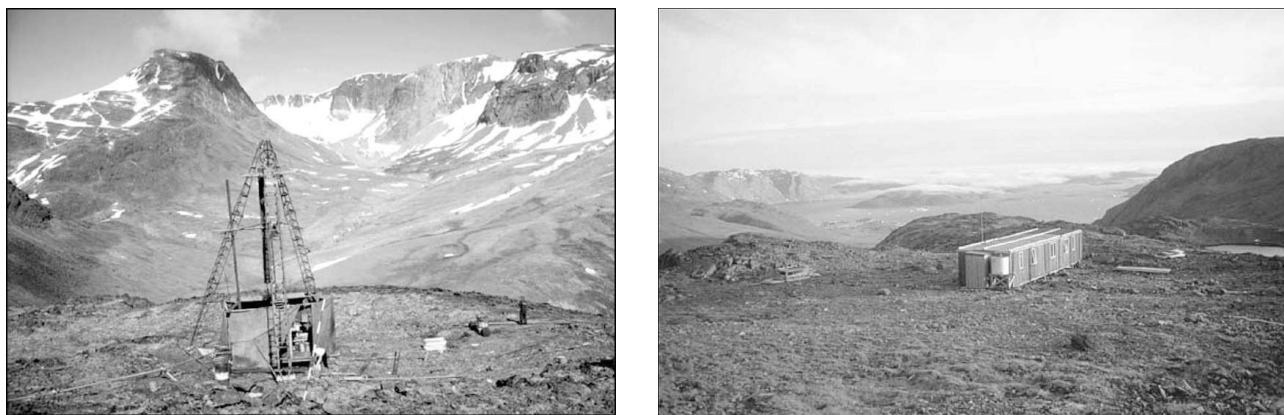
hjælp af en omskifter på forpladen successivt kunne indskydes som et thorium- og et uran-vindue henholdsvis med de nedre grænser 2,45 og 1,65 MeV <sup>35</sup>. Den resulterende kraftige reduktion af måletiden på feltlokaliteterne kunne så, igen ved at indkredse 2,615 eller 1,764 MeV fototoppen med analysatorens count rate meter, udnyttes til at energikalibrere måleopstillingen med jævne mellemrum.

Konstruktionen af den kollimerede detektor og udmålingen af dens vinkelkarakteristik krævede sin tid, det samme gjaldt modifikationen af analysatoren og de indledende forsøg med den nyanskaffede ECKO Mineral Analyser til XRF analyse af sjældne metaller i Ilímaussaq kompleksets bjergarter. Hertil kom, at Erling og Poul var travlt optaget af at scanne borekerner. Vi besluttede derfor at udsætte dimensioneringen og tilvirkningen af de to planlagte betonkalibreringsplatforme, hvilket medførte, at datamaterialet fra det gammaspktrometriske måleprogram for sommeren 1969 først ville kunne bearbejdes endeligt engang til efteråret.

\*\*\*

<sup>35</sup> Da kollimatoren forhindrede spredt gammastråling fra et målesteds omgivelser i at nå frem til detektoren, var det ikke længere nødvendigt at give uran-vinduet en asymmetrisk placering, der bortskar den venstre flanke af 1,764 MeV fototoppen, jf. Figur 18.

Det særlige ved felt sæson 1969 var, at den begyndte allerede i maj med de tidligere nævnte syv ekstra kerneboringer på Kvanefjeld, hvis positioner blev udpeget af GGU i samråd med Henning Sørensen, som repræsenterede den overordnede geologiske fagkendskab i en ny evaluering af uranressourcerne. Logistikken involveret i udførelsen af borerigerne stod Bjarne for, herunder helikoptertransport op til plateauet af boreriggeren og borerørene og af delene til et rummeligt træhus, som boreholdet kunne bo i, ligesom tovbanen blev retableret og sat i drift efter en årelang pause. De to fotos i Figur 31 har jeg lånt fra en meget læseværdig artikel, som Henning Sørensen skrev om Grønlands uran og thorium i Tidsskriftet Grønland 4-5, 2008.



Figur 31. Borerig på Kvanefjeld i 1969 og huset til indkvartering af boreholdet.  
Fotos: Henning Sørensen.

Det stod på forhånd klart, at der til det efterfølgende feltarbejde skulle anskaffes udstyr til gammalogning af de nye borehuller, mens de endnu var åbne hele vejen ned. Her kom det på tværs, at vores selvkonstruerede borehulssonde var beregnet til punktvis logning af geologiske overgangszoner og kun var forsynet med 80 meter kabel. Fra min korrespondance med Phil Dodd vidste jeg, at i den amerikanske uranindustri var borehulslogning den primært benyttede teknik til evaluering af prøveboringer, og at der omkring det nationale geologiske servicecenter i Grand Junction var opstået flere mindre elektronikfirmaer, der fremstillede prospekteringsgrej, deriblandt udstyr til gammalogning med kontinuerlig optegning af tællehastighederne på en blækskriver. Jeg skrev til Phil og bad ham om at udpege en leverandør, der kunne påtage sig at fremstille en gammasonde, der akkommoderede 50 mm borehuller og var forsynet med mindst 200 meter kabel. Phil anbefalede en mindre virksomhed, Mount Sopris hed den, som Risø indgik en købsaftale med om levering af et bærbart loggeudstyr, hvor højspændingsgeneratoren for NaI(Tl) detektoren i borehulssonden var indbygget i sonden, som derved kunne nedsænkes til bunden af et borehul med et tyndt, stålarmert kabel, der var 1000 fod (305 meter) langt. Det blev aftalt med firmaet, at udstyret skulle sendes til KGH (Den Kongelige Grønlandske Handel) i Narssaq med forventet ankomst medio juni.

Jeg skrev også til Harold Wollenberg og inviterede ham på vegne af GGU til at overvære den første halve snes dage af Risø's medvirken til sommerens feltarbejde på Kvanefjeld. Dermed ville han få lejlighed til at stifte bekendtskab med måleinstrumenterne og det komplekse geologiske miljø, de blev anvendt i, hvilket både han og vi ville få gavn af, når han syv måneder senere tiltrådte som gæsteforsker i gruppen. Dette tilbud, der også ville være en god anledning for Harold til at møde sine to danske geologkolleger, John og Bjarne, lod han ikke gå fra sig. Med på Risø's felthold denne sommer var som i de to foregående år Helmar, Poul og jeg, mens Erling blev hjemme for at færdiggøre scanningen af de tidligere indvundne borekerner fra Kvanefjeld, inden der kom nye til. Han blev ligesom i 1967 erstattet af laboratoriemekaniker Aage Christensen. Harold stødte til os i Reykjavik. På sejlturen fra Narssarsuak til Narssaq var han dybt fascineret af de nøgne farverige fjeldsider i Tunugdliarfik fjorden, som jeg selv havde været det på min første rejse til Grønland.

Dagen efter vores ankomst til Dyrnæs sidst i juni blev Helmar sammen med Torkild Lundgaard, der som ekspert i boreteknik havde overvåget de nu afsluttede nye prøveboringer, sejlet ud til det fjerntliggende kakortokit-område for at påbegynde XRF målinger af zirconium og niobium med den engelske Mineral Analyser (Figur 29). Jeg havde regnet med, at Mount Sopris loggeudstyret stod parat til os, men det var endnu ikke blevet modtaget hos KGH. Dette var penibelt, for jeg havde lovet Harold, at han under sit korte besøg ville få lejlighed til at logge et 200 meter dybt borehul og tage den resulterende udskrift med sig hjem som et eksempel på de vertikale variationer i kvanefjeldsbjergarternes radioaktivitet. Udstyret ankom endelig to dage inden Harold's hjemrejse - det var ved en fejl hos SAS blevet fløjet til Søndre Strømfjord og derpå sendt ned til Narssaq med en kutter, der flere dage havde siddet fast i pakisen i Davidsstrædet.

For at udnytte de mange timer med dagslys på Kvanefjeld flyttede Poul ind i det møblerede hus, hvor der var strøm til madlavning og opladning af batterier fra en udendørs placeret generator, og hvor han benyttede dage med dårligt vejr til at ordne sine måledata og planlægge indsamlingen af nye. Da jeg rejste hjem fra Dyrnæs en uge efter Harold, havde Poul og Aage logget de syv nye borehuller og opnået rutine i at håndtere det opgradede gammaspectrometer (Figur 32).



Figur 32. Poul Sørensen henholdsvis i gang med at logge et borehul og foretage vinduestællinger med den nye version af feltgammaspectrometret. Foto: GGU.

Det spektrometriske måleprogram, som Henning Sørensen og John havde udarbejdet sammen med Bjarne, tog primært sigte på at fremskaffe et malmgeologisk supplement til det store eksperimentelle materiale, der var under opbygning i form af borekernescanning, kemisk analyse og til dels også borehullslogning. Det betød, at målingerne udelukkende skulle foretages på de af kvanefjeldsbjergarterne, som var markant radioaktive og dermed gjorde det favorabelt at inkludere dem i vurderingen af uran og thorium ressourcerne fordelt på bjergartstyper. Dem var der ni af i måleprogrammet, eksponeret i arealer, der var op til nogle hundrede kvadratmeter store. Seks af arealerne repræsenterede hver sin karakteristiske variant af mellem- og finkornet lujavrit, mens de tre andre bestod af blandingsbjergarter af forskellig mineralogisk sammensætning. I hvert areal blev der udlagt et virtuelt geodætisk gitter med en maskestørrelse på  $1 \times 1$  meter til definition af målesteder, hvor bjergarten var blottet i et område med et tværmål på mindst en meter. De fleste af målingerne klarede Poul på egen hånd med assistance fra studentermedhjælpere til at bære kollimator-gryden og analysatoren, der tilsammen vejede 59 kilo, ud til målearealerne, hvoraf de fire lå 800-900 meter fra huset.

Mens det i kalibreringseksperimentet to år tidligere havde været omkring en halv time at scanne den øverste halvdel af gammaspectret på en målelokalitet med jævnt store koncentrationer af U og Th i bjergarten, så gik det nu anderledes hurtigt at få leveret tællertallene færdigt opsummerede i de to

energivinduer, hvilket satte Poul i stand til at foretage op til 100 målinger om dagen. Han var instrueret om at foretage en energikalibrering af udstyret lige før dagens første måling plus adskillige gange løbet af dagen i trit med variationerne i lufttemperaturen. Gennem feltsæsonen blev der i alt udført 1666 enkeltmålinger med det opgraderede feltgammaspæktrometer.

\*\*\*

Da jeg efter sommerferien gik i gang med planlægningen af en uran og en thorium kalibreringsplatform for udstyret, var det med udgangspunkt i, at betonen, de bestod af, takket være kollimatoren kun behøvede være omkring 1 meter i diameter og 30-40 cm tykke for at simulere et halvueligt kildemedium. Mount Sopris loggeudstyrets to følsomhedsfaktorer  $S_U$  og  $S_T$  - tællehastighederne pr. ppm eU og pr. ppm Th med sonden nedsænket i et borehul<sup>36</sup> - kendte jeg allerede. Dem havde Phil Dodd sørget for at fremskaffe, inden udstyret blev sendt til Grønland, via logning af borehuller, såkaldte *model drillholes*, disponible på servicecentret i Grand Junction. Jeg syntes, det kunne være interessant at udvikle en ganske simpel kalibreringsfacilitet for borehuls-sonden ved at gøre de planlagte betonplatforme 1 meter tykke og lade dem figurere som fritstående cylindriske blokke. Herved blev der mulighed for at udstyre disse med et skrånstillet 50 mm rør, der gennemskar sidefladerne for dermed at simulere borehuller med eller uden vand i røret. Prøvestenen for denne idé var, om vi med 13 mm dia.  $\times$  38 mm NaI(Tl) detektoren i Mount Sopris sonden placeret i centrum af blokkene kunne reproducere udstyrets  $S_U$  og  $S_T$  evalueret i Grand Junction.

Fremstilling og støbning af beton var ikke noget, jeg havde forstand på, så jeg henvendte mig til driftsleder Jens Jensen i Risø's serviceafdeling, hvor der blev fabrikeret store betonklodser til afskærmning af stærke strålingskilder, jf. den nu fjernede mur af betonklodser i hjørnet af vores laboratorielokale. Han foreslog at konstruere de to kalibreringsblokke ved at stampe betonmassen ned i to forme, hver bestående af et lodret stillet 1 m dia.  $\times$  1 m kloakrørs-ring, samt at fremstille betonen efter den samme recept, som blev benyttet til støbning af afskærmningsklodser: 15% portlandcement, 57% nedknust tungspat, 24% sand og 4% vand. I betonrecepten for kalibreringsblokkene blev der skaffet plads for de radioaktive ingredienser gennem en mindre reduktion af mængden af tungspat. Dette mineral, også kaldet baryt, er i kemisk henseende bariumsulfat ( $BaSO_4$ ). I kraft af sin høje vægtfylde på 4,48 g/cm<sup>3</sup> forbedrede dette materiale absorptionen af gammastråling i afskærmningsklodserne og ville som hovedbestanddel af betonmassen for de fritstående kalibreringsblokke gøre disse ekstra solide i tilgift til, at den lille procentdel vand indgående i recepten ville formindske blokkenes porevolumen.

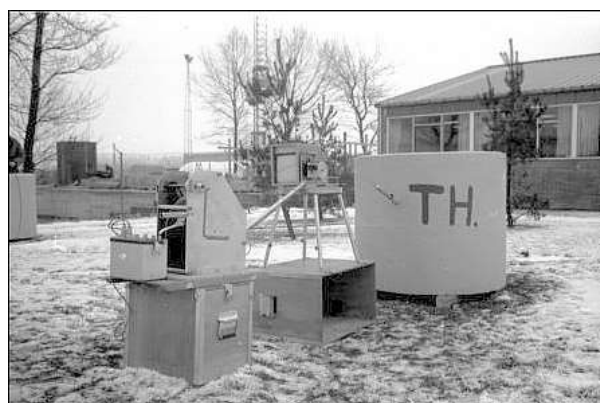
I anvendelsen af blokkenes plane overflader til måling af feltgammaspæktrometerets vindues-tællehastigheder udnyttede vi, at værdierne af betons massedæmpningskoefficient  $\mu_m$  ved energierne 2,615 og 1,764 MeV med god tilnærmelse reproducerer værdierne gældende for en massiv bjergart som lujavrit. Den strålingsfysiske baggrund er her, at  $\mu_m$  i energi-intervallet fra  $\sim$ 1 til 3 MeV overvejende kan henføres til Compton-spredning i kildemediet. Som omtalt i det indledende afsnit er spredningsbidraget til  $\mu_m$  proportionalt med antallet af orbitale elektroner pr. gram af mediet udtrykt ved den gennemsnitlige værdi  $\overline{Z/A}$  af forholdet mellem atomnummeret  $Z$  og atomvægten  $A$  for grundstofferne til stede i mediet. I Note 6 blev det forklaret, at  $Z/A$  meget nær er lig med 0,5 for de lette grundstoffer, som de fleste bjergarter typisk er opbygget af. Ved at fremstille blokkene af barytbeton for at gøre dem kompakte og stærke ville man måske forvente, at et tungt grundstof som barium med  $Z = 56$  og  $A = 137,3$ , dvs.  $Z/A = 0,408$ , ville trække  $\overline{Z/A}$  for betonen mærkbart ned, men det var ikke tilfældet, fordi de mange lette grundstoffer i blandingen, herunder oxygen med  $Z/A$  eksakt lig med 0,5, trak den anden vej. En kursorisk beregning antydede, at selv med cirka 55%

<sup>36</sup> Jeg bruger et stort 'S' til at betegne følsomhedsfaktorerne for totaltællingsinstrumenter som geigertællere, håndholdte scintillometre og - som her aktuelt - en borehulssonde for dermed at undgå forveksling med det lille 's' benyttet til karakterisering af følsomhedsfaktorerne for et feltgammaspæktrometers energivinduer.

BaSO<sub>4</sub> i betonen blev  $\overline{Z/A}$  for denne højst reduceret med et par procent.

Fabrikationen af de to kalibreringsblokke tog serviceafdelingen sig af. Erling og Poul havde forinden iblandet henholdsvis 600 gram *yellowcake* (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) med 9,6% U og 1100 gram thorit ((Th,U)SiO<sub>4</sub>) med 4800 ppm Th og 215 ppm U i de 330 kilo portlandcement, der medgik til fremstilling af hver af blokkene<sup>37</sup>. Det lod sig gøre portionsvis med en blandingsmaskine ovre i kemiafdelingen. Under stampningen af betonblandingerne i deres cylindriske forme tog vi prøver, som blev presset ned i en serie af de plastdåser, vi benyttede til laboratorie-gammaspektrometri af geologisk prøvemateriale med detektorerne i ”Minen”. Med denne blev betonprøverne efter forsegling af dåserne og en ventetid på tre uger analyseret for U og Th. Herefter kunne radioelementkoncentrationerne i betonen estimeres til 252 ± 4 ppm U og 4,6 ppm Th for U-blokken samt 142 ± 3 ppm Th og 12,4 ± 0,6 ppm U for Th-blokken. Det analytiske grundlag for anvendelsen af blokkene til kalibrering af feltgammaspektrometeret og borehulssonden var således de certificerede U og Th koncentrationer i de tidligere beskrevne NBL referencematerialer.

I slutningen af september blev pallerne med de færdige blokke kørt hen på græsset vest for kemiafdelingen, hvor de henstod i en måned, så betonen kunne affugte og hærde. Eftersom finkornet U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> er en heftig radon-emanator, blev U-blokken, og for fuldstændigheds skyld også Th-blokken, påført et lag udendørs lak, som vi håbede ville sikre radon ligevægt i betonen efter tre ugers yderligere ventetid. Da vi sidst i november omsider fik udført kalibreringsmålingerne, var det så småt blevet vinter (Figur 33).



Figur 33. Den kollimerede detektor for feltgammaspektrometeret i kalibreringsposition på toppen af U-betonblokken og sonden for loggeudstyret indsat i røret gennem Th-betonblokken.

\*\*\*

Nu havde vi et solidt grundlag for, temmelig sent ganske vist, at kunne omregne de mange vindues-tælleletal fra den systematiske opmåling af ni udvalgte arealer på Kvanefjeld udført med det modificerede feltgammaspektrometer. Med de to betonblokke anvendt som kalibreringsplatforme for den kollimerede 76 mm dia. × 76 mm NaI(Tl) detektor kom jeg frem til omstående estimer af spektrometerets kalibreringskonstanter, idet jeg i kalibreringsligningen for thorium-vinduet (Figur 2) valgte at medtage stripfaktoren  $\delta$ , som beskriver det lille bidrag til tællehastigheden i thorium-vinduet fra den svage <sup>214</sup>Bi emission med energien 2,204 MeV:

37 De 600 gram yellowcake - oparbejdet uranmalm - fik vi af Emil Sørensen, som på et tidspunkt havde anskaffet nogle kilo af dette nukleare råmateriale fra produktionsanlægget hos Eldorado Mining Company i det nordlige Saskatchewan, Canada. Thoritten stammede fra GGU's store samling af mineraler fra Ilímaussaq komplekset.

$$s_T = 2,08 \pm 0,05 \text{ cpm pr. ppm Th}$$

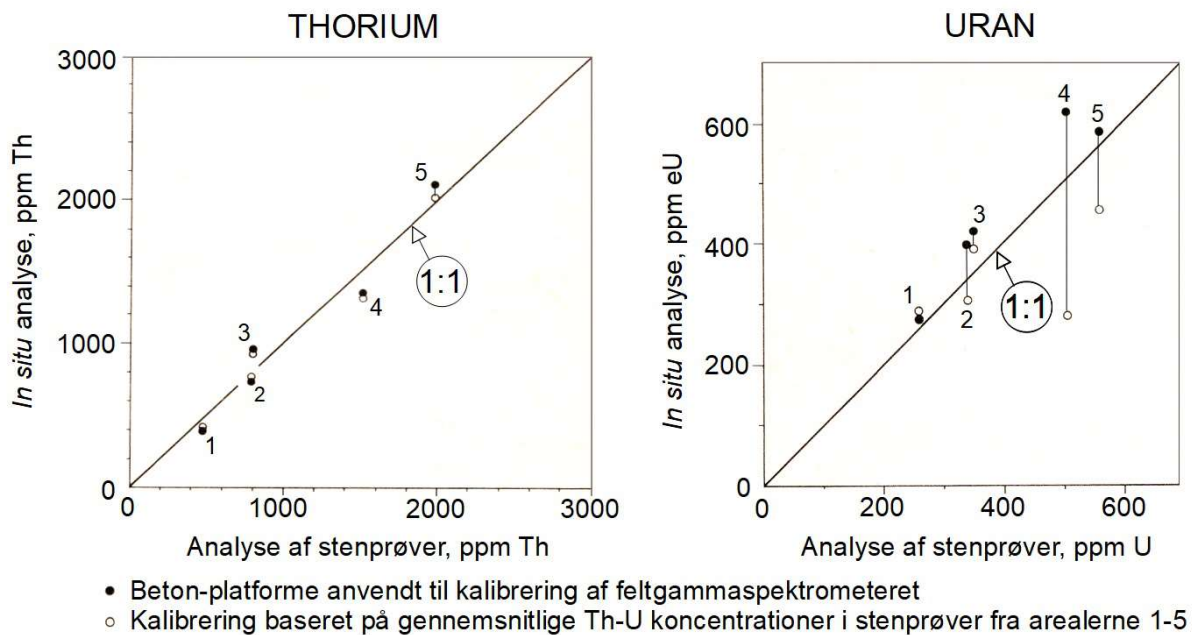
$$s_U = 6,00 \pm 0,10 \text{ cpm pr. ppm eU}$$

$$\alpha = 0,94 \pm 0,03$$

$$\delta = 0,032 \pm 0,008.$$

Generelt var der tale om en markant forbedring af kalibreringskonstanterne øverst på side 26 udledt for den uafskærmede 51 mm dia. × 51 mm NaI(Tl) detektor på grundlag af indsamling og analyse af stenprøver. Kalibreringsmålingerne på betonblokkene viste således, at bly-kollimatoren for den nye detektor i kombination med dennes større krystalvolumen ikke alene øgede følsomhedsfaktoren  $s_U$  i uranvinduet med over 80%, men også - hvad der var nok så vigtigt - reducerede den relative standardafvigelse for denne kalibreringskonstant fra dramatiske 40% til cirka 2%. Hertil kom en gunstig reduktion af stripfaktoren  $\alpha$  for uran-vinduet fra 1,5 til 0,94.

I det indledende afsnit bemærkede jeg, at fysisk prøvetagning i begrænset omfang altid er på sin plads i gammaspektrometriske måleprogrammer med henblik på at verificere gyldigheden af *in situ* radioelementkoncentrationer målt med et kalibreret gammaspektrometer. Den rettesnor fulgte vi, idet Poul supplerede et mindre antal af sine målinger i fem af de udvalgte kvanefjeldsarealer med indsamling af stenprøver, 51 i alt, der senere blev analyseret for Th og U i ”Minen”. Derved kunne vi tilskrive hvert af disse arealer gennemsnitlige koncentrationer af de to radioelementer til brug i en interimistisk instrumentkalibrering, der modsvarede kalibreringen udført med de to betonblokke. I Figur 34 er der foretaget en sammenligning mellem de gennemsnitlige thorium og uran koncentrationer bestemt med de to kalibreringsmetoder hver for sig.



Figur 34. Diagrammer til test af feltgammaspektrometerets kalibrering udført med de to betonblokke.

For thoriums vedkommende ligger de to sæt datapunkter tæt sammen med en ligelig fordelt og beskeden fælles spredning omkring 1:1 linjen, hvilket bekræfter, at kalibreringen udført med Th-betonblokken var til at stole på. En tilsvarende verifikation gældende for U-betonblokken afstod vi fra at gennemføre til trods for, at punktparrene for arealerne 1 og 3 er næsten sammenfaldende: Punktparrene for de tre andre arealer udviser en stor indbyrdes spredning omkring 1:1 linjen. Det manifesterer sig især i arealerne 4 og 5, som var de mest uran-holdige samtidig med, at U-koncentrationerne i dem var udpræget heterogent fordelt, se konturkortet for et udsnit af areal 5 i Figur 35 (side 51).

Forsøget på at kalibrere loggeudstyret med sonden indsat i røret gennem betonblokkene faldt ikke heldigt ud, eftersom de målte værdier af  $S_U$  og  $S_T$  viste sig at være betydeligt mindre - præcis hvor meget mindre husker jeg ikke - end værdierne målt i borehulsmodellerne i Grand Junction, henholdsvis 2,2 cps pr. ppm eU og 0,8 cps pr. ppm Th. Få dage efter at jeg havde konstateret denne diskrepans, kom Phil Dodd for første gang på besøg på Risø. Han og jeg blev hurtigt enige om, at årsagen til afvigelsen mellem de to sæt data måtte tilskrives den store mængde baryt indeholdt i kalibreringsblokkene i forbindelse med, at udstyret var designet til tælling af impulser med en minimumshøjde på cirka 100 keV og dermed gjort følsomt til den intense flux af spredt og direkte lavenergi-stråling frembragt af næsten alle gamma-emitterne i uran og thorium henfaldskæderne. Mens Compton-spredningen i et grundstof med atomnummeret  $Z$  er proportional med  $Z$ , så er den fotoelektriske absorption af lavenergetiske gammafotoner omtrentlig proportional med  $Z^4$ . Det betød, at tilstedeværelsen af barium med  $Z = 56$  i Risø-betonen reducerede de målte værdier af  $S_U$  og  $S_T$  jævnført med værdierne målt i Grand Junction, hvor borehulsmodellerne var fremstillet af almindelig beton med et gennemsnitligt  $Z$  på cirka 14.

På det tidspunkt var geologerne for længst færdige med at inspicere udskrifterne fra logningen af de syv nye borehuller og sammenligne dem med de geologiske profiler opstillet for borekernerne. I dette arbejde havde der ikke været behov for at kende sondens U og Th følsomhedsfaktorer. Det var imidlertid beklageligt, at betonblokkene på Risø ikke ville gøre fyldest som platforme til kalibrering af GGU's totaltællingsinstrumenter til overfladebrug, herunder den digitale geigertæller, på grund af den famøse baryt, der kun var ment som en foranstaltning til forbedring af betonens mekaniske egenskaber. Blokkene var med held blevet anvendt som platforme til kalibrering af feltgamma-spektrometers vinduestællehastigheder i den høje ende af energispektret, men dermed var det også slut - inden længe blev blokkene fjernet fra græsplænen og endte deres dage som lavradioaktivt affald<sup>38</sup>.

\*\*\*

Kort efter nytår 1969/70 var der i elektronikafdelingen indvielse af den nyopførte bygning 130, som var i to etager med fuld kælder og lå i forlængelse af bygning 109. Dermed var Jens Rasmussens årelange kamp for at få samlet afdelingen under fælles tag endelig lykkedes. Vores gruppe fik plads i sydenden af den nye bygnings stueetage, hvor vi fik tildelt to kontorer og et 2-moduls laboratorielokale overfor afdelingens sekretariat og Jens Rasmussens kontor, hvortil kom et kælderlokale, der blev hjemsted for gruppens centrale instrumentering, borekernescanneren og det automatiserede gammaspektrometer omtalt i Note 27, og som man kom ned til fra laboratoriet ovenover via en vindeltrappe<sup>39</sup>. Vi fik også dispositionsret over et 1-moduls lokale på den anden side af kældergangen. Her blev kemiafdelingens diamantsav og kæbeknuser opstillet på anmodning af Emil Sørensen, der havde brug for mere plads til forsøgene med udvinding af uran fra Kvanefjeld. Dermed var den måletekniske bistand til GGU og Helmars og min deltagelse i internationalt

---

38 Godt to år senere etablerede vi med bistand fra serviceafdelingen fire kalibreringsplatforme, der havde et tværmål på 3 meter og var 50 centimeter tykke. Deres overflader flugtede med terrænet i indbyrdes afstande på 5 meter langs en linje bag parkeringspladsen ud for Risø's nordlige centralvej. Denne facilitet udgjorde gennem en årrække grundlaget for omregning af et feltgammalspektrometers vinduestællehastigheder til dermed ækvivalente uran, thorium og kalium koncentrationer, idet den ud over at indbefatte en U- og en Th-plattform også rummede en K-plattform samt en neutral platform, 'B', til måling og efterfølgende subtraktion af baggrundstællehastighederne. Platformene kunne også benyttes til måling af geigertælleres og håndholdte scintillometres respons til terrestrisk gammastråling, fx udtrykt i cpm pr. mikrorøntgen i timen ( $\mu R/h$ ). Grundbestanddelen i U-, Th- og B-plattformene var en betonmørtel, der foruden cement og et minimum af vand bestod af rensede strandsand, mens der til K-plattformen blev benyttet floteret kalifeldspat fra Lillehammer i stedet for sand. Som tilsætning til cementen for U-plattformen forsynede Emil Sørensen os endnu gang med cirka et halvt kilo canadisk *yellowcake*. En tilsvarende mængde thorit for Th-plattformen købte vi hos Dansk Tungsand Industri.

39 "Minen" tog vi ikke med over, den blev reetableret i sin oprindelige skikkelse af en  $4\pi$  beta-gamma koincidens-opstilling og flyttet over i kælderen til DR 1, hvor den blev et fast inventar i Jørgen Olsens kursusvirksomhed.

forskningsamarbejde om anvendelsen af nukleare målemetoder på det geologiske område fast forankret i elektronikafdelingen frem til foråret 1986, hvor uranprospektering og udvinding af grønlandsk uran udgik af Risø's forskningsprogram.

Sidst i januar 1970 ankom Harold Wollenberg med familie til Roskilde, hvor der stod et Risø-gæstehus parat dem. Under sit gæsteophold i gruppen, sidenhen forlænget til knap to år, ydede Harold en stor indsats i den geologiske udforskning af Ilímaussaq komplekset med fokus på anvendelsen af gammaspektrometrisk analyse og XRF analyse i felten og i laboratoriet. Under sin kortvarige deltagelse i feltsæson 1969 havde han øvet sig i at betjene feltgammaspektrometeret og den engelske Mineral Analyser. I laboratoriet bidrog han effektivt til bearbejdningen af de store mængder gammaspektrometriske data fra de ni udvalgte arealer på Kvanefjeld, blandt andet ved at konstruere diagrammer, der viste frekvensfordelingerne af uran og thorium i overfladen af bjergarterne med angivelse af fordelingernes geometriske middelværdier<sup>40</sup>. Hertil kom, at Harold introducerede en målemetode, som han havde omtalt ved mit møde med ham i Berkeley og var ny på Risø: Fissionsspor-analyse af mikrostrukturen af uran og thorium i radioaktive bjergarter og mineraler<sup>41</sup>. Her var det en stor fordel, at DR 2 stod til rådighed for Harold, så han i samarbejde med Henning Sørensen og John kunne benytte sine erfaringer med metoden på LBL, hvor neutron-bestrålingen af prøverne skete i en forsøgsreaktor på Lawrence Livermore National Laboratory cirka en times kørsel fra Berkeley. XRF analysemetoden var til gengæld ny for Harold. Den indgik han et makkerskab med Helmar om, som blandt andet udfoldede sig ved, at de to sammen deltog i 1970 feltsæsonen i Dyrnæs. Et blivende resultat af Harolds arbejde var hans medforfatterskab på Risø til artikler i internationale fagtidsskrifter som *Nuclear Instruments & Methods*, *Economic Geology* og *Geophysics*, hvor Helmar og jeg ikke blot var begunstiget af hans geologiske fagkundskab, men også af hans talent for at skrive velstruktureret og flydende på sit engelsk-amerikanske modersmål.

\*\*\*

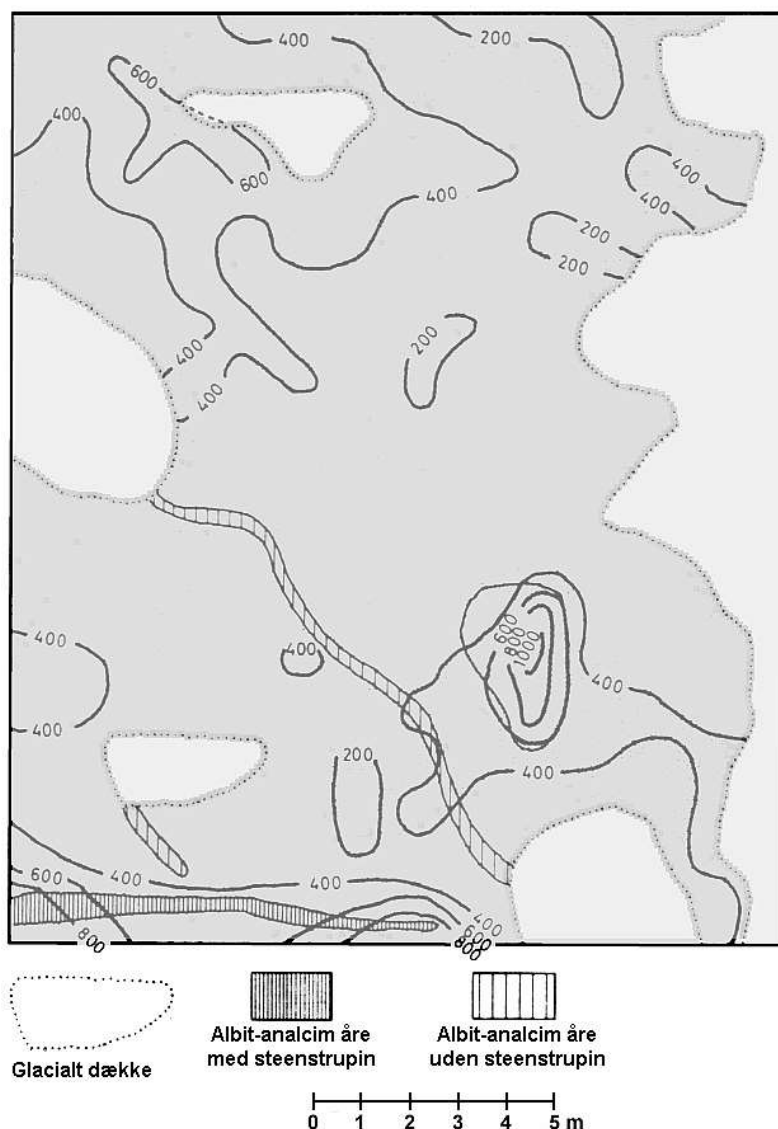
Jeg vil slutte den lange beretning om mine ”kvanefjelds-år” med at præsentere eksemplet i Figur 35 øverst på side 51 med tilhørende undertekst, som viser, at det i feltsæson 1969 lykkedes at virkeliggøre John Roses vision, som han fremlagde for mig under vores møde i september 1965 på Institut for Petrologi: Kortlægning af overfladefordelingerne af uran i kvanefjeldsbjergarterne med et feltgammaspektrometer.

Dog vil jeg lige tilføje, at selvom den bærbare én-kanalanalysator i sidste ende blev anvendt som et geologisk vindues-gammaspektrometer, der i princippet fungerede på samme måde som det primitive transistoriserede instrument, Adams & Fryer havde konstrueret nogle år tidligere, så var analysatoren født som en både digitalt og analogt registrerende bærbar impulshøjdeanalysator, der også ville kunne bruges til andre formål, fx identifikation af gamma-emitterne i terræn forurenede af radioaktivt nedfald eller udslip fra nukleare installationer.

---

40 Den geometriske middelværdi  $\mu_{geom}$  af en stokastisk variabel estimeret ud fra  $n$  observationer er den  $n$ 'te rod af observationernes produkt. Anvendelsen af  $\mu_{geom}$  til karakterisering af relativt små koncentrationer af et grundstof i en bjergart hænger sammen med, at deres frekvensfordelinger ofte er lognormale.

41 Med fissionsspor-analyse bestemmes de præcise lokationer og koncentrationer af uran og eventuelt også thorium i et såkaldt tyndslib eller en poleret overflade af en bjergartsprøve. Det sker ved at bestråle prøven med neutroner i en forsøgsreaktor og registrere de herved dannede spor af fissionsfragmenter i en simpel detektor typisk bestående af et tyndt stykke lys glimmer (moskuvit) i kontakt med prøven. Efter bestrålingen ætzes detektoren med syre, hvorved fissionssporene gøres synlige for inspektion og tælling i et mikroskop. Metoden er mest nøjagtig til udmåling af mikrofordelingen af uran i prøverne, hvor fissionssporene skyldes spaltning af  $^{235}\text{U}$  med de termiske neutroner i reaktoren. Ved at absorbere disse i et cadmium-filter lagt omkring prøve-detektor parret lader det sig gøre at spalte  $^{232}\text{Th}$  og  $^{238}\text{U}$  med de hurtige neutroner i reaktoren. De herved detekterede fissionsspor reflekterer prøvens samlede indhold af thorium og uran, således at dens indhold af Th i princippet kan analyseres ved at subtrahere bidraget fra U bestemt med termiske neutroner. Nøjagtigheden af denne kombinerede fremgangsmåde begrænser sig til prøve-materialer med et Th/U forhold på mindst cirka 3.



Figur 35. Konturkort, der viser den generelt heterogene fordeling af urankoncentrationerne i ppm eU i et 315 m<sup>2</sup> stort måleareal (areal 5) i den nordlige del af kvanefjeldsplateauet, hvor værtsbjergarten for uran og thorium er en variant af finkornet lujavrit. Konturkurverne er tegnet på grundlag af 225 gammaspektrometriske enkeltmålinger foretaget med én meters mellemrum. Koncentrationen af uran toppes ved 1000 ppm i centrum af de hinanden tæt omsluttende kurver cirka 6 meter over kortets bundlinje. Kortet viser desuden, at mineral-årer bestående af albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) og analcim ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) kan være bærere af steenstrupin - et af de fremherskende radioaktive mineraler i Kvanefjeld.

Ingeniør E. Olesen, min kontaktperson hos A/S Danfysik, hvor de to eksemplarer af analysatoren blev fremstillet ud fra mine diagrammer og tegninger, fortalte mig, at man i firmaet havde overvejet at søge Risø om licens til at iværksætte en begrænset produktion af instrumentet med salg for øje, men at dette skridt var blevet ved tanken. For mig var det nok så tilfredsstillende at have leveret et markant bidrag til min afdelings ekspertise i elektronikkonstruktion, udadtil manifesteret ved, at jeg i maj 1969, efter indstilling af Jens Rasmussen og kort før min fjerde og sidste deltagelse i GGU's ekspeditioner til Dyrnæs, modtog Dansk Ingeniørforenings Elektropris ”som en anerkendelse af en fremtrædende teknisk-videnskabelig indsats på det elektrotekniske fagområde”.

### Benyttede skriftlige informationskilder

- Adams, J.A.S. & Fryer, G.E. (1964). Portable  $\gamma$ -ray spectrometer for field determination of thorium, uranium, and potassium. *The Natural Radiation Environment* (Univ. Chicago Press, Chicago) 577-596.
- Wollenberg, H.A. & Smith, A.R. (1964). *Studies in terrestrial gamma radioactivity* (Univ. Chicago Press, Chicago) 513-566.
- Løvborg, L. (1967). A portable  $\gamma$ -spectrometer for field use. *Risø Report* 168. 36 p.
- Løvborg, L., Kunzendorf, H. & Hansen, J. (1969). Portable beryllium prospecting instrument with large sensitive area. *Nuclear Techniques and Mineral Resources* (IAEA, Vienna) 55-63.
- Løvborg, L., Kunzendorf, H. & Hansen, J. (1969). Use of field  $\gamma$ -spectrometry in the exploration of uranium and thorium deposits in South Greenland. *Nuclear Techniques and Mineral Resources* (IAEA, Vienna) 197-211.
- Darnley, A.G., Bristow, Q. & Donhoffer, D.K. (1969). Airborne gamma-ray spectrometer experiments over the Canadian shield. *Nuclear Techniques and Mineral Resources* (IAEA, Vienna) 163-186.
- Kunzendorf, H. & Wollenberg, H.A. (1970). Isotope-excited X-ray fluorescence analyses for Nb, Zr, and La + Ce on outcrops in the Ilímaussaq intrusion, South Greenland. *Econ. Geol.* **66** 1048-1060.
- Wollenberg, H.A. & Kunzendorf, H. (1970). Determination of rare-earth elements in rocks by isotope-excited X-ray fluorescence spectrometry. *Nucl. Inst. Meth.* **87** 197-203.
- Kunzendorf, H., Løvborg, L. & Wollenberg, H. (1971) Assay of powdered metallic ores by means of a portable X-ray fluorescence analyser. *Risø Report* 251. 29 p.
- Løvborg, L., Wollenberg, H., Sørensen, P. & Hansen, J. (1971). Field determination of uranium and thorium by gamma-ray spectrometry, exemplified by measurements in the Ilímaussaq alkaline intrusion, South Greenland. *Econ. Geol.* **66** 368-384.
- Wollenberg, H. (1971). Fission track radiography of uranium and thorium in radioactive minerals. *Risø Report* 228. 40 p.
- Løvborg, L., Wollenberg, H., Rose-Hansen, J. & Leth Nielsen, B. (1972). Drill-core scanning for radioelements by gamma-ray spectrometry. *Geophys.* **37** 675-693.
- Løvborg, L. (1972). Assessment of uranium by gamma-ray spectrometry. *Uranium Prospecting Handbook* (Inst. of Mining and Metallurgy, London) 157-173.
- Løvborg, L. (1973). Future development in the use of gamma-ray spectrometry for uranium prospecting on the ground. *Uranium Exploration Methods* (IAEA, Vienna) 141-153.
- Løvborg, L. & Kirkegaard, P. (1974). Response of 3"× 3" NaI(Tl) detectors to terrestrial gamma radiation. *Nucl. Inst. Meth.* **121** 239-251.
- Sørensen, H., Rose-Hansen, J., Nielsen, B.L., Løvborg, L., Sørensen E. & Lundgaard, T. (1974). The uranium deposit at Kvanefjeld, the Ilímaussaq intrusion, South Greenland. *Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport nr. 60.* 54 p.