

Jordskælvsrisiko i Danmark? – forslag til fremtidige studier

Af Søren Gregersen, *De geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)*

Spredt i de nordlige dele af Danmark sker der små jordskælv uden sammenhæng til den lokale geologi, og vi må skønne, at der kun vil ske små til moderate jordskælv inden for overskuelig fremtid. Ved jordskælvsstudierne har hver af de tre videnskabelige discipliner seismologi, geologi og geodæsi forskellige styrker og svagheder i tidshorisont, nøjagtighed og entydighed. Disse bør samarbejdes endnu mere end i dag. Det giver anledning til de 6 nedenstående umiddelbare forslag til forbedret bedømmelse af jordskælvsrisiko. Ud fra eksisterende oplysninger ser det ud til, at der ikke er bestemte geologiske zoner, hvor jordskælvene sker. Dette bør verificeres eller falsificeres.

Instrumentelle seismologiske data eksisterer intet sted på kloden fra seismografer før 1889. Om lidt ældre jordskælv eksisterer der i Danmark historiske, nedskrevne beretninger tilbage til år 1073 [1], altså kun knap tusind år. Så også her er der en kort tidshorisont. Palæoseismologiske undersøgelser, hvor man har indkredset en aktiv forkastning, og gravet den igennem og observeret rystelsesvirkninger i de omliggende sedimenter, kan rundt omkring i verden give overbevisende indikationer på jordskælv i ung geologisk tid, hundredtusinder af år tilbage. Nær Danmark findes der rapporter fra Norge [2] og fra Sverige [3]. Den slags oplysninger har ingen indtil nu skaffet penge til at grave efter i Danmark. Altså kan der være fornuft i et:

Forslag nr. 1. En palæoseismologisk undersøgelse af et af de kritiske steder i Danmark, som seismologerne kan udpege.

I jordskælvsegne som Californien og Japan samarbejdes seismologiske instrumentelle og historiske oplysninger med geodætiske og geologiske deformationsoplysninger i forsøg på at opnå større sikkerhed i risikoanalyse.

Den geodætiske tidshorisont ligner den seismologiske. Instrumentelle målinger går hundrede år tilbage. Der eksisterer historiske oplysninger tilbage i tiden om hyppigheden af oversvømmelser samt arkæologiske oplysninger om vandstanden nogle få tusinde år tilbage, se fx [4] og [5]. Både for palæo-seismologi og for den tilsvarende palæo-geodæsi er undersøgelserne i virkeligheden geologiske. Geologien har sin referenceramme fra i dag til millioner af år tilbage i tiden. Undersøgelser af gamle jordskælv giver gode muligheder for samarbejdsprojekter mellem seismologi og geologi.

Både seismologiske tid-og-sted-studier og geodætiske kortlægninger af bevægelser har en nøjagtighed og entydighed, som er afhængig af tætheden af instrumentnetværk. I de senere år er steds-nøjagtigheden af jordskælvs-lokaliseringerne kommet ned på få kilometer/tiere af kilometer, så det er indenfor rækkevidde, at afdække sammenhængen mellem geologiske strukturforskelle og fysiske deformationsmålinger. Figur 1 viser, at jordskælvsoplysningerne for Danmark ikke med noget nær entydighed kan sættes sammen med kystlinier eller med de overordnede geologiske forskellighedszoner (Tornquist-zonen og Ringkøbing-Fynhøjderyggen). Prøver man at se på figurens jordskælvs-

mønster uden linier i kortet, ser man ikke andet end, at der er større jordskælvsaktivitet mod nord, inde i det Fennoskandiske Skjold, end mod sydvest, uden for skjoldet. I øst er der færrest instrumenter og derfor færrest lokaliserede jordskælv. I Danmark er der størst aktivitet syd for den norske aktivitet. Der er mindre aktivitet over mod Sverige, og slet ingen mod sydvest. Danmark ligger i overgangszonen fra lille aktivitet til nærmest ingen aktivitet. Også mod sydøst fra Danmark er fortsættelsen af Tornquist-zonen, i Polen og længere sydpå, uden nævneværdig jordskælvsaktivitet.

For bedre bedømmelse af jordskælvsrisiko i forskellige egne af landet er der behov for:

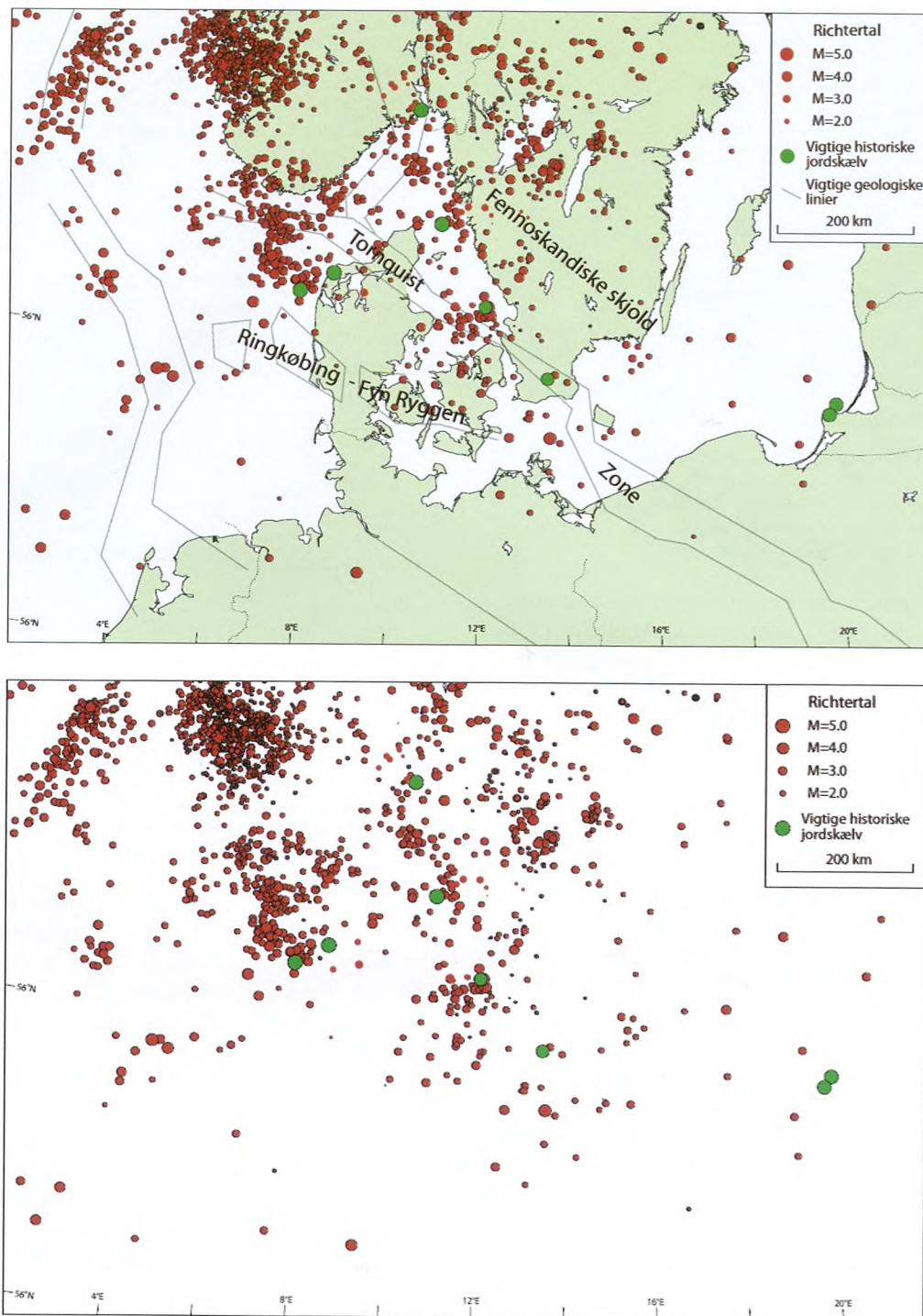
Forslag nr. 2. Endnu bedre geografisk dækning af seismografer, så den geografiske lokalisering forbedres.

Den nyeste geodætiske kortlægning af op-ned-bevægelser i Danmark har ikke bedre steds-opløsning end 50-100 km, så det kan ikke skelnes om Tornquist-zonen eller Ringkøbing-Fynhøjderyggen træder frem, som særlig bevægelig. Det skandinaviske samarbejdscenter i Onsala nord for Göteborg stiller i udsigt, at beregningerne snart kan fortættes. Hvis der kan findes ressourcer kan man drømme om:

Forslag nr. 3. Fortætning/større opløsning af de geodætiske beregninger af deformationerne af jordoverfladen både i højde og sted, ud fra eksisterende permanente GPS-stationer.

Forslag nr. 4. Et satellitprojekt med InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar, der kan identificere deformation af jordoverfladen mellem mange gange gentagne satellitmålinger i udvalgte områder som for eksempel de overordnede geologiske zoner.

Hidtil er sådanne InSAR-målinger på grund af store omkostninger kun foretaget i meget begrænsede, udvalgte områder. Den teknologiske udvikling skrider sådan frem, at ovenstående forslag kan gennemføres, hvis tilstrækkelige ressourcer sættes ind både til køb af instrumenter og køb af satellit-data og til forskningsmæssig databehandling.

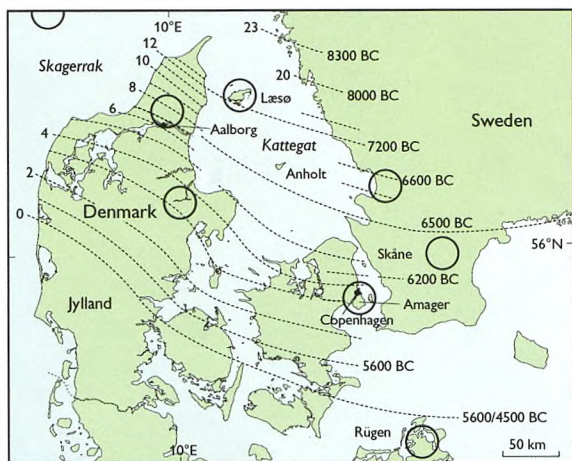


Figur 1. Jordskælvsaktiviteten i og omkring Danmark. Den instrumentelt registrerede aktivitet 1929-2008 er i begge kort vist med røde prikker. I det ene kort (nederst) er kystlinierne og de geologiske linier fjernet. Jordskælvets størrelse = Richtertallet er angivet ved størrelsen af prikkerne. Med grønne prikker er angivet de vigtigste følte jordskælv inden for de sidste 250 år.

Deformation kan i nogle tilfælde skelnes i ung geologi. En udfordring er at udskille unge geologiske bevægelser fra ældre bevægelser, der nu ses som strukturforskel i sedimenterne, i skorpen og i lithosfæren henover de overordnede geologiske zoner. Spørgsmålet er ikke, om der er sket store forskydninger, men om disse zoner deformeres nu? Den danske jordskælvsaktivitet, vist som de røde punkter i figur 1, er den sydlige begrænsning af norsk og svensk, svag aktivitet. De lidt større jordskælv i nærheden af Danmark med Richtertal oppe nær 5,5, ved Oslo 1904 og Kaliningrad 2004 [5]

skete inde i det Fennoskandiske Skjold (grønne punkter i figur 1). Sådanne jordskælv må man formode også kan ske i Danmark. Ganske som i andre intra-plade-regioner som Canada og Australien kan det uventede ske. Påstanden her er, at de overordnede geologiske zoner ikke er særlig udsatte.

I den videnskabelige litteratur findes der kun to konkrete geologiske udpegninger af fortidige jordskælv i Danmark. De er begge vist på figur 2 – ét i Københavnsområdet og et ved Læsø. De er begge tvivlsomme.

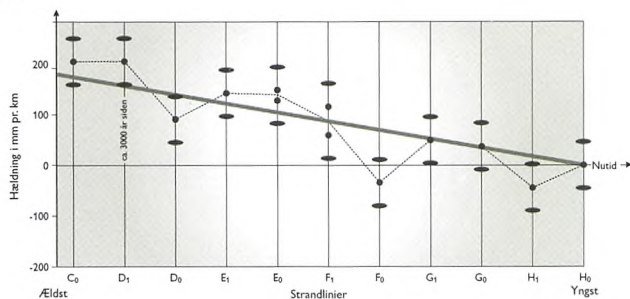


Figur 2. Generaliseret geologisk/arkæologisk hævningsmønster i det sydvestlige Skandinavien. Kurverne viser hævnning i meter siden kurven var en kystlinie for Litorinahavet, dvs. efter Istiden. Aldre angivet BC, f.Kr. Cirklerne viser positioner, som er nævnt i teksten. Fra [5].

I 1930'erne omtalte geologiprofessor Rosenkrantz i flere omgange en mulig sammenhæng mellem 1930-jordskælvet i Øresund og Carlsbergforkastningen i Københavns-området [6]. Det er en geologisk skillelinie, der går gennem Carlsbergs grund i det sydlige København, sydpå gennem Amager og nordpå til Furesøen. Det kan ikke skelnes, om et jordskælv er sket på den ene eller den anden forkastning. Det skyldes simpelthen en stor usikkerhed i den seismologiske beregning af, hvor jordskælvet er sket. Det gælder især for gamle jordskælv. Det kan bemærkes, at der i undergrunden er mange flere tegn på skred i sedimenter end der er på jordskælv. De argumenter, Rosenkrantz brugte om, at der var konstateret geodætiske deformationer af Amager betvivles af nutidens geodæter. De hævder, at Amager-målingerne mest sandsynligt ikke viser deformation af undergrunden, men derimod skred af geodætiske målepunkter, der ellers er tilstræbt stabilt opbygget [5]. En observation, der peger i denne retning, er, at de geodætiske afstands-målinger har vist forskellige tal fra 1838 til 1911 uden jordskælv, men viser overensstemmelse fra 1911 til 1933, henover tiden for det Københavnske 1930-jordskælv [5]. Geodæternes argument er, at der er konstateret en hældning af det ene af de geodætiske fundamenter, så de målte forskelligheder tydes som skred af fundamenter snarere end tektoniske bevægelser. Heller ikke de Københavnske niveaumålinger viser systematiske tektoniske bevægelser. Det skal her tilføjes, at adskillige geologer har observeret revner i huse langs Carlsbergforkastningen [7]. Men ingen af dem har foretaget en kortlægning, som viser værre revner i forkastningszonen end i området omkring. Altså kan disse observationer ikke tages som evidens for bevægelse i Carlsbergforkastningen.

Det andet konkrete jordskælv, som har været nævnt i den geologiske litteratur, var på Læsø [8] og [9]. Der er blevet fremført overbevisende argumenter om, at der aldrig var et Læsø-jordskælv, i de nylige publikationer af Gregersen & Voss [5] og [10]. Indikationen for jordskælv var en stejl forkastning på 4 meter for

omkring 4.000 år siden. Men der er ikke fundet tegn på rystelser i omliggende sedimenter. Så denne forkastning adskiller sig ikke fra andre unge forkastninger, hvor man må tyde, at der er sket skred i sedimenterne snarere end jordskælv i undergrunden. Og som det ses i figur 2 passer den højeste strandlinie, der ikke er påvirket af dette skred, fint ind i det regionale mønster med en hævnning på 11-12 meter. Som konsekvens af, at Læsø hæver sig siden Istiden er der opbygget en serie strandlinie-volde på nogle kyststrækninger helt op til de nævnte 11-12 meter. De ses som trappetrin på en bred strand, der på grund af størst hævnning mod nord hælder mere og mere jo ældre, og altså jo højere liggende, de er.



Figur 3. Figur 5 fra [8] med standardafvigelse introduceret. Med den rette linie gennem standardafvigelses-intervallerne illustreres, at vipningerne kan forklares ved en nær regelmæssig ændring over tid. Det konkluderes, at springene i hældning er insignifikante, regelmæssighed er en lige så god forklaring på hældningernes ændring og det passer bedre i det regionale hævningsmønster.

De målte gennemsnitshældninger er illustreret i figur 3. En zig-zag-linie, der forbinder målepunkterne, er brugt som argument for geologisk kortvarige vipninger, eventuelt så øjeblikkelige, så de kan kaldes jordskælv [8] og [9]. Men de viste hældningsmålinger kan meget vel, som det vises i figur 3, tydes som en gradvis vipning, eventuelt med små ujævnheder, når usikkerheden på målingerne tages i betragtning. De præsenterede originale målinger er fra figur 5 i reference [8]. Disse originale gennemsnits-målinger har jeg suppleret med en skønnet standardafvigelse ud fra de præsenterede niveaumålinger, som må skønnes at have standardafvigelse omkring en kvart meter på grundlag af omkring ti målinger hver. Det kan konstateres, at der skønnes netop samme standardafvigelse i undersøgelser af strandlinier på Anholt [10].

Diskussionen om lille eller megen uregelmæssighed i hævnings- og vipnings-udviklingen er intens. Fænomenet bør belyses af:

Forslag nr. 5. En sammenlignende geologisk og geofysisk undersøgelse, inklusive aldersbestemmelse af sammenlignelige strandlinier på Læsø, Anholt, Frederikshavn og svenskekystens Laholm-bugt og Hallandsåsen.

Der er foretaget spændende undersøgelser på hvert af disse steder med både målinger af hævnning siden Istiden og tilhørende tidsbestemmelser [5], [8] og [11].

Men de er ikke bedømt i samme system, hvad angår de nødvendige oplysninger om nøjagtighed og entydighed af tid og højde. Jordskælvet på Læsø må siges at være ikke-eksisterende. Men der kan være god grund til at undersøge, hvor nøje den mindre dramatiske tektoniske hævnings siden Istiden hænger sammen henover Læsø og Anholt fra den danske til den svenske kyst.

En ny artikel om strandlinierne på Læsø [4] indeholder en fortolkning om forskydning i Danmarks undergrund længere sydpå. I de sidste 100 års hævningsmønster tydes en uregelmæssighed som en diskontinuitet ved sydsiden af Ringkøbing-Fyn-højderyggen (se figur 1). Med usikkerheden taget i betragtning, som i overvejsen om standardafvigelse diskuteret i figur 3, må denne forskydning ses som et usandsynligt forslag, der er fremkommet ved ikke at tage den manglende jordskælvsforskydning i betragtning. Den valgte databehandling i [4] udpeger en statistisk insignifikant diskontinuitet, som ikke er i overensstemmelse med det seismologiske eller geodætiske regionale mønster [12].

I figur 2 er der, foruden de foregående nævnte jordskælvsfyndninger, afmærket fem andre lokaliteter, som skal nævnes i diskussionen om jordskælv:

- Omkring Ålborg er der hævdet enten et knæk eller en bøjning af jordoverfladen. I tidsskriftet *Geologisk Nyt* blev det omkring nytår 2000/2001 diskuteret. Min egen involvering får mig til at konkludere, at der ikke er signifikant evidens for et knæk i unge bevægelser, snarere en jævn bøjning som forventet i kanten af den Skandinaviske hævnings siden Istiden.

- Skåne-positionen henviser til en svensk undersøgelse med gentaget GPS. Vores svenske geodætiske kolleger accepterer ikke, at nøjagtigheden er god nok til at understøtte en konklusion om speciel lokaliseret deformation.

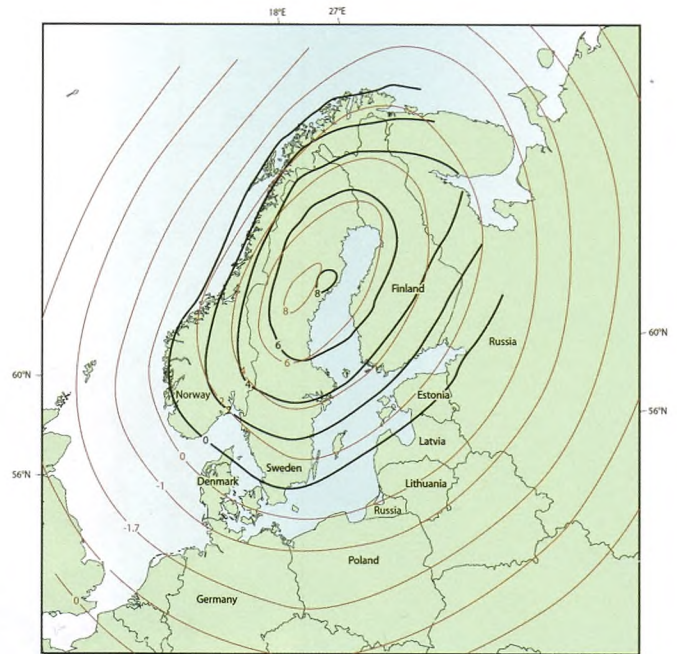
- Rügen-observationen ligner den geodætiske del af Ålborg-observationen. Der er lidt deformation af nivellements-linierne på Rügen, og det skal undersøges i fremtiden, om det er signifikant.

- I Midtjylland er observeret en ung forkastning. Det diskuteres, om den er forbundet til unge undergrundsbevægelser, men det er usikkert at skelne disse fra sedimentdeformationer. Det samme gælder ældre sedimentobservationer længere inde i Jylland.

- For svenskekysten nær Hallandsåsen (figur 2) er der udpeget adskillige geologiske indikationer på jordskælv: Forkastninger, strandlinier, der ikke passer sammen, sten- og jordskred, mange brud i stenblokke, liquefaction (forstyrrelser af vandfyldte sediment) og tsunamis sediment [11]. Hver enkelt af disse indikationer kan godt tydes som bevægelse *uden* jordskælv.

Derfor er der fornuft i:

Forslag nr. 6. Gennemgang i felten af disse svenske indikationer med geologiske og seismologiske kolleger, der har erfaring med palæo-seismologi, ganske som den foretaget for Norge, for nogle år siden [2]. Der bør bygges videre på geologiske ekskursioner, senest i 2008, og fra en seismologisk ekskursion med mig selv som arrangør i 2013 [10].

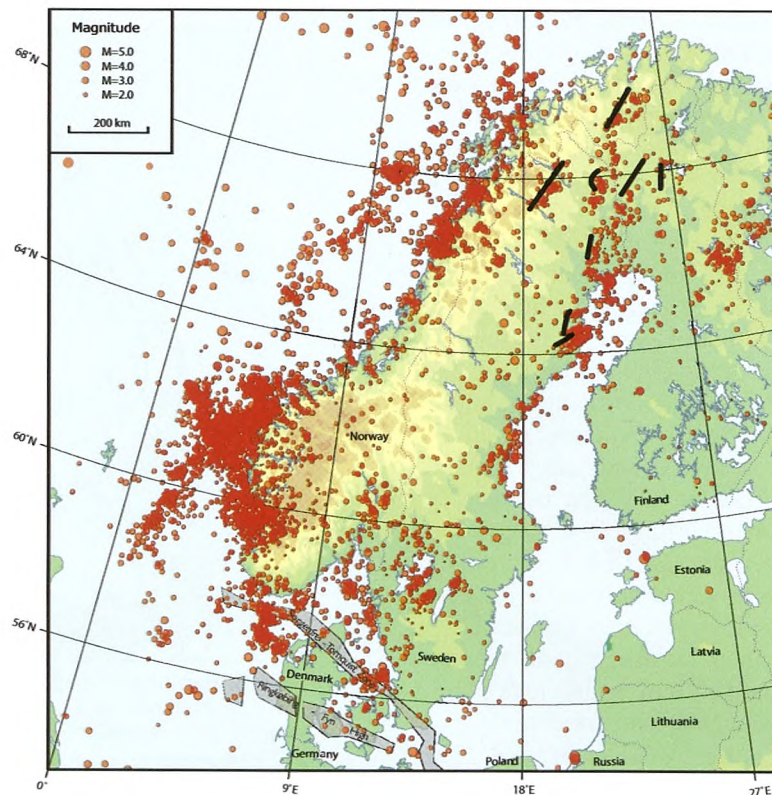


Figur 4. Hævnings og omgivende sænkning i tidsskala 10-100 år fra geodæsi og i tidsskala 100-1000-10.000 år fra geologi. De geodætiske kurver (sorte) viser millimeter pr. år. De geologiske kurver (røde) viser hundreder af meter siden den sidste istid for cirka 9.000 år siden. Fra [13].

Ser man samlet på alle oplysningerne kommer man frem til et billede af en ung geologisk udvikling med meget nær regelmæssig hævnings siden Istiden (figur 2 og 3). I figur 4 ses, at geometrien i hævningsbilledet er den samme for geologiske og geodætiske målinger. Disse hævningskurver er udledt helt uafhængigt i de to videnskabelige discipliner. Fra generel geofysik forventes langsommere hævnings henover årtusinderne. I de generaliserede geologiske kurver indgår observationer om strandlinier og skøn over havstigninger, der gik frem og tilbage flere gange efter smeltningen af Istidens store isskjolde. Det geodætiske billede indeholder vandstandsmålinger i mange havne, geodætiske højdemålinger med sigteinstrumenter, samt moderne GPS-målinger.

Palæo-seismologiske undersøgelser i det nordlige Skandinavien viser, at der lige efter Istiden skete store jordskælv deroppe [3] og [13] forårsaget af aflastningen fra ismasserne (figur 5). Jordskælvsudløsningen nutildags skyldes derimod den absolutte pladebevægelse med tryk fra den Midtatlantiske Ryg og kollision med pladerne syd for Europa i Alperne og Karpaterne [1] og [10].

De geodætiske og de geologiske oplysninger kan med tiden give ekstra oplysninger om jordskælvsaktiviteten i Danmark, ganske som det sker i Californien, Japan og andre aktive zoner. De giver i dette øjeblik ikke anledning til et andet syn på jordskælvsaktiviteten i Danmark end det, der kommer fra instrumentel seismologi og historiske beretninger. Seismologi og geodæsi er i gang med at supplere med bedre steds-opløsning. Jeg har en drøm om et sammenlignende geologisk og geofysisk dansk-svensk studium henover Kattegat.



Figur 5. Jordskælvsgeografien for Skandinavien 1970 til 2004. Jordskælvs-kataloget fra Helsinki Universitet er suppleret i Danmark med GEUS' katalog. Magnitude = Richtertal angivet. De meget tykke linier i det nordlige Skandinavien viser postglaciale forkastninger, som via mange indikationer, som fx forstyrrede omliggende sedimenter og sten- og jordskred, er tydet som jordskælv for cirka 9.000 år siden. Fra [13].

Litteratur

- [1] Gregersen, S., Hjelme, J. & Hjortenberg, E. (1998), Earthquakes in Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* **44**, 115-127.
- [2] Olesen, O., et al. (2004), Neotectonic deformation in Norway and its implications: a review. *Norwegian Journal of Geology*, **84**, 3-34.
- [3] Lagerbäck, K. (1990), Late Quaternary faulting and paleoseismicity in northern Scandinavia, with particular reference to the Lansjärv area, northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* **112**, 333-354.
- [4] Hansen, J.M., Aagaard, T. & Binderup, M. (2011), Absolute sea levels and isostatic changes of the eastern North Sea to central Baltic region during the last 900 years. *Boreas* 10.1111/j.1502-3885.2011.00229.x.
- [5] Gregersen, S. & Voss, P.H. (2012), Efforts to include geological and geodetic observations in the assessment of earthquake activity in Denmark. *GEUS bulletin* **26**. Review of survey activities 2011 (eds. Bennike, O., Garde, A.A. and Watt, W.S.), 41-44. GEUS København.
- [6] Nielsen, L. & Thybo, H. (2004), Location of the Carlsberg Fault zone from seismic controlled-source fan recordings, *Geophysical Research Letters*, **31**, L07621, doi: 10.1029/2004GL019603.
- [7] Ovesen, N.K., Blem, H., Gregersen, S., Møller, H.M.F. & Frederiksen, J.K. (2002), Recente terrænbevægelser i København. *Dansk Geoteknisk Forenings Bulletin*, **19**, 183-192.
- [8] Hansen, J.M. (1980), Læsøs postglaciale udvikling i relation til den Fennoskandiske Randzone. *Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1979*, 23-30.
- [9] Hansen, J.M. (1986), Et forhistorisk jordskælv. *Museumsforeningen for Læsø, Årbog for 1985*, 17-23.
- [10] Gregersen, S. & Voss, P.H. (2014), Review of some significant claimed irregularities in Scandinavian post-glacial uplift on timescales of tens to thousands of years – earthquakes in Denmark? *Solid Earth* **5**, 109-119.
- [11] Mörner, N.-A. (2003), Paleoseismicity of Sweden. A novel paradigm. JOFO Grafiska AB, Stockholm.
- [12] Knudsen, P., Engsager, K. & Khan, S.A. (2012), Dokumentation for beregning af ny uplift-model 2011. Intern rapport DTU Space. København.
- [13] Gregersen, S. & Voss, P. (2010), Irregularities in Scandinavian postglacial uplift/subsidence in time scales tens, hundreds, thousands of years. *Journal of Geodynamics* **50**, 27-31.



Søren Gregersen er adjungeret statsseismolog i De geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland og adjungeret professor ved Niels Bohr Institutet.