

III. DEN SEISMISKE VIRKSOMHED

af Søren Gregersen.

I. OPRETTELSE AF SEISMISK AFDELING. DRIFTEN AF SEISMISKE STATIONER

1. *Indledning: Jordskælv og jordskælvsaktivitet.*

Seismologi er den videnskab, der beskæftiger sig med jordskælv og deres virkninger samt med frembringelse og udbredelse af rystelser i jordlegemet.

Man må forestille sig et jordskælv som det, at noget bliver revet itu i jorden; det kan være store klippeformationer af mange kilometers udstrækning. Jordskælv kan finde sted i overfladen og ned i en dybde af ca. 800 km, oftest 30–40 km nede. Jordskælv giver anledning til rystelser i jorden. Rystelserne og dermed også ødelæggelserne er størst lige over jordskælvet.

På grundlag af ødelæggelserne forårsaget af et jordskælv og de rystelser, der registreres på seismiske stationer over hele jorden, foretager internationale centre beregning af, hvor og hvornår jordskælvet har fundet sted.

Centrene udarbejder lister over jordskælv og indtegner oplysningerne på kort. Hvis man sammenligner sådanne kort fra forskellige tidsrum, er det slående, at jordskælvene altid optræder i langstrakte zoner (langs kysten af Stillehavet, i et bælte fra Indonesien gennem Himalaya og Iran til Tyrkiet og Syd-europa, samt langs de bjergrygge, der ligger ude i de fleste af jordens oceaner) (fig. 1). Man får ved betragtning af et sådant kort et tydeligt indtryk af det, geologer og geofysikere i de senere år har betegnet pladetektonik. Jordens overflade er opdelt i cirka 10 store, stive plader og et større antal mindre plader i randzonerne mellem de store plader. Disse plader er cirka 100 km tykke. De bevæger sig ganske langsomt i forhold til hinanden med hastigheder på nogle få centimeter om året. I randzonerne, hvor de stive plader støder op til hinanden, giver bevægelserne anledning til jordskælv. Inde på en stor, stiv plade, hvor for eksempel Danmark ligger, sker der kun små bevægelser. Den langsomme bevægelse af de store plader (f. eks. af Afrika i forhold til Europa) ændrer sig ikke i løbet af tusinder af år. Derimod kan pladerne i nogle år hænge bedre fast i hinandens kanter end de gør i andre år. Således vil vi somme tider opleve år med mange jordskælv, f. eks. 1957, 1975 og 1976, og år med få jordskælv, f. eks. 1962.

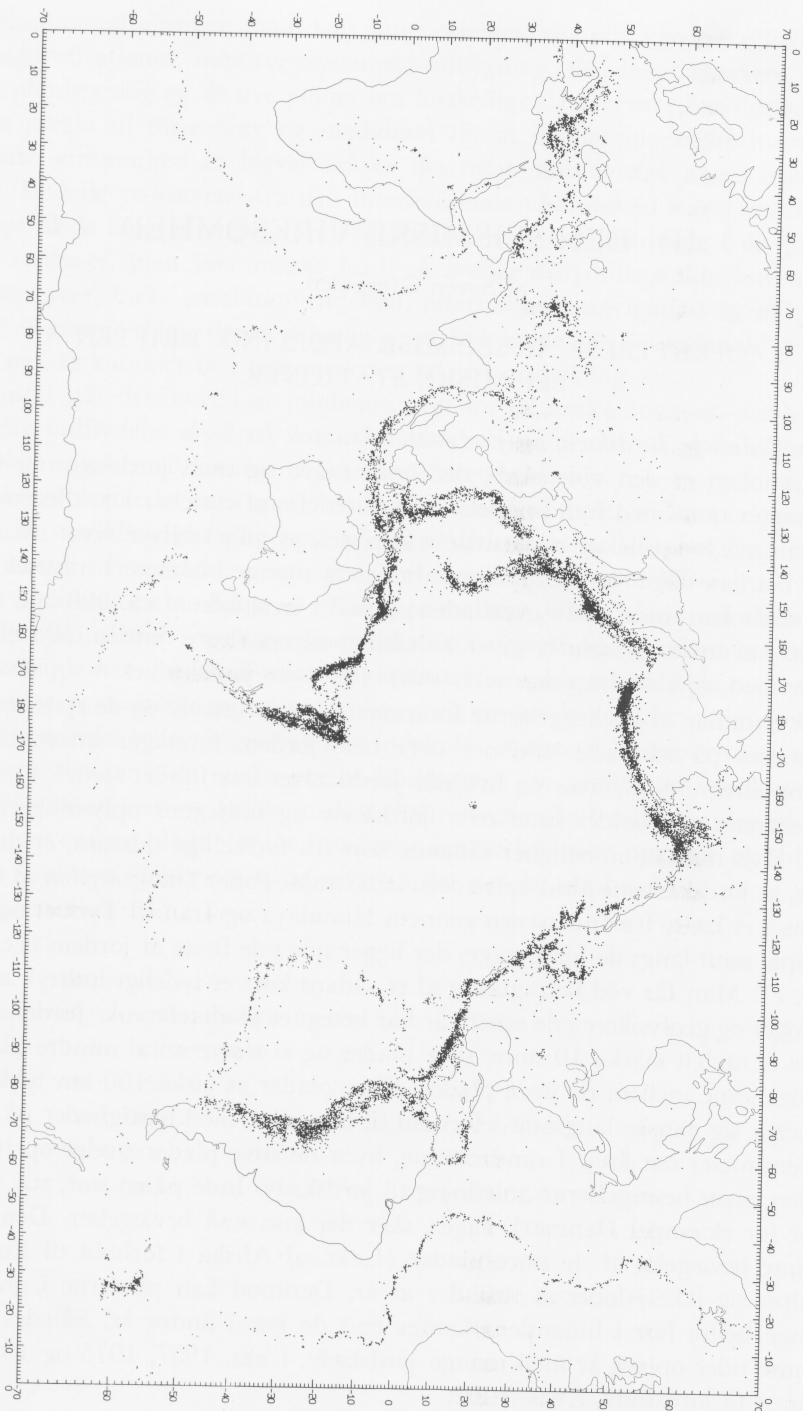


Fig. 1. Jordens jordskælvaktivitet i løbet af 7 år. Hver prik er et jordskælv.

Interessen for jordskælv i Danmark går langt tilbage i tiden. I en oversigt over danske jordskælv har seismologen Inge Lehmann således oplyst, at der findes beretninger om 49 danske jordskælv fra år 1073 indtil 1. verdenskrig.

Seismologi blev indført i Danmark af E. G. Harboe, seismolog og officer, der i 1907 på øen Disko i Vestgrønland fik oprettet en seismisk station. Stationen var i drift indtil 1912. På Harboes initiativ blev der endvidere i 1909 oprettet en seismisk station i Reykjavik på Island, som den gang var en del af Danmark.

I 1926 oprettede den daværende direktør for Den danske Gradmaaling, professor N. E. Nørlund, en seismisk station i Københavns gamle vestvold, og i 1927 fortsattes i Grønland med etablering af en seismisk station i Ivigtut i Sydgrønland. Året efter blev der oprettet en tilsvarende station i Scoresbysund i Østgrønland.

Kryolitselskabet, Rask-Ørsted-Fondet og navnlig Carlsbergfondet har ydet bidrag både til etablering og til drift af de seismiske stationer. Således har Carlsbergfondet f. eks. i tiden 1926–55 betalt et fast årligt beløb på 3 400 kr. til drift af København-stationen.

I forbindelse med oprettelse af Geodætisk Institut i 1928 blev den seismiske tjeneste organiseret som en særlig afdeling i instituttet. Inge Lehmann blev afdelingens første chef og udnævntes samtidig til statsgeodæt. Seismisk afdeling har i den forløbne tid varetaget tjenesten ved drift af seismiske stationer og ved bearbejdelse af seismiske registreringer.

Herudover har afdelingen deltaget i udveksling af seismiske data samt deltaget i den videnskabelige udvikling af seismologi. Registreringerne fra danske seismiske stationer har været tilgængelige for alle interesserede. Aflæsninger af ankomsttider af rystelsesbølger fra jordskælv videresendes til internationale centre, der indsamler oplysninger fra en række stationer og foretager beregning af, hvorfra bølgerne stammer, d.v.s. hvor jordskælvet har fundet sted. Udviklingen af de seismiske registreringers bearbejdelse og forskningen i seismisk afdeling er sket i nær tilknytning til den internationale udvikling i seismologi. I afdelingens første tid var det en udfordring at få registreret små rystelser fra fjerne jordskælv og at få undersøgt instrumenternes karakteristika. Afdelingen forbedrede således målemetoden til bestemmelse af karakteristikkene af en af seismograferne og foretog i 1930'erne sammen med chefen for teknisk afdeling undersøgelser af seismografernes teori. Siden er der taget en række emner op til behandling i tilslutning til den internationale udvikling. Disse emner er omtalt nedenfor under II.

2. De seismiske stationer.

Den seismiske station i København blev indrettet i to betonbunkers i vestvolden mellem Rødovre og Glostrup (kaponiere XIII og kaponiere XIV).

Stationens betongulv er støbt direkte på Saltholmskalk, hvilket giver god kontakt til undergrunden. Stedet er også valgt med hensyntagen til stabilitet i temperaturen, som er en forudsætning for arbejdet med seismiske instrumenter, idet temperaturen i disse bunkers er nogenlunde konstant døgnet igennem, mens den i løbet af året varierer inden for grænserne $+6^{\circ}$ til $+12^{\circ}$. I en længere årrække var stationen endvidere friholdt for rystelser fra trafik og fabrikker.

En seismisk station indeholder forskellige måleinstrumenter, der er følsomme over for rystelser i forskellige retninger (op-ned, nord-syd, øst-vest; fig. 2) og over for rystelser med forskellige svingningstider. Disse rystelsesmålere er alle forsynet med en form for registreringsskiver. Det samlede instrument benævnes en seismograf (jfr. tekst til fig. 2). En seismisk station indeholder des-

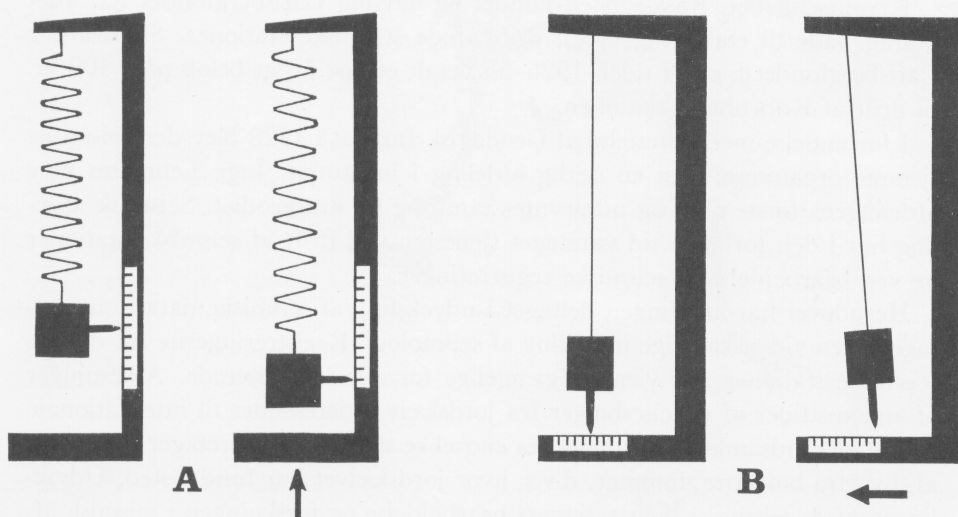


Fig. 2. Princippet i seismograferne. Ophængningen står på jorden.

A: Vertikal-instrument. B: Horizontal-instrument. Til venstre ved både A og B er jorden og instrumenterne i ro. Til højre har jorden bevæget sig i pilens retning, opad henholdsvis til venstre. Bevægelsen kan vises direkte med en viser som på tegningen her, eller den kan optegnes med en pen på et stykke papir, der trækkes forbi pennen, eller den kan frembringe en elektrisk strøm, som drejer et spejl i et galvanometer. En lysstråle, der rammer spejlet og tilbagekastes på et stykke fotografisk papir på en roterende tromle, vil kunne optegne bevægelsen. Den optegnede registrering kaldes et seismogram.

uden et præcisionsur og en radio. Uret udløser hvert minut et tidsmærke på skriverne, således at de seismiske rystessignaler kan tidsfæstes nøjagtigt. En gang i døgnet sammenlignes uret med et over radioen modtaget tidssignal.

Ved etableringen af København-stationen blev denne udstyret med en række forskelligartede instrumenter, hvis registreringer supplerede hinanden.

Der installeredes således to tunge Wiechert-seismografer (vertikal 1300 kg og horisontal 1000 kg) med svingningstid 6–8 sekunder. (Svingningstiderne for seismografer er væsentlige, fordi instrumentfølsomheden er størst for rystelser med svingningstider i nærheden af seismografernes egne svingningstider). Disse instrumenter registrerer ved hjælp af en ridsenål i et lag sod på papir. Endvidere forefandt tre relativt langperiodiske (12,5 sekunders svingningstid) instrumenter af Galitzin-Wilip-type, hvor jordbevægelsen frembringer et elektrisk signal, som registreres fotografisk ved hjælp af et galvanometer. Der var endvidere en enkelt horisontalkomponent (nord-syd) af Milne-Shaw-type, hvor registreringen foregår ved, at instrumentet drejer en lysstråle, som registreres fotografisk. Dette instruments svingningstid er 12 sekunder. Fra september 1927 blev en horisontal øst-vest-komponent af Milne-Shaw-type sat i drift, og i 1928 blev to Wood-Anderson horisontal-seismografer opstillet, ligeledes med drejning af en lysstråle på fotografisk papir. Sidstnævnte instrumenter kom aldrig til at fungere tilfredsstillende. I 1936 blev stationen udvidet med en kortperiodisk Benioff-seismograf (1 sekunds svingningstid), der registrerer ved hjælp af et galvanometer.

Stationen i Ivigtut blev indrettet i en naturlig klippehule, som Kryolitselskabet lod udvide og indrette til seismograferne (fig. 3). Fra 1927–53 var stationen udstyret med tunge Wiechert-seismografer. I 1952 blev disse instrumenter beskadiget af sprængningerne i kryolitbruddet, og året efter blev registreringen stoppet definitivt. I 1955–60 var stationen i stedet udstyret med en enkelt Milne-Shaw-seismograf (nord-syd-komponent). I forbindelse med det internationale geofysiske år blev der i 1957 endvidere installeret et Willmore-instrument (vertikal-komponent). Seismometret brød imidlertid sammen i løbet af en måneds tid. I 1960 blev stationen nedlagt.

Til trods for besværlige transportforhold og specielle arktiske forhold, som vanskeliggør vedligeholdelse af seismiske instrumenter, var der stor videnskabelig interesse i registrering af jordskælv i Atlanterhavet og nær Grønland. Et forslag om placering af en seismisk station på øen Jan Mayen blev opgivet, da jordbundsforholdene her viste sig uegnede. I stedet blev der som nævnt i 1928 oprettet en seismisk station i Scoresbysund. Ved valg heraf har suverænitetsmæssige synspunkter sikkert gjort sig gældende, jfr. den senere retssag mellem Danmark og Norge ved Den internationale Domstol i Haag i 1933 om overhøjhed over Østgrønland.

Stationsbygningen i Scoresbysund nedbrændte i 1932. De fleste af instrumenterne blev dog reddet, og året efter blev stationen igen sat i drift. Stationen var i mange år udstyret med et vertikal- og to horisontal-instrumenter af type Galitzin-Wilip. I 1950 blev udstyret udvidet med en kortperiodisk Grenet-seismograf (ca. 1 sekunds svingningstid), der ligesom Galitzin-Wilip-seismograferne registrerer ved hjælp af et galvanometer.



Fig. 3. Den seismiske station i Ivigtut i Sydgrønland var placeret på solidt grundfjeld i en klippehule bag kælder døren til venstre i billedet.

3. 2. verdenskrig.

Under 2. verdenskrig var det svært at opretholde kontakten til de grønlandske stationer, men det lykkedes alligevel at holde både stationen i Ivigtut og stationen i Scoresbysund i drift under det meste af krigen. Begge stationer blev forsynet med forbrugsgods (fotografisk papir og kemikalier) fra U. S. Coast and Geodetic Survey, og en del af registreringerne blev også aflæst i USA. Stationen i Scoresbysund gik ud af drift i 1944. Det varede næsten 2 år, inden den igen kom i gang.

Også for stationen i København medførte krigen vanskeligheder. Fra november 1943 til marts 1945 var stationen således kun tilgængelig for den tilsynsførende. I nogle måneder var stationen standset på grund af elektricitetsrationering. I maj 1945 sprængte en gruppe frihedskæmpere sig vej ind i kaponiere XIV og gennem søgte den. I nogen tid herefter var stationen under bevogtning af frihedskæmpere, senere af soldater, hvorefter den igen blev overgivet til Geodætisk Institut.

4. *Nye seismiske stationer.*

Da Gradmaalingens seismiske stationer blev oprettet i 1926–27, udstyredes de med de på den tid mest moderne instrumenter. Stationen i København var en af de bedste i Europa på den tid. Instrumenteringen af stationerne er senere blevet ført à jour. Da det blev erkendt, at nogle af rystelserne (P-bølgerne) fra fjerne jordskælv fremtræder særlig tydeligt på vertikal-seismografer, der har en egensvingningstid omkring 1 sekund, blev stationerne i København og Scoresbysund suppleret med sådanne instrumenter; således blev en Benioff-seismograf opstillet i København i 1936 og en Grenet-seismograf i Scoresbysund i 1950.

Så længe hovedopgaven for iagttagelsen af de seismiske signaler var bestemmelse af de seismiske signalers ankomsttider, var et nøjagtigt kendskab til seismografernes karakteristisk ikke afgørende. Det vigtigste var en regelmæssig registrering og en nøjagtig tidstjeneste. De krav, der stilledes til seismograferne, var, at de skulle fremhæve de interessante bølgetog. Men da man begyndte at interessere sig for rystelsernes rumlige forløb, opstod der behov for, at de forskellige seismografer, som tilsammen skulle vise rystelsernes forløb i tre retninger, havde ens karakteristisk. Denne betingelse var ikke opfyldt ved stationernes oprindelige instrumentering. De horisontale Galitzin-Wilip-seismografer var fremstillet til en egensvingningstid på $12\frac{1}{2}$ sekund, men det var ikke muligt at få pendulerne i den tilsvarende vertikal-seismograf til at balancere stabilt ved denne svingningstid. Da Askania-Werke i Berlin påbegyndte en ny produktion af Galitzin-Wilip-seismografer omkring 1955, blev en ny vertikal-seismograf købt og opstillet i København.

For yderligere at lette sammenligningen mellem registreringerne af de forskellige retninger blev der fremstillet et registrer-apparat med en såkaldt tripletromle. På tromlen på dette apparat kunne anbringes tre stykker fotografisk papir, ét for hver retning. På denne måde foregik registreringen af alle retninger helt synkront. Dette apparat kom i drift i København i 1959.

Fra København-stationens oprettelse havde man her på tilfredsstillende måde regelmæssigt udført bestemmelser af seismografernes karakteristiske parametre. Også tidstjenesten i København var tilfredsstillende. Hvert minut skulle der være et mærke på registreringerne. Disse tidsmarkeringer blev frembragt af ret gode pendulure, der var ophængt meget stabilt i et ret konstant miljø. Den stabile gang forudsatte naturligvis, at uret kun sjældent blev reguleret (med små vægte på pendulet) og slet ikke stillet. Man var vant til, at enhver aflæst tid skulle korrigeres med en størrelse, som var bestemt ud fra et radiotidssignal.

Derimod var tilstanden i Grønland mindre tilfredsstillende. På Ivigtut-stationen var der tekniske vanskeligheder med instrumenterne, og stationen blev opgivet i 1960.

Stationen i Scoresbysund trængte efter krigen til en gennemgribende modernisering. Da stationen blev anlagt, var den integreret med radiostationen, og med henblik på en gunstig antenneplacering var hele anlægget opført i nogen afstand fra selve kolonien og landingspladsen. I mellemtiden var radiostationen af hensyn til de meteorologiske observationer flyttet til Kap Tobin, der udgør den nordlige munding af Scoresby Sund. Tilbage var alene blevet den seismiske station med sin instrumentkælder halvt indsprængt i klippen og med en stationsbygning og et beboelseshus i meget ringe stand. Alle forsyninger måtte bæres op til stationen. Driften var uforholdsmæssig dyr. Galitzin-Wilip-seismograferne led af den samme skavank som dem i København. Den vertikale seismograf kunne ikke indstilles, så den kom til at have samme karakteristisk som horisontal-seismograferne. Endvidere ville et tripletromle-registreringsapparat også være ønskeligt der.

Under det internationale geofysiske år 1957-58 blev alle geofysiske discipliner opfordret til at intensivere den geofysiske dataindsamling i arktiske og antarktiske områder. Nogle år tidligere var der oprettet en vejrstation og en reserveflyveplads i det nordøstlige Grønland, Station Nord. Med henblik på det internationale geofysiske år var der på universitetet i Hamburg fremstillet et antal to-komponent horisontal-seismografer, der skulle benyttes til observation af seismisk uro fra det nordlige Ishav. En af disse seismografer blev opstillet på Station Nord. Ydermere blev anskaffet en kortperiodisk (1 sekunds svingningstid) Willmore-seismograf, der blev vertikalt opstillet, samt ur og radio.

Det viste sig, at den seismiske uro var meget ringe på Station Nord, hvilket har den betydning, at stedet er særdeles velegnet til at observere meget svage seismiske signaler. Resultaterne fra Station Nord var så betydningsfulde, at det blev besluttet at fortsætte den seismiske station her efter afslutning af det internationale geofysiske år. Ligesom på de andre stationer var en udvidelse og forbedring af instrumenterne ønskelig.

På generalforsamlingen i den Internationale Union for Geodæsi og Geofysik i Helsingfors i 1960 fremkom amerikanske seismologer med overvejelser vedrørende vanskelighederne ved at fremskaffe ensartede data fra seismiske stationer over hele jorden. Der var mange forskellige typer seismografer i brug, og i mange tilfælde var der kun ringe viden om seismografernes karakteristisk, ligesom instrumenternes følsomhed ofte var utilstrækkelig. På mange seismiske stationer var tidstjenesten tillige upålidelig. Da USA ønskede en forstærket indsats indenfor seismologi, fremlagde amerikanske seismologer en plan om at udstyre ca. 100 seismiske stationer med ens instrumenter, radioer og ure med henblik på kontinuerlig drift.

Hvis et sådant standardssystem blev realiseret, ville det være rimeligt, at man ved den planlagte modernisering i Grønland tog hensyn hertil og til-

stræbte en vis lighed med det foreslåede system. Seismisk afdeling indhentede derfor nærmere oplysninger om systemet, hvilket resulterede i tilbud fra USA om, at tre af stationerne i World Wide Network of Standardized Seismographs (WWNSS) blev placeret i Grønland. De to sæt skulle installeres i Scoresby-sund og på Station Nord. Det tredje sæt var tiltænkt den station, som skulle erstatte Ivigtut. Det blev placeret i Godhavn på Disko-øen. Det blev aftalt, at USA leverede instrumenterne og sørgede for deres opstilling. Fra dansk side skulle de nødvendige stationsbygninger stilles til rådighed.

Ud over udstyr til de seismiske stationer i Grønland blev der fra amerikansk side tilbudt et sæt WWNSS-udstyr til stationen i København, hvor kaponiere XIV blev ombygget til en station af denne type. I forbindelse hermed blev seismisk afdelings lager af seismogrammer flyttet til et gammelt ammunitionsdepot i Vestvolden, hvor der var plads til samtlige seismogrammer siden afdelingens oprettelse.

I en WWNSS-station er der i alt 6 seismografer, 3 kortperiodiske Benioff-seismografer med størst forstørring ved knap 1 sekunds svingningstid, og 3 langperiodiske Press-Ewing-seismografer med størst forstørring omkring 15 sekunders svingningstid. De tre seismografer i hvert sæt er opstillet, så de er følsomme for jordbevægelser i retningerne op-ned, nord-syd og øst-vest (fig. 4). Alle instrumenter registrerer fotografisk ved hjælp af galvanometre. Desuden indeholder en WWNSS-station et kvartsur, en radio til modtagelse af et tids-signal samt elektroniske instrumenter til sammenligning af urets og radioens tidssignaler.

WWNSS-udstyret blev overdraget Geodætisk Institut uden andre betingelser, end at det skulle benyttes. I begyndelsen blev stationerne besøgt af amerikanske teknikere, der tilså instrumenterne én gang om året.

Et væsentligt formål med oprettelsen af WWNSS var, at de resulterende seismogrammer skulle gøres let tilgængelige for den seismologiske forskning i alle lande. Med henblik herpå blev et specielt anlæg konstrueret til affotografering af seismogrammer i USA. Seismogrammerne har formatet 30×90 cm, negativerne er 8,17 gange mindre. De over 100 WWNSS-stationer producerer hver 6 seismogrammer pr. døgn. Kopier af denne store mængde observationsmateriale kan erhverves til videnskabeligt brug for en ringe kopieringsafgift. Flere større forskningsinstitutter i udlandet abonnerer på det totale data-materiale, der har dannet baggrund for et stort antal videnskabelige undersøgelser siden systemets oprettelse.

Bevillingsmæssige hensyn har bevirket, at de amerikanske teknikeres tilsyn med de fire danske stationer er ophørt. Hele WWNSS har i øvrigt nogle gange været truet af standsning af den amerikanske støtte, men endnu i 1978 oprettholdes dette omfattende stationsnet.

I forbindelse med et kortvarigt amerikansk-dansk projekt i 1966–67 blev

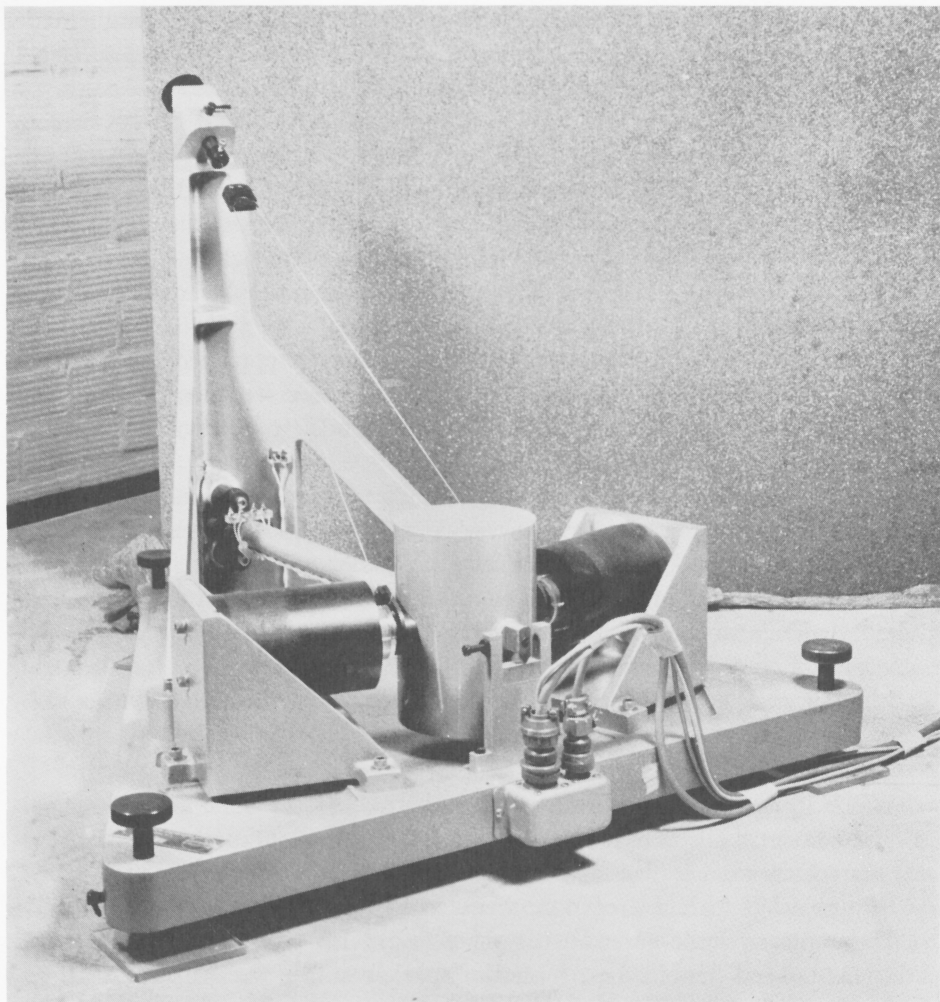


Fig. 4. Horizontal-seismograf af WWNSS-type. Det er et pendul med næsten lodret drejningsakse. Pendulet er den lyse cylinder midt i billedet. Pendularmen er fastgjort bagud til stativet, således at pendulet kan svinge sidelæns. Pendulet holdes oppe af de to tynde tråde. En bevægelse frembringer en elektrisk strøm i de trådspoler, der er anbragt inde i de sorte magneter på begge sider af pendulet.

der på Grønlands indlandsis oprettet en station opkaldt efter Inge Lehmann. Det var en slags seismisk antenne-station med fem vertikal-instrumenter ca. 3 km fra hinanden i en trekant med to instrumenter i midten. Derudover var der to horisontal-instrumenter. På grundlag af registreringer fra Inge Lehmann-stationen blev det påvist, at det er muligt med udbytte at placere en følsom seismisk station på Indlandsisens centrale område.

Da driften af Station Nord blev indstillet i 1972, kunne den seismiske sta-

tion ikke forblive der, men måtte flyttes. Det var den bedste station i Grønland, og der var gode postforbindelser til stationen. Det nærmeste beboede sted var Danmarkshavn.

Den efterhånden omfattende viden om seismisk uro i Grønland indicerede, at der ville være relativt gode forhold her. Det blev derfor besluttet forsøgsvis at flytte stationen til Danmarkshavn. Forventningerne om uroens størrelse slog til, og de kortperiodiske seismografer gav lige så gode registreringer som på Station Nord. For de langperiodiske seismografer har der været større vanskeligheder med driften her end på Nord, formodentlig på grund af de mere primitive forhold, hvorunder udstyret er installeret.

Indførelsen af WWNSS-udstyret i Grønland i 1960'erne betød en tiltrængt modernisering af de seismiske stationer. I København var moderniseringen dengang ikke så påtrængende, men WWNSS-udstyret her har haft en stor betydning for forståelsen af problemer i Grønland og for oplæringen af personale til de grønlandske stationer. Efter nogle års overlappning blev den daglige drift af Galitzin-Wilip-seismograferne og Benioff-seismografen indstillet. Kun driften af Wiechert-seismograferne opretholdes ved siden af WWNSS-udstyret.

Grenet-seismografen fra den gamle station i Scoresbysund blev i 1973 opstillet i Mønsted i Jylland. Den er af Århus Universitet, der passer stationen, blevet forsynet med et moderne registreringsudstyr. Seismisk afdeling får tilsendt registreringerne.

Det har været overordentligt heldigt, at de seismiske stationer har været i stand til at følge med i den tekniske udvikling. Endnu i nogle år vil udstyret ikke være forældet, men næste fase i udviklingen er på vej. Lokale jordskælv vil blive observeret med et stort antal seismometre fordelt i et tæt net omkring jordskælvene. Flere og flere seismiske stationer vil registrere med digitalt udstyr, og seismograferne vil være placeret i omhyggeligt udvalgte områder med lille seismisk uro.

II. SEISMOLOGISKE UNDERSØGELSER OG FORSKNING

1. *Jordskælvsaktiviteten i Danmark.*

I Danmark forekommer der kun så små jordskælv, at ødelæggelserne er minimale. Så vidt vides, er der således aldrig gået menneskeliv tabt som følge af jordskælv i Danmark. Men små jordskælv føles en gang imellem i Nordjylland, i Østsjælland og på Bornholm. Af og til registreres også lokale rystelser på seismograferne i København, i Mønsted, i Norge eller i Sverige. Siden oprettelsen af seismisk afdeling er der her indsamlet alle tilgængelige oplysninger om danske jordskælv. De indsamlede oplysninger er for de største jordskælvs vedkommende blevet bearbejdet og publiceret. Inge Lehmann har i 1956 endvidere skrevet en afhandling, der omhandler de danske jordskælv

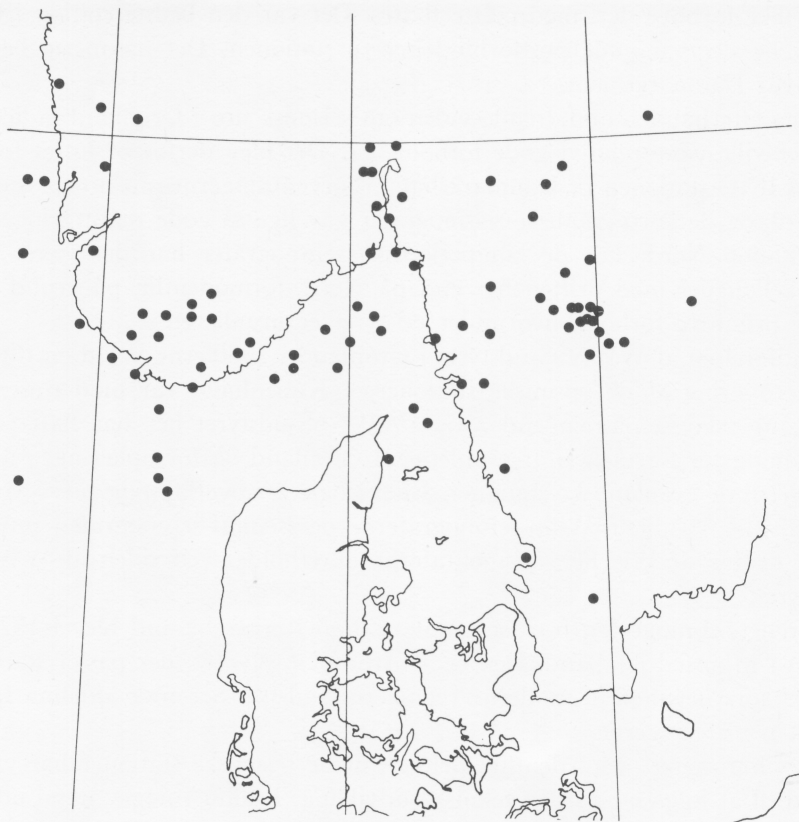


Fig. 5. Jordskælvsaktiviteten nær Danmark i perioden 1964–1970. Hver prik er et jordskælv.

indtil dette tidspunkt. Nogle få af de ældre oplysninger tyder på, at der har været enkelte jordskælv i Midtjylland og på Midsjælland. Moderne instrumentelle lokaliseringer kan tyde på, at der ikke sker jordskælv i Danmark, men at der er små jordskælv i Skagerrak mellem Danmark og Norge og i Vestsverige (fig. 5). Nogle af disse jordskælv kan være så store, at de mærkes i Danmark.

2. Jordskælvsaktiviteten i Grønland.

Seismisk afdeling har i den forløbne tid været interesseret i at registrere jordskælv i og i nærheden af Grønland. I mange år var instrumenterne på stationerne i Scoresbysund og i Ivigtut dog bedre egnede til at registrere signaler fra fjerne jordskælv end til at modtage højfrekvente signaler fra lokale jordskælv. Først i 1950 fik stationen i Scoresbysund en kortperiodisk seismo-

graf. Under det internationale geofysiske år i 1957 blev der som tidligere nævnt oprettet en seismisk station på Station Nord med et kortperiodisk instrument, og i begyndelsen af 1960'erne blev både den nye station i Godhavn og Scoresbysund-stationens afløser i Kap Tobin ligeledes udstyret med kortperiodiske instrumenter. Registreringen af mange grønlandske jordskælv, der således først er blevet mulig på et sent tidspunkt, er endnu mangelfuld.

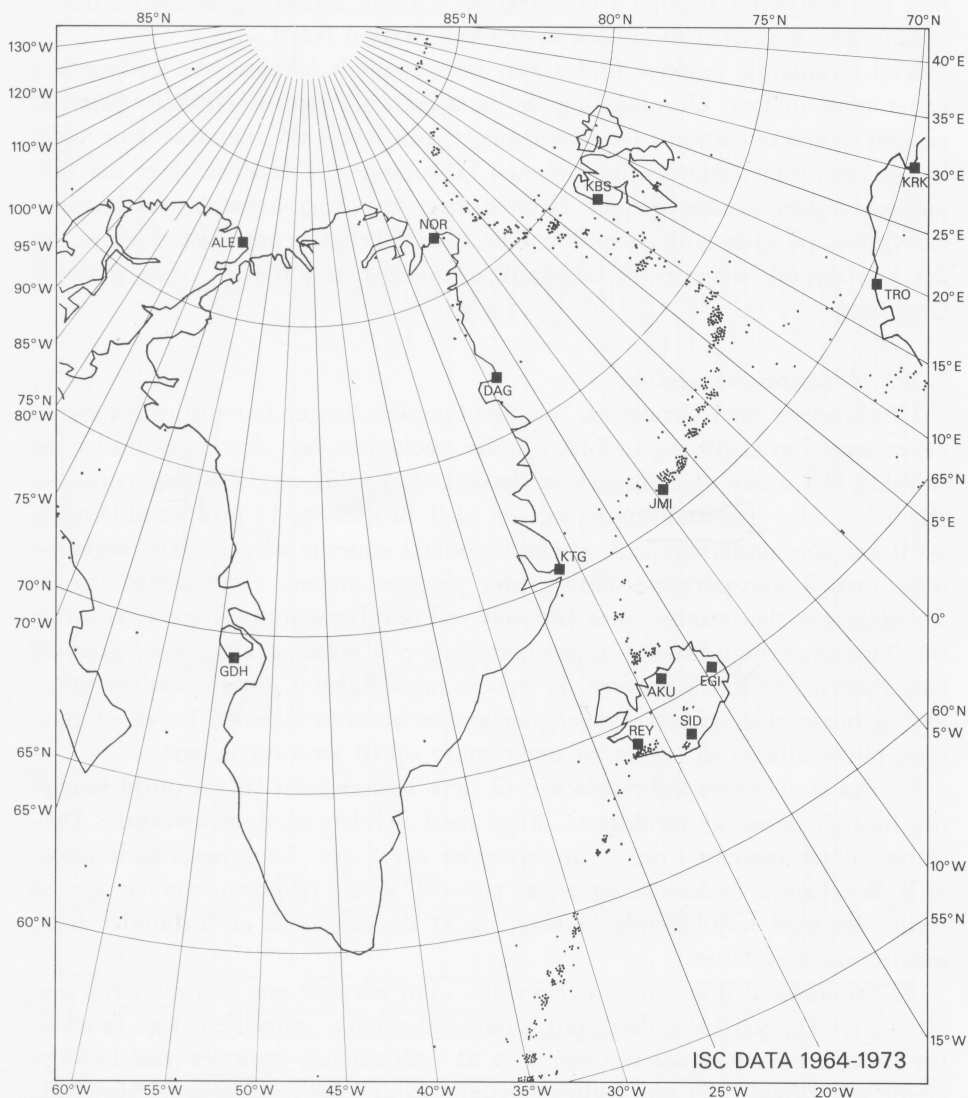


Fig. 6. Jordskælvsaktiviteten ved Grønland i perioden 1964-1973. Hver prik er et jordskælv. De seismiske stationer er mærket med en bogstavkode.

Man ved nu (fig. 6), at der finder jordskælv sted langs østkysten af Grønland af størrelse op til Richtertal godt 5. Også langs nordkysten er der en zone af jordskælv. Station Nord ligger nær skæringen af disse to jordskælvszoner og tillige meget nær en midtoceanisk bjergryg med jordskælv. En af de ting, der gør Station Nord så interessant, er, at den medvirkede til at afsløre fortsættelsen af den Midtatlantiske Bjergryg, der løber nordpå fra Island gennem Norskehavet og Grønlandshavet, og som nær Station Nord har et knæk, idet den fortsætter nordpå i det Arktiske Ocean. Knækket på denne midtoceanryg er kun ca. 150 km fra kysten ved Station Nord.

Ved Grønlands vestkyst findes kun instrumentelt lokaliserede jordskælv i havet midt mellem Grønland og de canadiske arktiske øer. Dog registreres på den seismiske station i Godhavn meget små jordskælv, der ikke kan lokaliseres, men som formodentlig foregår i Diskobugten. I Upernavik er der følt jordskælv. Det samme gælder Holsteinsborg og Angmagssalik. Jordskælvsaktiviteten på Grønland er endnu ikke tilstrækkeligt kendt. Det skønnes, at der kan ske ødelæggelser af betydning forårsaget af jordskælv visse steder i Grønland.

3. *Eksplodingsundersøgelser.*

I forbindelse med Geodætisk Instituts tyngdemålinger har instituttet været interesseret i at skaffe sig indblik i hvilke geologiske lag, der ligger under de istidslag, det meste af Danmark er dækket af. I 1932 og 1933 gennemførtes således en serie eksplosionsundersøgelser af B. Brockamp. 14 profiler af længde 5–10 km blev undersøgt ved, at eksplosioner i enderne af profilerne registreredes med 3 transportable seismografer placeret mellem eksplosionsstederne. Teknikken er den samme, som benyttes ved olieeftersøgning, hvor rystelserne fra eksplosionerne udbreder sig gennem jorden til seismografer. Som oftest er hastigheden i et jordlag større, jo dybere laget ligger i jorden, hvilket betyder, at nogle af de rystelsesbølger, der sendes nedefter i jorden fra en eksplosion, bliver afbøjet så meget, at de kommer op til jordoverfladen.

Ud fra rystelsernes udbredelsestid til flere seismografer på en profil beregnes hastighederne af jordlagene tillige med dybden til deres overside. Den største dybde bestemt i denne undersøgelse var 2 km. En generel konklusion af B. Brockamps undersøgelser er, at positive, lokale tyngdeanomalier ofte er forbundet med højtliggende kalklag, og at de ofte også er forbundet med magnetiske anomalier.

På grundlag af disse undersøgelser kan man allerede ane den moderne opfattelse af Danmarks undergrund med højtliggende grundfjeld i et område fra havet ud for Ringkøbing over Fyn til Sydsjælland, ligeledes med højtliggende grundfjeld i det nordøstligste Jylland samt i det nordøstligste Sjælland, og med sænkningssområder imellem og uden for disse egne.

Langt senere (i 1962, 1964 og 1965) har seismisk afdeling deltaget i Skagerrak-projektet, der var et tværfagligt geofysisk-geologisk fællesprojekt med deltagelse fra Danmark, Norge og Tyskland. Der blev foretaget sprængninger på flere tons trotyl i Lille Bælt og i Skagerrak, i tilslutning til hvilke der var placeret seismografer på en linie gennem Jylland og Sydnorge. Desuden var der opstillet seismografer på Fyn. Bearbejdelsen af disse eksplosionsundersø-

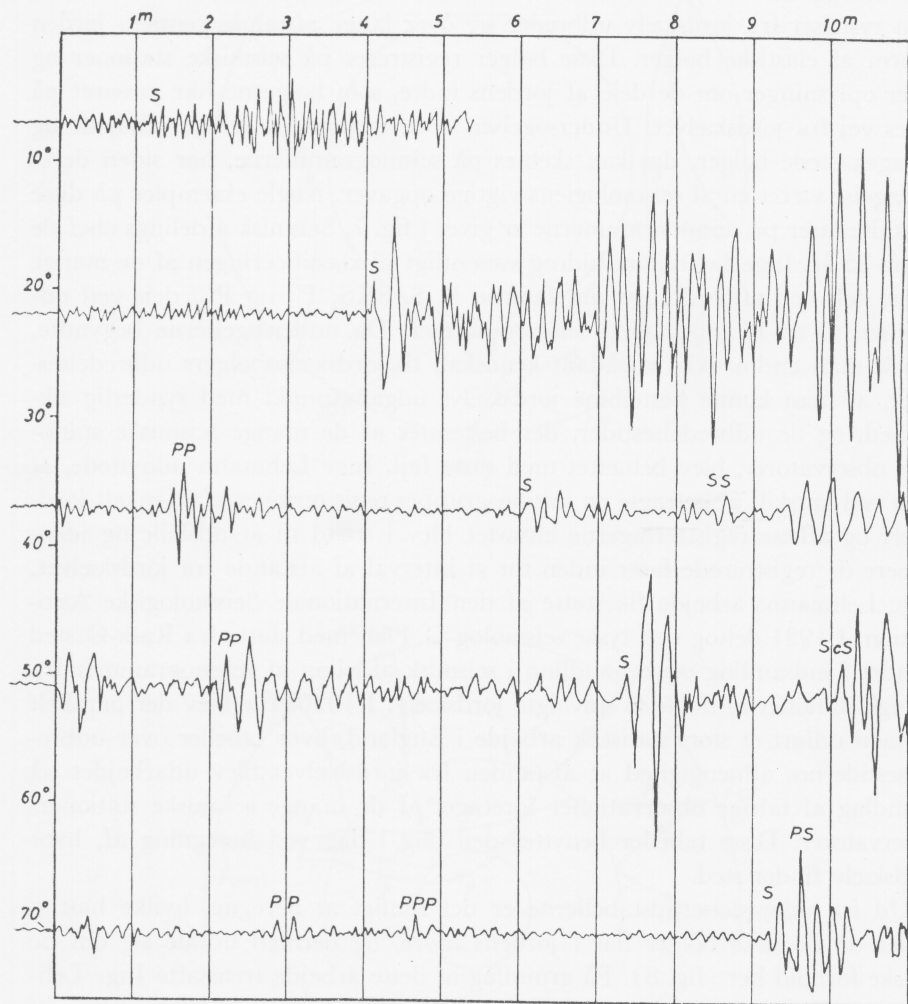


Fig. 7. Registreringer af jordskælv fra forskellige afstande målt i grader på jordkloden. 1 grad er ca. 110 km. For alle registreringerne er ankomsten af P-bølgen placeret ved tidspunkt nul. Tiden er angivet ved streger for hvert minut. Hvilke faser, der er tydeligst, afhænger af afstanden til jordskælvet. P-bølgen er tydet som en lydbølge, hvor det materiale i jorden, som bølgen løber igennem, ryster på langs af bølgens udbredelsesretning. S-bølgen er tydet som en bølge, hvor materialet ryster på tværs af bølgens udbredelsesretning.

gelter, der omfattede de seismiske egenskaber i mere end 5 km dybde, viste, at jordskorpen under Danmark har en tykkelse på lige knap 30 km. Til sammenligning kan nævnes, at skorpetykkelserne i Sydnorge og i Vestsverige er omkring 35 km.

4. Jordens indre.

Ødelæggelser fra jordskælv er koncentreret til disses umiddelbare nærhed, men rystelser fra jordskælv udbreder sig over lange afstande gennem jorden i form af elastiske bølger. Disse bølger registreres på seismiske stationer og giver oplysninger om de dele af jordens indre, som bølgerne har passeret på deres vej fra jordskælvet. Undersøgelser af de mange forskellige afbøjede og tilbagekastede bølger, der kan skelnes på seismogrammerne, har siden deres opdagelse været en af seismologiens vigtige opgaver. Nogle eksempler på disse såkaldte faser på seismogrammerne er givet i fig. 7. Seismisk afdelings chef de første 25 år, Inge Lehmann, bidrog væsentligt til klassificeringen af de mange faser, dels ved afhandlinger om faserne P, S, SKS, P'_1 og P'_2 , dels ved udgivelsen af en håndbog med seismogrammer. Da undersøgelserne begyndte, havde man endnu ikke et sådant kendskab til jordskælvsbølgers udbredelsestider, at man kunne bestemme jordskælvs udgangspunkt med synderlig sikkerhed, og de udbredelsestider, der bestemtes af de mange seismiske stationers observatorer, blev behæftet med store fejl. Inge Lehmann udnyttede, at man ved særskilt at betragte en stationsgruppes registreringer af et enkelt jordskælv og aflæse registreringerne ensartet blev i stand til at udskille og identificere de registrerede faser inden for et interval af afstande fra jordskælvet. Inge Lehmanns arbejde fik støtte af den Internationale Seismologiske Association. I 1931 deltog den tyske seismolog G. Plett med støtte fra Rask-Ørsted Fondet i indsamling og behandling i seismisk afdeling af seismogrammer fra mange stationer af nogle få udvalgte jordskælv. I 1930'erne blev der parallelt hermed udført et stort statistisk arbejde i England, hvor tabeller over udbredelsestidernes afhængighed af afstanden fra jordskælvet blev udarbejdet på grundlag af talrige observationer foretaget af de mange seismiske stationers observatorer. Disse tabeller benyttes den dag i dag ved beregning af, hvor jordskælv finder sted.

Ud fra udbredelsestidstabellerne er det muligt at beregne, hvilke hastigheder de elastiske bølger har i jordens indre, og dermed udtale sig om de fysiske forhold her (fig. 8). På grundlag af dette arbejde fremsatte Inge Lehmann i 1936 den teori, at der i jordens flydende kerne er en indre kerne af anderledes beskaffenhed end det omgivende, flydende materiale (fig. 8, hvor bølgen PKIKP går gennem den indre kerne). Eksistensen af den indre kerne er inden for de senere år blevet bekræftet, og man anser nu den indre kerne for at bestå af fast jernmateriale, medens den ydre kerne består af flydende

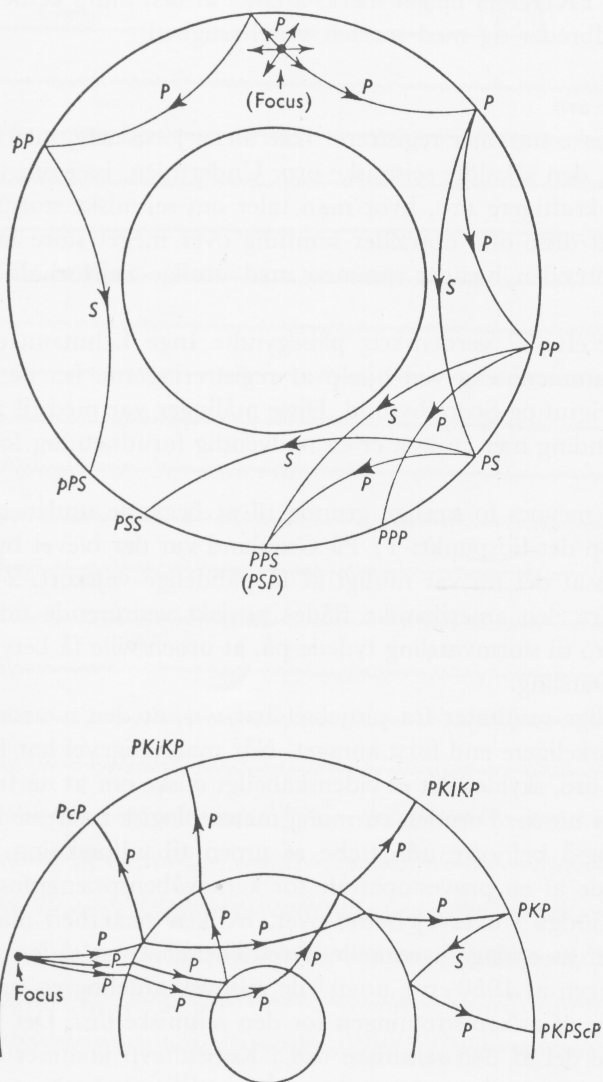


Fig. 8. Udbredelse af rystelsesbølger i jorden. Afbøjning og tilbagekastning giver anledning til, at mange forskellige faser (P, PS osv.) fra et jordskælv kommer frem til en bestemt seismisk station. For overskuelighedens skyld er der ikke tegnet S-bølger fra jordskælvet (focus). S-bølgerne findes dog også direkte fra jordskælvet.

jernmateriale. Den videnskabelige artikel, der indeholdt teorien om den indre kerne, havde den korte titel: P' (udtales P mærke). Artiklen drejede sig om de bølger, der i fig. 8 er benævnt PKIKP og PKP, og det revolutionerende i ideen er, at PKIKP er meget stærkt afbøjet af den indre kerne i jorden, hvori bølgerne udbreder sig med specielt stor hastighed.

5. *Seismisk uro.*

De seismiske stationer registrerer ikke alene jordskælv, men også vedvarende rystelser, den såkaldte seismiske uro. Undertiden, især om vinteren, optræder der en kraftigere uro, hvor man taler om seismiske storme (fig. 9). Det er påvist, at disse ofte optræder samtidig over meget store landområder, og at deres optræden hænger sammen med urolige vejrforhold over det åbne hav.

Nogle år efter 2. verdenskrig påbegyndte Inge Lehmann en undersøgelse af denne sammenhæng ved hjælp af registreringerne fra de to grønlandske stationer Ivigtut og Scoresbysund. Disse målinger var med til at aflive teorien om, at brænding nær en kyst er en nødvendig forudsætning for, at uroen kan opstå.

Der kan nævnes to særlige grunde til at begynde undersøgelser af denne art på netop det tidspunkt: 1) På Grønland var der blevet bygget vejrstationer, således at det nu var muligt at få pålidelige vejrkort. 2) De foreløbige resultater fra den amerikanske flådes projekt vedrørende udnyttelse af den seismiske uro til stormvarsling tydede på, at uroen ville få betydning for fremtidens vejrvarsling.

De endelige resultater fra projektet har vist, at den meteorologiske udnyttelse er vanskeligere end først antaget. Når man alligevel har fortsat studierne af seismisk uro, skyldes det et videnskabeligt ønske om at nå frem til en bedre forståelse af uroen. Foruden en mulig meteorologisk interesse kunne en sådan forståelse også befordre udnyttelse af uroen til udforskning af jordskorpen. Og i tilfælde af en prøvestopaftale for kernevåbensprængninger vil en viden om uroen indgå i overvejelserne over, hvilken sikkerhed man har for med seismografer at opdage eventuelle overtrædelser af en sådan aftale.

I slutningen af 1950'erne udviklede seismisk afdeling en metode til rutinebestemmelse af ankomstretningen for den seismiske uro. Det viste sig, at den væsentligste del af den seismiske uro i København kommer fra nord. I forvejen vidste man, at uro, som dannes nær den norske kyst, undertiden kan påvises i store dele af Europa, men alligevel er det forbavsende, at så lidt uro ankommer fra vest.

Arbejdet med retningsbestemmelser omfattede også de grønlandske stationer Ivigtut, Godhavn, Nord, Scoresbysund og Inge Lehmann-stationen på Grønlands indlandsis. Den seismiske uro, der blev målt på de grønlandske

STATION <u>GDH COMP NS</u>		MAG <u>1500</u>		CAL. CUR <u>0,20 G</u>		<u>0,109 N/A</u>	
DATE ON <u>12-19-75</u>		TIME ON <u>1350</u>		CORR <u>+20/0</u>		MS @ <u>1310</u> GMT	
DATE OFF <u>12-20-75</u>		TIME OFF <u>1308</u>		CORR <u>+20/0</u>		MS @ <u>1300</u> GMT	
To <u>15</u> Tg <u>100</u>		Remarks:					

GRIND MOT.

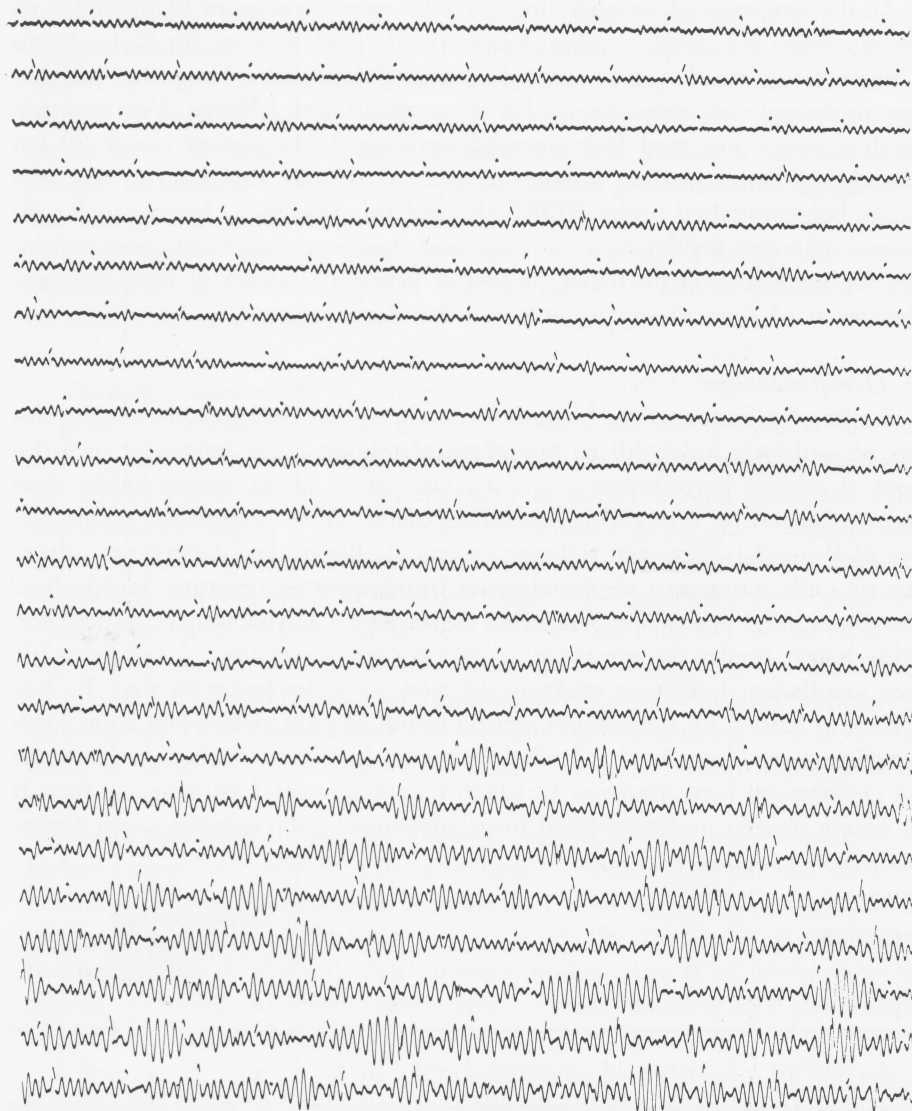


Fig. 9. Udsnit af seismogram med en begyndende seismisk storm. Registreringen læses oppefra og ned-
 efter, fra venstre mod højre. Det fulde seismogram har fem gange så lange linier som dette udsnit.
 Den seismiske uro har voksende amplitude i løbet af det afbildede døgn. Minutmarkeringerne frem-
 træder som små stregstumper i et regelmæssigt mønster på seismogrammet.

stationer, viste sig i det væsentlige at komme sydfra. Dette resultat førte til en erkendelse af, at det meste af den seismiske uro i Grønland frembringes ved kystområderne i syd, og at uroen breder sig derfra under stadig afsvækning nordpå. Herudover kommer der seismisk uro fra lokale storme over vandet ved kystnære stationer.

Undersøgelserne af seismisk uro har ikke været begrænset til målinger på registreringer fra dansk område. I samarbejde med forskere fra Københavns Universitet og fra den store seismiske station NORSAR i Norge har afdelingen undersøgt den seismiske uro fra et vandkraftværk i Norge. Ved spektralanalyse kunne uro med frekvenser på omkring 3 Hz påvises i over 20 km afstand, og denne uro har kunnet udnyttes til at måle variationer i den seismiske bølgehastighed under NORSAR med stor præcision. Interessen for sådanne målinger skyldes bl. a., at man har observeret bølgehastighedsændringer før jordskælv og nu håber på ved et generelt studium af hastighedsændringer at nå frem til engang at kunne forudsige jordskælv.

6. Overfladebølger.

I seismologiens barndom bemærkede man, at de instrumentelle registreringer af jordskælv indeholdt en hovedfase af relativt lange bølger og to forløbere af relativt korte bølger (fig. 10). Den første af forløberne kaldte man primær-bølgen og den anden sekundær-bølgen. Disse betegnelser er nu blevet til P- og S-bølger, som tidligere er omtalt. Begge disse bølgetyper udbreder sig i alle retninger i tre dimensioner fra rystelsernes centrum, jordskælvet. Det blev tidligt erkendt, at bølgenes udbredelse i hovedfasen er anderledes. Disse bølger breder sig som ringe ud over jordens overflade, på samme måde som vandbølger breder sig omkring det sted, hvor der kastes en sten. En udvikling af teorien for hovedfasen, der på grund af udbredelsen hen langs jordoverfladen nu bliver kaldt overfladebølgerne, blev først mulig, da forskerne fik elektroniske regnemaskiner til hjælp i slutningen af 1950'erne, og først ti år senere blev en undersøgelse af overfladebølgers udbredelse hen over Grønland lavet i seismisk afdeling.

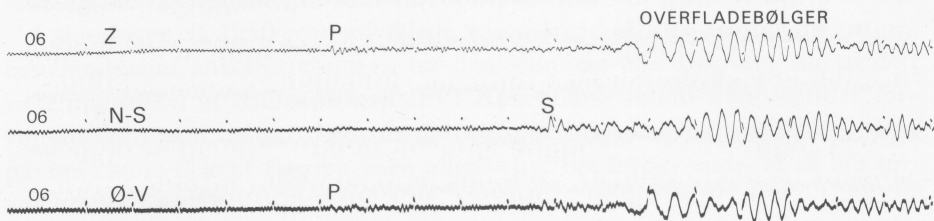


Fig. 10. Registreringer fra København af et jordskælv i det nordlige Atlanterhav ca. 300 km sydøst for Grønlands sydspids. Afstanden til København er 25 grader, dvs. ca. 2800 km. Tre forskellige instrumenter: Vertikal, nord-syd og øst-vest. P-bølge klokken 06 06 12 og S-bølge klokken 06 10 40.

Ligesom der findes to typer »forløbere«, eksisterer der to typer overfladebølger, Rayleigh- og Love-bølger. Den undersøgelse, der blev gennemført i seismisk afdeling ved hjælp af de tre grønlandske seismiske stationer i Godhavn, i Kap Tobin og på Station Nord, drejede sig om måling af overfladebølgenes hastighed for forskellige bølgelængder. Disse målinger blev brugt til beregning af bølgehastighederne i jorden under Grønland, idet hver bølgelængde er afhængig på sin måde af bølgehastighederne i jorden mellem overfladen og nogle få hundrede kilometers dybde. Resultaterne viste, at jordens skorpe og øvre kappe ned til dybder på omkring 100 km under Grønland meget ligner de tilsvarende jordlag under Canada. Denne konklusion understreger, at Canada og Grønland i jordens tidlige geologiske udviklingshistorie har hængt sammen uden hav imellem.

Interessen for seismiske overfladebølger er i seismisk afdeling videreført til studiet af amplitudeændringer af overfladebølgerne, når de udbreder sig fra en station til en anden.

7. Detektionsseismologi.

Efter 2. verdenskrig er der udført et stort antal forsøg med kernevåben. Sprængningerne har fundet sted både i atmosfæren og under jordoverfladen. De underjordiske sprængninger udsender så meget af den udviklede energi som seismiske bølger, at de kan minde om mindre jordskælv. I seismisk afdelings bulletiner og rapporter optræder de ligesom jordskælv. Fra de atmosfæriske eksplosioner er det kun en meget ringe del af energien, der trænger ned i jorden og bliver til seismiske bølger. Alligevel kom der betydelige udslag på registreringerne fra de store atmosfæriske sprængninger under atomkapløbet i begyndelsen af 1960'erne, som kulminerede med »Dommedagsbomben« på 58 megaton. Disse forsøg tiltrak stor offentlig opmærksomhed, som bl. a. medførte, at dagspressen var meget interesseret i afdelingens registreringer af forsøgene.

Denne periode afsluttedes i 1963 med den begrænsede prøvestopaftale, der forbød forsøg i atmosfæren, i det ydre rum og i havet. Der har dog siden været udført forsøg i atmosfæren, idet hverken Frankrig eller Kina har tiltrådt aftalen. En af vanskelighederne ved at få udvidet aftalen til en fuldstændig prøvestopaftale er usikkerheden omkring muligheden af at kontrollere, om aftalen overholdes af begge parter. Her kommer ligheden med jordskælv til at spille en afgørende rolle.

I flere lande, især i USA og i Storbritannien, blev der ydet en stor indsats for at udvikle de seismologiske metoder til at påvise underjordiske kernevåbenforsøg. I Norden blev problemet behandlet på et nordisk udenrigsministermøde i 1965, hvorefter det blev besluttet, at det skulle undersøges, om de nordiske lande kunne yde et bidrag til løsning af kontrolspørgsmålet ved

at etablere registreringsstationer på nordisk område. Det var samme år, det amerikanske seismiske array i Montana blev indviet. Et seismisk array består af et antal seismometre spredt i et geometrisk mønster på en sådan måde, at en fælles registrering af de seismiske signaler kan vise den rumlige udbredelse af de seismiske bølger eller endog fremhæve dem, der har en bestemt retning og hastighed.

Især Sverige har vist stor interesse for bestræbelserne for at opnå aftale om et fuldstændigt prøvestop. I januar 1966 fandt der et møde sted i Stockholm mellem repræsentanter fra de nordiske udenrigsministerier og seismologiske eksperter. Under mødet blev udarbejdet et mandat for en samarbejds-komité. På komiteens første møde i København blev den navngivet komiteen for nordisk samarbejde i detektionsseismologi. Komiteen afleverede sin rapport i marts 1967. I rapporten var angivet nogle mulige placeringer i Norden af detektionssystemer, men samtidig fremhævedes det, at ingen eksisterende eller foreslåede systemer med sikkerhed kunne detektere og identificere underjordiske kerneekspllosioner. Imidlertid skulle det være muligt med en placering i Norden at opnå de maksimale identifikationsmuligheder med den da kendte teknik. Komiteen efterfulgtes af en ny gruppe også omfattende medarbejdere fra udenrigstjenesterne. Hensigten var, at gruppen skulle udarbejde konkrete planer for et fællesnordisk anlæg. I mellemtiden var Norge indgået i et samarbejde med USA om oprettelsen af NORSAR, som var et array efter de samme retningslinier som det i Montana. Da der ikke blev noget fællesnordisk anlæg, gik Sverige i gang med at oprette det array, som er kendt under navnet Hagfors-stationen. På denne baggrund måtte gruppen indskrænke sig til at følge udviklingen og i øvrigt fremkomme med anbefalinger om det nordiske samarbejde. Et af resultaterne har været de nordiske seminarer om detektionsseismologi, der siden på skift har været afholdt hvert år i de nordiske lande.

I Danmark ville man undersøge mulighederne i Grønland, og i samarbejde med USA oprettedes den forømtalte forsøgsstation Inge Lehmann på den grønlandske indlandsis. Afdelingen har haft en medarbejder på stationen og har deltaget i bearbejdelse af målingerne af stationens følsomhed og den seismiske uro. Det var en udmærket station, men den viste sig for kostbar at opretholde og blev nedlagt. Planer om i stedet at udbygge det seismiske anlæg på Station Nord måtte opgives, da bemanningen her blev reduceret.

Den internationale nedrustningskonference, CCD, vedtog i 1976 et svensk forslag om at oprette en *ad hoc*-gruppe af seismologiske eksperter til undersøgelse af, hvorledes international udveksling af seismiske data kan fremme detektionen og identifikationen af seismiske hændelser. Afdelingen deltager i *ad hoc*-gruppen

8. Mikrojordskælv.

I udlandet har mange undersøgelser vist, at der som oftest er en sammenhæng mellem store, ødelæggende jordskælv og mikrojordskælv, der er så små, at de ikke forårsager ødelæggelser og i mange tilfælde slet ikke bemærkes uden brug af seismografer. For at få et mere detaljeret billede af jordskælvsaktiviteten i Danmark og Grønland har seismisk afdeling i årene 1974–77 anskaffet fire transportable seismografer, der skal opstilles i kortere perioder på skiftende steder. I løbet af nogle få dage i foråret 1976 og i foråret 1977 er nogle få mikrojordskælv registreret i Søndre Strømfjord, Grønland (fig. 11). Det er planen, at undersøgelser af mikrojordskælv skal gennemføres i Nordjylland, på Bornholm, i Østgrønland, ved Diskobugten og i Upernavik i Vestgrønland.

SØNDRE STRØMFJORD, GRØNLAND

23. APR. 1977

P- OG S-BØLGE MELLEM
KLOKKEN 0452 OG 0453

P

S

Fig. 11. Registrering fra Søndre Strømfjord i Vestgrønland af et jordskælv
150–200 km fra seismografen.

9. Regionale forskelle.

I seismisk afdeling har aflæsning af amplituderne af seismiske signaler i de fleste tilfælde spillet en sekundær rolle som en støtte for aflæsning af ankomsttiderne. Dette skyldes ikke mindst, at det blandt seismologer er almindeligt erkendt, at spredningen i de amplitudedata, der klassificeres og samles, er lige så stor som amplituderne selv på grund af lokale forskelle i jordlagenes egenskaber under de seismiske stationer. Hvis man forsøger at finde gennemsnits-egenskaber i jorden, der er afhængige af dybden, men uafhængige af, hvor på jordoverfladen vi observerer, er amplitudemålinger derfor usikre. Hvis man derimod undersøger forskelle fra sted til sted under de seismiske stationer eller under jordskælvszonerne, er amplitudemålinger meget følsomme. I 50-året for seismisk afdelings oprettelse er der i den internationale såvel som i den danske seismologiske forskning en stigende erkendelse af, at der eksisterer meget væsentlige forskelle ned til store dybder (måske 1000 km) mellem forskellige regioner af jorden, f. eks. mellem kontinenter og oceaner og mellem aktive jordskælvszoner og jordskælvsfrie områder. I de seneste år er der af afdelingen foretaget observationer og beregninger af, hvordan sådanne forskelle hænger sammen med forskelle i amplituder af overfladebølger og med forskelle i udbredelsestider af P- og S-bølger.



Kontrolbord, læser og outputudstyr til GIER. Interiør fra »pige-kammeret« i instituttets daværende lokaler Nr. Farimagsgade 1, hvor GIER trods de trange pladsforhold fungerede upåklageligt i hele sin funktionstid.



Interiør fra instituttets maskinstue for RC 4000. En del af centralenheden ses i baggrunden, foran denne de to pladelagre, ved vinduet magnetbåndsstationen og i forgrunden kontrollbordet med læser og skrivemaskine.