



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Jan-Anders Larsson
Erik Larsson

Scanscot Technology AB, Lund

2018:27

ESHM13 – En ny PSHA-modell för
Europa betraktad ur ett svenskt
perspektiv

SSM perspektiv

Sammanfattning

Den seismiska verifieringen av de svenska kärntekniska anläggningarna görs idag med användning av markresponsspektra enligt SKI TR 92:3. Inom ramen för ett stort gemensamt europeiskt forskningsprojekt (SHARE/ESHM13) utvecklades den första enhetliga seismiska riskmodellen för hela Europa med seismiska riskkurvor och markresponsspektra för olika överskridandenivåer. I föreliggande studie har jämförts den seismiska responsen för några svenska reaktorinneslutningar huvudsakligen baserat på markresponsspektra enligt SHARE/ESHM13 och SKI TR 92:3. Beräkningsresultaten visar att tillämpning av markresponsspektra enligt SHARE/ESHM13 ger för Ringhals väsentligt högre seismisk respons jämfört med tillämpning av markresponsspektra enligt SKI TR 92:3. För Oskarshamn och Forsmark visar resultaten på en likartad seismisk risk som är jämförbar med den som SKI TR 92:3 ger. Den aktuella studien innehåller dock enkla överslagsberäkningar och behöver således vidare utvecklas både vad det gäller omfattning och detaljeringsgrad.

Bakgrund

De äldre svenska kärnkraftsreaktorerna byggdes utan krav på jordbävningstålighet. I mitten av 1980-talet inleddes ett samarbetsprojekt mellan dåvarande myndigheten SKI och kraftbolagen i syfte att ta fram markresponsspektra för svenska förhållanden. Resultatet av detta projekt presenterades i rapporten SKI TR 92:3.

Metoderna som användes för att ta fram markresponsspektra i SKI TR 92:3 baseras på en databas över inträffade jordbävningar som sträcker sig fram till 1970-talet. Sedan dess har p.g.a. framförallt utbyggnaden och moderniseringen av de nordiska seismiska nätverken registrerats ett stort antal jordskalv med bättre kvalitén i bestämningen av skalven. Den samnordiska jordskalvkatalogen (s.k. Fencat) innehåller därför betydligt fler skalv idag än den gjorde vid tiden för datauttaget till SKI TR 92:3. Dessutom har under tiden skett en betydande utveckling av probabilistiska metoder för seismiska riskbedömningar (s.k. PSHA).

Utvecklingen av Eurokoderna under 1990- och 2000-talen underströk behovet av homogena och enhetliga procedurer för PSHA i Europa. Detta utvecklingsarbete har nu via ett stort gemensamt europeiskt forskningsprojekt (SHARE/ESHM13) resulterat i den första enhetliga seismiska riskmodellen för hela Europa, inklusive framtagning av seismiska riskkurvor och markresponsspektra för olika överskridandenivåer. I projektet har även den europeiska normkommittén CEN/TC250/SC8 deltagit i syfte att använda resultaten som en bas för en kommande uppdatering av Eurokod 8

Syfte

Syftet med projektet är att redovisa, dels använda metoder och erhållna resultat inom SHARE/ESHM13-projektet, och dels effekten på den seismiska risken vid tillämpning av de nya markresponsspektra enligt SHARE/ESHM13 jämfört med SKI TR 92:3 utifrån vissa säkerhetskritiska strukturer vid svenska kärnkraftsreaktorer .

Resultat

I föreliggande projektet har jämförts den seismiska responsen för några svenska reaktorinneslutningar mellan tillämpning av markresponspektra enligt SHARE/ESHM13 och tidigare tillämpade markresponspektra vid svenska kärntekniska anläggningar, nämligen SKI TR 92:3 och USNRC R.G. 1.60. Den seismiska respons som utvärderats avser tvärkraft vid basen i horisontell riktning. Beräkningarna utfördes, dels med en statisk ekvivalent metod, och dels med en förenklad modal responspektrumanalys för en typisk svensk reaktorinneslutning. Oberoende av använd metod ger tillämpning av markresponspektra enligt SHARE/ESHM13 för Ringhals väsentligt högre respons jämfört med tillämpning av markresponspektra enligt SKI TR 1992:3. Den aktuella studien innehåller dock enkla överslagsberäkningar och behöver således vidare utvecklas både vad det gäller omfattning och detaljeringsgrad. Det handlar bl.a. om att ytterligare studera och eventuellt förbättra de i SHARE-projektet använda modellerna för beräkning av framtida jordbävningsscenarier, att för svenska förhållanden använda senast uppdaterad lokal jordbävingskatalog samt noggrannare studera och värdera gentemot andra arbeten villkoren för användning av s.k. dämpningsfunktioner (GMPE) i SHARE-projektet.

Slutsatser

Resultaten från projektet visar bland annat

1. på en likartad seismisk risk för Oskarshamn och Forsmark som är jämförbar med den som SKI TR 92:3 ger,
2. på märkbart högre seismisk risk för Ringhals än vad SKI TR 92:3 ger för frekvenser lägre än 10 Hz,
3. att de använda GMPE i ESHM13/SHARE inte är direkt tillämpliga för svenska geologiska förhållanden och att de således behöver utvärderas och eventuellt kalibreras utifrån de lokala förhållandena för respektive förlängningsplats, och
4. att resultaten från ESHM13/SHARE-projektet ska betraktas som grund för vidare studier och analyser av de svenska kärnkraftsreaktorerna.

Projekt information

Kontaktperson SSM: Kostas Xanthopoulos

Referens: SSM2017-2660



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Jan-Anders Larsson
Erik Larsson

Scanscot Technology AB, Lund

2018:27

ESHM13 – En ny PSHA-modell för
Europa betraktad ur ett svenskt
perspektiv

Datum: Januari 2018

Rapportnummer: 2018:27 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Innehåll

1. Inledning	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte	9
2. Allmän beskrivning av PSHA	11
2.1.1 Allmänt	11
2.1.2 Sannolikhet för olika jordbävningsscenarier	11
2.1.3 Sannolikhet för markskakningsrespons	16
2.1.4 Kombinerad sannolikhet och summering av faran	18
2.1.5 Uniform hazard spectrum	22
3. The European Seismic Hazard Model (ESHM13)	23
3.1 Allmänt	23
3.2 PSHA-procedurer i SHARE-projektet	25
3.2.1 Allmänt	25
3.2.2 Modell för jordbävningssaktivitet	25
3.2.3 Modell för markskakningsrespons	30
3.2.4 Efterbehandling av resultaten i SHARE	31
3.2.5 Hantering av osäkerheter	35
4. Markresponspektra för svenska anläggningsområden	39
4.1 Dimensionerande jordbävning DBE	39
4.2 USNRC Regulatory Guide 1.60	40
4.3 SKI Technical Report 92:3	42
4.4 SHARE (ESHM13)	43
4.5 Jämförelse av markresponspektra	47
5. Enkla överslagsberäkningar	51
5.1 Allmänt	51
5.2 Statiskt ekvivalent jämförande beräkning	52
5.3 Jämförande modal analys	53
6. Sammanfattning och slutsatser	57
7. Erkännanden	61
8. Referenser	63
Bilaga 1 Lista över figurer	65
Bilaga 2 Lista över tabeller	69
Bilaga 3 Lista över förkortningar	71

Sammanfattning

Den svåra jordbävningen och den påföljande tsunamin som ödelade kärnkraftverket i Fukushima Dai-ichi i Japan den 11 mars 2011 resulterade i omfattande diskussioner kring hur man borde förbättra de existerande metoderna för bedömning av faran från naturfenomen (*natural hazard assessments*). Fukushima-händelsen medförde att så kallade stresstester genomfördes på samtliga kärnkraftverk i Europa, under ledning av ENSREG och WENRA. Baserat på resultaten från stresstesterna har man tagit fram dimensionerande referensvärden för naturfenomen samt riktlinjer för genomförande av deterministiska och probabilistiska metoder för yttre händelser vid kärntekniska anläggningar. Detta redovisas i en serie *Guidance Documents* utgivna av WENRA år 2015 och 2016.

En annan aspekt som lyftes fram efter stresstesterna var betydelsen av periodiska säkerhetsgranskningar. Man rekommenderar för naturfenomen att sådana genomförs så ofta som bedöms nödvändigt, men åtminstone varje tionde år. I WENRA *Guidance Documents* anger man specifikt att man därvid måste beakta ny kunskap avseende bland annat nya inträffade jordbävningar och nya utvecklingsframsteg inom PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessments*).

Ett viktigt syfte med projektet *Seismic Hazard Harmonization in Europe* (SHARE) var att försöka dra nytta av den samlade erfarenheten från senare års internationella utveckling av PSHA-procedureerna. SHARE var ett stort europeiskt samarbetsprojekt med engagemang av cirka 300 ledande experter inom ämnesområdet. Projektet resulterade i *The 2013 European Seismic Hazard Model* (ESHM13), som är en databas och modell för beskrivning av seismiska faran över hela Europa och Turkiet. Denna modell är baserad på homogena och samordnade data utan att vara begränsade av nationella gränslinjer och med en vetenskaplig koordinering av de olika inblandade disciplinerna. ESHM13 utvecklas vidare och kommer att utgöra basen för en uppdatering av Eurokod 8, men även för andra seismiska riskbedömningar i Europa under många år framöver. Inom den europeiska kärnkraftsindustrin bör man rimligen därför också förhålla sig till vad som framkommit inom SHARE-projektet, vid nykonstruktion såväl som vid periodiska seismiska säkerhetsbedömningar.

Syftet med arbetet som redovisas i denna rapport är i första hand att beskriva metoderna som använts och resultaten som tagits fram inom SHARE-projektet. Men även att ta fram markresponsspektra och på ett övergripande plan redovisa hur vissa säkerhetskritiska strukturer vid de svenska kärnkraftverken kan komma att påverkas om ESHM13 skulle användas i sitt befintliga skick. Resultaten jämförs gentemot markresponsspektra som tidigare använts vid de svenska kärnkraftverken.

Resultaten från SHARE visar på en förhöjd seismisk fara för stora delar av Sverige, jämfört med tidigare genomförda PSHA-analyser. Dessa slutsatser gäller framförallt för Skåne och svenska västkusten, där den seismiska faran är störst i landet. Det är emellertid viktigt att understryka att de *Uniform Hazard Spectra* (UHS) som presenteras i denna rapport avspeglar de regionala förutsättningar som gällde vid framtagning av ESHM13 i dess nuvarande skick. Vid tillämpning av underlaget i ESHM13 är det viktigt att den använda databasen utvärderas och eventuellt revideras utifrån de lokala förutsättningar som gäller för den aktuella anläggningsplatsen.

English summary

The severe earthquake and the subsequent tsunami that devastated the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant in Japan on March 11, 2011 resulted in extensive discussions on how to improve existing methods for natural hazard assessments. The Fukushima event resulted in the so-called stress tests being carried out at all nuclear power plants in Europe, under direction of ENSREG and WENRA. Based on the results of these stress tests, dimensioning reference values for natural phenomena were developed together with guidelines for the implementation of deterministic and probabilistic methods for external events at nuclear facilities. This is presented in a series of Guidance Documents published by WENRA in 2015 and 2016.

Another aspect raised after the stress tests was the importance of periodic safety reviews. It is for natural hazards recommended to perform such reviews as often as deemed necessary, but at least every 10 years. In WENRA Guidance Documents, it is specifically stated that you need to take into account new knowledge regarding, for example, new earthquakes and new developments in PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessments).

An important purpose of the Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE) project was to try to benefit from the overall experience of recent years of international development of the PSHA procedures. SHARE was a major European cooperation project with the involvement of approximately 300 leading experts in the subject area. The project resulted in the 2013 European Seismic Hazard Model (ESHM13), which is a database and model for describing seismic hazard across Europe and Turkey. This model is based on homogeneous and coordinated data without being limited by national boundaries and with a scientific coordination of the various disciplines involved. ESHM13 will be further developed and will provide the basis for an update of Eurocode 8, but also for other seismic risk assessments in Europe for many years to come. In the European nuclear power industry, it should therefore be reasonable to relate to what has emerged in the SHARE project, in the case of new construction as well as periodic seismic safety assessments.

The aim of the work presented in this report is primarily to describe the methods used and the results obtained within the SHARE project. But also to develop ground response spectra as well as assess how some safety-critical structures at the Swedish nuclear power plants can be affected if ESHM13 would be used in its existing state. The results are compared to the ground response spectra used on Swedish nuclear power plants up to now.

The results from SHARE show an increased seismic hazard for large parts of Sweden, compared to previously conducted PSHA-analyses. These conclusions apply mainly to Skåne and the Swedish west coast, where the seismic hazard is greatest in the country. However, it is important to emphasize that the Uniform Hazard Spectra (UHS) presented in this report reflects the regional conditions that exist in the development of ESHM13 in its present state. When applying the documentation in ESHM13, it is important that the database used is evaluated and possibly revised based on local conditions that apply to the particular site.

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Skandinavien kan utifrån ett övergripande perspektiv anses vara ett område med låg seismisk aktivitet. Emellertid finns det en zon längs den norska och svenska västkusten där ett antal jordskalv med magnituden $M > 5$ enligt Richter-skalan har registrerats under de senaste 300 åren. Det senaste av dessa inträffade 1904 vid Kosteröarna och hade magnituden $M=5.4$. Skador uppstod på en del byggnader, bland annat klocktorn och skorstenar som låg nära epicentrum [1] och skalvet kändes över stora delar av Sverige, Norge och Danmark. Det finns även ett stråk längs Norrlandskusten, som visar på en betydande seismisk aktivitet. Paleoseismiska studier indikerar att flera större jordbävningar inträffade i norra Sverige under slutet av senaste istiden för cirka 9 000 år sedan, förmodligen till följd av postglaciala landhöjningar på grund av isavsmältningen [2]. Några av dessa jordbävningar kan ha haft magnituden $M > 8$, alltså i samma storleksordning som de största som någonsin inträffat på jorden.

Man förväntar sig i Norge att skalv med magnituden $M > 5$ har en genomsnittlig återkomsttid av cirka 10 år och skalv med magnituden $M > 6$ en återkomsttid av cirka 100 år [3]. Utifrån denna uppskattning använder man för byggnadsdimensionering i Norge återkomsttiden 475 år enligt Eurokod 8 [4], baserat på en största möjlig magnitud $M=6.5$. Beslutet att införa Eurokod 8 [4] har inneburit att jordbävning numera ofta blir den dimensionerande lasten i Norge. Emellertid bedömde Boverket och Trafikverket i Sverige i samband med utgivningen av den första versionen av Eurokod 8 [4] att verifiering av bärverk med avseende på jordbävning endast behöver göras i mycket särskilda fall och att bärverkets bärförmåga säkerställs normalt av andra lastfall i övriga delar av Eurokoderna [5]. Därför ansåg man att det inte var nödvändigt att ge ut föreskrifter eller allmänna råd för jordbävningssdimensionering i Sverige.

När konstruktionsförutsättningarna för de äldsta svenska kärnkraftsanläggningarna togs fram under 1960- och 1970-talen beaktades inga extrema yttre händelser (exempelvis svåra väderförhållanden och jordbävning), till skillnad mot den internationella praxis som gäller idag med återkomsttider i storleksordningen 10 000 till 100 000 år för denna händelsekategori.

Utvecklingen av säkerhetsmedvetandet inom den svenska kärnkraftsindustrin under 1970-talet medförde efter hand en ökad förståelse för att seismiska laster måste hanteras inom kravbilden för kärntekniska anläggningar. I dimensioneringsförutsättningarna för de senast uppförda kärnkraftsanläggningarna, Oskarshamn 3 och Forsmark 3, infördes därför krav på beaktande av jordbävningsslast. Dessa anläggningar dimensionerades för en maximal horisontell markacceleration av 0.15g horisontellt och 0.10g vertikalt med markresponsspektra enligt USNRC RG 1.60 [6]. Vid uppförandet av CLAB etapp 1 på 1980-talet ingick samma kravbild i dimensioneringsförutsättningarna för speciellt viktiga säkerhetssystem, exempelvis bränsleförvaringsbassängerna.

I syfte att ta fram markskakningsförlopp att användas vid säkerhetsanalys av de svenska kärnkraftsanläggningarna, inleddes i mitten av 1980-talet ett samarbetsprojekt mellan dåvarande Statens Kärnkraftsinspektion (SKI) och de svenska kraftbolagen. Resultatet av detta projekt presenterades i SKI Technical Report 92:3 [7]. I denna rapport redovisas markresponsspektra för typiska svenska bergförhållanden vid olika sannolikheter för överskridande uttryckt i antal händelser/år ($1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ och $1 \cdot 10^{-7}$), baserat på data från

Japan och USA som modifierats till lokala seismologiska och geologiska förhållanden i Sverige.

Inom ramen för moderniserings- och effekthöjningsprogrammen vid de svenska kärnkraftverken under 1990- och 2000-talen, har omfattande modifieringar genomförts i syfte att kunna upprätthålla erforderliga barriärer och säkerhetsfunktioner i händelse av en jordbävning. Härvid har byggnadsstrukturer och utrustning analyserats för en jordbävning motsvarande en sannolikhet för överskridande av en gång på 100 000 år (en årlig överskridandefrekvens av $1 \cdot 10^{-5}$) med markresponsspektra enligt SKI Technical Report 92:3 [7]. I detta sammanhang bör det nämnas att det internationella kravet på den dimensionerande jordbävningen (*Design Basis Earthquake (DBE)*), som det beskrivs av IAEA och WENRA är att dimensionera för en årlig överskridandefrekvens av $1 \cdot 10^{-4}$. För regioner där värdet på max markacceleration (*Peak Ground Acceleration (PGA)*) inte överskrider 0.1g vid den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-4}$ måste en lägre årlig sannolikhet för överskridande användas så att PGA blir minst 0.1g. I Europa är det endast Sverige, Finland och delar av Tyskland som i enlighet med detta krav använder markresponsspektra motsvarande $1 \cdot 10^{-5}$ istället för $1 \cdot 10^{-4}$.

I samband med de europeiska stresstesterna efter Fukushima-olyckan 2011 har vissa speciellt betydelsefulla säkerhetskritiska strukturer, exempelvis reaktorinneslutningarna och bränslebassängerna, även kontrollerats för en mycket osannolik jordbävning med en årlig överskridandefrekvens motsvarande $1 \cdot 10^{-7}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7].

SKI Technical Report 92:3 [7] granskades av ENSREG i anslutning till de europeiska stresstesterna. I sin granskningsrapport [8] påpekar ENSREG att markresponsspektra (*Uniform Hazard Spectra (UHS)*) i SKI Technical Report 92:3 [7] baseras på observationer och historiska data i Fennoskandia under en tidsperiod av endast cirka 500 år. ENSREG ifrågasatte denna korta geologiska tidsrymd, inte minst på grund av att geodetiska och paleoseismiska data indikerar aktiva postglaciala uppåtriktade rörelser i Fennoskandia. ENSREG hänvisade bland annat till IAEA SSG-9 [9] som rekommenderar att data avseende historiska jordbävningar ska sammanställas så långt bakåt i tiden som möjligt. Paleoseismisk information om historiska och förhistoriska jordbävningar ska därvid beaktas, framförallt för områden som exempelvis Sverige där historisk dokumentation kring inträffade jordbävningar är bristfällig. Som framgår av den svenska handlingsplanen [10] efter Fukushima-händelsen tog SSM ett beslut att genomföra en översyn av SKI Technical Report 92:3 [7]. En sådan översyn har genomförts i samarbete mellan SGU och seismologigruppen vid Uppsala Universitet och som har redovisats i SSM 2017:35 [11]. I denna rapport pekar man bland annat på att de seismiska data som ligger till grund för resultaten i SKI Technical Report 92:3 [7] är bristfälligt redovisade och baseras på föråldrade metoder för datainsamling och riskanalyser.

En annan slutsats från ENSREGs granskning [12] var att man rekommenderade medlemsländerna i Europa att åtminstone varje tionde år se över sina anläggnings-specifika säkerhetsbedömningar beträffande den seismiska faran (*seismic hazard*). Härvid avses exempelvis nytillkommen kunskap i form av förbättrade seismiska bedömningsmetoder, uppdaterade skalvkatologer, nya mätdata från inträffade jordbävningar, nyupptäckta aktiva förkastningszoner, etc.

Metoderna som användes för att ta fram *hard rock spectra* i SKI Technical Report 92:3 [7] utvecklades under 1980-talet. Sedan dess har det skett en omfattande utveckling av metoderna för PSHA. Utvecklingen av Eurokoderna under 1990- och 2000-talen underströk behovet av homogena och enhetliga procedurer för PSHA i hela Europa. Detta utvecklingsarbete har nu via ett stort europeiskt forskningsprojekt (SHARE) resulterat i den första enhetliga modellen för beskrivning av den seismiska faran i Europa och Turkiet.

Seismiska sannolikhetskurvor för beskrivning av seismiska faran och markresponsspektra finns nu allmänt tillgängliga i digitalt format på en webbportal som omfattar 120 000 platser fördelade varje 10 km över hela Europa och Turkiet.

1.2 Syfte

Ett viktigt syfte med SHARE-projektet var att skapa ett robust underlag för en kommande revidering av Eurokod 8 [4]. Därför har även den europeiska CEN/TC250/SC8-kommittén aktivt deltagit i projektet. I flera europeiska länder, bland annat i Tyskland, Schweiz och Italien, pågår i skrivande stund utredningar och konsekvensanalyser som förberedelser för kommande revideringar av de nationella tillämpningsdokumenten för Eurokod 8 [4].

Resultaten från SHARE visar på en förhöjd seismisk fara för stora delar av Sverige, jämfört med det underlag som togs fram i samband med införandet av den första versionen av Eurokod 8 [4] år 2004. Ett arbete framtaget vid Lunds Universitet [13] år 2017 visar att jordbävning baserat på SHARE-underlaget ofta skulle bli den dimensionerande horisontella lasten för byggnader och bärverk om Eurokod 8 [4] infördes i Sverige. Dessa slutsatser gäller framförallt för Skåne och den svenska västkusten, där den seismiska faran är störst i landet.

Slutdokumentationen från SHARE har tagits fram inom ramen för ett stort europeiskt samarbetsprojekt med engagemang av cirka 300 ledande experter inom ämnesområdet. SHARE-underlaget utvecklas vidare och kommer att utgöra basen för de flesta seismiska riskbedömningar i Europa under de kommande decennierna. Inom den europeiska kärnkraftsindustrin bör man därför rimligen också förhålla sig till vad som framkommit inom SHARE, vid nykonstruktion såväl som vid periodiska seismiska säkerhetsbedömningar.

Databasen från SHARE innehåller data för årliga överskridandefrekvenser ned till intervallet $1 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-5}$, alltså nivåer som utgör dimensioneringsförutsättningar för kärntekniska anläggningar. Det är därför möjligt att göra preliminära bedömningar av konsekvenserna även för säkerhetskritiska strukturer vid de svenska kärntekniska anläggningarna.

Syftet med arbetet som redovisas i denna rapport är i första hand att redovisa metoderna som använts och resultaten som tagits fram inom SHARE-projektet. Men även att ta fram resulterande markresponsspektra och att på ett övergripande plan visa på några av konsekvenserna av SHARE-underlaget om det hade tillämpats i dess befintliga skick. Resultaten redovisas i jämförelse med andra markresponsspektra som använts tidigare vid de svenska kärnkraftverken, d.v.s. USNRC RG 1.60 [6] och SKI Technical Report 92:3 [7].

2. Allmän beskrivning av PSHA

2.1.1 Allmänt

Probabilistiska metoder för utvärdering av seismisk fara (*Probabilistic Seismic Hazard Assessments (PSHA)*) kombinerar vanligtvis följande två huvudsakliga processer som tillsammans karakteriserar den seismiska faran för en given geografisk plats:

- Identifiering av inträffade jordbävningar i regionen samt framtagning av en modell som beskriver regionens jordbävningssaktivitet. Med hjälp av aktivitetsmodellen kan sannolikheten för framtida jordbävningsscenarioer inom regionen beräknas.
- Selektion av markdämpningsekvationer (*Ground Motion Prediction Equations (GMPE)*) representativa för markförhållandena i regionen. Dessa GMPE används för beräkning av markskakningsresponsen, för de jordbävningsscenarioer som ryms inom ramen för aktivitetsmodellen.

Med ”*jordbävningsscenario*” avses en jordbävning med magnitud M och avstånd R till platsen som studeras och med ”*markskakningsrespons*” menas en godtycklig responsparameter av typ spektralacceleration (S_A).

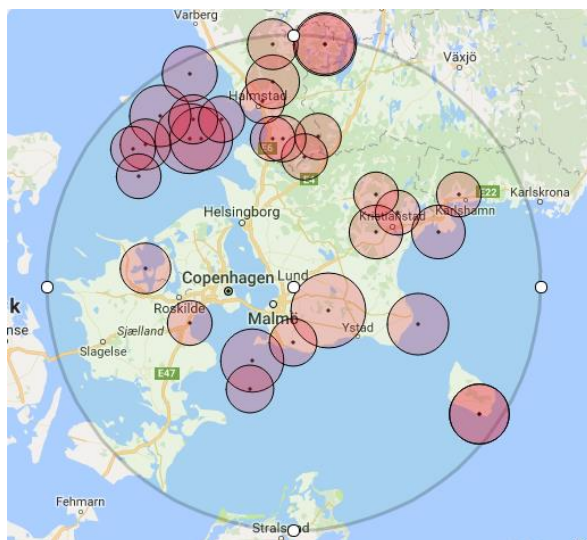
En PSHA summerar faran för samtliga jordbävningsscenarioer och den slutgiltiga seismiska faran ges av en markskakningsrespons som överskrids med en årlig sannolikhet för överskridande, alternativt en sannolikhet att överskridas under en given tidsperiod. Metodiken för hur man *summerar faran* beskrivs mera utförligt i följande avsnitt med hjälp av ett enkelt exempel på en PSHA för Lund.

2.1.2 Sannolikhet för olika jordbävningsscenarioer

Sannolikheten att markskakningsresponsen Y överskrider ett värde y är beroende av en mängd olika jordbävningsscenarioer, där varje jordbävning har en magnitud M_j och ett avstånd R_k till platsen som studeras. Både magnitud och avstånd till platsen modelleras normalt sett i en PSHA som slumpmässiga variabler vars teoretiska sannolikhetsfördelningar kan beräknas.

Det finns flera olika sätt att modellera förekomsten av framtida jordbävningar, d.v.s. var de statistiskt sätt bör förekomma och hur ofta. Det här avsnittet utgår från den vanligaste aktivitetsmodellen, en så kallad *Area Source-* (AS) modell, som även utgör den mest applicerade modellen i SHARE för den nordeuropeiska regionen.

En AS är ett polygon, av godtycklig form, som omsluter ett geografiskt område inom vilket jordbävningar antas kunna ske var som helst och när som helst. AS-modeller brukar användas för att beräkna förekomsten av jordbävningar som inte kan härledas till någon specifik förkastning [14]. I Figur 2.1 visas ett exempel på en cirkulär AS med radie 150 km runt Lund. Inom cirkeln visas historiska jordbävningar som dokumenterats i jordbävningsskataloger. Dessa jordbävningar utgör det statistiska underlaget som i nästa processteg ligger till grund för den beräknade jordbävningssaktiviteten inom AS-modellen. Jordbävningarna i Figur 2.1 är av magnitud 3 eller större och baseras på observationer under de senaste 300 åren.

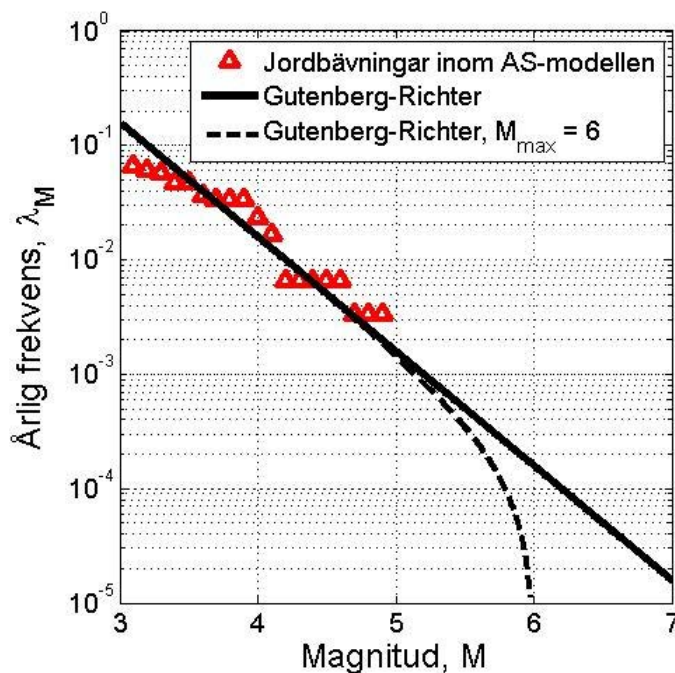


Figur 2.1 Area Source-modell med historiska jordbävningar av magnitud $M > 3$ [15].

I en PSHA måste en magnitud-frekvens-fördelning beräknas som beskriver hur ofta, statistiskt sett, jordbävningar med magnitud större än en godtycklig magnitud M inträffar inom AS-modellen. Den årliga frekvensen λ_M av jordbävningar med magnitud större än M brukar beskrivas med hjälp av ett Gutenberg-Richter-förhållande enligt nedan:

$$\log \lambda_M = a - b \cdot M$$

Konstanterna a och b bestäms så att ekvationen stämmer överens med överskridandefrekvensen av de historiska jordbävningarna med magnitud M . I Figur 2.2 visas ett exempel på ett Gutenberg-Richter-förhållande där parametrarna a och b har satts till 2.2 respektive 1.0 för att passa in med de historiska jordbävningarna inom AS-modellen.



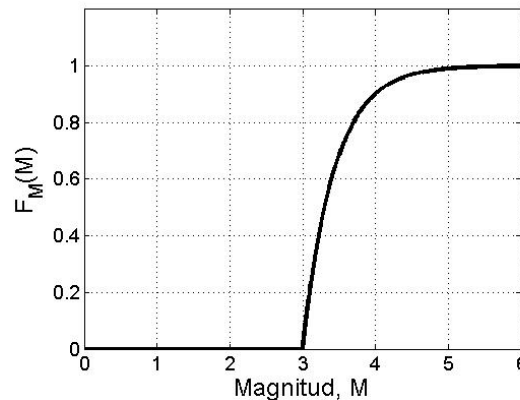
Figur 2.2 Magnitud-frekvens-fördelning av jordbävningar inom AS-modellen.

Notera att Gutenberg-Richter-förhållandet inte har någon övre gräns för M men att jordbävningar med magnitud $M > 5$ aldrig har observerats i området under de senaste 300 åren. Det finns en fysikalisk övre gräns för hur stor en jordbävning i området kan bli och det är således viktigt att etablera en maximal magnitud, M_{max} , som Gutenberg-Richter-förhållandet begränsas till. Magnituderna begränsas även nedåt till en minsta magnitud M_{min} så att oväsentligt små jordbävningar inte används i beräkningarna. I Figur 2.2 har M_{max} valts till 6.0 och M_{min} till 3.0 endast som ett illustrerande exempel. Valet av M_{max} är inte trivialt och leder till osäkerheter i modellen, så kallade epistemiska osäkerheter. Hur dessa osäkerhet behandlas inom SHARE-projektet redovisas i avsnitt 3.2.5.

Med hjälp av magnitud-frekvens-fördelningen, som definieras mellan M_{min} och M_{max} , så går det att beräkna sannolikheten att en framtida jordbävning har en given magnitud M_j . Den kumulativa fördelningen, $F_M(M) = P(M_j \leq M)$, ges av följande uttryck:

$$F_M(M) = \frac{1 - 10^{-b(M - M_{min})}}{1 - 10^{-b(M_{max} - M_{min})}}, M_{min} < M < M_{max}$$

För en härledning av uttrycket refereras läsaren till [14]. Den kumulativa magnitud fördelningen $F_M(M)$ med $M_{min} = 3$ och $M_{max} = 6$ ges i Figur 2.3.

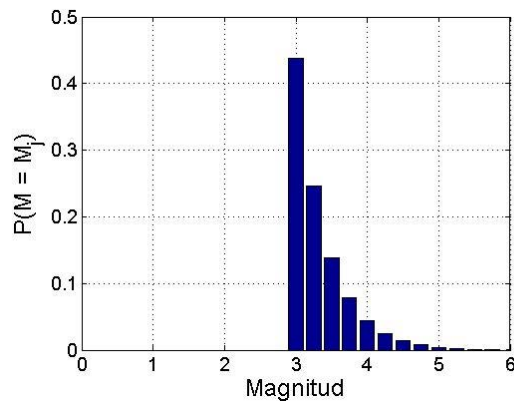


Figur 2.3 Kumulativ sannolikhetsfördelning av magnituder mindre än M inom AS-modellen.

För att underlätta numeriska beräkningar så kan vi associera sannolikheten att en framtida jordbävning har en given magnitud M_j , d.v.s. $P(M = M_j)$, med den totala sannolikheten mellan $F_M(M_j)$ och $F_M(M_{j+1})$, där inkrementet $M_j \rightarrow M_{j+1}$ är tillräckligt litet för att slutresultatet inte ska påverkas. Som exempel kan inkrementet $M_j \rightarrow M_{j+1}$ motsvara en storlek av 0.25 vilket innebär att sannolikheten kan beräknas som:

$$P(M = M_j) = F_M(M_{j+1}) - F_M(M_j) \quad , M_j = \{3.00, 3.25, 3.50 \dots 6.00\}$$

Sannolikhetsfördelningen $P(M = M_j)$ för exemplet ovan ges i Figur 2.4.



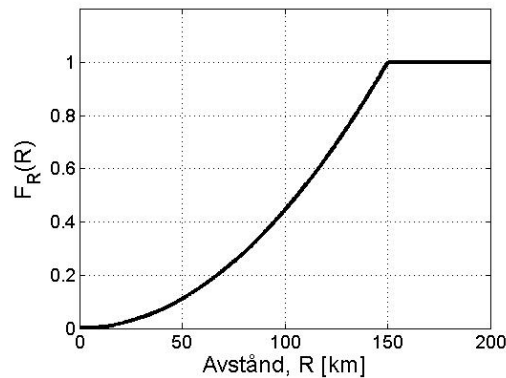
Figur 2.4 Diskret sannolikhetsfördelning av magnituder lika med M inom AS-modellen.

Jordbävningsaktiviteten inom AS-modellen antas vara homogen, d.v.s. jordbävningen kan inträffa var som helst (med samma sannolikhet) inom AS-modellen, vilket gör att vi enkelt kan beräkna sannolikheten för att en framtida jordbävning sker på ett visst avstånd R_k från t.ex. Lund som utgör origo av AS-modellen. Om en jordbävning inträffar inom AS-modellen, så ges sannolikheten att epicentrum ligger inom en radie R km av kvoten av arean på en cirkel med radie R km och en cirkel med radie 150 km:

$$P(R_k \leq R) = \frac{\pi \cdot R^2}{\pi \cdot 150^2} = \frac{R^2}{22\,500} \quad ,\text{då } R \leq 150 \text{ km}$$

$$P(R_k \leq R) = 1 \quad ,\text{då } R > 150 \text{ km}$$

Den kumulativa fördelningsfunktionen $F_R(R) = P(R_k \leq R)$ visas i Figur 2.5.

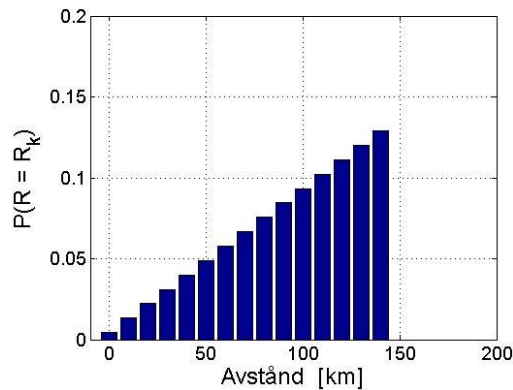


Figur 2.5 Kumulativ sannolikhetsfördelning av avstånd mindre än R mellan Lund och en slumpmässig jordbävning som inträffar någonstans inom AS-modellen

Likt magnitudfördelningen, så associeras sannolikheten $P(R = R_k)$ med den totala sannolikheten mellan två värden i den kumulativa fördelningen $F_R(R_k)$ och $F_R(R_{k+1})$. Som exempel kan inkrementet $R_k \rightarrow R_{k+1}$ motsvara 10 km, vilket ger följande fördelning:

$$P(R = R_k) = F_R(R_{k+1}) - F_R(R_k) \quad ,R_k = \{0, 10, 20 \dots 150\} \text{ km}$$

Sannolikhetsfördelningen $P(R = R_k)$ för exemplet ovan redovisas i Figur 2.6.

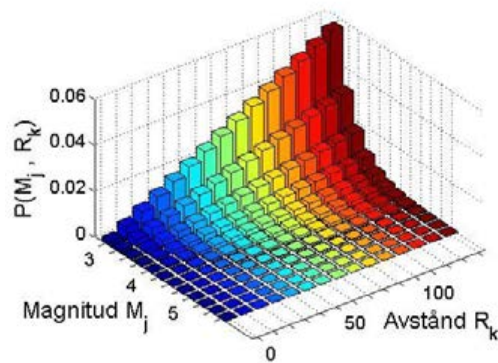


Figur 2.6 Diskret sannolikhetsfördelning av avstånd lika med R mellan Lund och en slumpmässig jordbävning inom AS-modellen.

När både magnitutfördelningen och avståndsfördelningen, d.v.s. $P(M = M_j)$ samt $P(R = R_k)$, har etableras så beräknas sannolikheten för samtliga jordbävningsscenarioer $P(M_j, R_k)$ som definieras av alla olika par M_j, R_k . Om magnitud och avstånd kan anses vara oberoende av varandra så ges sannolikheten för ett jordbävningsscenario som:

$$P(M_j, R_k) = P(M = M_j) \cdot P(R = R_k)$$

Sannolikhetsfördelningen $P(M_j, R_k)$ för exemplet Lund presenteras i Figur 2.7.



Figur 2.7 Diskret sannolikhetsfördelning av olika jordbävningsscenarioer, vid händelse av en jordbävning inom AS-modellen.

Observera att Figur 2.7 visar den probabilistiska bedömningen av olika jordbävningsscenarioer under följande premisser:

- En jordbävning har inträffat inom AS-modellen i Figur 2.1. Den probabilistiska bedömningen är således inte samma sak som den seismiska faran. För att den seismiska faran på plats ska bli komplett så behövs följande information:
 - Hur ofta inträffar jordbävningar inom AS-modellen?
 - Vad blir markskakningsresponsen för respektive jordbävningsscenario?
 - Finns det jordbävningskällor utanför AS-modellen som är kapabla att producera hög markrespons på plats?

Hur dessa frågeställningar hanteras beskrivs i avsnitt 2.1.3 och 2.1.4.

- Den probabilistiska bedömningen gäller enbart för Lund, eftersom avståndsfördelningen baseras på avståndet till Lund.

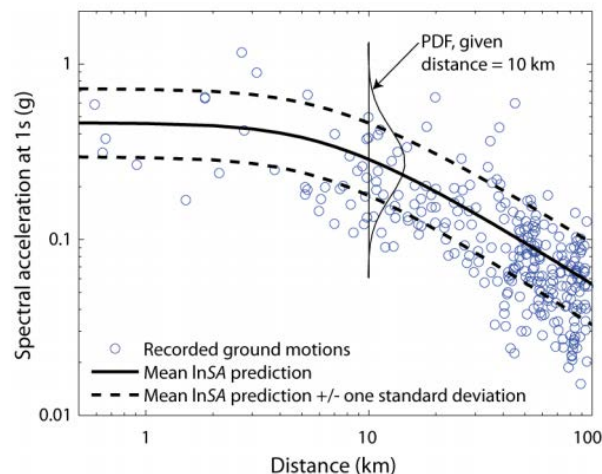
Den senare punkten kan verka självklar, men det bör understrykas att samma AS-modell (med Lund som origo) kan användas för att utföra probabilistiska beräkningar på andra platser inom, eller utanför, AS-modellen. Men eftersom avståndsfördelningen är plats-specifik, så är även den gemensamma fördelningen $P(M_j, R_k)$ plats-specifik. Detta är viktigt eftersom AS-modellerna i SHARE-projektet är fördefinierade polygon och inte cirkelar centrerade kring respektive plats som utvärderas, se Figur 3.3.

2.1.3 Sannolikhet för markskakningsrespons

Med hjälp av tidshistorier från instrumentellt registrerade jordbävningar (accelerogram) kan responsen för enfrihetsgradsystem med olika egenfrekvenser beräknas. Således är det möjligt att utifrån en jordbävning beräkna ett responsspektra som karakteriserar ett jordbävningsscenario M_j, R_k för platsen där jordbävningen registrerats. Eftersom de flesta platser saknar instrumentellt registrerade jordbävningar så är detta dock inte möjligt. Med hjälp av accelerogram över inträffade jordbävningar från hela världen kan man däremot få en samlad bild av den spektrala responsen för alla tänkbara jordbävningsscenarioer, givet olika tektoniska, seismologiska och geologiska förhållanden. Utifrån den samlade bilden (responsspektrum baserat på olika avstånd och jordbävningsmagnituder) kan markdämpningsekvationer anpassas som beskriver en markrespons Y , t.ex. PGA eller S_A , som en funktion av magnitud M och avstånd R och eventuellt andra parametrar:

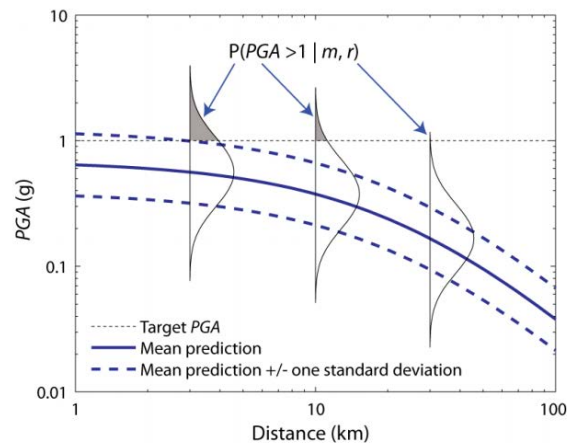
$$Y = f(M, R)$$

På engelska benämns dessa funktioner *attenuation relationships*, eller *Ground Motion Prediction Equations* (GMPE). Vid utvärdering av markresponsen för en studerad geografisk plats, så måste dessa väljas med omsorg eftersom de har utvecklats för specifika förhållanden. Det finns således en stor mängd olika GMPE och utvecklingen av dessa är ett forskningsområde i sig. I [14] jämförs den registrerade responsen $S_A(T=1s)$ från Chi-Chi-jordbävningen i Taiwan 1999 med en GMPE utvecklad av Campbell och Bozorgnia, se Figur 2.8 nedan.



Figur 2.8 Jämförelse av GMPE och registrerad respons $S_A(T=1s)$ för Chi-Chi-jordbävningen 1999 i Taiwan [14].

Notera att en GMPE beskriver medelresponserna av jordbävningen vid olika avstånd och att den registrerade responserna har en spridning kring medelvärdet. Markdämpningsekvationerna specificerar även standardavvikelsen vilket gör det möjligt att göra en probabilistisk bedömning av markskakningsresponserna för ett givet jordbävningsscenario, d.v.s. $P(Y > y | M_j, R_k)$. Nedan, i Figur 2.9, illustreras detta schematiskt. Markskakningsparametern som undersöks är PGA och sannolikheten som söks är $P(PGA > 1g | M_j, R_k)$. Denna sannolikhet utvärderas i sin tur för tre stycken jordbävningsscenarioer: $M_j = \{6.5\}$ tillsammans med $R_k = \{3, 10, 30\}$ km.



Figur 2.9 Schematisk illustration av sannolikheten att PGA överskrider 1g vid olika avstånd från epicentrum, för en jordbävning med magnitud 6.5 [14].

Sannolikheten beräknas alltså utifrån osäkerheten i förmågan hos vald GMPE att beskriva hur markskakningen dämpats ut vid platsen som studeras. Det ska tilläggas att markdämpningsekvationer idag oftast har fler ingående parametrar än bara magnitud och avstånd.

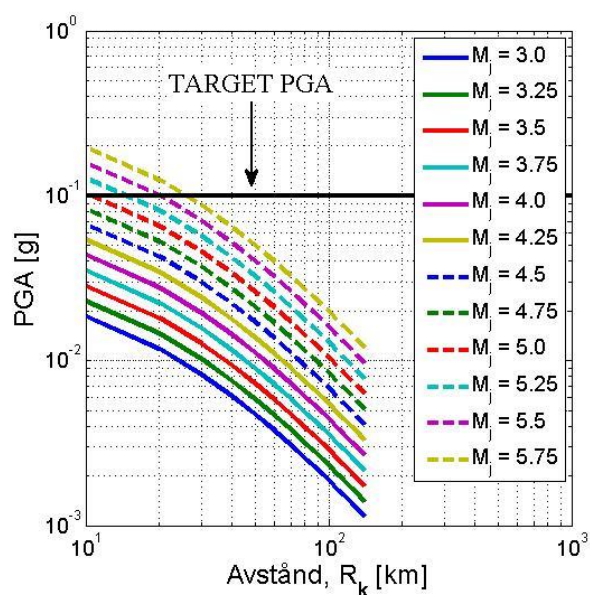
För att återgå till PSHA-exemplet som utförs för Lund, så används följande GMPE (Cornell et al., 1979) [14] för samtliga jordbävningsscenarioer M_j, R_k för beräkning av medelvärdet av PGA:

$$\overline{\ln PGA} = -0.152 + 0.859 \cdot M_j - 1.803 \cdot \ln(R_k + 25)$$

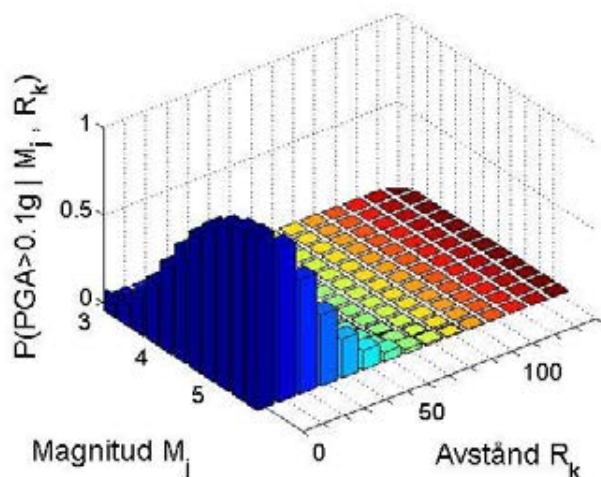
Standardavvikelsen av $\ln PGA$ är 0.57 och sannolikheten som söks är:

$$P(PGA > 0.1g | M_j, R_k)$$

Medelvärdena av markdämpningsekvationerna ovan presenteras i Figur 2.10. Sannolikheten att respektive jordbävningsscenario överskrider 0.1g presenteras i Figur 2.11. För hur sannolikheten $P(PGA > 0.1g | M_j, R_k)$ beräknas, hänvisas läsaren till [14].



Figur 2.10 Medelresponsen av PGA för olika avstånd och magnituder baserat på GMPE (Cornell et al, 1979), samt "Target PGA" = 0.1g.



Figur 2.11 Diskret fördelning av sannolikheten att PGA överskrider 0.1g i Lund vid olika jordbävningsscenarioer M_j, R_k .

2.1.4 Kombinerad sannolikhet och summering av faran

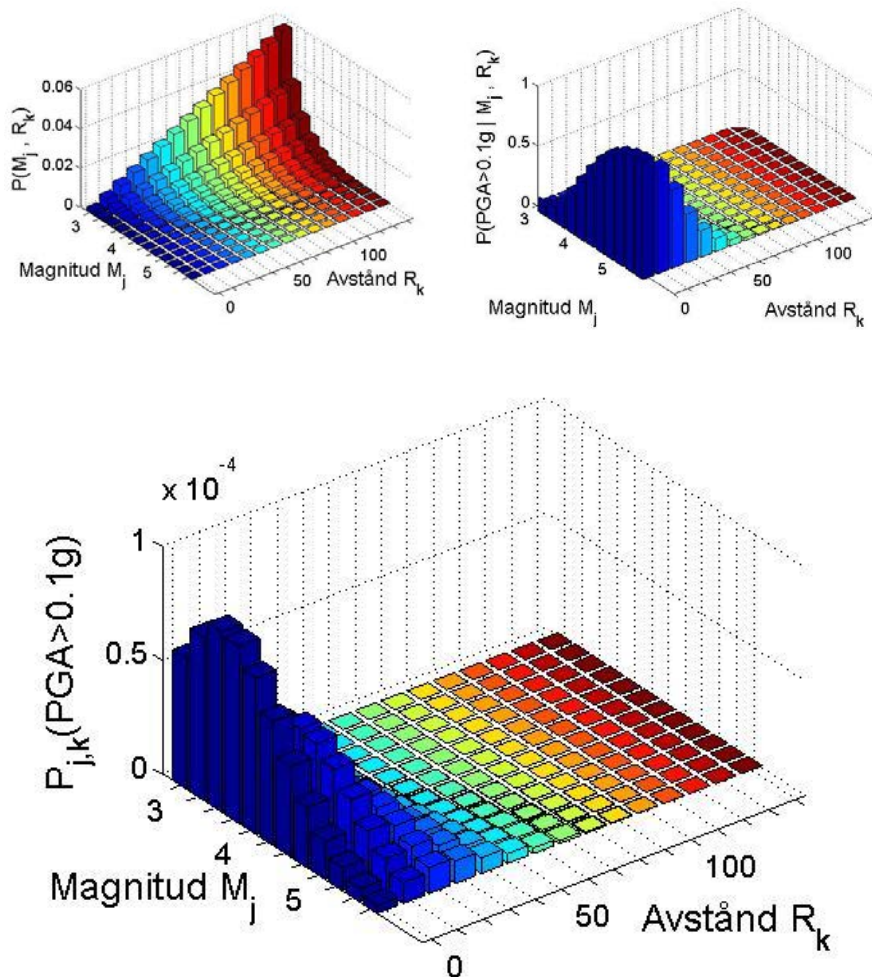
Sannolikheten för följande två scenarier kombineras i en PSHA:

- Om en jordbävning inträffar, så är jordbävningen av magnitud M_j och ligger på ett avstånd R_k från platsen som studeras.
- Markskakningsresponsen Y överskrider ett värde y , för ett jordbävningsscenario M_j, R_k .

Detta kan skrivas som:

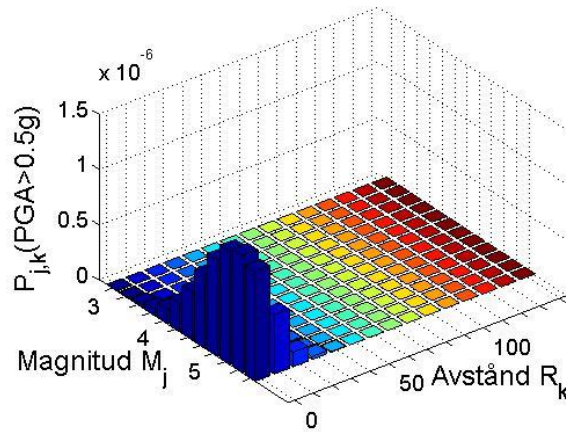
$$P_{j,k}(Y > y) = P(Y > y | M_j, R_k) \cdot P(M_j, R_k)$$

Den gemensamma sannolikheten för respektive jordbävningsscenario visualiseras i Figur 2.12, tillsammans med de ingående fördelningarna för exemplet med $\text{PGA} > 0.1\text{g}$ i Lund.



Figur 2.12 Diskret fördelning av sannolikheten att PGA överskrider 0.1g i Lund (längst ner) som är den gemensamma för de ingående fördelningarna (ovan).

Vi kan tolka Figur 2.12 som att om PGA överskrider 0.1 g i Lund så är det mest sannolikt att jordbävningen sker väldigt nära Lund och med en relativt liten magnitud. Men vi kan utföra samma beräkningar igen, fast den här gången undersöka sannolikheten att PGA överskrider 0.5g. Resultaten presenteras i Figur 2.13 och vi ser att om PGA överskrider 0.5g, så är det mest sannolikt att jordbävningen sker med relativt stor magnitud.



Figur 2.13 Diskret fördelning av sannolikheten att PGA överskrider 0.5g i Lund. Magnituder större än 5 bidrar mest till faran.

I en PSHA så summeras sannolikheterna $P_{j,k}(Y > y)$ för samtliga jordbävningsscenarior M_j, R_k :

$$P(Y > y) = \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} P_{j,k}(Y > y)$$

För $P(PGA > 0.1g)$ så är den här summeringen inget annat än en summering av staplarna i Figur 2.12. Sannolikheten baseras dock på premissen att en jordbävning har inträffat. För att beskriva den seismiska faran, som beskrivs av en årlig överskridandefrekvens $\lambda(Y > y)$, så multipliceras resultaten med jordbävningskällans årliga frekvens av jordbävningar med magnitud större än M_{min} :

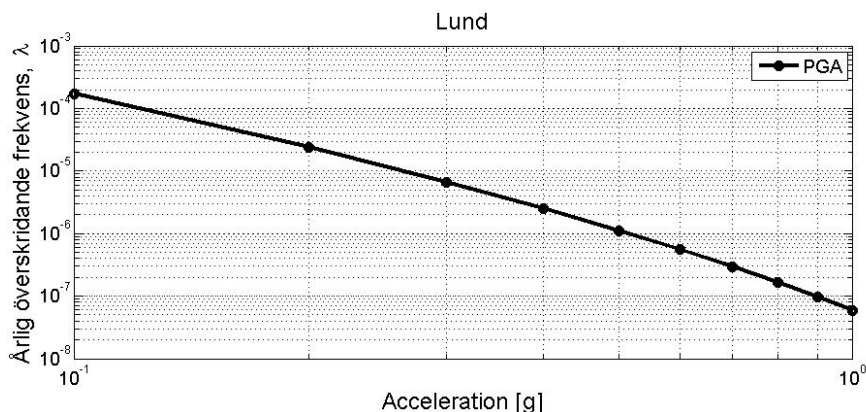
$$\lambda(Y > y) = \lambda(M > M_{min}) \cdot \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} P_{j,k}(Y > y)$$

För fallet i Lund, där faran som undersöks är $\lambda(PGA > 0.1g)$, så blir resultatet:

$$\lambda(PGA > 0.1g) = 1.71 \cdot 10^{-4} / \text{år}$$

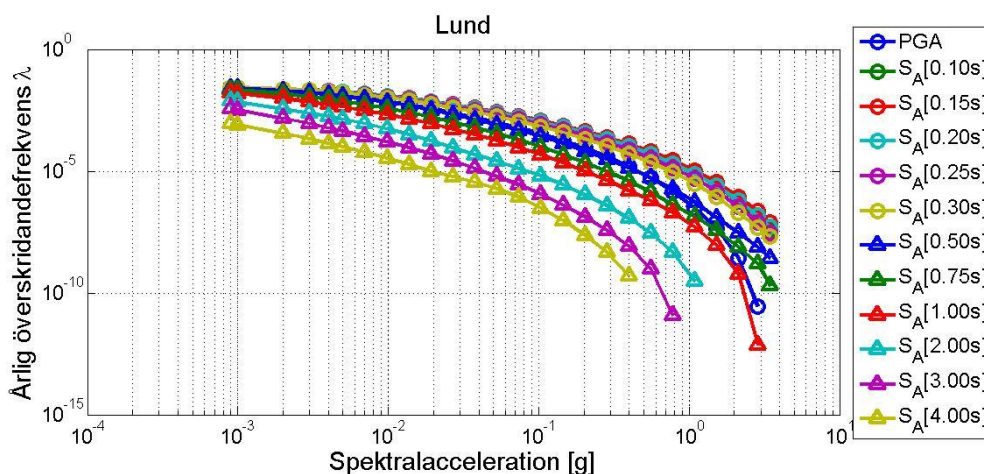
Detta baseras på AS-modellens aktivitet $\lambda(M > M_{min}) \approx 1.5 \cdot 10^{-1} / \text{år}$, enligt Gutenberg-Richter-sambandet i Figur 2.2.

Processen repeteras för ett antal värden på PGA som är av intresse. Som exempel beräknas här överskridandefrekvensen $\lambda(PGA > y)$ för 10 olika värden på y mellan 0.1g och 1.0g. Resultaten presenteras som en överskridandekurva, där överskridandefrekvensen av PGA är en funktion av PGA, se Figur 2.14.



Figur 2.14 Årliga överskridandefrekvenser av PGA i Lund baserat på AS-modellen och GMPE (Cornell et al, 1979).

Kurvor likt den i Figur 2.14, som på engelska kallas *Hazard Curves*, beräknas för samtliga markskakningsparametrar av intresse, $S_A(T=1s)$, $S_A(T=2s)$ etc. På grund av det omfattande arbetet som detta kräver görs inte detta för exempelmodellen som presenterats här. Men i Figur 2.15 visas de överskridandekurvor som beräknats i SHARE-projektet för koordinater i Lund. Det bör dock påpekas att SHARE har använt sig av andra aktivitetsmodeller och GMPE än de som använts i exempelmodellen som presenterats här.



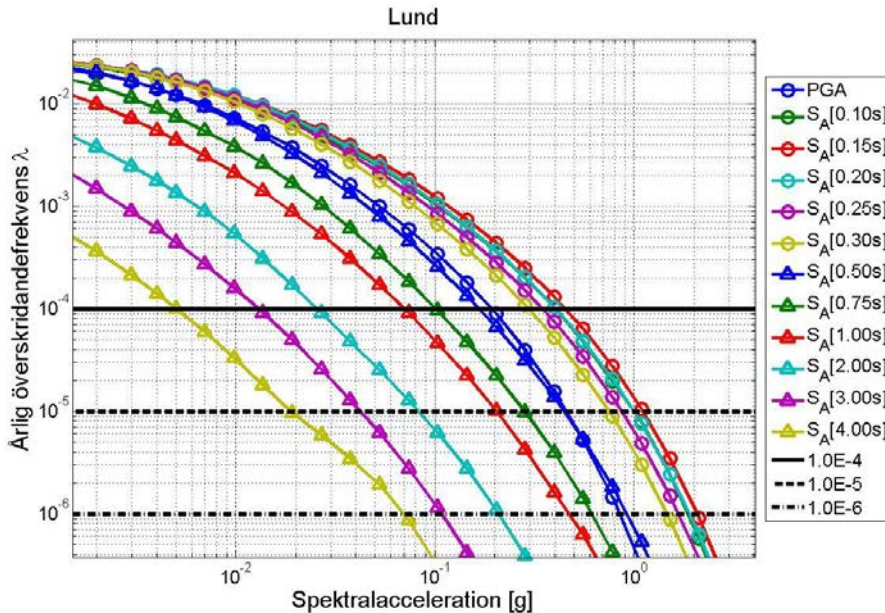
Figur 2.15 Årliga överskridandefrekvenser av spektralaccelerationer i Lund enligt SHARE.

Slutligen, det är möjligt att andra jordbävningsskällor utanför AS-modellen i det här exemplet bidrar till den seismiska faran i Lund. Det kan röra sig om exempelvis förkastningszoner, eller intilliggande AS-modeller. Om antalet källor som identifierats är N_s så utförs ovanstående beräkningar N_s gånger, en gång för respektive källa, och resultaten (faran) summeras för samtliga markskakningsparametrar:

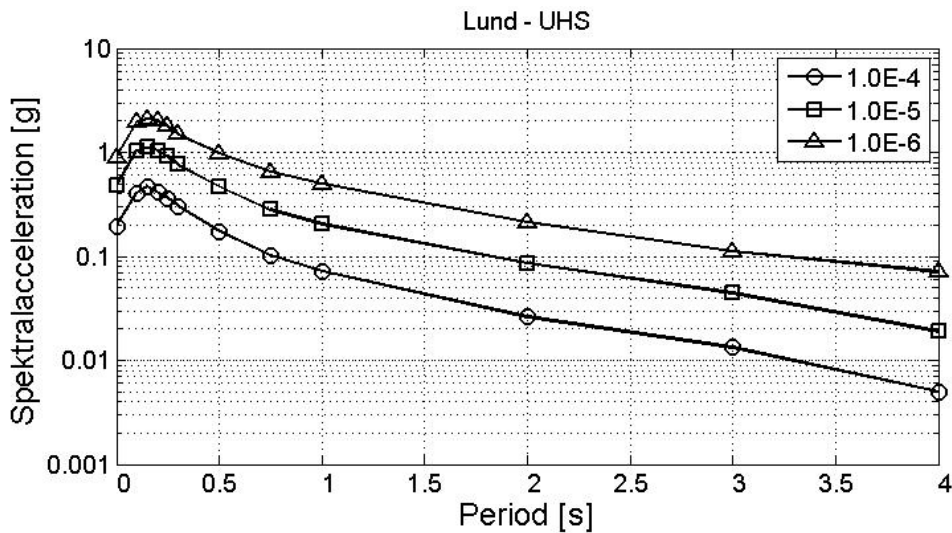
$$\lambda(Y > y) = \sum_{i=1}^{N_s} \lambda_i(M_i > M_{min}) \cdot \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} P_{i,j,k}(Y > y)$$

2.1.5 Uniform hazard spectrum

Ofta presenteras resultaten från PSHA även i form av så kallade *Uniform Hazard Spectrum* (UHS). Dessa består av en samling av spektralaccelerationer som alla har samma årliga överskridandefrekvens. Dessa kan hämtas direkt från kurvorna för respektive spektralacceleration. Som exempel interpoleras värden för $\lambda(Y > y) = 1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$ och $1 \cdot 10^{-6}$ ur kurvorna i Figur 2.16 som sedan assembleras till tre stycken UHS i Figur 2.17.



Figur 2.16 Interpolerade spektralaccelerationer korsar linjerna 10^{-4} , 10^{-5} och 10^{-6} .



Figur 2.17 UHS i Lund baserat på interpolerade accelerationer i överskridandekurvorna.

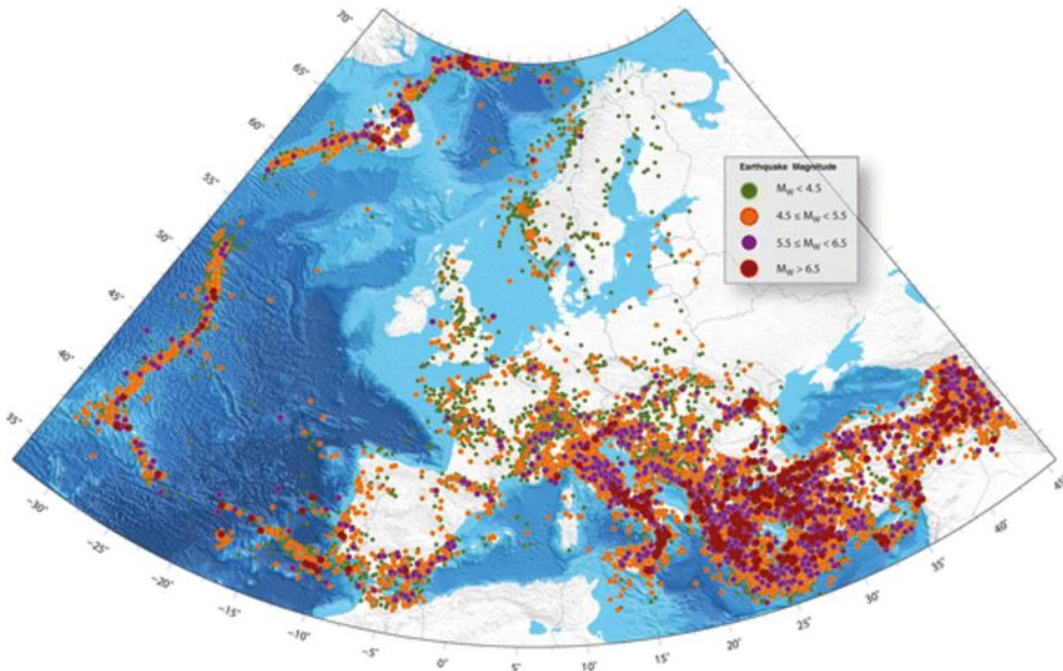
3. The European Seismic Hazard Model (ESHM13)

3.1 Allmänt

Under 1990-talet tog man för första gången ett samlat grepp att försöka harmonisera PSHA-metoderna för hela den europeiska kontinenten [16]. Resultatet från det arbetet utgjorde en viktig grund för de nationella tillämpningarna i den första utgåvan av Eurokod 8 [4] år 2004. Emellertid kvarstod flera grundläggande problemställningar, exempelvis att man inte fullt ut lyckats samordna de tillämpade procedurerna för de olika länderna och inte heller att harmonisera data över de nationella gränserna. Ett viktigt syfte med projektet *Seismic Hazard Harmonization in Europe* (SHARE) var därför att försöka överbrygga sådana skillnader och dessutom dra nytta av den samlade erfarenheten från senare års utveckling av PSHA-procedureerna. SHARE-projektet erhöll finansiering inom det sjunde ramprogrammet (FP7) hos Europeiska kommissionen och genomfördes under åren 2007 till 2013. I SHARE-projektet deltog ledande experter från 18 forskningsinstitut i 12 länder. Centralt i projektet ingick mer än 50 forskare från olika discipliner, exempelvis inom seismologi, geologi, geodesi, byggnadsteknik och statistik. Vidare inkluderades även bidrag från cirka 250 ledande europeiska och andra internationella experter. Dessutom var även CEN/TC250/SC8-kommittén direkt inblandad i projektet och definierade bland annat indata av relevans för en kommande revidering av Eurokod 8 [4].

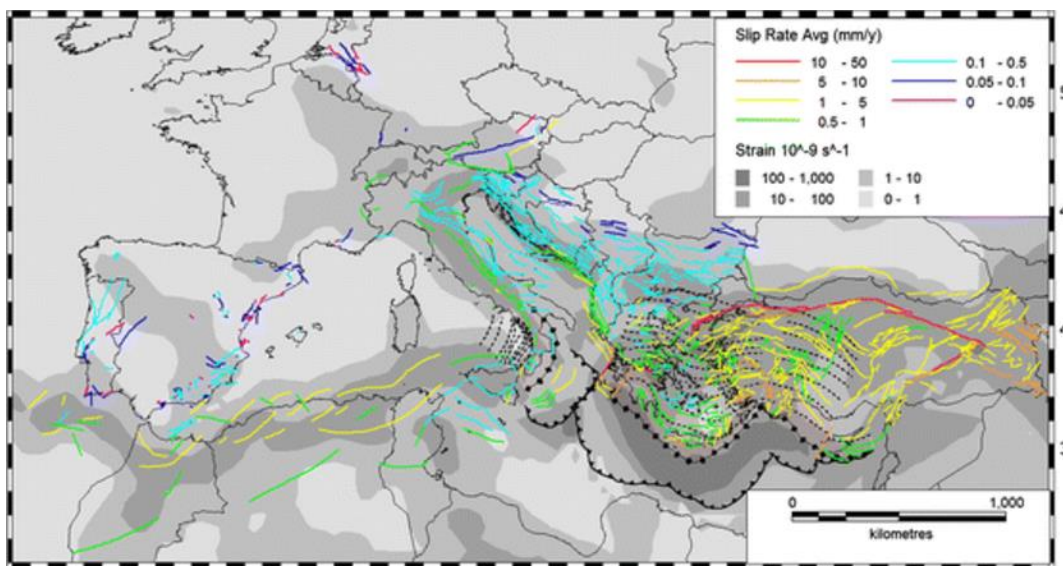
SHARE-projektet resulterade i *The 2013 European Seismic Hazard Model* (ESHM13) [17], som är en seismisk modell för beskrivning av seismiska faran över hela Europa och Turkiet. Denna modell är baserad på homogena och samordnade data utan att vara begränsade av nationella gränslinjer och med en vetenskaplig koordinering av de olika inblandade disciplinerna.

Det statistiska underlaget som ESHM13 [17] bygger på utgörs av harmoniserad data i form av en jordbävningsskatalog och en databas över förkastningar i Europa. Att datan är harmoniserad innebär att man har eliminerat skillnader i nationella metoder för hur jordbävningar och förkastningar registreras. Jordbävningsskatalogen SHEEC (*SHARE European Earthquake Catalogue*) innehåller cirka 30 000 jordbävningar som inträffat mellan år 1000 och 2006 med magnituder i intervallet $1.7 \leq M_w \leq 8.5$, se Figur 3.1.



Figur 3.1 Jordbävningsskatalogen SHEEC över inträffade jordbävningar år 1000 till 2006 [17]

Databasen EDSF (*The European Database of Seismogenic Faults*) innehåller förkastningar kapabla att försaka jordbävningar med magnitud $M_w \geq 5.5$. Detta innebär att databasen främst omfattar förkastningar i och omkring Medelhavet och att eventuella förkastningar i Sverige därmed inte ingår, se Figur 3.2.



Figur 3.2 Databasen EDSF över jordbävningförkastningar omkring Medelhavet [17]

3.2 PSHA-procedurer i SHARE-projektet

3.2.1 Allmänt

PSHA-processen som beskrivits i avsnitt 1 ska endast ses som en översiktlig introduktion av PSHA i allmänhet och inte uppfattas som en redovisning av den omfattande PSHA som utförts i SHARE-projektet.

Aktivitetsmodellerna som använts för att beräkna sannolikheten för olika jordbävningsscenarier i SHARE beskrivs i avsnitt 3.2.2.

Förutsättningarna för framtagning av markskakningsmodellerna i SHARE och strategin för urvalet av de olika markdämpningsekvationerna (GMPE) redovisas i avsnitt 3.2.3.

I avsnitt 3.2.4 åskådliggörs principerna för hur resultaten i SHARE efterbehandlats i den här rapporten med syftet att generera UHS för låga överskridandefrekvenser.

Hur osäkerheterna i PSHA-processen hanteras redovisas i avsnitt 3.2.5.

3.2.2 Modell för jordbävningsaktivitet

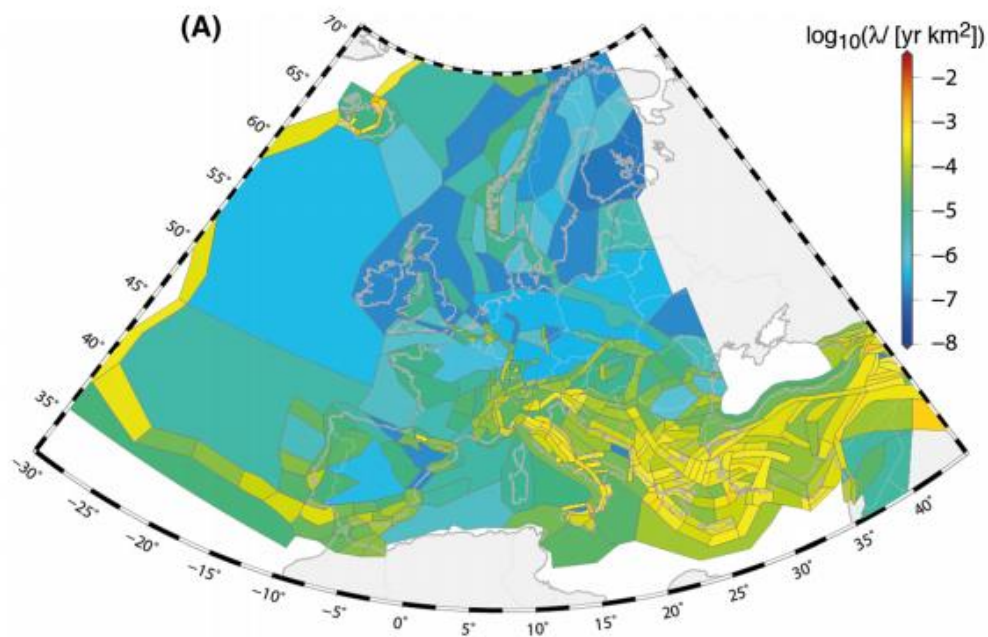
I SHARE har jordbävningsaktiviteten modellerats utifrån tre *source models* som på olika sätt hanterar information för att beräkna uppkomsten av framtida jordbävningar:

- **Area Source model (AS)**
- **Fault Source and BackGround model (FSBG)**
- **SEIsmicity and accumulated FAult moment (SEIFA)**

Att man i SHARE utvecklat tre olika modeller grundar sig i osäkerheten i hur man på bästa sätt spatialt fördelar framtida jordbävningsscenarier. Således representerar respektive modell ett alternativ för detta och slutresultaten (den seismiska faran) viktas som en del av ett större viktningsschema, ett så kallat *logiskt träd*, vilket beskrivs i avsnitt 3.2.5.

AS-modellen

I AS-modellen definieras jordbävningskällorna som polygon över europakartan (*Area Source Zones, ASZ*), se Figur 3.3. Indelningen i zoner görs utifrån de olika europeiska regionernas förutsättningar avseende seismologi, tektonik och geologi. Zonindelningen har delvis baserats på nationella indelningar enligt tidigare utredningar och sedan harmoniserats vid landsgränser.

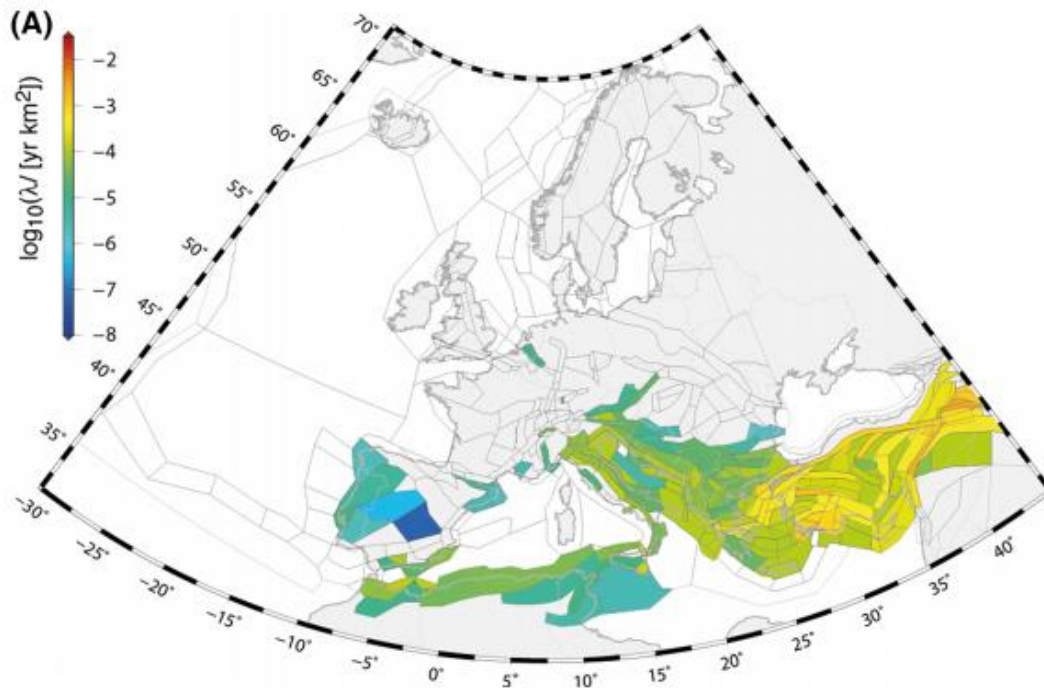


Figur 3.3 Årlig aktivitet av jordbävningar med $M_w > 4.5$ /år och km^2 inom respektive ASZ i AS-modellen [17]

Jordbävningensaktiviteten inom respektive ASZ i AS-modellen definieras som homogen över hela zonen, d.v.s. en jordbävning kan ske var som helst i en ASZ ner till ett djup på 40 km. Aktiviteten, d.v.s. den statistiska magnitud-frekvens-fördelningen, bestäms individuellt inom respektive ASZ baserat på det statistiska underlaget i SHEEC eller av regionala experter för zoner som saknar seismisk aktivitet i SHEEC. I Figur 3.3 redovisas jordbävningensaktiviteten inom respektive ASZ som antalet jordbävningar med momentmagnitud $M_w > 4.5$ per år och kvadratkilometer. Notera en väsentligt högre aktivitet i Skåne och på västkusten jämfört med övriga Sverige.

FSBG-modellen

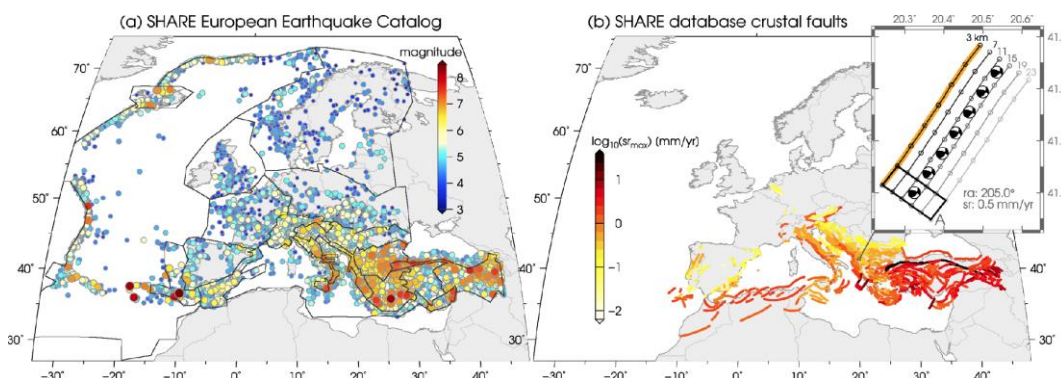
I FSBG-modellen baseras aktiviteten främst på glidhastigheten mellan två ytor vid dokumenterade förkastningar. Vidare delas kartan upp i *Background Zones*, likt AS-modellen, där en eller flera förkastningar ingår i varje polygon. Underlaget av förkastningar som utgörs av EDSF täcker dock endast delar av Europa vilket innebär att områden som saknar förkastningar i EDSF använder ASZ enligt AS-modellen istället för background zones i FSBG-modellen. Så är fallet i hela norra Europa inklusive Sverige. I Figur 3.4 visas samtliga Background Zones i FSBG-modellen. Notera att jordbävningensaktiviteten i Sverige är odefinierad men att zonindelningen för områden som inte täcks av FSBG-modellen följer ASZ i AS-modellen. Aktiviteten i dessa zoner definieras alltså utifrån AS-modellen.



Figur 3.4 Årlig aktivitet av jordbävningar med $M_w > 4.5/km^2$ inom respektive Background Zone i FSBG-modellen [17]

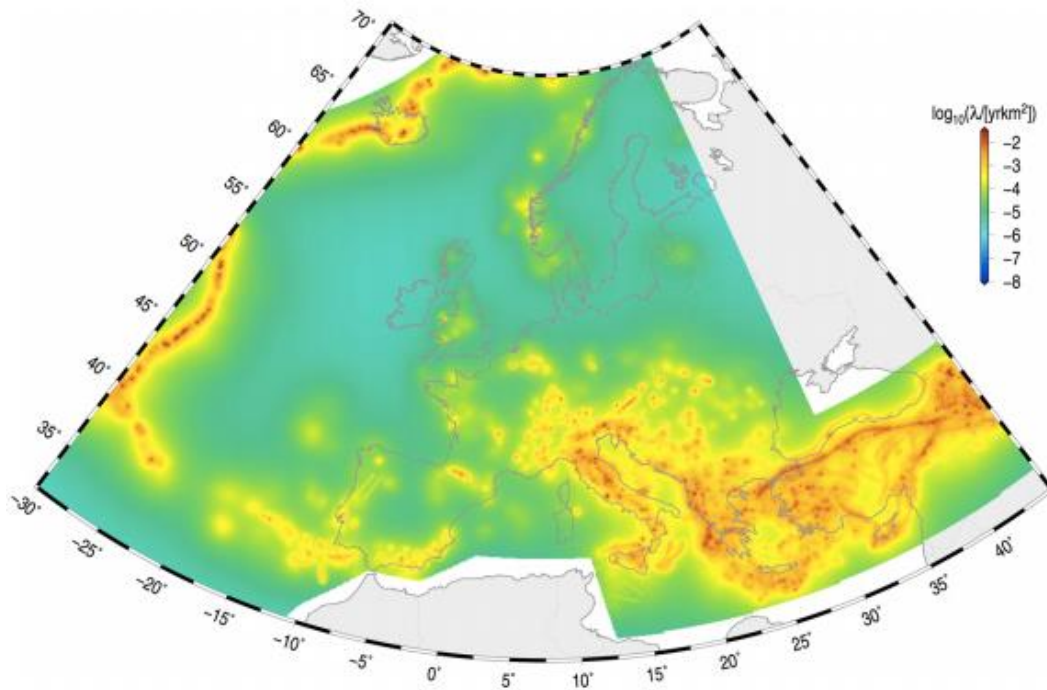
SEIFA-modellen

SEIFA är en icke-zonbaserad modell där den spatiala magnitud-frekvens-fördelningen är baserad på densiteten av jordbävningar i SHEEC-katalogen samt glidhastigheten vid registrerade förkastningar i EDSF, se Figur 3.5.



Figur 3.5 Registrerade event i SHEEC (vänster) och registrerade förkastningar i EDSF (höger) [18]

Den spatiala magnitud-frekvens-fördelningen är kontinuerlig över Europa med högre sannolikheter av jordbävningar lokalt vid förkastningar samt registrerade jordbävningar. Det är således ett grundläggande antagagande att framtida jordbävningar troligtvis sker i närheten av förkastningar och tidigare jordbävningar, vilket skiljer sig från ansatsen med homogen aktivitet inom zoner i AS-modellen. Figur 3.6 visar årliga jordbävningsaktiviteten per kvadratkilometer ($M_w > 4.5$) i Europa enligt SEIFA-modellen. Notera relativt jämn aktivitet över hela Sverige.



Figur 3.6 Årlig aktivitet av jordbävningar med $M_w > 4.5/\text{km}^2$ enligt SEIFA-modellen [17]

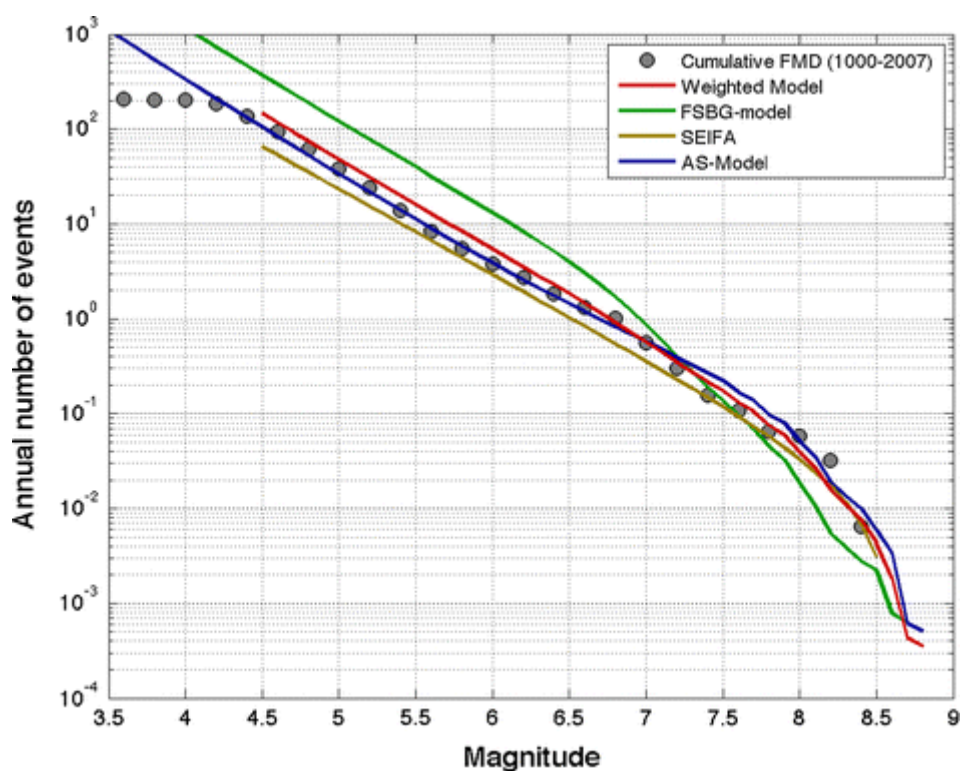
Viktning av aktivitetsmodeller

Varje jordbävningsscenario som producerats av respektive aktivitetsmodell viktas enligt ett schema beroende på modell AS/FSBG/SEIFA (0.5/0.2/0.3). Vikterna avspeglar experternas förtroende i respektive modell för jordbävningar med återkomsttider mellan 475 och 2475 år. Således är viktningsschemat inte nödvändigtvis det mest lämpliga för återkomsttider på över 10 000 år, vilka behandlas i den här rapporten. Man konstaterar i SHARE-projektet att förtroendet för SEIFA-modellen minskar med långa återkomsttider. Med anledning av detta har SHARE-projektet tagit fram kartor över seismiska faran för återkomsttider större än 2475 år med ett annat viktningsschema, varvid SEIFA reduceras till 0,1 till förmån för AS och FSBG som ökar till 0.6 respektive 0.3. Den numeriska utdatan i form av seismiska överskridandekurvor som ges ut på webbportalen (www.efehr.org) beräknas dock med viktningsschemat enligt ovan (0.5/0.2/0.3). För kärnkraftstillämpningar då återkomsttiderna är i storleksordningen 10 000 – 100 000 år minskar alltså förtroendet för SEIFA-modellen. Detta återges dock inte i resultaten som presenteras i den här rapporten eftersom dessa baseras på överskridandekurvorna enligt webbportalen.

I detta sammanhang bör nämnas att i praktiken får AS-modellen en dominerande vikt för Skandinavien eftersom inga förkastningar har identifierats inom detta område. Background zones inom FSBG-modellen har för regioner utan förkastningar ersätts med aktivitetsmodeller enligt AS-modellen.

Genom att summera jordbävningens aktivitet som beräknats i respektive modell från samtliga källor kan dessa jämföras med den kumulativa magnitud-frekvens-fördelningen för hela SHEEC-katalogen (för tidsperioden år 1000-2006) för att få en global översikt över hur bra modellerna stämmer överens med observerade jordbävningar. Detta görs i [17] som återges i Figur 3.7. Man konstaterar att eftersom den viktade globala modellen matchar observationerna väl så ger viktningsschemat en bra beskrivning av modellosäkerheten. Man medger dock att viktningsschemat kan ge sämre matchning vid mer regionala analyser, exempelvis för Skandinavien där inga bidrag till den seismiska faran från förkastningar är beaktade och man därmed får förlita sig till den homogent fördelad aktivitet enligt AS-modellen.

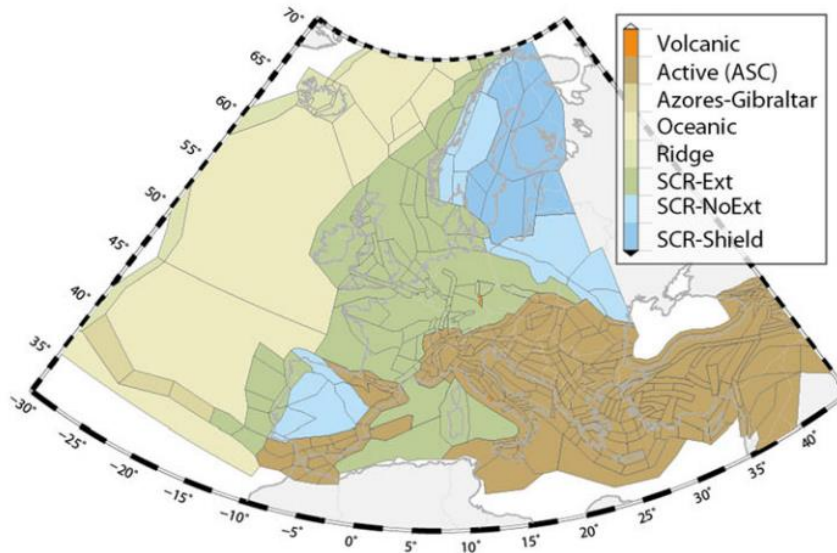
Hur vikterna i praktiken hanteras enligt ett logiskt träd beskrivs i avsnitt 3.2.5.



Figur 3.7 Årlig jordbävningens aktivitet för respektive aktivitetsmodell samt den viktade modellen AS/FSBG/SEIFA (0.5/0.2/0.3). Aktiviteten redovisas tillsammans med den kumulativa magnitud-frekvens-fördelningen av registrerade jordbävningar i SHEEC [17].

3.2.3 Modell för markskakningsrespons

Urvalet av markdämpningsekvationer (GMPE) baseras i SHARE på den tektoniska regionalisering som genomförts i projektet och som redovisas i Figur 3.8.



Figur 3.8 Tektonisk regionalisering för selektion av GMPE

De GMPEs som slutligen valdes ut bedömdes vara representativa för beräkning av markskakningsresponsen för samtliga magnituder, djup och distansintervall, givet de tektoniska och geologiska förutsättningar som gäller i Europa. En databas byggdes upp, bestående av 13500 accelerogram vid 3708 stationer från 2268 olika inträffade jordbävningar över hela världen, bland annat från Europa, Mellanöstern, Kalifornien och Japan.

Strategin för urvalet av GMPEs kan sammanfattas i 6 steg:

1. Först valdes ett antal GMPEs ut såsom preliminärt lämpliga för de olika tektoniska regionerna i Europa.
2. Baserat på ett förutbestämt antal kriterier gjordes en första utvärdering av experter inom ämnesområdet.
3. Oberoende tester och simuleringar genomfördes med användning av de utvalda GMPEs.
4. Baserat på resultaten av steg 2 och 3 togs ett viktningsschema fram.
5. Känslighetsanalyser genomfördes av viktningsschemat från steg 4 i ett logiskt träd för respektive tektonisk region.
6. Specificering av ett slutligt viktningsschema för det logiska trädet.

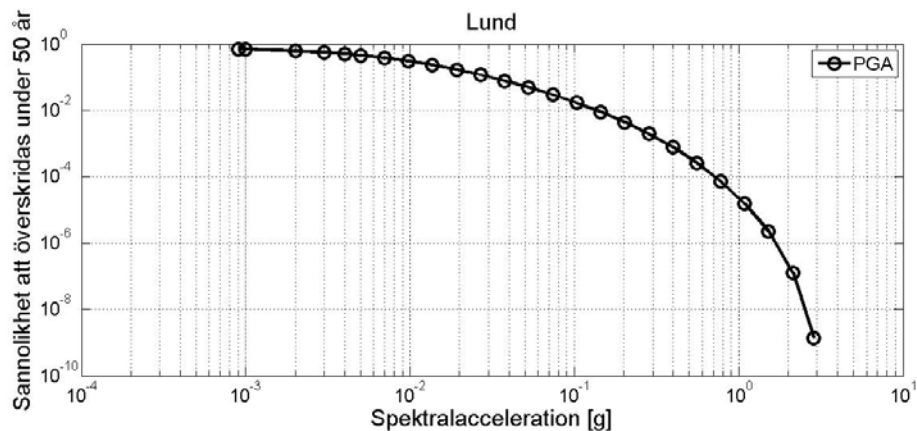
Slutligen valdes 14 stycken GMPEs ut för användning i det logiska trädet. Av dessa tillämpades 5 stycken för det tektoniska området *Stable Continental Regions* (SCR), i vilket norra Europa ingår, se vidare det logiska trädet i Figur 3.16.

De utvalda GMPEs har antingen utvecklats eller kalibrerats för en medelskjuvvågshastighet $v_{s,30} = 800$ m/s. Detta motsvarar nedre gränsen för vad som karakteriseras som *berg eller bergliknande* geologiska formationer (Klass A) i Eurokod 8 [4]. I normen görs ingen distinktion mellan vad som ska klassas som *berg* och *hårt berg*, utan skjuvvågshastigheter $v_{s,30}$ större än 800 m/s klassificeras som berg. Resultaten i

SHARE är således anpassade enligt definitionen av *berg* i Eurokod 8 [4] vilket kan diskuteras vid jämförelse med *hard rock-spectra* i SKI Technical Report 92:3 [7].

3.2.4 Efterbehandling av resultaten i SHARE

I den allmänna metodiken för en PSHA, som beskrevs i avsnitt 1, så korrelerar de beräknade accelerationerna till årliga överskridandefrekvenser. SHARE presenterar resultaten som spektralaccelerationer som med en specificerad sannolikhet för överskridande under 50 år. Att SHARE presenterar sannolikheten för överskridande under en 50-årsperiod beror på att resultaten är anpassade till Eurokod 8 [4] där accelerationerna ska representera sannolikheten att överskridas under en byggnads livslängd, vilket brukar anses vara 50 år. Resultaten har gjorts tillgängliga via webbportalen (www.efehr.org) för en hög upplösning av längd- och breddgrader över hela Europa. Som exempel presenteras sannolikhetskurvan för PGA i Lund i Figur 3.9.



Figur 3.9 Seismisk sannolikhetskurvor för PGA, sannolikhet för överskridande under 50 år, för Lund.

Sannolikheten p_{T_L} att en acceleration med en genomsnittlig återkomsttid på T_R år överskrids under en referensperiod T_L år ges av ekvationen [19]:

$$p_{T_L} = 1 - e^{-T_L/T_R}$$

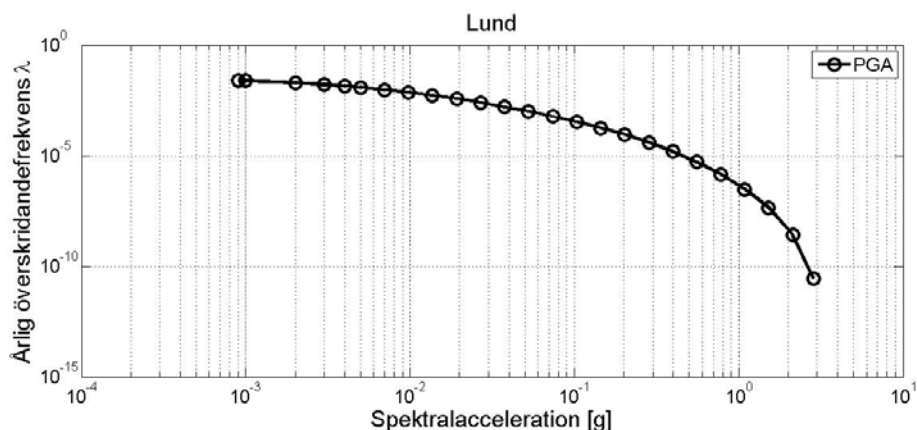
Vilket kan skrivas om som:

$$\frac{1}{T_R} = \frac{-\ln(1 - p_{T_L})}{T_L}$$

Den årliga överskridandefrekvensen definieras som $\lambda = 1/T_R$. Genom insättning i ovanstående ekvation med $T_L = 50$ år erhålls en ekvation för att räkna om sannolikheterna p_{50} i SHARE till årliga överskridandefrekvenser:

$$\lambda = \frac{-\ln(1 - p_{T_L})}{T_L} = \frac{-\ln(1 - p_{50})}{50}$$

Ovanstående ekvation används för att beräkna resultaten i SHARE till årliga överskridandefrekvenser λ , jämför Figur 3.9 och Figur 3.10.

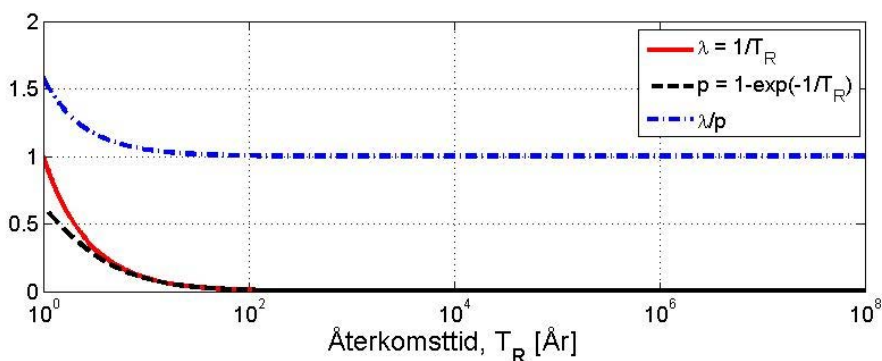


Figur 3.10 Årliga överskridandefrekvenser för PGA i Lund.

För att undvika missförstånd angående begreppen *årlig överskridandefrekvens* och *årlig sannolikhet att överskridas* bör det nämnas att båda används i seismiska sammanhang för samma ändamål: att definiera jordbävningsnivåer. Trots att den matematiska innebörden av uttrycken är olika så blir skillnaden försumbar i kärnkraftssammanhang då sannolikheten för långa återkomsttider konvergerar mot överskridandefrekvensen, d.v.s:

$$p_1 = 1 - e^{-\frac{1}{T_R}} = \frac{1}{T_R} = \lambda \quad , \text{ då } T_R \rightarrow \infty$$

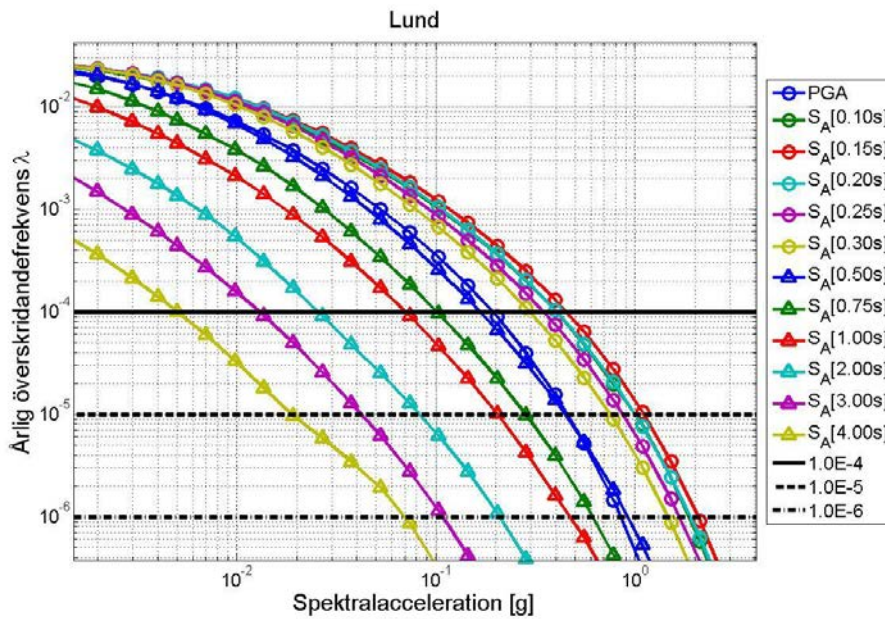
Denna konvergens sker redan för återkomsttider av storleksordningen 100 år, vilket framgår i Figur 3.11.



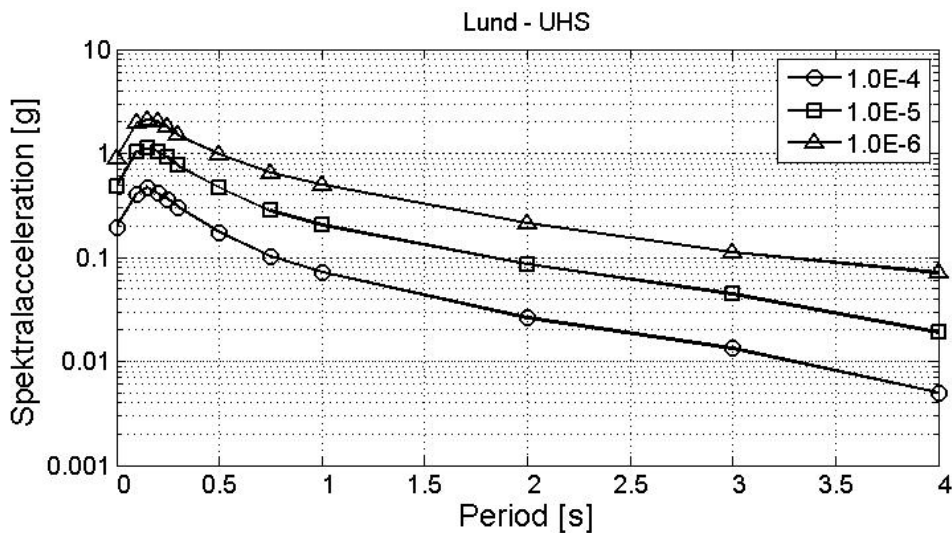
Figur 3.11 Årlig överskridandefrekvens respektive årlig sannolikhet för överskridande, som funktion av återkomsttid, T_R

Jordbävningsnivåer relaterat till SHARE för svenska kärnkraftverk definieras i den här rapporten som årliga överskridandefrekvenser λ .

På webbportalen (www.efehr.org) presenteras även UHS för återkomsttider upp till 5000 år, vilket är betydligt kortare återkomsttider än de som används i kärnkraftssammanhang. Det är dock möjligt, att utifrån sannolikhetskurvorna i SHARE-databasen [17], interpolera accelerationer för en godtycklig överskridandefrekvens och utifrån dessa assemblera ett UHS. I Figur 3.12 visas årliga överskridandefrekvenserna $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$ och $1 \cdot 10^{-6}$ som för varje spektralacceleration extraheras till ett UHS i Figur 3.13.



Figur 3.12 Seismiska överskridandekurvor för S_A och PGA, för Lund.



Figur 3.13 UHS för Lund med överskridandefrekvenser $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$ och $1 \cdot 10^{-6}$

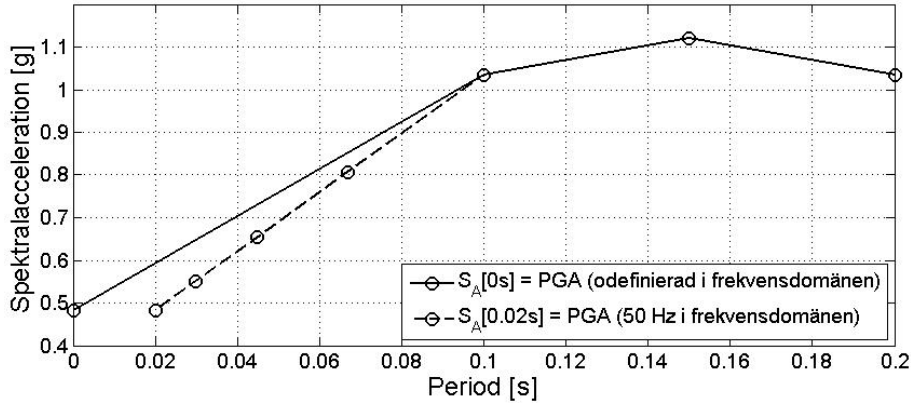
Eftersom praxis i kärnkraftsbranschen är att redovisa spektra i frekvensdomänen så beräknas perioder om till frekvenser:

$$f_n = \frac{1}{T_n}$$

Eftersom UHS erhålls från ESHM13 [17] i diskreta punkter med $S_A[T_n = 0.10s]$ närmast PGA, d.v.s. $S_A[T_n = 0s]$, så är upplösningen dålig (obefintlig) för frekvenser över 10 Hz. Vidare kan inte PGA representeras i frekvensdomänen då den korrelerar till en oändligt hög frekvens. För att komma runt detta så manipuleras PGA till att korrelera till en periodtid på 0.02s, vilket motsvarar 50Hz i frekvensdomänen:

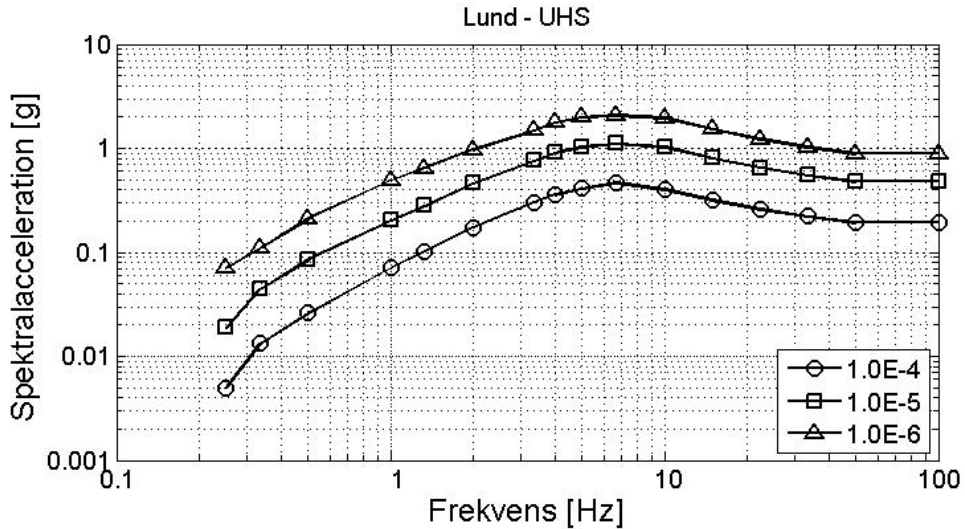
$$S_A[T_n = 0s] \rightarrow S_A[T_n = 0.02s]$$

Därefter interpoleras tre värden linjärt mellan $S_A[T_n = 0.02s]$ och $S_A[T_n = 0.10s]$ för att öka upplösningen, se Figur 3.14. Detta är ett antagande att responsen ökar linjärt med periodtiden i första delen av spektrumet (i perioddomänen) och är analogt med definitionen av elastiskt responspektrum i Eurokod 8 [4].



Figur 3.14 Ansättning av PGA till $S_A[T_n=0.02s]$ och interpolering.

Spektralaccelerationer större än 50 Hz (mindre än 0.02 s) ansätts vara konstanta och lika med PGA. Figur 3.15 visar UHS i Lund för överskridandefrekvenserna $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$ och $1 \cdot 10^{-6}$ i frekvensdomänen med hjälp av metodiken som beskrivits ovan. Samtliga UHS i den här rapporten, som framställs med hjälp av SHARE-underlaget, presenteras härnäst i frekvensdomänen, med logaritmiska axlar, enligt samma procedur.



Figur 3.15 UHS för Lund (frekvensdomänen)

3.2.5 Hantering av osäkerheter

I en PSHA finns det osäkerheter som relaterar till de modeller som används för att beräkna den slutgiltiga seismiska faran på plats. Dessa *epistemiska* osäkerheter är helt kopplade till oförmågan att på ett korrekt sätt beskriva en jordbävningssprocess och brukar skiljas från den ”naturliga variansen” då denna är helt central i en PSHA; resultaten uttrycks i sannolikheter baserat på denna osäkerhet.

De modelleringsantaganden som gjorts inom SHARE-projektet, och som leder till epistemiska osäkerheter, kan sammanfattas som:

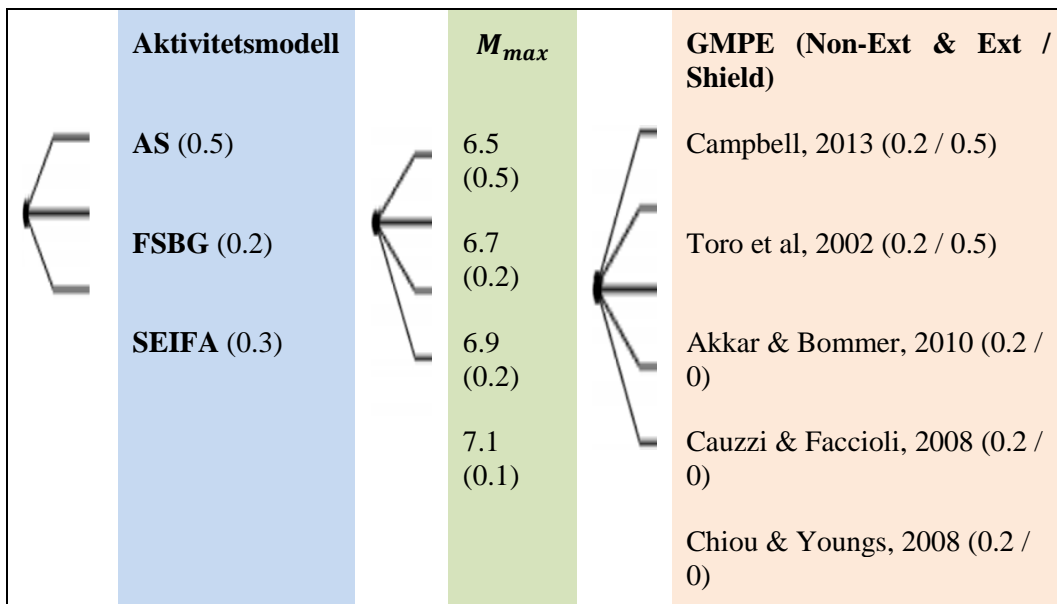
- Val av aktivitetsmodell som beskriver var och hur ofta jordbävningar med magnitud M sker. Dessa beskrevs i avsnitt 3.2.2.
- Val av maximal magnitud M_{max} . Detta avser den största möjliga jordbävningen som kan antas inträffa i ett område. Valet av M_{max} är inte trivialt, vilket påängterades i avsnitt 2.1.2, och påverkar magnitutfördelningen av jordbävningar.
- Val av markdämpningsekvation (GMPE) som beskriver marskaktionsresponsen vid studerad plats.

Osäkerheterna i dessa val hanteras i SHARE genom att utföra beräkningar för alla kombinationer av valmöjligheter, vilket effektivt leder till ett stort antal unika PSHA-processer per enskild plats som utvärderas. Denna metodik kan visualiseras med ett så kallat *logiskt träd* som ”förgrenar” sig på de tre nivåerna av modelleringsantaganden som ges i punktlistan ovan. Vid varje nivå i det logiska trädet tilldelas varje val en vikt mellan 0 och 1 som avspeglar konfidensnivån för respektive val, baserat på experternas samlade bedömning. Summan av vikterna för samtliga val vid respektive nivå är alltid lika med 1.

De utvalda GMPEs har kalibrerats för att matcha seismologiska variationer i olika regioner av Europa. Speciellt viktigt har detta arbete varit för de kontinentala delarna av Europa (*Stable Continental Regions*), i vilken Skandinavien ingår. I syfte att få en bättre uppfattning om osäkerheterna till följd av de regionala variationerna, har man genomfört känslighetsanalyser med stöd av två GMPE-modeller från östra Nordamerika, samt tre GMPE från andra jordbävningssaktiva områden med likartade geologiska förhållanden som de kontinentala delarna av Europa.

Det logiska trädet är svåröverskådligt, sett över hela SHARE-regionen, men i Figur 3.16 återges de grenar som är mest relevanta för nordeuropeiska förhållanden (*Stable Continental Regions* (SCR)). Vikten för respektive val ges inom parantes. Viktningsschemat för aktivitetsmodellerna i Figur 3.16 är det som används för resultaten som ges ut på webbplatsen (www.efehr.org). Valen av M_{max} kan skilja sig beroende på vilken aktivitetsmodell som valts och värden för M_{max} i Figur 3.16 gäller endast för AS-modellen. Viktningsschemat för GMPE varierar beroende på underkategori av SCR., d.v.s. *Shield*, *Non-extended Crust* eller *Extended Crust*, se Figur 3.8.

Man kan notera att Skåne och Halland ingår i det tektoniska området SCR- Extended Crust, med övriga Sverige ingår i SCR- Shield. Detta får till följd att de epistemiska osäkerheterna som hänförs till val av GMPE hanteras olika för Skåne/Halland jämfört med övriga Sverige.

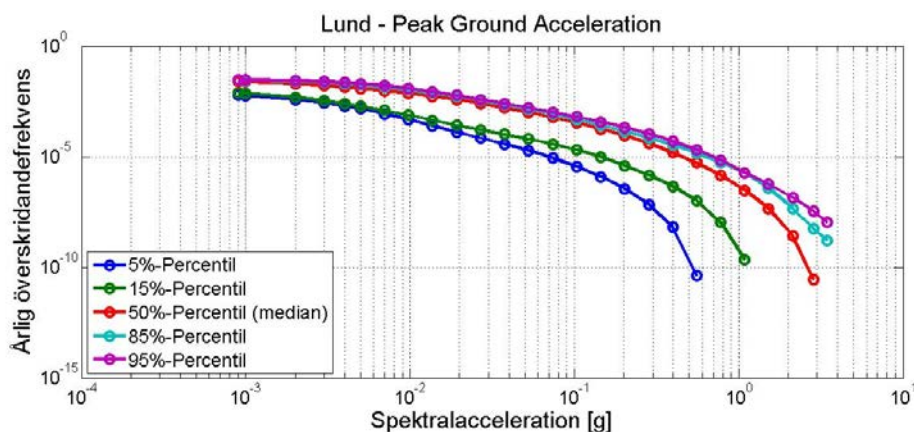


Figur 3.16 Logiskt träd för svenska förhållanden (*Stable Continental Regions*). Värden för M_{max} gäller endast AS-modellen.

Under förutsättningen att vikterna vid respektive nivå är ”korrekta”, så ger produkten av samtliga vikter, för varje unik väg igenom det logiska trädet, sannolikheten att den valda vägen beräknar en ”korrekt” probabilistisk bedömning av markresponser. Exempelvis så är konfidensnivån p för AS-modellen i ett tektoniskt område *SCR-Ext*, kombinerat med $M_{max} = 6.5$ och Campbell, 2013:

$$p = 0.5 \cdot 0.5 \cdot 0.2 = 0.05$$

Baserat på dessa sannolikheter så ges en numerisk sannolikhetsfördelning av de epistemiska osäkerheterna. På webbplatsen (www.efehr.org) så återges denna fördelning som percentiler av 5 %, 15 %, 50 %, 85 % och 95 %, se exempelvis Figur 3.17 för PGA i Lund.



Figur 3.17 Överskridandekurvor (PGA) för olika percentiler, för Lund.

För en mer övergripande beskrivning av varje nivå i det logiska trädet hänvisas läsaren till [17]. Syftet med att presentera det logiska trädet här är att redogöra för hur metodiken leder till en spridning i resultaten som är kopplad till de epistemiska osäkerheterna.

Epistemiska osäkerheter behandlas dock sällan explicit i byggnormer. I underlaget till SHARE [19] diskuteras möjligheten att använda högre percentiler för att skilja viktiga byggnader, t.ex. sjukhus från vanliga byggnader. I nuläget så används i Eurokod 8 [4] en *importance factor* γ_I som skalar en *reference peak ground acceleration* a_{gR} med en återkomsttid på 475 år till en *design ground acceleration* a_g som implicit korrelerar till en annan återkomsttid:

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$$

Tillförlitlighetskrav differentieras således (implicit) med avseende på återkomsttid men parametern a_{gR} bestäms på nationell nivå och vilken percentil eller medelvärde denna ska referera till nämns inte i normen. SHARE-projektet har dock fått det bekräftat av CEN/TC250/SC8-kommittén att a_{gR} ska referera till medianen [20].

Man bör observera att viktnings-schemat för de olika jordbävningssaktivitetsmodellerna i ESHM13 i första hand avspeglar experternas förtroende för återkomsttider upp till cirka 5000 år [17]. För längre återkomsttider bör man använda resultaten med försiktighet eftersom att låg-aktiva förkastningar i regioner med små tektoniska rörelser långt från plattgränser, som i Sverige, inte inkluderats i FSBG-modellen.

4. Markresponsspektra för svenska anläggningsområden

4.1 Dimensionerande jordbävning DBE

I WENRA Guidance dokument [21] beskrivs effekterna av en jordbävning inom samlingsuttrycket *seismotectonic hazards*, fritt översatt *seismotektoniska faror*. Seismotektoniska faror kan omfatta såväl direkta markvibrationseffekter som markbrott av typ exempelvis förkastningar, jordskred och *liquefaction* (ett vätskeliknande tillstånd som kan uppstå i vissa jordarter). Eventuella risker för markbrott ska enligt IAEA SSG-9 [9] behandlas i separata geotekniska utredningar utifrån de lokala förutsättningarna för förläggningsplatsen.

Benämningen *DBE* står för *Design Basis Earthquake* (dimensionerande jordbävning). Inom detta begrepp ingår primärt att definiera markskakningseffekter i form av *Uniform Hazard Spectra (UHS)*, men även andra eventuella seismotektoniska faror enligt ovan, för händelse att genomförda utredningar påkallar detta. Enligt WENRA [21] såväl som IAEA SSG-9 [9] ska DBE bestämmas med stöd av erkända och väl etablerade *Probabilistic Seismic Hazard Assessments (PSHA)* metoder.

IAEA SSG-9 [9] innehåller en omfattande beskrivning av de krav som ställs på beslutsunderlaget för bestämning av den dimensionerande jordbävningen (DBE), exempelvis:

- Krav på erforderliga utredningar för att klarställa de seismologiska och geologiska förutsättningarna för regionen, samt utredningar för bestämning av de geotekniska egenskaperna för det lokala anläggningsområdet.
- Krav på erforderliga utredningar för bedömning av den seismiska faran, inklusive hantering av tillhörande osäkerheter.
- Krav på metoder och tillvägagångssätt i de olika stegen av den tillämpade PSHA-metoden.
- Krav på metoder för framtagning av dimensionerande markresponsspektra och tillhörande accelerations-tidshistorier.

UHS genereras för vald markskakningsparameter (exempelvis spektralaccelerationer) och utifrån en specificerad årlig sannolikhet för överskridande av tröskelvärden, beräknade för ett antal frekvenser. Dessa UHS genereras med stöd av data över den seismiska faran, givet de geologiska och seismologiska förhållandena som gäller för den aktuella förläggningsplatsen.

I IAEA NS-G-1.6 [22], anges att den dimensionerande jordbävningen DBE (betecknad SL-2 i [22]) ska motsvara en årlig överskridandefrekvens i intervallet $1 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-5}$ vid median konfidensnivå (50%-percentilen). I IAEA NS-G-1.6 [22] såväl som i IAEA SSG-9 [9] anges även att oberoende av de lokala seismologiska och geologiska förhållandena ska den maximala markaccelerationen (*PGA-Peak Ground Acceleration*) uppgå till minst 0.1g.

Inom ramen för de europeiska stresstesterna 2011, slog ett granskningsteam från ENSREG [12] fast att yttre händelser, inklusive jordbävning, ska hanteras för händelser motsvarande en genomsnittlig återkomsttid av minst 10 000 år (en årlig sannolikhet för överskridande av $1 \cdot 10^{-4}$). För vissa regioner är accelerationerna mycket små vid denna målnivå och därför

rekommenderar man på samma sätt som IAEA att isåfall använda en lägre årlig överskridandefrekvens som ger ett horisontellt PGA minst lika med 0.1 g.

WENRA har i sina Guidance Document [23] och [21] år 2016 sammanfattat kraven på DBE utifrån vad som framkommit efter stresstesterna av de europeiska kärnkraftverken:

1. DBE ska motsvara en årlig överskridandefrekvens $\leq 1.0 \cdot 10^{-4}$. Konfidensnivån ska vara minst median (50%-percentilen).
2. Om värdet på PGA för den aktuella platsen understiger 0.1g, ska en lägre årlig överskridandefrekvens än $1.0 \cdot 10^{-4}$ användas, så att PGA blir ≥ 0.1 g.

Dessa två krav kan sägas utgöra nu gällande internationell praxis för definition av DBE vid kärntekniska anläggningar.

Som anges i 14§ i SSMFS 2008:17 [24] ska kärnkraftsreaktorer vara dimensionerade att motstå naturfenomen och andra händelser som uppkommer utanför eller inne i anläggningen och som kan leda till en radiologisk olycka. I kommentarerna till 14§ i SSMFS 2008:17 [24] anges att jordbävning är ett sådant naturfenomen som bör beaktas.

Vid dimensioneringen av Oskarshamn 3 och Forsmark 3 under 1970-talet användes markresponsspektra enligt USNRC-RG 1.60 [6]. Strålsäkerhetsmyndigheten rekommenderade i anslutning till de stora moderniseringsprogrammen under 1990- och 2000-talen att dimensionerande jordbävning i händelseklass H4 för svenska kärntekniska anläggningar ska motsvara en årlig överskridandefrekvens av $1 \cdot 10^{-5}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7]. Att den årliga överskridandefrekvensen sattes till $1 \cdot 10^{-5}$ och inte $1 \cdot 10^{-4}$, berodde på att markresponsspektra enligt SKI Technical Report 92:3 [7] understiger kravet $PGA \geq 0.1$ g för den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-4}$.

I följande avsnitt redovisas och jämförs markresponsspektra enligt USNRC-RG 1.60 [6], SKI Technical Report 92:3 [7] och ESHM13 [17] (SHARE-underlaget).

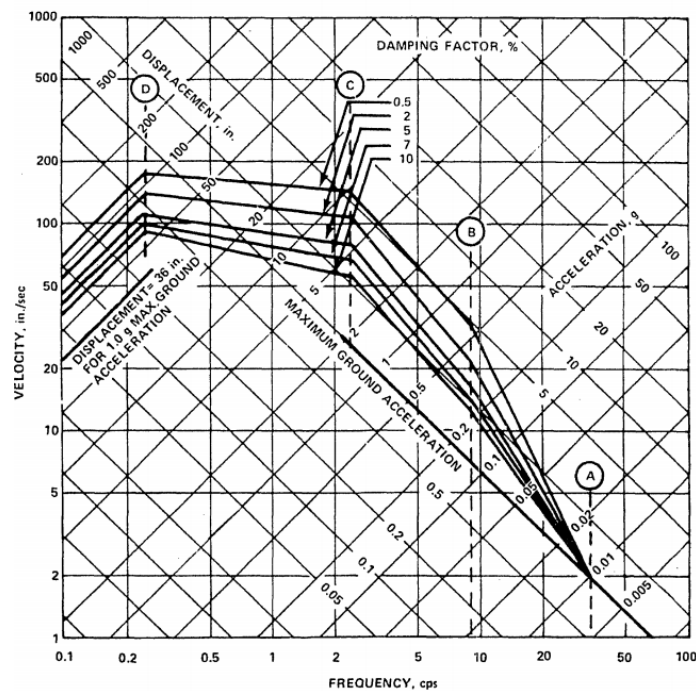
4.2 USNRC Regulatory Guide 1.60

Det är endast de äldsta svenska kärnkraftsanläggningarna Oskarshamn 3 och Forsmark 3 samt CLAB etapp 1, som inkluderar seismisk last i de ursprungliga konstruktionsförutsättningarna. Eftersom det statistiska underlaget för jordbävningar i Sverige var bristfälligt vid den tiden så användes ett standardiserat amerikanskt designspektrum enligt USNRC-RG 1.60 [6], se Figur 4.1.

Designspektrumet baseras på ett antal markresponsspektra från utvalda jordbävningar i västra USA som normaliserats med avseende på PGA. Med stöd av statistisk analys av gemensamma frekvenser för samtliga responsspektra tillsattes en statistisk (lognormal) fördelning av amplituderna vid respektive frekvens. Designspektrumet i USNRC-RG 1.60 [6] representerar en idealisering av 84.1%-percentilen (+1 standardavvikelse från medelvärdet av samtliga normaliserade responsspektra).

Den idealiserade formen på designspektrumet styrs enbart av kontrollpunkter för fyra frekvenser (A = 33Hz, B = 9Hz, C=2,5 Hz och D=0,25 Hz). För ett givet värde på PGA kan således ett designspektrum enligt USNRC-RG 1.60 [6] konstrueras genom att skala PGA vid kontrollpunkterna.

Vid dimensioneringen av Oskarshamn 3, Forsmark 3 och CLAB etapp 1 förankrades designspektrumet i 0.15 g horisontellt och 0.10g vertikalt, för 5 % kritisk dämpning.



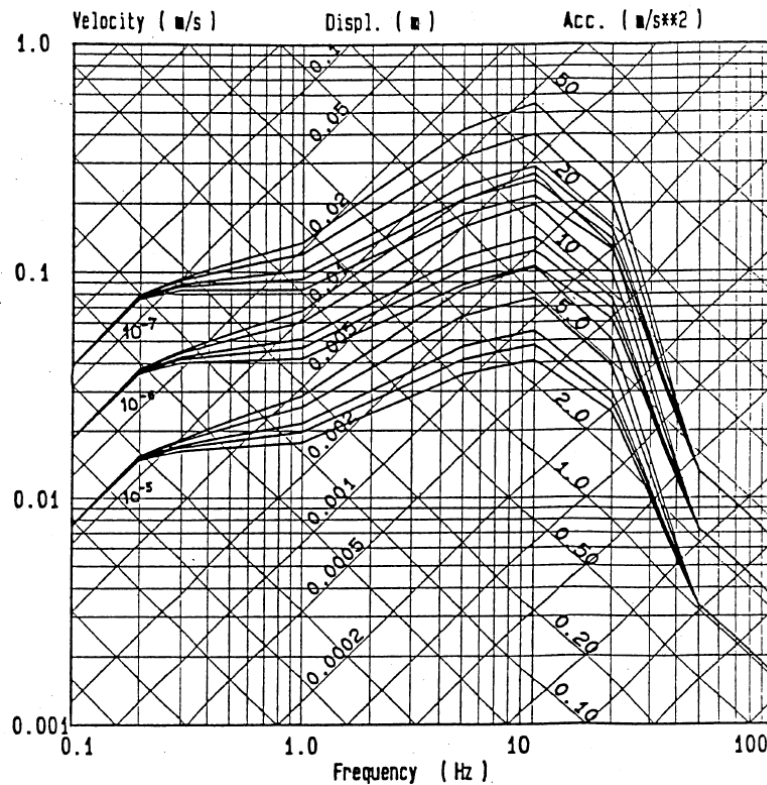
Figur 4.1 Horisontellt markresponspektrum i USNRC-RG 1.60 [6].

Ett standardiserat och idealiserat designspektrum som det i USNRC-RG 1.60 [6] är baserat på deterministiska tillvägagångssätt. Dessa skiljer sig från probabilistiskt framtagna UHS liksom de i ESHM13 [17] och SKI Technical Report 92:3 [7] på några grundläggande punkter:

- Varje spektralvärde i ett UHS med överskridandefrekvens λ har en egen sannolikhetsfördelning. Därmed kan formen på ett UHS vara olika för olika överskridandefrekvenser. Formen på designspektrumet i USNRC-RG 1.60 [6] är däremot fördefinierat och förankras vid valt PGA.
- Varje spektralvärde (t.ex. en spektralacceleration) i ett UHS beräknas utifrån jordbävningsaktiviteten och markdämpningsekvationer (GMPE) representativa för det aktuella anläggningsområdet, med bl.a. jordbävningsmagnitud och avstånd till jordbävningskällan som ingående parametrar. GMPE är empiriskt framtagna och dessa ska väljas utifrån de förhållanden som råder på den aktuella platsen. Det standardiserade designspektrumet i USNRC-RG 1.60 [6] är däremot en idealisering av responspektra som är framräknade från registrerade jordbävningar i västra USA. Därmed kan den spektrala responsen inte kopplas direkt till den seismiska faran för någon specifik plats.
- Eftersom den seismiska faran som designspektrumet i USNRC-RG 1.60 [6] karakteriserar baseras på registrerade jordbävningar med olika långt avstånd till epicentrum så kan spektrumet vara missvisande för platser där faran förväntas domineras av antingen en jordbävning i nära anslutning till platsen eller av en jordbävning långt ifrån. Ett UHS däremot, är en direkt representation av den seismiska faran på den aktuella platsen. Det är möjligt att olika jordbävningsscenarior (avstånd, magnitud) dominerar faran för olika frekvenser men formen på ett UHS är då ett resultat av detta.

4.3 SKI Technical Report 92:3

Seismisk Säkerhet var ett gemensamt forskningsprojekt med dåvarande Kärnkraftsinspektionen (SKI), Vattenfall AB, Sydkraft AB och OKG AB som deltagande parter. Syftet med projektet var bland annat att utveckla metoder för beräkning av markskakningsförlopp att användas vid analys av svenska kärnkraftverk. Projektet resulterade år 1992 i SKI Technical Report 92:3 [7] med typiska *hard rock*-spektra för årliga överskridandefrekvenser $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ och $1 \cdot 10^{-7}$, se Figur 4.2. Då data om markresponser från stora jordbävningar i Sverige är bristfälligt användes japanska markresponsspektra som modifierats för svenska *hard rock* – förhållanden.



Figur 4.2 Horisontella UHS enligt SKI Technical Report 92:3 [7].

Dessa typiska *hard rock*-spektra menade man kan representera den seismiska faran för samtliga svenska kärnkraftverk med reservation för eventuella lokala geologiska och seismologiska förhållande. Man konstaterade dock att dessa spektra kan anses vara direkt applicerbara för Ringhals kärnkraftverk men att Barsebäck måste modifieras för en sedimentär berggrund.

Efter det att projektet *Seismisk Säkerhet* avslutats genomfördes 1995 en separat utredning [25] framtagen på uppdrag av kärnkraftsindustrin och utan SKIs medverkan. En slutsats från denna utredning var att på grund av att hårdhetsvariationen mellan de övre och djupare marklagren för Ringhals och Oskarshamn avviker från motsvarande förhållanden i Japan, varifrån man utnyttjat instrumentellt registrerade accelerogram, kan man för dessa anläggningar reducera de framtagna spektra med en faktor 0.85. Oberoende av huruvida slutsatsen i [25] är relevant eller ej är den emellertid motstridig kraven i IAEA NS-G-1.6 [22] och IAEA SSG-9 [9] att oberoende av de lokala seismologiska och geologiska förhållandena för anläggningsområdet måste PGA för design alltid vara större än 0.1 g. Exempelvis, för en årlig överskridandefrekvens av $1 \cdot 10^{-5}$ är PGA lika med 0.106 g i SKI

Technical Report 92:3 [7], vilket med en reduktionsfaktor av 0.85 skulle innebära att PGA blir mindre än 0.1 g.

ENSREG granskade SKI Technical Report 92:3 [7] i anslutning till de europeiska stresstesterna. De ifrågasatte i [8] bland annat den korta tidsperioden (ca 500 år) av historiska data som UHS i SKI Technical Report 92:3 [7] baseras på, inte minst på grund av att geodetiska och paleoseismiska data indikerar aktiva postglaciala uppåtriktade rörelser i Fennoskandia.

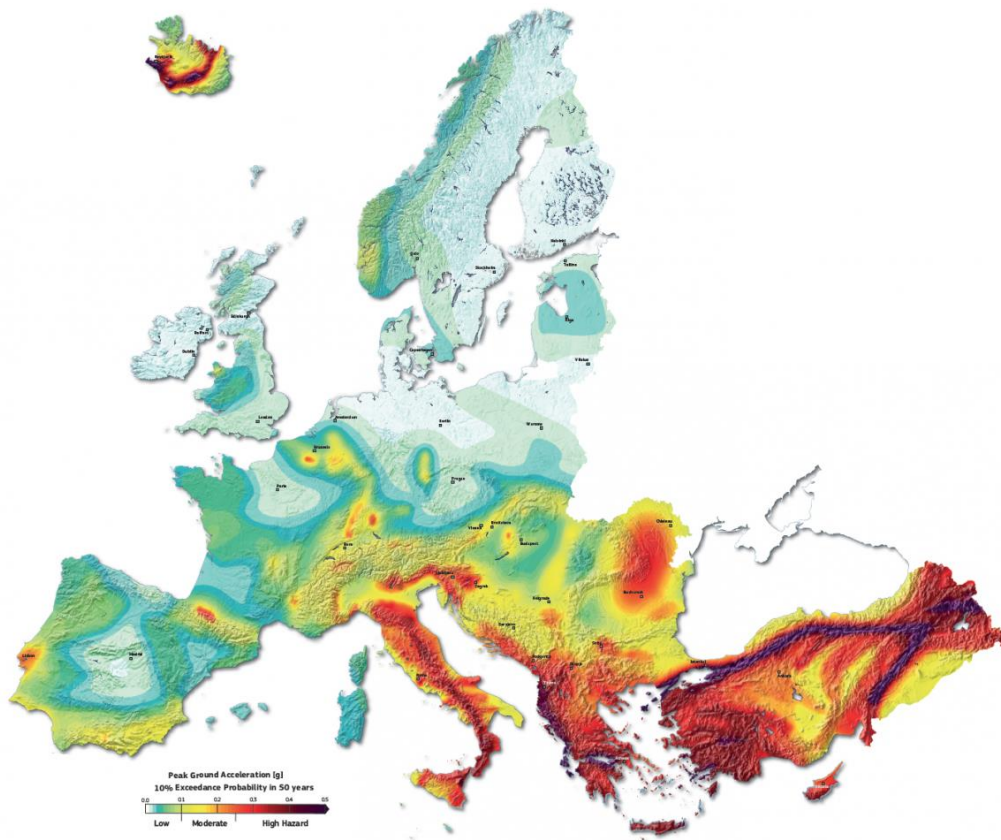
Vidare kan man konstatera att man i den översyn av SKI Technical Report 92:3 [7] som genomförts i SSM 2017:35 [11] framhåller att de seismiska data som ligger till grund för den seismiska faran är bristfälligt redovisade och baserade på föråldrade PSHA-metoder.

4.4 SHARE (ESHM13)

Inom ramen för SHARE-projektet har man tagit fram kartor som utvisar den seismiska faran för olika återkomsttider. I Figur 4.3 visas PGA vid 10% sannolikhet för överskridande under 50 år, för hela Europa och Turkiet. Detta motsvarar en genomsnittlig återkomsttid av 475 år, vilket är dimensioneringskriteriet för vanliga byggnader enligt Eurokod 8 [4]. I Figur 4.4 visas motsvarande seismisk fara för endast den skandinaviska halvön och Finland.

Resultaten från SHARE-projektet (ESHM13) visar på en förhöjd seismisk fara för stora delar av Sverige, jämfört med det underlag som togs fram i samband med införandet av den första versionen av Eurokod 8 [4] år 2004. Ett arbete framtaget vid Lunds Universitet [13] år 2017 visar att jordbävning baserat på det nya SHARE-underlaget ofta skulle bli den dimensionerande horisontella lasten för byggnader och bärverk om Eurokod 8 [4] infördes i Sverige. Dessa slutsatser gäller framförallt för Skåne och västkusten, där den seismiska faran är störst i landet, se Figur 4.4. I denna figur framgår tydligt skillnaden mellan den seismiska faran i Skåne/Halland jämfört med övriga Sverige. Den seismiska faran i sydvästra Sverige är tydligt sammanlänkad med de seismologiska förhållandena i Norge, medan östra Sverige har en seismisk fara mera i överensstämmelse med Finland. I Norge, där seismisk last för cirka 15 år sedan infördes i ett nationellt tillämpningsdokument till Eurokod 8 [4], är ofta idag jordbävning den dimensionerande lasten för byggnader och broar.

Kärntekniska anläggningar dimensioneras för jordbävningar med återkomsttider i storleksordningen 10 000 till 100 000 år. I Tabell 4-1 redovisas PGA för återkomsttiderna 5000 år, 10 000 år och 100 000 år enligt ESHM13 [17] för förläggningsplatserna Lund, Ringhals, Forsmark och Oskarshamn. Som framgår av denna tabell är den seismiska faran betydligt större i Lund och Ringhals på västkusten jämfört med Forsmark och Oskarshamn på östkusten. Bland annat framgår det att PGA för den genomsnittliga återkomsttiden 5 000 år i Lund och Ringhals är cirka 0.13 g, vilket är ungefär lika med återkomsttiden för 100 000 år i Oskarshamn och Forsmark. Det finns alltså en väsentlig skillnad i seismisk fara mellan östra och västra Sverige.



Figur 4.3 Sannolikhet för överskridande (PGA) motsvarande 10% under 50 år enligt SHARE, för hela Europa och Turkiet, enligt [17].

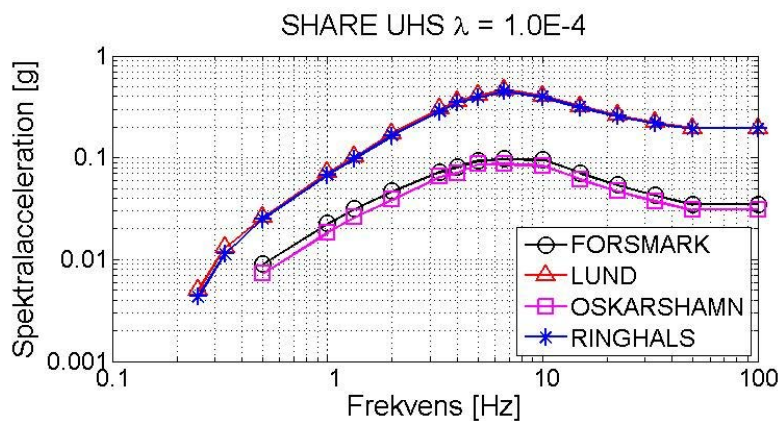


Figur 4.4 Sannolikhet för överskridande (PGA) motvarande 10% under 50 år enligt SHARE, för Skandinavien och Finland, enligt [17].

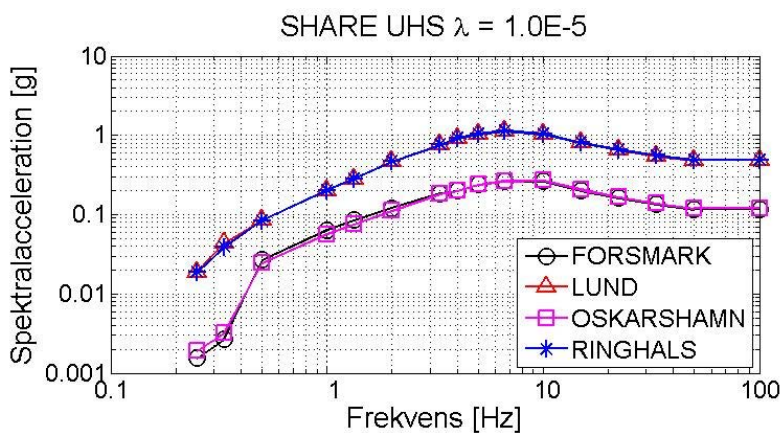
Tabell 4-1 PGA (g) vid median konfidensnivå (50%-percentilen) enligt ESHM13 [17] för Lund, Ringhals, Forsmark och Oskarshamn.

	Genomsnittlig återkomsttid		
	5000 år	10 000 år	100 000 år
Lund	0.14	0.20	0.48
Ringhals	0.13	0.19	0.49
Forsmark	0.025	0.035	0.12
Oskarshamn	0.021	0.031	0.12

Markresponsspektra med årlig överskridandefrekvens $1 \cdot 10^{-4}$ (genomsnittlig återkomsttid 10 000 år), framtaget för 5 % kritisk dämpning och medelskjuvvågshastighet $v_{s,30} = 800$ m/s för Forsmark, Lund, Oskarshamn och Ringhals presenteras i Figur 4.5. Motsvarande spektra för årlig överskridandefrekvens $1 \cdot 10^{-5}$ (återkomsttid 100 000 år) visas i Figur 4.6.



Figur 4.5 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-4}$) för Forsmark, Lund, Oskarshamn och Ringhals.



Figur 4.6 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-5}$) för Forsmark, Lund, Oskarshamn och Ringhals.

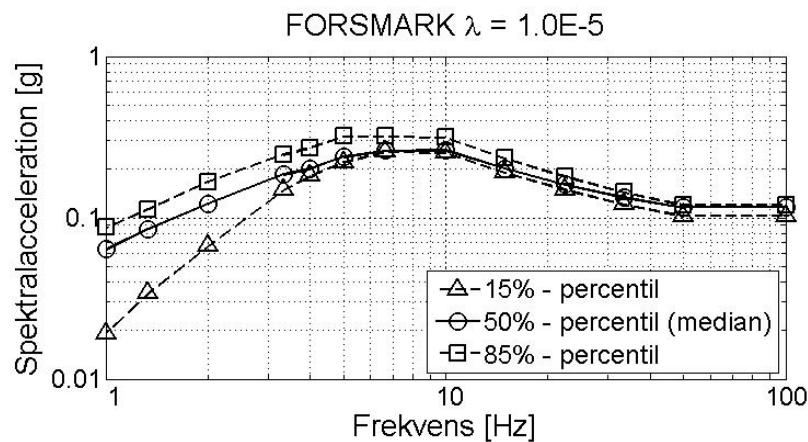
Redovisade responspektra i Figur 4.5 och Figur 4.6 baseras på median percentil som erhållits från webbportalen (www.efehr.org). Metod för framtagningen av UHS beskrivs i avsnitt 3.2.4. Koordinater för respektive anläggningsplats visas i Tabell 4-2.

Som framgår av Figur 4.5 understiger PGA för Oskarshamn och Forsmark tröskelvärdet 0.1 g vid den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-4}$, vilket innebär att för dessa anläggningsplatser måste en lägre överskridandefrekvens motsvarande $1 \cdot 10^{-5}$ användas för design (DBE) enligt WENRAs krav i Guidance Document [23] och [21]. För Ringhals och Lund däremot, kan den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-4}$ användas.

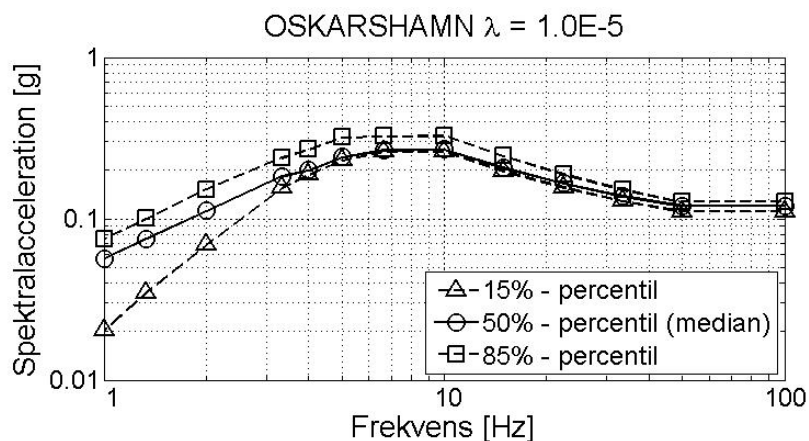
Tabell 4-2 Koordinater där UHS tagits ut för respektive anläggningsområde.

	Latitud	Longitud
Forsmark	60.4	18.182
Lund	55.7	13.182
Oskarshamn	57.4	16.682
Ringhals	57.3	12.082

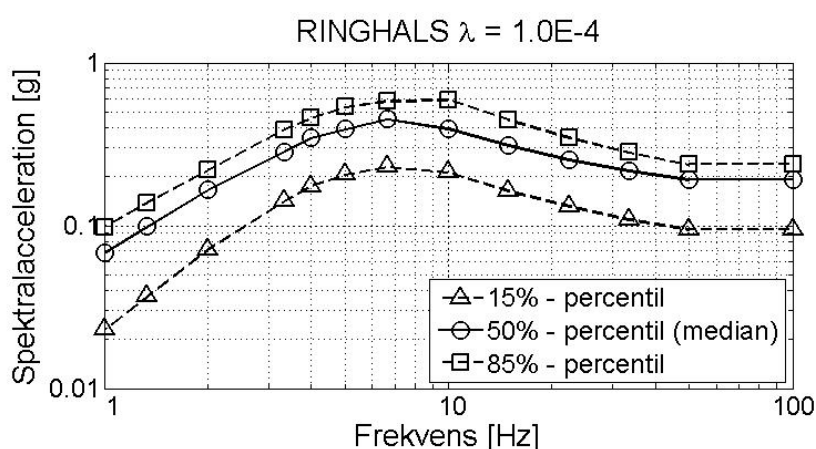
Tillhörande epistemiska osäkerheter för Forsmark, Oskarshamn och Ringhals med spektra för 15 % -, 50 % -, och 85 % - percentiler presenteras i Figur 4.7 till Figur 4.9.



Figur 4.7 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-5}$) för Forsmark, 15%-, 50%- och 85%-percentilen.



Figur 4.8 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-5}$) för Oskarshamn, 15%-, 50%- och 85%-percentilen.



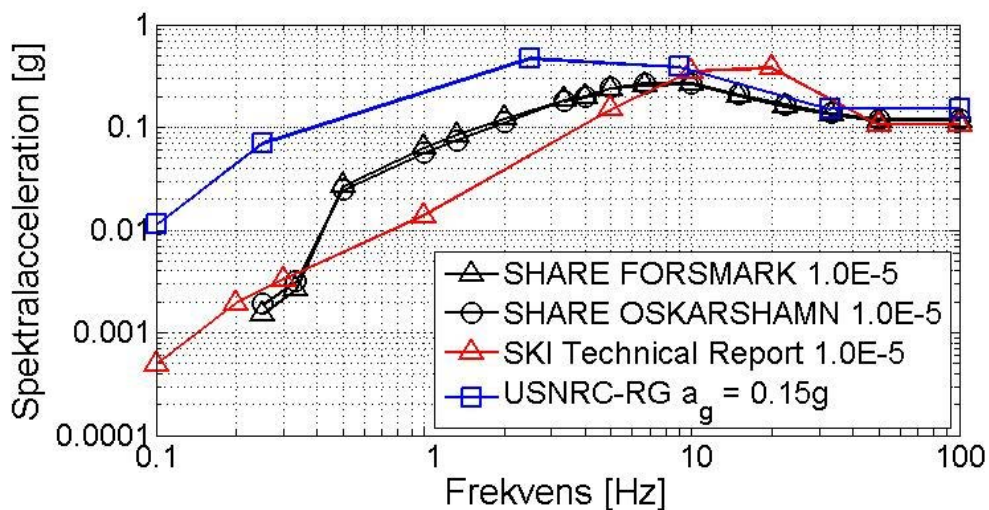
Figur 4.9 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-4}$) för Ringhals, 15%-, 50%- och 85%-percentilen.

Det är i detta sammanhang viktigt att understryka att de UHS som presenteras i detta avsnitt avspeglar de regionala förutsättningar som gällde vid framtagning av ESHM13 i dess nuvarande skick. Vid tillämpning av underlaget i ESHM13 är det viktigt att den använda databasen utvärderas och eventuellt revideras utifrån de lokala förutsättningar som gäller för den aktuella anläggningsplatsen. Härvid avses exempelvis eventuella identifierade aktiva förkastningar eller speciella lokala geologiska och topografiska förhållanden. Det ska framförallt noteras att de GMPE som använts i ESHM13 är kalibrerade för en skjuvvågshastighet av 800 m/s motsvarande berg enligt Eurokod 8 [4], medan vissa av de svenska anläggningsplatserna har bergförhållanden med skjuvvågshastigheter motsvarande cirka 2000-3000 m/s.

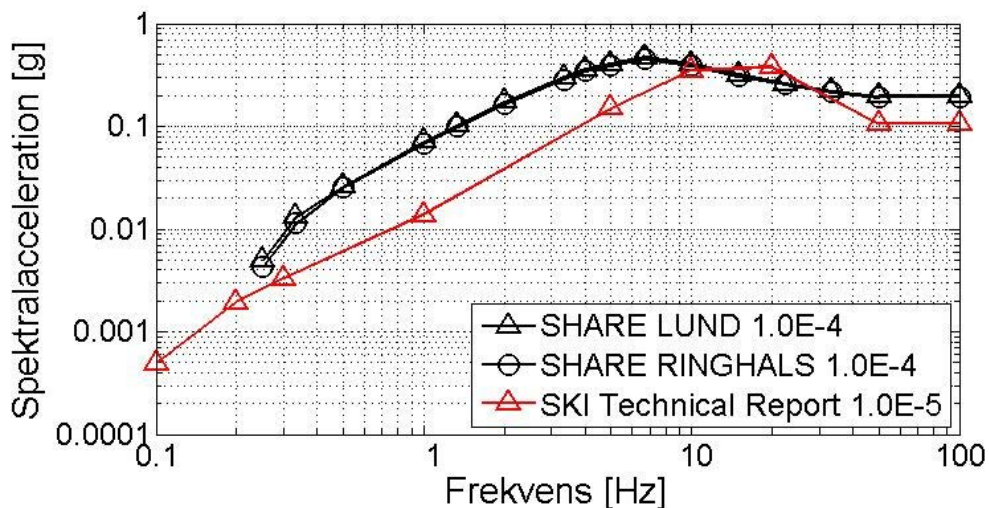
4.5 Jämförelse av markresponsspektra

UHS med den årliga överskridandefrekvens $1 \cdot 10^{-5}$ enligt ESHM13 (medianen) [17] för Forsmark/Oskarshamn och SKI Technical Report 92:3 [7] jämförs i Figur 4.10 tillsammans med markresponsspektra enligt USNRC-RG 1.60 [6] förankrat vid 0.15g. Samtliga spektra är framtagna för 5 % kritisk dämpning och horisontell riktning. Motsvarande jämförelse görs i Figur 4.11 för Lund/Ringhals, men med överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-4}$, och utan USNRC-RG 1.60 [6] då detta spektrum inte använts vid Ringhals.

Markaccelerationsvärden för PGA ges i Tabell 4-3 för respektive spektra.



Figur 4.10 Jämförelse av spektra, USNRC RG 1.60 [6], SKI Technical Report 92:3 [7] och SHARE/ESHM13 [17].



Figur 4.11 Jämförelse av spektra, SKI Technical Report 92:3 [7] och SHARE/ESHM13 [17].

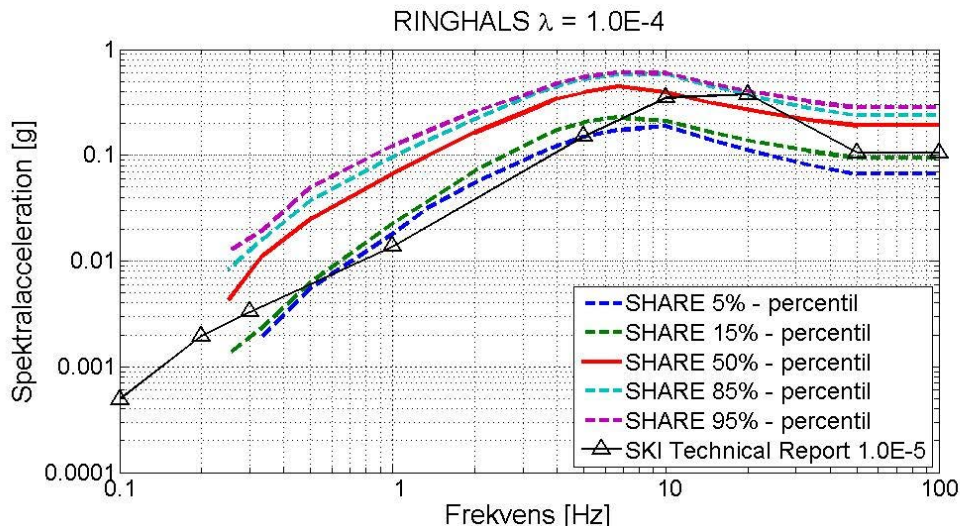
Tabell 4-3 Jämförelse av PGA enligt SHARE/ESHM13 [17] för respektive anläggningsplats och SKI Technical Report 92:3 [7].

	SHARE				SKI
	Forsmark	Lund	Oskarshamn	Ringhals	
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}
PGA [g]	0.115	0.196	0.120	0.192	0.106

Följande observationer kan göras:

- UHS för Oskarshamn och Forsmark är nästan identiska och med PGA relativt väl i överensstämmelse med SKI Technical Report 92:3 [7]. Den spektrala formen är däremot brantare i SKI Technical Report 92:3 [7] med högre amplitud på spektralaccelerationer mellan frekvenserna 10 och 20 Hz. ESHM13 [17] påvisar dock högre accelerationer för frekvenser lägre än 5 Hz.
- Spektrumet i USNRC-RG 1.60 [6] ger väsentligt högre responser för låga frekvenser, d.v.s. för typiska grundmoder för byggnadskonstruktioner, jämfört med ESHM13 [17] och SKI Technical Report 92:3 [7]. Designspektrumet förankras vid ett deterministiskt ansatt värde 0.15g vilket korrelerar väl med PGA för överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-5}$ i Oskarshamn och Forsmark. Att USNRC-RG 1.60 [6] ger hög respons för låga frekvenser kan förklaras med att det delvis baseras på stora jordbävningar som registrerats långt ifrån epicentrum vilka dominerar faran för låga frekvenser. Man konstaterar i SKI Technical Report 92:3 [7] att den seismiska faran i Sverige karakteriseras av närfälts-jordbävningar vilket man förklarar ger skillnaderna i den spektrala formen i jämförelse med USNRC-RG 1.60 [6]
- Den seismiska faran i Ringhals respektive Lund är i princip identiska för $1 \cdot 10^{-4}$ enligt ESHM13 [17], men betydligt högre värden än $1 \cdot 10^{-5}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7] för frekvenser lägre än 10 Hz.

Man kan även betrakta den epistemiska osäkerheten i ESHM13, alltså inte studera endast median-värdet, utan betrakta ytterlighetsvärden motsvarande 5% och 95%-percentilen. I Figur 4.12 visas median-värdet (50%-percentilen) och även 5%-, 15%-, 85%-och 95%-percentilerna för en årlig överskridandefrekvens motsvarande $1 \cdot 10^{-4}$, för Ringhals. Ur Figur 4.12 framgår att endast om man tillämpar extremt gynnsamma förutsättningar motsvarande 5%-percentilen så kommer man i närheten av de låga spektravärden som gäller för den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-5}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7], för frekvenser < 10 Hz.

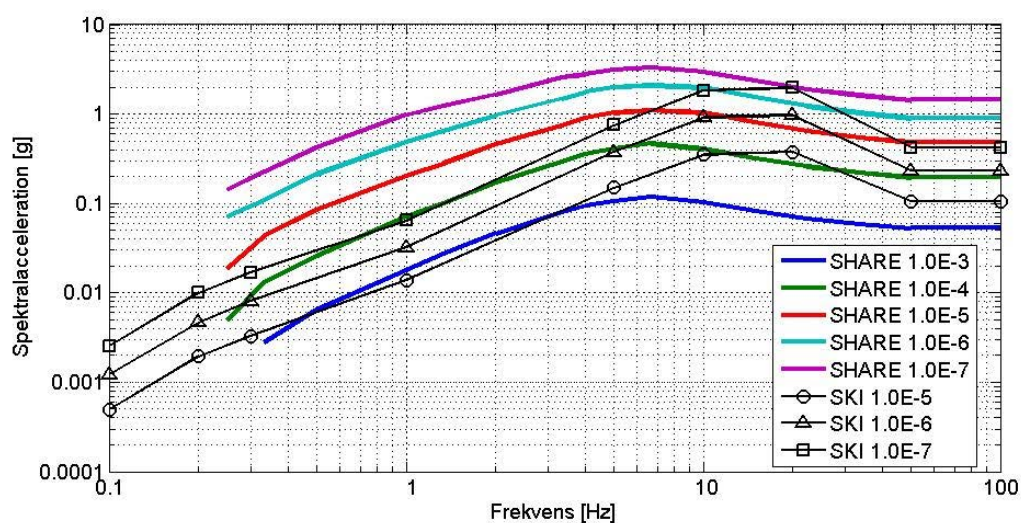


Figur 4.12 Jämförelse av spektra med årliga överskridandefrekvenser $1 \cdot 10^{-4}$, för percentilerna 5%, 15%, 50%, 85% och 95% för Ringhals enligt SHARE/ESHM13 [17] och den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-5}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7].

Vidare kan man jämföra responspektra (median) för årliga överskridandefrekvenserna $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ och $1 \cdot 10^{-7}$ för Ringhals enligt ESHM13 [17] med årliga

överskridandefrekvenserna $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ och $1 \cdot 10^{-7}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7]. Som framgår av denna figur blir responserna för låga frekvenser, alltså de typiska byggnadsmoderna, mycket högre för ESHM13 [17] än för SKI Technical Report 92:3 [7]. Exempelvis för intervallet 1–5 Hz blir responserna för en årlig överskridandefrekvens $1 \cdot 10^{-5}$ (en återkomsttid av 100 000 år) enligt SKI Technical Report 92:3 [7] lika med en återkomsttid av endast 1 000 år enligt ESHM13 [17].

I detta sammanhang bör än en gång understrykas att förutsättningarna i de GMPEs som använts i ESHM13 [17] är kalibrerade gentemot skjuvvågshastigheten $v_{s,30} = 800$ m/s motsvarande berg enligt Eurokod 8 [4]. Denna skjuvvågshastighet torde kunna vara relevant för förhållandena i Lund, däremot är skjuvvågshastigheten i berglagren vid Ringhals förmodligen högre.



Figur 4.13 Jämförelse av spektra med årliga överskridandefrekvenser $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ och $1 \cdot 10^{-7}$ för Ringhals enligt ESHM13 [17] och $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ samt $1 \cdot 10^{-7}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7].

5. Enkla överslagsberäkningar

5.1 Allmänt

I det här avsnittet jämförs den seismiska responsen för några svenska reaktorinneslutningar, baserat på UHS enligt SHARE/ESHM13 [17], SKI-Technical Report 92:3 [7] samt enligt standardiserade responspektra enligt USNRC-RG 1.60 [6].

UHS enligt SHARE/ESHM13 [17], framtaget med metoder enligt avsnitt 3.2.4, för Forsmark, Oskarshamn och Ringhals, och som möter WENRAS:s krav [21] [23] med avseende på årlig överskridandefrekvens ($\lambda \leq 10^{-4}$) och PGA ($\text{PGA} \geq 0.1\text{g}$) används som jämförande seismisk last. UHS med överskridandefrekvens $1 \cdot 10^{-4}$ uppfyller dessa krav i Ringhals. I Forsmark och Oskarshamn uppfylls kraven med en överskridandefrekvens av $1 \cdot 10^{-5}$. Samtliga spektra enligt SHARE/ESHM13 [17] är framtagna för median konfidensnivå (50 % - percentilen). Det är dock viktigt att understryka att UHS enligt SHARE/ESHM13 [17] i dagsläget inte är formellt gällande och måste utvärderas och eventuellt revideras utifrån lokala geologiska och seismologiska förhållanden.

I Tabell 5-1 redovisas de spektra som jämförs för respektive anläggningsplats och reaktorinneslutning. Endast F3 och O3 har dimensionerats för jordbävning med USNRC-RG 1.60 [6], förankrat vid 0.15g, som DBE. Samtliga reaktorinneslutningar i Tabell 5-1 har utvärderats i efterhand för en årlig överskridandefrekvens motsvarande $1 \cdot 10^{-5}$. Säkerhets-SSK som installerats i efterhand i samband med moderniseringsarbeten har i de flesta fall dimensionerats för den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-5}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7].

Tabell 5-1 Jämförande seismisk laster för respektive reaktorinneslutning.

Jämförande seismisk last				
	Block	SKI	USNRC-RG	SHARE
Forsmark	F1/F2	$1 \cdot 10^{-5}$	-	$1 \cdot 10^{-5}$
Forsmark	F3	$1 \cdot 10^{-5}$	0.15g	$1 \cdot 10^{-5}$
Oskarshamn	O3	$1 \cdot 10^{-5}$	0.15g	$1 \cdot 10^{-5}$
Ringhals	R3/R4	$1 \cdot 10^{-5}$	-	$1 \cdot 10^{-4}$

Responsen som utvärderas avser tvärkraft vid basen (*base shear force*), i en horisontell riktning. Beräkningarna utförs med en statistiskt ekvivalent metod genom att förenklat ansätta respektive reaktorinneslutning som en-frihetsgradsystem, d.v.s. all massa exciteras i första böjmoden. Den fundamentala egenfrekvensen (första böjmoden) ligger för de svenska reaktorinneslutningarna enligt Tabell 5-1 mellan cirka 3 och 5 Hz. En-frihetsgradsystemen antas därmed här förenklat ha en egenfrekvens av 4 Hz för samtliga reaktorinneslutningar enligt Tabell 5-1. Beräkningarna presenteras i avsnitt 5.2.

I avsnitt 5.3 utförs en enkel modal responspektrumanalys för en typisk svensk reaktorinneslutning. Syftet med detta är att kontrollera för effekten av att högre moder i realiteten bidrar till responsen.

5.2 Statiskt ekvivalent jämförande beräkning

Samtliga reaktorinneslutningar i Tabell 5-1 modelleras som en-frihetsgradsystem med 5 % dämpning. Eftersom samtliga spektra är framtagna för 5 % dämpning, så kan den dynamiska responsen (base shear force) beräknas statiskt ekvivalent som:

$$V_{bx} = S_A(f = 4 \text{ Hz}) \cdot m_t$$

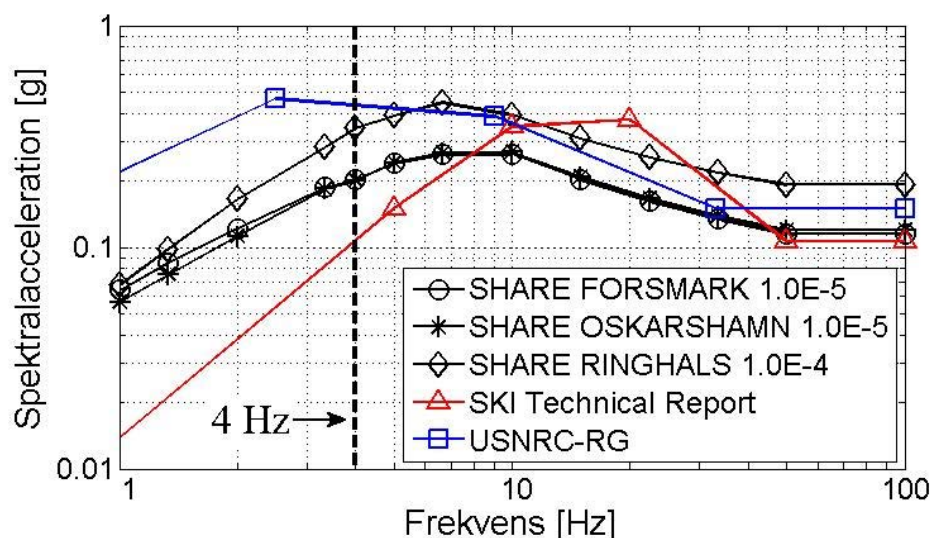
Där

V_{bx} är base shear force i en horisontell riktning x .

$S_A(f = 4 \text{ Hz})$ är spektralaccelerationen vid 4 Hz.

m_t är reaktorinneslutningens totala massa.

Responsen normaliseras mot responsen för SKI Technical Report 92:3 [7] för årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-5}$, för respektive reaktorinneslutning, vilket innebär att resultaten kan presenteras som kvoten av respektive spektra och SKI Technical Report 92:3 [7], vid 4 Hz. Nivån för respektive spektra vid 4 Hz visualiseras i Figur 5.1 och kvoterna presenteras i Tabell 5-2.



Figur 5.1 Jämförande nivå av spektralaccelerationer S_A vid 4 Hz.

Tabell 5-2 Base shear force för statisk ekvivalent metod med all massa i en mod vid 4 Hz. Responsen är normaliserad med avseende på responsen för SKI Technical Report 92:3 (10^{-5}).

	Block	SKI 10^{-5}	USNRC-RG $a_g=0.15g$	SHARE 10^{-4}	SHARE 10^{-5}
Forsmark	F1/F2	1.0	-	-	1.87
Forsmark	F3	1.0	4.08	-	1.87

Oskarshamn	O3	1.0	4.08	-	1.86
Ringhals	R3/R4	1.0	-	3.22	-

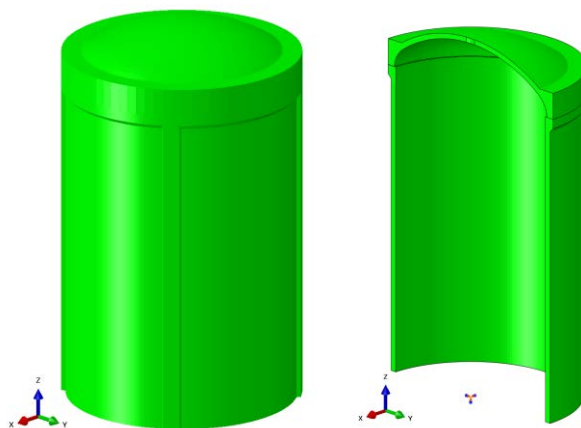
För samtliga reaktorinneslutningar framgår att responsen blir högre med användning av UHS enligt SHARE/ESHM13 [17], jämfört med SKI Technical Report 92:3 [7]. Blocken F3 och O3 påvisar dock ännu högre respons vid användning av USNRC-RG 1.60 [6], förankrat vid 0.15g, alltså den last som användes vid den ursprungliga dimensioneringen av respektive inneslutning.

Reaktorinneslutningarna i Ringhals (R3/R4) påvisar en faktor av 3.22 enligt SHARE 10^{-4} jämfört med SKI Technical Report 92:3 [7]. Jämförelsen är dock något missvisande eftersom spektrumet enligt SKI Technical Report 92:3 [7] är brantare än spektrumet enligt SHARE/ESHM13 [17], med högre accelerationer vid högre frekvenser. Faktorn förväntas därmed vara något lägre vid summering av responsen av högre moder.

5.3 Jämförande modal analys

I det här avsnittet analyseras effekten av att högre moder bidrar till responsen med syftet att kontrollera hur väl den statistiskt ekvivalenta metoden, som användes i föregående avsnitt, beskriver förhållandet mellan den seismiska responsen för SHARE/ESHM13 [17] och SKI Technical Report 92:3 [7] för Ringhals.

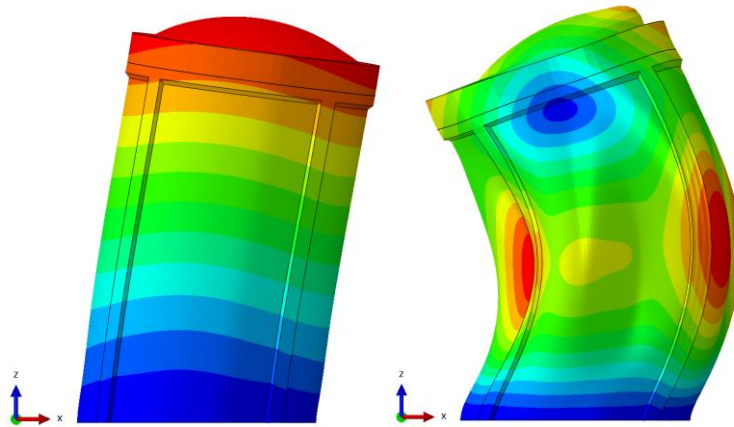
En FE-modell av en svensk tryckvattenreaktorinneslutning av typ R3/R4, med geometri enligt Figur 5.2 och Tabell 5-3, har använts för att beräkna egenfrekvenserna i första och andra böjmoden. Analysen som utförs i Abaqus visar att första och andra böjmoden ligger vid 4.1 Hz, respektive vid 13.4 Hz. Modformerna presenteras i Figur 5.3.



Figur 5.2 Typisk svensk tryckvattenreaktorinneslutning.

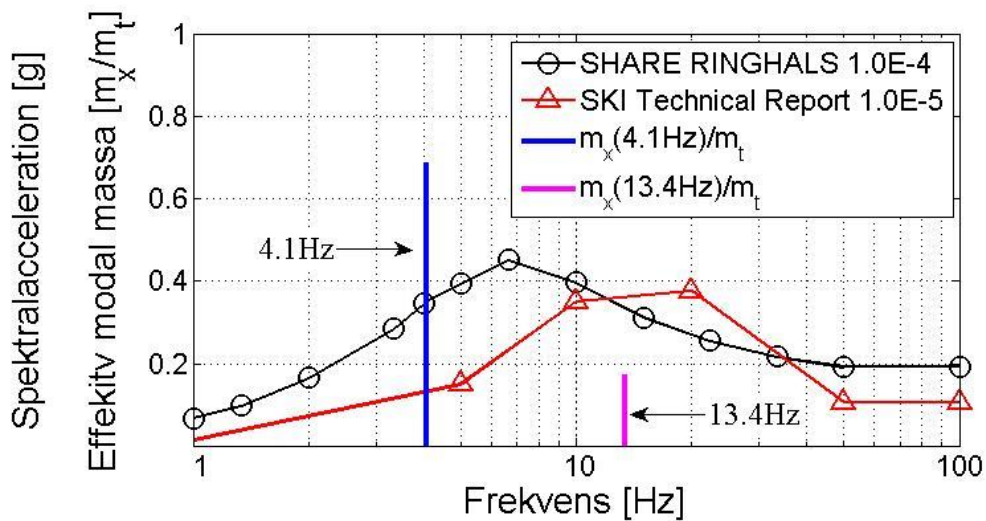
Tabell 5-3 Reaktorinneslutningens geometri i grova mått.

Ytterradie	19 m
Väggjocklek	1.1 m
Höjd	64 m



Figur 5.3 Första och andra böjmoden i x-led vid 4.1 Hz, respektive 13.4 Hz.

Den effektiva modala massan m_x , vid excitation i reaktorinneslutningens x-led, uppgår till 69% av totala massan m_t i första moden, och 17% av totala massan i andra moden. Resterande massa uppgår således till 14% av totala massan. Den effektiva modala massan för respektive mod visualiseras i Figur 5.4 tillsammans med UHS enligt SHARE/ESHM13 [17] ($1 \cdot 10^{-4}$) och SKI Technical Report 92:3 [7] ($1 \cdot 10^{-5}$).



Figur 5.4 UHS enligt SHARE 10^{-4} (Ringhals) och SKI 10^{-5} , samt förhållandet i effektiv modal massa för respektive böjmod vid 4.1Hz och 13.4 Hz.

Den modala responsen (base shear force) beräknas enligt:

$$V_{bx,n} = m_{x,n} \cdot S_A(f_n)$$

Där

$V_{bx,n}$ är modal base shear force i x-led för mod n

$m_{x,n}$ är effektiv modal massa i x-led för mod n

$S_A(f_n)$ är spektralaccelerationen för egenfrekvensen f_n

Summeringsmetoden SRSS används för att summera den modala responsen enligt:

$$V_{bx,SRSS} = \sqrt{V_{bx,1}^2 + V_{bx,2}^2}$$

Den resterande massan, d.v.s. 14 % av totala massan, antas förenklat utgöra en stelkroppsmod som följer markaccelerationen med $S_A = PGA$. Bidraget till responsen, $V_{bx,m}$, adderas efter SRSS- summeringen och beräknas som:

$$V_{bx,m} = 0.14 \cdot m_t \cdot PGA$$

Därmed beräknas den totala responsen V_{bx} som:

$$V_{bx} = V_{bx,SRSS} + V_{bx,m}$$

Ingående spektralaccelerationer och modala massor för beräkningarna presenteras i Tabell 5-4. Beräkningarna presenteras stegvis i Tabell 5-5.

Tabell 5-4 Ingående spektralaccelerationer och modala massor för beräkning av base shear force.

Spektralacceleration			
	$S_A(f_n = 4.1Hz)$	$S_A(f_n = 13.4Hz)$	PGA
SHARE 10⁻⁴	0.352g	0.333g	0.192g
SKI 10⁻⁵	0.112g	0.361g	0.106g

Effektiv modal massa			
	$f_n = 4.1Hz$	$f_n = 13.4Hz$	Resterande
$m_{x,n}$	$0.69 \cdot m_t$	$0.17 \cdot m_t$	$0.14 \cdot m_t$

Tabell 5-5 Beräkning av base shear force för SHARE RINGHALS (10⁻⁴) samt SKI Technical Report 92:3 (10⁻⁵)

SHARE 10⁻⁴	Mod 1:	$V_{bx,1}$	$= 0.69 \cdot m_t \cdot 0.352g$	$= 0.243 \cdot m_t g$
	Mod 2:	$V_{bx,2}$	$= 0.17 \cdot m_t \cdot 0.333g$	$= 0.057 \cdot m_t g$
	SRSS:	$V_{bx,SRSS}$	$= \sqrt{0.243^2 + 0.057^2} \cdot m_t g$	$= 0.250 \cdot m_t g$
	Resterande:	$V_{bx,m}$	$= 0.14 \cdot m_t \cdot 0.192g$	$= 0.027 \cdot m_t g$
	Totalt:	V_{bx}	$= (0.250 + 0.027) \cdot m_t g$	$= \mathbf{0.277 \cdot m_t g}$
				$\approx \mathbf{68\ 000\ kN}$

SKI 10⁻⁵	Mod 1:	$V_{bx,1}$	$= 0.69 \cdot m_t \cdot 0.112g$	$= 0.077 \cdot m_t g$
	Mod 2:	$V_{bx,2}$	$= 0.17 \cdot m_t \cdot 0.361g$	$= 0.061 \cdot m_t g$
	SRSS:	$V_{bx,SRSS}$	$= \sqrt{0.077^2 + 0.061^2} \cdot m_t g$	$= 0.098 \cdot m_t g$
	Resterande:	$V_{bx,m}$	$= 0.14 \cdot m_t \cdot 0.106g$	$= 0.015 \cdot m_t g$
	Totalt:	V_{bx}	$= (0.098 + 0.015) \cdot m_t g$	$= \mathbf{0.113 \cdot m_t g}$

$\approx 28\ 000\ \text{kN}$

Om responsen för SHARE 10⁻⁴ normeras mot responsen för SKI 10⁻⁵ så erhålls:

$$\frac{V_{bx}(\text{SHARE } 10^{-4})}{V_{bx}(\text{SKI } 10^{-5})} = \frac{68\ 000}{28\ 000} = 2.43$$

Faktorn 2.43 är lägre än 3.22, vilket erhöles med den statistiskt ekvivalent metoden i avsnitt 5.2. Men oberoende av metod ger UHS enligt SHARE/ESHM13 [17] (10⁻⁴) för Ringhals väsentligt högre respons än SKI Technical Report 92:3 [7] (10⁻⁵).

6. Sammanfattning och slutsatser

Den svåra jordbävningen och den påföljande tsunamin som ödelade kärnkraftverket i Fukushima Dai-ichi i Japan den 11 mars 2011 resulterade i omfattande diskussioner kring hur man borde förbättra de existerande metoderna för att bedöma faran från naturfenomen (*natural hazard assessments*). Fukushima-händelsen medförde att Europeiska rådet i mars 2011 krävde att så kallade stresstester skulle genomföras på samtliga kärnkraftverk i drift i Europa. Europeiska rådet bjöd in Europeiska kommissionen, ENSREG och WENRA att ansvara för utformningen av dessa stresstester. Man bestämde bland annat att speciellt fokusera arbetet på olika typer av naturfenomen, exempelvis jordbävningar och extrema väderförhållanden.

En viktig slutsats från dessa stresstester var att man rekommenderade WENRA, den organisation som har den bästa tillgängliga expertisen i Europa, att ta fram dimensionerande referensvärden för naturfenomen samt riktlinjer för genomförande av deterministiska och probabilistiska metoder för yttre händelser vid kärntekniska anläggningar. Ett viktigt syfte härvid var att harmonisera förutsättningar, krav och metoder i Europa, som ett led i att förbättra säkerheten vid kärnkraftverken. Som resultat av detta uppdrag redovisade WENRA under 2015 och 2016 i sina Guidance Documents [21] och [23] dimensionerande referensvärden och specifika riktlinjer för bedömning av seismotektoniska faror, inklusive vibrationseffekter av jordbävning.

Den dimensionerande jordbävningen (DBE) för en förläggingsplats definierade WENRA enligt följande:

1. DBE ska motsvara en årlig överskridandefrekvens $\leq 1.0 \cdot 10^{-4}$. Konfidensnivån ska motsvara minst median (50%-percentilen).
2. Om värdet på den horisontella PGA för den aktuella platsen understiger 0.1g ska en lägre årlig överskridandefrekvens än $1.0 \cdot 10^{-4}$ användas, så att PGA blir $\geq 0.1g$.

IAEA SSG-9 [9] är en annan viktig referens och som innehåller detaljerade beskrivningar av de krav som ställs på beslutsunderlaget för bestämning av den dimensionerande jordbävningen (DBE) vid kärntekniska anläggningar, exempelvis:

- Krav på erforderliga utredningar för att klarställa de seismologiska och geologiska förutsättningarna för regionen, samt utredningar för bestämning av de geotekniska egenskaperna för det lokala anläggningsområdet.
- Krav på erforderliga utredningar för bedömning av den seismiska faran, inklusive hantering av tillhörande osäkerheter.
- Krav på metoder och tillvägagångssätt i de olika stegen av den tillämpade PSHA-metoden.

En annan viktig aspekt som ENSREG lyfte fram i [12] var betydelsen av periodiska säkerhetsgranskningar. Man rekommenderar i [12] att för naturfenomen bör återkommande säkerhetsbedömningar genomföras så ofta som nödvändigt, men åtminstone varje tionde år. I WENRA Guidance Document [21] rekommenderar man specifikt för den seismiska faran (*seismic hazard*) vad som bör ses över för en specifik förläggingsplats:

- Signifikanta händelser som inträffat och ny vetenskaplig kunskap som tillkommit.
- Nya identifierade seismiska källor, exempelvis aktiva förkastningar.
- Nya data avseende de geotekniska förhållandena på platsen och översyn av tidigare använda GMPE.

- Nya metoder och tillvägagångssätt för bedömning av seismiska faran (PSHA-metoder)
- Ny kunskap och erfarenhet om inträffade jordbävningar och eventuella konsekvenser för närliggande kärntekniska anläggningar.

Det finns nu omfattande ny kunskap som byggts upp inom ramen för SHARE-projektet, exempelvis förbättrade PSHA-metoder, uppdaterade skalvkataloger, nya mätdata från inträffade jordbävningar och tillhörande GMPE, nya data avseende aktiva förkastningszoner, etc. Resultaten från SHARE [17] har tagits fram inom ramen för ett stort europeiskt samarbetsprojekt med engagemang av cirka 300 ledande experter inom ämnesområdet. SHARE-underlaget utvecklas vidare och kommer att utgöra basen för en uppdatering av Eurokod 8 [4], samt även andra seismiska riskbedömningar i Europa under de kommande decennierna. Inom den europeiska kärnkraftsindustrin bör man rimligen därför också förhålla sig till vad som framkommit inom SHARE-projektet, vid nykonstruktion såväl som vid periodiska seismiska säkerhetsbedömningar.

Här nedan sammanfattas några av de viktigaste slutsatserna från det arbete som genomförts i denna rapport:

- SHARE/ESHM13 [17] visar på en förhöjd seismisk fara för framförallt Skåne/Halland jämfört med tidigare genomförda studier. Skåne och svenska västkusten är tydligt sammanlänkade med de seismologiska förhållandena i Norge.
- SHARE/ESHM13 [17] visar en likartad seismisk fara för Lund och Ringhals, respektive för Oskarshamn och Forsmark, givet att de lokala geologiska förhållandena kan anses vara hyfsat lika för de olika förlägningsplatserna.
- De GMPE som använts i SHARE/ESHM13 [17] är inte rakt av tillämpliga för svenska geologiska förhållanden. Dessa måste utvärderas och eventuellt kalibreras utifrån de lokala förhållandena för respektive förlägningsplats.
- Med reservation för att det kan krävas lokala PSHA-anpassningar av SHARE-underlaget vid tillämpning för de svenska anläggningarna, visar de jämförande studierna på märkbart högre responser för Lund/Ringhals än vad SKI Technical Report 92:3 [7] ger, för låga frekvenser lägre än 10 Hz. (Inom detta frekvensområde dominerar frekvenser för byggnadskonstruktioner och rörsystem.) Exempelvis motsvarar spektravärdena för de låga frekvenserna i SKI Technical Report 92:3 [7] för återkomsttiden 100 000 år (en årlig överskridandefrekvens av $1 \cdot 10^{-5}$) vad som gäller för en återkomsttid av endast 1 000 år i SHARE/ESHM13 [17].

Som nämns i tredje punkten i listan ovan är det seismiska underlaget i SHARE/ESHM13 [17] inte rakt av tillämpligt för svenska geologiska och seismologiska förhållanden, utan det krävs en hel del arbete för att kunna tillämpa detta framförallt för de låga årliga överskridandefrekvenser som måste beaktas för kärntekniska anläggningar. Ronald Arvidsson, SGU, har varit svensk deltagare i SHARE-projektet när det genomfördes under åren 2007 till 2013. Han har granskat arbetet som genomförts i denna rapport och avlämnat ett granskningsmeddelande [26]. I sitt granskningsmeddelande understryker han, på samma sätt som i denna rapport, att resultaten från SHARE-projektet för kritiska anläggningar av typ kärnkraftverk måste betraktas som en startpunkt, från vilket ytterligare studier och analyser måste genomföras. Här nedan redovisas en lista över förslag till vidare studier som krävs för att kunna ersätta det föråldrade underlaget i SKI Technical Report 92:3 [7]. Denna lista baseras på vad som framkommit i denna rapport och som även understrykes i granskningsmeddelandet [26]:

- Man behöver ytterligare studera *Area Source*-modellen och förbättra denna. Det kan även behöva skapas alternativa modeller. Flera förenklingar gjordes i SHARE-projektet, vilket kan ha medfört att PSHA för vissa delar av Sverige är felaktiga eller för låga.
- Jordbävningsskatalogen sattes ihop utifrån ett europeiskt perspektiv. För nordiska förhållanden bör man använda den lokala katalogen, med framförallt fokus på kompletthet av data, vilket skulle kunna förändra resultaten. Här kan behöva göras mer för svenska förhållanden.
- Man måste arbeta med en anpassad statistik. Det finns nämligen ingen komplett statistik som inrymmer den maximala jordbävningen, eftersom det då krävs betydligt längre tidshorisont än den korta historiska epok som vi har information om. Denna problemställning löses lämpligen på så sätt att man använder en så kallad global fördelning förutom den lokala fördelningen av jordbävningar. En sådan lösning finns i den så kallade EPRI-metodiken [27]. Utan en sådan anpassning blir varje försök till beräkning orealistiskt.
- Beräkning av aktivitetshastigheter är beroende av rätt tillämpning av den del av fördelningen som ger den mest korrekta lutningen på den statistiska fördelningen av jordbävningar, den så kallade Gutenberg-Richter fördelningen. Se till exempel [28] för begränsningar av sådana beräkningar.
- Villkoren för användning av GMPE (dämpningsfunktioner) i SHARE-projektet bör studeras noggrannare och i jämförelse med andra arbeten. Inom SHARE genomfördes en utredning som bör ses över och förmodligen göras om, särskilt med tanke på att ett antal år förflutit sedan dess. Men också med speciellt fokus på den del av stabila områden som består av prekambrisk sköldar. Det kan nämligen finnas ett speciellt behov av att konstruera specifika GMPE för dessa områden eftersom man vid modellering av seismiska vågor har observerat mycket låg dämpning relativt andra områden.

7. Erkännanden

Denna rapport är beställd och finansierad av Strålsäkerhetsmyndigheten, (SSM). Författarna tackar SSM för att ha fått möjlighet att genomföra denna studie.

Teknologie doktor Ronald Arvidsson vid Sveriges Geologiska Undersökningar (SGU) har varit svensk representant och haft en projektsamordnande roll i SHARE-projektet. Författarna vill också tacka honom för den granskning han genomfört av rapporten och för värdefull input i övrigt.

8. Referenser

- [1] SKB, Report R-06-67, Earthquake activity in Sweden, Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn, 2006.
- [2] Wahlström, R., Grunthal, G, Probabilistic seismic hazard assessment (horizontal PGA) for Fennoscandia using logic tree approach for regionalization and non-regionalization models, 2001.
- [3] Rönnquist, et al, Earthquake engineering design practice in Norway, Implementation of Eurocode 8, 2012.
- [4] SS-EN 1998-1:2004; Eurokod 8, Dimensionering av bärverk med avseende på jordbävning.
- [5] Boverket, BFS 2011:10 - EKS 8 Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder), april 2011.
- [6] USNRC, Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
- [7] SKI Technical Report 92:3 - Characterization of seismic ground motions for probabilistic safety analyses of nuclear facilities in Sweden. Summary report, 1992.
- [8] ENSREG, Post-Fukushima accident. Peer review country report-Sweden. Stress tests performed on European nuclear power plants., 2012.
- [9] IAEA SSG-9 Seismic Hazard in Site Evaluation for Nuclear Installations, 2010.
- [10] SSM, Swedish action plan for nuclear power plants. Response to ENSREGs request, 2014.
- [11] SSM 2017:35, Review of paleo-, historical and current seismicity in Sweden and surrounding areas with implications for the seismic analysis underlying SKI report 92:3, 2017.
- [12] ENSREG, Post-Fukushima accident. Compilation of recommendations and suggestions. Peer review of stress tests performed on European nuclear power plants, 2012.
- [13] Lund University; Erik Larsson och Lucas Magnusson, Evaluation of seismic action in Sweden using the European Seismic Hazard Model, 2017.
- [14] Baker J, An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), 2008.

- [15] "FENCAT EQ-search tool v. 1.202," Seismologian instituutti, [Online]. Available: <http://www.seismo.helsinki.fi/>.
- [16] Giardini D, The Global Seismic Hazard Assessment (GSHAP), 1999.
- [17] Bull Earthquake Eng (2015) 13:3553-3596 , The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results, 2015.
- [18] S. Hiemer, J. Woessner, R. Basili, L. Dianciu, D. Giardini and S. Wiemer, A smoothed stochastic earthquake rate model considering seismicity and fault moment release for Europe, 2014.
- [19] G. Weatherill, H. Crowley and R. Pinho, SHARE deliverable D2.2 – Report on seismic hazard definitions needed for structural design applications, 2010.
- [20] G. Weatherill, H. Crowley, R. Pinho, A. Campos Costa, E. Coelho and A. Carvalho, SHARE deliverable D2.1 – Hazard output specifications requirement document, jointly approved with EC8 Committee, 2010.
- [21] WENRA RHWG, Guidance for the WENRA Safety Reference Levels for Natural Hazards introduced as lesson learned from TEPCO Fukushima Dai-Ichi accident. Issue T: Natural Hazards, Guidance on Seismic Events, 2016.
- [22] IAEA, SG, NS-G-1.6. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants.
- [23] WENRA RHWG, Guidance for the WENRA Safety Reference Levels for Natural Hazards introduced as lesson learned from TEPCO Fukushima Dai-Ichi accident. Guidance Document. Issue T: Natural Hazards, Head Document, 2015.
- [24] SSM, SSMFS 2008:17, Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer.
- [25] VBB Anläggning, Report 21007024-1, Site-specific ground motion characterization for Simpevarp and Ringhals, 1995.
- [26] Ronald Arvidsson, SGU, Granskning av rapporten ESHM13-En ny PSHA-modell för Europa betraktad ur ett svenskt perspektiv, 2018.
- [27] EPRI, Central and Eastern United States Seismic Source Characterization for Nuclear Facilities: Maximum Magnitude Distribution Evaluation, 2015.
- [28] Muir Wood, A review of the seismotectonics of Sweden.

Bilaga 1 Lista över figurer

Figur 2.1 Area Source-modell med historiska jordbävningar av magnitud $M > 3$ [15].....	12
Figur 2.2 Magnitud-frekvens-fördelning av jordbävningar inom AS-modellen.....	12
Figur 2.3 Kumulativ sannolikhetsfördelning av magnituder mindre än M inom AS-modellen.....	13
Figur 2.4 Diskret sannolikhetsfördelning av magnituder lika med M inom AS-modellen.....	14
Figur 2.5 Kumulativ sannolikhetsfördelning av avstånd mindre än R mellan Lund och en slumpmässig jordbävning som inträffar någonstans inom AS-modellen.....	14
Figur 2.6 Diskret sannolikhetsfördelning av avstånd lika med R mellan Lund och en slumpmässig jordbävning inom AS-modellen.....	15
Figur 2.7 Diskret sannolikhetsfördelning av olika jordbävningsscenarier, vid händelse av en jordbävning inom AS-modellen.....	15
Figur 2.8 Jämförelse av GMPE och registrerad respons $S_A(T=1s)$ för Chi-Chi-jordbävningen 1999 i Taiwan [14].....	16
Figur 2.9 Schematisk illustration av sannolikheten att PGA överskrider $1g$ vid olika avstånd från epicentrum, för en jordbävning med magnitud 6.5 [14].....	17
Figur 2.10 Medelresponsen av PGA för olika avstånd och magnituder baserat på GMPE (Cornell et al, 1979), samt "Target PGA" = $0.1g$	18
Figur 2.11 Diskret fördelning av sannolikheten att PGA överskrider $0.1g$ i Lund vid olika jordbävningsscenarier M_j, R_k	18
Figur 2.12 Diskret fördelning av sannolikheten att PGA överskrider $0.1g$ i Lund (längst ner) som är den gemensamma för de ingående fördelningarna (ovan).....	19
Figur 2.13 Diskret fördelning av sannolikheten att PGA överskrider $0.5g$ i Lund. Magnituder större än 5 bidrar mest till faran.....	20
Figur 2.14 Årliga överskridandefrekvenser av PGA i Lund baserat på AS-modellen och GMPE (Cornell et al, 1979).....	21
Figur 2.15 Årliga överskridandefrekvenser av spektralaccelerationer i Lund enligt SHARE.....	21
Figur 2.16 Interpolerade spektralaccelerationer korsar linjerna 10^{-4} , 10^{-5} och 10^{-6}	22
Figur 2.17 UHS i Lund baserat på interpolerade accelerationer i överskridandekurvorna.....	22

Figur 3.1 Jordbävningsskatalogen SHEEC över inträffade jordbävningar år 1000 till 2006 [17].....	24
Figur 3.2 Databasen EDSF över jordbävningssförkastningar omkring Medelhavet [17]... 24	
Figur 3.3 Årlig aktivitet av jordbävningar med $M_w > 4.5$ /år och km^2 inom respektive ASZ i AS-modellen [17].....	26
Figur 3.4 Årlig aktivitet av jordbävningar med $M_w > 4.5/\text{km}^2$ inom respektive Background Zone i FSBG-modellen [17]	27
Figur 3.5 Registrerade event i SHEEC (vänster) och registrerade förkastningar i EDSF (höger) [18]	27
Figur 3.6 Årlig aktivitet av jordbävningar med $M_w > 4.5/\text{km}^2$ enligt SEIFA-modellen [17]	28
Figur 3.7 Årlig jordbävningssaktivitet för respektive aktivitetsmodell samt den viktade modellen AS/FSBG/SEIFA (0.5/0.2/0.3). Aktiviteten redovisas tillsammans med den kumulativa magnitud-frekvens-fördelningen av registrerade jordbävningar i SHEEC [17].	29
Figur 3.8 Tektonisk regionalisering för selektion av GMPE	30
Figur 3.9 Seismisk sannolikhetskurvor för PGA, sannolikhet för överskridande under 50 år, för Lund.	31
Figur 3.10 Årliga överskridandefrekvenser för PGA i Lund.	32
Figur 3.11 Årlig överskridandefrekvens respektive årlig sannolikhet för överskridande, som funktion av återkomsttid, T_R	32
Figur 3.12 Seismiska överskridandekurvor för S_A och PGA, för Lund.	33
Figur 3.13 UHS för Lund med överskridandefrekvenser $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$ och $1 \cdot 10^{-6}$	33
Figur 3.14 Ansättning av PGA till $S_A[T_n=0.02s]$ och interpolering.....	34
Figur 3.15 UHS för Lund (frekvensdomänen).....	34
Figur 3.16 Logiskt träd för svenska förhållanden (<i>Stable Continental Regions</i>). Värden för M_{\max} gäller endast AS-modellen.....	36
Figur 3.17 Överskridandekurvor (PGA) för olika percentiler, för Lund.....	36
Figur 4.1 Horisontellt markresponspektrum i USNRC-RG 1.60 [6].....	41
Figur 4.2 Horisontella UHS enligt SKI Technical Report 92:3 [7].	42
Figur 4.3 Sannolikhet för överskridande (PGA) motsvarande 10% under 50 år enligt SHARE, för hela Europa och Turkiet, enligt [17].....	44

Figur 4.4 Sannolikhet för överskridande (PGA) motvarande 10% under 50 år enligt SHARE, för Skandinavien och Finland, enligt [17].....	44
Figur 4.5 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-4}$) för Forsmark, Lund, Oskarshamn och Ringhals.....	45
Figur 4.6 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-5}$) för Forsmark, Lund, Oskarshamn och Ringhals.....	45
Figur 4.7 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-5}$) för Forsmark, 15%-, 50%- och 85%-percentilen.....	46
Figur 4.8 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-5}$) för Oskarshamn, 15%-, 50%- och 85%-percentilen.....	47
Figur 4.9 SHARE-UHS ($1 \cdot 10^{-4}$) för Ringhals, 15%-, 50%- och 85%-percentilen.....	47
Figur 4.10 Jämförelse av spektra, USNRC RG 1.60 [6], SKI Technical Report 92:3 [7] och SHARE/ESHM13 [17].....	48
Figur 4.11 Jämförelse av spektra, SKI Technical Report 92:3 [7] och SHARE/ESHM13 [17].....	48
Figur 4.12 Jämförelse av spektra med årliga överskridandefrekvenser $1 \cdot 10^{-4}$, för percentilerna 5%, 15%, 50%, 85% och 95% för Ringhals enligt SHARE/ESHM13 [17] och den årliga överskridandefrekvensen $1 \cdot 10^{-5}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7].....	49
Figur 4.13 Jämförelse av spektra med årliga överskridandefrekvenser $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ och $1 \cdot 10^{-7}$ för Ringhals enligt ESHM13 [17] och $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$ samt $1 \cdot 10^{-7}$ enligt SKI Technical Report 92:3 [7].	50
Figur 5.1 Jämförande nivå av spektralaccelerationer S_A vid 4 Hz.	52
Figur 5.2 Typisk svensk tryckvattenreaktorinneslutning.	53
Figur 5.3 Första och andra böjmoden i x-led vid 4.1 Hz, respektive 13.4 Hz.	54
Figur 5.4 UHS enligt SHARE 10^{-4} (Ringhals) och SKI 10^{-5} , samt förhållandet i effektiv modal massa för respektive böjmod vid 4.1Hz och 13.4 Hz.....	54

Bilaga 2 Lista över tabeller

Tabell 4-1 PGA (g) vid median konfidensnivå (50%-percentilen) enligt ESHM13 [17] för Lund, Ringhals, Forsmark och Oskarshamn.	45
Tabell 4-2 Koordinater där UHS tagits ut för respektive anläggningsområde.....	46
Tabell 4-3 Jämförelse av PGA enligt SHARE/ESHM13 [17] för respektive anläggningsplats och SKI Technical Report 92:3 [7].	48
Tabell 5-1 Jämförande seismisk laster för respektive reaktorinneslutning.	51
Tabell 5-2 Base shear force för statisk ekvivalent metod med all massa i en mod vid 4 Hz. Responsen är normaliserad med avseende på responsen för SKI Technical Report 92:3 (10^{-5}).	52
Tabell 5-3 Reaktorinneslutningens geometri i grova mått.	53
Tabell 5-4 Ingående spektralaccelerationer och modala massor för beräkning av base shear force.	55
Tabell 5-5 Beräkning av base shear force för SHARE RINGHALS (10^{-4}) samt SKI Technical Report 92:3 (10^{-5})	55

Bilaga 3 Lista över förkortningar

AS	Area Source
ASZ	Area Source Zone
DBE	Design Basis Earthquake
EDSF	The European Database of Seismogenic Faults
ENSREG	The European Nuclear Safety Regulators Group
ESHM13	The 2013 European Seismic Hazard Model
FSBG	Fault Source and Background
GMPE	Ground Motion Prediction Equation
IAEA	International Atomic Energy Agency
PGA	Peak Ground Acceleration
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Assessment
SCR	Stable Continental Region
SEIFA	Seismicity and accumulated fault moment
SGU	Sveriges Geologiska Undersökningar
SHARE	Seismic Hazard Harmonization in Europe
SHEEC	SHARE European Earthquake Catalogue
SSK	Strukturer, System och Komponenter
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten
SKI	Statens kärnkraftsinspektion
SRSS	Square Root of Sum of Squares
UHS	Uniform Hazard Spectrum
USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association



2018:27

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se