



Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Forskning

# Kunskapssamman- ställning omfattande seismisk tålighet och analys av strukturer och komponenter i svenska kärntekniska anläggningar

## 2024:04

**Författare:** Konstantinos Xanthopoulos  
KONEX-DATA, Stockholm

**Datum:** Mars 2024

**Rapportnummer:** 2024:04

**ISSN:** 2000-0456

**Tillgänglig på** [www.ssm.se](http://www.ssm.se)





Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Konstantinos Xanthopoulos  
KONEX-DATA, Stockholm

# 2024:04

Kunskapssammanställning omfattande  
seismisk tålighet och analys av  
strukturer och komponenter i  
svenska kärntekniska anläggningar

Datum: Mars 2024

Rapportnummer: 2024:04

ISSN: 2000-0456

Available at [www.stralsakerhetsmyndigheten.se](http://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.

## SSM perspektiv

### Bakgrund

Äldre svenska kärnkraftsreaktorer byggdes utan krav på seismisk dimensionering. Reaktorernas tålighet mot jordbävningar kontrollerades i efterhand med jordbävningsspektra som togs fram i början av 1990-talet inom ett samarbetsprojekt mellan dåvarande myndigheten Statens kärnkraftinspektion (SKI) och kärnkraftsindustrin. Resultatet, vilket presenterades i rapporten SKI TR 92:3, visar markresponsspektra för typiska svenska bergförhållanden vid olika överskridandenivåer uttryckt i antal händelser/år (10-5, 10-6 och 10-7). Sedan dess har jordbävningsspektra med en årlig överskridandefrekvens av 10-5, enligt SKI TR 92:3, tillämpats för mekaniska anordningar som behöver fungera under och efter en jordbävning. Den nämnda jordbävningen fick bli den så kallade dimensionerande jordbävningen (DBE) för kärntekniska tillämpningar i Sverige och har tillämpats även för elektriska komponenter och byggnadsstrukturer. SSM har genom tiden bedrivit forskning inom jordbävningområdet. Inom ramen för denna forskning har bland annat genomförts översyn av SKI TR 92:3 med hänsyn till inverkan av paleoseismisk data på tillämpade markresponsspektra. SSM har även vid olika tillfällen, och i samband med hantering av vissa ärenden gett myndighetens syn om hur händelsen jordbävning ska tillämpas vid analys.

Huvudsyftet med denna studie är att kartlägga, sammanställa och värdera den kunskap som SSM vunnit över tid genom forskningsinsatser och separata ställningstaganden i frågan jordbävning, samt ge rekommendationer för användning vid kärntekniska tillämpningar i Sverige.

### Resultat

I föreliggande rapport redovisas tillämpade krav och praxis samt tillämpad metodik enligt SKI TR 92:3 i Sverige, tillämpliga delar i relevanta normer och standarder samt olika typer av seismiska metoder som kan användas vid kärntekniska tillämpningar i Sverige. I rapporten redovisas också resultat från SSM-publicerade forskningsrapporter inom jordbävningområdet samt tillämpade krav i det nyligen införda systemet för oberoende härdkylning (OBH).

Utifrån genomförd sammanställning och värdering av kunskapsläget rekommenderas att

1. rapporten SKI TR 92:3 bör ses över med hänsyn till bland annat nytillkommen kunskap,
2. en seismisk utvärdering med hänsyn till risken för tröskeeffekter bör genomföras vart tionde år och i samband med PSR-granskningar (Periodic Safety Review),
3. det nuvarande seismiska klassningssystem som tillämpas i Sverige är föråldrat och bör ses över, och
4. den med europeiska markresponsspektra (SHARE/ ESHM13) beräknade högre seismiska responsen för Ringhals bör utredas vidare.

### Relevans

Föreliggande rapport kan användas som underlag i säkerhetsbedömningar av anläggningarnas jordbävningstålighet samt i tillståndsprövningsprocesser där seismiska förhållanden och belastningar behöver värderas, exempelvis vid val av förläggningsplats av nya kärnkraftsreaktorer. Rapporten kan således vara till nytta för SSM i sin roll som tillsynsmyndighet. Rapporten kan vidare användas som stöd för kompetensöverföring inom myndigheten och i dialogen med tillståndshavarna.

### Behov av fortsatt forskning

Det finns behov av fortsatt forskning vad gäller översyn av rapporten SKI TR 92:3 och den beräknade högre seismiska responsen för Ringhals med användning av europeiska markresponsspektra (SHARE/ESHM13).

### Project information

Kontaktperson SSM: Fredrik Forsberg  
Referens: SSM2022-8535/4530631-00.



# Sammanfattning

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) initierade tillsammans med KONEX-DATA ett projekt för att kartlägga, sammanställa och värdera den kunskap som SSM vunnit över tid genom forskningsinsatser och separata ställningstaganden i seismiska frågor, samt ge rekommendationer för såväl förbättringar som tillämpningar inom jordbävningsområdet.

I föreliggande rapport redovisas tillämpade krav och praxis samt tillämpad metodik enligt SKI TR 92:3 i Sverige, tillämpliga delar i relevanta normer och standarder samt olika typer av seismiska metoder som kan användas vid kärntekniska tillämpningar i Sverige. I rapporten redovisas också resultat från SSM-publicerade forskningsrapporter inom jordbävningsområdet samt tillämpade krav i det nyligen införda systemet för oberoende härdkylning (OBH).

I början av 1990-talet togs det fram svenska jordbävningsspektra för tre olika sannolikhetsnivåer för överskridande uttryckt i antal händelser per år ( $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1 \cdot 10^{-6}$  och  $1 \cdot 10^{-7}$ ) genom ett samarbetsprojekt, *Projekt Seismisk Säkerhet*, mellan dåvarande myndigheten Statens kärnkraftinspektion (SKI) och kärnkraftsindustrin. Jordbävningen med en årlig inträffandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  fick sedan bli den dimensionerande jordbävningen (DBE) vid kärntekniska tillämpningar i Sverige. DBE baseras på observationer och historiska registreringar av jordbävningar i Fennoskandia under de senaste 500 åren samt på jämförelser med förekomst av jordbävningar i andra lågseismiska områden i världen.

Resultatet av SSM:s granskning av jordbävningsunderlaget inom ramen för projekt oberoende härdkylning (OBH) är viktigt för framtida säkerhetsbedömningar av strukturer och komponenter utsatta för jordbävningslaster. Det handlar bland annat om tillämpning av minsta acceptabla markacceleration för DBE och tillämpning av lägsta risknivå för tillstånd utanför design (Design Extension Conditions, DEC) vid värdering av säkerhetsmarginaler mot tröskeffekter.

Postglaciala skalv (paleoseismisk data) bedöms inte påverka resultaten i SKI TR 92:3 om den tillämpade beräkningsmetoden i SKI TR 92:3 används. Resultatet från beräknad skalvaktivitet utifrån det moderna svenska data tyder på att värdena i SKI TR 92:3 är konservativt uppskattade för skalv med magnitud upp till och med 5.0 i Richterskalan, men icke konservativa för större skalv. Vidare går det inte att utesluta att en modern seismisk riskanalys (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) med beaktande av paleoseismisk data inte resulterar i en ökad jordbävningsrisk.

Föreliggande rapport rekommenderar att befintliga strukturer och komponenter som konstruerades utan krav på jordbävningstålighet, bör genomgå en seismisk utvärdering i syfte att visa att det inte finns risk för tröskeffekter (cliff-edge effects). Sådana utvärderingar kan exempelvis genomföras vart tionde år och i samband med PSR-granskningar (Periodic Safety Review).

Rapporten rekommenderar också att SKI TR 92:3 bör ses över med hänsyn till nytillkommen kunskap avseende bland annat de stora förbättringarna i jordskalvkatalogen Fencat och den omfattande utvecklingen av PSHA-metoden.

Enligt föreliggande rapport är det nuvarande seismiska klassningssystem som tillämpas i Sverige föråldrat och bör således ses över. Rapporten föreslår också att den med europeiska markresponsspektra (SHARE/ ESHM13) beräknade högre seismiska responsen för Ringhals bör utredas vidare.

# English Summary

The Swedish radiation safety authority (SSM) initiated a project with KONEX-DATA in order to map, compile and evaluate the knowledge that has been gained over time through research funded by SSM and by particular positions on seismic issues, as well as provide recommendations for improvements concerning earthquake.

In this report, applied requirements and practice as well as applied methodology according to SKI TR 92:3 in Sweden, applicable parts of relevant norms and standards as well as different types of seismic methods that can be used in nuclear applications in Sweden are reported. The report also presents results from SSM-published research studies in the field of earthquake as well as applied requirements in the recently installed independent core cooling system (ICCS).

In the early 1990's, envelope ground response spectra with a yearly exceedance probability of  $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1 \cdot 10^{-6}$  and  $1 \cdot 10^{-7}$  were developed for Sweden in a joint venture project between the Swedish nuclear power inspectorate (SKI) and the Swedish licensees. The earthquake with an annual occurrence frequency of  $1 \cdot 10^{-5}$  then had to be the design basis earthquake (DBE) for nuclear applications in Sweden. The Swedish earthquakes are based on observations and historical records of earthquakes in Fennoscandia during the last 500 years as well as comparisons with the occurrence of earthquakes in other low seismic regions in the world.

According to the present report, the results and conclusions of the ICCS-review should be considered in future safety assessments of structures and components exposed to earthquake loads, for example, regarding the use of minimum acceptable ground acceleration for DBE and the lowest risk level for design extension conditions (DEC) when evaluating safety margins against cliff-edge effects.

Postglacial earthquakes (paleoseismic data) are not considered to affect the results of SKI TR 92:3, if analysed with the SKI TR 92:3. Occurrence rates estimated with only modern Swedish earthquake data indicate that the SKI TR 92:3 estimate may be conservative for earthquakes of magnitude up to 5.0 on the Richter scale, but that it may underestimate the rate of larger earthquakes. However, a modern seismic hazard analysis (PSHA) taking into account paleoseismic data would probably increase the estimated hazard.

It is recommended that structures and components in existing nuclear facilities which were constructed without consideration of seismic requirements, should be seismically evaluated in order to verify that there is no risk of cliff-edge effects. Such evaluations may, for example, be carried out every ten years and in connection to a PSR.

The present report suggests that an update of SKI TR 92:3 is carried out on the basis of new knowledge including the major improvements in data collection and the enormous development of the PSHA-methods.

Furthermore, the present report considers that the current seismic classification system used in Sweden is outdated and therefore needs to be updated. The report also considers that the higher seismic response calculated with the European ground response spectra (SHARE/ESHM13) for the location of Ringhals, is further investigated.



# Innehåll

<b>1. Inledning</b> .....	<b>4</b>
1.1. Bakgrund .....	4
1.2. Syfte.....	5
<b>2. Allmänt om jordbävning</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Tillämpade krav och praxis</b> .....	<b>8</b>
3.1. Svensk praxis .....	8
3.2. SSM:s föfattningssamling.....	9
<b>4. Metodik enligt SKI TR 92:3</b> .....	<b>11</b>
<b>5. Normer och standarder</b> .....	<b>14</b>
5.1. IAEA Safety Standard series.....	14
5.2. WENRA-dokument .....	16
5.3. Eurokod 8 .....	19
5.4. ASCE och ACI-standarder.....	20
<b>6. Seismiska metoder</b> .....	<b>22</b>
6.1. Erfarenhetsbaserade metoder.....	22
6.2. Provningsmetoder .....	23
6.3. Normenliga beräkningsmetoder .....	23
<b>7. Jordbävningsskrav i OBH-projektet</b> .....	<b>24</b>
7.1. Allmänt.....	24
7.2. SSM:s bedömning och ställningstagande .....	25
<b>8. SSM:s genomförda forskning</b> .....	<b>27</b>
8.1. ESHM13 – En ny PSHA-modell för Europa .....	27
8.2. Review of paleoseismicity in Sweden .....	32
8.3. Seismic design and analysis in Sweden .....	35
8.4. Inverkan från undergrund och bränslebasånger .....	40
8.5. Dimensionering av byggnadskonstruktioner .....	43
<b>9. Slutsatser och rekommendationer</b> .....	<b>47</b>
9.1. Slutsatser.....	47
9.2. Rekommendationer .....	48
<b>10. Erkännanden</b> .....	<b>50</b>
<b>11. Referenser</b> .....	<b>51</b>
<b>Bilaga 1 – Lista över förkortningar</b> .....	<b>54</b>
<b>Bilaga 2 – Lista över figurer</b> .....	<b>57</b>
<b>Bilaga 3 – Lista över tabeller</b> .....	<b>58</b>

# 1. Inledning

## 1.1. Bakgrund

Skandinavien utgörs av den Baltiska skölden, det som brukar kallas urberget, en landmassa som fogats samman under flera bergkedjecykler under prekambrium<sup>1</sup> och idag utgör ett tektoniskt sett stabilt område med låg seismisk aktivitet.

De äldre svenska kärnkraftsreaktorerna byggdes utan krav på seismisk dimensionering. Vid dimensioneringen av de senast uppförda kärnkraftsreaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3 infördes dock krav på beaktande av jordbävning. Dimensioneringen av dessa anläggningar baserades på markresponspektra enligt USNRC<sup>2</sup> RG 1.60 [3], då det vid den tiden inte fanns motsvarande seismiskt underlag framtaget för svenska förhållanden. Även vid uppförandet av CLAB<sup>3</sup> etapp 1 under 1980-talet användes dessa amerikanska markresponspektra för seismisk dimensionering av exempelvis bränsleförvaringsbassängerna.

De äldre svenska reaktorernas jordbävningstålighet bedömdes i efterhand utifrån jordbävningsspektra som togs fram i början av 1990-talet inom ett samarbetsprojekt mellan dåvarande myndigheten Statens kärnkraftinspektion (SKI) och de svenska kraftbolagen. Resultatet som presenterades i rapporten SKI TR 92:3 [4] visar markresponspektra för typiska svenska bergförhållanden vid olika överskridandenivåer uttryckt i antal händelser/år ( $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1 \cdot 10^{-6}$  och  $1 \cdot 10^{-7}$ ). Sedan dess har jordbävningsspektra med en årlig överskridandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  enligt SKI TR 92:3 tillämpats för mekaniska anordningar som behöver fungera under och efter en jordbävning. Denna jordbävning fick bli den s.k. dimensionerande jordbävningen (DBE<sup>4</sup>) för kärntekniska tillämpningar i Sverige. Denna praxis har tillämpats även för elektriska komponenter och byggnadsstrukturer, dock i varierande grad, huvudsakligen beroende på att för dessa konstruktioner saknades preciserade krav och tillräcklig vägledning i Strålsäkerhetsmyndighetens (SSM) författningssamling.

Efter Fukushima-händelsen 2011 och inom ramen för de europeiska stresstesterna genomgick SKI TR 92:3 en granskning av ENSREG<sup>5</sup>. Granskningsgruppen fann att SKI TR 92:3 baseras på observationer och historiska data i Fennoskandia<sup>6</sup> under en tidsperiod av endast cirka 500 år. ENSREG ifrågasatte denna korta tidsrymd, inte minst på grund av att geodetiska och paleoseismiska data indikerar aktiva postglaciala uppåtriktade rörelser i Fennoskandia [49]-[50].

I Skandinavien varar ett skalv normalt i sekundskala medan kraftiga skalv vid stora förkastningar kan pågå i flera minuter. De viktigaste parametrarna när risker förknippade med jordskalv analyseras för kärntekniska anläggningar är magnitud, frekvensinnehåll samt varaktighet. För att kunna räkna ut hur ett tänkt skalv påverkar en viss kärnteknisk anläggning krävs information om markens geologi, dess responspektrum och dynamiska parametrar. Utifrån dessa data samt byggnadernas konstruktion kan man beräkna krafter och deformationer i olika delar av en kärnteknisk anläggning.

---

<sup>1</sup> Tidigare kallad urtiden, motsvarar tiden från jordens bildande fram till ca 540 miljoner år sedan.

<sup>2</sup> United States Nuclear Regulatory Commission

<sup>3</sup> Centralt mellanlager för använt kärnbränsle

<sup>4</sup> Design Basis Earthquake

<sup>5</sup> European Nuclear Safety Regulators Group

<sup>6</sup> Fennoskandia är ett geografiskt område som inkluderar den skandinaviska halvön (Sverige och Norge), Finland, Kolahalvön och ryska karelen.

SSM har genom tiden bedrivit en del forskning inom jordbävningssområdet. Inom ramen för denna forskning har bland annat genomförts en

- översyn av SKI TR 92:3 med hänsyn till inverkan av paleoseismisk data på tillämpade markresponsspektra,
- undersökning av de spänningar och deformationer som kan uppstå i en anläggnings byggnadsdelar vid en jordbävningsslast genom tillämpning och jämförelse av olika analysmetoder, och
- studie om hur kärnbränsle- och kondensationsbassängerna påverkar reaktorinneslutningen till en kokvattenreaktor som blir utsatt för jordbävningsslast.

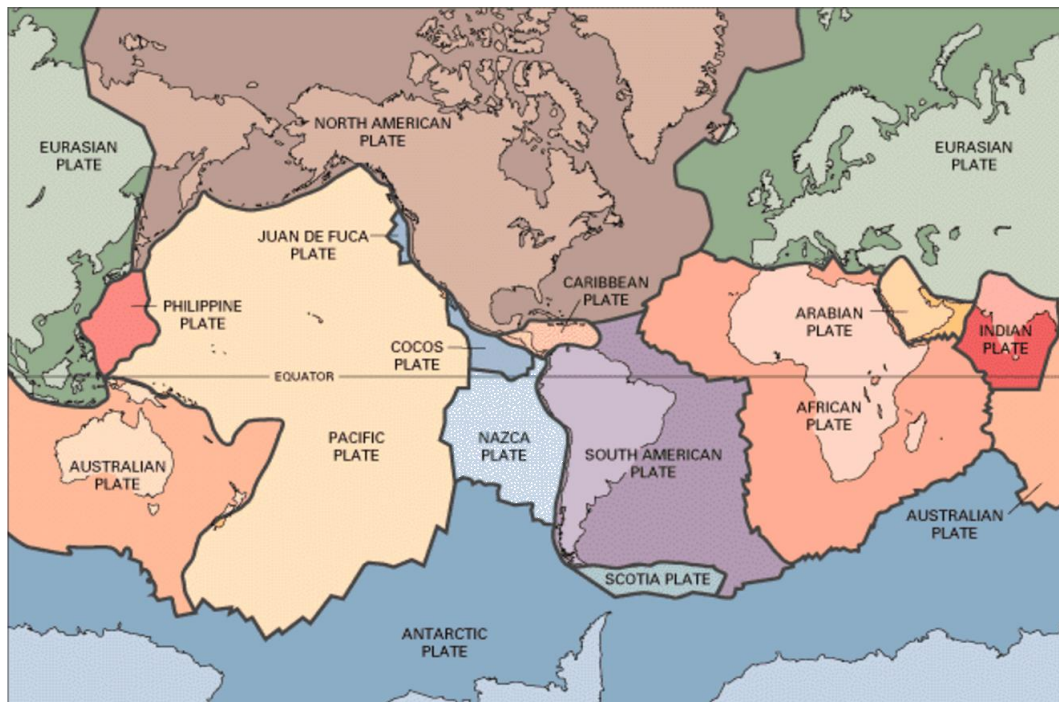
SSM har även i samband med hantering av vissa ärenden gett sin syn om hur händelsen jordbävning ska tillämpas.

## 1.2. Syfte

Huvudsyftet med arbetet i denna rapport är att kartlägga, sammanställa och värdera de kunskaper som SSM vunnit över tid genom forskningsinsatser och separata ställningstaganden i frågan jordbävning, samt ge rekommendationer för användning vid kärntechniska tillämpningar i Sverige.

## 2. Allmänt om jordbävning

Jordklotet är uppbyggt av tre koncentrisk lager med jordskorpan som ett tunt yttre skal, manteln, samt kärnan som är jordklotets innersta del. Jordens mantel är till största delen fast, men de yttre delarna har plastiska egenskaper. Jordens kärna består av en inre del som antas vara fast och med den högsta temperaturen ( $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) samt en yttre del som antas vara flytande. Jordskorpan och den övre delen av manteln tillsammans kallas litosfären, efter det grekiska ordet för sten, och plattorna benämns därför litosfärplattor, se figur 1. Dessa plattor flyter på den relativt mjuka delen av manteln som kallas astenosfären. Jordskorpan tjocklek varierar mellan 5 – 70 kilometer. I Sverige är jordskorpan vanligen mellan 40 – 50 kilometer tjock. Litosfärplattor under världshaven kallas oceaniska och är tunnare men tyngre än de kontinentala beroende på att de består av bergarter med högre densitet. Den gren av geovetenskaperna som behandlar litosfärplattornas rörelser kallas platteteknik [1].



Figur 1. De huvudsakliga plattorna i jordskorpan, Ref. [64]

Det finns tre olika typer av gränser mellan litosfärplattorna; transformala förkastningar, kollisionszoner och spridningszoner. Transformala förkastningar uppstår där plattorna rör sig i sidled med varandra. Kollisionszoner är de zoner där plattorna kolliderar med varandra. Spridningszoner är de områden där plattorna glider isär. I gränserna mellan plattorna finns stora förkastningar eller skjuvzoner i jordskorpan. På grund av rörelser i den underliggande manteln byggs upp spänningar längs plattgränserna. När en sådan spänning blir för stor utlöses den genom en hastig rörelse längs en svaghetszon. Denna rörelse är den som karakteriserar en jordbävning, även kallad jordskalv, och ger upphov till ljudvågor som fortplantas genom berggrunden. Vid en jordbävning frigörs således stora mängder energi som sprids i form av seismiska vågor [1].

Det finns tre huvudtyper av seismiska vågor; primära vågor (P-vågor), skjuvsvågor (S-vågor) och ytvågor. P-vågor överför sin energi genom kompression, d.v.s. parallellt med vågens riktning. P-vågor är de snabbaste av de tre seismiska vågorna. En S-våg kan röra sig

endast i fasta ämnen och förorsakar partikelrörelser i en riktning vinkelrätt mot utbretningsriktningen. När P-vågor och S-vågor når markytan reflekteras de och genererar då även ytvågor vilka kan vara antingen longitudinella (Rayleigh) eller tvärgående (Love och Rayleigh). Dessa vågor är långsammare än både P- och S-vågor, men har en högre amplitud och kan således bli mer destruktiva än övriga [61].

Jordbävningens storlek beskrivs normalt av magnituden ( $M$ ) som för det mesta är ett tal mellan 0 och 10. Magnituden räknas med hjälp av storleken på registrerade markrörelser i seismiska stationer runt jordbävningen. Skalan som man använder kallas ofta för Richterskalan efter utvecklaren Charles Richter på 1930-talet. Magnitudskalan är logaritmisk och konstruerad så att för varje helt steg på skalan ökar den utstrålade energin i jordbävningen med en faktor ca 32. Den moderna skalan för jordbävningar kallas momentmagnitud  $M_w$ . För mindre jordskalv uppmätta nära skalvet används ofta den så kallade lokala magnitudskalan  $M_L$ . Momentmagnitud  $M_w$  definieras genom relationen med det så kallade skalära seismiska momentet  $M_0$  som räknas ut från storleken på den ytan som rört sig, rörelsens storlek och bergets elastiska egenskaper. De jordskalv som inträffar i Sverige har oftast magnituder under 2.0, ett tiotal jordbävningar med magnitud mellan 2.0 och 3.0 inträffar årligen medan någon enstaka jordbävning per år är över 3.0 i magnitud. Sveriges mest seismiskt aktiva område är lokaliserat söder om Skellefteå (s.k. postglaciala Burträskförkastning) [2]. Återkomsttiden för kraftigare jordbävningar är mer osäker då mätningarna har pågått under relativt kort tid. Baserat på historiska data och instrumenteringsperioden kan det antas att skalv mellan  $M_5$ – $M_6$  sker ungefär en gång per sekel [48].

Jordbävningens position bestäms av dess hypocentrum eller fokus och epicentrum. Hypocentrum är den del i jordskorpan inre där brott uppstår medan epicentrum är delen på markytan direkt ovanför hypocentrum. Graden av lokala skador beror på jordbävningens magnitud, avståndet till epicentrum, lokala geologiska och geomorfologiska förhållanden samt i vilken utsträckning byggnormer följts med avseende på seismiska laster. Ett jordskalv till havs kan förflytta stora mängder vatten och skapa en vattenvåg, tsunami, som när den närmar sig land snabbt ökar i våghöjd. När tsunamin bryter in över land kan den orsaka stor skada.

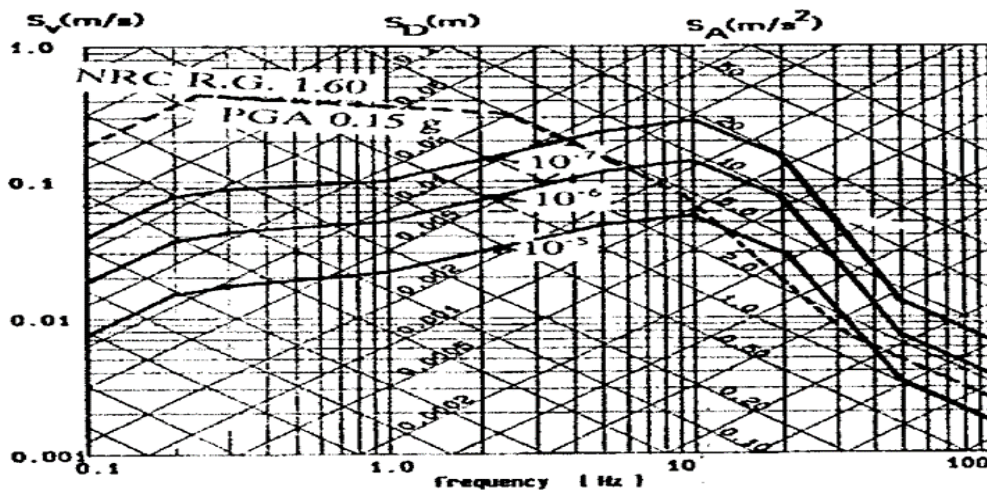
## 3. Tillämpade krav och praxis

### 3.1. Svensk praxis

Vid konstruktionen av de äldre svenska kärnkraftsreaktorerna beaktades inga extrema yttre händelser såsom svåra väderförhållanden och jordbävning. Ett i efterhand ökat säkerhetsmedvetande inom den svenska kärnkraftsbranschen under 1970-talet medförde att i de senast uppförda kärnkraftsreaktorerna, Forsmark 3 och Oskarshamn 3, infördes krav på dimensionering med hänsyn till jordbävning. Detsamma gällde vid uppförandet av CLAB etapp 1 under 1980-talet samt vid införandet av de konsekvenslindrade systemen<sup>7</sup> på samtliga svenska kärnkraftsreaktorer under 1986. För dessa har ett amerikanskt jordbävningsspektrum<sup>8</sup> använts vid deras dimensionering [3] då vid den tiden saknades jordbävningsspektra speciellt framtagna för svenska förhållanden.

I början av 1990-talet togs fram svenska jordbävningsspektra genom ett samarbetsprojekt, *Projekt Seismisk Säkerhet*, mellan dåvarande myndigheten Statens kärnkraftinspektion (SKI) och kärnkraftsindustrin.

Dessa typiska spektra för kristallint berg<sup>9</sup>, vilket dominerar den Baltiska skölden, presenterades i SKI TR 92:3 [4] som en årlig sannolikhet för att skalv av en viss styrka ska inträffa vid anläggningen. Sannolikheterna motsvarar en årlig överskridandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1 \cdot 10^{-6}$  och  $1 \cdot 10^{-7}$ , se figur 2 nedan. Eftersom det inte fanns tillräckligt med data om markresponser från stora jordbävningar i Sverige, användes i stället japanska markresponsspektra som modifierats för svenska förhållanden.



**Figur 2.** The original Swedish design response spectrum, based on RG 1.60 and scaled to  $PGA^{10}=0,15g$  for horizontal acceleration, compared with suggested Envelope Ground Response Spectrum for  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  and  $10^{-7}$  annual events per site (Figur 13 i [4])

<sup>7</sup> Systemens uppgift är att begränsa radioaktiva utsläpp vid ett svårt haveri. Systemens funktion består av dels sprinkla och vattenfylla reaktorinneslutningen, och dels tryckavsäkra den via ett anslutande rör till den s.k. skrubberbyggnad.

<sup>8</sup> Jordbävningsspektrum enligt USNRC Regulatory Guide 1.60 (RG 1.60) skalat till 0,15 g för horisontell markacceleration och 0,1 g för vertikal acceleration.

<sup>9</sup> Benämns *hard rock* i SKI TR 92:3

<sup>10</sup> Peak Ground Acceleration

Dessa spektra [4] skulle representera den seismiska faran för alla svenska kärnkraftsreaktorer. Efter projektets avslut genomförde kärnkraftsindustrin utredningar [6]-[7] i syfte att studera betydelsen av bergets hårdhetsvariation och dess eventuella effekt på resultatet i SKI TR 92:3. Skälet var att de japanska seismiska data som använts som underlag för framtagning av de svenska seismiska spektra var hämtad från områden där bergets hårdhetsvariation har varit stor. Hårdhetsvariationen, och därmed skjuvvågshastigheten, i berggrunden karakteriseras av på vilket djup det kristallina urberget påträffas.

Utifrån resultatet från genomförda geologiska undersökningar för Oskarshamns- och Ringhalsområdet, fastställde utredningen [7] att markresponsspektra enligt SKI TR 92:3 representerar förhållandena i Barsebäck, medan för anläggningarna i Ringhals och Oskarshamn får dessa spektra reduceras med 15 %. Denna reduktion har sedan använts huvudsakligen i samband med genomförda verifieringar av strukturer, system och komponenter (SSK) i kärntekniska anläggningar.

I samband med de genomförda moderniserings- och effekthöjningsprogrammen under 1990- och 2000-talen har de svenska kärnkraftsreaktorerna analyserats för en jordbävning med en årlig överskridandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  enligt SKI TR 92:3 [4]. Denna jordbävning ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) fick bli den så kallade dimensionerande jordbävning (DBE) för kärntekniska tillämpningar i Sverige. Denna praxis har främst tillämpats för jordbävningsanalys av mekaniska komponenter. För elektriska komponenter och byggnadsstrukturer har den tillämpats i varierande grad huvudsakligen beroende på att för dessa konstruktioner saknades preciserade krav och tillräcklig vägledning i SSM:s författningssamling.

Som en jämförelse mellan Richterskalan och de svenska jordbävningsnivåerna, motsvarar en jordbävning med magnituden 6.0 i omedelbar närhet till anläggningen (10 – 20 km), en sannolikhet mellan  $1 \cdot 10^{-5}$  och  $1 \cdot 10^{-6}$  i de svenska jordbävningskurvorna [65].

## 3.2. SSM:s författningssamling

### SKIFS 1998:1

Krav på beaktade av jordbävning infördes första gången i SKI:s allmänna föreskrifter SKIFS 1998:1 [57]. I dessa föreskrifter anges jordbävning som exempel på en händelse för vilken det ska visas att anläggningarna innehåller tålighet med avseende på barriärernas eller djupförsvarets säkerhetsfunktion.

### SSMFS 2008:17 (SKIFS 2004:2)

I efterföljande föreskrifter SSMFS 2008:17 (SKIFS 2004:2) [58] anges att kärnkraftsreaktorerna ska vara dimensionerad för att motstå naturfenomen och andra händelser som uppkommer utanför eller inne i anläggningen och som kan leda till en radiologisk olycka. För sådana naturfenomen och händelser ska dimensionerande värden vara fastställda. I föreskriftens allmänna råd anges jordbävning som exempel på naturfenomen som bör beaktas.

### SSMFS 2021:4 och SSMFS 2021:5

Av dessa nya föreskrifter, ref. [59] respektive [60], framgår bland annat följande:

- Jordbävning med överskridande årlig frekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  ska tillhöra händelseklass H4A, d.v.s. osannolika händelser och förhållanden. Denna jordbävning ska betraktas som den dimensionerande jordbävningen DBE vid kärntekniska tillämpningar.

- Jordbävning med överskridande årlig frekvens av  $1 \cdot 10^{-6}$  ska tillhöra händelseklass H4B, d.v.s. speciella händelser och förhållanden. Införandet av denna jordbävning har sin grund på SSM:s beslut om oberoende härdkyllning [28] och på det så kallade tillstånd DEC-A (Design Extension Conditions, DEC) enligt WENRA<sup>11</sup> RHWG<sup>12</sup> [5]. Syftet med DEC-A är att förhindra betydande bränsleskada i reaktorhärden respektive förvaringsutrymme för använt kärnbränsle.
- Kvalitativa kriterier för maximala konsekvenser är desamma för H4A och H4B men analysförutsättningar kan skilja avseende bland annat hantering av osäkerheter och tillgodoräknande av säkerhetsfunktioner.

De senaste decennierna har inom ramen för moderniseringsprogram införts omfattande förbättringar vid de svenska kärnkraftsreaktorerna för att de fundamentala säkerhetsfunktionerna ska kunna upprätthållas under och efter en jordbävning. Härvid har strukturer och komponenter som behöver fungera vid en jordbävning analyserats mot den svenska DBE.

Efter Fukushima-händelsen 2011 och i samband med de genomförda europeiska stresstesterna har vissa byggnadsstrukturer av säkerhetsmässig betydelse, såsom reaktorinneslutningar och bränslebassänger, även kontrollerats för jordbävning med en årlig överskridningsfrekvens av  $1 \cdot 10^{-7}$  och med en skattad PGA=0,41 g enligt SKI TR 92:3. Syftet var att visa att inga så kallade tröskeffekter (cliff-edge effects)<sup>13</sup> inträffar.

---

<sup>11</sup> Western European Nuclear Regulators Association

<sup>12</sup> Reactor Harmonization Working Group

<sup>13</sup> Plötslig övergång till ett försämrat anläggningstillstånd till följd av en liten avvikelse i en ingångsparameter. (Definition enligt IAEA SSR-2/1)



## 4. Metodik enligt SKI TR 92:3

Projektet *Seismisk Säkerhet* genomfördes i samarbete mellan SKI, Vattenfall AB, Sydkraft AB och OKG AB. Projektets målsättning var att utveckla metoder för beräkning av markskakningsförlopp att användas vid säkerhetsanalys av kärnkraftreaktorer i Sverige samt att demonstrera deras tillämpning på kärnkraftreaktorer i Ringhals och Barsebäck. Arbetet dokumenterades i följande fem rapporter:

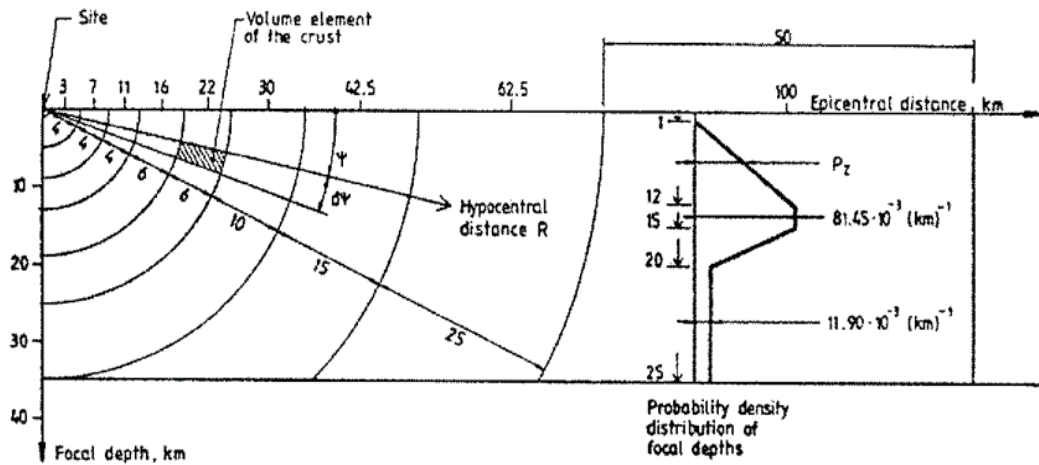
1. Report No. 1: Probabilistic assessment of seismic ground motion characteristics for Swedish hard rock sites.
2. Report No. 2: Seismic response spectra for characterization of ground motions in Swedish hard rock.
3. Report No. 3: Synthetic time-histories for characterization of ground motions in Swedish hard rock.
4. Report No. 4: Characterization of seismic ground motions for Barsebäck NPP (Nuclear Power Plants).
5. Report No. 5: Geological aspects on seismic hazard assessments for the Ringhals and Barsebäck NPP sites.

Markskakningsförlopp uttrycktes som markresponsspektra med tillhörande syntetiskt framtagna accelerations-tidshistorier. Markresponsspektra togs fram för olika dämpningsvärden i både horisontell och vertikal riktning medan tillhörande tidshistorier utvecklades för både vertikal och två ortogonala horisontella riktningar. I första hand togs beskrivningar av markskakningsförloppen fram för en anläggning på kristallin berggrund, dvs. granitiska till gnejsiga bergarter som dominerar berggrunden i Sverige. Vidare beaktades anläggnings-specifika förhållanden för Barsebäck genom att modellera skikt av sedimentärt berg och jord ovanpå det kristallina berget.

Den i projektet tillämpade metodiken består av följande steg [4]:

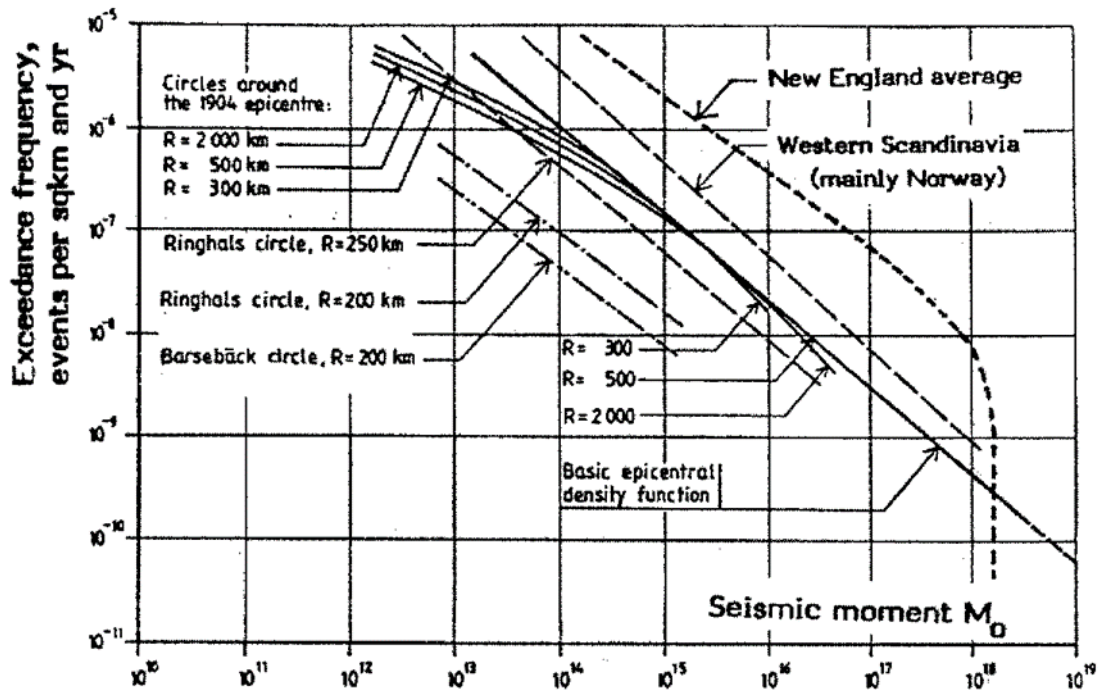
1. Uppskatta den seismiska frekvensen för samtliga signifikanta händelser, grupperade i diskreta klasser utifrån parametrarna seismiskt moment  $M_0$  och avstånd  $R$  till hypocentrum.
2. Upprätta händelsespecifika markresponsspektra för kristallina berggrundsförhållanden.
3. Uppskatta spridningen av spektralvärden runt medelvärdet.
4. Ta fram markresponsspektra för vissa utvalda sannolikhetsnivåer.
5. Generera syntetiska tidshistorier svarande mot framtagna markresponsspektra.
6. Ta fram anläggnings-specifika markresponsspektra med tillhörande syntetiskt genererade accelerations-tidshistorier.

Den tillämpade modellens geometriska egenskaper illustreras i figur 3. Den seismiska risken beräknades utifrån en geometrisk beskrivning av jordskorpan och en sannolikhetsfördelning av jordbävningens avstånd till hypocentrum enligt figur 3.



Figur 3. Geometrical division and distribution of focal depths adopted for the calculation of hypocentral densities of occurrence (Figur 4 i ref. [4])

Över hela det signifikanta områdesintervallet av olika jordbävningstorlekar och lokaliseringar, kategoriserades händelserna i olika klasser med hänsyn till seismiskt moment  $M_0$  och avståndet till hypocentrum  $R$ . Utifrån en storskalig seismisk zonindelning och tektoniska överväganden fick man fram en Fennoskandisk epicentrisk täthetsfunktion direkt tillämplig för minst två kärnkraftsreaktorer (Ringhals och Barsebäck), och även för de övriga reaktorerna efter mindre modifieringar, se figur 4.



Figur 4. The adopted average Fennoscandian epicentral density function compared with curves connecting data points relating to various geographical zones (Figur 5 i [4])

För varje volymelement i den geometriska modellen enligt figur 3 bestämdes händelsefrekvensen för de olika klasserna, baserat på den fennoskandiska täthetsfunktionen enligt figur 4 och sannolikhetsfördelningen av avståndet till hypocentrum enligt Figur 3. Den epicentriska täthetsfunktionen bestämdes utifrån tillgängliga kataloger med data från jordbävningshändelser i Fennoskandia under en period på nästan 500 år.

Resultatet av det första steget i den probabilistiska värderingen blev en matris med inträffande frekvens för varje vald klass av händelser utifrån en viss kombination av det seismiska momentet  $M_0$  och avståndet till hypocentrum  $R$ .

Modellen som användes för framtagning av händelsespecifika markresponsspektra baserades på bearbetning av empiriska data från mer högseismiska regioner för att passa de typiska förhållandena i Sverige. Huvudanledningen till valet av ett sådant förfaringssätt är den uppenbara bristen på data till jordbävningar som beaktas vid en riskanalys av kärntekniska anläggningar.

Markresponsspektra karakteristiska för svenska förhållanden togs fram genom att modifiera motsvarande japanska spektra med hänsyn till faktorer som förväntas påverka utformningen på spektra. Sådana faktorer är förknippade med skillnader i källparametrar såsom exempelvis spänningsfall och förkastningsyta samt vågutbredningseffekter såsom exempelvis olinjär dämpning.

## 5. Normer och standarder

Utveckling av normer och standarder för jordbävningsdimensionering samt utveckling av jordbävningskrav i myndigheters regelverk världen över har ökat under åren i takt med att ny kunskap ständigt tillkommit. De första generella designkraven infördes under 1930-talet. Inträffande av svåra jordbävningar under första halvan av 1900-talet bidrog till att byggrelaterade normkrav infördes. Den begränsande kunskapen om den seismiska påverkan och avsaknaden av tillförlitliga mätmetoder för registrering av markaccelerationer, gjorde att jordbävningslasterna inte kunde beräknas med tillräcklig noggrannhet.

Under andra halvan av 1900-talet och med ökande kunskap om seismisk dimensionering infördes stegvist förbättringar i existerande byggböcker, bland annat när det gäller tillämpning av dynamisk analys. Den ökade tillgängligheten till accelerogram och den snabba utvecklingen av datorbaserade verktyg bidrog till mer detaljerade och tillförlitliga analyser. Vidare hade den snabbväxande utbyggnaden av kärnkraftreaktorer under 1960- och 1970-talet bidragit starkt till den raska utvecklingen av normer och standarder vid kärntechniska tillämpningar. Dagens kunskap om olika strukturers och komponenters seismiska tålighet är jämfört med tidigare på en högre nivå, bland annat till följd av vunnen erfarenhet från nya inträffade jordbävningar världen över.

### 5.1. IAEA Safety Standard series

IAEA har tagit fram ett stort antal säkerhetsstandarder som omfattar kärnsäkerhet, strålsäkerhet, transportsäkerhet och avfallssäkerhet. Dessa standarder avspeglar internationell konsensus om vad som kan sägas utgöra en hög och tillförlitlig säkerhetsnivå för skydd av människor och miljö från skadliga effekter av joniserande strålning.

#### IAEA SSR-2/1

Denna standard [16], tidigare IAEA NS-R-1, innehåller designkrav för SSK i en kärnkraftsreaktor samt krav för organisatoriska processer som är viktiga för säkerheten och som måste uppfyllas för säker drift och för att förhindra händelser som kan äventyra säkerheten, eller för att mildra konsekvenserna av sådana händelser ifall de skulle inträffa.

Av paragrafen 5.17 framgår bland annat att konstruktionen ska beakta de naturfenomen och mänskligt framkallade yttre händelser som identifierats vid utvärderingsprocessen av anläggningsplatsen.

Av paragraferna 5.21 och 5.21A framgår att anläggningens konstruktion ska säkerställa att det finns tillräckliga säkerhetsmarginaler för skydd av säkerhetsrelaterade SSK mot externa faror inom design, så att tröskeleffekter inte uppstår, samt för skydd av sådana säkerhetsrelaterade SSK som är nödvändiga för att förhindra ett tidigt radioaktivt utsläpp eller ett stort radioaktivt utsläpp vid naturfenomen utanför design.

Av paragrafen 5.32 framgår att jordbävningen är bland de naturfenomen som behöver beaktas.

## IAEA SSG-67

Denna standard [8], tidigare IAEA NS-G-1.6, innehåller rekommendationer om hur en kärnteknisk anläggning ska konstrueras så att en ansatt jordbävning enligt IAEA SSG-9 [9] inte skulle förmå äventyra anläggningens säkerhet. Standarden ger också vägledning på tillämpning av metoder och procedurer för analys, provning och kvalificering av strukturer och utrustning för att de ska kunna uppfylla tillämpliga säkerhetskrav i till exempel IAEA SSR-2/1[16].

### Paragrafer 3.18, 3.22 och 3.25

Utifrån ett probabilistiskt tillvägagångssätt definieras två olika seismiska risknivåer, SL-1 och SL-2. Den seismiska risknivån SL-2 motsvarar en årlig överskridande sannolikhetsnivå i intervallet mellan  $10^{-3}$  och  $10^{-5}$  (medelvärde).

Den seismiska risknivån SL-1 motsvarar en årlig överskridande sannolikhetsnivå i intervallet mellan  $10^{-2}$  och  $10^{-3}$  (medelvärde). SL-1 nivån definieras vanligtvis som en procentandel av SL-2 nivån.

Termen dimensionerande jordbävning (DBE) definieras som den seismiska risknivån som behöver beaktas vid konstruktion av SSK i en kärnteknisk anläggning. De seismiska risknivåerna SL-2 och SL-1 bör utgöra den dimensionerande jordbävningen vid analys av en kärnteknisk anläggning för att säkerställa anläggningens säkerhet respektive möjlighet till fortsatt drift. För områden med låg seismisk aktivitet kan den dimensionerande jordbävningen definieras av endast en seismisk risknivå.

I sammanhanget kan nämnas att den seismiska risknivån SL-2 motsvarar en jordbävning för en kärnkraftsreaktors säker avställning (Safe Shutdown Earthquake, SSE).

### Paragraf 3.26

Minimivån för seismisk design (SL-2) bör motsvara en markacceleration på 0,1g på fritt fält och bör inte vara lägre än de värden som gäller för konventionella anläggningar enligt de nationella koderna.

### Paragraf 3.27

Det framgår bland annat att för seismiska händelser utanför design (DEC) bör

- finnas tillräckliga säkerhetsmarginaler för de SSK som krävs för att förhindra härdskador, tidiga radioaktiva utsläpp eller stora radioaktiva utsläpp, och
- visas att det inte föreligger risk för tröskeleffekter inom den definierade osäkerheten i SL-2.

## IAEA SSG-9 (Rev. 1)

I denna standard [9], tidigare IAEA NS-G-3.3, ges rekommendationer om hur seismiska krav kan uppfyllas i samband med utvärderingen av jordbävningsrelaterade risker vid anläggningsplatsen. Standarden ger vägledning om hur man definierar de seismiska parametrar som är nödvändiga för att utvärdera de geologiska och geotekniska farorna samt åtföljande händelser som beskrivs i andra IAEA-standarder.

Standarden innehåller bland annat uppgifter om framtagning av en integrerad databas<sup>14</sup> innehållande nödvändig information för hantering och utvärdering av faror i samband med en jordbävning, uppgifter om tillgängliga metoder för analys av markskakningar samt uppgifter om probabilistiska och deterministiska metoder för utvärdering av seismiska risker.

I paragrafen 3.36 anges att den upprättade seismologiska databasen bör innehålla sådan information att seismiska händelser med mycket låga årliga överskridandefrekvenser ska kunna karakteriseras på ett tillförlitligt sätt.

Händelserna sorteras i två olika tidsperioder, historisk och förhistorisk. För den historiska perioden finns dokumenterade uppgifter om jordbävningshändelser, vilka har registrerats antingen före utvecklingen och användningen av instrument (pre-instrumentell period) eller efter det (instrumentell period).

För den förhistoriska perioden finns inte några dokumenterade uppgifter över jordbävningshändelser. Jordbävningens bevis från denna period kan endast hänföras till arkeologiska platser i form av ristningar och målningar, inklusive paleoseismologiska och geologiska bevis.

Andra säkerhetsguider med riktlinjer om utvärdering av förläggningsplatser och bedömningar av seismisk risk är, IAEA NS-G-3.6 [10], IAEA NS-G-2.13 [11] och IAEA SSR-1 [12].

## 5.2. WENRA-dokument

WENRA är en organisation bestående av representanter från de europeiska strålsäkerhetsmyndigheterna. WENRA:s huvudsakliga verksamhet syftar till att förbättra säkerheten inom det kärntekniska området samt få fram ett gemensamt synsätt i olika säkerhetsfrågor och en harmonisering av tillämpade säkerhetskrav inom myndigheterna.

I WENRA:s dokument [13] definieras vad som kan anses vara en lämplig nivå på reaktor-säkerhet uttryckt i s.k. *Safety Reference Levels* (SRLs). WENRA:s arbete baseras huvudsakligen på IAEA:s säkerhetskrav samt medlemsländernas nationella regler och vägledningsdokument. I rapporten [13] definieras lämpliga säkerhetskrav inom 19 olika ämnesområden (s.k. *issues*). En första rapport med referensnivåer publicerades i januari 2006. Nya uppdaterade referensnivåer gavs ut i september 2014 efter Fukushima Dai-ichi reaktorolyckan för att ta hänsyn till lärdomar och erfarenheter inklusive resultaten från genomförda EU-stresstester.

Nuvarande utgåva som publicerades i februari 2021, innefattar ytterligare uppdateringar jämfört med 2014 års SRLs. Bland införda ändringar kan nämnas att issue T (Natural Hazards) i den nya utgåvan har utökats till att även omfatta mänskligt framkallade yttre faror (human induced external hazards).

---

<sup>14</sup> Geologisk, geofysisk, och geoteknisk databas samt seismologisk databas med detaljerad information om olika utredningar, exempelvis utredningar avseende seismologiska och geologiska förutsättningar för regionen samt anläggningsplatsens geologiska egenskaper.

Begreppet *yttre fara* (*external hazard*) omfattar förhållanden orsakade av naturfenomen (t.ex. jordbävning och översvämning) samt förhållanden framkallade av mänskliga aktiviteter (t.ex. yttre brand och transportolyckor).

Nedan följer en beskrivning av vissa utvalda punkter i WENRA:s dokument vilka kan vara av intresse för seismisk dimensionering. Det är i första hand uppgifter i WENRA:s vägledningsdokument för hantering av jordbävning [15] (WENRA GSE<sup>15</sup> Issue TU), samt i viss mån uppgifter om DEC (Design Extension Conditions) i WENRA SRL issue F [13]. Vägledningsdokumentet om seismiska händelser [15] utgör en bilaga till huvuddokumentet [14] om yttre faror och syftar till att ge ytterligare förklaringar specifika för jordbävningens risker. Dokumentet [15] innehåller inga krav utöver de som anges i dokumentet [13] om referensnivåer.

## Yttre händelser inom design (DBA<sup>16</sup>)

### WENRA GSE Issue TU2

Allmänt gäller att yttre faror ska utgöra en integrerad del i den så kallade säkerhetsdemonstrationen av anläggningen (inklusive lagring av använt kärnbränsle). En sådan säkerhetsdemonstration ska innehålla värderingar både inom design (DBA) och utanför design (DEC) i syfte att identifiera behov och möjligheter för förbättringar. Vidare gäller att hot från yttre faror ska elimineras eller minimeras så långt det är rimligt och möjligt för alla drifttillstånd.

Nedanstående lista omfattar ett minsta antal yttre faror som har identifierats kunna påverka anläggningsplatsen, inklusive relaterade yttre hot, t.ex. jordbävning och tsunami.

- Geological hazards
- Seismotectonic hazards
- Meteorological hazards
- Hydrological hazards
- Biological phenomena
- External fire
- Accidental aircraft crash
- Accidents at facilities outside the site area
- Transportation accidents
- Electrical disturbances and electromagnetic interferences

### WENRA GSE Issue TU4

En årlig överskridande frekvens av  $1 \cdot 10^{-4}$  ska användas för den dimensionerande yttre händelsen, DBA (Design Basis Accident). I det fall där det inte är möjligt att ta fram en tillförlitlig beräkningsmodell, ska en händelse väljas och kvalificeras för att uppnå en likvärdig säkerhetsnivå.

När det gäller seismiska laster ska som lägst ett horisontellt PGA-värde av 0,1g tillämpas även om detta motsvarar en lägre överskridande av frekvensen än  $1 \cdot 10^{-4}$  per år. Enligt nu-

---

<sup>15</sup> WENRA Guidance on Seismic Events

<sup>16</sup> Design Basis Accidents

varande praxis kräver flera WENRA-länder att för mänskligt framkallade yttre faror tillämpas ett lägre värde än  $1 \cdot 10^{-4}$  per år. Detsamma kräver vissa länder även för naturfenomen.

För varje dimensionerande händelse ska tillhörande designparametrar definieras utifrån resultatet från på ett konservativt sätt genomförda riskbedömningar.

Det ska vara verifierat att historiska extrema händelser har beaktats vid design. Detta kan ske genom en direkt jämförelse av dimensionerande händelser för naturfenomen med relevant historiska data.

### WENRA GSE Issue TU5

Anläggningen ska förses med skydd mot yttre dimensionerande händelser utifrån ett s.k. skyddskoncept som en grund för framtagning av lämpliga skyddsåtgärder.

För befintliga anläggningar som byggdes utan krav på seismisk tålighet kan erfarenhetsbaserade metoder enligt IAEA NS-G-2.13 [11], t.ex. SMA-metoden, användas för att kvantifiera anläggningens seismiska kapacitet i enlighet med dess faktiska tillstånd, samt visa att anläggningen är seismiskt tålig mot kraven i WENRA SRL TU4.2 [13].

### Yttre händelser utanför design (DEC)

I IAEA:s Glossary [17] definieras DEC som postulerade förhållanden som inte beaktas inom DBA, men som hanteras i konstruktionsprocessen i enlighet med *best-estimate metoder* och för vilka utsläpp av radioaktiva material är inom acceptabla gränser. För kärnkraftsreaktorer och forskningsreaktorer omfattar DEC förhållanden utan signifikanta bränsleskador samt förhållanden med reaktorhärdsfälta (Se nedan).

### WENRA SRL Issue F1.1, F1.2, F2.1 och F4.1

Syftet med en DEC-analys är att ytterligare förbättra reaktorsäkerheten genom att bland annat förbättra anläggningens förmåga att motstå mer utmanande händelser eller förhållanden än de som beaktas i designunderlaget.

DEC delas i två kategorier.

- DEC A, för tillstånd utan svåra skador på bränsle i reaktorhärden eller använt bränsle i förvaringsbassänger.
- DEC B, för tillstånd med postulerade svåra bränsleskador.

En uppsättning av DEC ska härledas och motiveras utifrån en kombination av deterministiska och probabilistiska bedömningar samt ingenjörsmässiga värderingar.

Vid DEC A ska de fundamentala säkerhetsfunktionerna, reaktivitetskontroll, värmebortförel från reaktorhärden och använt bränsle samt inneslutning av radioaktiva material, kunna uppfyllas. Vid DEC B ska inneslutningen av radioaktiva material kunna säkerställas. För detta ändamål ska värmebortförel från det skadade bränslet kunna upprättas.

### WENRA SRL Issue F3

I en DEC-analys ska bland annat beaktas följande:

- Använda metoder, antaganden eller argument bör inte vara onödigt konservativa.



- Identifiering av rimligt genomförbara åtgärder för att förhindra uppkomst av tillstånd DEC A eller DEC B, ska göras.
- Påvisa, där det är tillämpligt, att det finns tillräckliga marginaler mot tröskeffekter så att oacceptabla konsekvenser inte uppstår, t.ex. konsekvenser enligt DEC A eller DEC B.

### WENRA SRL Issue F5.1

Händelser och förhållanden inom DEC ska utvärderas regelbundet med hjälp av både deterministiska och probabilistiska metoder samt ingenjörskbedömningar utifrån drifterfarenheter och nyvunnen kunskap. Baserat på dessa resultat ska behov och möjligheter till förbättringar identifieras och relevanta åtgärder införas.

## 5.3. Eurokod 8

Eurokoder är gemensamma europeiska standarder för utformning och dimensionering av bärande konstruktioner till byggnader och anläggningar. Eurokoderna utarbetas av den Europeiska Standardiseringskommittén (CEN) och ges i Sverige ut av det svenska institutet för standarder (SIS). Ett syfte är att EU-länderna anpassar sina byggregler så att Eurokoderna kan tillämpas. Detta på grund av att byggreglerna inte är harmoniserade inom EU. Varje EU-land har därför i tillägg till Eurokoderna publicerat en nationell bilaga (Nationell Annex, NA) som anger de värden på s.k. nationellt valbara parametrar (Nationally Determined Parameters, NDP) som gäller för landet. Boverket och Transportstyrelsen är de svenska myndigheter som inom sitt respektive ansvarsområde bestämmer vilka NDP-värden (säkerhetsnivåer) som ska tillämpas i landet. Eurokodsyste­met består av tio Eurokoder, EN 1990 (Eurokod 0) – EN 1999 (Eurokod 9).

Standarden SS-EN 1998 (Eurokod 8) [18] gäller vid dimensionering och utförande av byggnader och anläggningar i seismiska områden i Europa. Standarden består av sex delar och innehåller endast tilläggskrav utöver de krav som anges i de övriga Eurokoderna. Syftet är att skydda människor och att begränsa potentiella skador i samband med en jordbävning. Eurokod 8 är, liksom de andra Eurokoderna, begränsad i sin tillämpning då den formellt inte gäller för t.ex. kärnkraftsreaktorer och offshore-anläggningar.

Standarden ställer krav på två så kallade gränstillstånd:

- Ultimate limit state – Förhindrade av kollaps
- Damage limitation state – Begränsning av skada

Nivån för påverkan i respektive gränstillstånd är nationellt valbart.

Vid dimensionering mot kollaps används en s.k. beteendefaktor  $q$  (*behaviour factor*) för att reducera de elastiskt beräknade lasterna och på så sätt beakta byggnadskonstruktionens olinjära respons i svängningsförloppet. Detta möjliggörs av en duktil design<sup>17</sup> med detaljerade krav på armeringsutformning i betongkonstruktioner. Beteendefaktorn  $q$ , som bland annat beror på material och dimensioneringsmetod, har som lägst värdet 1,5. Under vissa

<sup>17</sup> Förmågan att kunna deformeras plastiskt utan att spricka under en dragbelastning.

förutsättningar tillåts dock att betongkonstruktioner dimensioneras utan beaktande av materialets icke-linjära egenskaper.

I Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av Eurokoder, EKS (BFS 2011:10) [19], har man valt att inte införliva Eurokoddelar enligt SS-EN 1998. Motivet är att jordbävningens last inte betraktas som relevant för svenska förhållanden. I transportstyrelsens föfattningssamling, TSFS 2018:57 [20], anges att kontroll av bärverk i Sverige med hänsyn till jordbävning enligt SS-EN 1998, normalt inte behöver genomföras. Dimensionering enligt övriga delar av Eurokoder säkerställer normalt även bärverkets bärförmåga, stadga och beständighet för de nivåer på jordbävning som skulle uppkomma i Sverige. Eurokoddelar enligt SS-EN 1998 har således aldrig varit tvingande för tillämpning i Sverige.

## 5.4. ASCE och ACI-standarder

ASCE (American Society of Civil Engineers) har publicerat ett antal handböcker som behandlar olika aspekter avseende modellering och analys av strukturella dynamiska system.

ACI (American Concrete Institute) är en ledande organisation för utveckling och spridning av standarder inom betongområdet. Det finns normalt två typer ACI-standarder; designkoder (Design Codes) respektive konstruktionsspecifikationer (Construction Specifications). ACI-designkoder innehåller uppgifter om bland annat tillämpade krav- och acceptanskriterier. ACI-konstruktionsspecifikationer innehåller både konstruktions- och materialspecifikationer.

I [21] beskrivs kortfattat ett urval av amerikanska standarder speciellt framtagna för dimensionering av byggnadsstrukturer enligt följande:

### ASCE 4-16

I denna standard [22] anges minimikrav och acceptabla metoder för jordbävningens analys av kärntekniska anläggningar. Standarden ger en heltäckande kravbild av beräkningsprocessen vid seismisk bärverksanalys inklusive hur indata ska tas fram för verifiering av säkerhetssystem monterade i byggnaden. ASCE-4.16 täcker i princip in alla tillämpliga krav i Regulatory Guides (RG) och Standard Review Plan (SRP) utgivna av den amerikanska tillsynsmyndigheten USNRC, exempelvis RG 1.61 [23] och SRP 3.7.1 [24]. Standarden ger dessutom en mer omfattande bakgrundsinformation till kravbilderna, jämfört med vad som anges i de officiella USNRC-dokumenterna. ASCE 4-16 ger mer stringenta och robusta krav på analysmetoder, under beaktande av de strängare krav som finns för kärntekniska anläggningar, jämfört med vad som gäller i standarder för konventionella byggnader, som till exempel i Eurocode 8 [18].

### ASCE 43-05

Denna standard [25] redovisar seismiska dimensioneringskriterier som är strängare än vad som anges i vanliga nationella byggnadsstandarder.

Standarderna ASCE 4-16 och ASCE 43-05 utgör tillsammans ett väletablerat ramverk för seismisk design och analys, i enlighet med erkända ingenjörsmässiga principer.

## ACI 318

Denna standard [26] föreskriver minimikrav för alla typer av ordinära byggnader i USA. Dessa byggnader består företrädesvis av momentupptagande ramkonstruktioner som är dimensionerade för ett elastiskt strukturbeteende för alla laster och lastkombinationer utom för jordbävning, då olinjär analys accepteras vid dimensionering. För att möjliggöra att konstruktionerna kan ta upp icke-elastiska effekter under lastväxlingsförloppet vid en jordbävning, ställs det i ACI 318 [26], kapitel 21 speciella detaljkrav på armeringsutformningen. I ACI 318 avsnitt 21.1.1.1 anges explicit att kraven i kapitel 21 endast behöver uppfyllas om de dimensionerande jordbävningsslasterna har bestämts under antagande om energiupptagning via olinjär strukturrepons. För lågseismiska områden behöver kraven i kapitel 21 inte tillämpas, då de vanliga kraven i övriga kapitel av ACI 318 anses ge tillräcklig robusthet hos konstruktionen.

## ACI 349

Denna standard [27] är framtagen för dimensionering av säkerhetskritiska byggnadskonstruktioner vid kärntekniska anläggningar. Dessa byggnadskonstruktioner består till största del av bärande konstruktioner av typ skivväggar och grova bjälklagskonstruktioner. Byggnadskonstruktionerna är dimensionerade för ett elastiskt strukturbeteende för samtliga laster och lastkombinationer (utom för speciella missil- eller impulslast) inklusive kombinationer som innehåller den dimensionerande jordbävningen (DBE). Huvudanledningen till valet av typ av bärande system och den elastiska dimensioneringsprincipen är förstås att tillförsäkra kärntekniska byggnadskonstruktioner en robust design med höga säkerhetsmarginaler.

Trots att de flesta byggnadskonstruktioner vid kärntekniska anläggningar är dimensionerade för huvudsakligen elastiskt strukturbeteende, har i ACI 349, kapitel 21 ändå minimikraven på armeringsutformning för områden med hög seismisk risk enligt ACI 318 [26], kapitel 21 införts. Den viktigaste anledningen till detta är, utöver att få ett så konsistent regelverk som möjligt mellan ACI 318 och ACI 349, att tillförsäkra en ytterligare säkerhetsmarginal för den osannolika händelsen att en jordbävning större än den dimensionerande DBE inträffar.

## 6. Seismiska metoder

Verifiering av en anläggnings jordbävningstålighet kan ske genom användning av erfarenhetsbaserade metoder, provning, beräkningar eller en kombination av dessa. Sedan 1980-talet utvecklades i USA s.k. erfarenhetsbaserade metoder för utvärdering av befintliga anläggningar utan ursprungliga jordbävningskrav. Det finns primärt två olika typer av erfarenhetsbaserade metoder, deterministiska metoder och probabilistiska metoder. Metoderna används för att uppskatta en anläggnings förmåga att ta sig till säker avställning efter en DBE. Den s.k. GIP<sup>18</sup> och SMA<sup>19</sup> är de mest vanliga deterministiska metoderna.

### 6.1. Erfarenhetsbaserade metoder

#### GIP-metoden

Metoden har utvecklats av SQUG<sup>20</sup> för att möta krav från den amerikanska myndigheten NRC angående funktionen av de aktiva komponenter som behövs för en reaktors säkra avställning vid en jordbävning. Metoden går ut på att demonstrera robusthet och funktion hos komponenter genom användande av erfarenheter från ett stort antal verkliga jordbävningar kompletterade med resultat från prov av bland annat reläer. Komponenterna är indelade i klasser som baseras på generiska kriterier. Vissa komponenter som t.ex. rörledning och reaktortank omfattas inte av metoden.

#### SMA-metoden

Metoden introducerades av EPRI i NP-6041-SL och går ut på att fastställa hur mycket en viss nivå på jordbävning (s.k. Review Level Earthquake, RLE) kan överskridas utan att reaktorns avställningsförmåga äventyras. Normalt ansätts den jordbävning som låg till grund för konstruktionen, SSE-lasten. Metoden utnyttjar erfarenhetsdata från komponenters tålighet vid verkliga jordbävningar och från skakbordstester. Vidare innefattar metoden s.k. screeningskriterier för att avgöra om en komponent är tillräckligt lik utrustning som fungerat väl vid verkliga jordbävningar eller skakbordstester. Komponenter som inte uppfyller ställda screeningskriterier klassificeras som "Outliers" och behandlas enligt speciellt framtaget program.

Slutresultatet av en SMA-genomgång anges i form av ett s.k. HCLPF<sup>21</sup>-värde för anläggningen. HCLPF definieras matematiskt som det PGA-värde vid vilket med 95 % -konfidens kan visa att sannolikheten för fel är mindre än 5 %. Vid genomförande av en SMA beaktas samtliga system och komponenter som krävs för en reaktors säkra avställning.

#### SPSA-metoden

Den probabilistiska metoden, s.k. SPSA<sup>22</sup>, baseras i princip på de systemmodeller som är framtagna för PSA för interna händelser, dock med de modifieringar och kompletteringar som krävs för att kunna hantera jordbävningsinducerade fel som inte beaktas i fallet interna

---

<sup>18</sup> Generic Implementation Procedure

<sup>19</sup> Seismic Margin Assessment

<sup>20</sup> Seismic Qualification Utility Group

<sup>21</sup> High Confidence of Low Probability of Failure

<sup>22</sup> Seismic Probabilistic Safety Assessment

händelser. Metoden går ut på att bestämma sannolikhetsfördelningen för förekomstfrekvensen av negativa konsekvenser, t.ex. bränsleskador och radiologiska utsläpp, på grund av en jordbävning.

En av SPSA:s viktigaste del är *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA. I rapporten [47] ges en allmän beskrivning av PSHA som används för utvärdering av seismisk fara, se avsnitt 8.1

De erfarenhetsbaserade metoderna påminner till stor del om varandra i tillvägagångssätt vid genomförandet. Centrala moment i metodernas genomförande som ”walkdowns”<sup>23</sup> utförs på i princip samma sätt. För de komponenter som inte uppfyller metodernas krav, s.k. outliers, ställs krav på vidare analys eller andra åtgärder som t.ex. modifieringar eller utbyte.

I IAEA NS-G-2.13 [11] finns detaljerade beskrivningar av både SMA- och SPSA-metoden. Enligt denna standard [11] kan dessa metoder användas för jordbävningsvärdering av befintliga anläggningar.

Vid tillämpning av erfarenhetsbaserade metoder är det viktigt att bedöma metodens tillämplighet för komponenter och utrustning i svenska anläggningar samt ta i beaktande att de deterministiskt analyserade kraven utgör grunden för anläggningarnas drifttillstånd.

## 6.2. Provningsmetoder

Jordbävningsverifiering genom provning av berörda komponenter är komplicerad och tidsödande och kan endast utföras i mycket begränsad skala. Metoden används vanligtvis för verifiering av elektrisk utrustning. Jordbävningsverifiering av elektrisk utrustning genom provning kan utföras enligt vedertagna normer och standarder som t.ex. IEEE Std. 344-2004 [62]. I USNRC RG 1.100 [63] rekommenderas IEEE Std. 344-2004 som en acceptabel metod för seismisk kvalificering av elektrisk utrustning.

## 6.3. Normenliga beräkningsmetoder

Jordbävningsverifiering genom normenliga beräkningar används normalt vid modifieringar av befintlig utrustning eller vid nykonstruktion. Vid sådana fall baseras verifieringen på aktuella konstruktionsförutsättningar (KFM) för mekaniska anordningar respektive konstruktionsförutsättningar för byggnader (KFB). I den hållfasthetstekniska strukturella verifieringen beaktas således även de laster med vilka jordbävningslasten kombineras enligt gällande KFM och KFB.

Jordbävningen har historiskt placerats i händelseklass H5 (enligt SAR<sup>24</sup>) trots att den sannolikhetsmässigt tillhör H4. Orsaken till detta är att vissa anläggningar ursprungligen inte konstruerades för denna händelse samt att de metoder för att verifiera att anläggningen uppfyller kraven inte uppfyller de formella krav på metodik som ska tillämpas inom H1-H4.

---

<sup>23</sup> Används för att visa att anläggningen överensstämmer med installationshandlingar och för att bedöma om det finns faktorer som kan vederväga säkerhetsrelaterad utrustning

<sup>24</sup> Safety Analysis Report

## 7. Jordbävningsskrav i OBH-projektet

### 7.1. Allmänt

SSM beslutade 2014 att tillståndshavarna av kärnkraftreaktorer ska ha infört och tagit i drift ett system för oberoende härdkylning (OBH) vid samtliga kärnkraftsreaktorer senast till slutet av 2020. Bakgrunden till kravet var bland annat erfarenheter från kärnkraftsolyckan i Fukushima Dai-ichi och de efterföljande stresstester som i EU:s regi utfördes på alla europeiska kärnkraftreaktorer i drift.

OBH är utformat för att kunna hantera härdkylningen om all el-matning är borta, både yttre nät och ordinarie reservkraft eller om det inte går att använda havet för att kyla reaktorerna. OBH-systemet ska kunna hålla härden kyld i minst 72 timmar utan hjälp utifrån. Systemet ska också kunna hantera extrem yttre påverkan, d.v.s. betydligt kraftigare väderförhållanden, havsvattennivåer och jordbävningar än ordinarie säkerhetssystem.

I OBH-beslutet [28] ställdes följande krav avseende yttre påverkan:

- Den extrema yttre påverkan som ska beaktas för *oberoende härdkylning* omfattar all yttre påverkan som kan påverka anläggningens härdkylning förutom antagonistiska handlingar.
- Alla händelser och deras påverkan på anläggningarna ska beaktas om frekvenserna är skattade till  $1 \cdot 10^{-6}$  per år eller högre.
- Yttre påverkan som kan vara behäftad med tröskeleffekter ska särskilt beaktas.

Speciellt för jordbävning hade kärnkraftindustrins säkerhetskoordineringsgrupp (KSKG) tagit fram ett dokument [29] med riktlinjer för hur jordbävning med inträffandefrekvens ner till  $1 \cdot 10^{-6}$  per år ska beaktas i OBH-funktionen för att uppfylla villkoren i SSM:s beslut. KSKG-dokumentet granskades av SSM inom ramen för OBH-granskning. Resultatet av denna granskning är dokumenterat i ref. [30]-[32]. Av dokumenten [30]-[32] framgår följande:

#### KSKG-dokument

OBH kan betraktas dels som en DEC-funktion enligt både WENRA:s [33] och IAEA:s [34] nomenklatur, dels som BDBEE<sup>25</sup> enligt IAEA:s nomenklatur då inträffandefrekvensen  $1 \cdot 10^{-6}$ /år beaktas. Baserat på bland annat [33] och [34] redovisas riktlinjer på tillämpning för att beakta jordbävning ner till en inträffandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-6}$  per år på de delar av befintlig och tillkommande SSK som används för OBH. Utgångspunkten för analysen ska vara att anläggningen är kvalificerad för jordbävning med en årlig inträffandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  och att därutöver görs en analys utanför design (*Beyond Design Basis*), där realistiska förutsättningar (*best estimate approach*) kan tillämpas för att bestämma belastningar och omgivningsförhållanden.

I dokumentet beskrivs vidare metoder som kan tillämpas för seismisk analys utanför design för både befintlig och tillkommande utrustning enligt specificerade förutsättningar. Det anges att flertalet av metoderna har sitt ursprung i den av SQUG utvecklade metoden GIP

---

<sup>25</sup> Beyond Design Basis External Events

för att hantera krav på seismisk verifiering av mekaniska och elektriska komponenter vid kärnkraftreaktorer i drift. GIP-metoden beskrivs därför lite mer utförligt jämfört med de andra metoderna. Av de metoder som utvecklats från GIP nämns speciellt EPRI:s SMA-metod. Övriga metoder som beskrivs är analys av byggnadsstrukturer och rörsystem med anpassade acceptanskriterier baserat på metodik i genomförda stresstester samt metoder enligt [35]-[38]. I en del av de analyser och bedömningar som genomfördes i stresstesterna utnyttjades möjligheten att skala markresponsspektrum med 15 % (en reduktionsfaktor 0,85) baserat på platsspecifika geologiska förutsättningar som råder för svenska kärnkraftsreaktorer. Speciellt för byggnadsstrukturer anges att kapacitetsutvärdering utförs mot gällande byggnorm EN-1992-1-1 [44] samt mot EN 1998-1 [18].

Det anges att de svenska anläggningarnas genomförda seismiska verifieringar generellt sett baseras på en kombination av normenliga beräkningar och SMA-analyser. Vidare konstateras att en normenlig seismisk dimensionering medför betydande marginaler samt att metoder som kan tillämpas för seismisk analys utanför design innefattar generellt en mindre grad av konservatism jämfört med normenliga analyser.

## Förtydligande av beslutsvillkoren

I breven [39]-[41] till respektive tillståndshavare förtydligade SSM villkoren för oberoende härdkylning. Av förtydligandet framgår bland annat att det höjda kravet för OBH-funktionen syftar till att säkerställa sådan ytterligare robusthet utöver vad den dimensionerande nivån ger så att både *goda marginaler i konstruktionen* och eventuella *tröskeeffekter* inryms. För händelsen jordbävning anges speciellt att en sådan robusthet kan visas genom att acceptanskriterierna vid deterministiska beräkningar uppfylls även då DBE:s styrka ökar med en faktor 1,7.

Intentionerna i detta förtydligande är i linje med intentionerna i requirement 17 i IAEA SSR-2/1 [42] avseende tillämpning av säkerhetsmarginaler mot tröskeeffekter för händelser utanför design. SSM noterar att de berörda tillståndshavarna har valt att tillämpa en faktor på minst 1,7 i genomförda värderingar för att säkerställa förtydligandets [39]-[41] eftersträvande robusthet.

## 7.2. SSM:s bedömning och ställningstagande

Nedan följer SSM:s gjorda bedömningar och ställningstaganden för införande av OBH-systemet:

Valet av  $1 \cdot 10^{-5}$ -jordbävning som formell konstruktionsgrund för OBH är i linje med tillämpad praxis i Sverige sedan början av 1990-talet vid kärntekniska tillämpningar i samband med ändringar av en anläggnings utformning och dess driftförhållanden.

Principen att använda mer realistiska förutsättningar, vid analys av händelser med lägre inträffandefrekvens än  $1 \cdot 10^{-5}$ /år, är i harmoni med vad som framgår av vägledningen i WENRA- och IAEA-dokumenterna [33] respektive [34] avseende analys och dimensionering av SSK utanför design.

De erfarenhetsbaserade metoder som beskrivs i dokumentet [29] är internationellt vedertagna och somliga har i tidigare sammanhang använts vid kärntekniska tillämpningar i Sverige. Av dessa är det primärt SMA-metoden som de berörda tillståndshavarna tillämpat vid

värderingen av sina kärnkraftsreaktorers seismiska tålighet. Vid genomförande av en SMA beaktas samtliga system och komponenter som krävs för en reaktors säkra avställning, d.v.s. även byggnader, rörledningar, reaktortank m.m. SMA-metoden är således omfattningsmässigt mer komplett jämfört med andra erfarenhetsbaserade metoder. Enligt IAEA NS-G-2.13 [11] kan SMA-metoden användas för seismisk värdering av befintliga anläggningar.

Utifrån SMA:s framtagna HCLPF-värden kan EPRI:s metod enligt [37] tillämpas för generering av s.k. *seismic fragility curves*<sup>26</sup> för mekaniska anordningar. Tillämpning av metoden enligt [37] innebär att felsannolikheten kan höjas från 1 % till 10 % vid värdering av strukturer och komponenter utanför design. Denna felsannolikhet på 10 % tillämpas även i vissa standarder, t.ex. ASCE 43-05 [43], som kriterium för att demonstrera seismisk tålighet utanför design. Användning av 10 % felsannolikhet enligt [43] har accepterats av bland annat den amerikanska myndigheten USNRC.

Metoden enligt [35] (NARE) ger riktlinjer och vägledning för att tillämpa GIP vid både installation av tillkommande utrustning i OBH och utbyte av befintlig utrustning. Metoden kan med fördel användas som komplement till skakbordsprovning av aktiva komponenter eller strukturell verifiering av befintlig utrustning som innefattas av GIP.

SSM förtydligade att den vid stresstesterna tillämpade lastreduceringen med 15 % inte bör tillämpas vid analys och värdering av SSK mot den svenska DBE som motsvarar ett PGA-värde på ca 0,1g. Bakgrunden till det är kraven i både IAEA och WENRA enligt vilka vid analyser *inom design* det maximala PGA-värdet ska uppgå till minst 0,1g oberoende av de lokala seismologiska och geologiska förhållandena. Detta förtydligande är nödvändigt eftersom den svenska DBE ligger till grund för seismisk analys och värdering *utanför design*.

När det gäller kapacitetsvärdering av byggnadsstrukturer enligt Eurokod 2 [44] och Eurokod 8 [18], ville SSM uppmärksamma att samtliga säkerhetsrelaterade byggnadskonstruktioner vid de existerande svenska kärnkraftsreaktorerna dimensionerades huvudsakligen enligt då gällande krav i Boverkets bestämmelser (BfB). Kravet på mängd skjuvarmering enligt BfB var då lägre jämfört med nu gällande Eurokoder, vilket i praktiken innebär lägre grad av duktilitet. Detta innebär att befintliga byggkonstruktioner som krediterades i OBH-funktionen är inte konstruerade och utformade så för att den s.k. *beteendefaktor q* (*behaviour factor*) enligt [18] ska kunna tillämpas vid värdering mot en jordbävning utanför design.

Faktorn  $q$  används för reduktion av elastisk beräknade krafter och representerar överkapaciteten i en byggnadsstruktur. SSM noterade att det av redovisningen inte explicit framgår att faktorn  $q$  inte har använts i genomförda jordbävningsanalyser utanför design. SSM hade därför i sin bedömning av kravuppfyllelsen utgått ifrån att ref. [18] i det avseendet tillämpats fullt ut. I övrigt bedömde SSM att den gjorda värderingen av byggnadskonstruktioner mot en jordbävning utanför design borde så långt möjligt och rimligt ske med beaktande av anvisningarna i DNB 2017:07<sup>27</sup> [45], eller motsvarande anvisningar.

---

<sup>26</sup> *Seismisk fragility* definieras som den betingade sannolikheten för fel av en struktur eller komponent vid en given nivå av markrörelse orsakad av jordbävning uttryckt i t.ex. PGA

<sup>27</sup> Numera DNB 2021:23



## 8. SSM:s genomförda forskning

### 8.1. ESHM13 – En ny PSHA-modell för Europa

I rapporten [47], ”*ESHM13 – En ny PSHA-modell för Europa betraktat ur ett svenskt perspektiv*, SSM rapport 2018:27”, redovisas använda metoder och resultat inom ett stort gemensamt europeiskt forskningsprojekt (SHARE/ESHM13) samt effekten på den seismiska risken vid tillämpning av de nya markresponsspektra enligt SHARE/ESHM13 jämfört med spektra enligt SKI TR 92:3 [4]. 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. Projektet resulterade i *The 2013 European Seismic Hazard Model* (ESHM13) [46].

Utvecklingsarbetet inom projektet SHARE/ESHM13 har resulterat i den första enhetliga seismiska riskmodellen för hela Europa, inklusive framtagning av seismiska riskkurvor och markresponsspektra för olika överskridande nivåer. 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. Projektet [46] 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. 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.

I rapporten [47] ges en allmän beskrivning av probabilistiska metoder (PSHA) som används för utvärdering av seismisk fara. Enligt rapporten kombinerar vanligtvis PSHA två huvudsakliga processer som tillsammans karakteriserar den seismiska faran för en given geografisk plats.

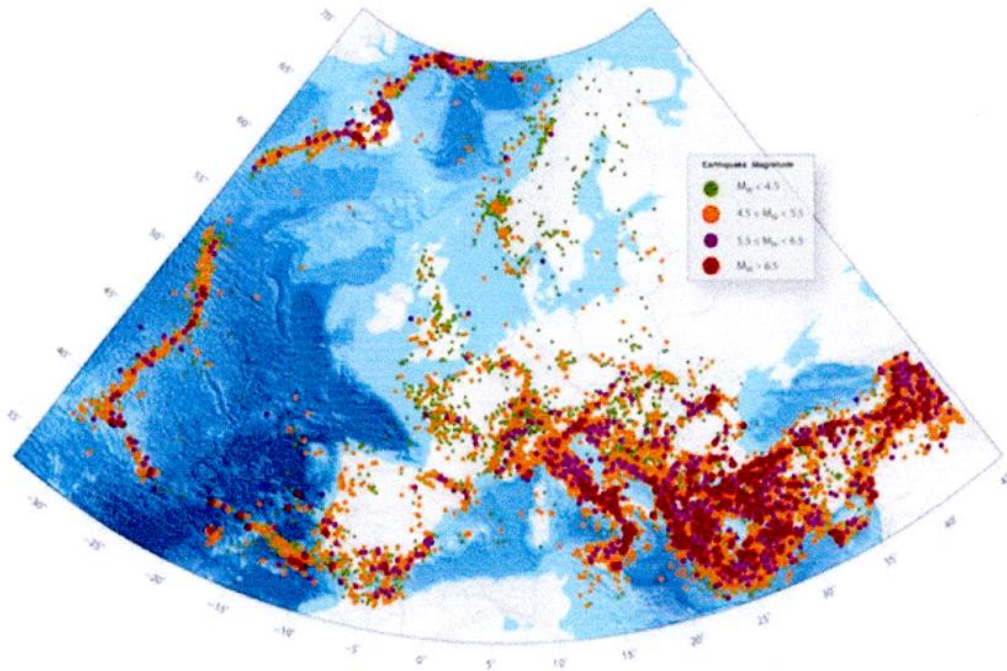
- Identifiering av inträffade jordbävningar i regionen samt framtagning av en modell som beskriver regionens jordbävningssaktivitet. Med hjälp av aktivitetsmodellen kan sannolikheten för framtida jordbävningsscenarier inom regionen beräknas.
- Val av markdämpningsekvationer (Ground Motion Prediction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

En PSHA summerar faran för samtliga jordbävningsscenarier och den slutgiltiga seismiska faran ges av en årlig överskridande markskakningsrespons. Metodiken för hur man summerar faran beskrivs mera utförligt i rapporten. 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.

PSHA-processen som beskrivits ovan 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.

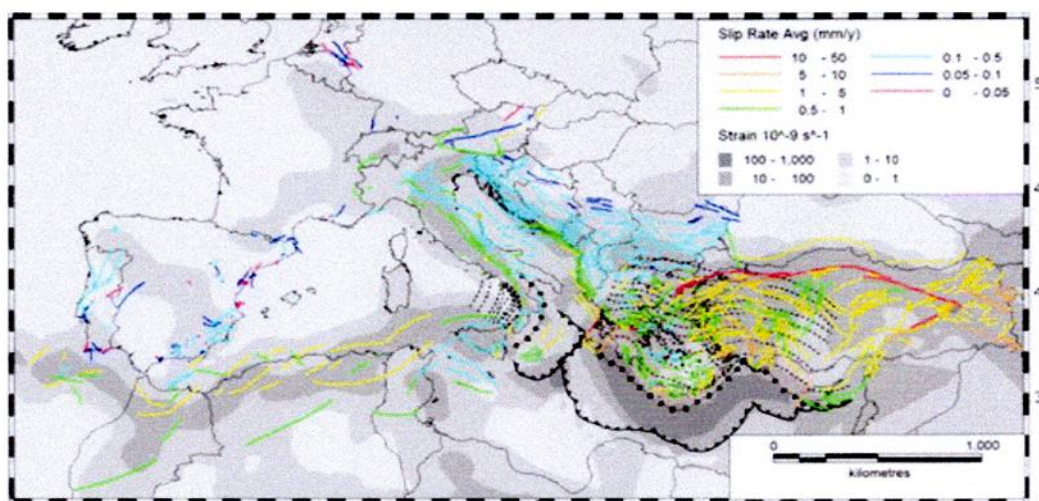
Det statistiska underlaget som SHARE/ESHM13 bygger på utgörs av harmoniserat data i form av en jordbävningsskatalog och en databas över förkastningar i Europa. Jordbävnings-

katalogen 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 5



**Figur 5.** Jordbävningsskatalogen SHEEC över inträffade jordbävningar år 1000 till 2006 (Figur 3.1 i ref. [47])

Databasen EDSF (The European Database of Seismogenic Faults) innehåller förkastningar kapabla att förorsaka 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 6.



**Figur 6.** Databasen EDSF över jordbävningssförkastningar omkring Medelhavet (Figur 3.2 i ref. [47])

I SHARE har jordbävningens aktivitet 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)

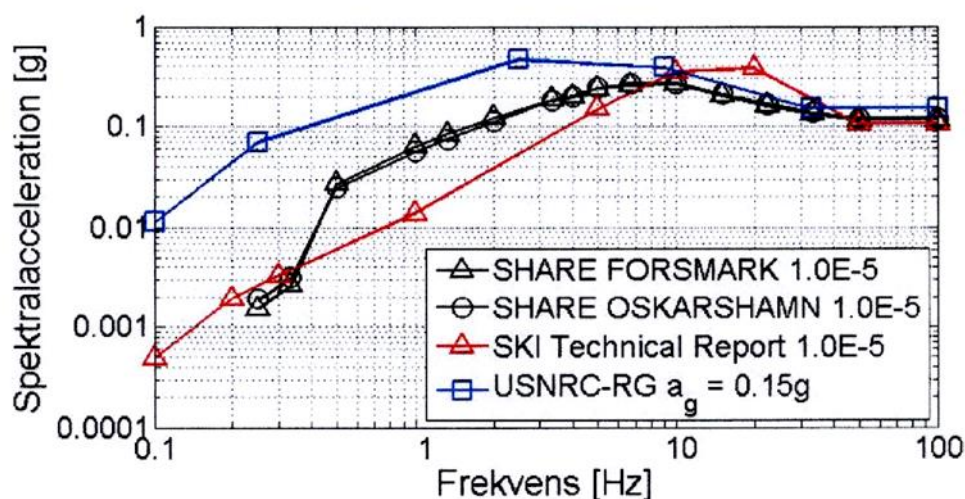
Att man i SHARE utvecklat tre olika modeller grundar sig i osäkerheten i hur man på bästa sätt spatialt fördelar framtida jordbävningsscenarier. I AS-modellen definieras jordbävningsskällorna som polygon över europakartan (Area Source Zones, ASZ). I FSBG-modellen baseras aktiviteten främst på glidhastigheten mellan två ytor vid dokumenterade förkastningar. SEIFA är en icke-zonbaserad modell där den spatiala magnitud-frekvensfördelningen är baserad på densiteten av jordbävningar i SHEEC-katalogen samt glidhastigheten vid registrerade förkastningar i EDSF-databasen.

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<sup>28</sup> 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.

I figur 7 jämförs markresponsspektra enligt SHARE/ESHM13 [46] för Forsmark/Oskarshamn, SKI TR 92:3 [4] och USNRC RG 1.60 [3].

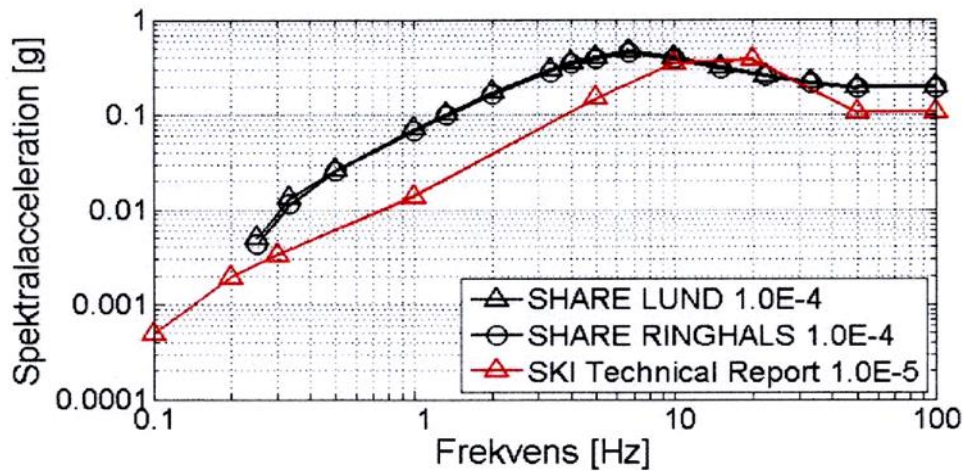
I figur 8 jämförs markresponsspektra enligt SHARE/ESHM13 [46] för Lund/Ringhals och SKI TR 92:3 [4].

I tabell 1 redovisas en jämförelse av PGA-värden enligt SHARE/ESHM13 [46] för respektive anläggningsplats och SKI TR 92:3 [4].



**Figur 7.** Jämförelse av markresponsspektra, SHARE/ESHM13, SKI TR 92:3 och USNRC RG 1.60 (Figur 4.10 i ref. [47]).

<sup>28</sup> Epistemisk osäkerhet relaterar till vår begränsade förståelse, kunskap och data.



**Figur 8.** Jämförelse av markresponsspektra, SHARE/ESHM13 och SKI TR 92:3 (Figur 4.11 i ref. [47]).

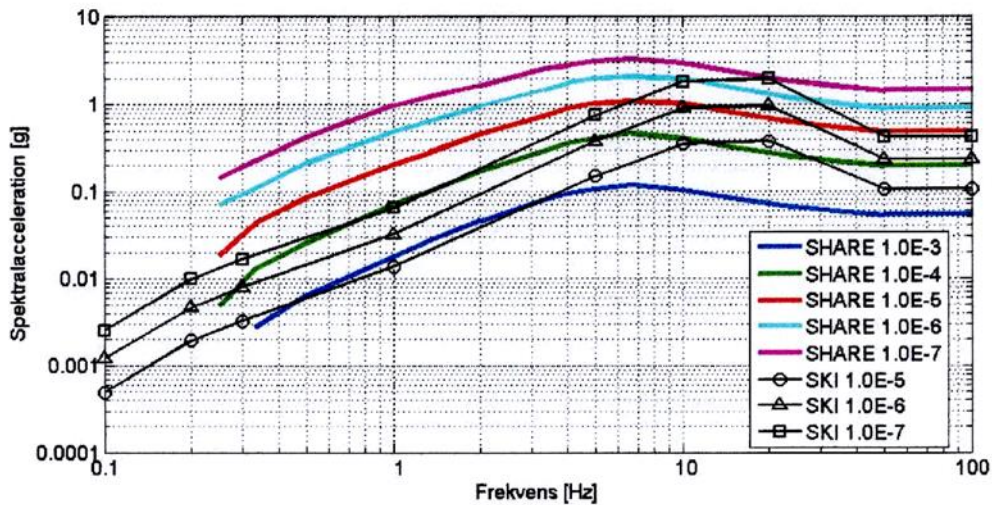
**Tabell 1.** Jämförelse av PGA-värden enligt SHARE/ESHM13 för respektive anläggningsplats och SKI TR 92:3 (Tabell 4-3 i ref [47]).

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

Utifrån ovanstående görs bland annat följande observationer:

- Markresponsspektra för Oskarshamn och Forsmark är nästan identiska och med PGA-värden relativt väl i överensstämmelse med SKI TR 92:3 [4]. Den spektrala formen är däremot brantare i SKI TR 92:3 [4] med högre amplitud på spektralaccelerationer mellan frekvenserna 10 och 20 Hz. ESHM13 [46] påvisar dock högre accelerationer för frekvenser lägre än 5 Hz.
- Spektrumet i USNRC-RG 1.60 [3] ger väsentligt högre respons för låga frekvenser, d.v.s. för typiska grundmoder för byggnadskonstruktioner, jämfört med ESHM13 [46] och SKI TR 92:3 [4].
- Den seismiska faran i Ringhals respektive Lund är i princip identiska för  $1 \cdot 10^{-4}$  enligt ESHM13 [46], men betydligt högre värden än  $1 \cdot 10^{-5}$  enligt SKI TR 92:3 [4] för frekvenser lägre än 10 Hz.

I figur 9 jämförs responsspektra (median) för årliga överskridandefrekvenser  $1 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1 \cdot 10^{-6}$  och  $1 \cdot 10^{-7}$  för Ringhals enligt ESHM13 [46] med årliga överskridandefrekvenserna  $1 \cdot 10^{-5}$ ,  $1 \cdot 10^{-6}$  och  $1 \cdot 10^{-7}$  enligt SKI TR 92:3 [4].



**Figur 9.** Jämförelse av spektra med olika årliga överskridandefrekvenser för Ringhals enligt ESHM13 och enligt SKI TR 92:3 (Figur 4.13 i ref. [47]).

Som framgår av denna figur blir responserna för låga frekvenser, alltså de typiska byggnadsmoderna, mycket högre för ESHM13 än för SKI TR 92:3. Exempelvis för intervallet 1 – 5 Hz blir responserna för en årlig överskridandefrekvens  $1 \cdot 10^{-5}$  (en återkomsttid av 100 000 år) enligt SKI TR 92:3 [4] lika med en återkomsttid av endast 1 000 år enligt ESHM13 [46].

Nedan följer några av rapportens [47] dragna slutsatser:

- SHARE/ESHM13 [46] visar på en förhöjd seismisk fara för framförallt Skåne/Halland jämfört med tidigare genomförda studier. Skåne och svenska västkusten är tydligt sammanlänkad med de seismologiska förhållandena i Norge.
- SHARE/ESHM13 [46] visar en likartad seismisk fara för Lund och Ringhals, respektive för Oskarshamn och Forsmark, givet att de lokala geologiska förhållandena kan anses vara någorlunda lika för de olika förlägningsplatserna.
- De markdämpningsekvationer (GMPE) som använts i SHARE/ESHM13 [46] är inte rakt av tillämpliga för svenska geologiska förhållanden. Dessa måste utvärderas och eventuellt kalibreras utifrån de lokala förhållandena för respektive förlägningsplats.
- 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 [4] ger, för låga frekvenser lägre än 10 Hz.

Rapporten [47] understryker att resultaten från SHARE-projektet för kritiska anläggningar av typ kärnkraftsreaktorer måste betraktas som en startpunkt, från vilket ytterligare studier och analyser måste genomföras. I rapporten [47] redovisas en lista över förslag till vidare studier som krävs för att kunna ersätta det, enligt rapporten [47], föråldrade underlaget i

SKI TR 92:3 [4]. Det anges bland annat att villkoren för användning av markdämpningsekvationerna (GMPE) i SHARE-projektet bör studeras noggrannare och i jämförelse med andra arbeten samt att den så kallade *Area Source-modellen* behöver studeras närmare för att förbättra denna eller skapa alternativa modeller.

## 8.2. Review of paleoseismicity in Sweden

Rapporten [48], ”*Review of paleo-, historical and current seismicity in Sweden and surrounding areas with implications for the seismic analysis underlying, SSM rapport 2017:35*”, innehåller uppgifter om bland annat vissa delar i SKI TR 92:2 [4], utvecklingen i de nordiska seismiska nätverken och särskilt det svenska seismiska nätverket (Swedish National Seismic Network, SNSN), identifiering och analys av förhistoriska skalv, dvs. data som är baserad på geologiska observationer (paleoseismisk data) samt utvecklingen av den samnordiska jordskalvkatalogen *Fencat*.

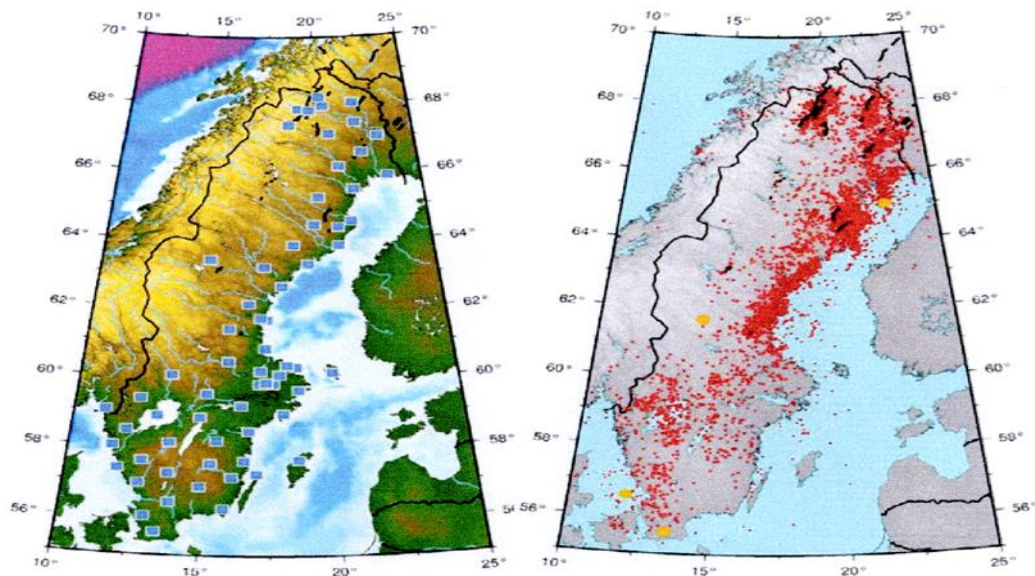
Syftet med denna studie var att uppdatera och utvärdera de jordbävningssedata som ligger till grund för framtagna markskakningsspektra i SKI TR 92:3 [4] inklusive information om paleoseismisk data som inte beaktats i [4]. Det ingick också att kvalitativt värdera hur de existerande spektra skulle förändras med ändringar i jordbävningssedata.

Jordbävningssedata i den samnordiska jordbävningsskatalogen *Fencat* kommer från en mängd olika källor. De tidiga uppgifterna är sammanställda i publikationer från olika naturvetare och från kyrkoböcker. En systematisk insamling av jordbävningssinformation i Sverige initierades i slutet av 1800-talet av den svenska geologiska föreningen (nuvarande Sveriges geologiska undersökning, SGU). Liknande utveckling kan ses i de övriga nordiska länderna. Den instrumentella registreringen av jordbävningar i de nordiska länderna startade med den första installationen av en seismograf i Uppsala år 1904 och sedan med installation av seismografer i Bergen år 1905 och Helsingfors år 1924. Dessa seismografer var dock inte tillräckligt känsliga och det verkar som att vissa jordbävningar med magnitud upp till 4.0 inte blivit registrerade [48]. Mätinstrument som var tillräckligt känsliga för att fånga upp de flesta händelserna var på plats i slutet av 1960-talet/början av 1970-talet för hela Fennoskandia.

I rapporten [48] noteras att använd jordbävningssedata i SKI TR 92:3 [4] kommer huvudsakligen från *Fencat* och att i analysen [4] utnyttjats *Fencat*-data fram till 1987. Man påpekar dock att sedan SKI TR 92:3 publicerades har förbättrade mätmetoder och en förtätning av det seismiska nätverket lett till mer högupplösta data och en avsevärd ökning i antalet registrerade jordskalv i Fennoskandia. Den samnordiska jordskalvkatalogen *Fencat* innehåller därför betydligt fler skalv idag än den gjorde vid tiden för publiceringen av SKI TR 92:3. Den historiska delen av *Fencat* har dessutom uppdaterats med nya bestämningar av lokaliseringar och magnituder för många av de större skalven och rensats på händelser som visat sig vara relaterade till frostknäppar eller sprängningar. Den aktuella versionen av *Fencat* innehåller totalt 21 385 händelser från perioden 1375 – 2012, varav 4582 inträffade före den 1 januari 1988. Rapporten [48] anger att eftersom SKI TR 92:3 inte uttryckligen beskriver den använda datamängden, kan man inte avgöra hur många av de senare jordskalven i 1987 års *Fencat*-utgåva användes i projektets [4] tillämpade analysmetod.

Moderniseringen och utbyggnaden av Sveriges nationella seismiska nätverk, SNSN, från 1998 till 2012 har gett en betydligt mer detaljerad bild av jordbävningssaktiviteten i Sverige

än tidigare. I Figur 10 visar vänstra bilden det nuvarande stationsnätet (SNSN) i Sverige. Högra bilden visar alla registrerade jordbävningar av SNSN under perioden 2000 – 2016 (röda cirklar), händelser med en magnitud av minst 4.0 (gula cirklar) samt postglaciala förkastningar (svarta linjer) vilka huvudsakligen finns i nordligaste Sverige.



**Figur 10.** Stationsnätet (SNSN) och seismicitet i Sverige 2000 – 2016 (Figur 4 i ref. [48])

I bilaga 1 till rapporten [48] har sammanställts en litteraturstudie över postglaciala jordskalv i Sverige. Enligt studien finns 12 bekräftade postglaciala förkastningar i Sverige som förskjutit sediment från den senaste istiden. Av dessa är det endast åtta stycken med rapporterad momentmagnitud. Rapporten [48] har därför i en tabell enligt nedan (Tabell 2) sammanställt de förkastningar i Sverige, Norge och Finland som har bekräftats som postglaciala och med uppgifter om skalvens lokalisering, magnitud och när de inträffade, d.v.s. parametrar som behövs för en seismisk riskstudie.

**Tabell 2.** Large paleoseismic earthquakes in Sweden, Norway and Finland with associated location, timing and magnitude. Coordinates give the approximate midpoints of the faults (Tabell 1 i ref. [48]).

Name	Country	Central latitude	Central longitude	Timing [years before present]	Moment magnitude	Reference
Pärvie	Sweden	67.93	19.28	9,500	8.0	Appendix 1
Lainio	Sweden	67.98	22.32	11,000 – 10,000	7.1	Appendix 1
Merasjärvi	Sweden	67.53	22.00	11,000 – 10,000	6.3	Appendix 1
Lansjärv	Sweden	66.59	22.11	10,500 – 10,390	7.8	Appendix 1
Röjnoret	Sweden	64.78	20.12	11,000 – 10,000	7.1	Appendix 1
Burträsk	Sweden	64.42	20.53	11,000 – 10,000	7.1	Appendix 1
Lillsjöhögen & Ismunden	Sweden	63.18	15.16	After deglaciation < 10,000	7.0	Appendix 1
Bollnäs	Sweden	61.33	16.35	10,670 – 10,200	6.1	Appendix 1
Stuoragurra	Norway	69.54	23.91	postglacial	7.3	Olesen et al. (2013)
Suasselkä	Finland	67.97	25.30	postglacial	7.0	Kujansuu (1964), Olesen et al. (2013)
Pasmajärvi/ Ruokojärvi/ Venejärvi	Finland	67.26	24.16	Postglacial	6.5	Kujansuu (1964), Olesen et al. (2013)

I rapporten [48] diskuteras också paleoseismiska händelser som definierats utifrån spår i lösa sediment, där det inte finns en förkastning på jordytan. Det anges att tolkningen av dessa data är som regel behäftade med stora osäkerheter som t.ex. om huruvida det verkligen är ett skalv som orsakat sedimentstörningarna och när skalvet inträffade.

Vidare noteras att data för framtagning av markresponspektra karakteristika från större jordbävningar i Fennoskandia var mycket ovanligt i slutet på 1980-talet. SKI TR 92:3 [4] utgick därför ifrån den så kallade standard responspektra för *platsdata från Japan*. Projektet [4] identifierade följande huvudfaktorer som utgjorde den stora skillnaden mellan Japan och Fennoskandia:

- Jordbävningens spänningsfall.
- Förkastningsyta och associerad markskakningsvaraktighet.
- Olinjär dämpning längs vågens utbredning.

Dessa japanska spektra modifierades att passa svenska förhållanden utifrån genomförd analys och värdering av ovanstående faktorer.

Rapporten [48] har sammanställt och uppdaterat seismiskt data och kvalitativt jämfört nya jordskalvsfrekvenser med de i SKI TR 92:3 [4]. Det noteras dock att det inte ingått i studien att kvantitativt utvärdera hur de existerande markresponspektra skulle förändras med ändringar i den bakomliggande jordskalvskatalogen.

I rapporten [48] sammanfattas bland annat följande observationer och slutsatser:

- Det ser ut som att den storskaliga skalvfördelningen i Sverige är relativt stabil över det senaste århundradet utifrån den rumsliga fördelningen av jordskalv i olika tidsperioder i Fencat.
- Det är svårt att göra jämförelser mellan nu uppdaterade jordbävningsdata och siffrorna i SKI TR 92:3, bland annat på skalvaktiviteten, då exempelvis seismiska data som ligger till grund för SKI TR 92:3 inte är beskrivna i detalj.
- För de postglaciala skalven (paleoseismisk data) bedöms att dessa inte påverkar resultaten i SKI TR 92:3, om den tillämpade beräkningsmetoden i SKI TR 92:3 används.
- Resultatet från beräknad skalvaktivitet utifrån det moderna svenska data eller data från Fencat under två olika tidsperioder tyder på att värdena i SKI TR 92:3 är konservativt uppskattade för skalv med magnitud upp till och med 5.0 i Richterskalan, men icke konservativa för större skalv.
- Genomförande av en modern seismisk riskanalys, s.k. PSHA, med beaktande av paleoseismisk data skulle troligen visa ökad jordbävningsrisk.

Rapporten [48] anser att förbättringar i datainsamling, riskanalys och internationella rekommendationer har gjort att SKI TR 92:3 nu är föråldrad. Det föreslås därför att SKI TR 92:3 [4] ses över. Enligt [48] behöver ett flertal viktiga frågor om den Fennoskandiska seismiciteten belysas ytterligare. Det handlar bland annat om den paleoseismiska aktivitetens omfattning och jordskalvsaktivitetens stabilitet i tid och rum, samt sättet att kvantifiera osäkerheterna i markskakningsberäkningar.



### 8.3. Seismic design and analysis in Sweden

Denna rapport [49], ”*Seismic design and analysis of safety-related nuclear structures in Sweden, SSM rapport 2014:56*”, innehåller bland annat en redovisning av den historiska utvecklingen av de seismiska principerna för dimensionering i USA, Frankrike och Sverige, en utvärdering av resultaten från stresstesterna av de europeiska kärnkraftverk, en beskrivning av seismiska analysmetoder och den seismiska designprocessen för nya kärntekniska anläggningar samt uppgifter om procedurerna för säkerhetsbedömningar av befintliga anläggningar.

Efter de allvarliga skador som den svåra jordbävningen med den efterföljande tsunamin orsakade i kärnkraftverket Fukushima Dai-ichi i Japan, begärde Europeiska rådet i mars 2011 att stresstester skulle utföras för alla europeiska kärnkraftverk. Europeiska rådet uppmanade ENSREG<sup>29</sup>, Europeiska kommissionen och WENRA att ta fram stresstesternas omfattning och innehåll. Utifrån lärdomarna från Fukushima-händelsen beslutades att stresstesterna och så kallade peer reviews (expertgranskningar) skulle fokusera på följande huvudämnen (topics):

- Naturliga faror, inkluderade jordbävning, tsunami och extremt väder
- Förlust av säkerhetssystem
- Hantering av svåra haverier

Ovanstående bedömdes i en trestegsprocess av stresstesterna och ENSREG-granskning. Det första steget krävde att tillståndshavarna gjorde en värdering och lade fram förslag enligt ENSREG-specifikationer. Det andra steget var att de nationella tillsynsmyndigheterna skulle utföra en oberoende granskning av tillståndshavarnas bedömningar samt utfärda krav närhelst det var lämpligt. Det sista steget var en ENSREG-granskning av de nationella rapporter som lämnats in av Europas tillsynsmyndigheter. ENSREG-granskningen resulterade i en huvudrapport med redovisning av slutsatser och rekommendationer på europeisk nivå. Även i de nationella rapporterna redovisades nationellt specifika slutsatser och rekommendationer. Man enades om att en ENSREG-handlingsplan (action plan) skulle tas fram för att kunna kontrollera hur väl rekommendationerna implementerades. Till följd av det tog varje europeisk tillsynsmyndighet fram en nationell handlingsplan.

I rapporten [49] summeras de viktigaste observationerna från ENSREG av den svenska verksamheten när det gäller gjorda bedömningar med hänsyn till den dimensionerande jordbävningen (DBE). ENSREG fann bland annat att för den svenska DBE tillämpas en inträffande frekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  /år samt en reduktion med 15 % på tillhörande PGA-värde med hänsyn till de gynnsamma platsförhållandena då alla svenska kärnkraftverk är placerade på kristallint berggrund (hard rock site). ENSREG fann också att viktiga byggnadsstrukturer som reaktorinneslutningar, bränslebassänger och konsekvenslindrande system, uppskattas bibehålla sin mekaniska integritet även för svårare jordbävningar ( $1 \cdot 10^{-7}$ -jordbävning). Av rapporten framgår dock att det behövs ytterligare undersökningar och förfinade analyser innan några definitiva slutsatser kan dras.

ENSREG fann vidare att SKI TR 92:3 [4] baseras på observationer och historiska data i Fennoskandia under en tidsperiod av endast cirka 500 år. Denna korta tidsperiod ifrågasat-

---

<sup>29</sup> The European Nuclear Safety Regulators Group

tes, inte minst på grund av att geodetiska och paleoseismiska data indikerar aktiva postglaciala uppåtriktade rörelser i Fennoskandia. ENSREG påpekade att även i IAEA SSG-9 [10] rekommenderas att sådan data beaktas vid seismiska riskbedömningar i lågseismiska länder som Sverige.

Utifrån den internationella expertgranskningen och SSM:s egen granskning av de svenska kärnkraftreaktorerna, specificerade SSM vissa prioriterade aktiviteter i den svenska handlingsplanen [50] i syfte att hantera de brister som de europeiska stresstesterna kunnat identifiera. SSM beslutade bland annat att genomföra en översyn av SKI TR 92:3 [4].

En sådan översyn har genomförts i samarbete mellan SGU och seismologigruppen vid Uppsala universitet vilken redovisats i SSM 2017:35 [48]. En kort beskrivning av innehållet i 2017:35 ges i föreliggande rapport, se avsnitt 8.2.

Den första generationens amerikanska kärnkraftsreaktorer som togs i drift under 1950-talet och i början av 1960-talet inkluderade endast vissa generella seismiska rekommendationer utan några detaljerade designkrav för byggnadsstrukturer. Den snabba expansionen av kärnkraftsindustrin under 1960- och 1970-talen bidrog starkt till utveckling av seismiska designkrav tillämpliga för säkerhetsrelaterade nukleära strukturer och komponenter. Den med tiden vunna kunskapen och erfarenhet inom det seismiska området ledde till utveckling av nya standarder för kärnkraftsreaktorer.

Standarder och riktlinjer för seismisk design och analys av kärnkraftsreaktorer har i stor utsträckning utvecklats i USA, under överinseende av den amerikanska tillsynsmyndigheten NRC<sup>30</sup>. Dessa riktlinjer och standarder för kärntekniska tillämpningar infördes senare i flera andra länder.

Följande kravhierarkin tillämpas i USA vid seismisk design:

- Federal laws of the U.S.: Dessa lagar, som antagits av kongressen, ger den högsta kravnivån.
- Code of Federal Regulations (CFR): Dessa är föreskriftskrav framtagna av NRC om hur lagarna ska uppfyllas.
- Regulatory Guide (RG) och Standard Review plan (SRP): Dessa är krav som om de följs skulle NRC:s tolkning av federala lagar och CFR uppfyllas. I motsats till federala lagar och CFR är dessa krav inte obligatoriska.
- Codes & Standards for Design and Construction: De mest viktiga standarderna för nukleära byggnadsstrukturer är ASME B&PV Code, Section III, Division 2 för reaktorinneslutningar och ACI 349 för andra säkerhetsrelaterade strukturer.

Kravhierarkin för säkerhetsrelaterade nukleära strukturer i Frankrike är följande:

- Lagar som antagits i det franska parlamentet. TSN-lagen (Transparency and Security in Nuclear field) från juni 2006 förenar tidigare lagar och förordningar kompletterat med flera förordningar som ger tillämpningsdetaljer. Enligt TSN-lagen är ASN<sup>31</sup> den oberoende tillsynsmyndigheten med ansvar för bland annat tekniska och regulativa beslut samt kontroll av kärntekniska anläggningar.

---

<sup>30</sup> Nuclear Regulatory Commission

<sup>31</sup> Autorité de Sureté Nucléaire

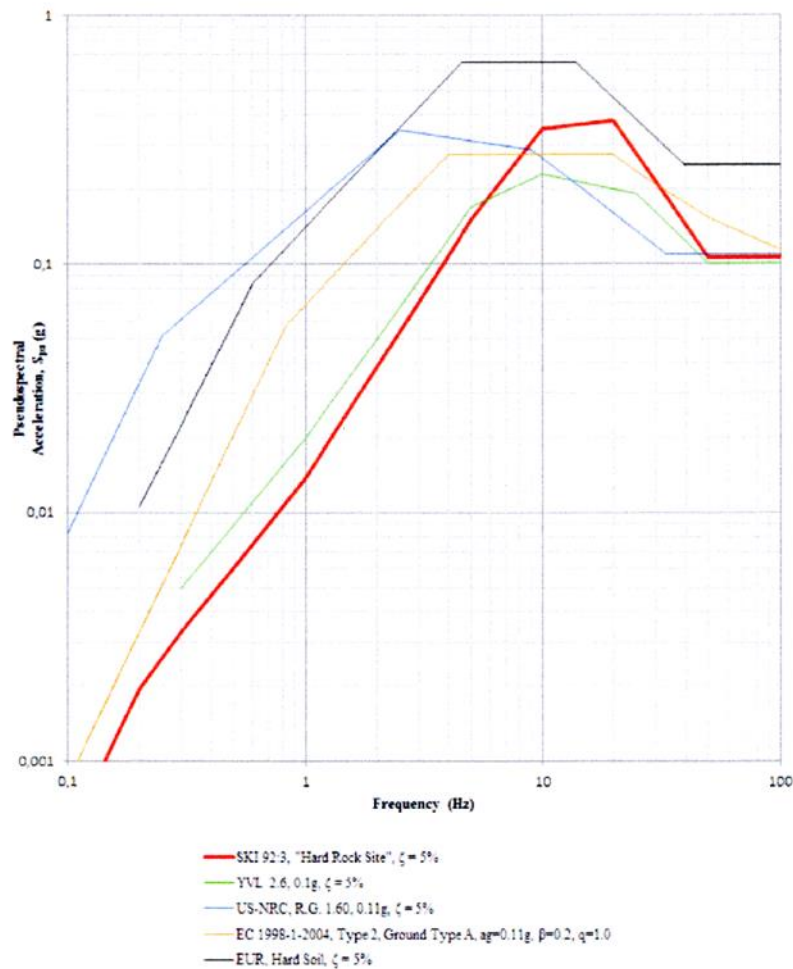
- Förordningar och myndighetsbeslut. Som exempel kan nämnas RTGE-förordning om reglering av arbetsförhållanden och skydd av arbetarnas hälsa samt förordning om kvalitetssäkring i kärnteknisk verksamhet.
- Grundläggande säkerhetsregler (RFS), ASN-guider och tekniska direktiv: RFS och ASN-guider utfärdas av ASN och definierar tekniskt acceptabel praxis.
- Koder och standarder för konstruktion och utförande. Typiska franska koder & standarder för konventionella strukturer är RCC-G som täcker de befintliga franska kärnkraftsreaktorerna samt ETC-C för design av EPR-reaktorer.

Rapporten [49] anger vidare att SSM övervakar de svenska kärntekniska anläggningarna samt all annan verksamhet i landet inom områdena kärnsäkerhet, strålskydd och icke-nukleär spridning. SSM rapporterar direkt till Miljödepartementet. Kravhierarkin i Sverige för att reglera design och analys av kärnkraftsreaktorer kan kategoriseras enligt följande:

- Kärntekniklagen och Strålskyddslagen. Dessa lagar antagits av Sveriges Riksdag och ger den högsta kravnivån.
- Myndighetsföreskrifterna SSMFS. Föreskrifterna som utfärdas av SSM är tvingande och syftar på att ge mer specifika krav på hur kärntekniklagen och strålskyddslagen ska uppfyllas.
- Allmänna rekommendationer till SSMFS. Dessa allmänna råd som utfärdas av SSM är inte obligatoriska (tvingade), men ger myndighetens syn på hur berörda lagar och föreskrifter efterlevs.
- Koder & standarder för konstruktion och utförande.

Inom ramen för moderniserings- och effekthöjningsprojekten vid de svenska kärntekniska anläggningarna under 2000-talet, tillämpades generellt villkor och kriterier enligt DRB:2001 [51]. I DRB:2001 formuleras villkor och krav för nykonstruktioner och för utvärdering och analys av befintliga säkerhetsrelaterade konstruktioner vid kärnkraftverken. Reglerna i DRB:2001 [51] baserades på dåvarande svenska byggkoden BKR [52] tillsammans med tillägg av villkor och krav speciellt framtagna för nukleära byggnadsstrukturer. Sedan 2011 måste all byggverksamhet i Sverige följa Eurokoderna vilket medförde att villkoren och kraven i BKR och DRB:2001 blev inaktuella. SSM och de svenska tillståndshavarna startade därför ett projekt i syfte att vidareutveckla DRB:2001 baserat på Eurokoderna. Projektet genomfördes under perioden 2012 – 2013 och den första versionen av DNB [53] publicerades i januari 2014. DNB innehåller krav, villkor och acceptanskriterier för seismisk konstruktion och analys. DNB kan tillämpas vid nykonstruktion och vid utvärdering av befintliga anläggningar.

Rapporten [49] anger att konstruktion och kvalificering av strukturer och komponenter i framtida kärnkraftsreaktorer, som t.ex. EPR, kommer att baseras på EUR:s standard designspektra med en skalad horisontell markacceleration på 0,25g [54]. Figur 11 nedan visar att den svenska DBE ger lägre accelerationer för frekvenser under 9 Hz jämfört med andra internationella välkända markresponsspektra, men högre accelerationer för frekvenser större än 9 Hz (utom för EUR-spektrum). Viktiga byggnader som reaktorinneslutning är därför mindre känsliga för den svenska DBE, medan andra säkerhetsinstallationer i en kärnkraftsreaktor som t.ex. elektrisk utrustning är jämförelsevis mer känsliga.



**Figur 11.** Comparison between the Swedish DBE ground response spectra ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) and other international well-known DBE response spectra (Figur 3.2 i rapporten)

Rapporten [49] presenterar vissa rekommendationer om en reviderad form av den svenska DBE utifrån ett antal identifierade brister i karakteriseringen av seismiska markrörelser i SKI TR 92:3 [4] enligt följande:

- Den tillämpade statistiska databasen är från 1970-talet vilket innebär att det saknas data från seismiska händelser under de senaste decennierna. Enligt internationella rekommendationer från tillsynsmyndigheter bör de seismiska riskbedömningarna bekräftas vart tionde år och beakta all ny och viktig information.
- Den metod som tillämpades i SK TR 92:3 var i linje med den vetenskapliga ståndpunkten vid den tiden. Det har dock under de senaste åren skett en omfattande utveckling av dessa metoder.
- Inom ramen för de europeiska stresstesterna har ENSREG ifrågasatt den mycket korta geologiska tiden (500 år) som använts för observationer och historiska data till SKI TR 92:3.

På grundval av dessa brister föreslås i rapporten [49] följande:

- Ersätta SKI TR 92:3 [4] med en ny modell för seismiska riskbedömningar utifrån de senaste decenniernas forskning och utveckling inom området.
- Upprätta årliga seismiska riskkurvor för olika fraktiler och medelvärden för olika regioner i Sverige och för olika årliga överskridande frekvenser i intervallet  $1 \cdot 10^{-2}$  –  $1 \cdot 10^{-7}$ .
- Ta fram nya markresponsspektra för olika årliga överskridande frekvenser, och om möjligt även för de olika anläggningsplatserna i Sverige.
- Fixera den svenska DBE vid en minsta PGA på 0,1g.
- Verifiera de seismiska riskbedömningarna vart 10:e år.

Det anges vidare [49] att en s.k. Operating Basis Earthquake (OBE) med en rekommenderad årlig överskridandefrekvens enligt IAEA NS-G-1.6 skulle ha försumbar inverkan på strukturer och komponenter vid kärntekniska anläggningar och behöver därför inte beaktas vid seismiska tillämpningar i Sverige. Det bör noteras att IAEA NS-G-1.6 på senare år har blivit ersatt av IAEA SSG-67 [8].

Enligt rapporten [49] innehåller standarden ASCE 4-98 [55] krav och acceptabla metoder för seismisk analys av säkerhetsrelaterade nukleära strukturer. ASCE 4-98 täcker i princip alla tillämpliga krav i Regulatory Guides (RG) och Standard Review Plans (SRP) utfärdade av NRC före 1998. Det bör noteras att ASCE 4-98 [55] på senare år har blivit ersatt av ASCE 4-16 [22].

I rapporten [49] beskrivs de olika stegen i designprocessen för kärntekniska anläggningar i Sverige på en allmän anläggningsnivå. De detaljerade bedömningarna och rekommendationerna är dock inriktade på enskilda säkerhetsrelaterade strukturer. Rapporten beskriver klassificeringen av SSK (eng. SSC) i olika seismiska kategorier enligt IAEA NS-G-1.6, USNRC Regulatory Guides och YVL Guides i Finland, samt den tillämpade seismiska klassningen i Sverige.

Nedan ges en kort beskrivning av det seismiska klassningssystemet och det som tillämpas i de svenska kärntekniska anläggningarna.

Enligt IAEA NS-G-1.6 kan SSK indelas i fyra olika kategorier, Seismic Category 1 (SC1) till Seismic Category 4 (SC4). SSK som kan motstå konsekvenserna av en SL2-nivå jordbävning (DBE) ska tillhöra SC1. Till SC2 ingår huvudsakligen SSK vars fel på grund av kollaps, fall eller förskjutning till följd av DBE kan äventyra SSK tillhörande SC1 och SC3, eller SSK som kan påverka säkerhetsfunktioner av SSK tillhörande SC1 och SC2. Kategorin SC3 inkluderar sådana SSK som kan utgöra en radiologisk fara men som inte är relaterade till reaktorn. I kategorin SC4 ingår alla SSK som inte tillhör någon av kategorierna SC1, SC2 eller SC3.

I Sverige tillämpas tre seismiska kategorier (I, P och N) beroende på typen av säkerhetsfunktion, såsom det visas i Tabell 3 nedan.

**Tabell 3.** Seismic design classification for SSCs at Swedish NPP (Tabell 2.3 i ref [49])

Seismic Category	Structures	Piping system	Pump/valve	Electrical components
1	Leak-tightness	Passive function <sup>1)</sup>	Active function	Active function
P	Load-bearing function	Mechanical integrity	Mechanical integrity	-
N	No demand <sup>2)</sup>	No demand <sup>2)</sup>	No demand <sup>2)</sup>	No demand <sup>2)</sup>

1) Refers for instance to ensure free flow of water or steam.

2) No demand as regards leak-tightness, load-bearing function or mechanical integrity. But SSCs in Seismic Category N should not challenge any safety function of SSCs in Seismic Category 1 or P.

I rapporten [49] analyseras och diskuteras bakgrundsunderlaget till den svenska dimensionerande jordbävningen (DBE), frågor relaterade till allvarliga jordbävningseffekter utanför design (DEC) för nya säkerhetsrelaterade strukturer samt specifika frågor för befintliga strukturer som inte konstruerades med hänsyn till jordbävning. Det noteras att den finska dimensionerande jordbävningen är lik den svenska med en årlig överskridande frekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  (mediankonfidensnivå) och ett PGA-värde på 0,1g. När det gäller tillstånd utanför design (DEC) anges att en rimlig risknivå kunde vara en faktor mellan 1.6 till 1.7 gånger DBE, vilket är i linje med dåvarande diskussioner i USA och Frankrike. Ett annat alternativ kunde vara att tillämpa en årlig överskridandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-6}$  enligt SKI TR 92:3 med ett PGA-värde på 0,23g, d.v.s. ca två gånger DBE. För vissa väsentliga säkerhetskritiska SSK rekommenderas att tillämpa en årlig överskridandefrekvens på  $1 \cdot 10^{-7}$  enligt SKI TR 92:3. Detta för att erhålla tillräckliga säkerhetsmarginaler mot framtida ökade seismiska risknivåer på grund av identifierade brister i karakteriseringen av seismiska markrörelser i SKI TR 92:3.

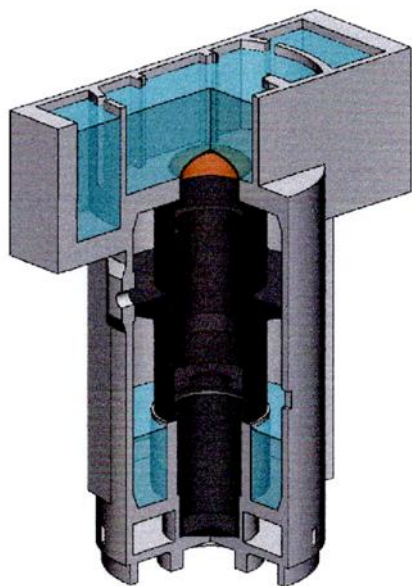
När det gäller seismisk utvärdering av befintliga strukturer som inte konstruerades med hänsyn till jordbävning, anges de situationer vid vilka en sådan utvärdering skulle vara motiverad (t.ex. i samband med PSR<sup>32</sup>-granskning) samt huvudsyften med en sådan utvärdering (t.ex. visa att det inte finns risk för tröskeeffekter). Vidare anges i rapporten [49] att analys och bedömning av dessa strukturer sker huvudsakligen genom tillämpning av någon av metoderna SMA eller SPSA<sup>33</sup>.

## 8.4. Inverkan från undergrund och bränslebassänger

I rapporten [56], ”*Inverkan från undergrund och bränslebassänger vid jordbävningssanalyser på svenska kokvattenreaktorer; SSM rapport 2021:17*”, har studerats kärnbränsle- och kondensationsbassängernas inverkan på reaktorinneslutningen till en typisk svensk kokvattenreaktor utsatt för jordbävningsslaster. Geometrin till den modellerade reaktorinneslutningen består av en förspänd betongcylinder med en vattenfylld bränslebassäng i toppen och en kondensationsbassäng runt om reaktorn. Även långsidorna på bränslebassängen är förspända, se figur 12 (figur 14 i ref. [56]).

<sup>32</sup> Periodic Safety Review

<sup>33</sup> Seismic Probabilistic Safety Assessment



**Figur 12.** Genomsnitt av reaktorinneslutningens geometri inklusive inre kärna (Figur 14 i ref. [56])

Genomförda analyser syftade till att studera inverkan från analysmetoder och undergrunden samt valet av dämpningens inverkan på strukturer. Rapporten [56] omfattar även en litteraturstudie avseende modeller för den s.k. fluid-structure interaction (FSI) samt deras inverkan på strukturen.

Av rapporten [56] framgår att idag kan dimensioneringen av svenska nukleära byggnadsstrukturer ske enligt DNB [45] och att jordbävningsanalyserna enligt DNB utgår framförallt från den amerikanska standarden ASCE 4-98. Det anges också att denna rapport [56] utgår ifrån DNB för att diskutera de aktuella analyserna.

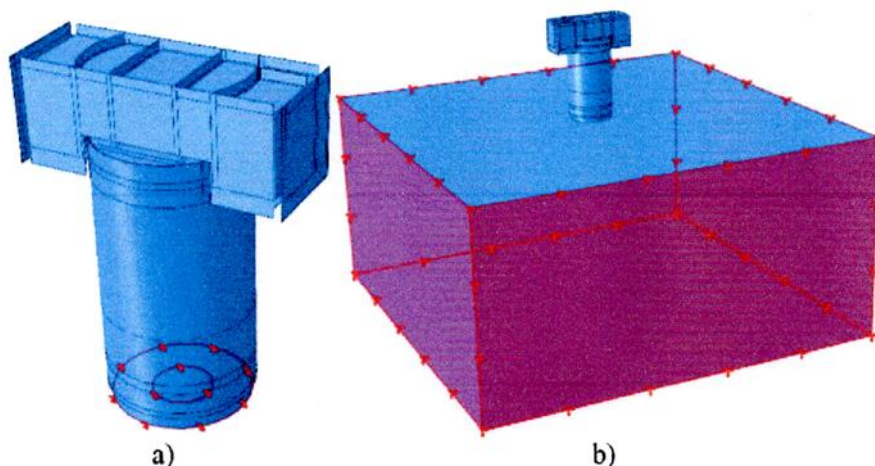
Vidare har i [56] en jämförelse gjorts mellan responspektrumanalys och tidshistorieanalys för ett fall med tomma bassänger. Det visade sig att resultaten avvek ganska mycket och tidshistorieanalysen hade både högre spänningar och acceleration. Avvikelsen var som störst halvvägs upp längs reaktorinneslutningens cylindervägg. Orsaken till avvikelsen berodde dock på analysmetoden och inte på dämpningen. Skälet till att analysen utfördes för tomma bassänger var begränsningen i beräkningsprogrammet ABAQUS där det inte gick att genomföra en responspektrumanalys med akustiska element<sup>34</sup> för att beskriva vattnet. Enligt rapporten [56] kan enbart linjärelastiska materialmodeller användas med responspektrumanalys, vilket begränsar möjligheten att exempelvis räkna på sprickbildning eller beteende hos existerande sprickor i en struktur. Responspektrumanalysen har således begränsad tillämpbarhet vid analys av jordbävningar utanför design.

Vidare anges att vid en kontroll med tidshistorieanalys behövs flera datauppsättningar för att täcka in alla möjliga frekvensvariationer. Detta innebär att en sådan analys blir tidskrävande med hög beräkningskostnad. För att en strukturs verkliga tålighet i brottgränstillstånd

<sup>34</sup> Akustiska element är en förenklad modell som antar att inget flöde sker i vätskan och att hela den hydrodynamiska responsen beskrivs därför genom vågpropagering.

det ska kunna undersökas behöver att en iterativ metod utförs, där många jordbävningssignaler testas till dess att strukturen uppgår till brott. Enligt rapporten framstår därför den s.k. uthållighetsanalys (Endurance Time Analysis) som ett bra alternativ till tidshistorieanalysen för bestämning av strukturens bärförmåga. Vid en uthållighetsanalys behöver endast strukturen kontrolleras mot en jordbävningssignal och brottgränstillståndet kan därmed kontrolleras relativt enkelt.

Beträffande interaktion med undergrunden har två olika modelleringsalternativ för randvillkoren undersökts; fast inspänd struktur direkt på berget och ett masslöst berg, se figur [13] nedan.



**Figur 13.** a) Fast inspänd grund, utan inverkan från berg och b) Grund med inverkan av masslöst berg. Berget är fast inspänt längs hela randen (Figur 21 i ref. [56]).

Resultatet från en parameterstudie avseende inverkan av det masslösa bergets styvhet visade att en sänkt styvhet medför en sänkning av strukturens egenfrekvens och respons. Strukturens respons sänks ytterligare om ett berg med massa inkluderas. Detta beror på att den inkluderade bergmassan bidrar till ökad dämpning, särskilt för låga frekvenser. Det blir således viktigt att ha korrekta materialparametrar för berget för att inte underskatta jordbävningens påverkan. Enligt rapporten [56] har metoden med inkluderad massa i bergvolymen visat sig ge ett mer verklighetstroget resultat. Det påpekas dock att en nackdel med att modellera berget är att det behövs information om bergets materialparametrar vilket kräver storskaliga geotekniska undersökningar. Av kostnadsskäl kan det därför vara mer effektivt att i vissa fall använda en fast inspänd modell.

I föreliggande studie [56] har seismiska simuleringar av reaktorinneslutningen till en kokvattenreaktor utförts där vattnets beteende beskrivs med akustiska element. Resultatet från denna studie visade att vattnets massa sänkte såväl strukturens egenfrekvens som den resulterande accelerationen, men ledde till större spänningsökning i reaktorinneslutningens cylindervägg och bassängväggarna. Det anges vidare att FSI har en större relativ påverkan på resultatet vid högfrekventa jordbävningar med något lägre amplitud.

När det gäller dämpningens inverkan anger rapporten [56] att den s.k. Rayleigh-dämpning används normalt vid numeriska analyser och att ett mycket vanligt sätt att bestämma Rayleigh-dämpning i litteraturen är att använda den första och tredje egenmodens frekvenser. Ett



sådant förfarande leder till att dämpningen blir mycket hög för höga frekvenser. Detta innebär att inverkan av högfrekventa jordbävningar, likt den svenska DBE, blir underskattad. Det anges vidare att i många riktlinjer för dimensionering av jordbävning beaktas en dynamisk elasticitetsmodul som ofta är ca 20–30 % högre än den statiska.

Följande slutsatser dras i rapporten [56]:

- Simuleringar med responsspektrumanalys är begränsande då inga icke-linjära materialegenskaper och randvillkor kan användas vilket är problematiskt vid simuleringar i brottgränstillstånd.
- Val av sätt att bestämma dämpningen har stor inverkan på en strukturs dynamiska beteende.
- Bränsle- och kondensationsbassängerna har stor inverkan på reaktorinneslutningens dynamiska beteende. Det har visat sig att tillämpning av moderna analysmetoder för FSI, som t.ex. akustiska element, ger goda resultat.
- Det har genom analyser visats att berggrunden har relativt stor inverkan på strukturens dynamiska respons, även i fall där den inte behöver beaktas.

I rapporten [56] rekommenderas att vid framtida uppdateringar av DNB [21] kan införas vissa gjorda observationer som bland annat rör responsspektrumanalysens tillämpbarhet och sättet att bestämma dämpningen.

## 8.5. Dimensionering av byggnadskonstruktioner

Rapporten [21], ”Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB), SSM 2021:23”, innehåller anvisningar för dimensionering av nukleära byggnadsstrukturer. Dessa anvisningar kan användas som grund vid dimensionering av nukleära byggnadsstrukturer på motsvarande sätt som ASME<sup>35</sup>-normerna gör för mekaniska anordningar. Rapporten som är baserad på Eurokoderna publicerades första gången som SSM rapport 2014:06.

I rapporten [21], kapitel 7, behandlas frågor rörande jordbävning där det bland annat beskrivs tillämpliga normer, regelverk och handböcker, arbetsprocess för seismisk säkerhetsverifiering samt seismisk klassning. Nedan redovisas det i rapporten [21] beskrivna seismiska klassificeringssystemet för nukleära SSK.

### Historik och principer

En jordbävning förorsakar olika former av mer eller mindre allvarliga konsekvenser, som samtliga kan härledas till inducerade vibrationer i anläggningens olika SSK. Dessa vibrationer kan ge en direkt påverkan på barriärerna och säkerhetsfunktionerna men även indirekt via eventuell mekanisk interaktion mellan konstruktionsdelar, genom utsläpp av farliga substanser eller via bränder och översvämningar förorsakade av jordbävningen. Det är därför viktigt att SSK i en anläggning grupperas i ett antal kategorier med avseende på dess betydelse för säkerheten under och efter en jordbävning, så kallad seismisk klassning. På det sättet skapas, i tillägg till säkerhetsklassningen, ett säkerhetsorienterat angreppssätt.

---

<sup>35</sup> American Society for Mechanical Engineers

De ursprungliga principerna för seismisk klassning togs fram 1972 i USA i en första version av USNRC RG 1.29 med ett i grunden helt deterministiskt upplägg. Klassningsmetodiken har under de senaste 20 åren utvecklats i en riktning mot ett mera generellt angreppssätt med fokus på den radiologiska säkerhets-signifikansen hos respektive säkerhetsklass. Denna utveckling har bland annat inneburit att i den senaste versionen av USNRC RG 1.29 från år 2016 refererar man till de rekommendationer om seismisk klassning som finns redovisat i IAEA NS-G-1.6 från 2006.

Den praxis som tillämpats i Sverige har i princip inte ändrats sedan man för första gången dimensionerade kärnkraftsreaktorer för jordbävningsslast i samband med uppförandet av Oskarshamn 3 och Forsmark 3 i slutet av 1970-talet. Det svenska klassningssystemet baseras på tre seismiska klasser (klass I, P och N). Beteckningarna på klasserna representerar olika krav på att vissa funktioner ska uppfyllas.

Klass I: Aktiv funktion<sup>36</sup>.

Klass P: Passiv funktion, oftast bärande funktion eller mekaniska integritet.

Klass N: Avser övriga SSK för vilka varken aktiv eller passiv funktion krävs. Det finns dock krav att SSK i denna klass inte får vedervåga funktionen hos SSK i klass I och P.

Enligt rapporten [21] innehåller den tillämpade seismiska klassningen i Sverige vissa brister. Använda beteckningar och tillämpade principer är inte riktigt koordinerade med internationella riktlinjer. En annan brist är att klass N kan uppfattas som otydlig på så sätt att den egentligen avser alla SSK som inte är klass I och P, nämligen inte endast de SSK som riskerar att vedervåga klass I och P.

I rapporten [21] diskuteras därför den tillämpade klassningen i den finska YVL-guiden. Man har där tre seismiska klasser enligt följande:

Klass S1 Omfattar upprätthållande av funktion, täthet, integritet och geometrisk form i händelse av en DBE.

Klass S2A Omfattar sådana SSK som i förlust av funktion, t.ex. lastbärande funktion, alternativt förlust av funktion som medför brand eller översvämning, kan medföra att viktiga säkerhetsfunktioner för SSK i seismisk klass S1 vedervågas.

Klass S2B Avser endast SSK utan någon säkerhetsfunktion och som inte riskerar att vedervåga komponenter i seismisk klass S1.

Seismisk klass S1 gör således ingen direkt åtskillnad mellan aktiv och passiv funktion som i det svenska klassningssystemet. När det gäller klass S2A och S2B kan dessa sammantaget motsvara klass N enligt den svenska modellen.

## Metodik för seismisk klassning

Baserat på vad som framgår av analysen ovan föreslås i rapporten [21] att det införs ett klassningssystem som både tar tillvara uppdelningen av aktiva respektive passiva funkt-

---

<sup>36</sup> Med aktiv funktion avses att systemet, komponenten eller anordningen ska kunna vara i drift under eller efter jordbävningen

ioner i separata klasser enligt det tidigare svenska klassningssystemet, såväl som den ändamålsenliga uppdelningen i den finska YVL Guiden av S2-komponenter i två klasser. Vidare definieras en seismisk klassningsbeteckning enligt upplägget i YVL Guiden, dock med införande av klassbeteckningen  $S_e$  istället för S för att undvika sammanblandning mellan den övergripande säkerhetsklassningen och den seismiska klassningen. Det erhålls då fyra seismiska klasser enligt följande:

- Klass  $S_{e1A}$**  Tillämpas för system, komponenter och anordningar vars aktiva funktion krävs under eller efter en jordbävning. Byggnader eller byggnadsdelar med krav på täthet och geometrisk form under och efter en jordbävning tillhör också denna klass.
- Klass  $S_{e1B}$**  Tillämpas för byggnader, byggnadsdelar, system, komponenter och anordningar som inte tillhör Seismisk klass  $S_{e1A}$  men vilkas passiva funktion måste upprätthållas under och efter en jordbävning.
- Klass  $S_{e2A}$**  Tillämpas för byggnader, byggnadsdelar, system, komponenter och anordningar som inte tillhör seismisk klass  $S_{e1A}$  eller  $S_{e1B}$ , men vilkas förlust av lastbärande funktion, mekanisk integritet eller annan typ av funktion kan äventyra funktionen hos utrustning som tillhör seismisk klass  $S_{e1A}$  eller  $S_{e1B}$ .
- Klass  $S_{e2B}$**  Alla övriga byggnader, byggnadsdelar, system, komponenter och anordningar vid anläggningen och som inte har några krav på upprätthållande av funktion under eller efter en jordbävning.

**Tabell 4.** Seismisk klassning – Exempel på funktionskrav (Tabell 7.1 i ref [21])

Seismisk klass	Strukturer	System	Komponenter	
	Byggnads-konstruktioner	Rörsystem	Pump/ventil	Elutrustning
$S_{e1A}$	Täthet	Aktiv funktion <sup>1)</sup>	Aktiv funktion	Aktiv funktion
$S_{e1B}$	Bärande funktion	Mekanisk integritet	Mekanisk integritet	-
$S_{e2A}$	Får inte vedervåga SSK i seismisk klass $S_{e1A}$ och $S_{e1B}$	Får inte vedervåga SSK i seismisk klass $S_{e1A}$ och $S_{e1B}$	Får inte vedervåga SSK i seismisk klass $S_{e1A}$ och $S_{e1B}$	Får inte vedervåga SSK i seismisk klass $S_{e1A}$ och $S_{e1B}$
$S_{e2B}$	Inga jordbävningsskrav	Inga jordbävningsskrav	Inga jordbävningsskrav	Inga jordbävningsskrav

1) Avser här exempelvis förmåga att släppa fram vatten eller ånga

## Acceptanskriterier och tillämpliga regelverk

Rapporten [21] anger att enligt SSMFS 2008:17 [57] ska de detaljerade kvalitets- och funktionskraven för anordningarna i anläggningen styras via säkerhetsklassningens underliggande klasser, exempelvis mekanisk kvalitetsklass, elektrisk funktionsklass och seismisk klass. Dessa detaljerade kvalitets- och funktionskrav styrs vanligtvis via det regelverk som anvisas för respektive klass. Den mekaniska kvalitetsklassen och den elektriska funktionsklassen styrs direkt av den övergripande säkerhetsklassningen. Detta direkta samband finns inte på samma sätt för den seismiska klassningen, men vissa riktlinjer kan erhållas utifrån vad som anges här nedan i relation till IAEA NS-G-1.6.

I sammanhanget ska nämnas att år 2021 blev SSMFS 2008:17 [57] ersatt av SSMFS 2021:4 [60]. Av 4 kap. 10 § i den nya föreskriften [60] framgår att säkerhetsklassificeringen utgör en ”grundklassificering” av SSK:s betydelse för strålsäkerheten mot vilken mer specifika klassningssystem, för specifika tillämpningar, kan relateras. Olika klassningssystem tillämpas enligt etablerad tolkning och tillämpning för att koppla betydelsen hos SSK till de olika krav som behöver ställas på t.ex. konstruktion och tillverkning. Innebörden av kravet när det gäller säkerhetsklassning och dess underliggande klasser i SSMFS 2021:4 är således densamma som i SSMFS 2008:17.

Rapporten [21] anger att av IAEA NS-G-1.6, paragraf 2.16 och 2.23, framgår att för varje anordning som ansätts en seismisk klass, ska funktionskrav tydligt definieras med tillhörande acceptanskriterier som ska gälla för dimensioneringssituationer som inkluderar DBE. Med acceptanskriterier avses fastställda värden på dimensioneringsparametrar för exempelvis täthet, maximal förskjutning och maximal lastbärande utnyttjandegrad. I vissa fall kan det vara acceptabelt att fastställda acceptanskriterier för fysiska barriärer reduceras något, med villkoret att konsekvenserna för anläggningens säkerhetsfunktioner utreds i detalj.

Det anges också [21] att av paragraf 2.14 och 2.16 i IAEA NS-G-1.6 framgår att anordningar som ingår i Seismic Category 1 (motsvarande seismisk klass Se1A eller Se1B enligt ovan) behandlas i överensstämmelse med den högsta säkerhetsklassen för anläggningen och dimensioneras, installeras och underhålls i överensstämmelse med de strängaste nationella kraven för nukleära anläggningar.

Rapporten [21] anger vidare att enligt paragraf 2.19 i IAEA NS-G-1.6 ska anordningar som ingår i Seismic Category 2 (motsvarande seismisk klass Se2A enligt ovan) följa vedertagen praxis för dimensionering, installation och underhåll enligt nukleära tillämpningar. För de konstruktionsarbeten som krävs för att Se2A-anordningar inte ska kunna vederväga anordningar i seismisk klass Se1A eller Se1B kan lägre säkerhetsmarginaler accepteras än vad som krävs enligt nukleär standard, under förutsättning att sannolikheten för påverkan på anordningarna i de högre klasserna kan anses vara mycket liten.

För anordningar i seismisk klass Se2B finns inga krav på tålighet mot jordbävningsslast och dessa anordningar kan dimensioneras enligt standarder för icke-nukleära anläggningar, exempelvis enligt Eurokoderna/EKS för byggnadskonstruktionerna.

Speciellt när det gäller byggnadsstrukturer anger rapporten [21] följande:

- Byggnadsdelar i seismisk klass Se1A och Se1B och som utgör del av reaktorinneslutningen hänförs till säkerhetsklass 2, med dimensionering enligt DNB [21] och med högsta tilläggskrav på robusthet.
- Byggnadskonstruktioner i övrigt i seismisk klass Se1A och Se1B kan kategoriseras till säkerhetsklass 3A, med dimensionering enligt DNB [21] med mildare krav på utökad robusthet.
- Byggnader och byggnadsdelar i seismisk klass Se2A bör hänföras till säkerhetsklass 3B, med dimensionering enligt DNB [21] utan några specifika tilläggskrav.
- För byggnader och byggnadsdelar i seismisk klass Se2B gäller inga seismiska krav och kan därför hänföras till säkerhetsklass 4 med följd att nationella regelverk (EKS) för ordinära anläggningar utan radiologisk omgivningspåverkan kan användas.

Säkerhetsklassningen ovan är den som definieras och tillämpas i DNB [21].

## 9. Slutsatser och rekommendationer

### 9.1. Slutsatser

1. En jordbävning med en årlig överskridandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-5}$  enligt SKI TR 92:3 fick sedan början av 1990-talet vara den dimensionerande jordbävningen (DBE) för kärntekniska tillämpningar i Sverige.
2. Av tillämpliga paragrafer i relevanta IAEA Safety Standard series framgår bland annat följande:
  - Jordbävningen ska beaktas vid analys och konstruktion av en kärnteknisk anläggning.
  - Vid utvärdering av jordbävningens risk ska en geologisk och seismotektonisk modell för förlägningsplatsen tas fram vilken bland annat innehåller en seismologisk databas. I denna databas ingår uppgifter om alla inträffade jordbävningar i regionen, d.v.s. både historiska (pre-instrumentella och instrumentellt registrerade jordbävningar) och förhistoriska jordbävningar (paleoseismisk data avseende jordbävningar med potential att orsaka mycket stor skada).
  - Den seismiska risknivån SL-2 ska motsvara en årlig överskridande sannolikhetsnivå mellan  $1 \cdot 10^{-3}$  och  $1 \cdot 10^{-5}$  (medelvärde).
  - Dimensioneringen av säkerhetsklassade SSK ska ske utifrån en SL-2 dimensionerande jordbävning (DBE) och med tillämpning av en minsta  $PGA=0,1g$ . DBE ska bestämmas med stöd av antingen deterministiska eller probabilistiska metoder (PSHA).
  - Den seismiska dimensioneringen bör utföras så att marginaler erhålls även för seismiska händelser utanför design (DEC) och på så sätt förhindra uppkomst av tröskeleffekter.
3. Av tillämpliga ämnesområden (issues) i relevanta WENRA-dokument framgår bland annat följande:
  - En årlig överskridande frekvens av  $1 \cdot 10^{-4}$  ska användas för den dimensionerande jordbävningen (DBE). Tillhörande designparametrar ska definieras utifrån resultaten från på ett konservativt sätt genomförda riskbedömningar.
  - Ett minsta horisontellt  $PGA$ -värde av  $0,1g$  ska tillämpas även om detta motsvarar en lägre överskridandefrekvens än  $1 \cdot 10^{-4}$  per år.
  - Vid en analys utanför design (DEC) bör använda metoder, antaganden eller argument inte vara onödigt konservativa.
  - Det ska visas att det föreligger tillräckliga säkerhetsmarginaler mot tröskeleffekter så att konsekvenser enligt DEC-tillstånd inte uppstår.
  - För befintliga anläggningar som byggdes utan krav på seismisk tålighet kan erfarenhetsbaserade metoder enligt IAEA NS-G-2.13 tillämpas.

Ovanstående visar att krav och riktlinjer enligt WENRA är harmoniserade mot IAEA:s säkerhetskrav och rekommendationer.

4. Av SSM:s bedömning och ställningstagande i OBH-projektet framgår följande:

- Markacceleration som tillämpas vid dimensionering eller värdering av strukturer och komponenter mot den svenska DBE, ska inte understiga 0,1g.
  - Vid värdering av säkerhetsmarginaler mot tröskeffekter ska en jordbävning med en styrka av minst 1,7 gånger DBE tillämpas.
  - De befintliga byggnadskonstruktioner som krediters i OBH-funktionen är inte konstruerade och utformade för att den s.k. beteendefaktor q ska kunna tillämpas vid värdering mot  $1 \cdot 10^{-6}$ -jordbävning.
  - Värderingen av byggnadskonstruktioner mot  $1 \cdot 10^{-6}$ -jordbävning bör så långt möjligt och rimligt ske med beaktande av anvisningarna i DNB [21].
  - De erfarenhetsbaserade metoder som anges i KSKG-dokumentet [29], exempelvis SMA- och GIP-metoden, kan tillämpas vid värdering mot den svenska DBE och mot jordbävning utanför design ( $1 \cdot 10^{-6}$ ).
5. De amerikanska standarderna ASCE 4-16 och ASCE 43-05 utgör tillsammans ett väletablerat ramverk för seismisk design och analys, i enlighet med erkända ingenjörsmässiga principer.
  6. För att tillförsäkra en ytterligare säkerhetsmarginal mot en svårare jordbävning än DBE, ställs det krav i ACI 349 på duktil armeringsutformning i betongkonstruktioner.
  7. Även om postglaciala skalv skulle ingå i en utvärdering av den seismiska faran, bedöms detta inte påverka resultaten i SKI TR 92:3 om den tillämpade beräkningsmetoden i SKI TR 92:3 används.  
Genomförande av en modern seismisk riskanalys, s.k. PSHA, med beaktande av paleoseismisk data skulle troligen visa ökad jordbävningrisk.  
Resultatet från beräknad skalvaktivitet utifrån nuvarande kunskapsläge tyder på att värdena i SKI TR 92:3 är konservativt uppskattade för skalv med magnitud upp till och med 5.0 i Richterskalan, men icke-konservativa för större skalv. Dessa slutsatser vilar dock på ofullständig information om hur SKI TR 92:3 tagit ut sitt seismiska data. [48].
  8. En rimlig risknivå för tillstånd utanför design (DEC) kunde vara en faktor mellan 1.6 till 1.7 gånger DBE, alternativt tillämpning av en årlig överskridandefrekvens av  $1 \cdot 10^{-6}$  enligt SKI TR 92:3 [49].
  9. Bränsle- och kondensationsbassänger har stor inverkan på reaktorinneslutningens dynamiska beteende. Det har visat sig att tillämpning av moderna analysmetoder för FSI, som t.ex. akustiska element, ger goda resultat.  
Det har visats att berggrunden har relativt stor inverkan på strukturens dynamiska respons, även i fall där den inte behöver beaktas [56].

## 9.2. Rekommendationer

1. Den samnordiska jordskalvkatalogen Fencat innehåller betydligt fler skalv idag än den gjorde vid tiden för datauttaget till SKI TR 92:3 [4] och med en uppdaterad historisk del med nya bestämningar av lokaliseringar och magnituder av de större skalven. Dessutom har moderniseringen och utbyggnaden av Sveriges nationella seismiska nätverk, SNSN, från slutet av 1990-talet gett en betydligt mer detaljerad bild av jordbävningens aktiviteten i Sverige än tidigare. Vidare har det skett en omfattande utveckling av probabilistiska metoder (PSHA) för värdering av seismisk fara. Användning av probabilistiska och deterministiska metoder rekommenderas av både IAEA och WENRA.

De stora förbättringarna i jordskalv-katalogen Fencat och den omfattande utvecklingen av analysmetodik samt internationella rekommendationer har gjort att SKI TR 92:3 nu är omodern. Föreliggande rapport föreslår att SKI TR 92:3 [4] bör ses över med hänsyn till bland annat nyttillkommen kunskap enligt ovan.

2. Föreliggande rapport rekommenderar att befintliga strukturer och komponenter som konstruerades utan krav på jordbävningstålighet, bör genomgå en seismisk utvärdering i syfte att bland annat visa att det inte finns risk för tröskeeffekter. Sådana utvärderingar kan exempelvis genomföras varje tionde år och i samband med PSR-granskningar. Detta är i linje med rekommendationerna från ENSREG till medlemsländerna i Europa som ett resultat från expertgranskningar i anslutning till stresstesterna.
3. Erfarenhetsbaserade metoder utnyttjar normalt data från komponenters tålighet vid verkliga jordbävningar och från skakbordstester. Vidare innefattar metoden s.k. screeningskriterier för att avgöra om en komponent är tillräckligt lik utrustning som fungerat väl vid verkliga jordbävningar eller skakbordstester. Enligt föreliggande rapport är det viktigt att vid tillämpning av erfarenhetsbaserade metoder bedöma metodens tillämplighet för komponenter och utrustning i svenska anläggningar, samt ta i beaktande att de deterministiskt analyserade kraven utgör grunden för anläggningarnas drifttillstånd.
4. DNB [21] innehåller principer och regler för analys och dimensionering av reaktorinneslutningar och andra byggnadsstrukturer vid svenska kärntekniska anläggningar och är ett komplement till Boverkets grundförfattning, BFS 2011:10, för användning vid kärntekniska tillämpningar. DNB har sin grund i Eurokoder med kompletterande krav från internationellt vedertagna standarder som t.ex. ASCE 4-16 och ASME Section III Division 2. I vissa fall görs även hänvisningar till IAEA Safety Guides. I DNB föreslås ett seismiskt klassningssystem baserat på internationellt tillämpade principer och med en bättre tydlighet i beskrivningen av de seismiska klasserna jämfört med det hitintills tillämpade klassningssystemet i Sverige. Föreliggande rapport anser att det nuvarande seismiska klassningssystemet är föråldrat och bör således ses över, exempelvis utifrån det klassningssystem som beskrivs i DNB [21].
5. Arbetet inom det stora europeiska forskningsprojektet SHARE/ ESHM13 [46] resulterade i seismiska sannolikhetskurvor för beskrivning av seismiska risken och markresponsspektra över flera tusen platser fördelade i hela Europa. SHARE-underlaget visar på en förhöjd seismisk fara för framför allt Skåne och svenska västkusten jämfört med tidigare genomförda studier. Beräkningsresultaten från en jämförande studie i [47] visar att för låga frekvenser är den seismiska responsen för Ringhals väsentligt högre med tillämpning av markresponsspektra enligt SHARE/ ESHM13 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. Föreliggande rapport anser att den märkbart högre seismiska responsen för Ringhals som den jämförande studien [47] visar, är en farhåga av hög säkerhetsbetydelse som SSM bör utreda vidare.

## 10. Erkännanden

Denna rapport är beställd och finansierad av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). Författaren vill tacka SSM för förtroendet att genomföra denna studie. Författaren vill också tacka SSM:s Lars Bennemo, Fredrik Forsberg och Carl-Henrik Pettersson för den granskning de genomfört av rapporten och för värdefull input i övrigt.



# 11. Referenser

1. <https://www.sgu.se/om-geologi/jordklotets-uppbyggnad>, 2023-10-19.
2. <https://snsn.se>, Jordbävningar, 2023-10-19.
3. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, USNRC RG 1.60 Rev 1, december 1973.
4. Project seismic safety – Characterization of seismic ground motions for probabilistic safety analyses of nuclear facilities in Sweden, SKI TR 92:3, 1992.
5. WENRA RHWG, Safety of new NPP designs, March 2013.
6. Modified ground motion characterization for Barsebäck, VBB Report 07013-1, 1995-06-01.
7. Site-specific ground motion characterization for Simpevarp and Ringhals, VBB Report 21007024-1, 1995-09-20.
8. IAEA, Seismic Design for Nuclear installations, Safety Guides No. SSG-67, November 2021.
9. IAEA, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Guides No. SSG-9 (Rev. 1), January 2022.
10. IAEA, Geotechnical aspects of site evaluation and foundations for nuclear power plants, Safety Guides No. NS-G-3.6, December 2004.
11. IAEA, Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations, Safety Guides No. NS-G-2.13, may 2009.
12. IAEA, Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Requirements No. SSR-1 (Rev. 1), April 2019.
13. WENRA RHWG, Safety Reference Levels for Existing Reactors 2020, 17 Februari 2021.
14. WENRA RHWG, Issue TU: Guidance Head Document on External hazards.
15. WENRA RHWG, Issue TU: Guidance on Seismic Events – Annex to the Guidance Head Document.
16. IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements, Safety Guide No. SSR-2/1 (Rev. 1), February 2016.
17. IAEA, IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, 2022 (interim) Edition.
18. SS-EN 1998-1:2004; Eurokod 8: Dimensionering av bärverk med avseende på jordbävning.
19. Boverket, Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (Eurokoder), EKS (BFS 2011:10), 1 juli 2019.
20. Transportstyrelsen, Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av Eurokoder, TSFS 2018:17, 21 september 2018.
21. SSM, Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB), SSM 2021:23, 3 september 2021
22. American Society of Civil Engineers, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-16.
23. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Damping values for Seismic Design of Nuclear Power Plants, RG 1.61 Rev 1, mars 2007.
24. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Seismic Design Parameters, SRP 3.7.1. Rev 3, mars 2007.
25. American Society of Civil Engineers, Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities, ASCE/SEI 43-05.

26. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete with Commentary, ACI 318-11, Augusti 2011.
27. American Concrete Institute, Code Requirements for Nuclear Safety-Related Structural Concrete Structures with Commentary, ACI 349-06, September 2007.
28. SSM, Bilaga 1, Grundläggande konstruktionsförutsättningar för oberoende härdkylning i svenska kärnkraftsreaktorer, SSM2012-3021-12-14, SSM2012-3022-16, SSM2012-3023-16--17, 2014-12-15
29. OKG/FKA/RAB, *KSKG Riktlinjer – Vägledning för att beakta jordbävning i funktionen för oberoende härdkylning*, 2017-11-30, KSKG Riktlinjer/1.0.
30. SSM, Bilaga 3 – Granskning av extrem yttre påverkan för OKG, SSM2019-10024-62, 2020-12-18.
31. SSM, Bilaga 3 – Granskning av extrem yttre påverkan för FKA, SSM2019-10007-40, 2020-12-18.
32. SSM, Bilaga 3 – Granskning av extrem yttre påverkan för Ringhals AB, SSM2019-10023-38, 2020-12-18.
33. WENRA, *Safety Reference Levels for Existing Reactors*, 2014-09-24, RHWG Report.
34. IAEA, *Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants*, TECDOC-1791, May 2016.
35. SQUG, *Implementation of Guidelines for Seismic Qualification of New and Replacement Equipment/Parts (NARE) – Using the Generic Implementation Procedure (GIP)*, NARE Guidelines Rev. 5.
36. Fauske & Associates, *Walkdown Screening Methodology for Seismic Ruggedness Verification of the Piping Systems at OKG*, Report FAI/13-0570.
37. EPRI, *Seismic Fragility Applications Guide Update*, Report 1019200.
38. EPRI, *Experience-based Seismic Verification Guidelines for Piping and Tubing*, Report 1019199.
39. SSM, Förtydligande – Oberoende härdkylning, Brev-OKG, SSM2017-2576-6, 2018-01-18.
40. SSM, Förtydligande – Oberoende härdkylning, Brev-FKA, SSM2017-2576-6, 2018-01-18.
41. SSM, Förtydligande – Oberoende härdkylning, Brev-RAB, SSM2017-2576-6, 2018-01-18.
42. IAEA, *Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements*, No SSR-2/1 Rev 1, Februari 2016.
43. American Society of Civil Engineers, *Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities*, ASCE 43-05.
44. SS-EN 1992-1-1; Eurocode 2: *Design of concrete structures - General rules and rules for buildings*.
45. SSM, *Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB)*, SSM rapport 2017:07.
46. Bull Earthquake Eng. (2015) 13:3553-3596 , The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results, 2015.
47. SSM, ESHM13 – En ny PSHA-modell för Europa betraktat ur ett svenskt perspektiv, SSM rapport 2018:27.
48. SSM, Review of paleo-, historical and current seismicity in Sweden and surrounding areas with implications for the seismic analysis underlying, SSM rapport 2017:35.

49. SSM, Seismic design and analysis of safety-related nuclear structures in Sweden, SSM rapport 2014:56.
50. SSM, Swedish action plan for nuclear power plants, response to ENSREGs request, SSM december 2012.
51. Scanscot Technology AB, Dimensioneringsregler för byggnader (DRB:2001), March 2002.
52. Boverket, Boverkets konstruktionsregler, BKR, 2010.
53. SSM, Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB), SSM 2014:06, Februari 2014.
54. EUR – European Utility Requirements for LWR nuclear power plants, Volume 2, Chapter 4, 2012.
55. American Society of Civil Engineers, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98, 1998.
56. SSM, Inverkan från undergrund och bränslebassänger vid jordbävningsanalyser på svenska kokvattenreaktorer, SSM rapport 2021:17, 2017.
57. SKI, Statens kärnkraftsinspektions föreskrifter om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar, SKIFS 1998:1, augusti 1998.
58. SSM, Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer, SSMFS 2008:17, januari 2009.
59. SSM, Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om konstruktion av kärnkraftsreaktorer, SSMFS 2021:4, december 2021.
60. SSM, Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om värdering och redovisning av strålsäkerhet för kärnkraftsreaktorer, SSMFS 2021:5, december 2021.
61. <https://www.britannica.com/science/seismic-wave>, 2023-10-19.
62. IEEE, recommended practice for seismic qualification of class 1E equipment for nuclear power generating stations, Institute of Electrical and Electronics Engineers, June 2005.
63. USNRC, Seismic qualification of electrical and active mechanical equipment and functional qualification of active mechanical equipment for nuclear power plants, RG 1.100 rev. 3, September 2009.
64. <https://www.usgs.gov/media/images/tectonic-plates-earth>, 2024-02-06.
65. VBB VIAK AB, PM beträffande jordbävningsrisker i Sverige, S7980, 23 november 1992.

## Bilaga 1 – Lista över förkortningar

ACI	American Concrete Institute
AS	Area Source model
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASME	American Society for Mechanical Engineers
ASN	Autorité de Sureté Nucléaire (Franska kärnkraftsmyndigheten)
ASZ	Area Source Zones
BKR	Boverkets konstruktionsregler
CFR	Code of Federal Regulations
DBA	Design Basis Accident
DBE	Design Basis Earthquake
DEC	Design Extension Condition
DEE	Design Extension Earthquake
DNB	Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner
DRB	Dimensioneringsregler för byggnader
EDSF	The European Database of Seismogenic Faults
ENSREG	The European Nuclear Safety Regulators Group
EPR	European Pressurised Water Reactor
EPRI	The Electric Power Research Institute
ESHM	European Seismic Hazard Model
EUR	European Utility Requirements
FSI	fluid-structure interaction
FSBG	Fault Source and BackGround model
GIP	Generic Implementation Procedure
GMPE	Ground Motion Prediction Equations
GSA	Guidance on Seismic Events
HCLPF	High Confidence of Low Probability of Failure
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICCS	Independent Core Cooling System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

KSKG	Kärnkraftindustrins säkerhetskoordineringsgrupp
NPP	Nuclear Power Plants
OBE	Operating Basis Earthquake
OBH	Oberoende härdkylning
PGA	Peak Ground Acceleration
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Assessment
PSR	Periodic Safety Review
RFS	Règles Fondamentales de Sureté (Grundläggande säkerhetskrav)
RG	Regulatory Guide
RTGE	French: General Technical Environmental Regulations
SEIFA	SEismicity and accumulated FAult moment
SAR	Safety Analysis Report
SGU	Sveriges Geologiska Undersökning
SHARE	Seismic Hazard Harmonization in Europe
SHEEK	SHARE European Earthquake Catalogue
SKIFS	Statens kärnkraftinspektions författningssamling
SMA	Seismic Margin Assessment
SNSN	Swedish National Seismic Network
SQUG	Seismic Qualification Utility Group
SPSA	Seismic Probabilistic Safety Analysis
SRL	Safety Reference Levels
SRP	Standard Review plan
SSC	Structures, systems and components
SSK	Strukturer, system och komponenter
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten
SSMFS	Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling
SKI	Statens kärnkraftinspektion
SS-EN	En europeisk EN-standard som blivit fastställd som svensk standard
TSN	Transparency and Security in Nuclear field
UHS	Uniform Hazard Spectrum

USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
YVL	Regulatory Guides on nuclear safety, Finland
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association

## Bilaga 2 – Lista över figurer

- Figur 1.** De huvudsakliga plattorna i jordskorpan, Ref. [64]
- Figur 2.** The original Swedish design response spectrum, based on RG 1.60 and scaled to  $PGA=0,15g$  for horizontal acceleration, compared with suggested Envelope Ground Response Spectrum for  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  and  $10^{-7}$  annual events per site (Figur 13 i [4])
- Figur 3.** Geometrical division and distribution of focal depths adopted for the calculation of hypocentral densities of occurrence (Figur 4 i ref. [4])
- Figur 4.** The adopted average Fennoscandian epicentral density function compared with curves connecting data points relating to various geographical zones (Figur 5 i [4])
- Figur 5.** Jordbävningsskatalogen SHEEC över inträffade jordbävningar år 1000 till 2006 (Figur 3.1 i ref. [47])
- Figur 6.** Databasen EDSF över jordbävningssförkastningar omkring Medelhavet (Figur 3.2 i ref. [47])
- Figur 7.** Jämförelse av markresponsspektra, SHARE/ESHM13, SKI TR 92:3 och USNRC RG 1.60 (Figur 4.10 i ref. [47]).
- Figur 8.** Jämförelse av markresponsspektra, SHARE/ESHM13 och SKI TR 92:3 (Figur 4.11 i ref. [47]).
- Figur 9.** Jämförelse av spektra med olika årliga överskridandefrekvenser för Ringhals enligt ESHM13 och enligt SKI TR 92:3 (Figur 4.13 i ref. [47]).
- Figur 10.** Stationsnätet (SNSN) och seismicitet i Sverige 2000 – 2016 (Figur 4 i ref. [48])
- Figur 11.** Comparison between the Swedish DBE ground response spectra ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) and other international well-known DBE response spectra (Figur 3.2 i rapporten)
- Figur 12.** Genomskäring av reaktorinneslutningens geometri inklusive inre kärna (Figur 14 i ref. [56])
- Figur 13.** a) Fast inspänd grund, utan inverkan från berg och b) Grund med inverkan av masslöst berg. Berget är fast inspänt längs hela randen (Figur 21 i ref. [56]).

## Bilaga 3 – Lista över tabeller

- Tabell 1.** Jämförelse av PGA-värden enligt SHARE/ESHM13 för respektive anläggningsplats och SKI TR 92:3 (Tabell 4-3 i ref [47]).
- Tabell 2.** Large paleoseismic earthquakes in Sweden, Norway and Finland with associated location, timing and magnitude. Coordinates give the approximate midpoints of the faults (Tabell 1 i ref. [48]).
- Tabell 3.** Seismic design classification for SSCs at Swedish NPP (Tabell 2.3 i ref [49]).
- Tabell 4.** Seismisk klassning – Exempel på funktionskrav (Tabell 7.1 i ref [21]).









Strålsäkerhetsmyndigheten arbetar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden.

Du kan ladda ner våra publikationer från [www.stralsakerhetsmyndigheten.se/publikationer](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/publikationer). Om du behöver alternativa format som exempelvis lättläst, punktskrift eller Daisy, kontaktar du oss på e-post [registrator@ssm.se](mailto:registrator@ssm.se).

**Strålsäkerhetsmyndigheten**  
171 16 Stockholm  
08-799 40 00  
[www.stralsakerhetsmyndigheten.se](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se)  
[registrator@ssm.se](mailto:registrator@ssm.se)

©Strålsäkerhetsmyndigheten