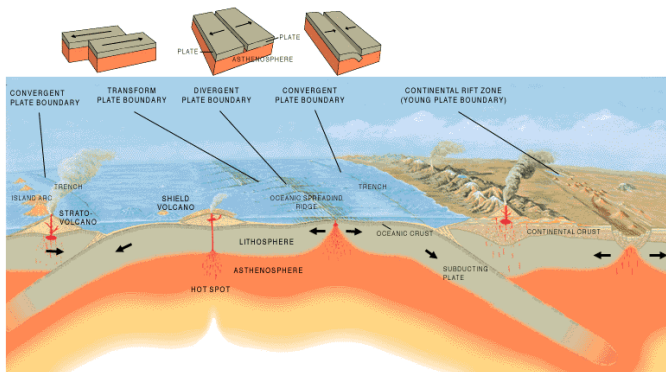


# SKB:s hantering av jordskalv

Raymond Munier

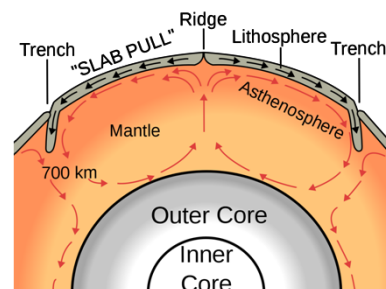
- Genomgång av centrala begrepp
- SKB:s hantering av skalv
- Repliker i sakfrågor

## Om tektonik

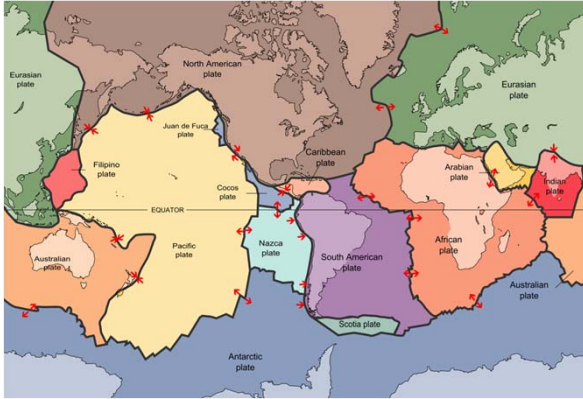


Earle S, 2016. Physical Geology. Campus Manitoba, <http://open.bccampus.ca>

- Plattorna rör sig mellan 2-12 cm per år
  - Skorpa konsumeras vid *subduktionszoner*
  - Skorpa skapas vid *spridningszoner*
- De flesta och de största skalven sker vid *plattgränserna* ("interplate")
- *Megaskalv* ( $\geq M8$ ) nästan uteslutande vid subduktionszoner.
- Skalv sker även inom plattorna (intraplate)



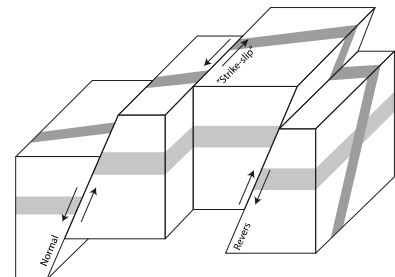
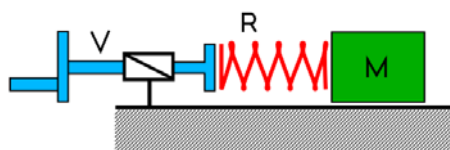
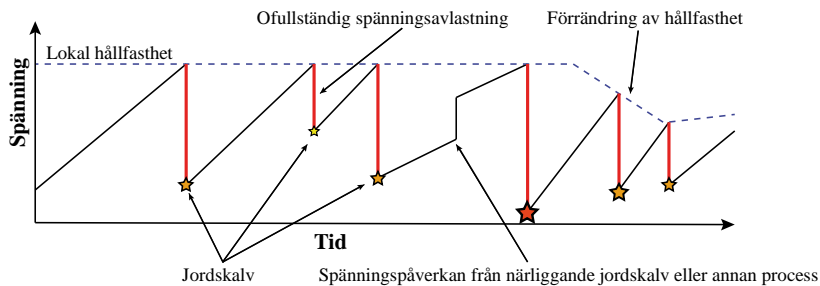
## Plattor och plattgränser



<https://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html>

- Mittatlantiska ryggen närmaste plattgräns och ger störst bidrag till bergspänningar
- 2,5 cm per år
- Spänningstillståndet i Sverige har varit i det närmaste konstant i flera miljoner år (med undantag av mindre, periodiska, tillskott från islaster)

## Hur fungerar ett skalv?



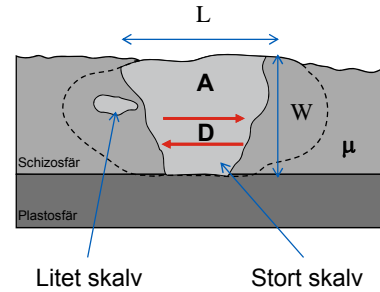
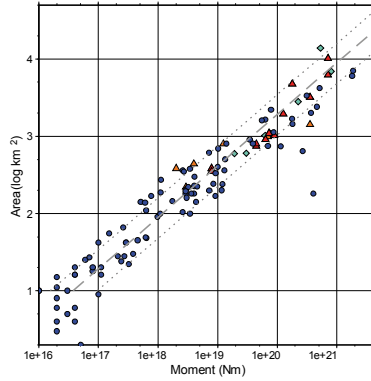
Omritat från: Grotzinger J, Jordan T H, 2010. Understanding earth. Macmillan. ISBN: 1429219513.

## Om magnitud

- Seismiskt moment,  $M_0 = \mu D A$
- För varje helt steg på Magnitudskalan ökar den utstrålade energin i jordskalvet cirka 32 gånger.
- **Skalvets maximala storlek styrs av storleken på zonen**



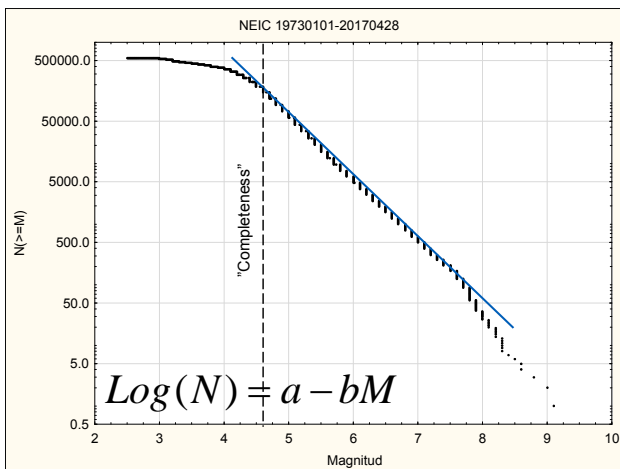
$$M_w = 2/3 \log(M_0) - 10.73$$



Leonard M, 2010. Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. Bulletin of the Seismological Society of America. Volume 100, issue 5A, p. 1971-1988. doi:10.1785/0120090189

Hanks T C, Kanamori H, 1979. A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research. Volume 84, issue B5, p. 2348-2350

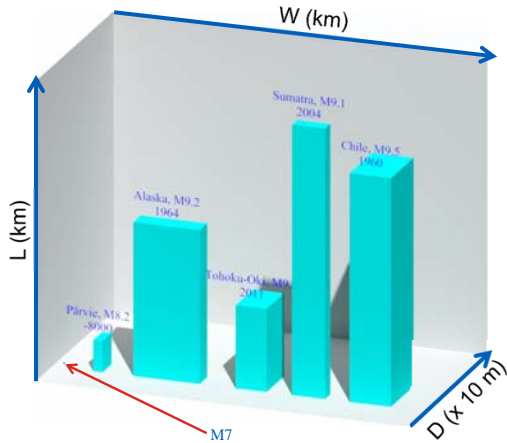
## Frekvens-magnitud samband (G-R relation)



- "a" = "aktivitet", dvs hur många skalv per område och tid (skärningen med y-axeln)
- "b" = förhållande mellan stora och små skalv
- "b"  $\approx 1$  i de flesta områden  $\rightarrow \approx 10$  ggr färre skalv för varje ökad magnitud



## Några jämförelser av storlekar



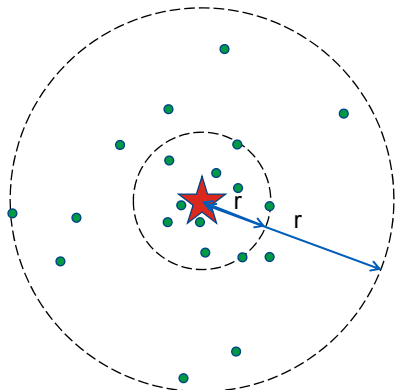
- I snitt ett megaskalv ( $\geq M8$ ) per år i världen
- Miljoner skalv  $> M2$  per år i världen
- Ett megaskalv avger lika mycket *energi* som alla andra skalv tillsammans
- Chile M9.5 (1965) ca 6 ggr större än Tohoku-Oki M9.1 (2011) och ca 90 ggr större än Pärvie (8.2)

Data från: Arvidsson, R. (1996). "Fennoscandian earthquakes; whole crustal rupturing related to postglacial rebound." Science 274(5288): 744-746.

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php>

$L \text{ (km)} \times W \text{ (km)} \times D \text{ (x 10 m)}$ . Mer exakt formulerat är förhållandet mellan två skalvs energiutveckling lika med  $10^{1.5(M_1 - M_2)}$

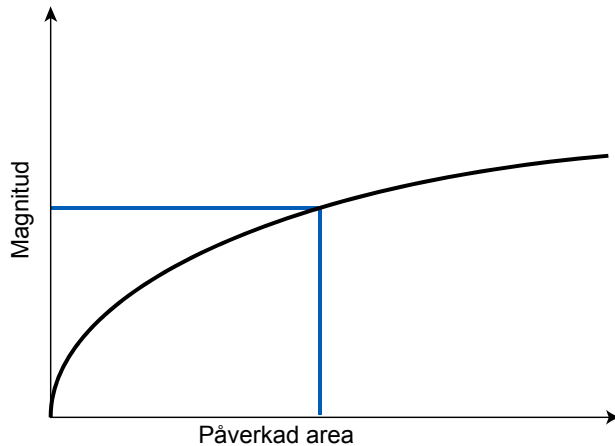
## Hur beräknas magnituder på "fossila" skalv (1/2)?



Starkt beroende av *lokala* förhållanden

- Vattenmättnad
- Jordartstyp
- Topografi
- ...

## Hur beräknas magnituder på "fossila" skalv (1/2)?



- Otvetydigt *seismiskt* inducerade händelser
- *Samtidiga* händelser (kräver datering)

Tex: Galli P, 2000. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. Tectonophysics. Volume 324, issue 3, p. 169-187

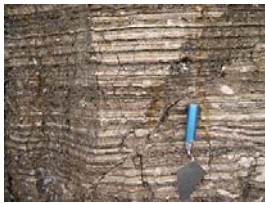
## Komplikationer – ursprung

- Kanten av tempererade glaciärer är **extremt dynamiska geologiska miljöer**. Terrängen saknar vegetation och **sedimenten ofta mättade med smältvatten**. Massflöden är vanliga (Benn and Evans 2014, s. 262) och **sedimentationshastigheten kan vara extrem** (Benn and Evans 2014, s. 289).
- Både massflöde och snabb sedimentation kan orsaka ökat portryck och därmed flytbildningsstrukturer (dvs "water escape" and "liquefaction") som **ofta misstas för paleoseismicitet** (Collinson et al. 1982).
- Visa glacialt skapade formationer är benägna att kollapsa när isen smälter (Benn and Evans 2014, s 247, s 243). Sådana kollapsar ger "förkastningar" i sedimenten som är helt okopplade till jordskalv.
- Ytterligare deformation i form av "förkastning" och veckning orsakas av isens eget flöde (Benn and Evans, 2007, s. 249-255).
- **Man måste, ovillkorligen, påvisa seismiskt ursprung om deformationen ska användas för skattning av Magnitud.**

Benn D, Evans D J, 2014. *Glaciers and glaciation*. Routledge. ISBN: 1444128396.  
Collinson J D, Collinson D, Thompson D B, 1982. *Sedimentary structures*. ISBN: 0412445603.

## Komplikationer – datering

- Varviga sediment kan dateras genom korrelation av relativ tjocklek av varven till en etablerad varvssekvens.
- Absoluta åldrar kan därefter erhållas om kronologin är endera C14 daterad eller korrelerad till en varvssekvens som i sig är daterad.
- **Utan korrelation av varvtjockleken till etablerad kronologi kan inte ålder av sedimentära lager fastställas.**
  - **Utan ålder kan inte samtidig händelse påvisas.**
  - **Utan påvisad, *samtidig*, händelse kan skalv ej demonstreras.**
  - **Även med datering finns osäkerheter (precision i C14, t ex).**



Strömberg B, 1989. Late Weichselian deglaciation and clay varve chronology in east-central Sweden. Sveriges geologiska undersökning. Serie Ca. Avhandlingar och uppsatser I 4: 0. issue 73, p. 3-70  
 Cato I, 1998. Ragnar Lidén's Postglacial Varve Chronology from the Angermanälvan Valley, Northern Sweden. Vol. 88 Sveriges Geologiska Undersökning. ISBN: 9171585737  
 Foto: Jan-Olof Svedlund, SGU

## Hur beräknas magnituder på "fossila" skalv (2/2)?



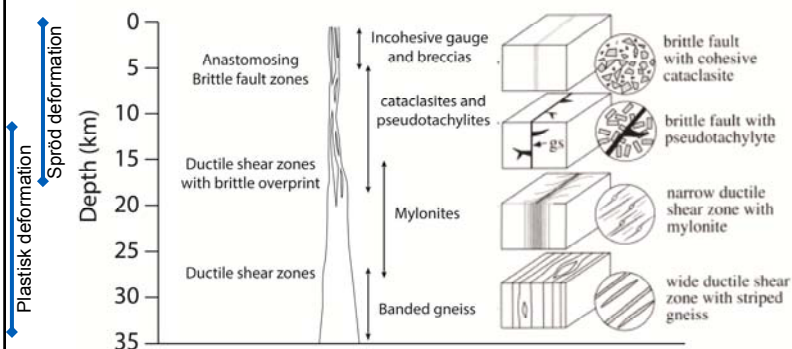
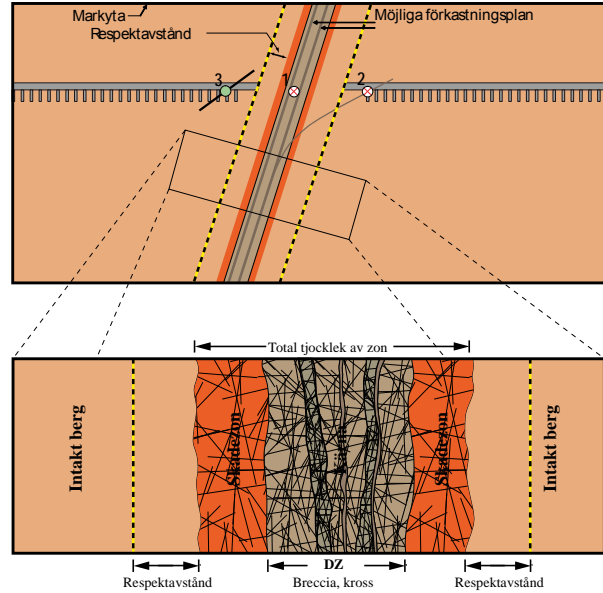
- Beräkna det seismiska momentet
  - $M_0 = \mu D A$
- Antag då
  - Förkastningsytan lika stor som zonytan
  - Längden (L) = sprickspårlängden
  - Djupet (W) skorpans tjocklek
  - Skjuvbeloppet (D) = den maximalt karterade
  - En konservativ styvhet
- Omvandla till momentmagnitud ( $M_w$ )
  - $M_w = 2/3 \log(M_0) - 10.73$
- Pärvie = M8.2, Lansjärv M7.8

Data från Mikko H, Smith C A, Lund B, Ask M, Munier R, 2015. LIDAR-derived inventory of post-glacial fault scarps in Sweden. GFF. doi:10.1080/11035897.2015.1036360  
 Arvidsson R, 1996. Fennoscandian earthquakes, whole crustal rupturing related to postglacial rebound. Science. Volume 274, issue 5288, p. 744-746

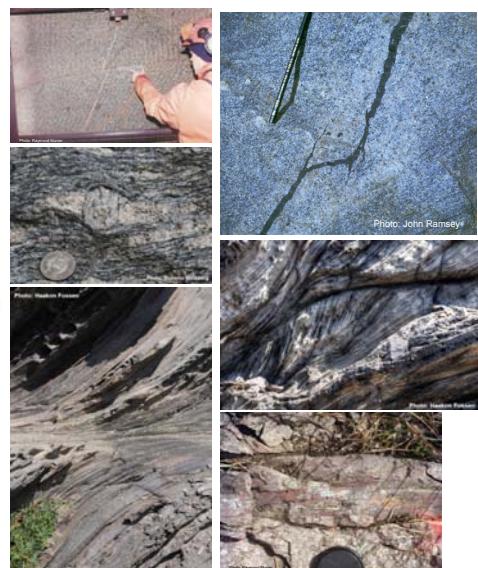
## Ytterligare några begrepp



Deformationszon: **Koncentration** av deformation  
 Förkastningsplan: **Svaghetsplan** som kan hysa **skalv** i en zon  
 Skadezon: **Tillväxtvolym** runt zonen  
 Respektavstånd: Avstånd från skadezon inom vilket **deponering ej tillåts**  
 "Intakt berg": Bergvolymen som avgränsas av zoner, innehåller också sprickor

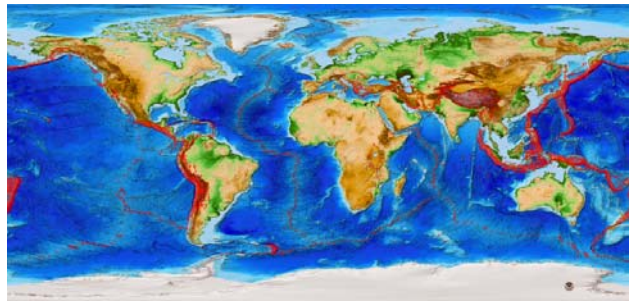
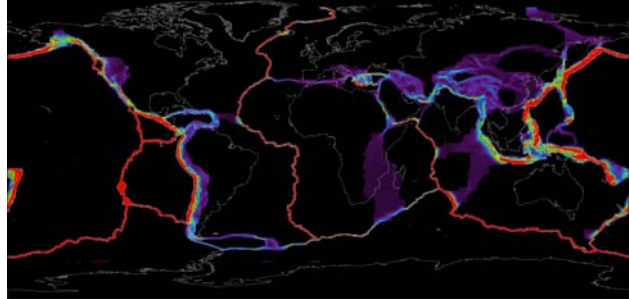


- Deformation koncentreras med tiden till smalare zoner
- Zoner reaktiveras
- Zoner kan övergå från plastisk till spröd och vice versa med tiden
- Ären av dessa deformationer kan avläsas i berggrunden
- Zoner i Forsmark har karakteriserats avseende dessa aspekter



## Skalv i Sverige

- Sverige är ett seismisk lågaktivt område långt ifrån aktiva plattgränser och vulkanism.
- Den kontinentala skorpan är här mycket gammal, mycket tjock och mycket stabil.
- Skalven som trots allt förekommer är små och inträffar relativt sällan.



Kreemer C, Blewitt G, Klein E C, 2014. A geodetic plate motion and global strain rate model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Volume 15, issue 10, p. 3849-3889  
 Slunga R S, 1991. The Baltic Shield earthquakes. *Tectonophysics*. Volume 189, issue 1-4, p. 323-331

## Svenska skalv

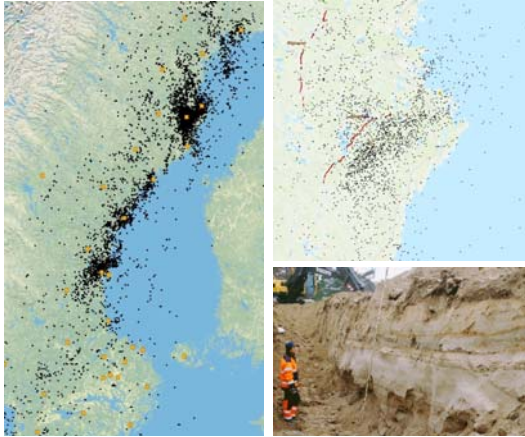


- Registreras av svenska nationella seismiska nätet (SNSN)
- Ca 500-700 skalv/år (> M-1)
- Ca 1/år > M3, ca 10/år > M2
- Data även ifrån anekdotiska kataloger

FENCAT, 2007. Historical earthquakes in northern Europe. Institute of Seismology, University of Helsinki, Finland. Available at: [http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/catalog\\_northeurope.html](http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/catalog_northeurope.html)  
 Slunga, R. S., 1991. The Baltic Shield earthquakes. *Tectonophysics*, 189(1-4), pp 323-331  
 SNSN: Swedish National Seismological Network, Department of Earth Sciences, Uppsala University

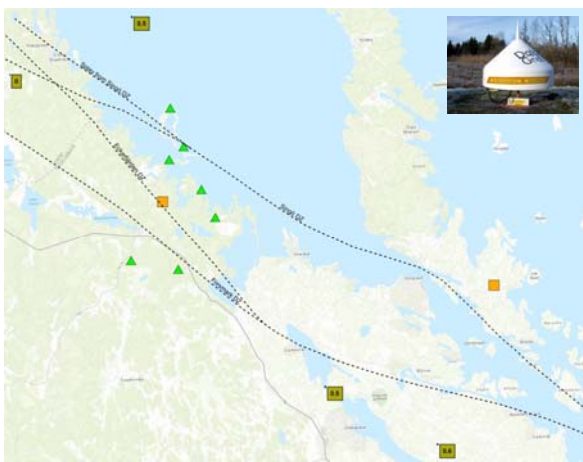


## Svenska skalv – detaljer



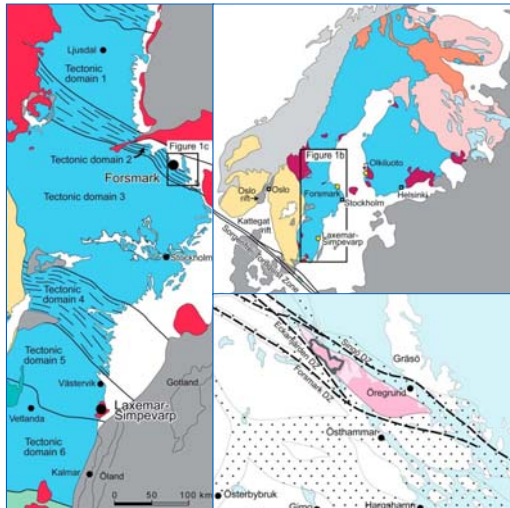
- Stråket av seismisk aktivitet längs Norrlandskusten är inte orsakat av en enskild skjuvzon, utan **består av ett antal koncentrationer** av skalv, samlade kring NO-ONO-strykande, **kända geologiska strukturer**.
- **En koppling mellan dessa seismiska kluster och Singözonen har inte kunnat påvisas givet dagens kunskap.**
- **Förekomsten av stora skalv i Forsmark har inte kunnat påvisas under platsundersökningarna.**

## Om pågående deformationer



- Trots relativt hög stationstäthet kring Forsmark, och drygt 15 års högupplösta mätningar, kan vi inte bekräfta seismisk aktivitet längs de stora zonerna i Forsmark.
- Analys av InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) har inte heller kunnat påvisa deformationer.
- Mätningar med GPS har givit motstridiga resultat (bruset överstiger signalen); nya förbättrade mätningar är i planeringsstadiet.
- **Sammanfattningsvis är pågående deformationer så små, om de ens finns, att de knappt går att mäta.**

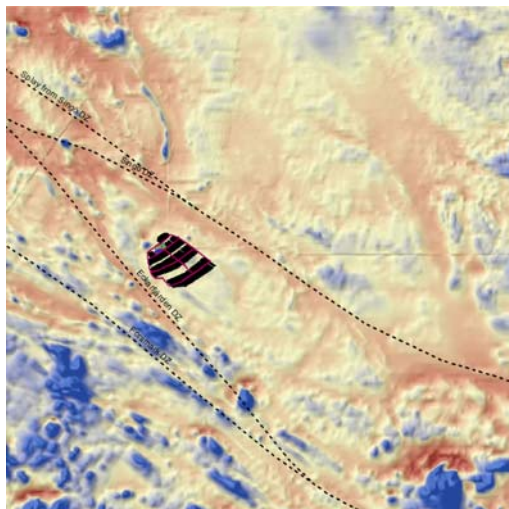
## Om linsen



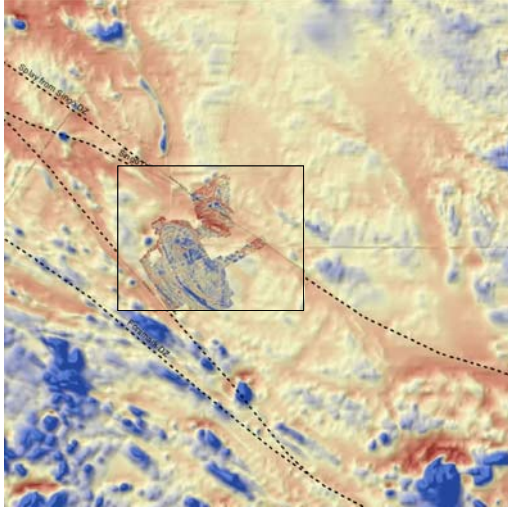
Salntot A, Stephens M B, Viola G, Nordgulen Ø, 2011. Brittle tectonic evolution and paleostress field reconstruction in the southwestern part of the Fennoscandian Shield, Forsmark, Sweden. Tectonics. Volume 30, issue 4, p. n/a-n/a. doi:10.1029/2010tc002781

- Samtliga skjuvzoner, oavsett s k "skala", innehåller partier inom vilka **deformationen koncentrerats**, och motståndskraftigare partier i form av linser vilka är mindre påverkade av deformationen.
- Rörelsen längs Singözonen är ett **ackumulerat resultat av långväga effekter** från aktiva plattgränser.

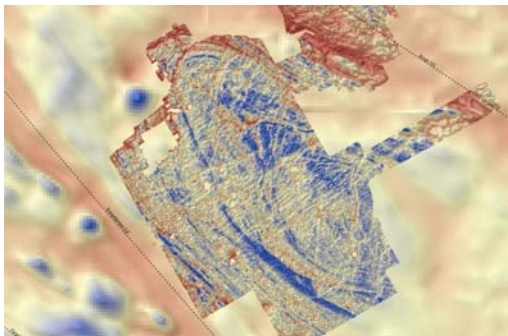
## Om linsen



## Om linsen

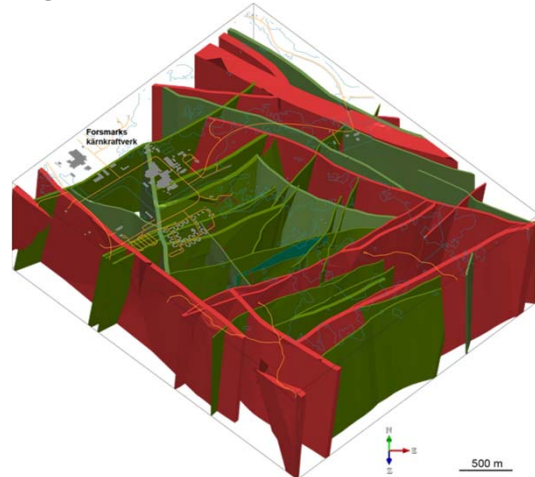
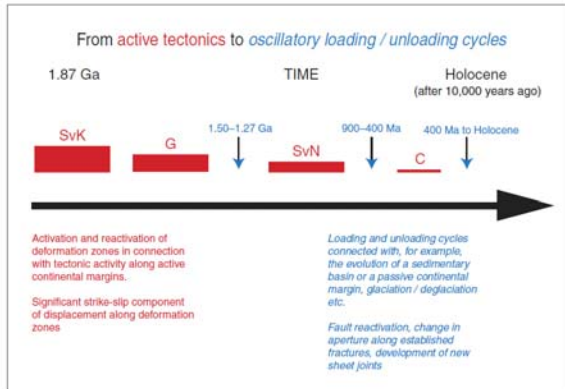


## Om linsen



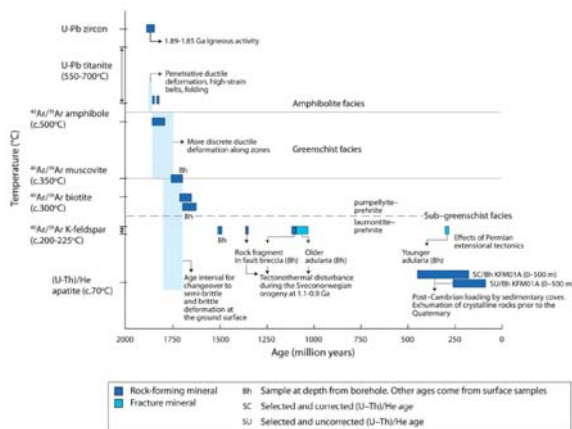
Vissa skjuvrörelser har skett efter ca 1800 miljoner år sedan utmed Singözonen och Forsmarkszonen, samt utefter mindre zoner som skär igenom Forsmarkslinsen. De senare är **försumbart små**.

## Upprepad belastning och avlastning



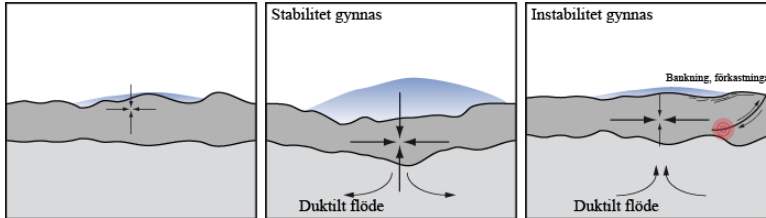
Stephens M B, Fox A, La Pointe P, Simeonov A, Isaksson H, Hermanson J, Ohman J, 2007. Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## Geologisk utveckling

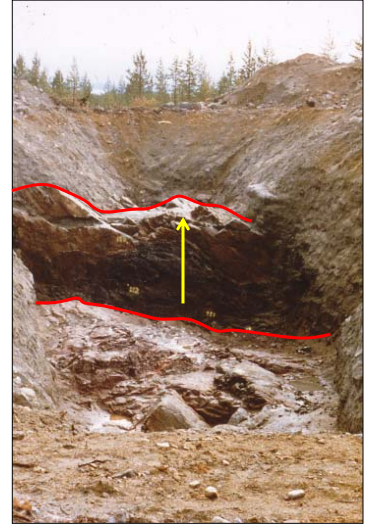


- Vi har en mycket god bild om hur och när berget i Forsmark deformerats.
- Vår bild stämmer med forskningsvärlden i övrigt; vi förstår också varför vi haft deformationer.
- Berget har utsatts för jordskalv, vulkanism, bergskedjebildning i närområdet, ett tiotal istider. Likväl är berget relativt intakt.
- Vi har inte kunna påvisa några mätbara deformationer som är yngre än tiotals miljoner år.

## Varför beakta jordskalv?



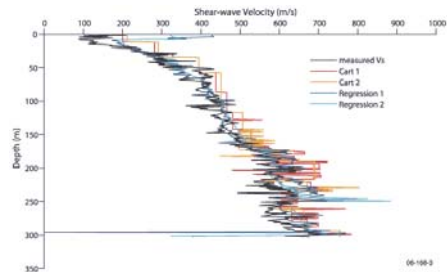
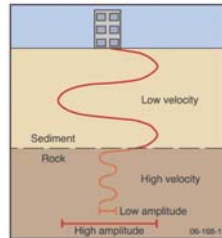
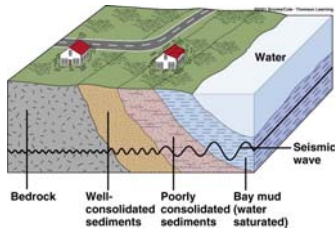
- **Stora och många** skalv i samband med inlandsisens tillväxt och avsmältning.
- Så länge isen ligger kvar är förkastningar **stabila**
- Sådana skalv **sker längs svaghetszoner** i berget, dvs zoner där deformation koncentrerats under långa tidsrymder.
- Tektoniska spänningar är **drivkraften**
- SKB har **forskat på detta sedan slutet av sjuttioalet** och forskning pågår än idag
- **Vi har i ansökan utgått ifrån att det i Forsmark kommer att ske mycket stora skalv, oavsett vad denna forskning har gett oss.**



## Tunnlar är resistent mot skalv



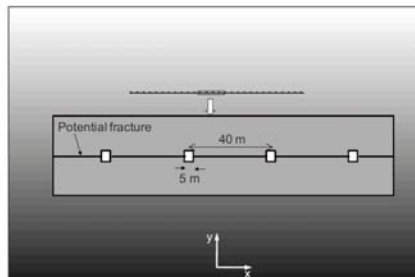
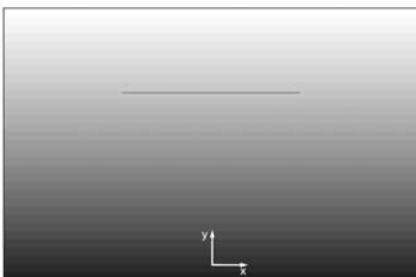
- Det finns omfattande dokumentation om hur tunnlar reagerar på skalv. **Alla resultat hittills pekar mot att tunnlar i kristallint berg är mycket resistent mot skalv.**
- Skador i tunnlar begränsade till infrastruktur (lining, installationer, etc).
- Mycket stor skillnad i effekt på markytan och mot djupet.
- Mycket stor skillnad mellan sediment och fast berg.
- Skadorna i tunnlar är i stort sett begränsade till skärningen mellan tunnlar och svaghetszoner och skador i berget avtar snabbt med avstånd från svaghetszonen.



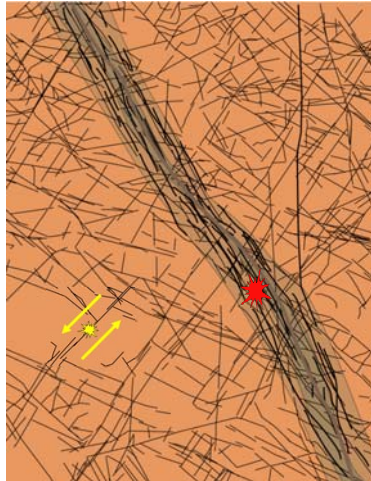
## Förvaret som svaghetsplan

*MKG: "Det finns en risk att slutförvaret utgör en brottanvisning genom linsen så att det blir ett totalhaveri vid en större anspänning, t.ex. en jordbävning."*

Möjligheten att förvaret, dvs systemet av tunnlar och deponeringshål, skulle kunna utgöra ett svaghetsplan kan uteslutas givet att avståndet mellan deponeringstunnlarna överstiger 20 m. Förvaret är utformat med ett inbördes avstånd mellan tunnlar av minst 40 m.



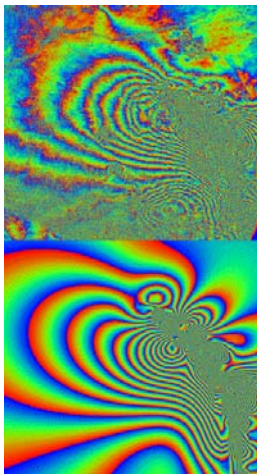
## Risken – sekundära rörelser triggade av skalv



- Skalv kan få stora och ogynnsamt orienterade sprickor i bergmassan att röra sig. Om dessa skär kapslar kan dessa skadas.
- Påverkan avtar med avståndet från zonen (visat empiriskt och med modellering).
- Respektavstånd till zoner + acceptanskriterier för deponeringshål.

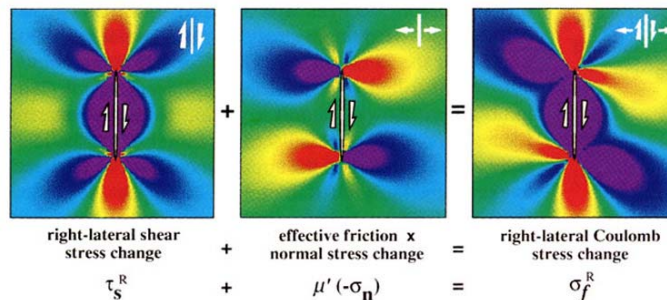


## Co-seismic Static Deformation



- Co-seismisk deformation i samband med skalvet i Landers (1992, Ms 7.3)
- Kan modelleras mycket väl (med bra modeller och data)
- Teorin mycket väl etablerad sedan lång tid

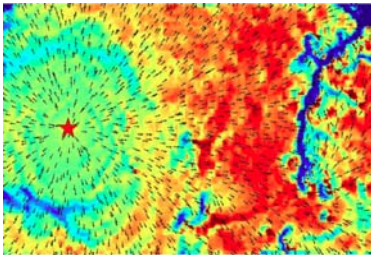
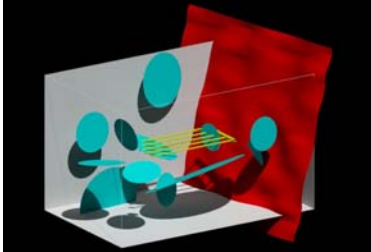
A. Coulomb stress change for right-lateral faults parallel to master fault Stress ■ Rise ■ Drop



Hernandez B, Cotton F, Campillo M, 1999. Contribution of radar interferometry to a two-step inversion of the kinematic process of the 1992 Landers earthquake. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Volume 104, issue B6, p. 13083-13099

Pollard D D, Fletcher R C, 2005. Fundamentals of structural geology. Cambridge University Press.

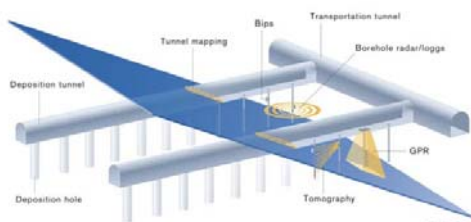
## Vilka är de kritiska sprickorna?



- SKB har modellerat skalven s.k. "deterministiskt" genom att **ansätta stora skalv** (upp till magnitud 7.5) på zoner nära förvaret och beräknat hur det skulle påverka kapslarna.
- Metodiken framtagen **stegvis**, publicerad och granskad av både vetenskapliga samfundet och olika remissinstanser.
- SKB har **fortsatt** med detta arbete sedan ansökan och **förfinat** metodiken ytterligare.
- Det **återstår forskning** och metodutveckling, främst med avsikt att förstärka hanteringen av osäkerheter, göra ytterligare verifieringar av modellresultat samt att **optimera förvaret** genom att minska pessimistiska antaganden.

## Slutsatser av skalvanalyser

- Risk för skador på kapslarna kan i stort sett elimineras **helt**, även under långa tidsrymder.
- Även med mycket försiktiga antaganden, understigs **med råge** riskkriteriet.
- Skalv kan endast skada kapslarna om de skärs av **mycket stora sprickor**.
- Sådana sprickor **kan undvikas** genom detaljerade undersökningar under jord.

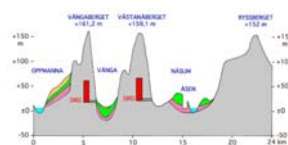




## Bemötande Dr Mörner

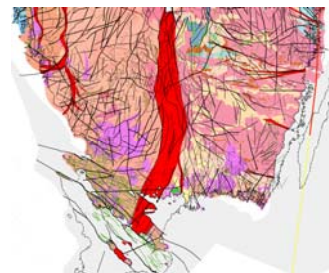
”Många och mycket bättre platser än Forsmark”  
 ”En seriös riskbedömning måste baseras på paleoseismiska data.”  
 ”Metanisexplosioner ”  
 ”Tsunamis i östersjön”  
 ”Felaktiga klimatmodeller”  
 Varför tar inte SKB hänsyn till Dr Mörners forskning?

## ”Många och mycket bättre platser än Forsmark”



*”Det finns platser i Sverige där det rätt förvånande lugna geodynamiska förhållanden för en period av runt 80 miljoner år; nämligen i Ivö-Åsen området i sydöstra Sverige, där ett okonsoliderat delta, daterat med fossil och paleomagnetism till övre Santon för runt 80 Ma sedan, förblivit totalt opåverkat a senare tektoniska och seismiska krafter och deformationer, liksom effekter av alla de glaciationer som passerat under Kvartertiden.”*

I relation till de omfattande platsundersökningarna i Laxemar, Simpevarp och Forsmark, och SKB:s generella kunskap om Sveriges berggrund förefaller påståendet vara mycket löst grundat.

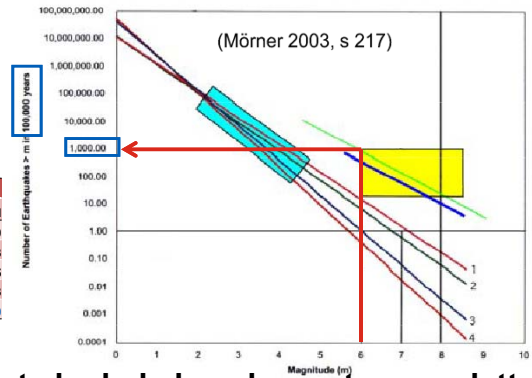


## ”En seriös riskbedömning måste baseras på paleoseismiska data”



NAM: ”SKB:s jordbävningsscenario behandlar paleoseismiska data på ett oacceptabelt, ovetenskapligt och klandervärt sätt. SKB anger maximalt 1 jordbävning av magnitud 6 på 100.000 år. Paleoseismiska data ger en helt annan bild (gult fält): 1000 M 6, 100 M 7, 10 M 8 och 2-3 M 9 jordbävningar. Det är 1000 miljarder mer seismisk energi utlösning i det gula fältet än i SKB:s blåa fält.” (mina understrykningar)

Referens i SR-Site	Skalvfrekvens per km <sup>2</sup> och år	Jmfr med Hora et al
M≥6		
Hora et al	3.18E-09	1.0
LaPointe et al	8.69E-10	0.3
Bödvarsson et al	4.77E-09	1.5
Fenton et al	4.00E-09	1.3
Mörner	2.22E-08	7.0



Area (A) ≈ 450 000 km<sup>2</sup>  
 Referenstid (RT) ≈ 100 000 år  
 Frekvens (f) ≈ 1000 ≥ M6  
 $f/(A*RT) \approx 2.22E-8$  (M≥6, år<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>)

Omräknat till antalet skadade kapslar motsvarar detta en ökning från 0,08 till 0,31 kapslar som ett statistiskt medelvärde.

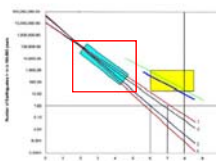
Aktbilaga 502-503, 449

Mörner N-A, 2003. Paleoseismicity of Sweden - a novel paradigm. Nils-Axel Mörner Paleogeophysics & Geodynamics. ISBN: 91-631-4072-1.

## Vad finns i SKB:s analyser?

Table 10-20. Number of canisters that may fail during different time spans and using different earthquake frequencies.

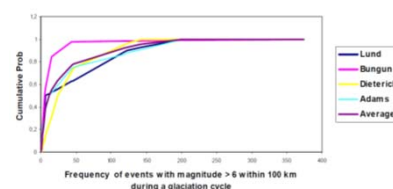
Reference	Strike-slip + reverse (mixed) stress regime		Number of potentially failed canisters					
	Earthquake frequency (M6 50 years)	5 km radius area	1,000 years		100,000 years		1,000,000 years (2 events)	
	Per zone (30)	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
/Bödvarsson et al. 2006/	2.4 · 10 <sup>-6</sup>	7.8 · 10 <sup>-4</sup>	9.3 · 10 <sup>-4</sup>	2.2 · 10 <sup>-2</sup>	2.2 · 10 <sup>-2</sup>	5.4 · 10 <sup>-2</sup>	2.9 · 10 <sup>-2</sup>	7.3 · 10 <sup>-2</sup>
/La Pointe et al. 2000, 2002/	8.7 · 10 <sup>-7</sup>	2.9 · 10 <sup>-4</sup>	3.4 · 10 <sup>-4</sup>	8.2 · 10 <sup>-4</sup>	8.2 · 10 <sup>-4</sup>	2.0 · 10 <sup>-3</sup>	8.2 · 10 <sup>-4</sup>	2.0 · 10 <sup>-3</sup>
/Hora and Jensen 2005/	2.5 · 10 <sup>-6</sup>	8.3 · 10 <sup>-4</sup>	9.9 · 10 <sup>-4</sup>	2.4 · 10 <sup>-3</sup>	2.4 · 10 <sup>-3</sup>	5.7 · 10 <sup>-3</sup>	3.1 · 10 <sup>-2</sup>	7.8 · 10 <sup>-2</sup>
/Fenton et al. 2006/	2.0 · 10 <sup>-6</sup>	6.8 · 10 <sup>-4</sup>	8.1 · 10 <sup>-4</sup>	1.9 · 10 <sup>-3</sup>	1.9 · 10 <sup>-3</sup>	4.7 · 10 <sup>-3</sup>	2.4 · 10 <sup>-2</sup>	6.0 · 10 <sup>-2</sup>



- Anmärkningsvärt lika trots osäkerheterna
- Extrapolering över en glaciationscykel predikerade ca 40 M7 och 6 M8
- ”Using the frequency-magnitude relations of /Bödvarsson et al. 2006, Section 4.4/ about 40 earthquakes ≥ M7 and about 6 earthquakes ≥ M8 during a glacial cycle are computed, when normalised to the area of Sweden” (TR-11-01, s 468).

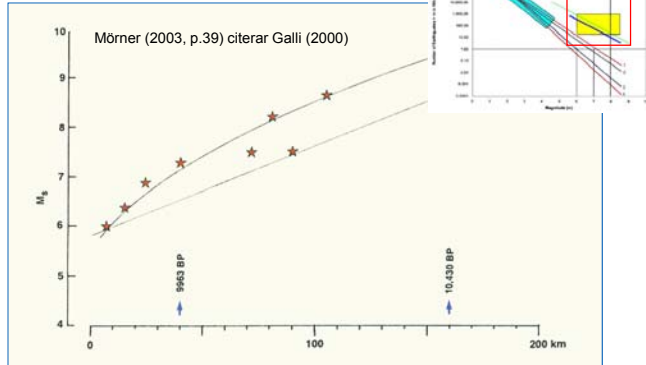
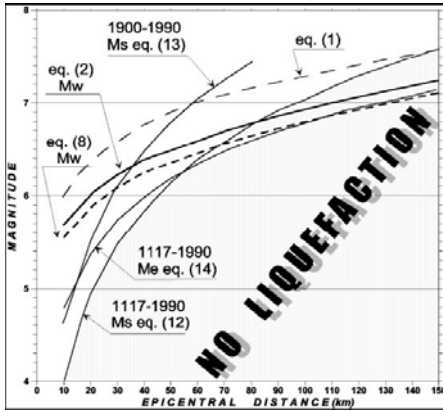
480

TR-11-01



La Pointe P R, Cladouhos T, Follin S, 1999. Calculation of displacement on fractures intersecting canisters induced by earthquakes: Aberg, Beberg and Ceberg examples. SKB TR-99-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.  
 Bödvarsson R, Lund B, Roberts R, Slunga R, 2006. Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear repository in Forsmark or Oskarshamn. SKB R-06-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.  
 Fenton C H, Adams J, Halchuk S, 2006. Seismic Hazards Assessment for Radioactive Waste Disposal Sites in Regions of Low Seismic Activity. Geotechnical and Geological Engineering, Volume 24, issue 3, p. 579-592. doi:10.1007/s10706-005-1145-4  
 Hora S, Jensen M, 2005. Expert panel elicitation of seismicity following glaciation in Sweden. SSI Rapport 2005:20, SSI - Statens strålskyddsinstitut (Swedish Radiation Protection Authority) Stockholm Sweden Sweden.

## Vad finns i Mörners analyser?

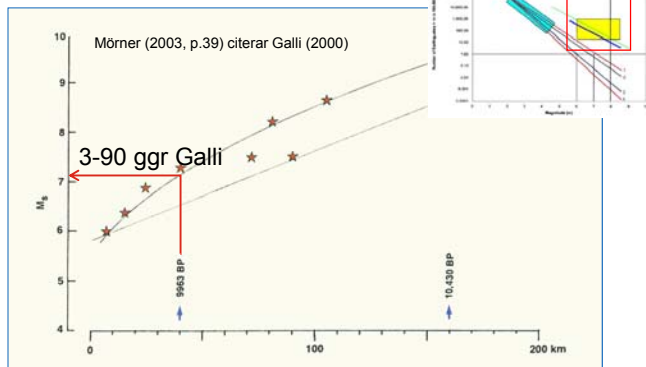
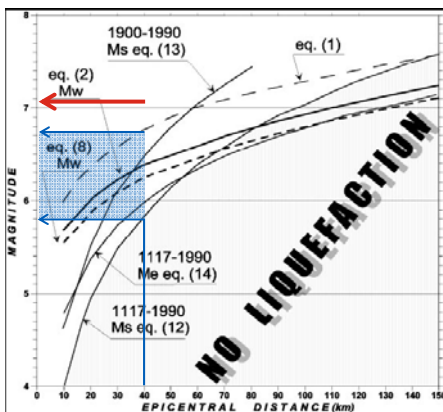


Aktbilaga 502-503, 449

Galli P, 2000. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. Tectonophysics. Volume 324, issue 3, p. 169-187

Mörner N-A, 2003. Paleoseismicity of Sweden - a novel paradigm. Nils-Axel Mörner Paleogeophysics &amp; Geodynamics. ISBN: 91-631-4072-1.

## Vad finns i Mörners analyser?

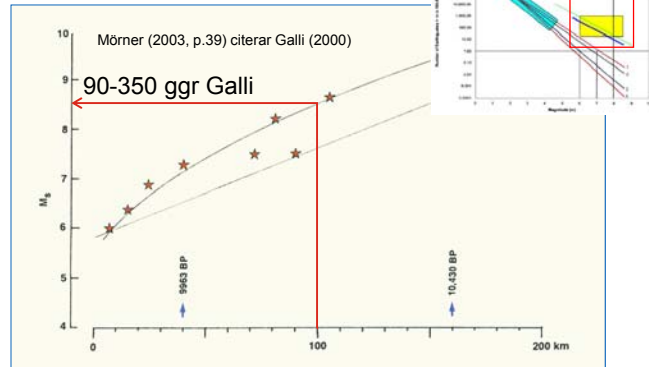
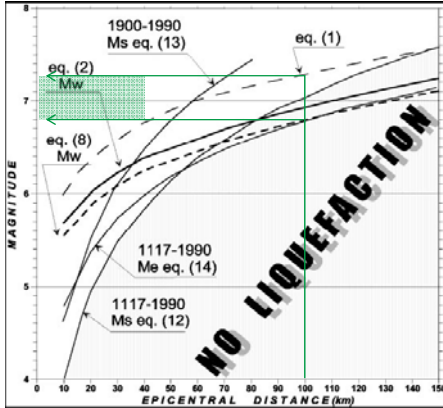


Aktbilaga 502-503, 449

Galli P, 2000. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. Tectonophysics. Volume 324, issue 3, p. 169-187

Mörner N-A, 2003. Paleoseismicity of Sweden - a novel paradigm. Nils-Axel Mörner Paleogeophysics &amp; Geodynamics. ISBN: 91-631-4072-1.

## Vad finns i Mörners analyser?

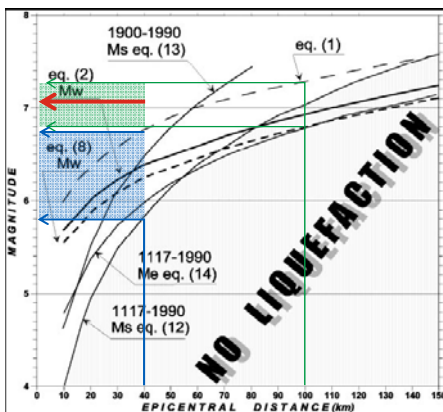


Aktbilaga 502-503, 449

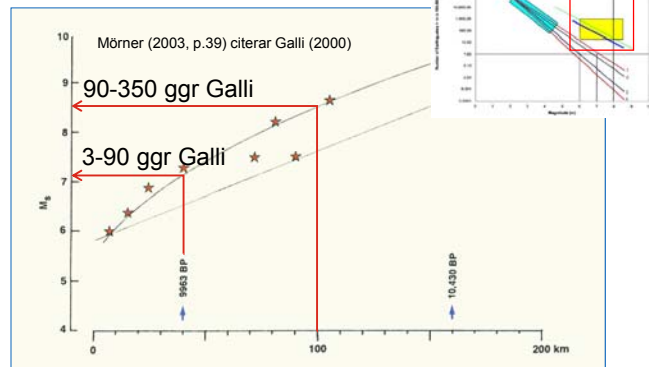
Galli P, 2000. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. Tectonophysics. Volume 324, Issue 3, p. 169-187

Mörner N-A, 2003. Paleoseismicity of Sweden - a novel paradigm. Nils-Axel Mörner Paleogeophysics &amp; Geodynamics. ISBN: 91-631-4072-1.

## Vad finns i Mörners analyser?



Galli (2000)



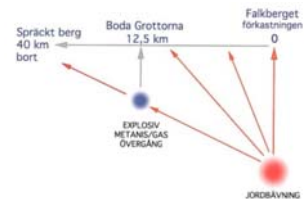
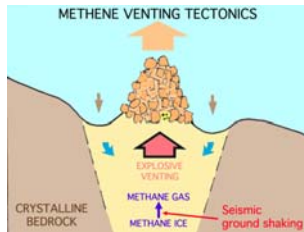
De anförda forskningsresultaten kan vare sig spåras eller replikeras

Aktbilaga 502-503, 449

Galli P, 2000. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. Tectonophysics. Volume 324, Issue 3, p. 169-187

Mörner N-A, 2003. Paleoseismicity of Sweden - a novel paradigm. Nils-Axel Mörner Paleogeophysics &amp; Geodynamics. ISBN: 91-631-4072-1.

## Om metanisexplosioner



NAM: "This factor seems to invalidate all talk about a safe deposition of high-level waste according to the KBS-3 concept."

- Metanisavgång i ytnära berg kan inte påverka kapslar på 500 m djup.
- Metanis finns beskrivet i TR-10-45 (FEP-rapporten), TR-10-48 (Processrapporten).
- Det finns inga förutsättningar för bildandet av några större mängder metanis i Forsmark (R-10-58).

### Aktbilaga 449

Tohidi B, Chapoy A, Smellie J, Puigdomenech I, 2010. The potential for methane hydrate formation in deep repositories of spent nuclear fuel in granitic rocks. SKB R-10-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.  
 Bath A, Hermansson H-P, 2009. Biogeochemistry of Redox at Repository Depth and Implications for the Canister. Research report 2009:28, ISSN: 2000-0456, Strålsäkerhetsmyndigheten.  
 Rempel A W, Buffett B A, 1997. Formation and accumulation of gas hydrate in porous media. Journal of Geophysical Research. Volume 102, issue B5, p. 10-10,164. doi:http://dx.doi.org/10.1029/97JB00392

Bilaga K.3, Fråga 11:6

## Stora tsunamis i Östersjön

Aktbilaga 386: "Mitt koncept "methane venting tectonics" diskuteras över huvud taget inte. Och, ändå: så sent som för 2900 år sedan orsakade en sådan händelse strax norr om Hudiksvall en tsunamivåg på minst 12 m vid Hudiksvall och minst 6 m när den sköljde in över Forsmarksområdet 16 mil söderut."



"Rocky Surf Off Rhode Island", William Trost Richards, 1833–1905.

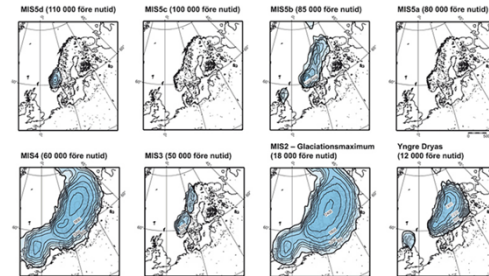
- Tsunami uppstår som följd av
  - Skav, normalförkastningar, vanligen vid plattgränser
  - Undervattensskred av sediment (som kan vara seismiskt inducerat)
  - Kalvande bergssidor i sjö eller hav
  - Vulkanutbrott, meteoritnedslag, etc.
- Normalförkastning längs skalvzon ej påvisad
- Sambandet mellan en eventuell "methane venting tectonics" och eventuell tsunami (eller förkastning) är inte påvisat.
- Diskutabelt om djupet i Östersjön räcker
- Finns inga belägg för att det existerar en zon som kan hysa skalv med vertikalkomponent av de minst ca 2 m som krävs för en tsunami av den storlek som anförts
- Huvudfrågan: SKB kan inte se på vilket sätt en tsunami skulle kunna hota långsiktig säkerhet av återfyllda tunnlar 500 m ned i berget

## ”Missvisande klimatmodeller”

Mörner:

”...SKB:s ”klimatscenario” är mycket svagt underbyggt och grovt missvisande. Under de sista 400.000 åren har vi haft 4 stora istider. Dessa är mycket väl dokumenterade i isbörnkärnan i Vostok i Antarktis...”

”Under kommande 100.000 år måste vi förvänta oss 4 nya stora glaciationer – inte alls bara 1 à 2”



- Vi är mycket väl insatta i hur istider historiskt sett betett sig. Under istider växer inlandsisen till i **faser**, med mindre nedslagningar i början och **större mot slutet**. Olika geografiska platser **påverkas på olika sätt**.
- I SKB:s **referensutveckling** är inlandsisens utveckling **samstämmig** med bilden i tex Vostok-iskärnan. **Vi har fyra kalla perioder** med istillväxt, med små isar i början och sen allt större. **Andra rekonstruktioner** av senaste glaciala cykeln **visar samma utveckling**.
- Inlandsisen når Forsmark under två av de fyra perioderna med nedslagning i vår rekonstruktion.
- Vi har dessutom **kompletterande klimatfall** som täcker in alternativa utvecklingar:
  - inlandsis som **ligger längre** över förvarsplatsen än i referensutvecklingen
  - där inlandsisens **front (med högre grundvattenflöden) ligger längre tid rakt ovanför förvaret**
  - fall med **större maximal istjocklek** än i referensutvecklingen.
- Det är inte möjligt att direkt översätta lufttemperatur eller CO<sub>2</sub> från Antarktis (Vostok) till inlandsis över Forsmark.

## Varför tar inte SKB hänsyn till Mörners forskning?

**Grundpåståendet att SKB ignorerat Dr Mörners forskningsresultat är i grunden felaktigt.**

- Mörner anlitad av SKB angående:
  - Postglaciala förkastningar i Lappland (1977)
  - Förstudier av Äspö inför bygget av Laboratoriet (1989)
  - Bodaprojektet (2003)
- Mörners skalvstatistik beaktades av Adams, i Hora et al, som ingick i SR-Site.
- SKB har i alltför många fall inte kunnat spåra bevisen som framförts i diverse publikationer (tex dateringar).
- SKB har i flera fall inte kunna finna stöd för Mörners påståenden (tex Äspö, Boda) trots omfattande undersökningar.
- I stort sett en total avsaknad av hypotesprövning (alternativa förklaringsmodeller ignoreras).
- Undermålig hantering av osäkerheter (tex magnituder).
- Påståenden utan vare sig referens, belägg eller bevis (tex epicentrum av "Falkbergetförkastningen").
- Mörners slutsatser står i alltför bjärt kontrast till den etablerade forskningen inte bara vad gäller seismologi, utan även klimatforskning och arkeologi.
- Dr Mörner åberopar i stort sett bara sig själv i sitt källmaterial.

**Mörner N-A, 1977.** Rörelser och instabiliteter i den svenska berggrunden (Movements and instability in the Swedish bedrock). KBS TR 18, Svensk Kärnbränslehantering AB, Skbf/Kbs.

**Mörner N-A, 1989.** Postglacial faults and fractures on Äspö. SKB HRL Progress report 25-89-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Mörner N-A, 2003.** Paleoseismicity of Sweden - a novel paradigm. Nils-Axel Mörner Paleogeophysics & Geodynamics. ISBN: 91-631-4072-1.

**Hora S, Jensen M, 2005.** Expert panel elicitation of seismicity following glaciation in Sweden. SSI Rapport 2005:20, SSI - Statens strålskyddsinstitut (Swedish Radiation Protection Authority) Stockholm Sweden Sweden.

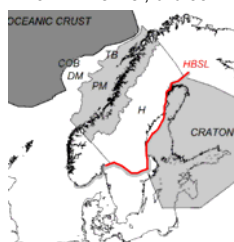
## Bemötande Prof Henkel

- Subduktionszon utanför Norge?
- "Det går inte att dra slutsatser om den geologiska utvecklingen för 100 000 år baserat på observationer i ett tidsfönster på mindre än 100 år"
- "Det går inte att förstå det strukturgeologiska sammanhanget baserat på ett geografiskt fönster på några kvadratkilometer"
- "Postglacial förkastning nära linsen"
- "Seismisk fluidisering av berget"

## Subduktionszon utanför Norge?

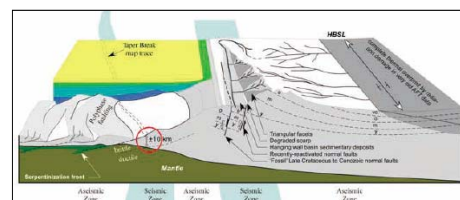
Henkel: "Just nu pågår en platttektonisk aktivitet längs norska kusten. Där håller jordskorpan på att destabiliseras och man gissar att det är en pågående subduktion som börjar där, alltså en ny plattgräns"

Från H. Henkel, bild 35

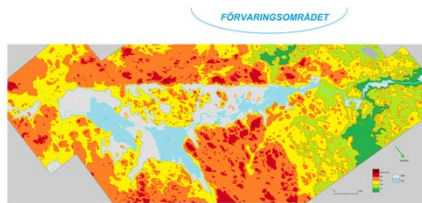


Redfield T, Osmundsen P, 2013. The long-term topographic response of a continent adjacent to a hyperextended margin: A case study from Scandinavia. Geological Society of America Bulletin. Volume 125, issue 1-2, p. 184-200  
 Redfield T F, Osmundsen P T, 2014. Some remarks on the earthquakes of Fennoscandia: A conceptual seismological model drawn from the perspective of hyperextension. Norwegian Journal of Geology/Norsk Geologisk Forening. Volume 94, issue 4

- I artikeln som HH refererar till föreslås en hypotes om att norska kusten skulle kunna utgöra starten på en subduktion när kontinentalplattorna åter konvergerar till en framtida superkontinent.
  - "this weakened zone may potentially localize the onset of subduction when plate convergence begins"
  - "Thus, the onset of the accommodation phase may represent the beginning of the end of a Wilson cycle"
- Författarna beskriver således en process som ligger flera tiotals, kanske hundratals miljoner år fram i tiden.
- Vi noterar att författarna själva placerat Forsmark i den stabila delen (Craton) av sin modell.
- Ingenting i artikeln antyder att det finns någon drivkraft för Singölinjen
- **Det pågår inte någon subduktion utanför Norges kust!**



## Postglacial förkastning nära linsen?

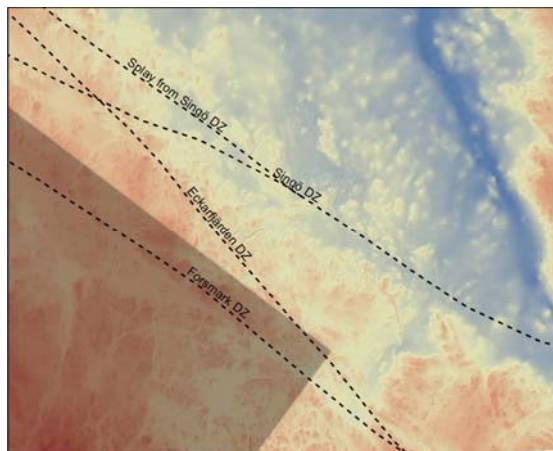
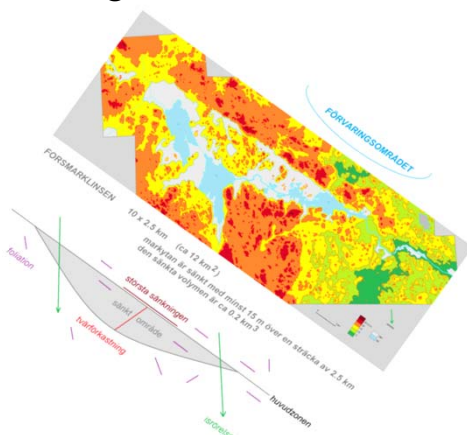


FORSMARKKLINSEN 10 x 2,5 km (ca 12 km<sup>2</sup>)  
markytan är sänkt med minst 15 m över en sträcka av 2,5 km  
den sänkta volymen är ca 0,2 km<sup>3</sup>



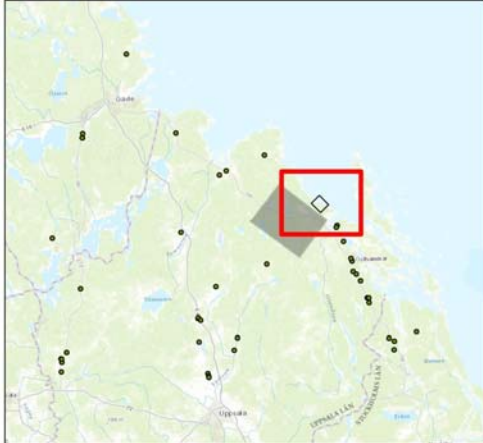
- Henkel: "...När jag ser det här, ser jag ett typiskt exempel på en mycket ung deformationszon. Det här tolkar jag som en postglacial förkastning..."
- Henkel: "...Trots att isrörelseriktningen går tvärsigenom är strukturen väldigt tydlig och det tolkar jag som att den är postglacial..."
- Henkel: "...det som är inuti linsen har brutits sönder av olika förkastningar..."

## Postglacial....forts.





## Postglacial....forts.

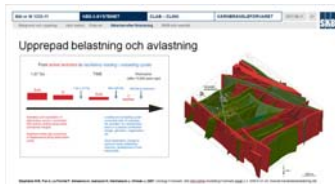


Lagerbäck R, Sundh M, 2003. Searching for evidence of late- and post-glacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002. Forsmark site investigation. SKB P-03-76, Svensk Kärnbränslehantering AB.  
 Lagerbäck R, Sundh M, 2008. Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. Research Paper C 836. SGU - Sveriges Geologiska Undersökning.  
 Lagerbäck R, Sundh M, Johansson H, 2004. Searching for evidence of late- and post-glacial faulting in the Forsmark region. Results from 2003. Forsmark site investigation. SKB P-04-123, Svensk Kärnbränslehantering AB.  
 Lagerbäck R, Sundh M, Svedlund J-O, Johansson H, 2005. Searching for evidence of late- or postglacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002-2004. Forsmark site investigation. SKB R-05-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## Tids- respektive geografiskt fönster

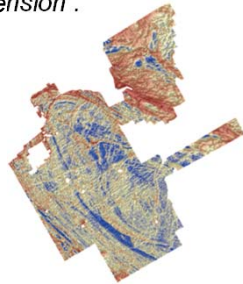
*Henkel: "Det går inte att dra slutsatser om den geologiska utvecklingen för 100 000 år baserat på observationer i ett tidsfönster på mindre än 100 år"*

*Henkel: "Det går inte att förstå det strukturgeologiska sammanhanget baserat på ett geografiskt fönster på några kvadratkilometer"*



## Om linsen

*Henkel: "Man antog felaktigt att en skjuvlins inte berörs av eventuell rörelse i skjuvzonen då dessa rörelser förmodas tas upp av de omgivande zonerna. Deformation av skjuvlinserna i skjuvzoner är emellertid en förutsättning för att de angränsande bergblocken ska kunna röra sig i relation till varandra. Skjuvlinserna deformeras genom kompression eller tension".*



Aktbilaga 385

- SKB håller naturligtvis med Henkel om att skjuvlinser inte är immuna mot deformationer. Men det ligger i deformationens natur att koncentreras i zoner vilka avskärmar blocken de omger.
- Vi har med omfattande platsundersökningar **påvisat** att berget i linsen är relativt opåverkad av de laster som den utsatts för.
- Vi har daterat deformationerna och inte kunna finna belägg för yngre deformation.
- Den deformation som linsen uppvisar är underordnad. Vi anser därför oss ha belägg för att linsen ska vara stabil under förvarets livstid.

- *Henkel: "Seismisk fluidisering av berget, dvs berget övergår till flyttillstånd vilket är vanligt i samband med jordskalv"*



© Ralf Hetzel

<http://www.uni-muenster.de/GeoPalaeontologie/en/strukturgeologie/photogallery/pseudotachylites.html>

- Troligen förligger ett missförstånd. Den "fluidisering" som möjligtvis kan ske är ytterst lokaliserad till förkastningsplanet (friktionssmälta) och stelnar mycket hastigt.
- Någon annan seismiskt inducerad fluidisering av berget, motsvarande "liquefaction" av sediment, har oss veterligen inte rapporterats i den vetenskapliga litteraturen.

## Sammanfattning

- SKB har belägg för att linsen har varit stabil i tiotals miljoner år och anser att den därför förväntas förbli stabil under förvarets livstid.
- SKBs forskning har utsatts för rigorös granskning av forskarsamfundet, olika myndigheter och dessas remissinstanser. SKB har i den iterativa utvecklingsprocessen tagit del av, och beaktat, samtliga dessa granskningar. Resultatet av detta finns redovisat i de Forsknings- och Utvecklingsprogram (FUD) som ges ut vart tredje år.
- SKB följer kontinuerligt, och deltar inom vissa områden aktivt i, relevant forskning för att säkerställa att långsiktig säkerhet inte hotas av nya rön. I detta arbete följer SKB strikt etablerad vetenskaplig metodik och forskningsetik.
- SKBs arbete har präglats av total öppenhet. Samtliga arbeten har tillgängliggjorts för allmänheten.
- **SKBs analyser visar att förvaret, med en klok utformning, med mycket god marginal kan motstå påfrestningar i form av även mycket stora skalv i närområdet.**