# Jordbävningar i Sverige och seismisk fara: var står vi idag?

Björn Lund

Svenska nationella seismiska nätet

Uppsala universitet

UPPSALA UNIVERSITET

# Jordbävningar i Sverige och seismisk fara: var står vi idag?

## Nomenklatur

seismisk fara = seismic hazard

karta över seismisk fara = seismic hazard map

utvärdering av seismisk fara = seismic hazard assessment

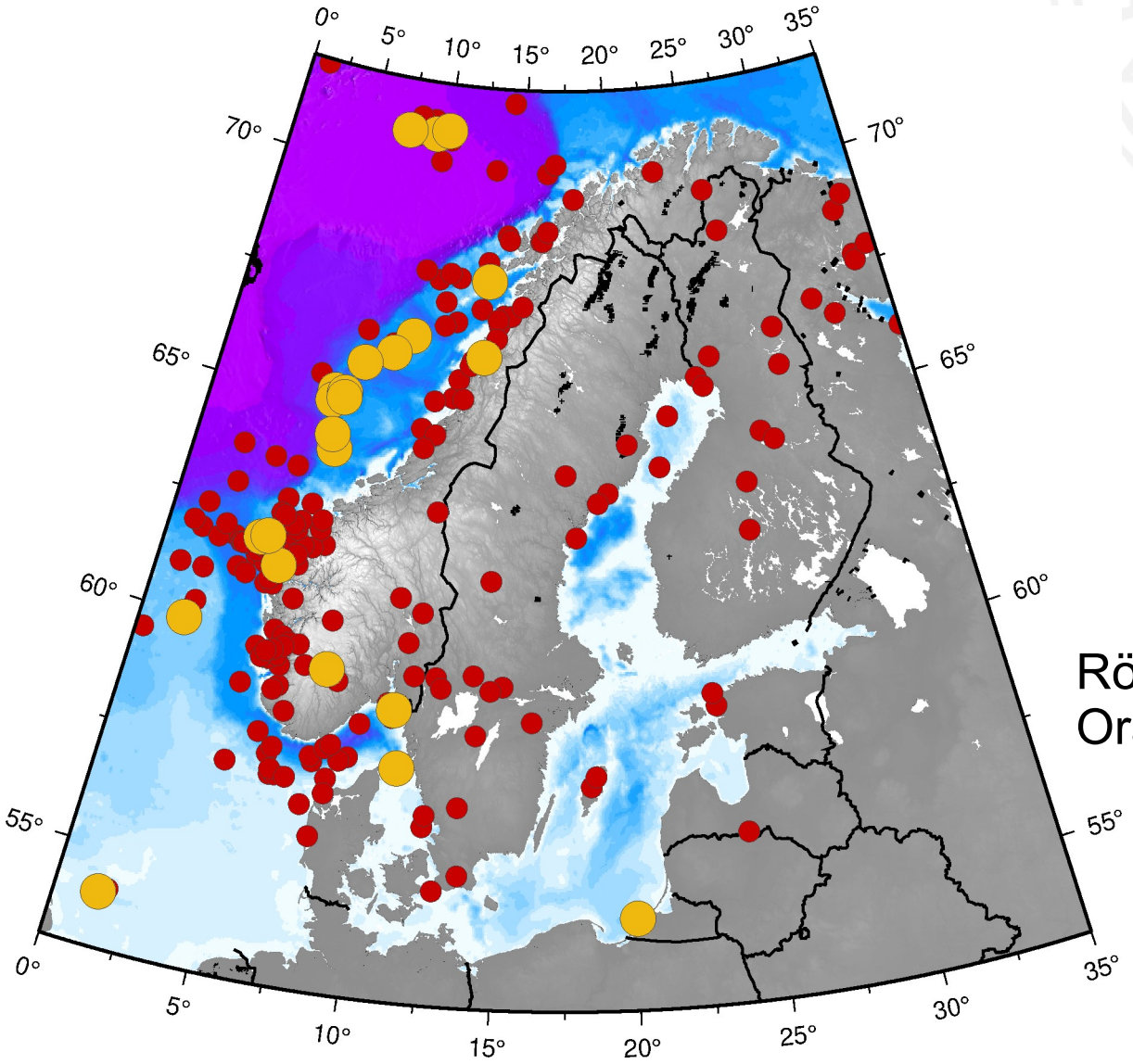
UPPSALA UNIVERSITET

# Stora jordbävningar i Fennoskandien

Stora jordbävningar i Sveriges närhet genom historien:

| | |
|---|---|
| Kattegatt (?) | 1759 M 5.6 |
| Mo i Rana | 1819 M 5.9 |
| Södra Norge | 1834 M 5.0 |
| Lofoten | 1894 M 5.4 |
| Kosteröarna | 1904 M 5.4 |
| Kaliningrad | 2004 M 5.0 |

Vi känner inte till något skalv med M>5 på land i Sverige de senaste 500 åren.




Röd: 4 < M < 5
Orange: M > 5

UPPSALA UNIVERSITET

# Lurøy, Norge 1819. Magnitud 5,9

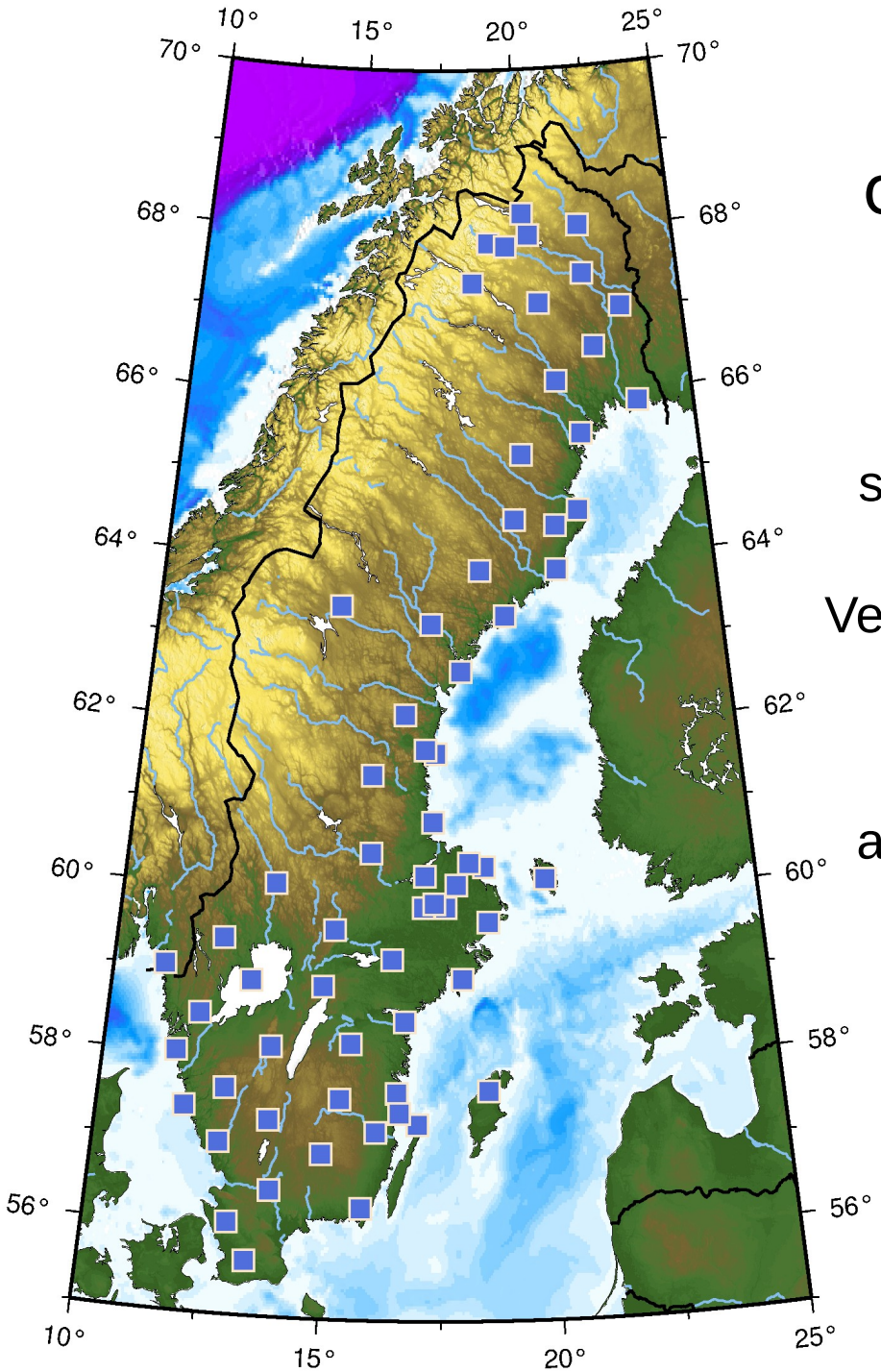
Den största jordbävningen på land i historisk tid i Sverige, Norge, Finland, Danmark och Tyskland.

Skalvet kändes i hela Norge, ner till Stockholm i Sverige, till Åbo i Finland och även i Ryssland.

Intensitet II – VIII.
Vid intensitet VIII kollapsar byggnader

Mäntyniemi et al. (2020)

UPPSALA UNIVERSITET



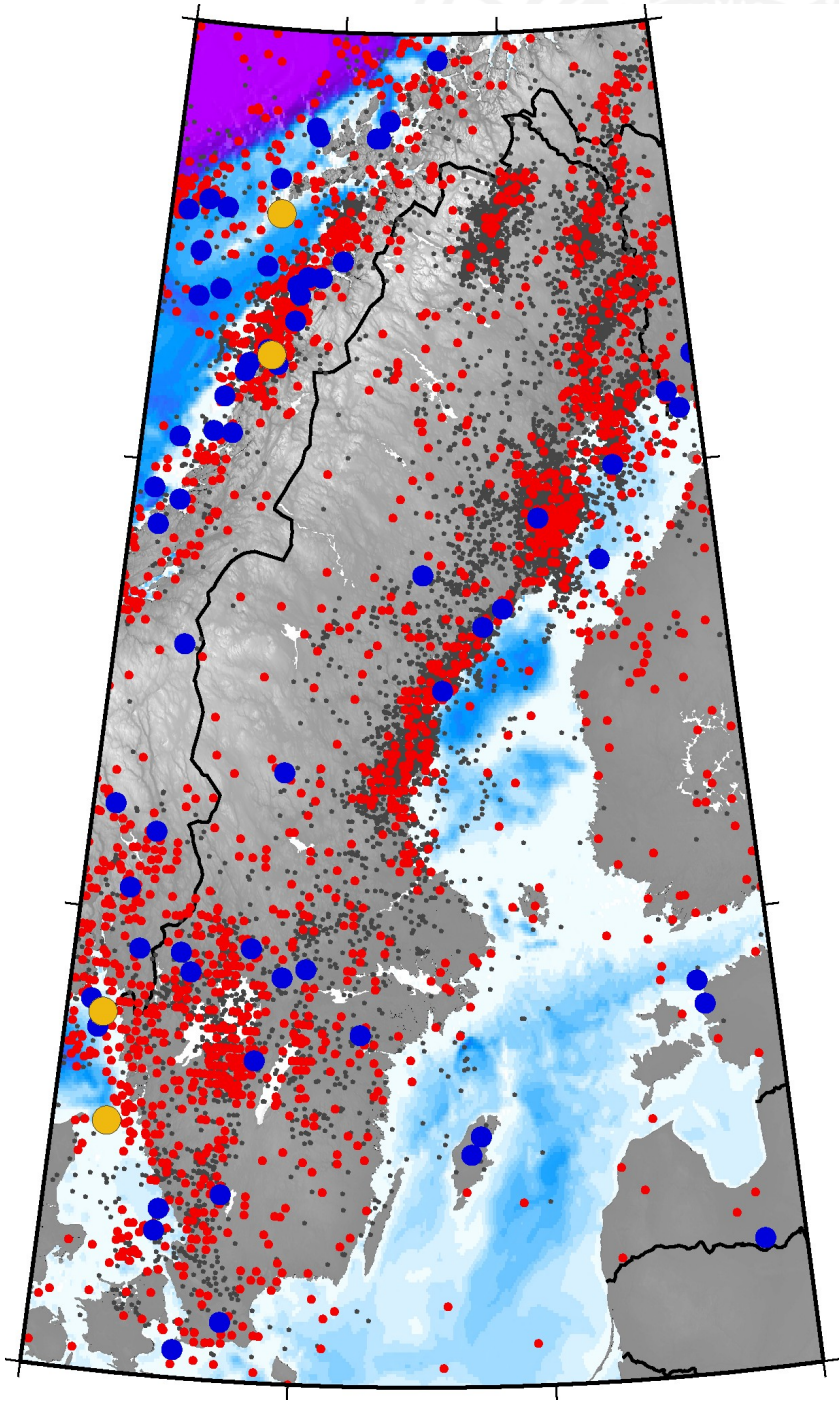

# Ökad känslighet de senaste 20 åren

Det svenska nationella seismiska nätet (SNSN) har idag 68 mätstationer från Veberöd i söder till Torneträsk i norr.

Drygt 11 000 skalv analyserade sedan år 2000.

(www.snsn.se)

Magnituder
M < 2: Grå
2 < M < 4: Röda
4 < M < 5: Blå
M > 5: Gula



# Utvärdering av seismisk fara i Sverige

- Låg seismisk aktivitet och få stora jordbävningar har gjort att Sverige inte har byggnormer för jordbävningssäkerhet. Eurocode 8 är inte implementerad i Sverige.

- Det finns ingen nationell karta över seismisk fara.

- Kärnkraftsverken som byggdes under 1970-talet byggdes utan hänsyn till risken för jordbävningar.

UPPSALA UNIVERSITET

# Utvärdering av seismisk fara i Sverige

- Den första faroutvärderingen(?) gjorde av Markus Båth 1979: “Seismic risk in Fennoscandia”

Sannolikheten för att få ett visst antal skalv per år i ett område med yta 2° x 2°.

TABLE II

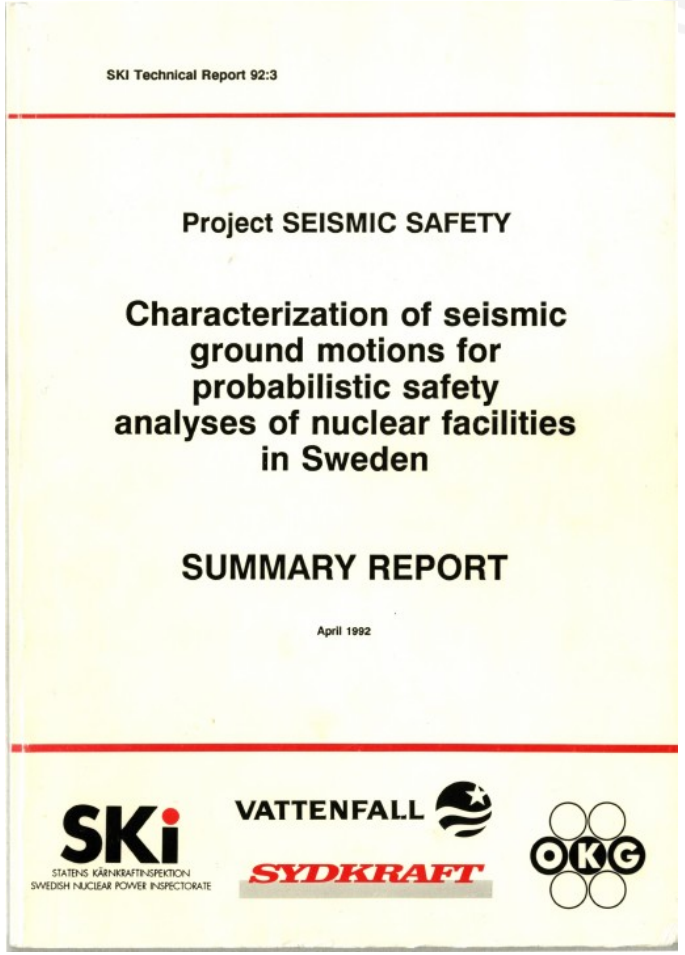
Seismic risk $R$ with error d$R$

| Region | $R \pm dR$ (%), $\tau = 1$ y | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $M_L \geqslant 2.0$ | $M_L \geqslant 2.5$ | $M_L \geqslant 3.0$ | $M_L \geqslant 3.5$ | $M_L \geqslant 4.0$ | $M_L \geqslant 4.5$ | $M_L \geqslant 5.0$ |
| 12 | 42 ± 8 | 9 ± 2 | 2 ± 0 | 0 ± 0 | | | |
| 13 | 91 ± 3 | 45 ± 4 | 14 ± 2 | 4 ± 0 | 1 ± 0 | 0 ± 0 | |
| 14 | 6 ± 0 | 4 ± 0 | 3 ± 0 | 2 ± 0 | 1 ± 0 | 1 ± 0 | 1 ± 0 |
| 15 | 10 ± 1 | 6 ± 1 | 4 ± 0 | 2 ± 0 | 1 ± 0 | 1 ± 0 | 0 ± 0 |
| 20 | 63 ± 8 | 34 ± 6 | 16 ± 3 | 7 ± 1 | 3 ± 1 | 1 ± 0 | 1 ± 0 |
| 21 | 99 ± 0 | 75 ± 2 | 36 ± 1 | 13 ± 1 | 4 ± 0 | 1 ± 0 | 0 ± 0 |
| 23 | 40 ± 2 | 17 ± 1 | 7 ± 0 | 2 ± 0 | 1 ± 0 | 0 ± 0 | |

# Utvärdering av seismisk fara i Sverige

- Den första platsspecifika seismiska faroutvärderingen: kärnkraftsindustrin på sent 1980-tal

- Rapporterades i SKI 92:3
- Baserad på den gemensamma nordiska skalvkatalogen Fencat (1987) och skalerade “Standard Response Spectra” från Japan.
- SKI 92:3 är fortfarande standarden för de svenska kärnkraftsverken. 30 år senare.
- Lund et al. (2017) rekommenderade en uppdatering av SKI 92:3


SKI Technical Report 92:3

Project SEISMIC SAFETY

Characterization of seismic ground motions for probabilistic safety analyses of nuclear facilities in Sweden

SUMMARY REPORT

April 1992

SKi STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION SWEDISH NUCLEAR POWER INSPECTORATE

VATTENFALL

SYDKRAFT

OKG

UPPSALA UNIVERSITET

# Utvärdering av seismisk fara i Sverige

- Arbeten med seismisk fara som inkluderar Sverige sedan år 2000 (som jag känner till)

| | |
|---|---|
| Wahlström & Grünthal (2001) | Fennoskandien (PSHA) |
| Bodare & Kulhanek (2006) | Dammsäkerhet (DSHA) |
| SHARE/ESHM13 (2013) | Europa (PSHA) |
| Fennovoima (2015) | Finland (PSHA) |
| Lund et al. (2017) | Utvärdering av SKI 92:3 |
| TVO/Fortum (2017) | Finland (PSHA) |
| Larsson & Larsson ESHM13 (2018) | Sverige (PSHA) |
| ESHM20 | Europa (PSHA) |
| Seismic hazard map Finland (2020) | Finland (PSHA) |
| Gruvdammar (2018,2021,2022) | Återkomsttider, litteraturstudier |
| Doktorandprojekt Uppsala, Joshi (2022) | Sverige (PSHA) |

UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020

- ESHM20 släpptes till allmänheten nu den 28 april 2022.
- Det är en homogeniserad modell över landsgränserna i Europa.
- Den ligger till grund för en revision av Eurocode 8.
- Den ligger också till grund för European Seismic Risk Model 2020.
- Data och modeller finns tillgängliga på www.efeher.org

- ESHM20 är INTE ett substitut för en “site-specific PSHA”.

Från Laurentiu Danciu, en av huvudförfattarna till ESHM20:

*“It is worth mentioning here that the ESHM20 is a regional model, and it has its limitations when compared with site specific studies. The results are not robust for periods longer than 5000 years; for such long return periods other assumptions (i.e. sigma of the gmpes, reference site conditions,  maximum magnitudes, etc) must be done in the model construction”.*

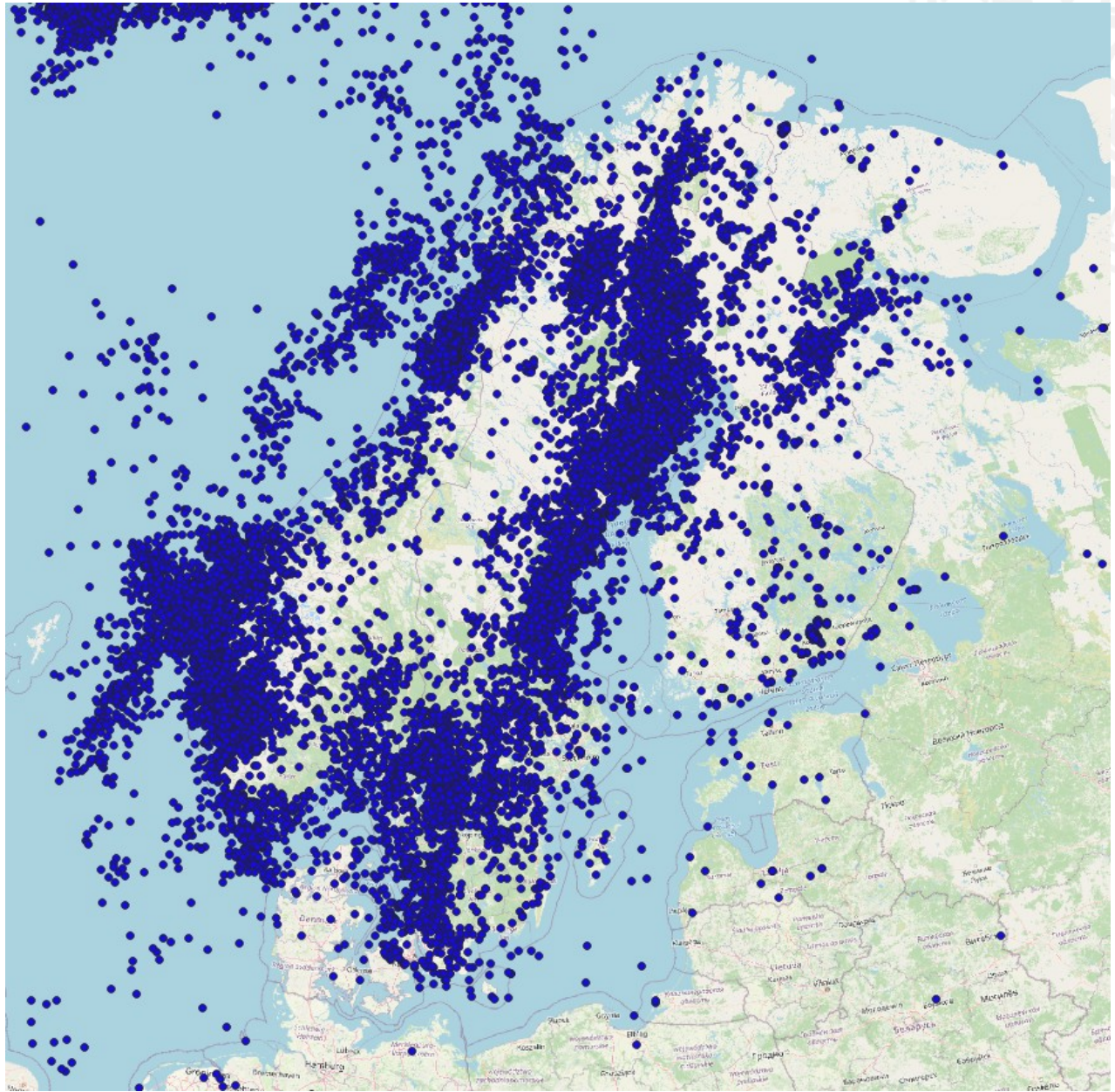
UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020

Ur svensk/finsk synvinkel finns problem med ESHM20:

23 500 skalv i Fencat + SNSN,
Alla magnituder

Lat: 54° – 72°
Lon: 0° - 35°



UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020

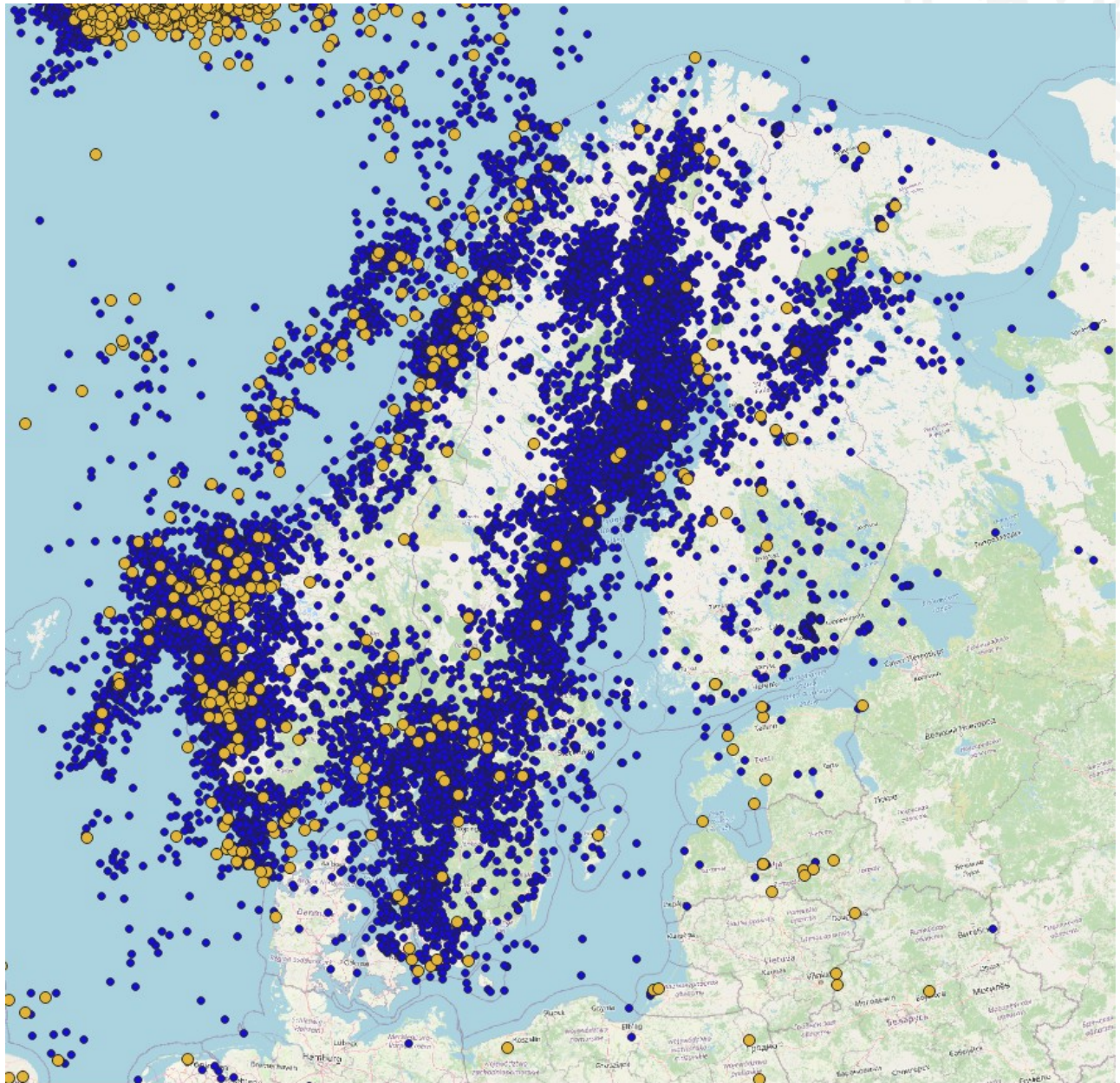
Ur svensk/finsk synvinkel finns problem med ESHM20:

23 500 skalv i Fencat + SNSN,
Alla magnituder

395 skalv i ESHM20
M ≥ 3.5

Lat: 54° – 72°
Lon: 0° - 35°

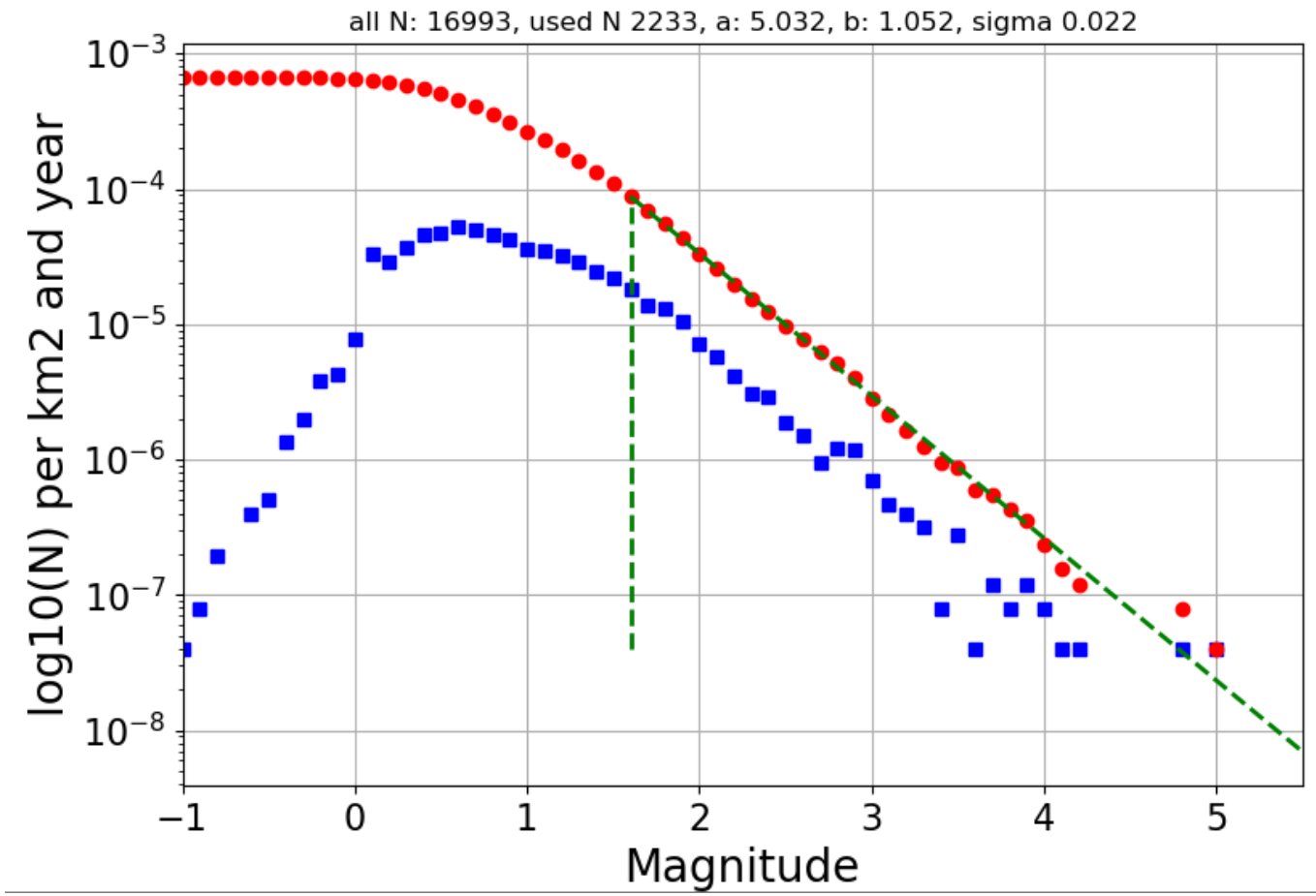
Något färre i ESHM13.



UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020

- Frekvens-magnitudfördelningen (FMD, eller Gutenberg-Richterfördelningen) är en grundbult i PSHA.
- log10(N>=Mc) = a - bM
- Lutningen på den räta delen kallas b-värdet och beskriver förhållandet mellan stora och små skalv. b-värdet är runt 1 generellt, varierar mellan 0.7 – 1.4 (oftast).
- Aktivitetsnivån, a-värdet, är skärningen av den räta linjen med y-axeln.
- För ett någorlunda välbestämt b-värde krävs dels fler än ~500 skalv och att dessa fördelas över 2 – 3 magnitudenheter (e.g. Geffers et a., 2022).



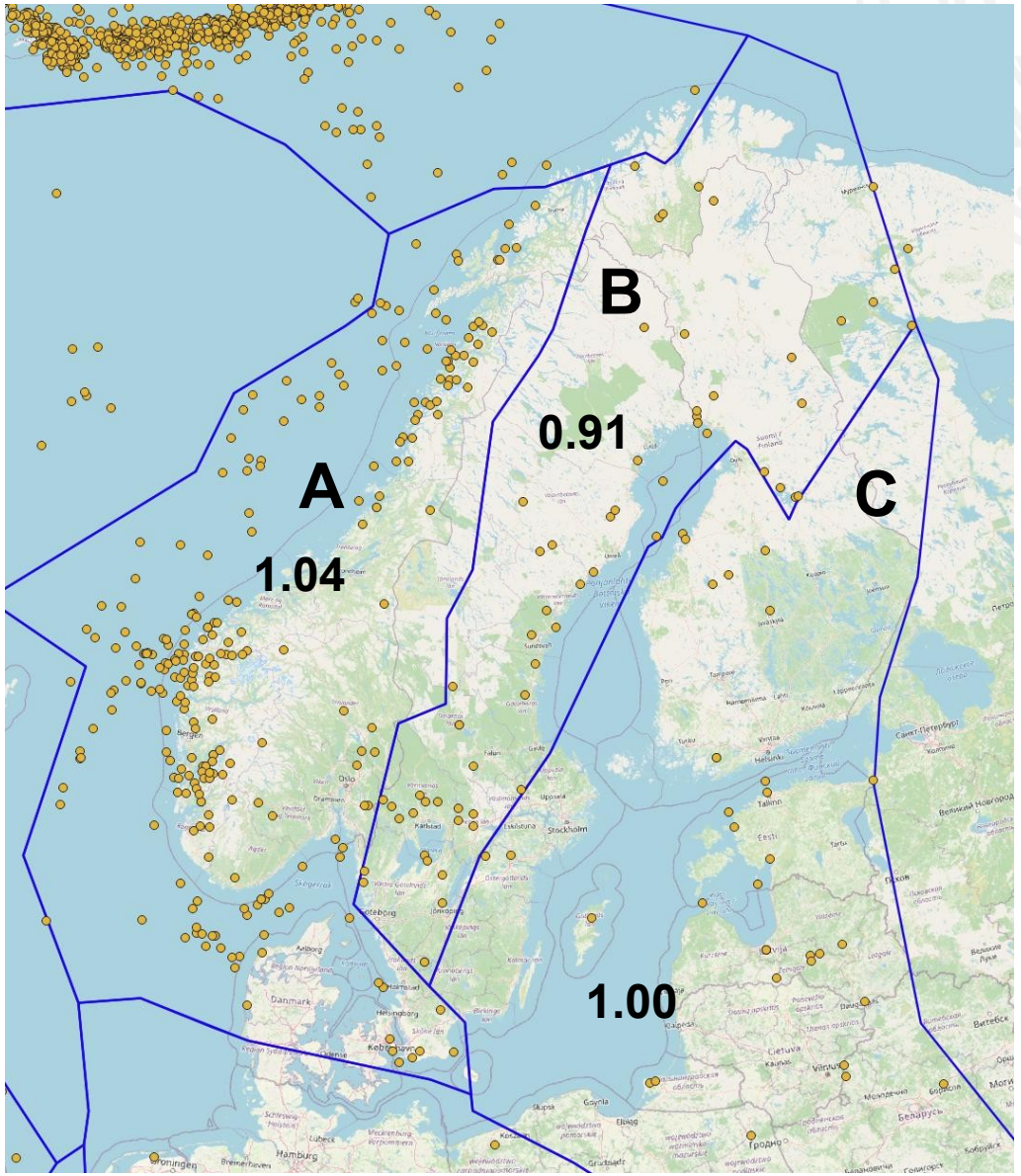

UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020

Ur svensk/finsk synvinkel finns problem med ESHM20:

Tektoniska zoner:

- Stora zoner för att kunna få övergripande a- och b-värden.
- Trots det, bara knappt 380 skalv i de tre zonerna.
- Zon A  a: 4.09  b: 1.04
- Zon B  a: 2.80  b: 0.91
- Zon C  a: 3.20  b: 1.00



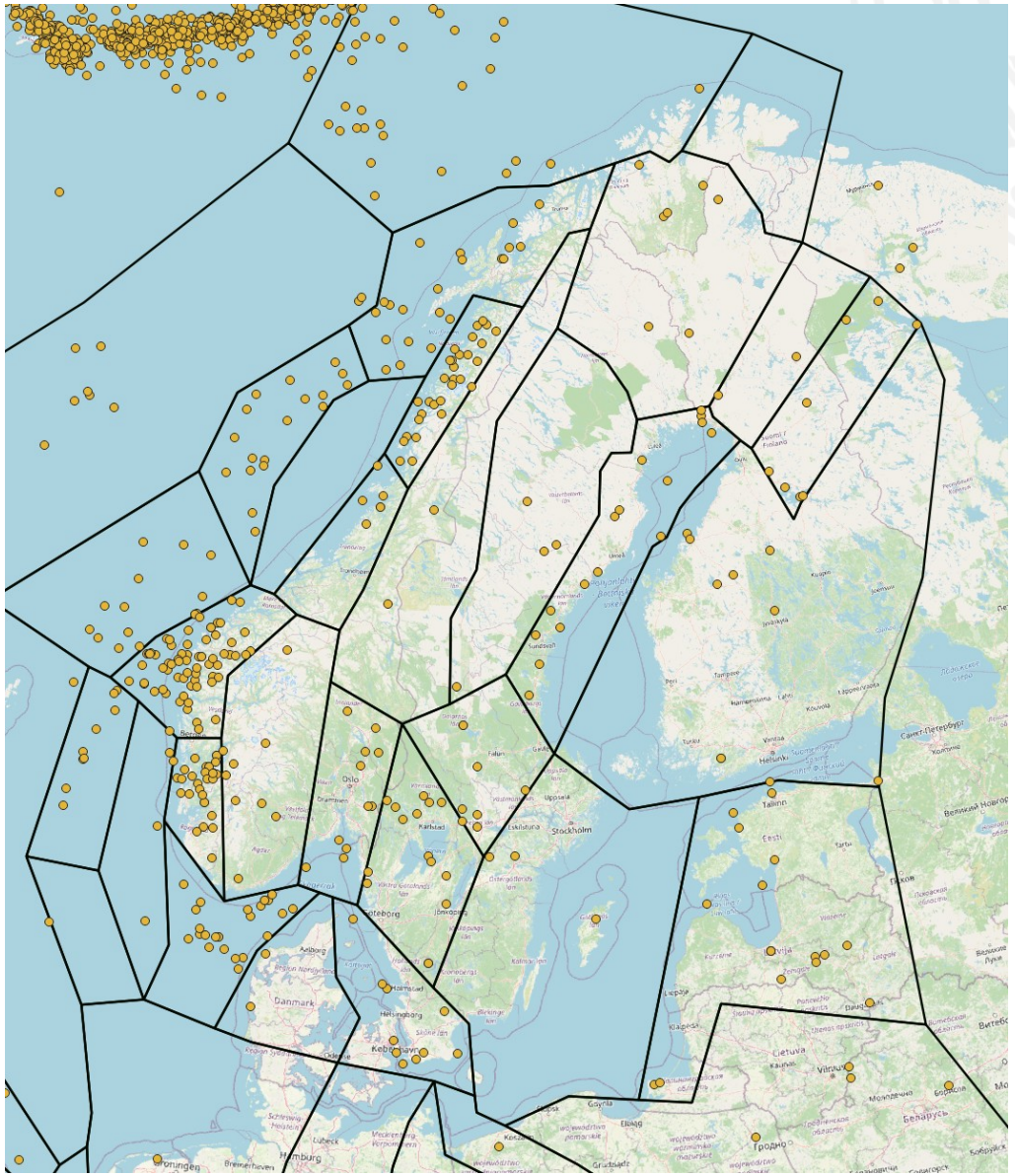

UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020

Ur svensk/finsk synvinkel finns problem med ESHM20:

Areazoner:

- Mindre zoner efter skalvaktivitet och geologi.
- I dessa finns inte tillräckligt med data för lokala FMD utan b-värdet behålls från den tektoniska zonen och a-värdet skalas med antalet skalv i den mindre zonen.
- Endast tre av areazonerna har lokala b-värden.

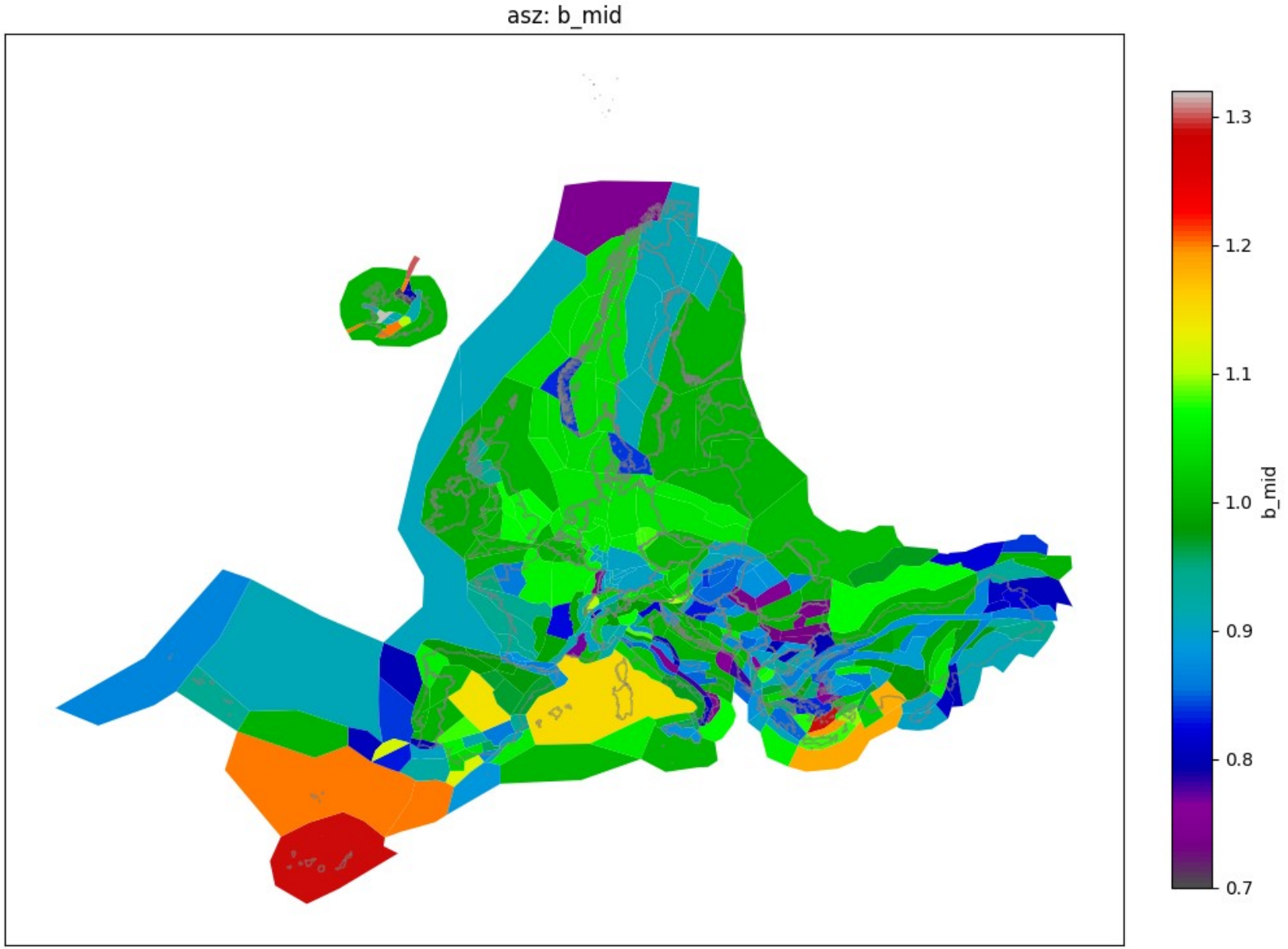



UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020

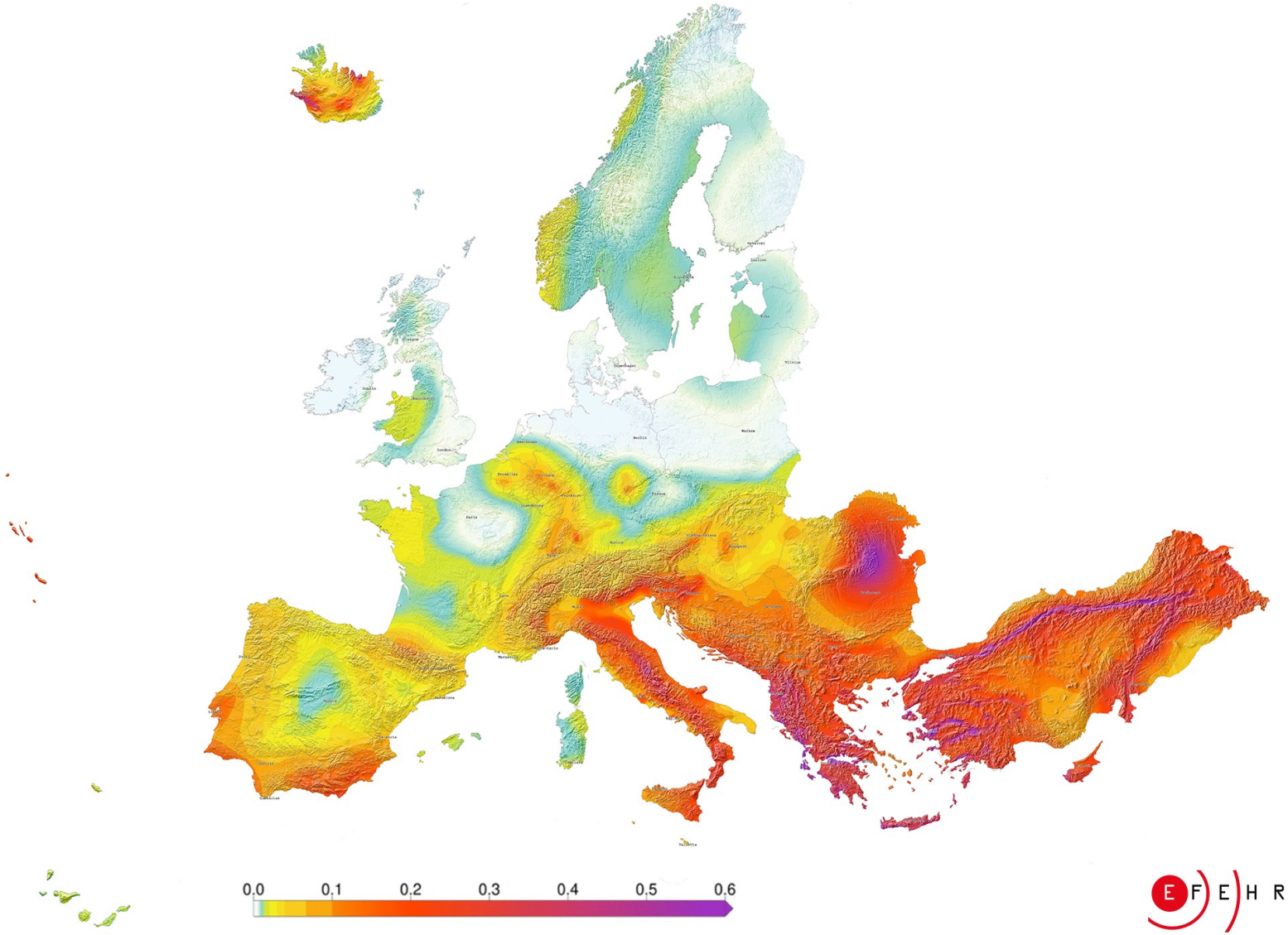
Ur svensk/finsk synvinkel finns problem med ESHM20:

Något är skumt i Skåne-Hallandzonen, som fått eget b-värde.



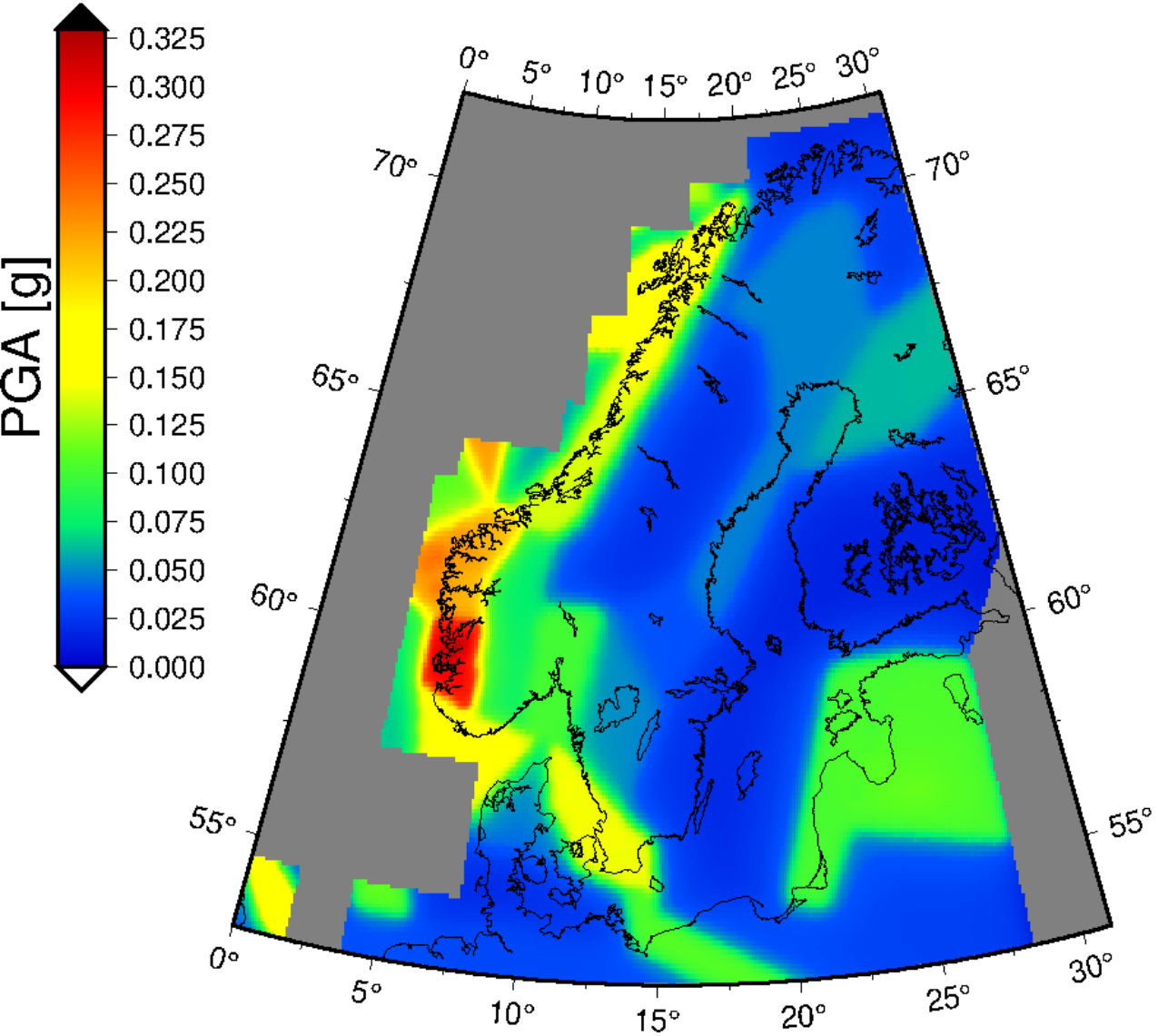
# European Seismic Hazard Model 2020

Peak ground acceleration (PGA), 10% exceedence på 50 år (återkomsttid på 475 år).

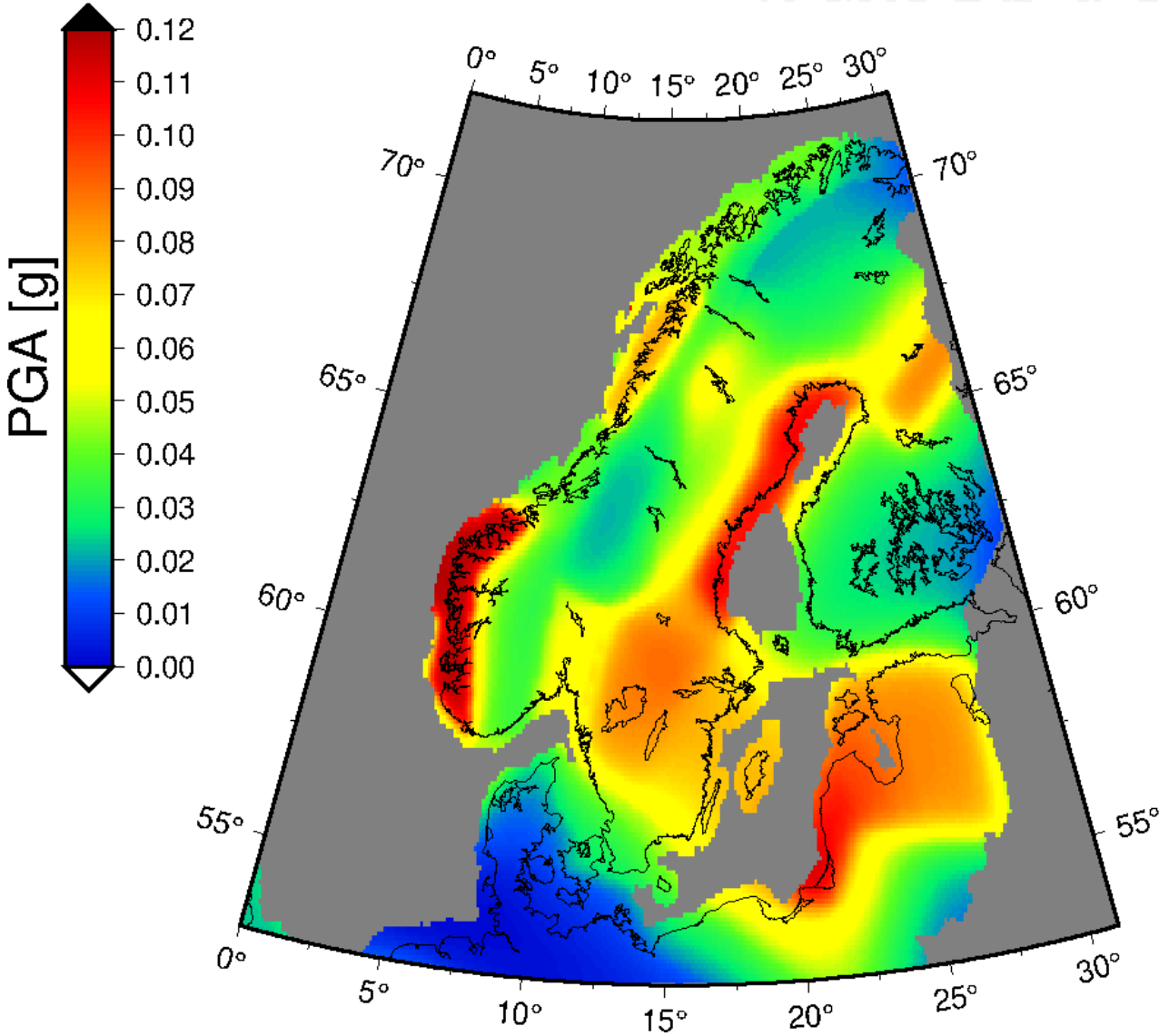


# European Seismic Hazard Model 2020/2013

ESHM13: T = 4975 år




ESHM20: T = 5000 år



# European Seismic Hazard Model 2020/2013

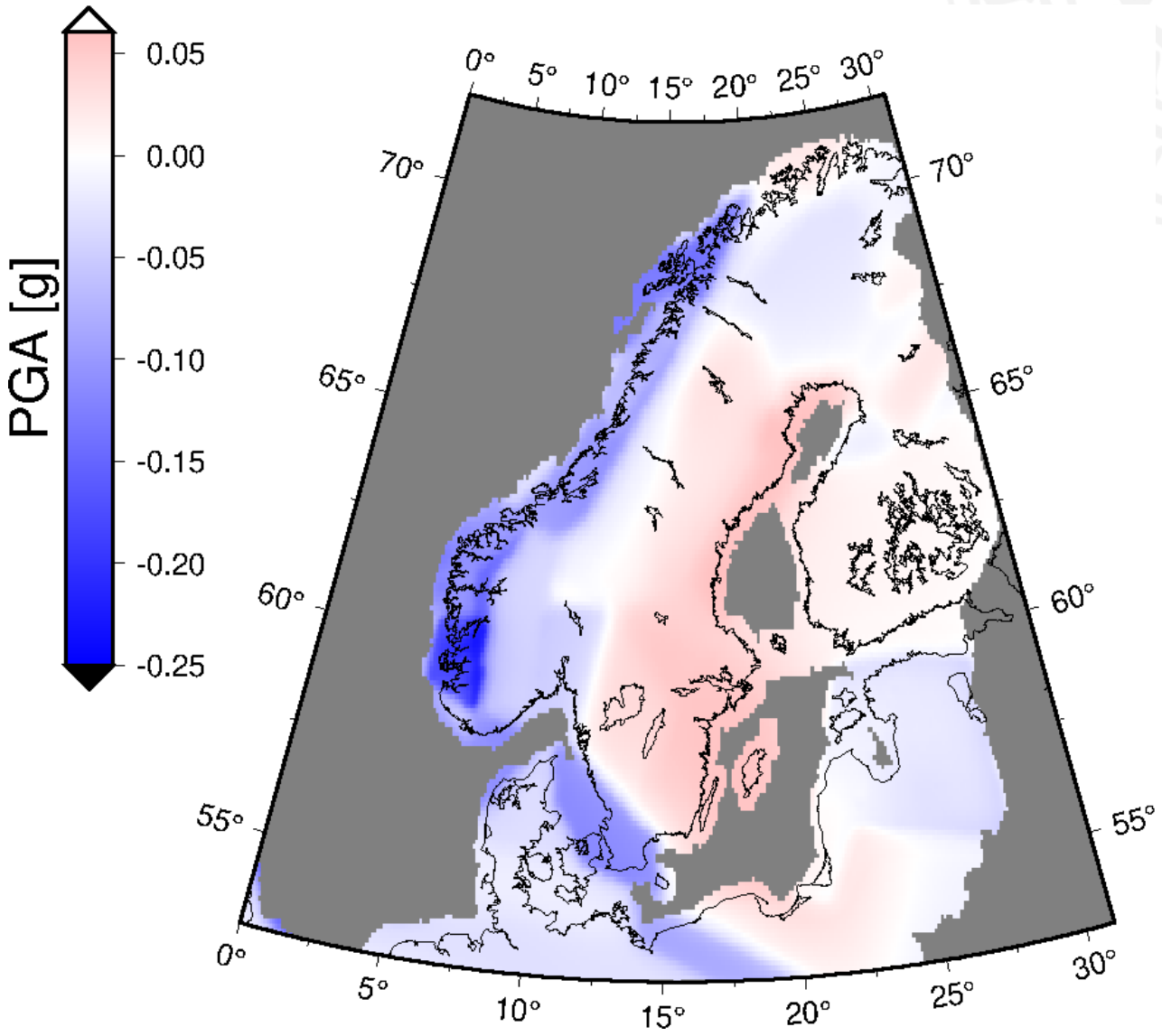
Skillnad ESHM20 – ESHM13

För T = ~5000 år.

- Faran har gått ner på västkusten, i nordligaste Norrland och i Norge och Danmark.
- Faran har gått upp i stora delar av Sverige och Finland.

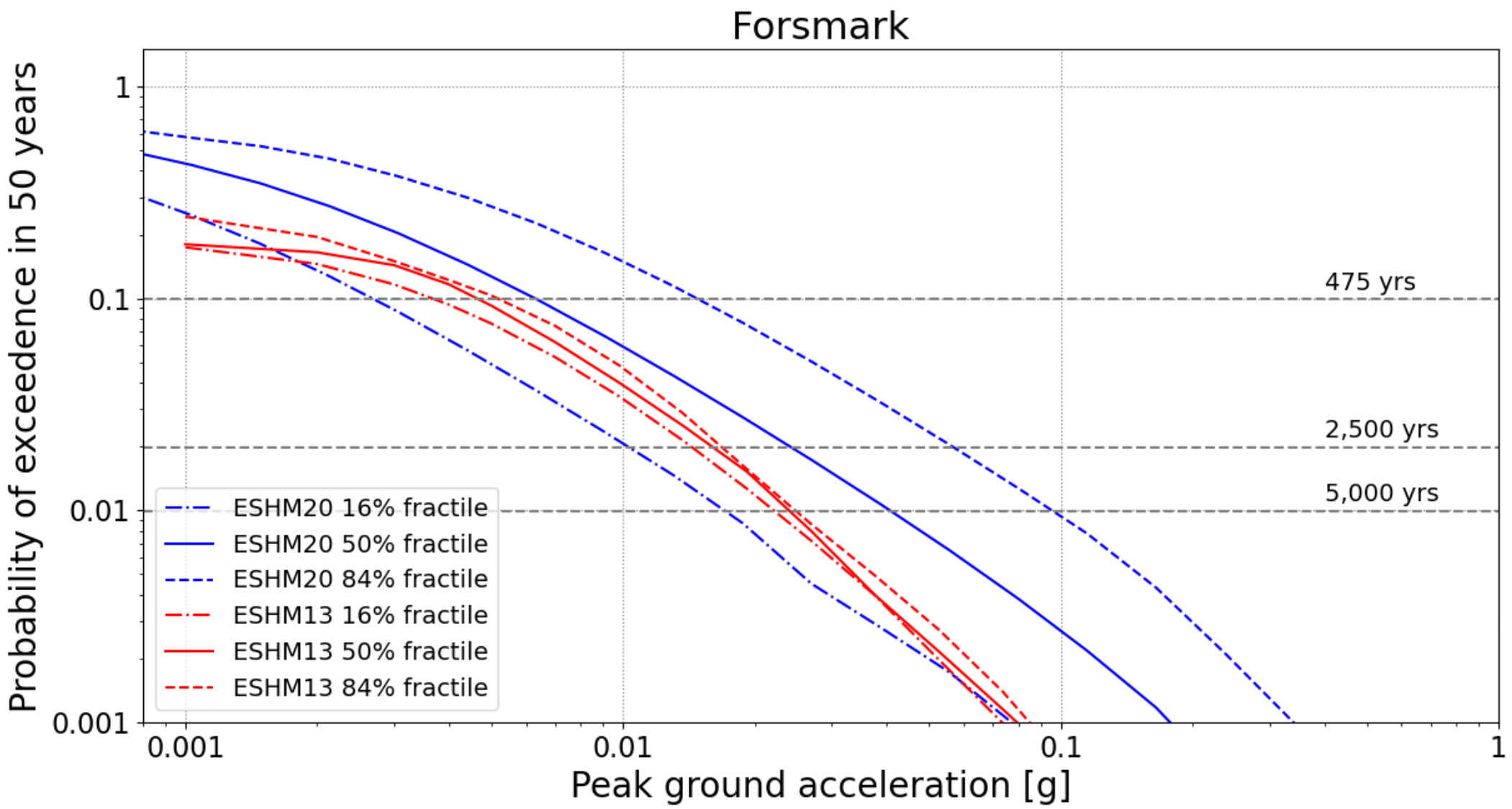
Är skillnaden signifikant?

Sannolikt inte, men för att svara på det krävs en fullständig analys.




UPPSALA UNIVERSITET

# European Seismic Hazard Model 2020/2013




UPPSALA UNIVERSITET

# Potentiella problem med utvärderingen av seismisk fara i Sverige och Finland

- Korrekt identifiera små skalv.
- Korrekt magnitudbestämma små skalv och få en homogen magnitudbestämning över tid.
- Sker de stora skalven där de små sker?
- Hur dämpas markrörelserna med avståndet för stora skalv i Fennoskandien?
- Hur stora kan skalven bli?
- De postglaciala skalven.

# Är det en jordbävning?

Historiskt data

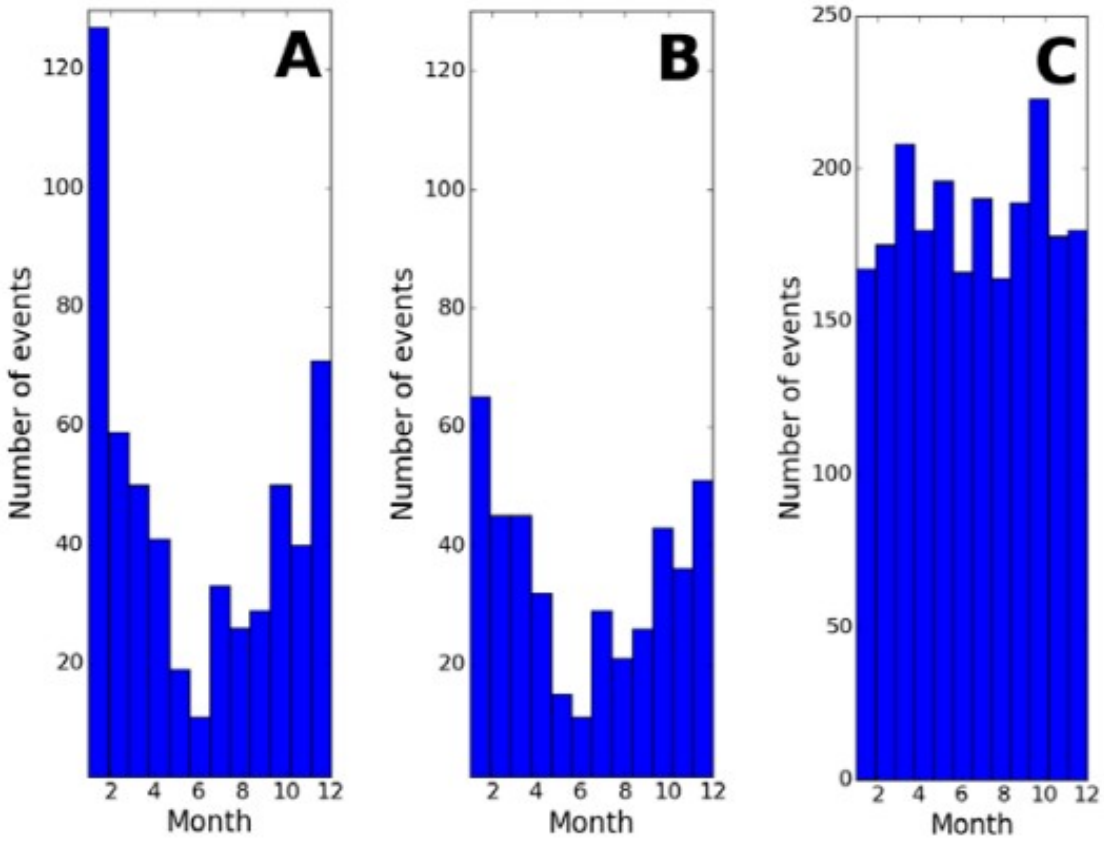



**Figure 3.** Seasonality in the earthquake data in Fencat. Number of events versus month. A) All events in Fencat 1375 - 1920. B) Events considered to be frost, weather and blast related removed from 1375-1920. C) Instrumental earthquake recordings 1965-2012 (note the different scale).

Lund et al. (2017)

Idag lägger vi mycket tid, och AI, på att rätt klassificera skalv och sprängningar.

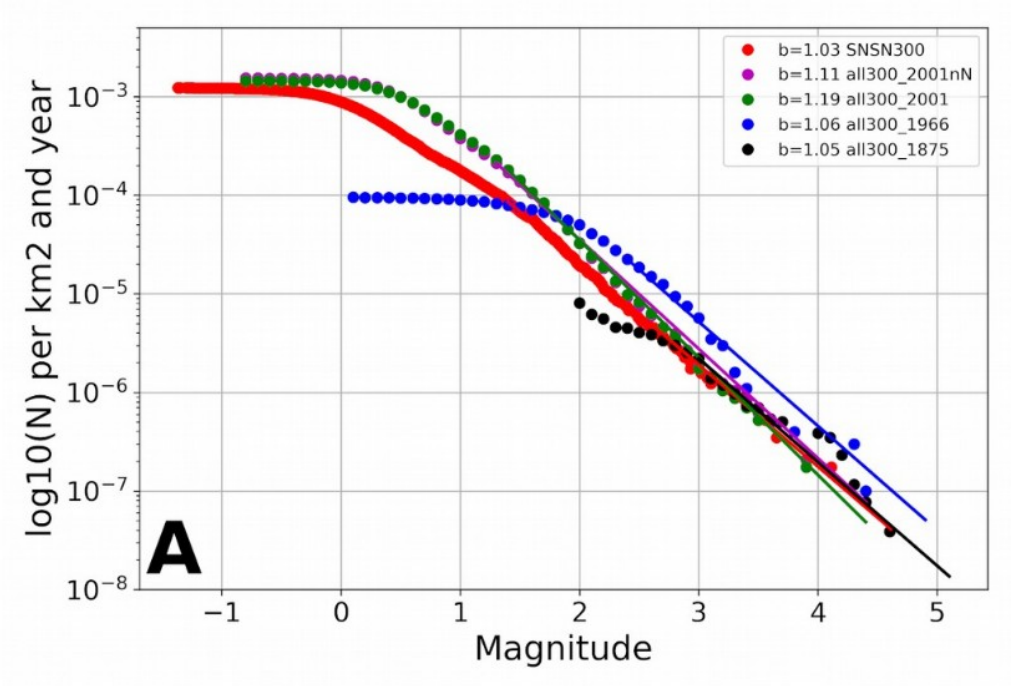
UPPSALA UNIVERSITET

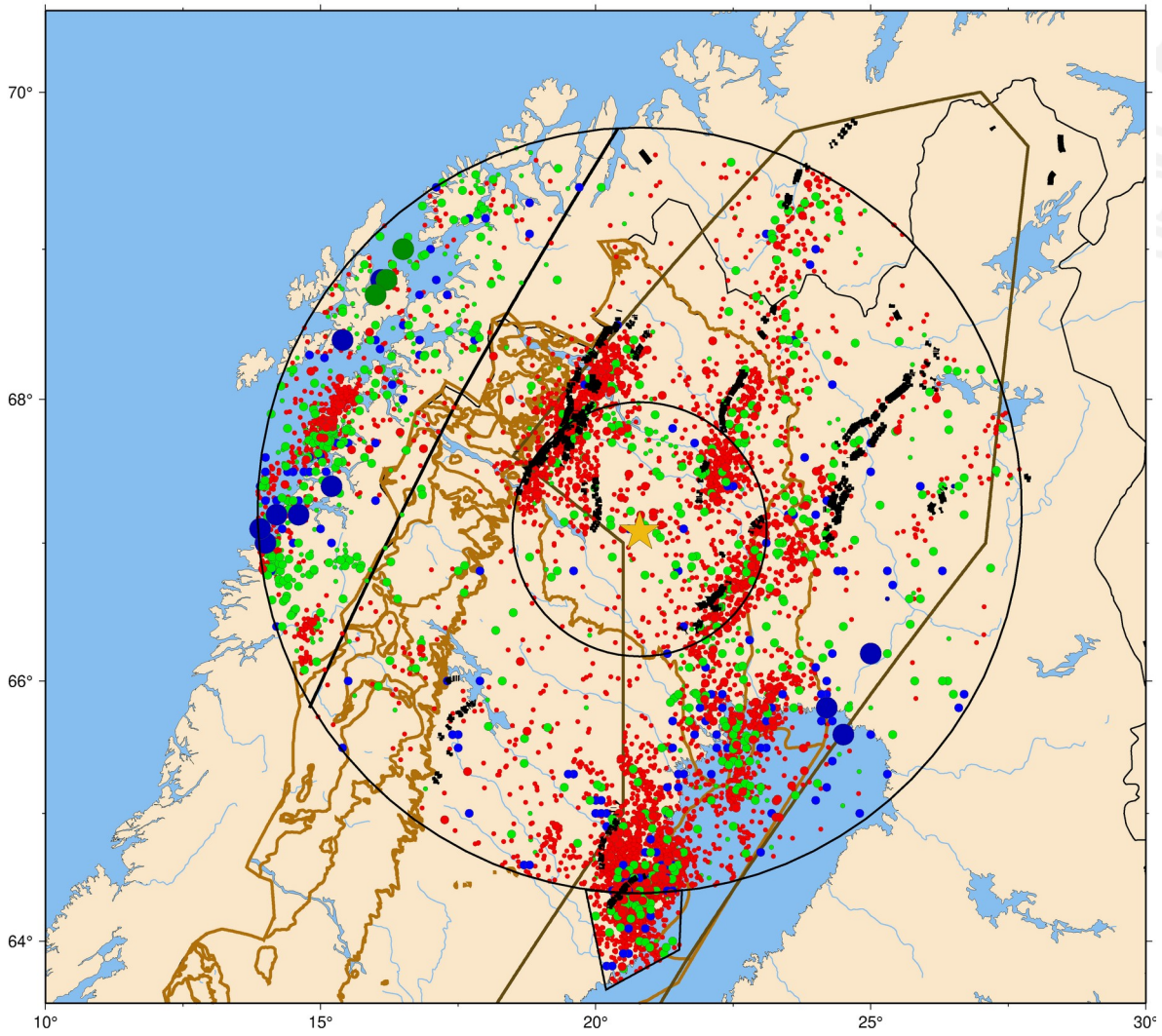
# Magnituder

Ett dataset för seismisk analys runt Aitik innehåller 9 506 skalv

8 550 under magnitud 2

5 992 under magnitud 1




Vi vet att magnitudskalan kan ha skalningsproblem mot mindre skalv.

UPPSALA UNIVERSITET

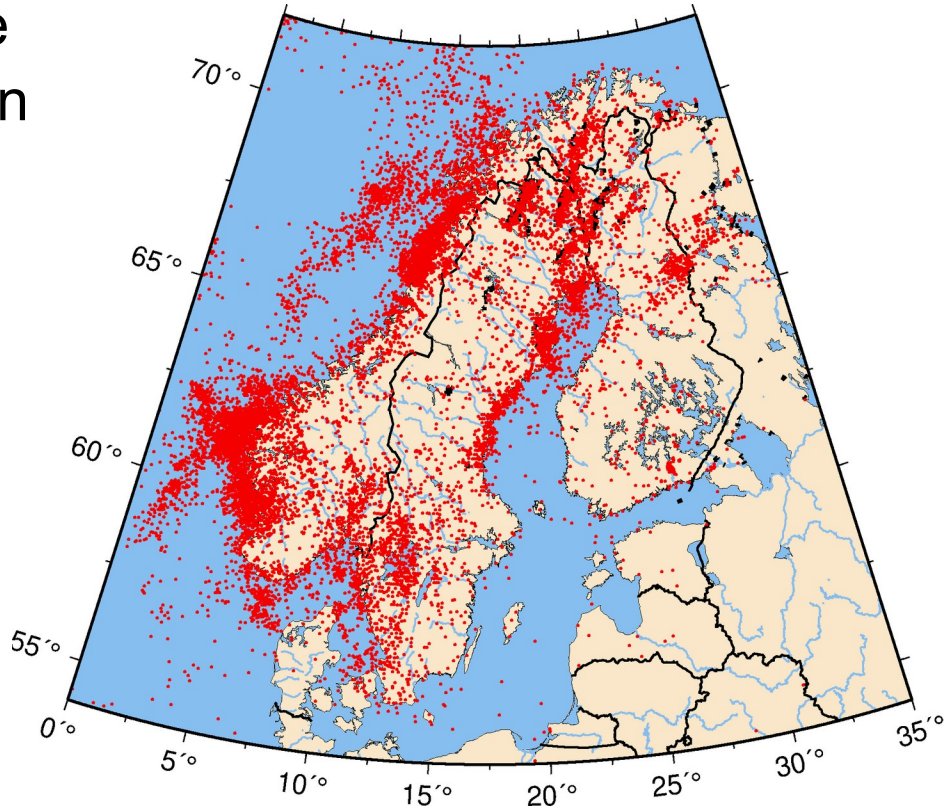
# Lokaliseringen av stora jordbävningar

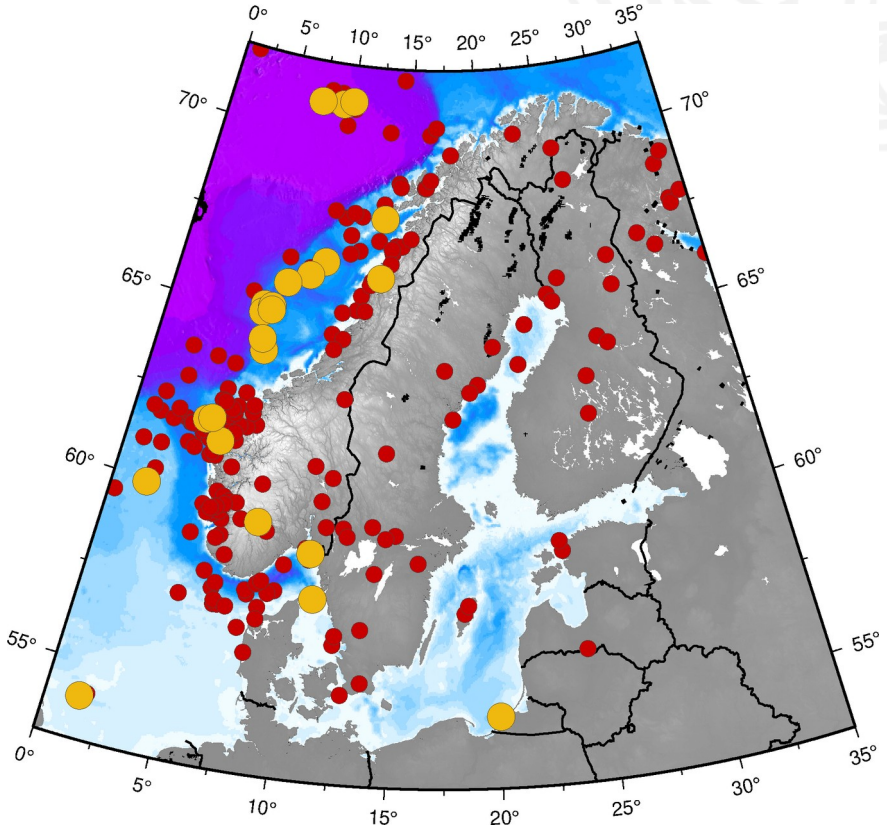
Röd: 4 < M < 5
Orange: M > 5

I intraplate-områden som Sverige sker inte alltid de större skalven på samma plats som de observerade småskalven.

Till exempel som i Kaliningrad (2004), Sjöbo (2008) och Lillhärdal (2014).

Hur tar vi höjd för det?




UPPSALA UNIVERSITET

# Dämpning: Ground Motion Prediction Equations

Vi har inga digitala data för skalv med magnitud större än ~4.5 i Sverige eller Finland, och särskilt inga data nära större skalv.

Så vi vet inte i detalj hur markrörelserna avtar med avstånd i den Fennoskandiska skorpan.

Vi tar det data vi har och lägger till modelldata och data från andra geologiskt likartade områden.

## Application of a Hybrid Modeling Method for Generating Synthetic Ground Motions in Fennoscandia, Northern Europe

Vilho Jussila[1], Billy Fälth[2], Päivi Mäntyniemi[3], Peter H. Voss[4], Björn Lund[5], and Ludovic Fülöp[*1]

**ABSTRACT**

We present a modeling technique for generating synthetic ground motions, aimed at earthquakes of design significance for critical structures and ground motions at distances corresponding to the engineering near field, in which real data are often missing. We use dynamic modeling based on the finite-difference approach to simulate the rupture process within a fault, followed by kinematic modeling to generate the ground motions. The earthquake source ruptures were modeled using the 3D distinct element code (Itasca, 2013). We then used the complete synthetic program by Spudich and Xu (2002) to simulate the propagation of seismic waves and to obtain synthetic ground motions. In this work, we demonstrate the method covering the frequency ranges of engineering interests up to 25 Hz and quantify the differences in ground motion generated. We compare the synthetic ground motions for distances up to 30 km with a ground-motion prediction equation, which synthesizes the expected ground motion and its randomness based on observations. The synthetic ground motions can be used to supplement observations in the near field for seismic hazard analysis. We demonstrate the hybrid approach to one critical site in the Fennoscandian Shield, northern Europe.

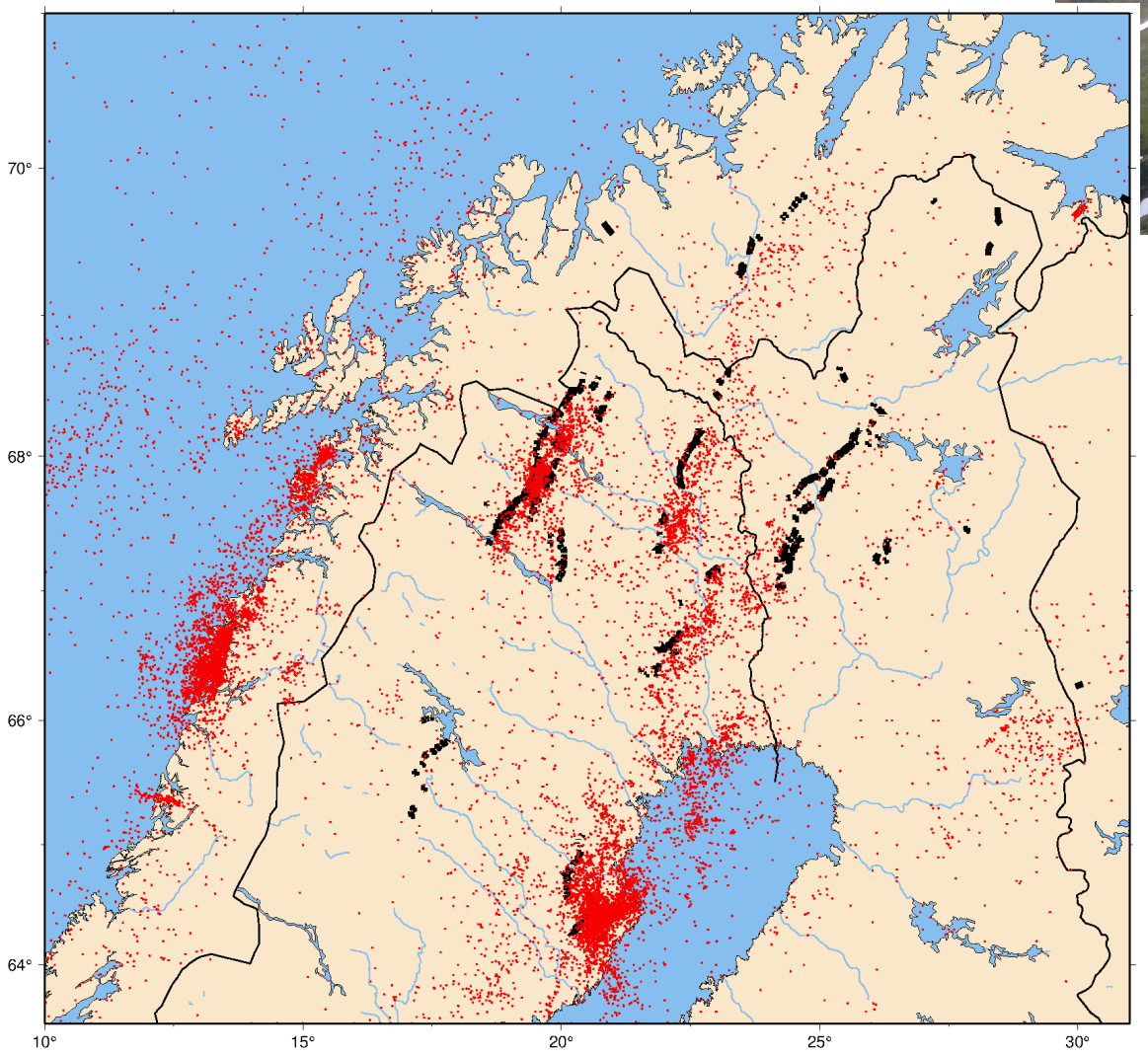
UPPSALA UNIVERSITET

# De postglaciala jordbävningarna

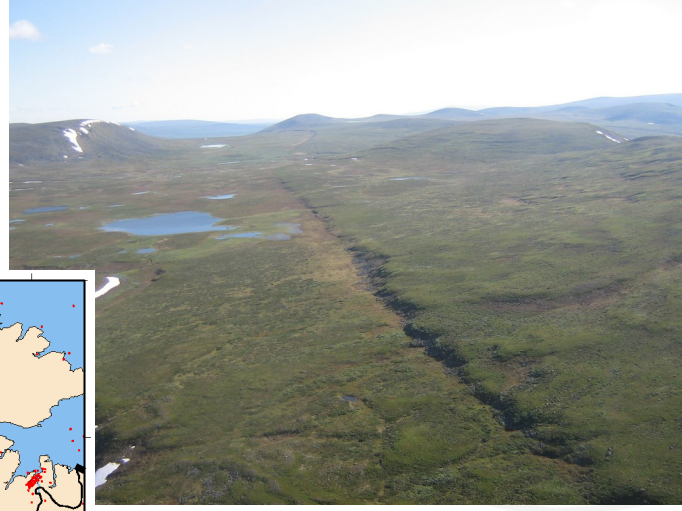
Jordbävningar vid istidens slut med magnitud på upp til 8. Förkastningarna är fortfarande aktiva mycket aktiva.

Vi kan alltså ha mycket stora jordbävningar i Fennoskandien. Frågan är hur ofta? Och var?

Hur tar vi hänsyn till risken för större skalv, på PGF:erna eller på annat håll?




Förkastningsdata från Munier et al. (Glacially triggered faults, 2022).



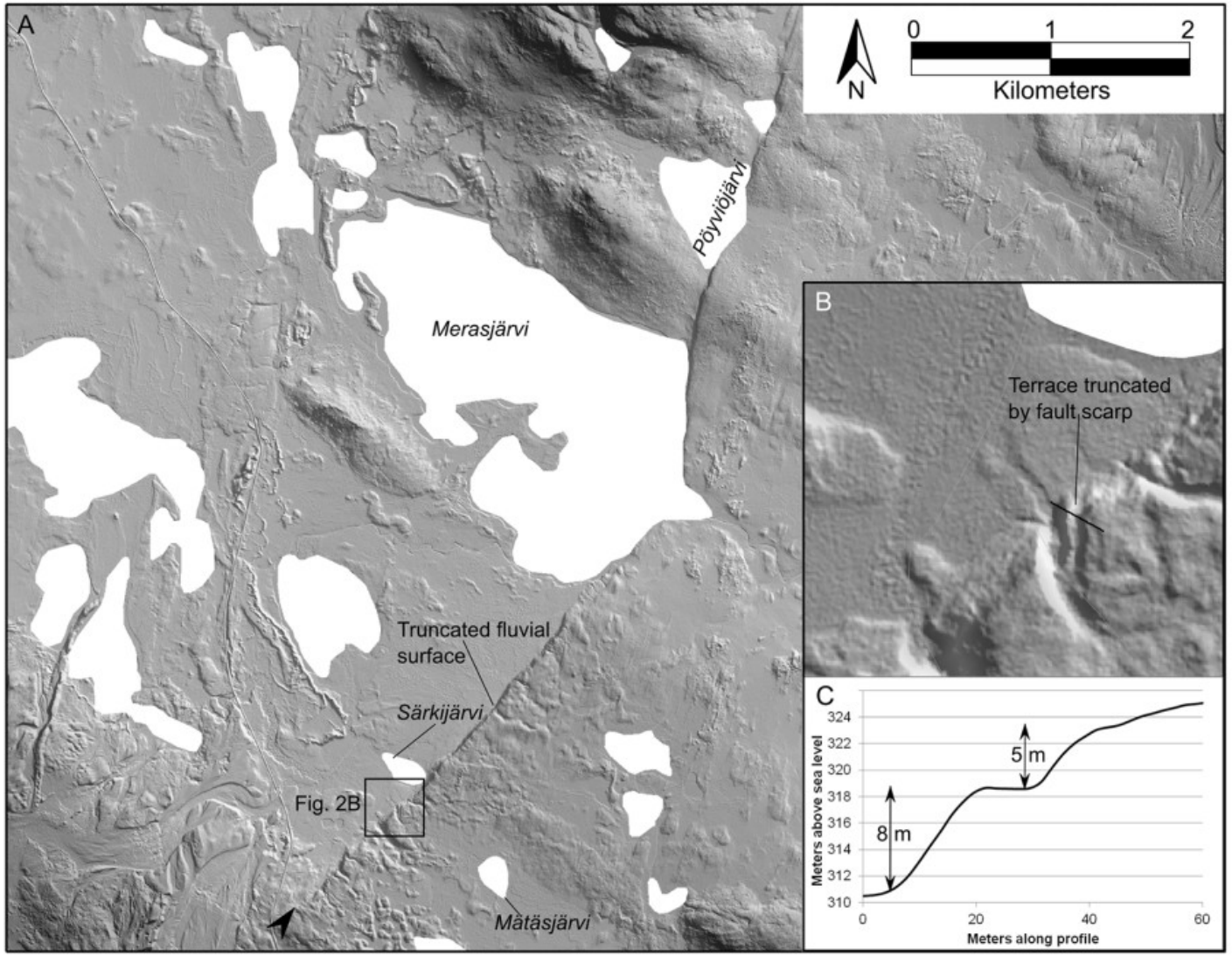
Pärvie

UPPSALA UNIVERSITET

# De postglaciala förkastningarna: En uppdatering

Mer och mer data från Sverige, Finland och Norge visar på att förkastningarna rört sig i stora skalv flera gånger under och efter istidens slutskede.

Dessa skalv är alltså inte enstaka händelser.



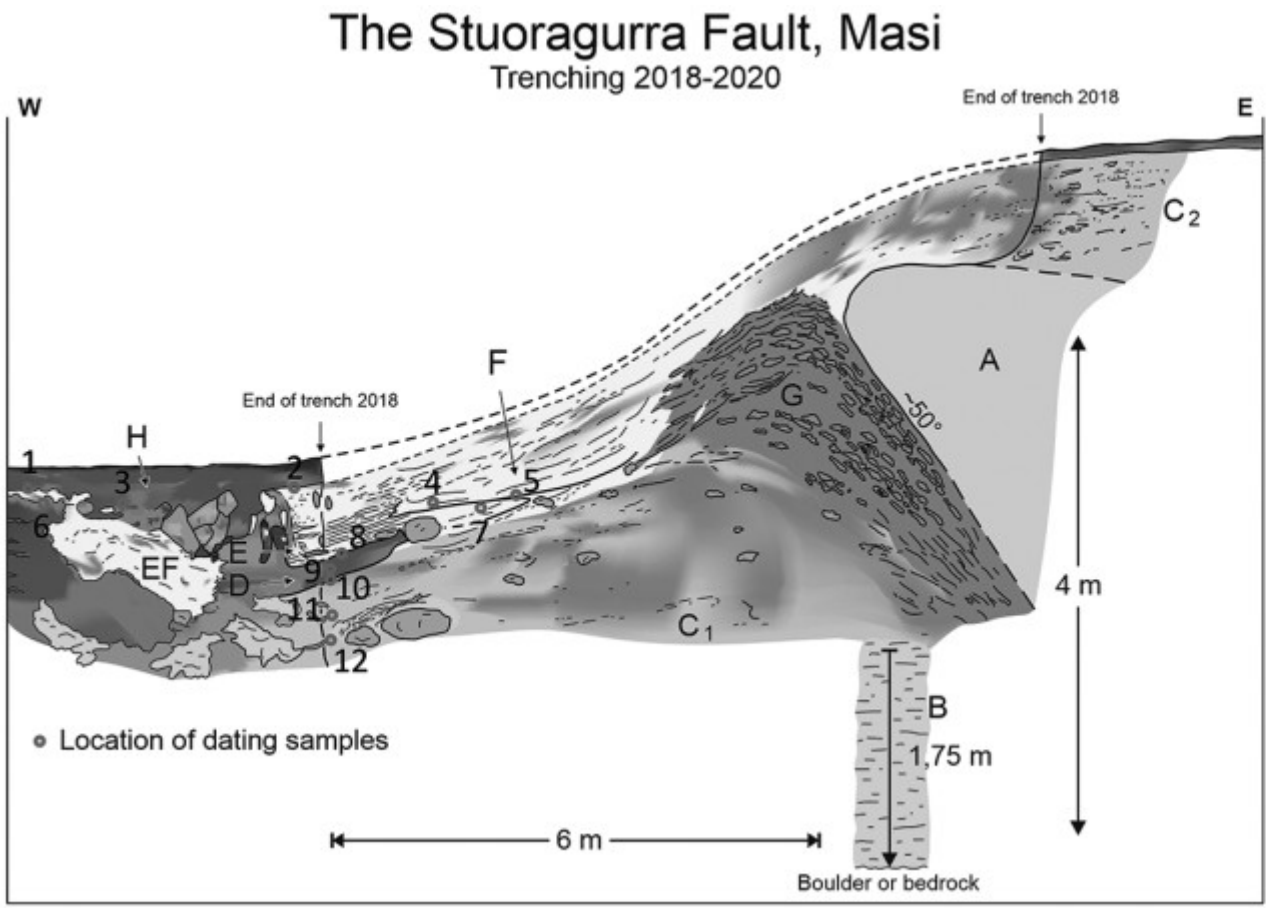

Smith et al. (Glacially triggered faults, 2022).

UPPSALA UNIVERSITET

# De postglaciala förkastningarna: En uppdatering

Data från Stuoragurra i Norge indikerar att förkastningen rört sig i ett magnitud ~7 skalv så sent som för 600 år sedan.

Det är alltså mer än bara istiden som orsakar skalven.




**$^{14}$C dates calibrated to calendar years B.P.:**

1. 530 –555 (N=2)
2. 310 –455, 675 –695
3. 570–660, 2355 –2485
4. 555–655
5. 795–925
6. 2860–2950, 2915 –2960
7. 6285–6310
8. 6405–6485
9. 6830–6940
10. 6975–7160
11. 8545–8630
12. 9015–9130

Olesen et al. (Glacially triggered faults, 2022).

UPPSALA UNIVERSITET

# Nästa generations utvärdering av seismisk fara

- Vi behöver fortsätta mäta för att öka kunskaperna och minska osäkerheterna.
- Vi behöver datera rörelserna på de svenska postglaciala förkastningarna mer exakt, nu finns bara dateringar relativt glaciärsformationer.
- Vi behöver också veta mer om förkastningarnas egenskaper och spänningsförhållanden, genom djup borrning.
- SKI 92:3 behöver uppdateras med:
  - Nya data
  - Nya modeller
  - Ny metodik
- För platsspecifik SHA, som vid ett kärnkraftsverk eller en damm, bör en PSHA kompletteras med en Deterministisk SHA för en bättre utvärdering av risken för anläggningen.

# PSHA-arbete pågår vid Uppsala universitet

## Probabilistic seismic hazard assessment of Sweden

Niranjan Joshi[1], Björn Lund[1], Roland Roberts[1]
[1]Department of Geosciences, Uppsala University, Sweden

UPPSALA UNIVERSITET

### CONTACT

Niranjan Joshi
PhD Candidate,
Department of Geosciences
Uppsala University
Email: niranjan.joshi@geo.uu.se

### Summary

Sweden is a low seismicity region and as such has neither a national seismic hazard map nor seismic building codes. In this project we develop a seismic hazard map for Sweden, using data accumulated in the last 20 years. We use relatively large seismic source areas, distance and adaptive smoothing of seismicity, two recently developed GMPEs appropriate for the region plus five older GMPEs. The fixed distance smoothing seems to focus the hazard in places with dense seismicity, e.g. the Pärvie fault. The adaptive smoothing seems to spread the hazard out into lower density regions. The PGA values are between 0.025-0.03g(poe=0.1), with the ESHM20 craton GMPE estimating the highest mean PGA(0.03g) around the Burträsk fault. 0.024g is the lowest mean PGA estimated for it by the cluster GMPEs.

### METHODS AND MATERIALS

In this study we estimate the b-value using Aki's MLE method[4] and smooth the seismicity using the inbuilt function in OpenQuake, and adaptively using the nearest neighbour distance[5].
We then calculate the hazard using the Fülöp GMPE[6], the experimental ESHM20[7] craton GMPE and a suite of 5 equally weighted GMPEs(Campbell2003, Toroetal2002, AkkarBOmmer2010, CauzziFaccioli2008 and chiouYoungs2008)[8]

### REFERENCES

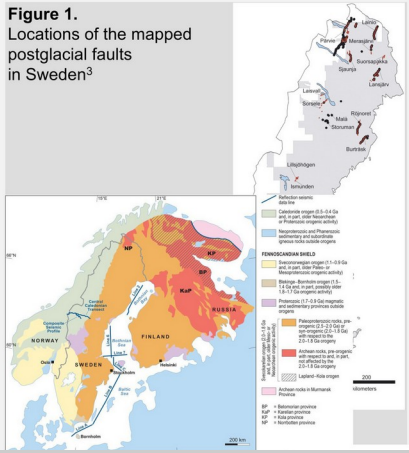
1. Lund et.al, 2021
2. GSL Memoirs 50, 2020
3. Mikko et al, 2015
4. Aki M.,1965
5. Helmstetter et.al, 2007
6. Fülöp et al., 2020
7. Weatherill et.al, 2020
8. Bykova et.al, 2016

### Seismicity

Sweden lies in a low-seismicity region with very few damaging earthquakes. Most of the country lies on Precambrian crystalline rocks which are part of the billion-year-old Fennoscandian shield.
The modern-day seismicity is quite benign, with only four M4+ events in last 20 years and is mostly observed in the south-west around Lake Vänern, along the north-east coast near Skellefteå, and in the Norrbotten region[1],which is home to the post-glacial faults that caused large earthquakes 10,000 years ago. The rest of the country is relatively inactive. Seismicity is also limited by the span of instrumental observations, oldest of which have been recorded back in 1375. The catalogues are more complete in the recent years, and we have decided to focus on the recent seismicity (2000-present) in this study. In the future we aim to incorporate all the historical data, which includes events such as the 1759 M5.6 event in Kattegatt, and the 1904 M5.4 event at Kosteröarna, which are the largest events in the catalogue's history.

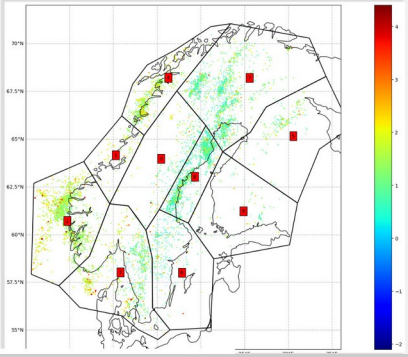
### Geological setting of Sweden[2]

**Figure 1.**
Locations of the mapped postglacial faults in Sweden[3]




### Seismicity and zonation map

**Figure 2.**
We try to keep the zones as broad as possible and try to align them with the underlying geology and seismicity. Colorbar shows the magnitude



### Smoothing algorithms

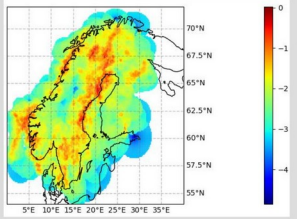


**Figure 3.** Log of activity rates per grid cell, as seen for Adaptively smoothed Seismicity (NN6)

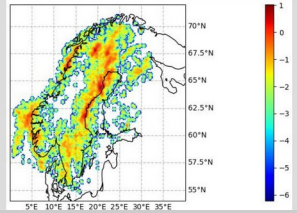


**Figure 4.** Log of activity rates per grid cell, as seen for Smoothing using a fixed distance (5km)

UPPSALA UNIVERSITET