

Seismiske eksperimenter ved Rømø

af

JØRGEN HJELME

Abstract

A seismic refraction profile has been measured in the southern Jylland. The source was explosions near the island of Rømø. The instrument was a Willmore seismograph, which was moved along the line. The results are interpreted and compared with other investigations.

I løbet af sommeren 1959 blev ret store mængder sprængstof bragt til at eksplodere i vadehavet mellem Rømø og fastlandet. Sprængningerne blev udført i forbindelse med nogle forsøg på at ændre forløbet af tidevandets strømning i dette område. Imidlertid fik Geodætisk Institut lejlighed til at udnytte sprængningerne til seismiske refraktionsbestemmelser, og jeg vil gerne her takke instituttets direktør, professor dr. phil. EINAR ANDERSEN for tilladelse til at benytte de foretagne observationer.

Undersøgelser over elastiske bølgers hastigheder i det indre af jorden har ført til en jordmodel, der består af en kerne, med en indre kerne, en kappe og en jordskorpe. Kernens og kappens seismiske egenskaber er i dag ret godt bestemt takket være studiet af de bølger, der frembringes af jordskælv. Endnu er det ikke lykkedes at påvise, at disse egenskaber har nogen regional afhængighed. Lagene under jordens skorpe synes at være aksialsymmetriske. Anderledes stiller det sig med skorpen. I 1956 er givet en oversigt af P. BYERLY (1) over de metoder, der anvendes til skorpens udforskning, og de resultater, der er fundet. Heraf fremgår det, at skorpens tykkelse er 30–40 km, men at de mange forskellige iagttagelser vanskeligt lader sig forene til et generelt billede. Undersøgelser af elastiske bølger, som er bundet til jordens overflade, har vist, at der er en afgørende forskel på skorpen under kontinenterne og under oceanerne. BYERLY tør heller ikke afvise muligheden af, at skorpens sammensætning er forskellig under de forskellige kontinenter. Det har derfor stor interesse at få udført undersøgelser af skorpen mange forskellige steder jorden over.

Til iagttagelse af rystelserne fra Rømø-sprængningerne benyttedes en Willmore seismograf af fabrikatet Hilger & Watts. Seismometret har en masse på ca. 4 kg og en svingningstid på 1 sek. Det er koblet induktivt til et 0,25 sek. galvanometer, hvis udslag registreres på fotografisk papir. Den anvendte papirfremføringshastighed var 53 mm/min. Papiret blev drevet af en synkronmotor, der blev tilsluttet det forhåndenværende veksel-

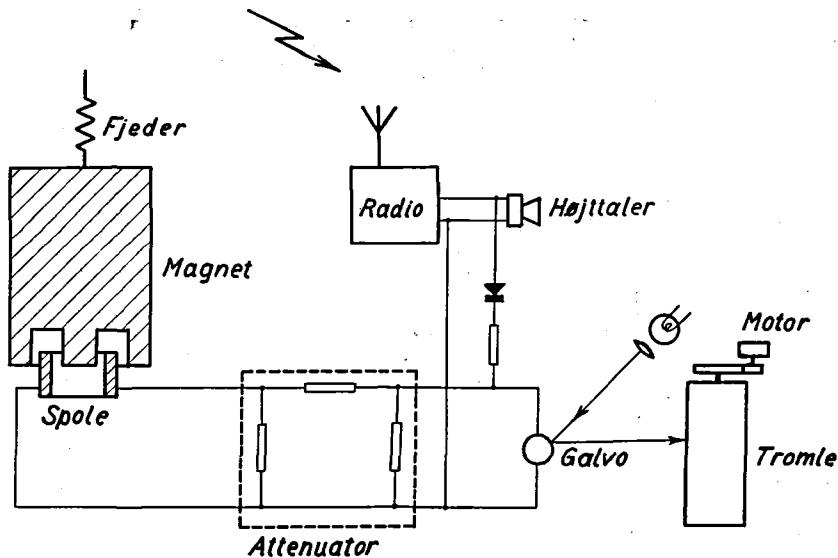


Fig. 1.

strømsnet. Hastigheden blev kontrolleret ved hjælp af sekundmærker fra et marinekronometer med sekundkontakter. Der blev målt i 7 stationer langs en ca. 40 km lang profil. Da der kun stod een seismograf til rådighed, var det nødvendigt at flytte den mellem stationerne.

Sprængtidspunkterne blev overført fra sprængstedet til stationerne ved hjælp af et VHF radioanlæg. I det elektriske kredsløb, der benyttedes til affyringen, blev indskudt en ekstra detonator, som sprængtes samtidig med den store sprængmængde. Omkring denne ekstra detonator var lagt en ledning, som blev bortsprængt af eksplosionen. Så længe denne ledning var intakt, moduleredes radiosenderen med en 1000 hz tone. På modtagerstationen blev radiosens output ensrettet og påtrykt seismografens galvanometer, som da viste et konstant udslag, indtil sprængningen fandt sted. (Fig. 1).

De her omtalte målinger er udført i april og i august måned. I april blev der kun målt i Brøns, og den sprængning, der er benyttet, fandt sted et par hundrede meter ud for Juvrediget. Sprængningerne i august fandt alle sted i et område, hvis udstrækning var ca. 500 m. Sprængningerne skulle bane vej til løbet Sælpriel, $55^{\circ} 10' N$ $8^{\circ} 35' E$.

De seismiske stationers placering fremgår af fig. 2. Afstanden Δ mellem stationerne og sprængstedet er udmålt på et 1:100 000 kort. Til beregningerne er afstandene benyttet med en nøjagtighed på 0,1 km. Alene usikkerheden i sprængstedets placering forhindrer større nøjagtighed. I tabel I er angivet afstanden til de enkelte stationer. Endvidere er angivet mængden af sprængstof, der er benyttet til de sprængninger, der er registreret.

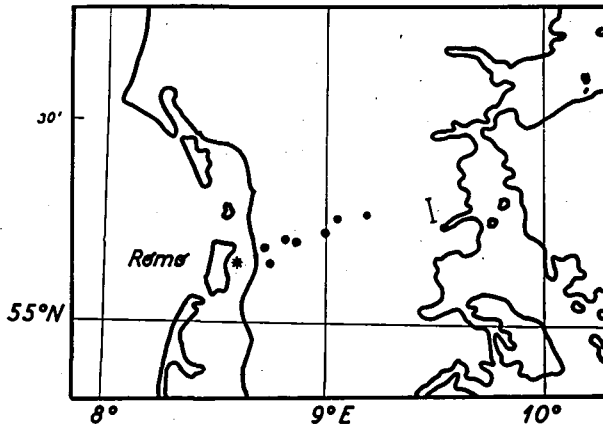


Fig. 2.

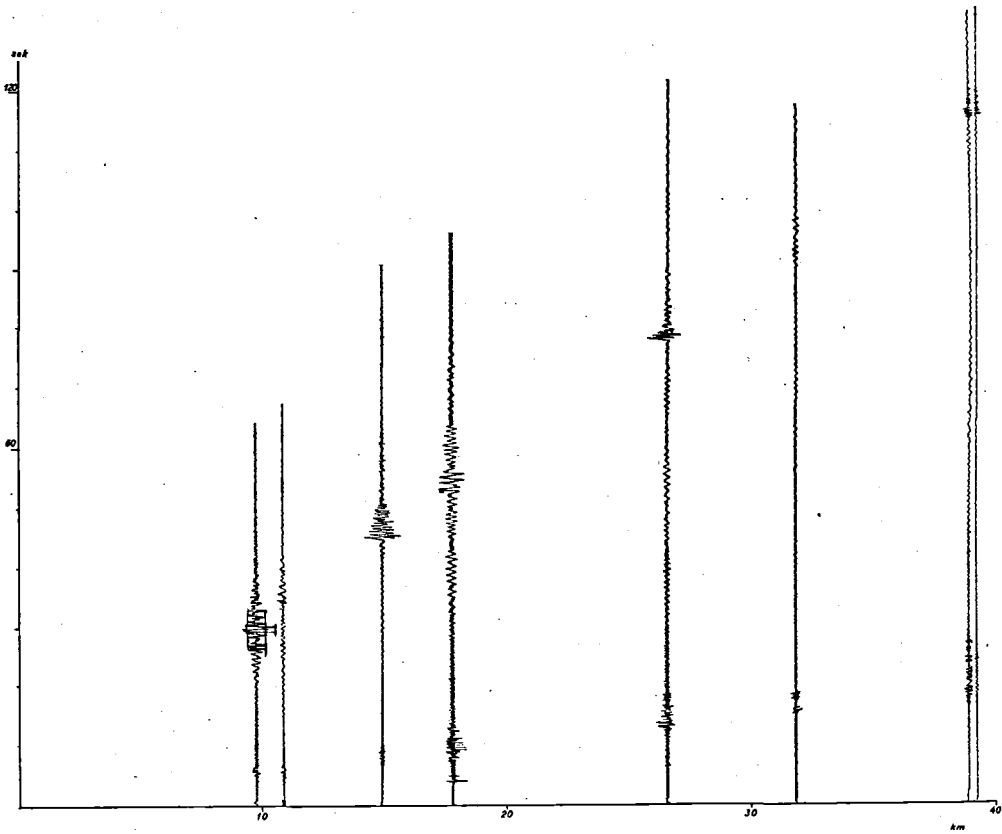


Fig. 3.

Tabel I

Station	Δ	Attenuator	Sprængmængde
Brøns.....	9,8 km	1/30	0,8 t.
Skærbæk.....	10,9	1/30	1,2
Birkelev.....	14,9	1/10	.
Vodder.....	17,8	1/10	2
Højrup.....	26,7	1/10	3
Kastrup.....	31,9	1/10	2,3
Nustrup.....	39,2		1,1
			2,5

De seismogrammer, der er benyttet ved bearbejdelsen, er afbildet i fig. 3, hvor de er placeret i forhold til stationernes afstand fra sprængstedet. De aflæste løbetider er med undtagelse af den langsomste fase afbildet på fig. 4. Der er ikke foretaget korrektion for højdeforskelle. Sprængningerne fandt sted nær 0-niveau, og den højest beliggende station lå i 50 m højde.

Resultaterne af udjævning efter mindste kvadraters metode med lige vægt på hver observation er givet i tabel II. Det er antaget, at løbetidskurverne er retlinede, så de kan fremstilles af:

$$T = \Delta \cdot \left(\frac{1}{v}\right) + t_0.$$

De middelfejl, der er angivet i tabel II, er beregnet på grundlag af den indbyrdes overensstemmelse mellem de observerede løbetider og den fundne kurve.

Tabel II

v	t_0
$6,03 \pm 0,16$ km/sek	$+1,74 \pm 0,11$ sek
2,37 ,08	0,08 ,24
2,23 ,02	1,1 ,10
1,89 ,04	0,73 ,22
1,50 ,11	0,7 1,5
0,340 ,004	1,15 ,80

Løbetidskurverne må være retlinede, hvis skorpen er opbygget af homogene lag. Det er ikke muligt af de foreliggende observationer at undersøge, hvorvidt disse lag er vandrette. En sådan undersøgelse ville kræve en profil i modsat retning. F. eks. kunne man i de samme stationer måle rystelserne fra sprængninger foretaget i Nustrup eller længere inde i landet. Indtil sådanne målinger foreligger kan vi kun antage, at der foreligger vandrette lag.

Den mest fremtrædende fase på seismogrammerne har en forplantnings-hastighed på 340 m/sek. Da denne hastighed er den samme som lyd-hastigheden i luft, er det nærliggende at antage, at lydbølgen er årsag til denne fase, idet det kan tænkes, at lydbølgen har påvirket terraingenstande, som så har overført rystelserne til jorden. Det er observeret, at selv i den fjerneste station var det muligt at høre eksplosionerne.

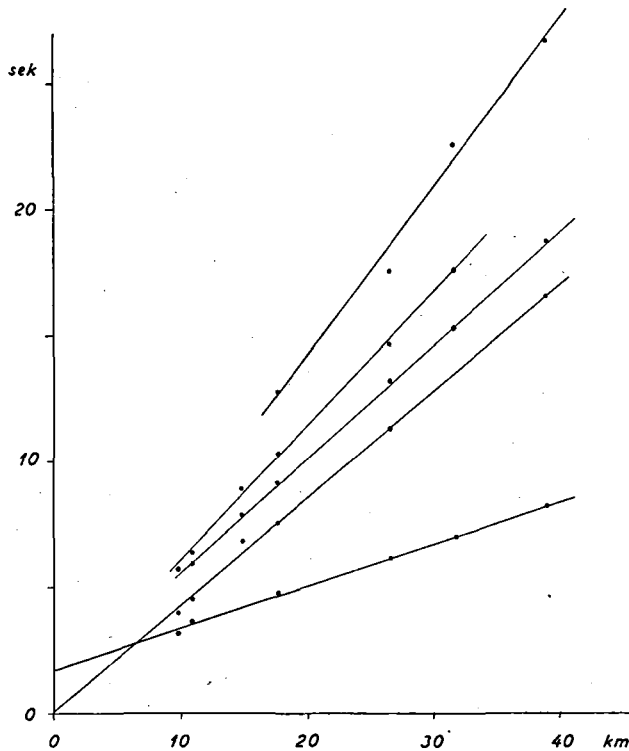


Fig. 4.

De to faser med hastighederne henholdsvis 1,5 og 1,9 km/sek. kan være forskellige overfladebølger. Hastigheden 1,5 km/sek er ikke særlig velbestemt, da de hertil hørende punkter ligger ret spredt. I LEHMANN (2) har tidligere påvist bølger med 1,7 og 1,6 km/sek på strækningen Kalø vig-København. LEHMANN antog, at disse bølger var Rayleigh bølger i de sedimentære lag. Det er imidlertid også muligt, at disse faser er P-bølger i de øverste lag. N. E. NØRLUND og B. BROCKAMP (3) har bestemt hastighed i tertiære og kvartære aflejringer og har fundet 1,4–1,9 km/sek.

I det følgende forudsættes, at 1,9 km/sek bølgen er en P-bølge i et øvre lag. Under dette lag finder vi nu to faser med næsten samme hastighed ca. 2,3 km/sek. De hertil hørende observationer er blevet udjævnet under den forudsætning, at det er bølger med samme hastighed. Denne udjævning gav da hastigheden $2,33 \pm 0,03$ km/sek og forsinkelserne 0,2 og $1,6 \pm 0,1$ sek. Denne hastighed stemmer godt overens med de tidligere (3) bestemte hastigheder for kridt i Danmark. Af forsinkelsen for den første fase fås tykkelsen af det øvre lag til 0,33 km. Den næste fase kan skyldes en kombination af P- og S-bølger. Sådanne kombinationer er fundet af H. BERCKHEMER og J. OLIVER (4) ved modelforsøg.

Den største bestemte hastighed er 6,03 km/sek. Med de værdier, der er

bestemt for det øverste lag, vil forsinkelsen i dette lag andrage 0,33 sek. Den resterende forsinkelse tilskrives nu kridtlaget, hvis tykkelse da bliver 1,78 km. Dybden til 6,03 km/sek-laget bliver da 2,1 km. Denne dybde er beregnet med den antagelse, at kridtlaget har hastigheden 2,33 km/sek helt ned til 6,03 km/sek-laget. Imidlertid har P. WILLMORE (5) ved Soltau fundet en hastighed på 4,4 km/sek. Ved tidligere målinger i Danmark (3) har man under kridtet fundet hastigheder på 3–5 km/sek. Disse hastigheder er ikke iagttaget ved de her udførte målinger. Men stiger hastigheden i kridtlaget med dybden, vil dette bevirke, at 6,03 km/sek laget må søges dybere end her beregnet. Af observationerne fra Helgoland sprængningen bestemte WILLMORE hastigheden for P_g til 5,95 km/sek. Dybden af dette granitlag fandt WILLMORE til 5,9 eller 6,7 km, afhængig af hvilken hypotese, der benyttedes.

Denne interpretation giver altså følgende struktur:

0,33 km med 1,9 km/sek	(kvartær og tertiær)
1,78 km med 2,33 km/sek	(kridt, kalksten, lersten og sandsten)
Herunder 6,03 km/sek	(granit?)

Som det fremgår af det foregående, hviler denne model imidlertid på flere ikke verificerede antagelser. Den følgende sammenligning med andre erfaringer antyder da også, at denne model kun i store træk svarer til den sandsynligste struktur.

NØRLUND og BROCKAMP (3) har ikke udført målinger i dette område. Den nærmeste profil findes ved Haderslev. Den største hastighed, der er målt her, 5,15 km/sek, er fundet i en dybde af 1,5 km. Lader vi antagelsen om vandrette lag falde, og i stedet antager 5 km/sek i laget, bliver den tilsvarende skinhastighed 6 km/sek, når lagets hældning er 6°. Også kridtet ligger højere i Haderslev. I denne profil er der mellem kridtet og det dybeste lag fundet et lag med 3,2 km/sek. Når afstanden til Haderslev profilen og dennes relativ korte udstrækning tages i betragtning, synes der imidlertid ikke at være direkte modstrid mellem disse målinger.

Danmarks Geologiske Undersøgelse har stillet oplysninger om fire dybdeboringer i Sønderjylland til rådighed for Geodætisk Institut. Ifølge disse boringer synes de geologiske formationer fordelt således: De kvartære og tertiære dannelser strækker sig til en dybde af 360–470 m under nulniveauet. Når man tager hensyn til den ret store usikkerhed på den seismiske bestemmelse af dette lags dybde, er der god overensstemmelse. Under disse lag findes kridt ned til en dybde på ca. 1000 m, hvor det afløses af trias. Grænsen mellem trias og perm varierer ret meget mellem de fire boringer, men de fundne dybder varierer omkring den seismisk bestemte dybde af 6,03 km/sek-laget. Dette kunne tyde på, at den fundne dybde svarer til de faktiske forhold, hvorimod den fundne hastighed på ca. 6 km/sek normalt tilskrives granit.

I forbindelse med disse eksperimenter er der ikke fundet faser fra bølger, som har forplantet sig gennem kappen. Dette var heller ikke at vente, idet P_n fra Helgoland sprængningen først observeredes med sikkerhed i afstanden 142 km. Usikre P_n blev iagttaget fra 66 km. På så store afstande ville sprængningerne fra Rømø næppe være iagttaget. Allerede i Nustrup

nærmer amplituderne sig baggrundsuroen. Dette kan til dels skyldes, at kun en forholdsvis ringe del af den udviklede energi er omsat til elastiske bølger i jorden, idet sprængningerne netop skulle kaste store mængder materiale væk.

Medvirkende til eksperimenternes heldige forløb har været det gode samarbejde mellem de mange implicerede. Vi skylder professor N. NIELSEN, Geografisk Laboratorium og oberst B. VALEUR LARSEN, ingeniørtropperne tak for, at dette samarbejde kom i stand. Fra Geodætisk Institut har chefen for seismisk afdeling, statsgeodæt H. JENSEN ledet planlægningen af de seismiske eksperimenter og deltaget i de første forsøg. Materieforvalter T. NIELSEN har assisteret ved målingerne, og afdelingsgeodæt T. KRARUP har ledet den seismiske gruppe under mit fravær i Grønland.

SUMMARY

In the summer of 1959 rather large amounts of explosives were shot in the tidal flats between the island of Rømø and Jylland (fig. 2). This gave an opportunity to make seismic soundings in the area. Having only one seismograph this had to be moved along the profile, recording each shooting at only one site.

The seismograph was a 1 sec Willmore seismometer connected to a 0.25 sec galvanometer placed in a Hilger & Watts recording box. The paper speed was only 53 mm/min, which gave only slight resolution.

The shot instant was transmitted from the shot point to the site of the seismograph with an ordinary VHF communication set. At the recording end of this link the output was rectified and superposed on the recording galvanometer. At the shooting end the transmitter was provided with a special device transmitting the exact time of firing. This device contained a 1000 c/s oscillator, which was interrupted by the explosion.

The seismograms are shown in fig. 3, spaced according to the distance to the shot point. The most prominent phase travel with a velocity of 0.34 km/sec equal the velocity of sound in air. The first phase was well marked in most of the records. The readings have been plotted in fig. 4.

The readings are fitted to straight lines by adjustment by least squares, and the results are given in Table II.

The results are compared with other investigations. And it is found that this sounding gives an approximate picture of the geological structure.

LITTERATUR

1. P. BYERLY: Subcontinental Structure in the Light of Seismological Evidence. *Advances in Geophysics* 3, 105-152 (1956).
2. I. LEHMANN: On Two Explosions in Danish Waters in the Autumn of 1946. *Geofisica Pura e Applicata* 12, 145-161 (1948).
3. N. E. NØRLUND und B. BROCKAMP: Seismische Feldarbeiten in Dänemark. *Geod. inst. skr.* 3. serie 2 (1934).
4. H. BERCKHEMER und J. OLIVER: Zur Deutung seismischer Einsätze mit parallelen Laufzeitkurven. *Zeitschrift f. Geophys.* 21, 152-164 (1955).
5. P. L. WILLMORE: Seismic Experiments on the North German Explosions, 1946 to 1947. *Phil. trans. Roy. Soc. London Series A* 242, 123-151 (1949).