

KATTEGAT-JORDSKÆLVET

D. 22 DECEMBER 1759

en reanalyse av Biskop Harboes data fra 1760

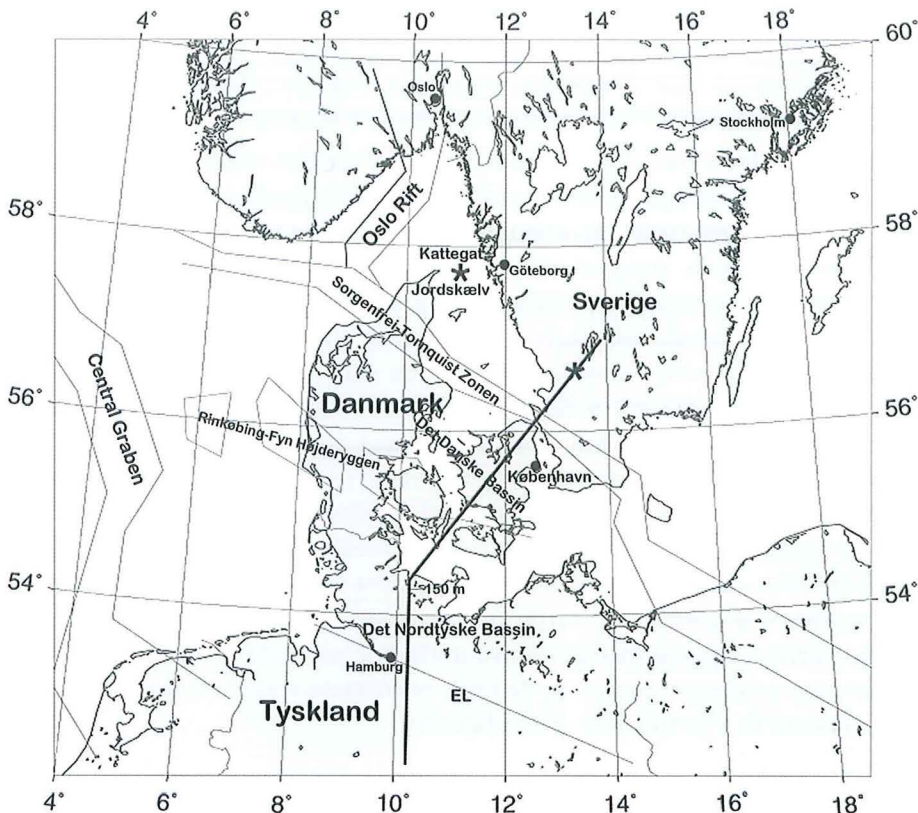
Eystein S. Huseby

Jordskælvet forårsagede rystelser på hele Sjælland, dele af Jylland, Skåne, dele af Sydnorge og Slesvig-Holsten. Der har næppe været noget tilsvarende i historisk tid, og det har derfor status som det størst kendte jordskælv i Sydskandinavien og kan som sådan bruges som reference ved seismiske risikoanalyser for de sydsvenske atomkraftværker og for Øresundsbron. Med baggrund i præsteindberetninger initieret og indsamlet av biskop Harboe for herrederne i Sjællands Stift i 1759/60, har vi reanalyseret jordskælvet ved at simulere det seismiske bølgefelt i 2-dimensioner. Vi vurderer at de 2 sedimentbassiner, det danske og nordtyske forstærkede de seismiske shearbølger (S-bølger) 5 – 10 gange, således at jordskælvet mærkedes specielt kraftigt i dele af Sjælland, i Jylland og i Slesvig-Holsten. Ved at korrigere for denne bassinfaktor får vi et tal - MS - på Richterskalaen på 5,1 for Kattegat-jordskælvet og ikke ca. 5,7 som alment antaget. I praksis vil dette medføre, at det seismiske risikoniveau for regionen må nedjusteres.

I artiklen er der anvendt en del fagtermer, der ikke tidligere har været brugt i VARV. Der er derfor udarbejdet en fyldig ordliste (se side 34-35).

INDLEDNING

I denne artikel skal vi se nærmere på jordskælvet, som fandt sted natten til den 22. december 1759 udenfor Gøteborg dvs. i Kattegat nord for Sjælland (figur 1). Som nævnt rangerer det som det klart største i Sydskandinavien og er meget omtalt i danske beretninger - ikke mindst i samtiden - af astronom og professor Christian Horrebow. Jordskælvet er også hyppigt omtalt i faglitteraturen, fordi dets formodede styrke tjener som målestok ved beregninger af den seismiske risiko for store bygningsværker som de svenske atomkraftværker Ringhals og Barsebäck samt Øresundsbron. Det der gør Kattegat-jordskælvet enestående er, at umiddelbart efter den 22. december beordrede L. Harboe, biskop over Sjællands Stift, sine præster til at indberette i henhold til et spørgeskema (tabel 1), om hvordan jordskælvet blev mærket i de respektive herreder. Materialet, kendt som præsteindberetningerne, udgjorde grundlaget for professor



Figur 1. Væsentlige tektoniske træk i Sydvestskandinavien. Beliggenheden af Kattegat-jordskælvs formodede epicenter vest for Göteborg er markeret med en stjerne. Profilsportet med placering af kilden som er benyttet ved beregningen af de 2-dimensionale seismogrammer er også vist. EL: Elben lineament.

Horrebows arbejde, men blev senere regnet for tabt. Heldigvis blev de fundet igen i Sjællands Stifts Bisparkiv af dr. A. Kruse ved Domkirkemuseet i Roskilde, og derefter bearbejdet og publiceret af Roskilde-forskerne Erling Bondesen og Inge Wohlert i 1999.

Der var 3 grunde til at udgive dette materiale i bogform, nemlig 1) de enestående historiske jordskælvsobservationer, 2) et værdifuldt kulturhistorisk kildemateriale og 3) belysning af videnskabshistorien, idet årene mellem 1750 og 1800 var en brydningstid for naturvidenskaberne i Norden og Europa i øvrigt. Der lå i tiden en religiøst betinget angst for alt nyt, en angst som endvidere blev næret gennem beretningerne om den store jordskælvskatastrofe i Lissabon Allehelgensdag d. 1. november 1755, hvor ca. 70.000 mennesker omkom. Lissabon

blev ødelagt dels på grund af jordskælvsbølgerne, men også på grund af en efterfølgende flodbølge (tsunami), som blev skabt af jordskælvet. Få begivenheder har haft så fundamentale konsekvenser i den religiøse verden, idet ulykken ramte de mange kirker og klostre i Lissabon, og i mindre grad det syndige glædeskvarter. Heri lå kimen til tvivl om den antagne verdensorden indstiftet af en almægtig Gud, en verdensorden der tjente som en spændetrøje for uafhængig videnskabelig tænkning. På denne baggrund betyder udsendelsen af biskop Harboes spørgeskema at Kattegat-jordskælvet bliver et jordisk fænomen, som kortlægges på menneskelig vis. I eftertiden karakteriseret som et enestående videnskabelig initiativ eftersom biskop Harboes form for seismisk spørgeskema først blev almindeligt i Norden godt hundrede år senere.

Forfatterens interesse for Kattegat-jordskælvet er inspireret af de præste-indberetningerne som i 1999 blev gjort alment tilgængelige av Bondesen og Wohler. Det som mest interesserer og fascinerer er: hvor stærkt var jordskælvet egentligt og er det muligt at besvare dette spørgsmål på baggrund af præste-indberetningerne. Også det forhold at mange seismologer - såvel danske som udenlandske - i den senere tid har analyseret Kattegat-jordskælvet var en udfordring ved reanalysen – ville der fremkomme nye og originale resultater. Lad os derfor begynde med de af biskop Harboe udsendte spørgeskemaer med tilhørende analyseresultater og derefter præsentere forfatterens egen - ikke-konventionelle - fortolkning af resultaterne.

FYSISKE FORESTILLINGER OM JORDSKÆLV - FRA ANTikken TIL Oplysningstiden

I det klassiske Grækenland blev jordskælv forbundet med de 4 elementer: vand, luft, ild og jord, og jordskælv skyldtes således kræfter, som påvirkede disse elementer. Det virker som om der er en sammenhæng mellem vulkanud-brud med ild og damp og medfølgende jordskælvsaktiviteter. De kræfter som udløser jordskælv kan stamme fra udvidelsen af damp i underjordiske hulrum, gasekspllosioner eller sågar himmelske konstellationer af stjerner og planeter. Dette kan ses som en del af det aristoteliske verdensbillede, som var stort set uforanderligt frem til oplysningstiden dvs. 1750 - 1800.

Omkring 1750 opdagede man elektriciteten og tilhørende fænomener, hvilket betød at sådanne kræfter måske kunne være en årsag til jordskælv. I forbindelse med Lissabon-jordskælvet i 1755 blev der observeret ikke bare rystelser, men også bølgebevægelser knyttet til jordskælvet. De klassiske forestillinger om jordskælv er fascinerende læsning. Men det er også klart, at pladetektoniske teorier og hypoteser om kontinentaldrift var fjernt fra datidens geologiske forestillinger om Moder Jord.

Tabel 1. Biskop Harboes tjenstlige skrivelse til stiftets præster udfærdiget den 28. december 1759. Skrivelsen blev sendt med post og de første af totalt 194 besvarelser var dateret den 2. januar 1760.

- 1. Om det har været allmindelig over det heele Herred?**
- 2. Naar eller til hvad Tiime det tog sin Begyndelse?**
- 3. Om det meere end een Gang yttrede sig, saafremt, hvor ofte? og hvor lang Tiid der var mellem hvert Stød?**
- 4. Hvorlænge det hver Gang vedblev?**
- 5. Hvad Direction det havde, om det gick fra Østen til Vesten, eller Syd til Nord?**
- 6. Om det var sterckt og har foraarsaget nogen skade?**
- 7. Om nogle Phænomena med Lynild, usædvanlig Brusen i Havet etc. etc. enten ere foregaaet eller har fuldt på Jordskælvet?**

De klassiske jordskælvsforestillinger finder man i forbindelse med udformningen af biskop Harboes spørgeskema, som er gengivet i gammeldags sprogform i tabel 1. Det blev afsendt den 28 december og var med få undtagelser modtaget af de fleste præster i Sjællands stift inden den 4. januar. Den lokale postgang må betegnes som fremragende tiden taget i betragtning.

Der skal knyttes følgende kommentarer til biskop Harboes spørgeskema og til de 194 præsteindberetninger, der har baggrund i spørgeskemaet :

PUNKT 1 OG 2: Anvendes også i dag - kaldes nu et makroseismiske spørgeskema.

PUNKT 3 OG 4: Lyd og rystelser: akustiske P-bølgers overgang fra jord til luft giver hørefornemmelser som durren eller rumlen af en vogn på brosten. Lydbilledet kan have længere varighed idet lyden opstår over et større område, men vil dårligt mærkes på afstande over 150 kilometer fra epicenteret. Ankomsten af transversale shear- eller S-bølger mærkes som rystelser i bygninger og forårsager skader ved store skælv.

PUNKT 5: Var almindeligt tidligere og kan give en indtryk af retningen til kilden.

PUNKT 6: Dette spørgsmål er meget uddybet i vore dages spørgeskema med detaljer om bygningstype, grundforhold etc.

På baggrund af ovennævnte punkter beregnes skælvets lokale intensitet. Bemærk at rapporterne kan være meget subjektive således at angivelsen af styrken (Richter-tallet) baseret på makroseismiske observationer i dag angives ud fra størrelsen af det område hvor skælvet har kunnet mærkes (intensitet (I) = III på Mercalli-skalaen, se tabel 2 og tabel 3). Ved I = III vil skælvet kunne mærkes indendøre, men først ved I = VII vil der forekomme skader på bygninger.

Anvendt Intensitetsskala for Modificeret Mercalli (MM)		
MMI værdi	Alvorlige rystelser	Udførlig beskrivelse af rystelser
I	-----	Mærkes ikke af mennesker
II	-----	Mærkes af mennesker i ro
III	-----	Mærkes indendørs, hængende billeder svinger, vibrationer føles som passerende køretøj
IV	-----	Vinduer og døre knirker, det knager i vægge og loft, billeder svinger og tallerkener klirrer; vibrationer føles som en passerende lastbil
V	Små rystelser	Mærkes udendørs; sovende vågner, døre åbnes, genstande bevæger sig, pendul-ure stopper etc.
VI	Moderate rystelser ting falder ned	Mærkes af alle, mange bliver bange og løber ud af deres huse, vinduer og tallerkener knuses, møbler bevæger sig og der dannes sprækker i soklen. Mindre kirkeklokker ringer og træer og buske svajer
VII	Stærke rystelser mindre skader på huse og inventar	Vanskeligt at stå oprejst, møbler ødelægges, enkelte skorstene falder ned, mure får sprækker og beskadiges, folk i biler mærker rystelserne
VIII	Meget stærkt moderate skader	Større skader på huse, skorstene falder ned, Monumenter vælter, grene brækker af på træer, vandstanden i brønde ændres, sprækker i jorden
IX	Kraftige rystelser	Almen panik, mange huse ødelægges, skader på vandledninger og reservoirer
X-XII	Ekstreme rystelser	De fleste huse ødelægges og selv mange træhuse få omfattende skader. Diger, damme og broer bliver ødelagt og forandringer i landskabet er åbenbare

Tabel 2. Den Modificerede Mercalli-skala. Kaldes ofte blot Mercalli-skalaen. De stærkeste rystelser, som er rapporteret fra Skandinavien, svarer til I = VII. For Kattégat-jordskælv blev der rapporteret om ringende kirkeklokker, altså maksimum I = VI. Skadens omfang er afhængig af bygningers tilstand, og mur- og lerhuse i udviklingslande er ofte af dårlig kvalitet og bliver derfor udsat for store ødelæggelser, selv ved moderate jordskælv med værdier på 5,5 - 6,5 på Richter-skalaen.

EMS-skalaen er mere avanceret og tager også hensyn til bygningstandard. For I = II-VI er de to skalaer tilnærmelsesvis ens. Intensitetsskalaer er ofte tilpasset lokale forhold og skadebeskrivelserne kan være langt mere omfattende end den kortfattede fremstilling, der er præsenteret her.

RESULTATER - OPSUMMERING AF PRÆSTEINDBERETNINGERNE

Bondesen og Wohlert (1999) har sammenfattet informationen fra præsteindberetningerne og essensen af resultaterne er gennemgået nedenfor.

Mulige forvarsler: Tørke de 3 til 4 foregående år. I dagene før jordskælvet sås mange røde solnedgange, mens der dagen og aftenen før er indrapporteret mange 'ildfænomener' på himmelen. Informationerne er dog ikke gensidigt konsistente, og biskop Harboe synes her at bruge observationer, som ikke direkte kan læses i præsteindberetningerne.

PUNKT 1: Med nogle få undtagelser på Sydsjælland kunne jordskælvet mærkets i alle herreder.

PUNKT 2: Tidsangivelse: de meste sikre og også de flest indrapporteringer siger klokken ca. 12.32 midnat, dvs. jordskælvet starttidspunkt kan sættes til den 22. december klokken 00.30.

PUNKT 3 OG 4: Der bruges ordet 'stød', men det er uklart, hvad der menes. Det rapporteres dog, at man først hørte skælvet (akustiske P-bølger), hvorefter man mærkede rystelser indendøre, dvs. ankomsten af S-bølgerne. Varigheden fra 'før-lyd tilstand' til en tilstand med ikke-rystelser er ikke nøjagtigt defineret, men varierede fra et halvt til godt 3 minutter.

PUNKT 5: Bevægelsesretningerne fordeler sig som følger, i) nord-syd: 35, ii) øst-vest: 29 og iii) andre: 24. Med et epicenter ret nord for Sjælland vil P-bølgerne - om de mærkes - give en fornemmelse af, at bevægelsesretningen er nord-syd. Hvis man i stedet registrerer de senere ankomne S-bølger, vil man her have fornemmelsen af, at bevægelsesretningen er øst-vest. Dette er i overensstemmelse med de angivne observationer idet 2 af 3 af disse er enten nord-syd eller øst-vest.

PUNKT 6: Hvor stærkt?: der blev faktisk ikke rapporteret om skader, men om kraftige rystelser indendørs og svagere udendørs. En opsummering af Bondesen og Wohlert er givet i figur 2. Denne viser, at de kraftigste rystelser blev rapporteret fra Nordsjælland og med betydelige variationer aftagende mod syd.

PUNKT 7: Lynild, brusen i havet, lyd etc.: der er mange sådanne observationer både før, under og efter jordskælvet. Observationerne har ingen fysisk relation til selve jordskælvet, men er 'efterlyst' i selve spørgeskemaet og vil ofte resultere i nogen form for besvarelse.

Bondesen og Wohlert har i deres bog også gengivet notitser fra danske, norske, svenske samt tyske aviser, og vores opsummering er vist i tabel 3 inklusive intensiteter på MM-skalaen.

RICHTERTAL FOR DE STØRSTE JORDSKÆLV NOGENSINDE, DE MEST DESTRUKTIVE I ANTALLET AF DRÆBTE OG DE STØRSTE I SKANDINAVIEN

Dato	Beliggenhed		Dybde	Richtertal	Intensitet	Døde	Område
De største jordskælv							
22/05/1960	38.29 S	73.05 W	35	9,6 Mw	XII	5.700	Chile
28/03/1964	61.02 N	147.63 W	6	9,2 Mw	XII	125	Alaska
04/11/1952	52.75 N	159.50 E	-	9,0 Mw	XII	mange	Kamchatka
15/08/1950	28.50 N	96.50 E	-	8,6 Mw	XII	4.000	Assam, Indien
18/04/1906	38.00 N	123.00 W	-	7,9 Mw	XII	700	San Francisco, USA

De mest dødelige jordskælv

23/01/1556	34.50 N	109.70 E	-	8,3 Ms	XI	830.000	Kina
18/11/1727	38.00 N	46.20 E	-	7,2 Ms	X	77.000	Tabriz, Iran
01/11/1755	36.00 N	11.00 W	-	8,5 Ms	-	70.000	Lisboa, Portugal
28/12/1908	38.20 N	15.70 E	-	7,1 Ms	XI	82.000	Messina, Italien
01/09/1923	35.40 N	139.20 E	35	7,9 Ms	-	143.000	Tokyo, Japan
31/05/1970	09.40 S	78.90 W	73	7,8 Ms	-	66.800	Peru
28/07/1976	39.40 N	118.00 E	18	7,8 Ms	XI	242.800	Kina

De største skandinaviske jordskælv

22/12/1759	57.70 N	11.10 E	15	5,1 Ms	VI	ingen	Kattegat
31/08/1819	66.40 N	14.40 E	10	5,1 Ms	VII	ingen	Lurøy, N.Norge
09/03/1866	65.20 N	06.00 E	-	5,7 Ms	V	ingen	Vestlandet, Norge
23/10/1904	59.20 N	10.50 E	-	5,4 Ms	VII	ingen	Ydre Oslofjord
24/01/1927	59.90 N	01.80 E	-	5,3 Ms	V	ingen	Nordlige Nordsø
07/07/1931	54.10 N	01.50 E	-	5,5 Ms	VI	ingen	Dogger Banke

Oversigt over de største jordskælv, de der har omfattet flest døde samt de største jordskælv i Skandinavien med de respektive Richtertal. Bemærk, at der her benyttes Richtertal både som moment-magnitude Mw og Rayleighbølge-magnitude Ms, som er almindelig i forbindelse med omtale i medierne. Richters skala er logaritmisk, hvilket betyder, at den udløste energi i et Ms = 7 jordskælv er ca. 32 gange større end for et Ms = 6 jordskælv.

Typisk for Skandinavien er at de største jordskælv har Richtertal omkring 5, hvilket vil sige 1000 gange svagere end de der har et Richtertal på 7.

Chile-jordskælvet havde en Mw = 9,6, mens den største Ms-værdi ville have været ca. 8,6, da skalaen av seismotekniske grunde stopper ved denne værdi. For lavere værdier omkring 7,0 er Mw tilnærmelsesvis lig med Ms-værdien. For Mw = 5,0 er Ms = 4,7.

De største katastrofer målt i antallet af døde har ramt Kina og sidste gang så sent som i 1976. I Europa er Italien mest udsat, men i de senere år er det Tyrkiet og Iran, som har haft flest jordskælvskatastrofer. I Skandinavien med den moderate jordskælvsaktivitet har der ikke været rapporteret døde, ligesom skader på bygninger har været yderst moderate og begrænset til nogle skorstene, der er faldet ned samt sprekker i huse og grundmure. Skælvet på Vestlandet i 1866 havde et Richtertal på 5,7 som vi mener er for højt, men vores reanalyse er ikke afsluttet i skrivende stund.

C. F. RICHTERS SKALA

Intensitet er et mål for hvor stærkt et skælv mærkes på et givet sted, eventuelt hvor meget skade, der er sket. 'Magnituden' af et jordskælv er derimod et udtryk for styrken af skælvet i fokus, dvs. der hvor jordskælvet fandt sted.. Den originale Richter-skala var enkel: logaritmen til den maksimale amplitude af lokale Californiske jordskælv i en afstand af 100 kilometer fra en Wood-Anderson seismograf. Ved at anvende logaritmen til bølgeamplituden fik man en enkel skala med en underinddeling fra 1 til 10. Begrebet var praktisk og brugervenligt og blev senere udvidet til registreringer af 'fjernskælv' og andre typer seismiske bølger. Da styrken af en bølge aftager med afstanden til kilden, må der naturligvis korrigeres for dette forhold. I andre tilfælde kan lokale forhold i undergrunden forstærke bølgefeltet, og så bliver det aktuelt med en anden type korrektioner. den generelle formel for 'magnitude' er af formen

$ML = \text{Log}(A) + D(x) + \text{Corr}$, hvor A er den maksimale amplitude korrigeret for instrumentforstærkning, D er afstanden x mellem målestation og kilde for jordskælvet og Corr den lokale målestationskorrektion. Når man skal finde størrelsen - 'magnitude' - af et jordskælv ud fra intensitetsobservationer, må der korrigeres for lokale forhold, som vi har gjort det i analysen af Kattegat- skælv i 1759.

PRÆSTEINDBERETNINGEN - INFORMATION FOR MODERNE SEISMOLOGISK ANALYSE

Præsteindberetningerne giver primært et kulturhistorisk tidsbillede, men også vigtig videnskabelig information af seismologisk interesse. Vi har ønsket at beregne kildeparametre for Kattegat-skælv, dvs. hvornår skete det, hvor lå epicenteret og dybden af fokus. Tiden er enkel: den 22. december 1759 klokken 00.30. Epicenterets beliggenhed er 57,7 °N - 11,1 °Ø, og dybden var 15 kilometer (mellemste jordskorpe). I analyser af jordskælvsrisiko er styrken af de største jordskælv naturligvis meget vigtig, og det gælder ikke mindst her. Parameteren er ikke altid let at beregne, da det drejer sig om menneskelige og ikke instrumentelle (seismograf) observationer. Eksempelvis benyttede man oprindeligt den maksimalt observerede intensitet på Mercallis skala (tabel 2) som mål for jordskælvet styrke. Denne metode var i praksis ikke særlig anvendelig, da epicenteret kunne være langt fra beboede områder, eller fordi omfanget af skader primært kunne skyldes afstivning eller manglende afstivning på bygninger. Da instrumentbaserede observationer af jordskælv blev mere almindelige for 100 år siden, blev det ønskeligt at knytte Mercalli-intensiteter til Richter-tal, idet

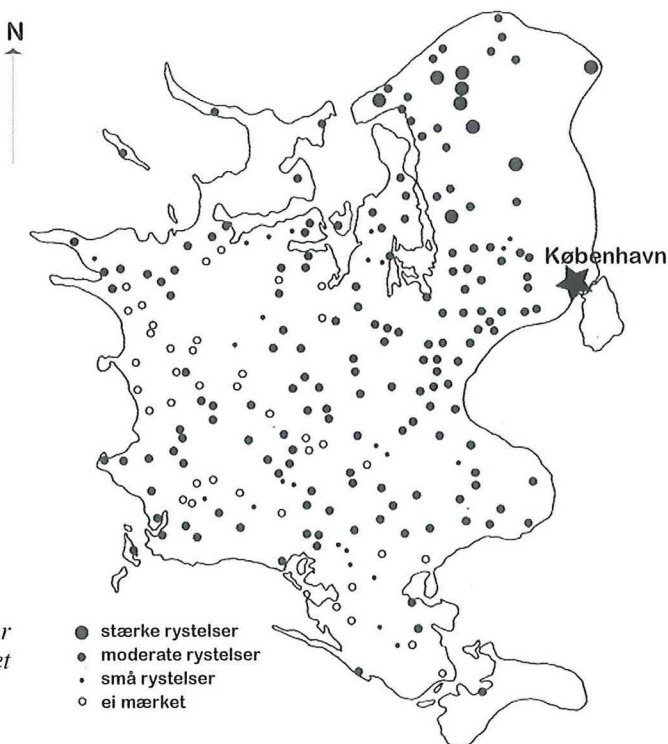
Sted	Geografisk breddegrad (grader N)	Geografisk længdegrad (grader Ø)	Afstand (km)	Azimut (grader)	Intensitet		
					Original	EMS-98/MM	Korrigeret
Kattegat	57.7	11.1			I (A, M)	I (EMS-98)	Ic
0 – 100 km							
Marstrand (S)	57.8	11.5	26	65	VI	VII	VII
Göteborg (S)	57.7	11.9	47	90	VI	VII	VII
Vallda (S)	57.7	12.0	58	112	VI	VII	VII
Uddevalla (S)	58.3	11.9	82	35	IV	IV	IV
Älingsås (S)	57.9	12.5	86	74	VI	VII	VII
Varberg (S)	57.1	12.2	94	135	VI	VII	VII
Aalborg (D)	57	9.9	106	223	VII	VII	VII
100 – 200 km							
Tønsberg (N)	59.1	10.4	161	346	IV	IV	IV
Jönköping (S)	57.7	14.1	178	89	IV	IV	IV
Laholm (S)	56.5	13.1	180	137	IV	IV	IV
Skien (N)	59.1	9.5	181	330	IV	IV	IV
Birkeland (N)	58.3	8.2	183	293	IV	III	III
Kristiansand (N)	58.2	8	191	288	IV	III	III
200 – 300 km							
Helsingør (D)	56	12.5	207	155	VI	V	III
Kongsberg (N)	59.7	9.7	236	341	III	III	III
Vejle (D)	55.7	9.5	242	204	V	IV	IV
København (D)	55.6	12.5	248	159	IV	III	I
Kristinehamn (S)	59.3	14.1	249	43	III	III	III
Karlstad (S)	59.5	13.8	254	37	III	III	III
Sorø (D)	55.4	11.5	256	174	V	V	III
Odalén(N)	60.1	11.7	269	7	III	III	III
Odense (D)	55.3	10.3	271	191	V	V	III
Fyn (D)	55.1	10.3	293	190	IV	III	III
300 – 400 km							
Lindköping(S)	59.0	15.7	304	60	IV	III	III
Örebro (S)	59.5	15.1	306	47	IV	III	III
Arboga (S)	59.3	15.9	330	55	IV	III	II
Holstein (T)	54.7	9.5	347	197	III	III	I
Flensburg (T)	54.7	9.4	349	198	III	III	I
Schleswig (T)	54.5	9.5	369	196	III	III	I
Kiel (T)	54.5	9.2	374	199	III	III	I
Fåberg (N)	61.1	10.4	379	354	III?	III?	
400 – 500 km							
Fron (N)	61.5	9.7	429	350	III?	II?	
Stockholm (S)	59.3	18.0	439	62	III?	II?	
Bergen (N)	60.4	5.3	444	314	III?	?	
Hamburg (T)	53.5	10.0	471	188	III	III	I

Tabel 3. Kattegat-jordskælvets beliggenhed og de byer hvor det blev registreret. Koordinaterne for hver by er angivet ligesom afstanden til og azimuth for det formodede jordskælvs beliggenhed. Der er ligeledes vist intensiteter I(AM) opgivet i litteraturen, intensiteter I anvendt i denne undersøgelse og EMS-98 og endelig korrigerede intensiteter, hvor indflydelsen fra det danske og det nordtyske bassin er fjernet. Forkortelser: D - Danmark, T - Tyskland, N - Norge og S - Sverige.

begge typer af registreringer var tilgængelige ved lokale jordskælv. På denne måde kunne man sammenstille sammenlignelige jordskælvs kataloger for mange hundrede år. Der blev derfor udarbejdet formler med til en simpel relation mellem Richter-tal og arealet af området med Mercalli-intensitet (I) = III.

På baggrund af både biskop Harboes observationer og observationer fra andre kilder (tabel 3) har vi udarbejdet et kort over Sydsandinavien, som viser observationspunkter og intensitetskonturer - se figur 3a. Baseret på disse observationer har man beregnet en såkaldt MS-styrke på 5,7. Bemærk at Richtertallet er det samme som seismologisk styrke med det forbehold, at de forskellige skalaer for jordskælvsstyrke er baseret på forskellige typer seismiske bølger, og giver forskellige værdier. For P-bølger anvendes betegnelsen Mb, for S-bølger betegnelsen ML og for langperiodiske Rayleigh bølger (der svarer til havbølger) betegnelsen MS.

Ser man på figur 3/tabel 3 er der noget der ikke stemmer - nemlig at skælvet blev registreret langt nede i Slesvig-Holsten, mens der kun var få observationer fra de sydlige dele af Sjælland. Antallet af observationer i Norge og Sverige er relativt moderat til trods for at forplantningen af de seismiske bølger i eksempelvis det svenske grundfjeld (dvs. det baltiske skjold) er langt mere effektiv end i de yngre sedimentære bjergarter i Danmark og Tyskland. Kan der gives en rationel videnskabelig forklaring på disse observationer fra 1759? Hvis dette er tilfældet, vil det betyde at de mange seismologiske analyser af Kattegat-skælvet kan være modne til en revision og ikke mindst, at det kan få betydning for den



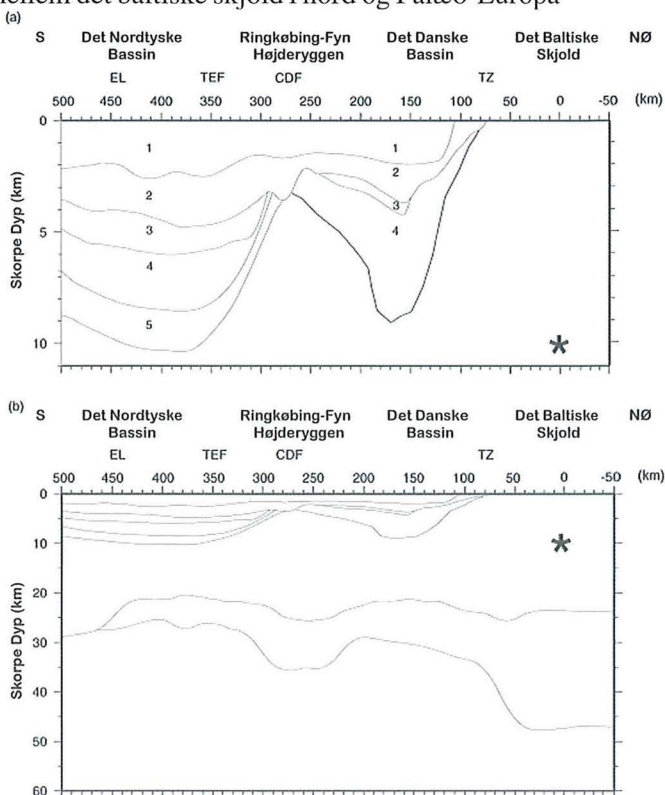
Figur 2. Registrerede rystelser forårsaget af Kattegat-jordskælvet d. 22. december 1759

formodede styrke. Vi tror, at Danmarks geologi er nøglen til dette mærkelige forhold, og det vil vi diskutere i næste afsnit.

SEDIMENTBASSINER I DANMARK OG NORDTYSKLAND

I figur 1 ser man en grov skitse af de geologiske og tektoniske forhold for Danmark og tilgrænsende områder. I nord har vi dele af det baltiske skjold (Sverige og østlige dele av Norge) med meget massive krystallinske bjergarter, der er fra 1,0 til 2,5 milliarder år gamle. I selve Danmark finder vi en gigantisk akkumulation av sedimentære bjergarter med tykkelser på op mod 10 kilometer, hvor bassinerne er dybest. Mod nord har vi det danske bassin. Dette er mod syd afgrænset af Ringkøbing-Fyn højderyggen, hvor sedimenttykkelsen er aftaget - helt ned til 2 kilometer. Videre mod syd får vi det nordtyske bassin, hvor sedimenttykkelserne overgår dem, vi finder i det danske bassin. Mod vest i Nordsøen finder vi også store sedimentbassiner og veludviklede graben-strukturer som Central-graven og Skagerrak-graven, dvs. den sydlige del af Oslo-riften. Det danske bassin afgrænses mod nord af Sorgenfrei-Tornquist zonen, som markerer et skel mellem det baltiske skjold i nord og Palæo-Europa i syd. Af interesse for os er et tvær-snit over det danske bassin og det nordtyske bassin som vist i figur 4, idet dette er en 2-dimensional model af jordskorpen i Danmark i en omtrentlig nord/syd retning.

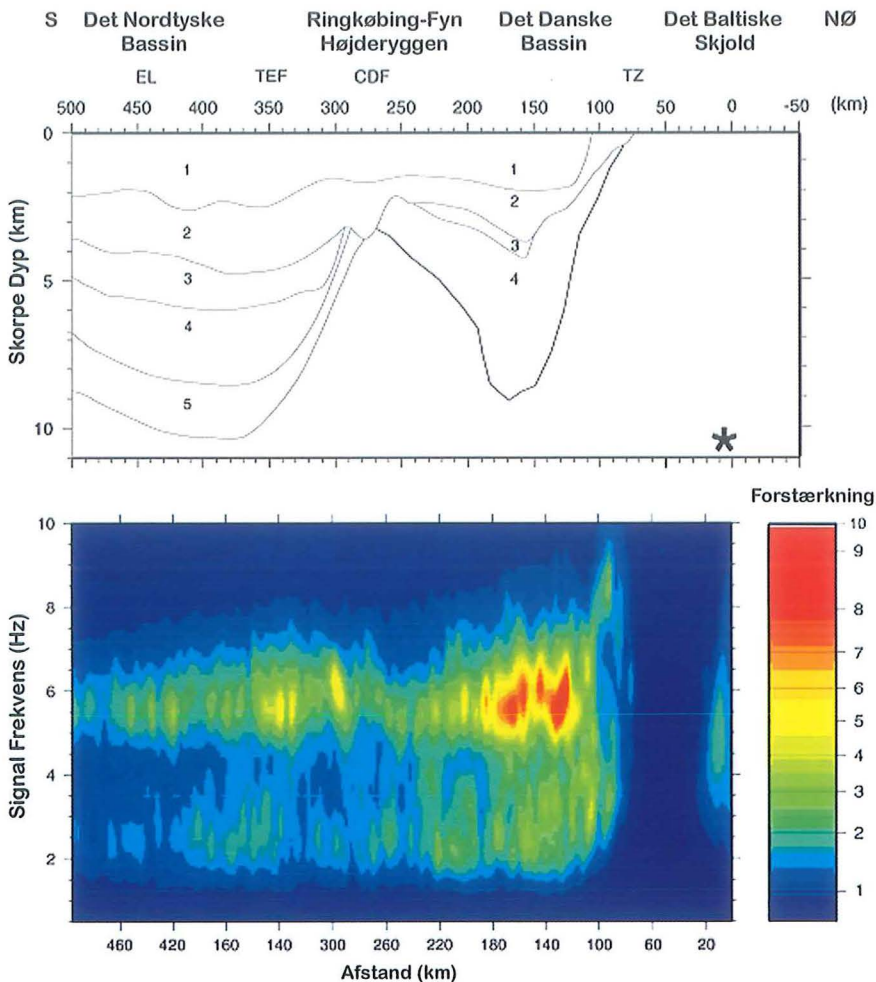
Vi har placeret epicenteret for Kattegat-skælvet vest



Figur 3. To isoseismiske kort for Kattegat-jordskælv.

a) intensitetsobservationer er vist i form af punkter, hvis størrelse angiver intensitetsværdierne i EMS-kolonnen i tabel 3.

b) viser det samme plot som a), men intensitetsværdierne er korrigeret for forstærkninger forårsaget af de to bassiner: det danske og det nordtyske.



Figur 4. Skorpemodellen som er anvendt ved beregninger af de syntetiske seismogrammer langs profilet vist i figur 1. For at beregne syntetiske seismogrammer er det nødvendigt at have kendskab til de geologiske formationer i jordskorpen. I Danmark er et sådant kendskab opnået gennem undersøgelser af især geologer og geofysikere ved Københavns Universitet.

Figur 4a og b viser således den sedimentære lagdeling, der er baggrund for beregningerne, idet a viser en model for den øverste del af skorpen, mens b viser en model for hele skorpen inklusive en dybereliggende skorpe mod nord. De ældste lag - nederst i figuren - er sandsten fra Silurtiden (400 - 500 millioner år), mens der øverst er sandsten fra tertiærtiden (1,8 - 65 millioner år).

I tabel 4 er de fysiske betegnelser i form af P-bølge hastigheder, massefylde og dæmpningsparametre vist. Grundfjeldet er mere kompakt og har tilsvarende højere hastighed og massefylde. I bunden af profilet ses således P-bølge hastigheder på 7,0 kilometer pr. sekund. EL – Elben lineament, TEF – Trans European Fault (forkastnings zone, CDF – Caledonian Deformations Front, and SZ – Sorgenfrei-Tornquist Zonen. Lg = Love-bølge: Jordskælvsbølge der udbreder sig langs jordens overflade. Samme type som S-bølger, og udbreder sig kun i faste medier.

Lag	Det Danske Bassin			Det Nordtyske Bassin		
	Vp (km/s)	ρ (g/cc)	Qp	Vp (km/s)	ρ (g/cc)	Qp
1	2.4	2.06	500	2.4	2.06	500
2	3.0	2.21	500	3.0	2.21	500
3	4.2	2.43	500	4.4	2.46	500
4	5.3	2.62	500	5.4	2.64	500
5				5.8	2.72	500
Øvre skorpe	6.3	2.85	500	6.3	2.85	500
Nedre skorpe	7.0	3.04	500	7.0	3.04	500
Kappe	8.1	3.38	500	8.1	3.38	500

Tabel 4. Tabellen viser faktorer fra det danske bassin og det nordtyske bassin, der er anvendt ved beregningerne præsenteret i denne artikel. Vp er P-bølge hastighed (kilometer pr. sekund), ρ er massefylde (gram pr. kubikcentimeter) og Qp er de elastiske dæmpningsparametre for de respektive lag.

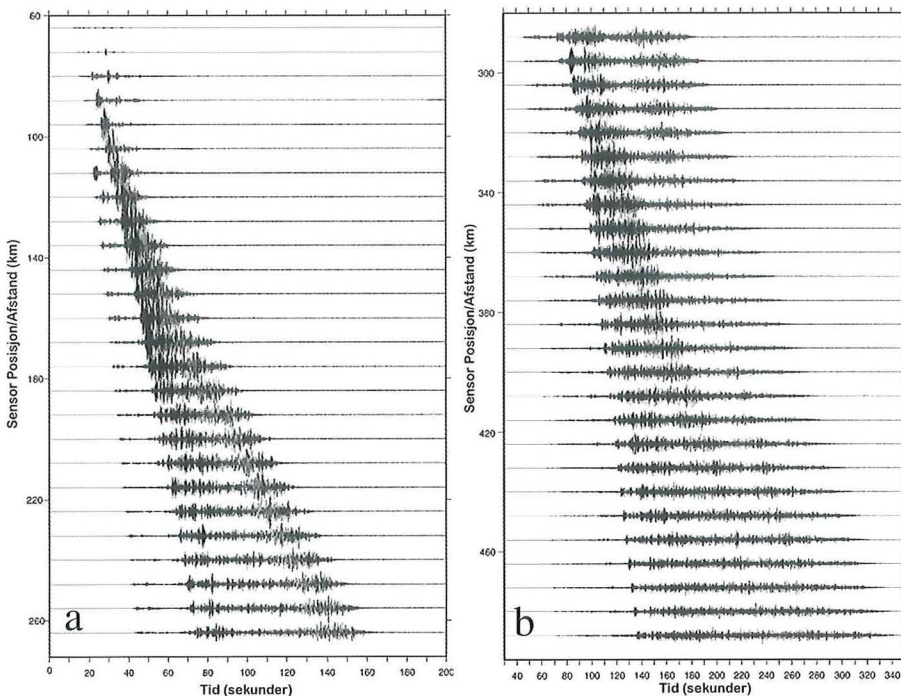
for Gøteborg (figur 1), men for simulere de seismiske bølger som blev genereret d. 22 december 1759 har vi af hensyn til beregningerne placeret jordskælvets kilde i Sverige (figur 1). Grunden til dette er, at de mange skorpeprofiler der er publiceret af danske forskere er orienteret NØ-SV fra Danmark og ind i Sverige og også N-S fra centrale dele av Danmark mod Tyskland. Knækket på skorpeprofilen i figur 1 ses ikke på figur 4, der fremstår som en ret linje og kompenserer på denne måde for manglende skorpeinformation i N-S'lig retning mod Kattegat. Denne antagelse er ikke kritisk, da vi hverken kender den nøjagtige placering af epicenteret og endvidere bruger en 2-dimensional tilpasning til reelle 3-dimensionale strukturer.

Ved beregning av syntetiske seismogrammer har man brug for fysiske parametre til at beskrive bjergarterne, dvs. P- og S-bølgehastigheder i de respektive bjergarter samt deres massefylde. De værdier der er anvendt her er vist i tabel 4 sammen med de elastiske dæmpningsparametre, Qp og QS for de respektive lag. S-bølgehastigheden og QS er ikke angivet direkte, da der ved

beregninger er benyttet almindeligt brugte konverteringsligninger:

$$P_{vel} = \text{Sqrt}(3) \cdot S_{vel} \text{ og } Q_p = 9/4 \cdot Q_s,$$

hvor P_{vel} er P-bølge hastigheden og $\text{Sqrt}(3)$ er kvadratroden af 3. Metodebeskrivelser for beregninger af 2-dimensionale syntetiske seismogrammer findes i mange lærebøger og videnskabelige tidsskrifter. Beregningerne er meget krævende, og vi har derfor måttet bruge den store regnemaskine ved



Figur 5 a) syntetiske seismogrammer for det dansk-norske bassin langs profilsporet vist i figur 1 og i dybet i figur 4a og b. Sensorafstanden er 8 kilometer, og afstandsintervallet går fra 60 – 260 kilometer. Alle seismogrammer har samme amplitudeskala, som svarer til den, der er anvendt i figur

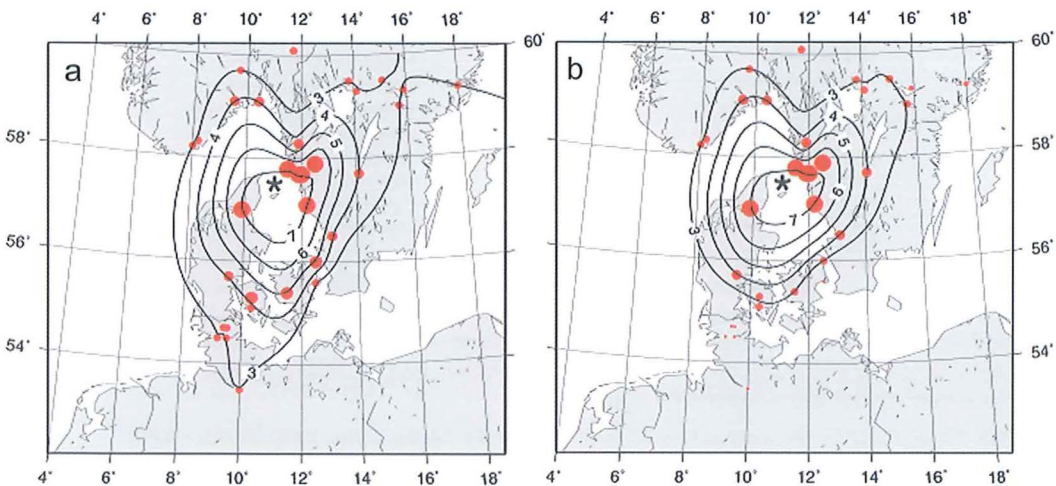
figur 5b) Syntetiske seismogrammer for det nordtyske bassin langs profilet vist i figur 1 og i dybet vist i figur 4a og b. Som i figur 5a er sensorafstanden 8 km, mens afstandsintervallet går fra 260 – 500 kilometer og amplitudeskalaen den samme som i figur 5a.

Den først ankomne bølge er P-bølgen, som ses tydeligt ved afstande omkring 100 kilometer og en tid på 20 sekunder (figur 5a), men som dårligt kan ses ved afstande større end 300 kilometer eller 45 sekunder (figur 5b).

S-bølgerne er markante fra ca. 100 - 180 kilometer (30 - 50 sekunder) og 300 - 360 kilometer (70 - 90 sekunder). Først ved 180 kilometer ser vi ankomsten af de langsomme Rayleigh-bølger, som danner 'halen' på bølgetoget.

Trondheim tekniske universitet (NTNU). Størrelsen af vores skorpemodell er 550 kilometer $\times$ 60 kilometer $\times$ 2 kilometer, afstanden mellem datapunkterne er 50 meter og tidsopløsningen er på kun 0,5 millisekunder. Dette kan illustreres ud fra de analoge seismogrammer vist i figur 5, som igen er baseret op punktregninger hvert 0,5. millisekund. Det er i praksis vanskeligt at beregne absolutte udslag langs profilet, hvorimod relative udslag og forstærkninger er enklere at have med at gøre, idet man kun sammenligner undergrundslagene med en referencemodell af samme størrelse, men hvor der ikke er nogen form for sedimentbassiner – bare homogene skorpestrukturer. Det vil i praksis sige, at de sedimentære bjergarter er erstattet med grundfjeld, sådan at modellen er den samme både for de danske og svenske dele af denne. Seismogrammerne er vist i figur 5a og b som en funktion af antagne epicenterafstande, mens figur 6 viser de relative forstærkninger af de udslag fra undergrunden, som er forårsaget af de 2 sedimentbassiner. Disse er klart afhængige af signalfrekvenserne (i Hertz), som det også fremgår af figuren. Selve kilden har et tilnærmet fladt spektrum fra 0,5-10,0 Hz i undergrunden. I figur 6 fremgår det hvorledes bassinerne influerer på bølgefeltet.

Der skal knyttes nogle kommentarer til de beregnede syntetiske



Figur 6. Forstærkning af det seismiske bølgefelt, som kan skyldes det dansk-norske og det nordtyske bassiner. Den er plottet som en funktion af frekvens og afstand fra kilden. Bølgespektrene er påført en 5% dæmpning ved overgangen fra krystallinske til sedimentære bjergarter. Fokuseringen af bølgefeltet finder først sted på den sydvendte flanke af det danske bassin, og tilsvarende får man en om end svagere fokusering på flanken af det nordtyske bassin. Dette forklarer hvorfor der blev rapporteret en varighed af rystelserne på mindst 1 minut (se også figur 5b). Ringkøbing-Fyn ryggen dæmper bølgefeltet, dvs. lægger en skyggezone.

seismogrammer. De først ankomne signaler er P-bølgerne, som er relativt stærke til en afstand af 200 kilometer. Mellem 100 og 180 kilometer er shearbølgerne S meget iøjnefaldende, dvs. over de centrale dele af det danske bassin. Geografisk svarer dette til de nordlige og centrale dele af Sjælland. Bølgefeltet er svækket over den nordlige flanke af Ringkøbing-Fyn højderyggen, men øges igen over den sydlige flanke, hvad det falder sammen med dele af Fyn. Længere mod syd i det nordtyske bassin er Love-bølgerne (Lg-bølgerne) relativt stærke og af længere varighed, dvs. ca. 1 minut. Dette sidste stemmer godt med observationer fra Flensborg, Kiel og andre steder i Slesvig-Holsten, hvor varigheden af rystelserne blev rapporteret til at være ca. et minut. Der blev også genereret Rg-bølger, dvs. kortperiodiske Rayleigh-bølger, som er dannet ved en konvertering fra S-bølger til Rg-bølger i de sedimentære lag som findes i bassinerne. Rg-bølgerne har partikel bevægelser som havbølger, men er for svage til at forårsage skader på bygninger og bemærkes knapt nok af mennesker. Som nævnt har vi været optaget af relative forstærkninger af bølgefeltet. Dette er mest markant i de dele af Danmark som er sammenfaldende med de centrale dele af det danske bassin og de nordlige til centrale dele af det nordtyske bassin. Forstærkningen af bølgefeltet influerer på de makroseismiske observationer, og for en objektiv dataanalyse må man korrigere for dette. I denne sammenhæng har vi anvendt ligningen:

$$dI = 0,27 + 2,7 \cdot \log(AHSA)$$

hvor dI er ændringen i intensitet mellem niveau $(I)=III$ og $(I)=VI$, mens $AHSA$ er den gennemsnitlige forstærkning af S-bølger i skorpen under observationspunktet. For en $AHSA$ -værdi på ca. 10, som vi finder over dele af det dansk-norske bassin, bliver korrektionen på hele 3 intensitetsenheder, som vi anser for at være vel meget. Som det fremgår af tabel 3 anvender vi maksimalt $dI = 2$ enheder, og de korrigerede makroseismiske observationer er plottet i figur 3a og b. Næste trin var så at bestemme en ny værdi for størrelsen eller Richter-tallet for Kattégat-jordskælvet ved brug af formelen:

$$ML = 0,86 \cdot \log(A_{iii}) + 0,21$$

hvor ML = skælvets størrelse på baggrund af Lg-bølger; og A_{iii} = er det største areal af en elliptisk form med indrapporterede intensitetsværdier $I = III$. Andre bruger Rayleigh-bølge 'størrelser' (MS) og sammenhængen mellem vores ML og MS er:

$$ML = 0,72 \cdot MS + 1,1$$

For Kattégat-skælvet er $ML = 4,8$ og $MS = 5,1$, hvor den almindeligt antagne MS -værdi er på 5,7. Reduktionen i værdi skyldes indføringen af korrektioner for forstærkninger af bølgefeltet, som kan henføres til det dansk-norske og det

nordtyske bassin. Der er ikke indført korrektioner for den relativt homogene jordskorpe i Norge og Sverige, selv om der også her kan forekomme mindre bølgefeltsforstærkninger.

SAMMENFATNING

Det forskningsarbejde som ligger til grund for denne artikel er inspireret af det grundige makroseismiske materiale, som er præsenteret i Bondesen og Wohlers bog fra 1999. En anden motiverende faktor er, at det forekommer få større jordskælv i dagens Skandinavien (N,S,DK). Der er ingen seismologiske faktorer der siger, at det skal være sådan, og en alternativ forklaring kan være, at vi har fejlfortolket nogle af de historiske observationer. Det som er helt klart i denne sammenhæng er, at de store variationer i de mange præsteindberetninger fra Sjælland ikke alene kan forklares ud fra bygningstekniske forskelle og ej heller i 'almuens' observationsevner. Vi har her vist, at de 2 store sedimentbassiner i Danmark og Nordtyskland virker som veritable forstærkninger for jordskælvs kilder nord for Sjælland. Vi finder ved brug af en relativt enkel 2-dimensional model en relativ forstærkning for jordskælvsbølgefeltet af en størrelsesorden 10. I virkeligheden er Jorden 3-dimensional, men en sådan fremstilling er urealistisk, ikke mindst når der skal samles data for hver 50 meter. Når det nordtyske og det dansk-norske bassin er tilnærmelsesvis 2-dimensionale og ydermere er omtrent orienteret nord-syd, så anses den benyttede model ligesom de opnåede resultater for at være realistiske. Læg mærke til at man ikke kender beliggenheden af epicenteret helt nøjagtigt. Med basis i de makroseismiske rapporter er det placeret i Kattegat vest for Gøteborg. Men vi argumenterer med, at dette ikke er kritisk, fordi responsberegninger af 2-dimensionale strukturer giver stabile resultater. Ser vi på tidligere studier, hvor man har ønsket at beregne størrelsen af Kattegat-jordskælvet, så er der ikke blevet korigeret for sådanne effekter og dermed giver vurderingerne for høje tal. Dette medfører igen for høje seismologiske risikoniveauer for Sydsandinavien og for de risikoanalyser, der som nævnt er udført for de svenske kernekraftværker og Øresundsbron.

Vi har testet vor syntetiske bølgefeltsmodel på jordskælv i Nildalen og finder også der, at det lokale sedimentbassin forårsager væsentlige forstærkninger af jordskælvsbølger. I en tilsvarende 3-dimensionalt studie for Lurøy (Ranafjord i Nordnorge) fandt vi, at de lokale fjeldformationer forårsagede formidable bølgefeltsforstærkninger, der faldt sammen med de steder, hvorfra der blev

rapporteret voldsomme stenskred. Et uløst problem i denne sammenhæng er de store såkaldte New Madrid (Missouri) jordskælv i 1811-12, hvor problemet er om disse skælv har en styrke på 7 eller 8 på Richters skala. Disse eksempler viser, at en del historiske jordskælv (ældre end 1900) nok er givet med for stor styrke. Vi valgte Kattogat-skælvet for grundigere analyse med baggrund i de enestående præsteindberetninger.

Er studiet så også relevant for analyser af andre danske jordskælv? Dertil vil vi svare et ubetinget ja. I det formodentlig nyeste oversigtsstudie over danske jordskælv fra forskere ved Kort- og Matrikelstyrelsen i København præsenteres en række historiske skælv, som man har mærket i Vestjylland, dvs. de ydre dele af Limfjordsområdet. Efter 1900 med et stadigt stigende antal seismiske stationer i drift er tilsvarende rystelser, som også nu er mærket i Vestjylland med basis i de instrumentelle registreringer blevet lokaliseret til centrale dele af Skagerrak.

I den danske jordskælvs-katalog har de fleste skælv i Jylland sine epicentre i de ydre dele af Limfjorden, hvilket antageligt skyldes specielle sedimentations-strukturer i dette området som så forårsager markante seismiske bølgeforstærkninger i undergrunden. Besynderligt er det at jordskælvsaktiviteten i vest er knyttet til den ydre del af Limfjorden og dens forlængelse videre mod vest ud i Nordsøen og ikke i den tektonisk markante Sorgenfrei-Tornquist zone (figur 1).

Ser vi på de sidste års instrumentlokaliserede jordskælv er de allerfleste lokaliseret vest for Jylland men ved udløbet af Limfjorden. Der er også forholdsvist mange længere mod nord i Skagerrak, men mange af disse er efter alt dømme eksplosioner fra Titania-minerne i Norge (nær Flekkefjord).

I 1950'erne og -60'erne var det også mange seismiske undersøgelser i Skagerrak samt marine øvelser med brug af kraftige sprængladninger. Signaler fra sådanne eksplosioner bliver også registreret af de seismiske stationer og kan altså være rubriceret som jordskælv – det er der mange eksempler på. Et problem er, at det er så få seismiske stationer både på norsk og dansk side af Skagerrak. Det betyder at epicenterbestemmelser og også dybden til fokus bliver meget usikre. Vi tror at anvendelse af bølgefeltsanalyser kan løse nogle af gåderne knyttet til de historiske observationer af jordskælvsrystelser i Vestjylland. Først og fremmest - hvorfor er der så stærke rystelser i et lille område ved udløbet af Limfjorden, som Kort- og Matrikelstyrelsen rapporterer. Ja, det spørgsmål overlader vi vore danske kolleger at besvare.

LITTERATUR

Bondesen, E. og Wohlert, I., 1999. Høy Ædle Hr. Biskop. Præsteindberetninger om jordskælv den 21.- 22. december 1759.

Institut for Miljø, Teknologi og Samfund. Roskilde Universitetscenter og Roskilde Museums Forlag. 315 sider.

ORDLISTE: Seismisk nomenklatur og udtryk der anvendes i artiklen

2-dimensional model: Et snit gennem jordskorpen der viser den geologiske lagrækkefølge i 2-D, dvs. variationer vertikalt (lodret) og i profilretningen.

3-dimensional model: I forhold til 2-D modellen viser denne model også variationer vinkelret på profilet, dvs. horisontalt (vandret).

Amplitude: Udslaget målt fra top til bund i bølgetoget i et seismogram. Denne parameter anvendes til beregning af 'magnitudo' eller værdier på Richterskalaen.

Azimuth: Vinklen mellem epicenter og nordpol.

Dæmpning af bølger: Kan skyldes to faktorer: i) at bølgen udbreder sig over et større og større område og ii) friktion i selve mediet med tab af energi.

EMS-intensitet: Europæisk Mikroseismisk Skala er en moderne tilpasning af Mercalli-skalaen til europæiske forhold.

Endelig differens: Matematisk model til løsning af bølgeligninger.

Epicenter: Punkt på jordens overflade umiddelbart over jordskælvets kilde. Denne betegnes fokus eller hypocenter.

Fokus: Jordskælvets kilde, som i Skandinavien ligger i 10-30 kilometers dybde.

Grabenstruktur (rift): Store indsynkninger i landskabet begrænset af forkastninger. Indsynkningerne er nu fyldt med sedimenter. Rhindalen er en grabenstruktur.

Historisk seismologi: Studier af jordskælvsberetninger fra før 1900 og uden adgang til registreringer på seismografer.

Intensitet: Et mål for rystelsernes styrke på observationsstedet. Se endvidere tabel 2 med den Modificerede Mercalli-skala (MM).

Love-bølge: Jordskælvsbølge der udbreder sig langs jordens overflade. Samme type som S-bølger, og udbreder sig kun i faste medier.

‘Magnitude’: Et mål for et jordskælvs styrke baseret på størrelsen af amplituder i et seismogram. Mb, ML og MS for henholdsvis P-, S- og Rayleigh-bølger. Richter-værdier er fortrinsvis MS-magnitude, men nogle gange ML-magnitude.

Makroseismiske observationer: Hvordan mennesker har mærket et jordskælv på et givet sted udtrykt i en intensitetsværdi på Mercalli-skalaen.

MM-skala: Den Modificerede Mercalli-skala eller bare Mercalli-skalaen.

P-bølge: Svarer til lydølger eller akustiske bølger i luft. P-bølger har størst hastighed og ses derfor som de først ankomne bølger i seismogrammet.

Rayleigh-bølge: Rayleigh-bølger udbreder sig langs jordens overflade og er af samme type som havbølger. Bruges til beregning af MS-magnitude. Forårsager ikke skader.

Richter-værdier: Et mål for styrken af et jordskælv baseret på amplituden af S-bølger 100 kilometer fra kilden. Nu et alment udtryk for styrke - se ‘magnitude’.

S-bølge: Shearbølge som giver rystelser i undergrundens horisontale plan og på tværs af bevægelsesretningen. Disse bølger forårsager skader på bygninger. Kan kun bevæge sig gennem faste medier. Betegnelsen transversale bølger bruges også.

Seismisk bølgefelt: Et jordskælv danner både P-, S-, Rayleigh- og Love-bølger. Disse har fået fællesbetegnelsen ‘bølgefelt’.

Seismiske bølger: Elastiske bølger der udbreder sig i jorden.

Seismogram: En visuel præsentation af jordskælvsbølger i tid (figur 5).

Seismograf: Omfatter seismometer, forstærker og ur til tidsangivelse

Seismometer: En form for pendulinstrument som registrerer jordskælv og har meget stor følsomhed overfor alle typer af seismiske bølger.

Sensor: Sempel variant af seismometer.

Syntetiske bølger: Genskabning af jordskælvsbølger ved brug af kraftige regnemaskiner og komplekse matematiske bølgeligninger.

Tidsopløsning: Punkter på seismogrammet er beregnet så tæt som muligt, så mindst mulig information går tabt. Er perioden 1 sekund er det nødvendigt med punkter for mindst hvert 0,5 sekund.