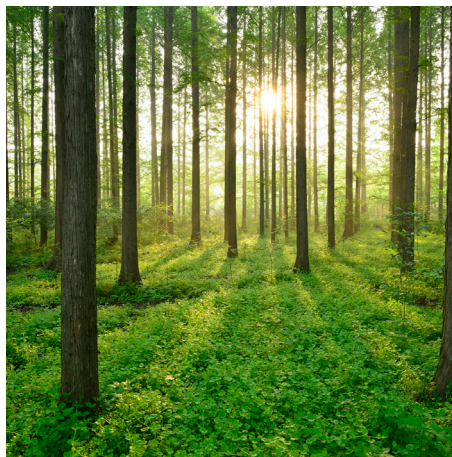
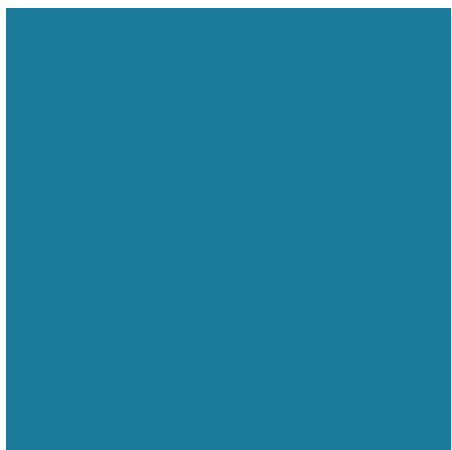


# STRESSTEST AV DAMMANLÄGGNINGAR

RAPPORT 2024:1017



DAMMSÄKERHET



# Stresstest av dammanläggningar

ANDERS FRISK, MARIE WESTBERG WILDE,  
MARIA FRISK, STEFAN AUTHEN, SIMON ÅGREN

ISBN 978-91-89919-17-4 | © Energiforsk maj 2024

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

## Förord

**Denna rapport behandlar metoder för att genomföra stresstest för dammanläggningar genom att utgå från etablerade arbetsätt och en grundlig omvärldsanalys.**

Den här rapporten har finansierats av Energiforsks program för Dammsäkerhet, och har skrivits av Anders Frisk, Marie Westberg Linde och Simon Ågren på AFRY samt Maria Frisk och Stefan Authén på Riskpilot. Projektledare har varit Anders Frisk på AFRY och Maria Frisk på Riskpilot.

Projektet har haft en referensgrupp bestående av: Mats Eriksson (Fortum), Romanas Wolfsborg (Vattenfall), Anders Isander (Sydkraft HydroPower/Uniper), Daniel Sjöstedt (Skekraft), Anton Lundkvist (Statkraft), Henrik Arver (Vattenregleringsföretagen), Anna Engstöm Meyer (Svenska kraftnät) samt Maria Bartsch (Svenska kraftnät).

I rapporten redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Sammanfattning

**Stresstest genomförs inom ett flertal olika områden för att analysera ett systems respons på olika belastningar. Denna rapport redovisar metoder för att genomföra stresstest för dammanläggningar. Metoderna tar avstamp i redan etablerade arbets sätt.**

En omvärldsanalys av metoder som använts för stresstester inom områden som kärnkraft, elförsörjning och kritisk infrastruktur har utförts. En entydig definition av stresstester tycks saknas, med det finns stora likheter i hur stresstester genomförs inom olika områden. Stresstester omfattar ofta en grundlig analys av ett systems stabilitet och förmåga att hantera störningar och hot. Det innebär ofta att systemets respons bedöms för situationer och kombinationshändelser där systemet belastas utanför sina normala konstruktionsförutsättningar, ofta till den punkt att systemet havererar. Syftet kan variera och omfattar flera områden som att bestämma tröskeeffekter, säkra driftområden, identifiera systemets felmoder eller för att analysera systemets förmåga att hantera laster och kombinationer av laster utanför dess normala drifttillstånd.

Med utgångspunkt av detta definieras för detta Energiforskprojekt stresstest för dammanläggningar som:

*”En metod för att analysera anläggningens respons och bedöma dess resiliens och säkerhetsmarginaler mot kombinationer av tillstånd, händelser, faror och förhållanden.”*

I rapporten beskrivs tre olika metoder som kan användas för stresstest för dammanläggningar. Dessa innebär varierande grad av förarbete och omfattning i resultat.

Metod 1 är en probabilistisk metod där anläggningens hot och belastningar genereras utifrån sannolikhetsfunktioner och återkomsttider, anläggningens respons modelleras matematiskt och utfallet av händelserna sammanställs i en resultatmatris och i detaljerade redogörelser för respektive scenario. Metoden kräver detaljerade beskrivningar av sannolikhetsfördelningar och är beräkningstung. Resultatet är en sannolikhetsbaserad resultatsammanställning som redovisar anläggningens hot- och riskprofil.

Metod 2 är en scenariobaserad metod där kritiska scenarion identifieras och anläggningens förmåga att hantera dessa beräknas med enklare hjälpmedel än automatiska modeller. Resultatet är en ökad förståelse för anläggningens förmåga att hantera dessa scenarion. Metoden är enkel att applicera på en stor mängd anläggningar.

Metod 3 är en scenariostyrd metod med modellerad anläggningsrespons. I denna metod sätts varken sannolikhetsfunktioner för olika hot, eller identifiering av de mest kritiska scenariona, istället sätts en omfattande testmatris upp som kombinerar olika händelser oaktat sannolikheten för att dessa inträffar. Resultatet blir en omfattande resultatmatris som kan analyseras såväl med metaanalys över scenarioutfallen som i detaljerad analys över respektive scenarios händelsekedja.

Metoden har applicerats på en fiktiv anläggning i syfte att visa hur modellen kan sättas upp och hur resultat kan utvärderas.

Författarna till rapporten förespråkar att metod 3 används i de fall dammägaren önskar skaffa sig en bättre förståelse för vilken förmåga anläggningen har att hantera ett stort antal lastkombinationer.

Vidare förespråkar författarna att metod 2 används i de fall dammägaren önskar göra en mer översiktlig analys, eller en screening över en större portfölj av dammar för att få en sammanställning över anläggningarnas säkerhet mot olika kombinationshändelser.

Vidare förespråkar författarna metod 1 i de fall sannolikhetsfunktioner och återkomsttider finns framtagna, eller går att ta fram, för samtliga hot och risker som anläggningen kan utsättas för, samt om det bedöms (t.ex. från metod 2 eller 3) att en fördjupad metod bör användas. Denna metod kräver dock att vissa kunskapssteg tas inom branschen.

## Nyckelord

*Stresstest, Dammsäkerhet, Riskanalys, Säkerhetsutvärdering, Scenarioanalys, Säkerhetsmarginaler, Resiliens*



## Summary

**A stress test is conducted in various areas to analyze a system's response to different loads. This report presents methods for conducting stress tests for dam facilities. The methods are based on established practices.**

A study of methods used for stress testing in areas such as nuclear power, electricity supply, and critical infrastructure has been carried out. A clear definition of stress tests seems to be lacking, but there are significant similarities in how stress tests are conducted in different areas. Stress tests often involve a thorough analysis of a system's stability and ability to handle disturbances and threats. This often means assessing the system's response to situations and combinations of events where the system is stressed beyond its normal design conditions, often to the point of failure. The purpose can vary and includes determining threshold effects, securing operational ranges, identifying the system's failure modes, or analyzing the system's ability to handle loads and combinations of loads outside its normal operating conditions.

Based on this, stress tests for dam facilities are defined for this Energy Research project as:

En metod för att analysera anläggningens respons och bedöma dess resiliens och säkerhetsmarginaler mot kombinationer av tillstånd, händelser, faror och förhållanden.

*"A method for analyzing the facility's response and assessing the facility's resilience and safety margins against combinations of states, events, threats and conditions."*

The report describes three different methods that can be used for stress testing dam facilities. These methods involve varying degrees of preparation and scope of results.

Method 1 is a probabilistic method where the facility's threats and loads are generated based on probability functions and return periods, the facility's response is mathematically modeled, and the outcome of events is compiled in a result matrix and detailed reports for each scenario. The method requires detailed descriptions of probability distributions and is computationally complex. The result is a probability-based result compilation that presents the facility's threat profile.

Method 2 is a scenario-based method where critical scenarios are determined, and the facility's ability to manage them is calculated using simpler tools than automatic models. The result is an increased understanding of the facility's ability to manage these scenarios. The method is also easy to apply to a large number of facilities.

Method 3 is a scenario-driven method with modeled facility response. In this method, no probability functions for different threats or identification of the most critical scenarios are set, instead a comprehensive test matrix is established that combines different events regardless of the probability of their occurrence. The

result is an extensive result matrix that can be analyzed both with meta-analysis of scenario outcomes and in detailed analysis of each scenario's event chain.

The authors of the report advocate for the use of Method 3 in cases where the dam owner wishes to gain a better understanding of the facility's ability to manage a large number of load combinations.

Furthermore, the authors recommend the use of Method 2 in cases where the dam owner wants to conduct a more overview analysis or screening of a larger portfolio of dams to compile information on the facilities' safety against various combination events.

Additionally, the authors recommend Method 1 in cases where probability functions and return periods are available, or can be developed, for all threats and risks the facility may be exposed to, and if it is assessed (e.g., from Method 2 or 3) that an in-depth method should be used. The method demands that the industry takes some knowledge leaps in the understanding of certain topics.

# Innehåll

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning</b>  | <b>10</b> |
| <b>2</b> | <b>Omvärldsanalys och litteraturstudie</b>  | <b>11</b> |
| 2.1      | Kärnkraft   | 11        |
| 2.1.1    | Bakgrund till att genomföra stresstest för kärntekniska anläggningar                          | 11        |
| 2.1.2    | Metod och tillvägagångssätt   | 12        |
| 2.1.3    | Resultat  | 14        |
| 2.1.4    | Slutsatser  | 16        |
| 2.2      | Elförsörjning   | 16        |
| 2.3      | Kritisk infrastruktur – EU projektet Strest   | 17        |
| 2.3.1    | Erfarenhetsåterföring upptagen i STREST rapporten   | 18        |
| 2.3.2    | Riskbedömning av extrema händelser  | 18        |
| 2.3.3    | Sårbarhetsanalyser av kritisk infrastruktur   | 19        |
| 2.3.4    | Utvecklandet av stresstest metodik och ramverk  | 19        |
| 2.3.5    | Utvärdering av metodiken på representativa kritiska infrastrukturer inom Europa.              | 20        |
| 2.3.6    | Sammanfattning STREST projektet   | 21        |
| 2.4      | Stresstest inom andra områden   | 21        |
| 2.4.1    | Stresstest inom finansmarknaden   | 21        |
| 2.5      | Vattenkraft   | 22        |
| <b>3</b> | <b>Definition</b>   | <b>23</b> |
| 3.1      | Säkerhetsmarginal   | 24        |
| <b>4</b> | <b>Metod för stresstest</b>   | <b>26</b> |
| 4.1      | Metod 1. Probabilistisk metod - översiktlig beskrivning                                       | 26        |
| 4.2      | Metod 2. Scenariobaserade stresstester – översiktlig beskrivning                              | 28        |
| 4.3      | Metod 3. Scenariostyrt stresstest med modellerad anläggningsrespons – översiktlig beskrivning | 30        |
| 4.4      | Sammanställning metod 1-3   | 32        |
| <b>5</b> | <b>Metod 1 - Probabilistisk metod</b>   | <b>33</b> |
| 5.1      | Metod 1 - Beskrivning av Delsystem  | 33        |
| 5.2      | Metod 1 - Beskrivning av hot och lastkombinering  | 34        |
| 5.3      | Metod 1 - Beskrivning av Systemtillstånd  | 37        |
| 5.4      | Metod 1 - Krav på förarbete och underlag  | 37        |
| 5.5      | Metod 1 - Krav på utförande   | 38        |
| 5.6      | Metod 1 - Förväntat resultat och vidare arbete  | 38        |
| <b>6</b> | <b>Metod 2 - Scenariobaserade stresstester</b>  | <b>40</b> |
| 6.1      | Metod 2 - Beskrivning av Delsystem  | 41        |
| 6.2      | Metod 2 – Beskrivning av hot och lastkombinering  | 42        |
| 6.3      | Metod 2 – Beskrivning av Systemtillstånd  | 43        |



|                  |   |           |
|------------------|---|-----------|
| 6.4              | Metod 2 – Krav på förarbete och underlag                                    | 44        |
| 6.5              | Metod 2 – Krav på utförande   | 44        |
| 6.6              | Metod 2 – Förväntat resultat och vidare arbete                              | 44        |
| <b>7</b>         | <b>Metod 3 – Scenariostyrt stresstest med modellerad anläggningsrespons</b> | <b>45</b> |
| 7.1              | Metod 3 – Beskrivning av Delsystem  | 45        |
| 7.2              | Metod 3 – Beskrivning av hot och lastkombinering                            | 49        |
| 7.3              | Metod 3 – Beskrivning av Systemtillstånd                                    | 53        |
| 7.4              | Metod 3 – Krav på förarbete och underlag                                    | 53        |
| 7.5              | Metod 3 – Krav på utförande   | 53        |
| 7.6              | Metod 3 – Förväntat resultat och vidare arbete                              | 53        |
| <b>8</b>         | <b>Test och fördjupad analys av metod 3</b>                                 | <b>55</b> |
| 8.1              | Framtagande av systembeskrivande modell                                     | 55        |
| 8.2              | Metaanalys av resultat  | 55        |
| 8.3              | Detaljerad resultatanalys   | 59        |
| 8.4              | Lärdomar från den fördjupade analysen                                       | 60        |
| <b>9</b>         | <b>Tillämpning</b>  | <b>62</b> |
| <b>10</b>        | <b>Diskussion</b>   | <b>63</b> |
| <b>11</b>        | <b>Referenslista</b>  | <b>65</b> |
| <b>Bilaga A:</b> | <b>Säkerhetsmarginaler inom kärnkraft</b>                                   | <b>67</b> |
| <b>Bilaga B:</b> | <b>Kriterier för att screena bort händelser</b>                             | <b>70</b> |
| <b>Bilaga C:</b> | <b>Utredningar som SSM förväntade sig av tillståndshavarnas stresstest</b>  | <b>72</b> |
| <b>Bilaga D:</b> | <b>Förslag på scenarioval för metod 2</b>                                   | <b>76</b> |
| <b>Bilaga E:</b> | <b>Test av metod 3 för en fiktiv anläggning</b>                             | <b>79</b> |

# 1 Inledning

**Stresstester har genomförts inom flertalet olika områden för att identifiera och analysera sårbarheter och risker för olika system. Detta energiforsk projekt syftar till att beskriva möjliga metoder för stresstest för dammanläggningar i Sverige.**

Stresstester genomförs för att analysera systems sårbarheter och förmåga att hantera risker. Metoden används inom ett flertal olika områden som till exempel hydrologi/klimathot, kärnkraftsäkerhet och inom finansiella system. Efter olyckan i Fukushima 2011 fick metoden ett stort genomslag inom kärnkraftsområdet då EU initierade ett stresstestprogram på samtliga europeiska kärnkraftverk. Intresset för stresstest inom EU var fortsatt stort och 2013-2016 genomfördes ett omfattande EU projekt för att ta fram en metod för stresstest för kritisk infrastruktur utanför kärnkraftsområdet. Energimyndigheten fick under 2023 ett regeringsuppdrag att utvärdera och stödja stresstester inom energisektorn.

I beskrivningen av syfte och mål inför detta projekt tydliggörs att projektet ska

- beskriva hur stresstester kan användas och upprätta en eller flera metoder för stresstest för dammanläggningar
- beskriva metoder som ska ge stöd för identifiering av rimliga kombinationer av händelser samt hur dessa kan beaktas ur ett dammsäkerhetsperspektiv
- höja kunskapen inom stresstester och erbjuda en eller flera metoder för att utvärdera dammsäkerhet för kombinationer av händelser.

Detta görs genom att

- inventera hur stresstest genomförs inom andra verksamheter och hur stresstest genomförs inom vattenkraft internationell
- ta fram en eller flera metoder för stresstest för dammanläggningar
- ta fram förslag på händelser och kombinationer av händelser att värdera.

## 2 Omvärldsanalys och litteraturstudie

Stresstest har använts för att analysera ett systems respons på hot och belastningar inom ett flertal områden. Dessa områden innefattar till exempel elförsörjning, hydrologiska frågor kopplade till klimatförändringar, belastning på kritisk infrastruktur och analyser av finansiella system.

Energimyndigheten fick under 2023 ett regeringsuppdrag att uppmuntra och stödja stresstester inom energisektorn<sup>1</sup>. Detta som ett led av det Europeiska rådets rekommendation om en unionsomfattande samordnad strategi i syfte att ge ökad motståndskraft för kritisk infrastruktur. Regeringsuppdraget tydliggör att:

*”Cybersäkerhetshot mot energisektorn bör inkluderas i de scenarier som stresstesterna behandlar. Stresstesterna bör syfta till att bedöma den kritiska infrastrukturens motståndskraft mot antagonistiska hot orsakade av människan.”*

Stresstest som begrepp kan även användas när till exempel en fysikalisk last appliceras på ett system eller komponent. Några exempel på detta är belastningstest av flygplansvingar eller flygplanskroppen. Begreppet används även inom medicin då det kan avse såväl psykisk stress som stresstest av det kardiologiska systemet, så kallad stressekardiografi, vilket genomförs för att undersöka hur hjärtat agerar under belastning.

I denna rapport har sammanställningen av erfarenheter från stresstest inom andra områden än vattenkraft fokuserat på stresstest genomförda för att analysera system.

### 2.1 KÄRNKRAFT

#### 2.1.1 Bakgrund till att genomföra stresstest för kärntekniska anläggningar

Den 11 mars 2011 inträffade en jordbävning och tsunami som ledde till en allvarlig kärnkraftsolycka i Fukushima, Japan. Kärnkraftverket Fukushima Daiichi, som hade sex reaktorblock, var konstruerat för att stå emot jordbävningar och flodvågor men inte flodvågor av den höjd som följde på jordbävningen den 11 mars 2011. Kärnkraftsolyckan klassades som en sju (stor olycka) på internationella INES skalan, samma klass som olyckan i Tjernobyl.

Efter händelserna i Japan beslutade EU att medlemsländerna skulle se över säkerheten vid kärntekniska anläggningar genom en omfattande bedömning av risk och säkerhet, så kallade stresstester. EU ansåg att kriterierna för bedömningarna skulle baseras på lärdomar från olyckan i Japan.

EU gav European Nuclear Safety Regulatory Group (ENSREG) i uppdrag att ta fram kriterier för stresstester i samarbete med medlemsländerna och expertorganisationer såsom Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) där SSM ingick. Vidare utarbetade WENRA ett förslag för omfattning

<sup>1</sup> Regeringskansliet. (2023). Uppdrag att uppmuntra och stödja genomförande av stresstester inom energisektorn. Hämtat från <https://www.regeringen.se/regeringsuppdrag/2023/04/uppdrag-att-uppmuntra-och-stodja-genomforande-av-stresstester-inom-energiesektorn/>

och inriktning av risk- och säkerhetsbedömningar (stresstester) som ENSREG sedan bearbetade till riktlinjer för stresstester av kärnkraftverk<sup>2</sup>.

Som första fas genomförde kärnkraftverksoperatörerna en självutvärdering, i fas två utvärderade de nationella tillsynsmyndigheter dessa självutvärderingar och utarbetade egna landrapporter. Regeringen gav strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) detta uppdrag för de svenska kärnkraftverken<sup>3,4</sup>. I fas tre analyserades dessa rapporter av multinationella team i en peer review process, organiserad av ENSREG, gruppen av nationella säkerhetsmyndigheter i alla 27 medlemsstater. 17 länder deltog fullt ut i stresstesterna (alla 14 EU länder med kärnkraftverk i drift, Litauen med en anläggning under avveckling, samt Ukraina och Schweiz).

En oberoende internationell grupp granskade samtliga länders resultat. Den oberoende internationella granskningen rekommenderade att genomföra utvärdering av marginaler och tröskeleffekter vid händelser som är värre än de förhållanden som beaktats inom de ursprungliga konstruktionsförutsättningarna. Tillsynsmyndigheterna rekommenderades att säkerställa att säkerhetsförbättringar för att förebygga olyckor och begränsa eventuella konsekvenser av extrema naturfenomen implementerades, exempelvis:

- mobil utrustning som klarar extrema naturfenomen
- beredskapscentraler skyddade mot extrema naturfenomen och kontamination
- personal och utrustning som snabbt kan finnas på plats och hantera långtidsförlopp.
- instrumentering och kommunikationsutrustning.

SSM förelade därefter respektive tillståndshavare att vidta åtgärder identifierade via säkerhetsutvärderingar eller annan relevant aktivitet och inarbeta erhållna erfarenheter från olyckan i Fukushima Daiichi.

### 2.1.2 Metod och tillvägagångssätt

ENSREG definierade stresstesterna enligt följande: Med målet att omvärdera säkerhetsmarginalerna för kärnkraftverken i ljuset av de händelser som inträffade i Fukushima: extrema naturhändelser som utmanar kärnkraftverkets säkerhetsfunktioner och kan leda till allvarlig olyckshantering<sup>2</sup>.

Tre typer av inledande händelser analyserades:

- översvämning
- jordbävning
- extrema väderförhållanden.

Två händelser postulerades med 72 timmars varaktighet samt kombinationen av dessa två händelser:

- bortfall av yttre nät och all reservkraft, ELAP
- bortfall av huvudvärmesänka, LUHS.

<sup>2</sup> Declaration of ENSREG - EU Stress Tests specifications, 31 maj 2011

<sup>3</sup> Uppdrag till Strålsäkerhetsmyndigheten om redovisning av den långsiktiga säkerhetsutvecklingen i den svenska kärnkraften, M2010/2046/Mk, 8 april 2010

<sup>4</sup> Kompletterande uppdrag till Strålsäkerhetsmyndigheten med anledning av händelserna i Japan, M2011/1946/Ke, 12 maj 2011

I stresstesterna undersöktes vad som händer om en mycket allvarlig jordbävning, översvämning eller annat extremt väderförhållande inträffar och därmed slår ut all elkraft och/eller kylning. Stresstesterna innebar således att genomföra utvärderingar av allvarligare förhållanden än de som antagits vid konstruktion av kärnkraftverken. Stresstesterna skulle belysa och utvärdera säkerhetsmarginaler och eventuella tröskeleffekter för att bedöma robustheten hos kärnkraftsanläggningarna samt identifiera behov av säkerhetsförbättringar och/eller behov av vidare analyser.

Metodsteg som ingick i stresstesterna:

- Utvärdering av responsen från kärnkraftverk när de står inför en rad olika extrema situationer orsakade av främst naturfenomen i kombination med de två postulerade händelserna, se ovan för grundantaganden och postulat.
- Systematisk genomgång och ifrågasättande av de redan existerande säkerhetsanalyserna för anläggningarna baserat på erfarenheterna efter olyckan i Fukushima.
- Identifiera säkerhetsmarginaler (se bilaga A för begreppet säkerhetsmarginal) och förbättringsområden då anläggningarna utsätts för extrema störningar utöver vad de ursprungligen konstruerades för. Detta genomfördes genom att stressa analyserna till dess att acceptanskriterier överskreds enligt analyserna. Arbetet bestod till stor del av kvalitativa bedömningar av typen "best estimate" genom expertbedömningar inom områdena.
- Identifiering av extrema väderförhållanden eller kombinationer av händelser som kan utmana reaktorsäkerheten. I bilaga B beskrivs kriterierna som används för att kunna screena bort händelser.

I stresstesterna ingick även att undersöka hur kärnkraftverkens haveriberedskap fungerar när en riktigt stor katastrof inträffar. I scenariot för haveriet antogs att flera reaktorer hade slagits ut samtidigt och att omgivningarna runt kärnkraftverken, exempelvis vägar och samhällen hade förstörts.

I stresstesterna ställdes inte särskilda krav på vad anläggningarna ska tåla. Följaktligen kunde anläggningarna inte "godkännas" eller "underkännas" i stresstesten. Däremot hade Strålsäkerhetsmyndigheten möjlighet att ställa krav på mer djupgående analyser inom vissa områden, eller kräva åtgärdsplaner, där tillståndshavaren redovisade hur de skulle arbeta för att höja säkerheten.

Därmed syftade stresstesterna till att vara en screeninganalys för att identifiera brister i anläggningarna som behövdes utredas eller analyseras ytterligare och eventuellt åtgärdas.

Bilaga C redovisar de utredningar som SSM förväntade sig av tillståndshavarnas stresstester. Nedan beskrivs under vilka förutsättningar de inledande händelserna och de postulerade händelserna analyserades i de svenska stresstesterna.

### **Jordbävning**

I analyser och i konstruktionsunderlag för de svenska kärnkraftverken tillämpas en dimensionerande jordbävning inom en radie på två mil från förlägningsplatsen, med en styrka som motsvarar storleksordningen 6 på Richterskalan och som har en sannolikhet uppskattad till 1 gång per 100 000 år (10-

<sup>5</sup>/år). För de konsekvenslindrande<sup>5</sup> systemen har emellertid en dimensionerande jordbävning tillämpats som är cirka fyra gånger starkare och har en sannolikhet uppskattad till 1 gång per 10 miljoner år ( $10^{-7}$ /år) använts. SSM beslutade att utvärderingen skulle genomföras mot den svårare jordbävningen (med en uppskattad sannolikhet på  $10^{-7}$ /år) för att verifiera komponenter, system och strukturer avsedda att förhindra radioaktiva utsläpp till omgivningen i samband med jordbävning. Dessutom skulle följdhändelser av jordbävning såsom brand och översvämning beaktas.

### **Extrema väderförhållanden inklusive översvämning**

Utvärderingar av extrema väderförhållanden utfördes genom att i enlighet med den ursprungliga specifikationen för stresstesterna, studera ökande laster utöver de nivåer som beaktats inom den ursprungliga konstruktionen och utformningen av anläggningen, dvs. stressa (t.ex. havsvattennivån) tills härdskada uppstår enligt analyserna.

### **Bortfall av el och huvudvärmesänka**

Utvärderingen specificerades till att analysera vad som händer om alla befintliga växelströmskällor och huvudvärmesänka, det vill säga havet, inte skulle vara tillgängligt i 72 timmar.

### **2.1.3 Resultat**

De generella förbättringar som snabbt initierades var bland annat följande:

- utvärdering av risk på grund av seismiskt inducerade översvämningar och bränder
- förstärkning av strukturer mot extrema väderfenomen
- förstärkning av översvämningsskydd, förstärkning av vallar
- implementering av backup för kylvattenförsörjning från extern mobil utrustning
- implementering av mobila dieselgeneratorer.

För de svenska kärnkraftverken genomfördes bland annat följande åtgärder:

- Utökad nyttjande av mobil utrustning, avtal, mm, för att förstärka befintliga funktioner.
- Utökad säkerhetsredovisning för externa händelser, långdragna förlopp och att alla block drabbas samtidigt.

Nedan är några exempel på resultatet av de genomförda och redovisade stresstesterna<sup>6</sup>.

För att kunna genomföra analyserna behövdes nya metoder utvecklas, till exempel kvalificerade "walk-downs"<sup>7</sup> som kan identifiera brister med avseende på jordbävning, översvämning och extrema väder, och säkerställa att dessa åtgärdas. Resultatet från "walk-downs" innebar förändringar av exempelvis förvaring av

<sup>5</sup> För att lindra konsekvenserna av allvarliga haveriscenarier har alla svenska kärnkraftverk kompletterats med konsekvenslindrande system med haverifilter, efter regeringsbeslut 1986.

<sup>6</sup> Strålsäkerhetsmyndigheten, Sammanfattning av säkerhetsutvärderingar (stresstester) av svenska kärntekniska anläggningar, SSM2010-1557-11, 2012-10-31

<sup>7</sup> En walk-down är en systematisk visuell inspektion av en anläggning eller ett system för att kontrollera dess status, funktion och säkerhet.

stationär och mobil utrustning som användas för att motverka händelser som inte beaktats inom den ursprungliga konstruktionen och utformningen av anläggningen, till exempel att mobil utrustning kommer att förvaras i förråd som tål extrema naturhändelser, såsom jordbävning, översvämning och extrem vind. Utrustningen är därmed säkerställd för att nyttjas som avsett i ett större antal händelser än tidigare, vilket är positivt för säkerheten.

För jordbävning var bedömning av SSM att kärnkraftverken inte kunde visa fullt ut att marginalerna till säker avställning var tillräcklig, detta resulterade i att tillståndshavarna utförde kompletterande fördjupade analyser som i sin tur resulterade i fysiska förstärkningar i anläggningen.

Säkerhetsutvärderingarna visade att kärnkraftsanläggningarna hade god tålighet mot de förhållanden som kan uppkomma vid anläggningarna till följd av olika extrema väder. Av säkerhetsutvärderingarna framkom emellertid att det finns ett antal områden som innehåller stora osäkerheter eller av annan anledning borde utredas vidare. Detta för att kunna identifiera ytterligare möjligheter att förstärka anläggningarnas skydd vid dessa händelser. Exempelvis sågs driftpersonalens instruktioner avseende åtgärder som behöver vidtas vid stora nederbördsmängder och extrema temperaturer över. Därutöver saknades djupare analyser av kombinationer av olika väderfenomen, såsom extremt snöfall i kombination med extrem vind. Likaså saknades utförliga analyser av bärigheten hos vissa tak för att säkerställa att de klarar de laster som kan uppkomma vid extrema snöfall. Vidare konstaterades att det saknades utförlig redovisning av hur kärnkraftsanläggningarna påverkas vid eventuella isstormar. De ingenjörsmässiga bedömningarna som gjordes var att en extrem isstorm kunde slå ut yttre nät och riskerade att täppa igen ventilationssystemen samt att tillträdet till förläggingsplatsen skulle bli begränsat.

För översvämning är de svenska kärnkraftverken dimensionerade för havsvattennivåer mellan 2 och 3 meter över medelvattenståndet. Alla anläggningar kan dock motstå en havsvattennivå på 3 meter över medelvattenstånd utan att risk för hårdskada föreligger. Denna nivå har en sannolikhet som tillståndshavarna hade uppskattat till 1 gång per 100 000 år ( $10^{-5}$ /år) baseras på statistik från SMHI och utnyttjande av extremvärdesteorier. SSM bedömde att dessa uppskattningar borde utvärderas vidare.

Effekter till följd av kombinationer av vågor och höga vattenstånd hade inte beaktats för alla anläggningar, vidare analyser behövdes därför genomföras för att beakta sådana kombinationer som även beaktade eventuella dynamiska laster.

En följd effekt av stresstesterna var att krav infördes enligt SSM:s beslut<sup>8</sup>, på en oberoende härdkylningsfunktion, som ska vara tålig mot extrema naturfenomen (inklusive jordbävning) med en återkomstfrekvens på ner till  $10^{-6}$ /år, oberoende mot befintliga system så långt som rimligt och möjligt och att funktionen ska klara sig utan ordinarie elförsörjning och värmesänka (havet) i minst 72 timmar utan extern hjälp.

---

<sup>8</sup> Strålsäkerhetsmyndigheten, Villkor för oberoende härdkylning för Ringhals 3, SSM2012-3023-16, 2014-12-15



### 2.1.4 Slutsatser

Huvudsyftet med stresstesterna var att bedöma säkerheten och robustheten hos kärnkraftverk i händelse av extrema naturhändelser, särskilt översvämningar och jordbävningar.

Resultaten av kärnkraftsstresstesterna:

- Säkerhetsnivåerna för kärnkraftverk i Europa är generellt höga och inget kärnkraftverk bör stängas av säkerhetsskäl.
- Ett behov av betydande och påtagliga förbättringar har identifierats för nästan alla kärnkraftverk.

Stresstesterna innebar att de gamla konstruktionsförutsättningarna ifrågasattes och förnyade analyser visade på att relativt enkla och billiga åtgärder kunde införas, till exempel genom att införskaffa och säkra mobil utrustning för elförsörjning, se till att instruktioner och resurser alltid finns för att kunna skotta tak innan rasrisk där säkerhetskritisk utrustning finns, säkra att det finns drivmedel och smörjmedel så att befintliga dieslar ska kunna klara sig utan extern hjälp i upp till en vecka, mm. Även analysansatsen att samtliga verk drabbas samtidigt gav nya insikter och resulterade i säkerhetsförbättringar. Dessa åtgärder kunde införas relativt snabbt och enkelt.

För att kunna möta upp alla krav från stresstesterna och uppfylla de fullt såsom Strålsäkerhetsmyndigheten preciserade dom år 2014 krävdes större ingrepp i anläggningarna genom införandet av en oberoende härdkylningsfunktion för samtliga svenska kärnkraftverk. Kravbilden för den oberoende härdkylningsfunktion är bland annat, tålighet mot alla extrema naturfenomen som skattas till en frekvens på  $10^{-6}$ /år eller högre, oberoende mot befintliga system så långt som rimligt och möjligt och att funktionen ska klara sig utan ordinarie elförsörjning och värmesänka (havet) i minst 72 timmar utan extern hjälp.

## 2.2 ELFÖRSÖRJNING

Den tyska statliga myndigheten Bundesnetzagentur som bland annat ansvarar för elnätsfrågor i Tyskland har använt stresstest<sup>9</sup> bland annat för att analysera hur olika osäkerheter inom elkraftsystemet kan påverka elnätets stabilitet.

2022 genomförde nätägarna i Tysklands en särskild analys av elnätets säkerhet inför vintern 2022/2023 baserat på försvårade externa förhållanden.

Bakgrunden var flera osäkerhetsfaktorer, inklusive torra under sommaren, låga vattenflöden, avstängda kärnkraftverk i Frankrike, och den allmänt ansträngda situationen på energimarknaderna efter den ryska invasionen av Ukraina. Syftet med testet var att undersöka olika scenarier och nätets förmåga att hantera dessa.

Testet fann att längre krissituationer i kraftsystemet var mycket osannolika under kommande vinter, men inte helt uteslutna. Därför rekommenderas ytterligare åtgärder för att förhindra att även dessa mycket osannolika scenarier leder till akut brist på leverans eller strömavbrott på grund av nätbelastningar.

<sup>9</sup> BMWK, Power system stress test, 2022

Vissa av åtgärdsförslagen som användningen av reservkraftverk, återinförandet av koleldade kraftverk, samt att två kärnkraftverk hölls i beredskap implementerades.

Myndigheten gör återkommande stresstest för att analysera aktuella händelser och dess inverkan på elkraftsystemet.

### 2.3 KRITISK INFRASTRUKTUR – EU PROJEKTET STREST

Med utgångspunkt från händelserna i Fukushima genomfördes ett program under den Europiska kommissionens 7:e forskningsprogram.

Nedan följer en redogörelse av projektets slutrapport. Beskrivningar och förklaringar är hämtade från STREST projektet, ingen värdering om hur projektet lyckats med sin målsättning görs därmed.

Programmet gick under benämningen STREST och avsåg att genomföra

- erfarenhetsåterföring från tidigare regelverk och forskningsprojekt
- riskbedömning av extrema händelser
- sårbarhetsanalyser av kritisk infrastruktur (exklusive kärnkraft<sup>10</sup>) samt analysera hur dessa klara extrema händelser
- utvecklandet av stresstest metodik och ramverk
- utvärdering av metodiken på representativa kritiska infrastrukturer inom Europa.

Det EU finansierade projektet STREST<sup>11</sup> hade som mål att

- etablera en gemensam och konsekvent taxonomi för kritisk infrastruktur (KI)
- utveckla en rigorös och konsekvent modelleringsmetod för bedömning av faror, sårbarheter, risker och resiliens för händelser av låg sannolikhet och hög konsekvens
- utforma ett ramverk för stresstest och specifika tillämpningar för att hantera sårbarhet, resiliens och interberoenden för kritisk infrastruktur.
- möjliggöra implementering av europeiska riktlinjer för ett systematiskt genomförande av stresstest.

STREST fokuserade på hot som jordbävningar, tsunamier, geotekniska effekter och översvämningar, och på tre huvudsakliga klasser av kritisk infrastruktur:

- Infrastrukturer bestående av enskilda anläggningar på ett begränsat område med hög risk.
- Infrastrukturer som är geografiskt utspridda eller utsträckta över ett större område med potentiellt hög ekonomisk och miljöpåverkan.
- Infrastrukturer som är geografiskt utspridda eller utsträckta över ett större område med låg individuell samhällspåverkan men stor gemensam samhällspåverkan eller samberoenden.

<sup>10</sup> Med kritisk infra struktur i för projektet STREST avses kritisk infrastruktur som inte omfattar kärnkrafttekniska anläggningar.

<sup>11</sup> STREST. (2016). Harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards.

STREST projektet testade och applicerade den utvecklade stresstestmetodiken på specifika anläggningar som var utvalda för att representera typiska anläggningar inom dess bransch.

### 2.3.1 Erfarenhetsåterföring upptagen i STREST rapporten

STREST fann att resultaten från tidigare stresstest av kärnkraftsanläggningar tydligt visar att särskild vikt måste ägnas åt återkommande säkerhetsöversyner inklusive en översyn och omprövning av anläggningens hot och lastsituationer.

Risk- och hotbildsanalys introduceras i vissa nationella bestämmelser, främst i samband med användning, lagring och transport av farliga ämnen och i flera länder även i förhållande till skyddet av kritisk infrastruktur.

Tidigare händelser har visat att konsekvenser från naturkatastrofer på kritisk infrastruktur kan omfatta hälsopåverkan och miljööförsämring till betydande ekonomiska förluster på grund av skador på tillgångar och avbrott i verksamheten. Vid jordbävningar, översvämningar och tsunamier finns risk för samtidiga påverkningar på en enskild infrastruktur, eller på flera infrastrukturer, över ett potentiellt stort område.

Tidigare händelser har också påvisat en betydande risk för kaskadverkningar, såsom frigörande och spridning av oönskade ämnen samt minskning av produktion på grund av påverkan hos leverantörer. Antingen på grund av påverkan i råvarutillgång eller på grund av att produkter inte kan levereras när stora transportnätverk påverkas av händelsen.

### 2.3.2 Riskbedömning av extrema händelser

En process utvecklades för att säkerställa en tillförlitlig hantering av den kunskapsosäkerhet (epistemisk osäkerhet) som kan uppkomma inom en stresstest. Modellen tar hänsyn till den variationen av åsikter och expertutlåtanden inom området, budgetbegränsningar och regelverkets påverkan.

En stor del av detta arbete fokuserade på hot kopplade till seismisk aktivitet och tsunamis. Flera tillvägagångssätt togs fram för platsspecifik probabilistisk seismisk riskbedömning. Resultaten från tillämpningen användes sedan för att formulera rekommendationer för ett optimalt tillvägagångssätt beroende på tillgänglig information.

En metod för platsspecifik bedömning av tsunamifara utvecklades för att inkluderas i stresstesterna. För tillämpningen i ett specifikt område har fullständiga simuleringar genomförts med hjälp av händelsesträd.

Probabilistiska scenarier bestående av kombinerade hot, där händelser uppstår från flera samverkande faror, genererades för tre olika fall. Ett av dessa fall var sannolikhetspåverkan av olika hot, vilket beaktades vid analysen av en vattenkraftsdamm. Detta gjordes för att belysa hur en inträffad jordbävning påverkar sannolikheten för uppkomst av andra hot, som översvämningar, inre erosion, fel på damm och grundläggning, utskov med mera.

### 2.3.3 Sårbarhetsanalyser av kritisk infrastruktur

För enskilda kritiska infrastrukturer utvecklades standardiserade metoder för bestämning av hot och konsekvensanalys av petrokemiska anläggningar, dammar och hamnar. Strukturella sårbarheter analyserades för alla riskelement (lagringstankar, ledningar för oljeindustrin; grundläggning och diverse system i dammar; samt byggnader och kranar i hamnar) och definierades med avseende på hot från jordbävningar, tsunamis och översvämning.

På liknande sätt tillhandahölls verktyg som till exempel sårbarhetskurvor, modeller för respons och sårbarhetsanalys för de tre geografiskt utspridda kritiska infrastrukturerna som ingick i projektet. Interberoenden i hamnen i Thessaloniki undersöktes med målet att utveckla ett koncept för faktorer som påverkar motståndskraften hos geografiskt utspridda kritiska infrastrukturer och att definiera stresstester på regional nivå som tar hänsyn till konsekvenserna av kaskadhändelser.

### 2.3.4 Utvecklandet av stresstest metodik och ramverk

Det riskbaserade stresstestet, ST@STREST, som utvecklades och tillämpades i projektet syftade till att förbättra processerna för utvärdering av riskexponering för kritisk infrastruktur mot naturkatastrofer. För att ta hänsyn till olika typer av infrastrukturer, potentiella konsekvenser av fel, typ av faror och tillgängliga resurser för att genomföra stresstestet, karakteriseras varje stresstestnivå av olika omfattning och olika komplexitet i riskanalysen.

Arbetet delas upp i fyra faser.

1. I förberedelsefasen samlas data in om den kritiska infrastrukturen samt dess hotbild. Därefter definieras mål, tidsram, lämplig nivå samt budget för stresstestet.
2. I bedömningsfasen jämförs designkrav för olika komponenter och delsystem med tillgänglig informationen om dess nuvarande kapacitet och funktion. Därefter genomförs en systematisk probabilistisk riskanalys av hela den kritiska infrastrukturen.
3. I beslutsfasen jämförs resultaten från bedömningsfasen med de mål som definierats i förberedelsefasen. Denna jämförelse resulterar i en bedömning om den totala risken är oförsvarbar eller oacceptabel samt hur mycket säkerheten för infrastrukturen bör förbättras. Kritiska händelser som orsakar överskridande av acceptabla konsekvenser identifieras genom en resultatanalys. Riskhanteringsåtgärder och riktlinjer formuleras.
4. I rapportfasen presenteras resultaten från stresstestet för myndigheter och reglerande organ. Presentationen inkluderar resultatet av stresstestet i form av riskbedömningen, de kritiska händelserna, förslag på riskhanteringsåtgärder och noggrannheten för de metoder som använts i stresstestet.

De det finns många olika typer av kritisk infrastruktur (exklusive kärnkraftsanläggningar) och då de potentiella konsekvenserna av fel, typ av hotbild och tillgängliga resurser för att genomföra stresstester kan variera ansågs det inte optimalt att kräva den mest allmänna formen av stresstest för alla möjliga situationer. Därför föreslogs tre varianter av stresstester.

Nivå 1: Analys av förmågan att hantera en händelse bestående av ett inträffat hot där kontroll görs på komponentnivå.

Nivå 2: Analys av systemets förmåga att hantera en händelse bestående av ett inträffat hot.

Nivå 3: Analys av systemets förmåga att hantera olika händelser bestående av flera hot som kan samverka.

Även inom dessa nivåer kan olika implementeringar väljas. Till exempel kan kvantifiering av epistemisk osäkerhet väljas att inte utföras (undernivå a) eller, om den genomförs, baseras på antingen bedömningar från en enda expert (undernivå b) eller flera experter (undernivå c).

### 2.3.5 Utvärdering av metodiken på representativa kritiska infrastrukturer inom Europa.

För att utveckla och testa metoden samarbetade STREST med infrastrukturägare och tillämpade STREST metoden på sex pilotplatser som ansågs vara representativa för tre olika klasser av kritiska infrastrukturer

- A. Kritiska infrastrukturer på en geografiskt avgränsad yta med hög risk och potential för höga lokal- samt regionala eller globala konsekvenser.
- B. Kritiska infrastrukturer på flera platser eller som täcker stora områden med potentiellt hög ekonomisk och miljömässig påverkan
- C. Kritiska infrastrukturer på flera platser eller som täcker stora områden med låg individuell påverkan men stor kollektiv påverkan.

Följande infrastrukturer analyserades.

- ENI/Kuwait oljeraffinaderi och petrokemisk anläggning, Milazzo, Italien
- Vattenkraftsdamm i Valaisregionen i Schweiz
- Baku-Tbilisi-Ceyhan-pipeline, Turkiet
- Gasunie nationellt gaslagrings- och distributionsnätverk, Nederländerna
- Hamninfrastrukturer i Thessaloniki, Grekland
- Industriområde i regionen Toscana, Italien

Stresstest av olika djup och omfattning genomfördes för de olika infrastrukturerna.

För anläggningar enligt klass A analyserades en vattenkraftsdamm och ett oljeraffinaderi.

För ett konceptuellt dammsystem bestämdes sårbarhets- och sannolikhetsfunktioner för hot och delsystems integritet. Inträffande av hot och tillgänglighet för anläggningens delsystem simulerades med Monte Carlo simulering och resultatet gav en inblick i återkomsttider för kritiska händelser och dammhaverier. Analysen fokuserade även på nedströmskonsekvenserna för eventuellt dammhaveriet. Metoden är mer utförligt beskriven i kapitel 5.

En kvantitativ riskbedömning av oljeraffinaderiet påverkan från jordbävningar och tsunamis genomfördes. I analysen framkom att tsunamier skadade ett begränsat antal lagringstankar längs strandlinjen, medan jordbävningar ökade frekvensen av skador på samma lagringstankar. Samhällsriskerna orsakades dock främst av skador på LPG-tankar, dessa skadades allvarligt framförallt på grund av andra

orsaker än naturfenomen. Påverkan från de naturliga farorna var därmed begränsad.

För anläggningar i klass B analyserades en oljepipeline, ett distributionsnätverk av naturgas samt en hamnanläggning.

Stresstestet av oljepipeline analyserade rörbrott i fem olika kopplingsnoder av ledningssystemet. Med hjälp av analysen identifierades de tre mest kritiska noderna. En föreslagen ändringen av vinkeln vid noden minskade sannolikheten för rörbrott och den övergripande risken blev försumbar.

Stresstestet för en delmängd av Groningen naturgasfält i Nederländerna genomfördes med en riskbaserad metod för individuella stationer och rörsegment, samt med en fullständig probabilistisk riskanalys med Monte Carlo-simuleringar för nätverksanalysen. Jordbävningar var det huvudsakliga hotet. Resultaten från stresstestet visar låg risk för omfattande förlust av kapacitet.

Tillämpningen på hamnanläggningen gav varierande resultat beroende på seismiskt scenario, analysmetod och krav på hanterbar risknivå. Flera eldistributionsstationer, som slogs ut i hög grad, bidrog betydligt till förlusten av hamnens prestanda. Detta på grund av utebliven strömförsörjning till hamnens kranar. Som riskhanteringsåtgärd föreslogs uppgradering och/eller att dessa förses med reservkraft.

### 2.3.6 Sammanfattning STREST projektet

STREST har utvecklat riskmodeller som kan ingå i stresstester av kritisk infrastruktur för att hantera analyser med extrema händelser med fokus på stora jordbävningar, översvämningar och kaskadeffekter.

Projektet utvecklade också sårbarhetsfunktioner för komponenter i petrokemiska anläggningar, dammar, hamnar, gas- och oljedistributionsnät och vanliga industribyggnader med avseende på jordbävningar, översvämningar och tsunamier, och visade hur dessa komponentsårbarheter kan integreras på systemnivå.

Den riskbaserade metodik som utvecklades av STREST syftar till att förbättra utvärderingen av riskexponeringen för kritisk infrastruktur mot naturkatastrofer.

Varje nivå av stresstest omfattar olika komplexitet i riskanalysen. Resultatet av ett stresstest för kritisk infrastruktur är en bedömning som indikerar var anläggningens risk förhåller sig till förutbestämda riskacceptanskriterier.

## 2.4 STRESSTEST INOM ANDRA OMRÅDEN

### 2.4.1 Stresstest inom finansmarknaden

Inom finansmarknaden används stresstest för att bedöma de ekonomiska systemens förmåga att hantera systemets motståndskraft mot olika typer av belastningar<sup>12, 13</sup>.

<sup>12</sup> Finansinspektionen. (2022). Makrobaserade stresstest av svenska banker.

<sup>13</sup> <https://www.bankingsupervision.europa.eu/banking/tasks/stresstests/html/index.sv.html>

Testen görs för att simulera hur väl de finansiella systemen klarar av att hantera extrema händelser och scenarion. Syftet med stresstest inom finansmarknaden är att identifiera risker och sårbarheter, det ger också tillsynsmyndigheter<sup>14</sup> en möjlighet att bedöma om finansinstituten har tillräckligt med kapital och resurser för att hantera extrema belastningar. I stresstesten analyseras olika risker, som t.ex. likviditetsrisk<sup>15</sup>, olika kreditrisker<sup>16</sup> samt marknadsrisk<sup>17</sup>. Stresstesten används för att värdera hur systemet hanterar särskilda händelser som ekonomiska nedgångar eller större förluster inom tillgångar i specifika områden.

## 2.5 VATTENKRAFT

Ett flertal rapporter redovisar genomförda stresstest inom vattenkraft. Med undantag från tidigare nämnda STREST projektet, vilket redovisar en metod för att analysera dammsäkerhet genom stresstest, redovisar resterande rapporter och källor att stresstest genomförts för att

- utvärdera investeringar ur ett klimat- och lönsamhetsperspektiv<sup>18, 19</sup>
- säkerställa god tillgång till kostnadseffektiv och förnybar elkraft<sup>20</sup>
- analysera klimatologiska, ekonomiska och säkerhetsmässiga perspektiv.<sup>21, 22</sup>

STREST projektet är den enda referens som identifierats där stresstest genomförts i syfte att utvärdera dammsäkerhet. I det redovisade arbetet med STREST projektet har inte någon hänvisning hittats till andra referenser där stresstest genomförts inom vattenkraft i syfte att utvärdera dammsäkerhet.

<sup>14</sup> <https://www.fi.se/sv/publicerat/nyheter/2022/makrobaserade-stresstester-av-svenska-banker-resultat-och-metod-hosten-2022/>

<sup>15</sup> <https://www.fi.se/contentassets/462d9db1b7914f308c7ff429898bfd5f/fi-analys-37-stresstester-fonders-likviditetsrisker2.pdf>

<sup>16</sup> <https://www.fi.se/sv/publicerat/rapporter/fi-analys/2020/fi-analys-24-stresstest-av-bankernas-utlaning-till-fastighetsforetag/>

<sup>17</sup> <https://www.fi.se/contentassets/bf16d9cb3fdc4b26acabc4d687343670/marknadsrisker.pdf>

<sup>18</sup> IHA. (2019). Climate Resilience Guide. Hämtat från [https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/5fa7e38ce92a9c6b44e63414\\_hydropower\\_sector\\_climate\\_resilience\\_guide.pdf](https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/5fa7e38ce92a9c6b44e63414_hydropower_sector_climate_resilience_guide.pdf)

<sup>19</sup> World Bank Group. (2022). HYDROPOWER AND DAMS - Strengthening Climate-Informed Project Design. World Bank. Hämtat från <https://documents1.worldbank.org/curated/en/926391632392943578/pdf/Hydropower-and-Dams-H-and-D-Strengthening-Climate-Informed-Project-Design.pdf>

<sup>20</sup> USBR; US Army Corps of engineers; U.S. Department of Energy. (2021). MEMORANDUM OF UNDERSTANDING FOR FEDERAL HYDROPOWER. Hämtat från <https://www.usbr.gov/power/mou-action-plan-2020.pdf>

<sup>21</sup> IHA. (u.d.). Assessment of climate resilient hydropower. Hämtat från [https://unfccc.int/files/cooperation\\_and\\_support/financial\\_mechanism/standing\\_committee/application/pdf/climate\\_resilience\\_unfcc\\_scf\\_session\\_7\\_sept\\_2017.pdf](https://unfccc.int/files/cooperation_and_support/financial_mechanism/standing_committee/application/pdf/climate_resilience_unfcc_scf_session_7_sept_2017.pdf)

<sup>22</sup> Bourgin, P.-Y., & Le-Clerc, S. (u.d.). A pragmatic approach to assess the climate resilience of hydro projects.



### 3 Definition

Även om en entydig definition av stresstester tycks saknas finns stora likheter i hur stresstester genomförs inom flertalet områden. Stresstester omfattar ofta en grundlig analys av ett systems stabilitet och förmåga att hantera störningar och hot. Det innebär ofta att systemets respons bedöms för situationer och kombinationshändelser där systemet belastas utanför sina normala konstruktionsförutsättningar, ofta till den punkt att systemet havererar. Syftet kan variera och omfattar flera områden som att bestämma tröskeeffekter, säkra driftområden, identifiera systemets felmoder eller för att analysera systemets förmåga att hantera laster och kombinationer av laster utanför dess normala drifttillstånd. Nedan listas ett urval av begrepp eller termer som använts i de definitioner eller beskrivningar som gjorts för stresstest inom ett antal olika områden:

- omprövning av säkerhetsmarginaler
- extrema naturfenomen som belastar anläggning och leder till allvarlig skada
- systematisk utvärdering av anläggningsrespons för förhållanden värre än normal belastning
- testa sårbarhet och resiliens
- verifiera säkerhet och risk för enskilda komponenter samt hela system.

I samma rapporter eller metoder har syfte och mål beskrivits som att

- utvärdera säkerhet och robusthet
- identifiera förhållanden som leder till ej accepterbar förmåga relativt fördefinierade nivåer
- ge förståelse för sannolikhet att systemet belastas utanför dess ramar.

I vissa fall (STREST) har stor ansträngning lagts för att bedöma konsekvenser och samhällsinverkan av systemets haveri, i andra fall (kärnkraftens stresstest) har konsekvensanalysen helt uteblivit. Utifrån ett svenskt vattenkraftperspektiv är konsekvenserna ofta relativt väl utredda. Detta i kombination med projektbeskrivningens fokus i att stresstest ska användas för dammsäkerhetsanalys har konsekvensanalysen inte tagits med i stresstest arbetet.

Inom svenskt dammsäkerhetsarbete används ett flertal analysmetoder för att utvärdera säkerheten för en dammanläggning. Arbetet med att ta fram en metod för stresstest för dammanläggningar har delvis utgått utifrån dessa befintliga analysmetoder och denna del av arbetet syftar till att beskriva hur dessa metoder kan användas som underlag eller förarbete i stresstest. Den tydligaste skillnaden mellan stresstest och nuvarande analysmetoder bedöms vara att stresstesten

- syftar till att bedöma anläggningens säkerhetsmarginaler, till skillnad mot nuvarande analysmetoder som i vissa fall binärt svarar på om anläggningen klarar ett särskilda lastfall
- syftar till att ge förslag och analysera lastkombinationer, till skillnad mot nuvarande analysmetoder som i vissa fall primärt fokuserar på anläggningens förmåga att hantera en särskild dimensionerande last eller händelse.

Med utgångspunkt av resonemanget ovan definieras för detta Energiforskningsprojekt stresstest för dammanläggningar som:

*En metod för att analysera anläggningens respons och bedöma dess resiliens och säkerhetsmarginaler mot kombinationer av tillstånd, händelser, faror och förhållanden.*

Med *bedömning* avses identifiering, analys och värdering.

Med *resiliens* avses anläggningens motståndskraft, uthållighet och förmåga till återhämtning.

*Säkerhetsmarginal* definieras för detta projekt i eget stycke, se avsnitt 3.1 nedan.

Med *tillstånd* avses ett system eller objekts skick, beskaffenhet, kondition, status med mera.<sup>23</sup>

Med *händelse* avses uppkomst av ett tillstånd eller en handling.<sup>24</sup>

Med *förhållande* avses samspel mellan de viktiga faktorerna i ett visst sammanhang; betraktande faktorernas inbördes inverkan på varandra etc.

### 3.1 SÄKERHETSMARGINAL

I detta arbete kan begreppet säkerhetsmarginal användas för den marginal en anläggning har innan allvarlig skada eller haveri uppstår för ett givet scenario. För att bestämma detta måste projektet först bestämma gränsvärden där anläggningen bedöms vara säker från allvarlig skada. Dessa gränsvärden kan till exempel vara magasinivåer<sup>25</sup>, i vissa fall i kombinerat med överdämningstider<sup>26</sup>, kritiska nedströmsvattenytor<sup>27</sup> samt kritiska avbördningsvärden<sup>28</sup>. Ett viktigt gränsvärde är säker dämningnivå. Säker dämningnivå relaterar till dammens förmåga att dämna och motstå vattenlast och avser här den nivå som, baserat på andra analyser (stabilitetsberäkningar, bedömning av risk för inre erosion etc.) bedöms att vattennivån kan stiga till utan att dammens säkerhet äventyras. Överskridande av dessa gränsvärden resulterar i att dammanläggningen inte längre anses ha tillfredställande säkerhet.

Att bestämma dessa gränsvärden är inte alltid trivialt. Det kan dels finnas osäkerheter i bestämmandet av vissa värden utifrån osäkert kunskapsläge antingen av anläggningens beskaffenhet eller i kvantifiering av de fysikaliska processerna. Om dessa gränsvärden ska vara baserad på RIDAS rekommendationer, teoretiska gränsvärden för när funktionen inte klarar ytterligare belastning utan strukturell kollaps eller utifrån en av dammägaren fastslagen accepterbar risknivå måste bestämmas utifrån varje dammägares dammsäkerhetskriterier.

Med hjälp av framtagna resultatvärden och beslutade gränsvärden kan säkerhetsmarginalen beräknas. Till exempel beräknas säkerhetsmarginalen för

<sup>23</sup> Energiföretagen. (2020). RIDAS Terminologi.

<sup>24</sup> SEK Svensk Elstandard. (2011). Tillförlitlighet – Metoder för tillförlitlighetsanalys – Händelseträdsanalys (ETA).

<sup>25</sup> För stabilitet betongdammar med avseende på upptryck, eller med avseende på frågeställningar runt fyllningsdammar där tidsaspekten inte påverkar

<sup>26</sup> För erosionsförlopp av fyllningsdammar som utvecklas över tid och inte sker momentant. T.ex. erosion föranlett av överströmning

<sup>27</sup> Stabilitet fyllningsdamm eller betongdamm med avseende på höga nedströmsvattenytor och försämrad glidstabilitet.

<sup>28</sup> Flöden då exempelvis energiomvandlingen inte är tillfyllest vilket i sin tur resulterar i kritisk erosion i till exempel nedströmsslänt.

drivgodsigensättning i ett givet scenario som den ytterligare drivgodsigensättning som anläggningen kunnat hantera i aktuellt scenario utan att något gränsvärde (magasinsnivå eller kritisk överdämningstid) överskridits.

Säkerhetsmarginal kan därmed bestämmas i ett flertal olika storheter, några exemplifieras nedan där säkerhetsmarginalen kan uttryckas som:

- magasinnivåmarginal - genom avstånd från kulminerande vattennivå till säker dämningnivå samt mätt i tid i relation till säker överdämningstid
- flöde – bland annat genom skillnad i scenariots flöde och det flöde som hade föranlett att säker dämningnivå och/eller dämningstid överskridits
- ytterligare drivgodsigensättning - den drivgodsigensättningsgrad som anläggningen kunnat hantera i ett givet scenario utan att magasinsnivå för scenariots flöde föranleder högre magasinsnivåer eller överdämningstider än fastslagna säkra nivåer
- marginal i inställelsetid - den tid en driftgrupp kunnat försenats utan att scenariot lett till magasinsnivåer högre än säker dämningnivå.

När stresstest genomförts inom andra områden används begrepp som cliff edge-effekt eller tröskeleffekt. Begreppet tröskeleffekt används inte i denna rapport men kan tolkas som den effekt som inträffar när en säkerhetsmarginal är noll.

## 4 Metod för stresstest

Inom ramen för detta energiforskningsprojekt har tre metoder för stresstest identifierats. Detta har gjorts utifrån tidigare redovisad omvärldsanalys samt med utgångspunkt från redan nu etablerade arbetsmetoder för utvärdering av dammsäkerhet. De tre metoderna är av olika komplexitet, de kräver i sin tur olika nivåer av förarbete och levererar således även resultat med varierande komplexitet. Metoderna är:

1. probabilistisk metod
2. scenariobaserade stresstester
3. scenariostyrt stresstest med modellerad anläggningsrespons.

### 4.1 METOD 1. PROBABILISTISK METOD - ÖVERSIKTLIG BESKRIVNING

Metod 1 bygger på att genomföra en fullskalig simulering och bedömning av en anläggnings hot, respons och konsekvenser. Denna metod används i EU projektet STREST och har inom det arbetet applicerats på en vattenkraftsanläggning. Metoden är mycket arbetskrävande och ställer höga krav på förarbete och förberedande analyser.

Resultatet från metoden ger en sammanställning av vilka hot, eller kombinationer av hot som är allvarligast för anläggningen. Resultatet visar även återkomsttider för haverier och scenarion som allvarligt hotar anläggningen. I det europeiska projektet kvantifierades även konsekvenser och frekvens för skador på samhälle och förlust av människoliv kunde därmed bestämmas.

Fördelar:

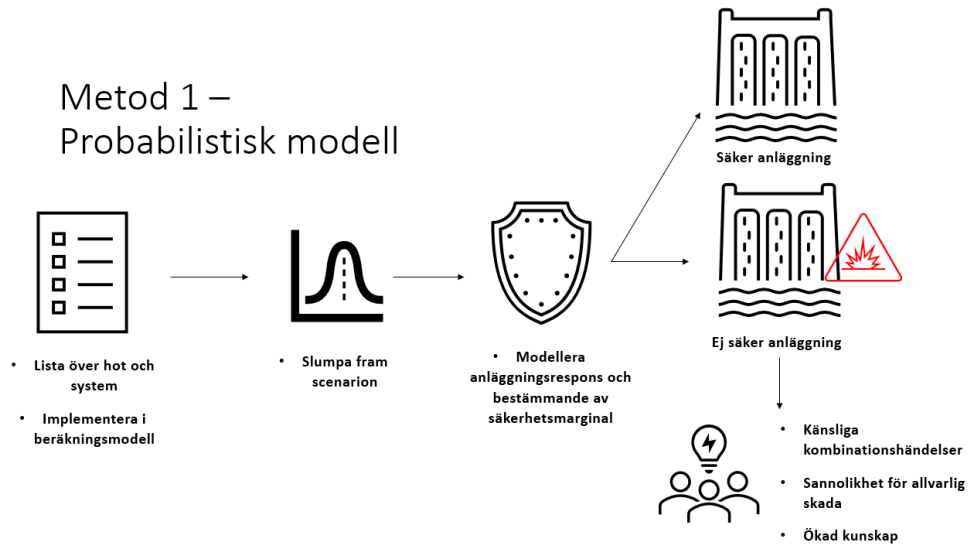
- Metoden kan ge en mycket hög förståelse för hur anläggningen belastas och hanterar olika hot och kombinationshändelser.
- Metoden ger statistiskt underlag och återkomstfrekvenser för kombinationshändelser som leder till allvarlig skada.
- Metoden kräver inte att något förarbete görs i syfte att analysera/identifiera de mest kritiska hot eller kombinationshändelserna.
- Resultatet är mycket informationsrikt med sammanställningar av sannolikheter och återkomsttider för hot, kombinationshändelser och haverier.

Nackdelar:

- Metoden kräver ett mycket omfattande och komplext förarbete. Det system som ska analysera såväl belastningar som anläggningsrespons är komplext och tidskrävande att definiera.
- Vissa ingångsvärden till metoden som t.ex. frekvenskurvor för olika incidenter kan vara mycket osäkra och svåra att fastställa, vilket får en direkt inverkan på kvaliteten i metodens resultat. Ett exempel på detta är förloppet inre erosion där det enligt STREST34 saknas tillförlitlig metod för att bestämma frekvensfunktion för förloppet. Istället tas frekvensfunktionen fram genom en expertbedömning. Osäkerheten i denna och övriga bedömningar av frekvenser får en direkt koppling till resultatets tillförlitlighet.

- Modellen ger framräknade sannolikheter och frekvenser för dammhaveri. Dessa är dock ytterst beroende av sannolikhet och frekvensfördelning för ingående hot och kombinationshändelser, vilka i sin tur är förknippade med stora osäkerheter/svårigheter att bedöma.

Metoden beskrivs mer utförligt i kapitel 5.



Figur 4-1 Schematisk vy över metod 1

## 4.2 METOD 2. SCENARIOBASERADE STRESSTESTER – ÖVERSIKTLIG BESKRIVNING

Metod 2 tar avstamp i befintliga arbetsmetoder som används inom dammsäkerhetsarbetet. Med utgångspunkt från dessa görs vidare analyser för att erhålla ett resultat i linje med tidigare beskrivna definition för stresstest. Till skillnad mot metod 1 görs i metod 2 ingen fullskalig simulering av hot, kombinationshändelser och anläggningsrespons. I stället görs en inledande dammsäkerhetsanalys i syfte att identifiera de mest kritiska scenarierna.

Anläggningens förmåga att hantera dessa scenarion bedöms under en workshopliknande arbetsform. För att kunna utvärdera anläggningens säkerhetsmarginaler behöver scenarioanalysen även justera det enskilda scenariots påverkansfaktorer till den grad att anläggningen havererar.

Metoden 2 är även den som är mest lik den metod som användes inom kärnkraften som en följd av olyckan i Fukushima.

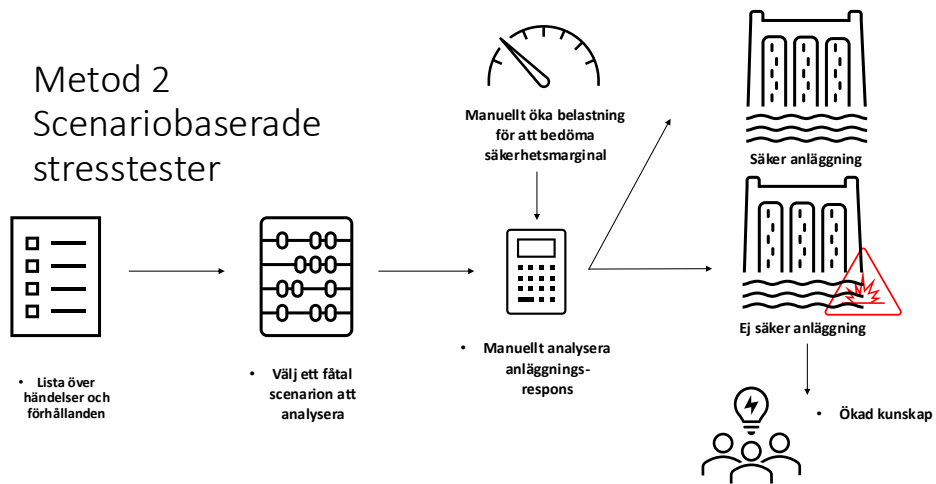
Fördelar:

- Det förberedande arbetet med identifiering av kritiska scenarion ger en god förståelse för anläggningens hot och belastningssituation.
- Det arbete som krävs för att sätta upp system och modell är begränsat.
- Metodens workshopliknande arbetsform gör att de individer som genomför scenarioanalysen får en god förståelse för anläggningens respons och möjlighet att hantera olika scenarion.
- Det kan vara enkelt att i scenarioanalysen göra utvecklingar för respektive scenario med olika variationer och samberoenden utan att dessa behöver beskrivas i en avancerad modell.

Nackdelar

- Det kan vara svårt att på förhand bestämma vilka scenarion som utmanar anläggningen mest.
- Resultatet som ges har ingen koppling till frekvens för inträffande och hjälper inte anläggningsägaren att identifiera vilka scenarion som utmanar anläggningen mest.
- Extra arbete krävs under scenarioanalysen för att utreda anläggningens säkerhetsmarginal.
- Metoden är arbetskrävande om ett stort antal scenarion ska analyseras.

Metoden beskrivs mer utförligt i kapitel 6.



Figur 4-2 Schematisk vy över metod 2



### 4.3 METOD 3. SCENARIOSTYRT STRESSTEST MED MODELLERAD ANLÄGGNINGSRSPONS – ÖVERSIKTLIG BESKRIVNING

Metod 3 innebär att en stor, men förutbestämd, mängd hot och kombinationshändelser analyseras för anläggningen. Anläggningsresponsen simuleras i en modell. Genererat resultat är en stor resultatmatris.

Metod 3 syftar till att erhålla fördelarna från metod 1 där ett stort antal scenarion kan utvärderas, men till skillnad mot metod 1 sätts inga svårbestämda frekvens- eller sannolikhetsfunktioner för systemets hot och händelser. Därigenom undviks några av de svårigheter som är förknippat med metod 1. Metod 3 har även likheter med metod 2 i aspekten att kombineringsen av händelser och scenarion görs manuellt innan analysen, men till skillnad från metod 2 görs här ingen manuell identifiering eller värdering av vilka scenarion som ska analyseras. Detta leder till att en av de största nackdelarna med metod 2 (svårigheten att identifiera de allvarligaste scenariona) undviks. I metod 3 görs analysen av anläggningsresponsen på motsvarande automatiserade sätt som i metod 1, vilket gör att nackdelen med tidskrävande manuell scenarioanalys från metod 2 undviks.

Fördelar:

- Anläggningsrespons för en stor mängd scenarion analyseras automatiskt. Ingen selektering av scenarion, eller bestämmande av sannolikhet/frekvenskurvor behöver göras.
- Resultatmatrisen ger en bra insikt i vilka hot och kombinationshändelser som hotar anläggningen.
- Det går effektivt att för en stor mängd scenarion utvärdera anläggningens respons och säkerhetsmarginal.

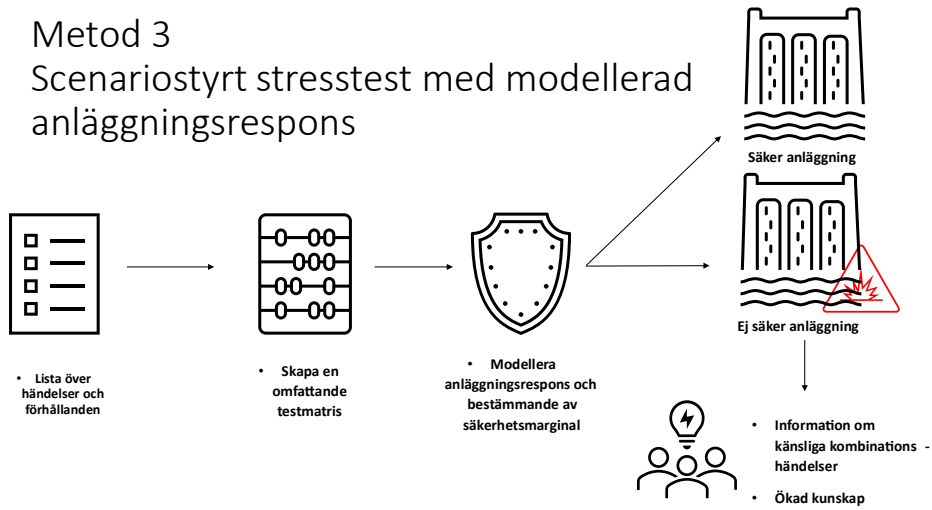
Nackdelar

- Resultatmatrisen blir omfattande och kräver en del bearbetning för att identifiera vilka scenarion och kombinationshändelser som är relevanta.
- Även om resultatmatrisen visar hur olika hot och kombinationshändelser leder till allvarlig skada och därigenom kunna redovisa hur stor andel av haverierna som innefattar t.ex. drivgodsscenarion fås ingen automatisk sannolikhet eller frekvensindikation för händelsen.

Metoden beskrivs mer utförligt i kapitel 7.

## Metod 3

## Scenariostyrt stresstest med modellerad anläggningsrespons



Figur 4-3 Schematisk vy över metod 3

#### 4.4 SAMMANSTÄLLNING METOD 1-3

I Tabell 4-1 ges en kort sammanställning över hur lastkombinering, modellering av anläggningsrespons samt resultatframställning sker för respektive metod.

Tabell 4-1 Tabell över metodernas ingående huvudmoment.

|         | Hot och last-kombinering | Modellering av anläggnings-respons | Resultat   |
|---------|--------------------------|------------------------------------|--|
| Metod 1 | Probabilistisk           | Automatisk                         | Frekvensfunktion för haveri och allvarliga incidenter.                                 |
| Metod 2 | Manuell*                 | Manuell                            | Händelseträäd och sammanställning av anläggningens förmåga att hantera valda scenarion |
| Metod 3 | Automatisk**             | Automatisk                         | Resultatmatris över samtliga analyserade lastkombinationer                             |

\* Utföraren bestämmer vilka hot och kombinationer som utvärderas

\*\* Samtliga definierade hot och händelser kombineras

## 5 Metod 1 - Probabilistisk metod

Den probabilistiska modell som används i STREST<sup>11</sup> projektet använder matematisk simulering för att generera såväl scenarion som anläggningens respons.

### 5.1 METOD 1 - BESKRIVNING AV DELSYSTEM

För den fullt probabilistiska modellen krävs en väl genomförd systemnedbrytning och beskrivning av anläggningen. Anläggningens tre huvudsystem, dämmande, avbördande och kontrollerande funktion måste beskrivas i modellen med tillhörande delsystem.

Respektive huvudsystem bryts ned i delsystem. Tillvägagångssättet i STREST resulterade i en systemnedbrytning enligt Figur 5-1/figur 5-2 nedan. I exemplet nedan har kraftstationen sorterats in under avbördande system. Observera att STREST projektet inte fullt ut modellerade dammanläggningens samtliga system och hot.



Figur 5-1 Systemnedbrytning för dammanläggningen i STREST projektet.

Anläggningens nedbrytning i huvud och delsystem är givetvis beroende på anläggningens utformning, men generellt måste de delsystem vars egenskaper kan påverka andra systems tillförlitlighet, kapacitet, funktion eller tillstånd inarbetas i modellen.

Modelleringsmässigt delades anläggningen vidare in i delsystemen<sup>29</sup>

- Magasin
- Damm och grundläggning
- Avbördningssystem
  - Ytutskov
  - Bottenutskov
  - Kraftstation

<sup>29</sup> Sid 51 STREST 3.5

- Nedströmsområde

Respektive delsystem tillskrevs olika funktioner och egenskaper.

Exempelvis hade magasinet en tillgänglig volym samt en målfunktion för magasinens nivå över året. Magasinet hade även en fördelningskurva över hur sannolikheten för höga tillrinningar varierar över året.

Dammen med dess grundläggning samt avbördningssystemet modellerades med olika sårbarhetsfunktioner för olika hot. T.ex. tillskrevs dammen en sårbarhetsfunktion som beskrev hur olika jordbävningssamplituder genererar skador på dammen.

Samma sårbarhetsfunktion togs fram för överströmning av fyllningsdammen. Vid t.ex. måttlig överströmning (överströmningsdjup maximalt 0,5 m) ansågs det med

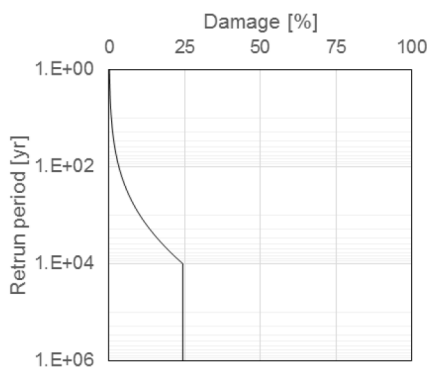
- 100 % sannolikhet generera 20 % skada på dammen
- 10 % sannolikhet generera 60 % skada.

Vid 50 % skada bedöms inte dammen ha kvar sin dämmande funktion.

Utskovsfunktionen modellerades med olika sårbarhetsfunktioner utifrån funktionens komplexitet. Det enklare överfallsutskovet hade endast sårbarhet från jordbävningshot. Det mer komplexa bottenutskovet kunde påverkas av såväl jordbävning som slumpvisa mekaniska fel. Exempelvis sattes återkomsttiden, se Figur 5-2, för slumpvisa mekaniska fel som

- 10 000 år för mekaniska fel om 25 % skadegrad
- 400 år för mekaniska fel om 10 % skadegrad.

Vid 10 % skadegrad ansågs inte bottenutskovet vara funktionsdugligt. Skadegraden bestämde även reparationstiden och således hur länge utskovet var otillgängligt.



Figur 5-2 Figur från STREST projektet om sannolikhet för olika skadegrader på utskovsfunktionen

## 5.2 METOD 1 - BESKRIVNING AV HOT OCH LASTKOMBINERING

Anläggningens hot beskrivs också i modellen. De hot som analyserades i STREST testet var:

- jordbävning

- höga flöden
- inre erosion
- fel i avbördningssystemet.

Utöver detta nämns även överrinning som ett hot, men detta hot modelleras inte på samma sätt som övriga fyra hot, utan uppkommer som en konsekvens av andra händelser.

Att man väljer att beskriva inre erosion som ett yttre hot förklaras med<sup>30</sup> svårigheten att förutse dessa, framför allt i äldre konstruktioner med begränsad övervakning.

Samtliga hot beskrivs med sannolikhetsfunktioner, där sannolikheten, eller frekvensen, för inträffande bestäms.

För jordbävningshotet bestämdes sannolikheten för inträffad jordbävning utifrån schweiziska riktlinjer<sup>31</sup>.

Sannolikhet för felfunktion i utskovspartiet baserades på observerade felfrekvenser för utskovsluckor<sup>32</sup>.

För höga flöden användes en Generaliserad extremvärdesfördelning (GEV)<sup>33</sup> för att beskriva maximalt inflöde, se Figur 5-3 – a. Det konstaterades att korrelationen mellan höga flöden och lång varaktighet historiskt var låg, tillrinningsseriens längd bestämdes därmed oberoende av tillrinningens storlek. Istället bestämdes sannolikheten för olika varaktigheter för flödessekvensen genom analys av ett liknande avrinningsområdes flödeshistorik, se Figur 5-3 – b. En normaliserad hydrograf bestämdes, se Figur 5-3 – c, vilken kunde skalas både i varaktighet och tillrinning. Hänsyn togs även till att sannolikheten för höga flöden varierar över året, se Figur 5-3 – d.

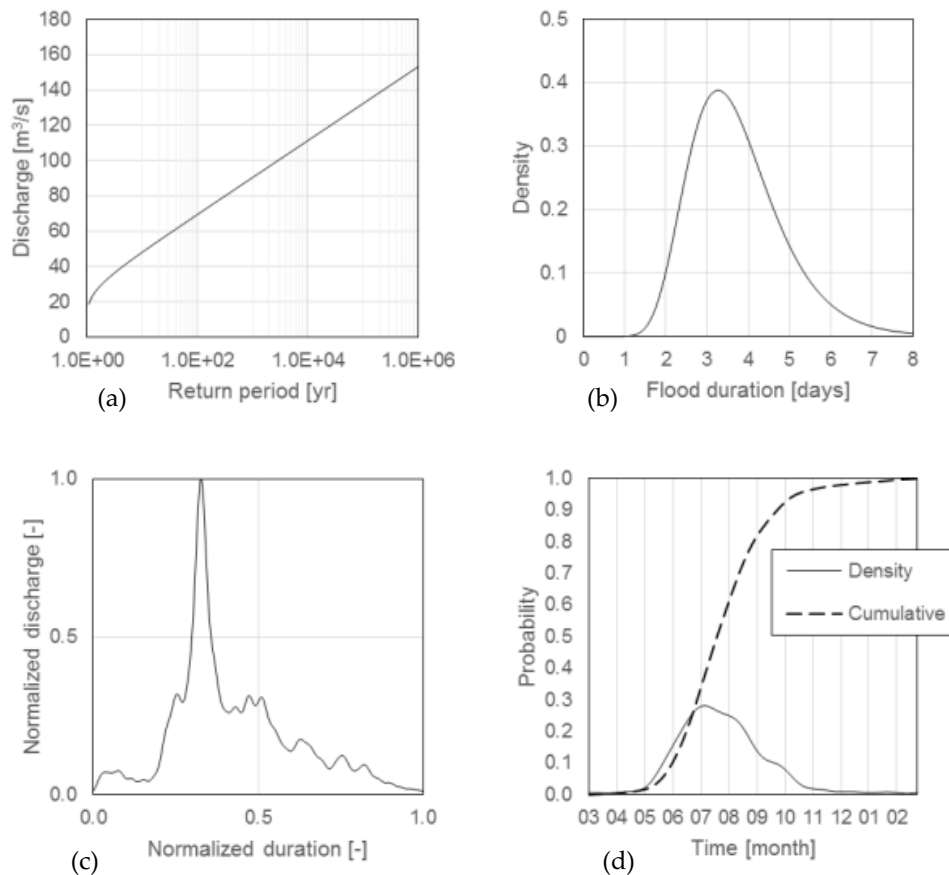
---

<sup>30</sup> Sid 55, STREST 3.5

<sup>31</sup> Sid 57, STREST 3.5

<sup>32</sup> Pohl, Failure frequency of gates and valves at dams and weirs. International Journal on Hydropower & Dams(6):77-81

<sup>33</sup> Sid 59, STREST 3.5



Figur 5-3 Figur från STREST projektet.  
 (a) Återkomsttider för olika tillrinningar.  
 (b) Sannolikhetsfördelning för olika varaktigheter.  
 (c) Normaliserad tillrinnings och varaktighetshydrograf.  
 (d) Sannolikhetsfunktion för högflödestidpunkt.

För andra hot som bland annat inre erosion bestämdes sannolikhetsfunktioner Figur 5-4 genom en expertbedömning<sup>34</sup> med utgångspunkt i att anläggningen hade en hög säkerhet mot inre erosion samt hade byggts och underhållits med modern teknik. Expertbedömningen resulterade i användandet av en lognormalfördelning för inre erosion och den kumulativa lognormalfördelningen visas i Figur 5-4.

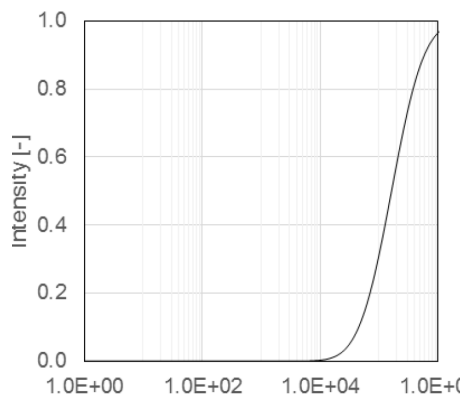
Det konstaterades att inre erosion har en progressiv utveckling och att vidare undersökningar krävs kring hur det ska modelleras. I det aktuella fallet antogs skadegraden vara proportionell mot intensiteten<sup>35 36</sup>.

<sup>34</sup> Sid 60, STREST 3.5

<sup>35</sup> Sid 61, STREST 3.5

<sup>36</sup> Sid 72, STREST 4.1





Figur 5-4 Figur från STREST projektet med kumulativ lognormalfördelning som beskriver inre erosion.

### 5.3 METOD 1 - BESKRIVNING AV SYSTEMTILLSTÅND

Damm och avbördningssystemet modellerades med systemtillstånd där systemets integritet avgjorde vilket tillstånd systemet befann sig i. För dammen antogs den ha en kritisk skada vid integritet 50-70 %, samt att den inte längre hade dämmande funktion under 50 % integritet.

Avbördningssystemet bedömdes inte ha avbördande funktion vid integritet lägre än:

- 90 % för bottenutskovet
- 85 % för överfallsytutskovet
- 50 % för kraftstationen.

Magasinet modellerades med olika systemtillstånd utifrån fyllningsgrad. De olika delsystemens tillstånd påverkade sannolikheten för att vissa hot uppkommer, samt hur systemet hanterar dessa. Delsystemens tillstånd kunde även påverka driftinstruktioner, exempelvis initierades neddragning av magasinet vid integritet

- under 70 % för dammen och dess grundläggning, samt
- under 85 % för ytutskovet.

### 5.4 METOD 1 - KRAV PÅ FÖRARBETE OCH UNDERLAG

Arbetet med att genomföra stresstest enligt metod 1 kräver ett stort förarbete. Förarbetet kan delas in två delar.

Den första delen handlar om att sätta upp ett modelleringsverktyg som på ett korrekt och tillräckligt noggrant vis klarar av att bestämma sannolikhet och återkomsttider för olika hot och händelser. Denna del är komplex och kräver viss tankemöda, framförallt då denna metod kräver att korrelation och/eller beroende mellan olika funktioner definieras (d.v.s. att det finns en koppling mellan olika hot och händelser som t.ex. att en jordbävning kan påverka sannolikheten för uppkomst av inre erosion).

Den andra delen av förarbetet inriktas på att ta fram en beräkningsmodell som simulerar anläggningens respons givet uppkomna hot och händelser. I STREST projektet påverkas anläggningsresponsen av de uppkomna hoten, samt driftinstruktioner som till exempel neddragning av magasin. Anläggningen

påverkas också av att utslagna funktioner, som exempelvis utskovsluckor, kan repareras och återgå i drift efter en viss tid.

## 5.5 METOD 1 - KRAV PÅ UTFÖRANDE

Genomförandet av metod 1 är relativt automatiskt då en stor del av arbetet görs i förarbetet. Den simuleringsmodell som tagits fram simulerar långa tidsserier vilket krävs för att få händelser med låga frekvenser att inträffa och samverka. Beräkningen bör vara beräkningstung och kräva relativt stor datorkapacitet, detta framgår dock inte av rapporterna från STREST projektet.

## 5.6 METOD 1 - FÖRVÄNTAT RESULTAT OCH VIDARE ARBETE

Resultatet från metod 1 är dels en sammanställning över vilka scenarion som utgör det största hotet mot anläggningen. Utifrån denna sammanställning kan en metaanalys göras där olika hot och händelsers påverkansgrad identifieras. Detta exemplifieras i Figur 5-5 där andel (antal) av dammhaverierna plottas utifrån återkomsttiden av jordbävning och inre erosion. Av figurerna kan man utläsa att utifrån dammhaverier påverkade av jordbävning var flest haverier orsakade av jordbävningar med en återkomsttid av ca 8 000 år. På samma sätt var inre erosionsförlopp med återkomsttid av 200 000 år den vanligast förekommande av dammhaverier påverkade av felmoden.

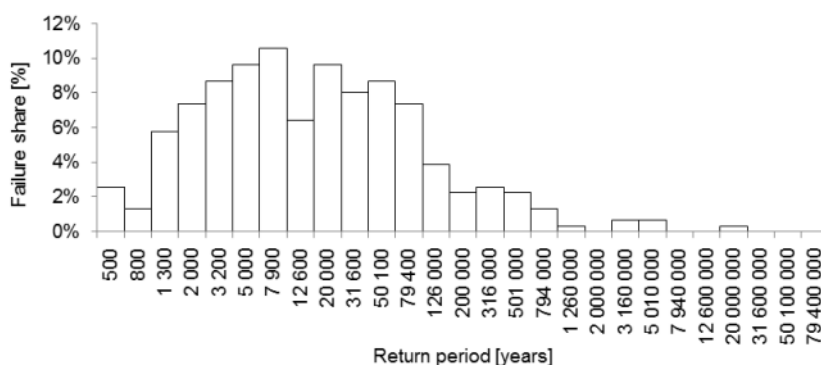


Fig. 3.43 Disaggregation of failures caused by earthquakes

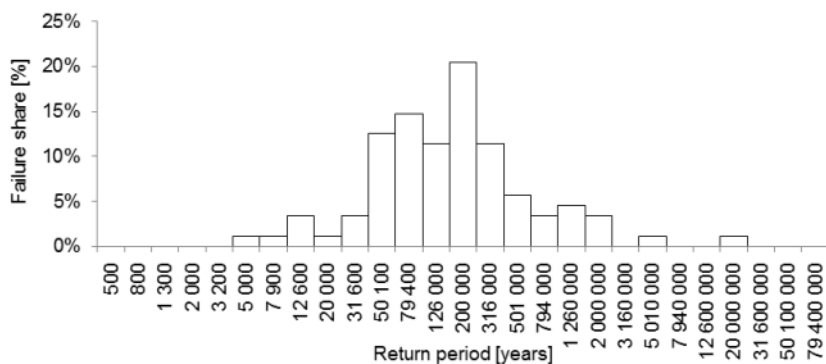
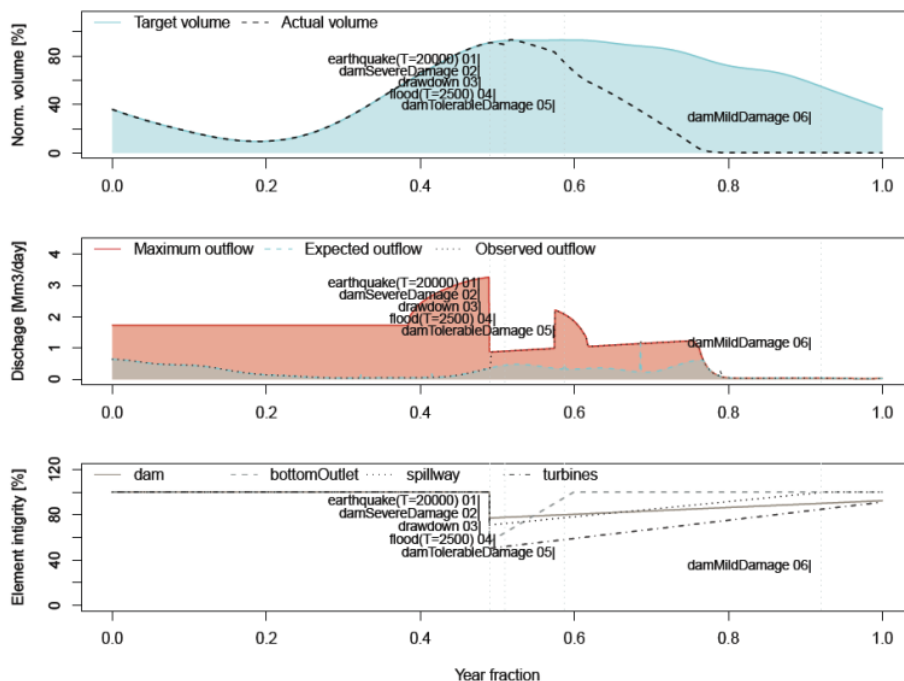


Fig. 3.44 Disaggregation of failures caused by internal erosion

Figur 5-5 Figur från STREST projektet där andelen av haverier analyseras mot återkomsttider för jordbävning och inre erosion.

Metoden ger även detaljerad insikt i respektive scenario. I Figur 5-6 redovisas hur scenariot förlupit samt hur anläggningen påverkats. Figuren visar magasinutvecklingen under scenariot, samt hur avbördning och hur skadegraden för de ingående systemen påverkats. Observera att i den nedersta delen av figuren ökar "integriteten" (integrity) på komponenterna på grund av den återhämtningsförmåga som modelleras i systemet.



**Results of a ST-L3 scenario based assessment. A 20 000 year earthquake occurs when the reservoir is full and is followed by a 2 500 year flood**

Figur 5-6 Figur från STREST projektet magasin nivå, avbördning, samt skadegrad (integritet) redovisas över scenariots tidsaxel.

För den som är mer intresserad av STREST projektet rekommenderas genomläsning av rapporterna

- D 2.2 - State-of-the-art in hazard and risk assessment of non-nuclear critical infrastructures
- D 3.5 - Report on cascading events and multi-hazard probabilistic scenarios
- D4.1. Guidelines for performance and consequences assessment of single-site, high-risk, non-nuclear critical infrastructures exposed to multiple natural hazards
- D 6.1 - Integrated report detailing analyses, results and proposed hierarchical set of stress tests for the six CIs covered in STREST.

## 6 Metod 2 - Scenariobaserade stresstester

I Metod 2 analyseras anläggningens respons kvalitativt för ett fåtal scenarion. De scenarion som analyseras tas fram genom brainstorming och med hjälp av checklistor. För dessa analyseras sedan anläggningens respons manuellt med enklare beräkningar av t.ex. magasinsrespons och beskrivningar av t.ex. driftgruppens förutsättningar. Anläggningens förmåga bedöms utifrån kvalitativa mått så som säkerhetsmarginal eller andra relevanta mått.

Framtagande av scenarion och analys av anläggningsrespons är likt arbetssätt med situationsanalys och brainstormingstekniker som ofta används för att identifiera felmoder och orsaks/verkansamband vid genomförande av DSU.

Genomförande av situationsanalys rekommenderades tidigare i RIDAS för beredskapsplanering. Från RIDAS 2012 framgår: *En noggrann situationsanalys över alla tänkbara/möjliga onormala situationer skall göras och ligga till grund för beredskapsplaneringen. I analysen skall även ingå sådana situationer som kan uppstå på grund av att anläggningsdelar inte fungerar på tillfredsställande sätt eller att funktionen bortfaller på grund av elbortfall eller avsaknad av reservkraft. [...] Situationsanalysen avser att vara en noggrann genomgång för varje anläggning med avseende på vad som kan inträffa och vad det kan innebära för risker. Genomförda tillståndskontroller av typ besiktning och FDU ger ett gott underlag för analysen med avseende på möjliga händelser och risker. Som ett led i situationsanalysen anges acceptabla gränsvärden såsom tillåtna normala läckage, tillgänglighet av utskov, tillåten överdämning m.m.*

Syftet med situationsanalys var i första hand att få fram underlag för beredskapsplanering och identifiera behov av specifika åtgärdsplaner. Detaljeringsnivån var därför mer övergripande än de mer noggranna orsaks- och verkansamband som behövs i en DSU (se vidare nedan).

Jämförelse mellan den definition av stresstest som ges i detta projekt och den metodik som beskrivs i RIDAS TV4 visar att det som görs vid riskidentifiering och riskanalys enligt TV4 kan anses uppfylla fetmarkerad text” *En metod för att analysera anläggningens respons och bedöma dess resiliens och säkerhetsmarginaler mot kombinationer av tillstånd, händelser, faror och förhållanden.*

Det som därmed skulle återstå är att analysera säkerhetsmarginaler, något som vanligen inte görs under/vid riskidentifiering och riskanalys.

Eftersom Metod 2 görs för ett fåtal scenarier är det viktigt att dessa scenarion är väl definierade och innefattar de händelser som kan ha störst påverkan på dammens säkerhet. Dessa scenarion är starkt beroende på anläggningens egenskaper och hotbild. Det går därmed inte att i förhand bestämma vilka scenarion som belastar anläggningen värst. Baserat på tidigare erfarenheter ges dock följande rekommendationer för val av scenarion och lastkombinationer att analysera

- För i stort sett samtliga anläggningar gäller att tillräcklig och tillgänglig avbördningsförmåga är kritisk, samt att förmågan att hantera drivgodis är viktig.

- För anläggningar med små magasin och snabb<sup>37</sup> stighastighet är störningar som inträffar vid normal drivvattenföring/utbyggnadsvattenföring och orsakar stationsbortfall ofta de mest kritiska. Det gör att utskovsluckor snabbt behöver öppnas och kräver att automatiska system fungerar, alternativt eller kombinerat med att personalen snabbt måste komma på plats.
- För anläggningar med medelstora magasin och medelsnabb<sup>38</sup> stighastighet kan störningar som inträffar vid normal drivvattenföring/utbyggnadsvattenföring vara kritiska, men mest troligt är det kombinationer av yttre hot så som storm/skogsbrand, stationsbortfall och svårigheter att nå anläggningen, eller problem med gemensamma system (t.ex. gemensamma spelhus) som kommer vara mest allvarligt.
- För anläggningar med stora magasin och långsam<sup>39</sup> stighastighet ger störningar vid utbyggnadsvattenföring vanligen liten påverkan. Yttre hot och kombinationer av yttre hot och störningar kan orsaka svårigheter, men är vanligen ej kritiska. Åtkomst och tillfart kan vara problematiskt då dessa anläggningar ofta är lokaliserade långt upp i avrinningsområdena. Allvarliga fel, eller fel som påverkar flera funktioner och som tar lång tid att åtgärda är ofta det som är mest kritiskt, t.ex. mekaniskt fel på luckor som gör att ordinarie och nöddrift ej går att köra. Vidare kan kombinationshändelser under extremt flöde (definierat som  $>Q_{100}$  enligt riktlinjer för flödesdimensionering<sup>40</sup>) orsaka problem vid anläggningen.

Arbetsättet som användes av kärnkraften var ett antal färdigdefinierade scenarion som dels syftade till analys av anläggningen i sig, men även för att möjliggöra screening. Samma tillvägagångssätt för vattenkraften skulle innebära analys för ett antal fördefinierade scenarion, men även att det kan finnas andra scenarion som anläggningen också bör analyseras för.

## 6.1 METOD 2 - BESKRIVNING AV DELSYSTEM

Utgångspunkten för testet är att analysera anläggningsrespons för ett antal fördefinierade scenarion. Orsaken till varför t.ex. lucköppning uteblir är därför inte intressant om scenariot identifierats som "utebliven lucköppning i en lucka".

I andra scenarion är däremot anläggningsförståelsen viktig, t.ex. för ett scenario med en storm av en viss omfattning under en viss tid där anläggningens och även organisationens respons blir viktig.

Beskrivning av system behöver därför göras på en nivå där det övergripande systemet beskrivs utifrån aspekter som:

- Tillfartsvägarnas längd, omgivning, nivå i förhållande till vattendrag, status över året (problem vid tjäle, snö osv).
- Yttre kraftnätets förutsättningar gällande påverkan från storm, träd, åska mm. Vilka inmatnings- och utmatningspunkter finns och vilka nät finns.

<sup>37</sup> överrinning inom ca 2-3h vid stationsbortfall

<sup>38</sup> överrinning inom ca 2-3h upp till ca 12-24h

<sup>39</sup> överrinning efter > 12-24h

<sup>40</sup> Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar, Svenska kraftnät, Energiföretagen, SweMin. 2022.

- Kommunikationsvägar mellan driftcentral och damm samt mellan driftcentral och beredskapspersonal (fjärrkommunikation, mobilkommunikation, RAKEL och liknande).

Dammens system beskrivs utifrån:

- Avbördningsförmåga för respektive utskov vid olika vattennivåer och igensättningsgrad.
- Övergripande systemuppbyggnad för kraftmatning. Varifrån kommer kraftmatning till dammen, finns gemensamma kabelvägar eller gemensamma inkopplingspunkter. För detta är det lämpligt att upprätta en skiss över det fysiska läget för olika delar.
- Identifiering av gemensamma system så som spelhus, motorer/aggregat, reservdrift, nöddrift, isfrihållning mm.
- Säker dämningnivå (se avsnitt 3.1).

Organisationen:

- Inställelsetid
- Andra anläggningar som gruppen ansvarar för, avstånd mm
- Instruktioner
- Relevanta driftstrategier

## 6.2 METOD 2 – BESKRIVNING AV HOT OCH LASTKOMBINERING

Som tidigare beskrivits föreslås fördefinierade scenarion som är möjliga att kontrollera anläggningsrespons för i syfte att förstå vilka säkerhetsmarginaler anläggningen har (se avsnitt 3.1).

De scenarion som föreslås för analys får en starthändelse och sedan byggs ytterligare händelser stegvis på. I något läge kommer situationen troligen bli sådan att säkerhetsmarginalerna är noll/uttömda.

Som nämnts tidigare är det svårt att identifiera de allvarligaste hot och lastkombinationerna för en anläggning, trots detta är det ofta vanligare att vissa scenarion utmanar anläggningen mer än andra. Av denna anledning ges här ett förslag på scenarion att analysera:

1. **Bortfall av kraftförsörjning.** Som start är det bortfall av det yttre nätet, för att sedan lägga på ytterligare omständigheter (ej fungerande reservkraft, personal som har lång tid att komma på plats/ej kan nås/ej fungerande nöddrift). Det intressanta utfallet är att titta på hur många olika fungerande redundanta system som måste felfungera, hur högt ytan stiger givet olika händelser. Det kan också vara av intresse att analysera faktiskt inställelsetid i förhållande till vilken tid som finns tillgänglig given händelse.
2. **Funktionsfel/igensättning utskovsluckor vid utbyggnadsvattenföring.** Olika fördefinierade nivåer av utebliven avbördningsförmåga analyseras. Det intressanta utfallet är att titta på hur högt ytan stiger givet olika igensättningsgrad. Vidare kan det vara av intresse att analysera hur hög igensättningsgrad som leder till att ytan stiger till osäker dämningnivå.

3. **Funktionsfel/igensättning utskovsluckor vid flöde med återkomsttid 100 år.** Som ovan men för högre flöde.
4. **Funktionsfel/igensättning utskovsluckor vid dimensionerande flöde.** Som ovan men för högre flöde.
5. **Storm.** En storm under en fördefinierad tid, och med viss fördefinierad påverkan på omgivningen. Stormen kan vara känd i tid, men kan även vara hastigt uppkommen (mer troligt svårare än förväntat), den kan även ha påverkan på kraftsystem. Det intressanta utfallet är att analysera vilken uthållighet anläggningen har och vilka åtgärder som kan tas för att öka denna uthållighet.
6. **Kommunikationsbortfall.** Driftcentralen tappar kommunikation med anläggningen. Vidare tappas eventuellt reservkommunikation och kraftförsörjning. Det kombineras även med förlängd inställetid och utebliven kommunikation med driftpersonal. Det intressanta utfallet är analysera om några åtgärder kan vidtagas för att öka anläggningens förmåga att autonomt hantera uppkomna situationer.
7. **Fullständigt kommunikationsbortfall.** Driftcentralen tappar kommunikation med samtliga anläggningar i kombination med ett allvarligt men inte extremt förlopp, t.ex. flöde med återkomsttid om 100 år. Även normala driftsituationer kan vara intressanta för analys. Det intressanta utfallet är att analysera hur driftgruppen klarar att bemanna ett flertal anläggningar under normala och onormala förhållanden.
8. **Utebliven vattennivåövervakning.** Här felfungerar peglar och driftcentralen har ingen aktuell bild av verklig vattennivå. Det intressanta utfallet är om automatiska säkerhetssystem leder till ökad säkerhet under vissa förutsättningar.
9. **Antagonistiska hot.** Den antagonistiska hotbilden behöver beskrivas för respektive anläggning och beror troligen på anläggningens läge, skalskydd, storlek mm. Antagonistiska hot kan inkludera avsiktlig eller oavsiktlig åverkan som skada på utrustning eller konstruktioner, brand, men även cybersäkerhetshot behöver beaktas.

Observera att det i ovanstående scenarion inte analyseras orsak till att en händelsekedja inträffar utan enbart anläggningens respons om det sker. Därmed analyseras inte det yttre nätets robusthet, eller utskovsluckornas status. Återkomsttid för den definierade stormen är inte bestämt. Funktionsfel eller igensättning har likartad påverkan på en lucka och därmed på anläggningsresponsen, även om orsakerna är vitt skilda. Orsak till utebliven kraftförsörjning definieras inte och kan därför innefatta stora nätstörningar, åska och andra väderrelaterade problem med mera. Scenarierna visas i avsnitt Bilaga D.

### 6.3 METOD 2 – BESKRIVNING AV SYSTEMTILLSTÅND

Utgångspunkten i denna metod är att analysera anläggningens känslighet givet ett visst scenario, men att inte titta i detalj på systemtillståndet. För scenarion där säkerhetsmarginalen är otillräcklig kan ytterligare analys behöva göras för att

bedöma status eller sannolikhet för uppkomst. Exempelvis om reservkraftssystemet är mycket viktigt så kan dess funktion behöva säkerställas särskilt.

#### **6.4 METOD 2 – KRAV PÅ FÖRARBETE OCH UNDERLAG**

Det förarbete som krävs är till stor del sådant som redan är känt och som vanligen inkluderas i en dammsäkerhetsutvärdering, eller som finns analyserat i tidigare situationsanalyser.

#### **6.5 METOD 2 – KRAV PÅ UTFÖRANDE**

Dammens säkra dämmningsnivå, samt övriga gränsvärden behöver definieras. Där det är svårt eller där informationen är otillräcklig föreslås att en mycket konservativ bedömning görs i ett första steg.

Analys görs för postulerade scenarion (se exempel i avsnitt 15 ) och arbetet består sedan i att analysera anläggningens säkerhetsmarginal för respektive scenario.

#### **6.6 METOD 2 – FÖRVÄNTAT RESULTAT OCH VIDARE ARBETE**

Metoden innebär standardiserade scenarion vilket gör det möjligt att jämföra olika anläggningar. På en övergripande nivå ger det överblick av olika anläggningar. På anläggningsnivå ger det information om anläggningens känslighet mot dessa fördefinierade scenarion. Det ger information om anläggningsrespons och möjlighet till vidare analys.

Eftersom det endast är ett fåtal scenarion som analyseras kan det finnas behov av ytterligare fördjupande eller utökade analyser. Utfallet från analyserade scenarier kan ge inspel till ytterligare scenarion att analysera.



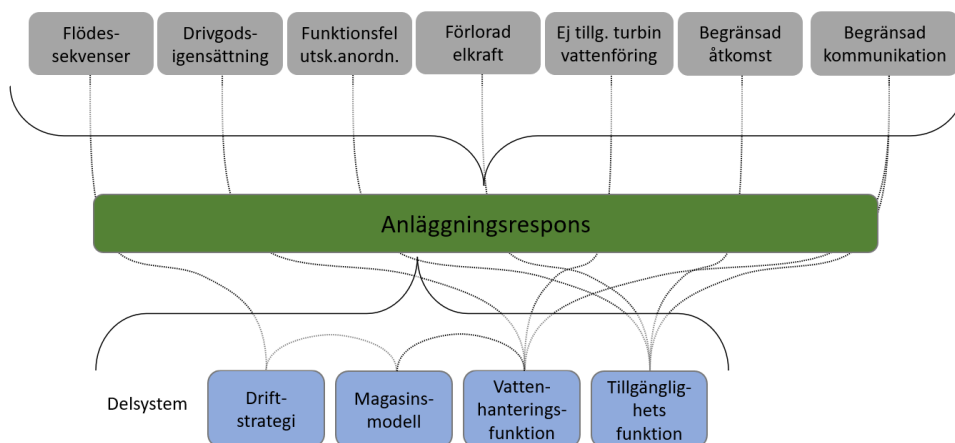
## 7 Metod 3 – Scenariostyrt stresstest med modellerad anläggningsrespons

För Metod 3 identifieras inledningsvis vilka hot, händelser och tillstånd som ska kombineras, exempel på dessa ges i kapitel 7.2. En testmatris skapas där dessa situationer kombineras till olika scenarion. En simuleringsmodell för anläggningen tas fram där anläggningens respons för de olika scenarierna kan simuleras. Resultatet för respektive scenario sparas i en resultatmatris. Med hjälp av resultatmatrisen kan såväl metaanalyser, samt ingående analyser av respektive scenarion genomföras.

### 7.1 METOD 3 – BESKRIVNING AV DELSYSTEM

För en väl fungerande metod är det avgörande att den simuleringsmodell som tas fram på ett tillräckligt noggrant sätt klarar av att modellera anläggningen i fråga. Modellen bör bestå av anläggningens viktigaste funktioner och kunna simulera utfallet av ett antal tidsupplösta händelser.

Tillstånd, händelser, faror och förhållanden belastar dammanläggningen och dess delsystem. För att modellera anläggningsrespons för detta krävs att anläggningens delsystem, inre och yttre hot, samt dessa tillstånd, händelser, faror och förhållanden på ett korrekt sätt representeras i en modell med tillräcklig upplösning och komplexitet. Tillstånd, händelser, faror och förhållanden kan påverka delsystem och dess förmåga att uppfylla sin funktion. Figur 7-1 illustrerar en förenklad bild hur olika händelser och anläggningens delsystem tillsammans påverkar anläggningsresponsen.



Figur 7-1 Systemlayout för simuleringsmodell

Det är viktigt att modellen tar hänsyn till att vissa objekt är beroende av särskilda förutsättningar i en tillgänglighetsfunktion. Exempelvis är både kraftstation och ordinarie matning av utskovsluckor ofta beroende av det yttre elnätets tillgänglighet. Om det yttre nätet faller bort vid en given tidpunkt bör modellen i tillräcklig grad ta hänsyn till detta i dels modellens vattenhanteringsfunktion genom en förlorad förmåga att förbileda vatten genom kraftstationen, dels genom att utskovsvattenföringen endast kan justeras om reservmanövreringssystemet är

tillgängligt. Om så anses vara nödvändigt kan även förändrad utskovsöppningstid modelleras.

Exempelvis bör nödmanövreringssystemet alltid vara inaktivt i det initiala skedet, på grund av att det definitionsmässigt<sup>41</sup> kräver förberedande arbete på plats, nödmanövreringssystemet kan således endast aktiveras efter att driftgruppen kontaktats, kunnat ta sig till anläggningen samt kunnat initiera och aktivera nödmanövreringssystemet.

De viktigaste delsystemen beskrivs i Tabell 7-1 Tabell 7-1, tabellen har sitt ursprung i RIDAS TV4 Bilaga C.

---

<sup>41</sup> RIDAS TV9 – Avbördande funktion maj 2021. "Nödmanövreringssystemet utgörs av utrustning som vid behov helt eller delvis monteras i syfte att ersätta utebliven funktion i ordinarie manövrerings-, reservermanövreringssystem samt överströmningskyddet."

Tabell 7-1 Beskrivning av delsystem och påverkansfaktorer

| Delsystem                                     | Påverkansfaktorer   | Behov att modellera för anläggningsrespons   |
|---|---|--|
| Kraftstation                                  | Möjlighet tillförbiledning av turbinvattenföring kan påverkas av drivgods, höga NVY:er, strömlöshet eller dylikt.   | Kraftstation modelleras så att både frånslag i enstaka aggregat, samt hela kraftstationen kan utvärderas.  |
| Utskovskanal/<br>skibord/<br>energiomvandlare | Kan påverkas av bland annat erosion, bergerosion eller andra skador på konstruktionen och leda till begränsningar i avbördningsfunktion.  | Kan modelleras på sådant sätt att begränsningar sätts i avbördningsfunktionen givet att system för upptäckt funnits tillgängligt.  |
| Utskovsluckor                                 | Kan påverkas av mekaniska fel, drivgods, is eller andra yttre hot som kan begränsa funktion och kapacitet.  | Utskovens mekaniska delar behöver modelleras med tillräcklig upplösning. I många fall kan det dock räcka med att fastslå att ett utskov är otillgängligt av antingen mekaniska eller elektriska skäl detta då avhjälpanse insatser, och erforderlig tid för dessa, är olika för felsätten. Testmatrisen bör omfatta funktionsfel i samtliga kombinationer av utskov.                                     |
| Kraftförsörjning                              | Kan påverkas av yttre omständigheter som anläggningsägaren inte råder över och som inte direkt har en koppling till anläggningen (storskaliga strömavbrott), men som även kan orsakas av skador uppkomna från andra händelser som har koppling till anläggningen och dess drift och tillstånd t.ex. skogsbrand (åtkomst), extrema flöden (vattenhantering), dammhaverier (drift/beredskap/åtkomst/vattenhantering). | Modelleras genom att antingen vara tillgängligt eller inte. Ej tillgänglig kraftförsörjning påverkar många delsystem, som i sin tur kan vara beroende av reservsystem för att fungera (kommunikation, vattennivåmätning, matning till luckmanövrering). Vid eventuellt frånfall kan även tiden som kraftförsörjning uteblir vara en aktuell parameter att variera, exempelvis 6, 12, 24 eller 48 timmar. |

| Delsystem                      | Påverkansfaktorer   | Behov att modellera för anläggningsrespons   |
|--------------------------------|---|--|
| Driftcentral/<br>kommunikation | Driftcentralens älv-övergripande funktion kan påverkas av antagonistiska hot, eller storskaliga störningar i kommunikation. För den enskilda kraftstationen kan kommunikation och styrning av anläggningen påverkas av väderfenomen som storm och skogsbrand vilket kan slå ut vissa kommunikationsvägar. | Fel i driftcentral kan påverka flera underliggande system. Exempelvis kan luckmanövrering endast ske lokalt, vattennivåmätningen är eventuellt inte tillgänglig för DC och endast lokalmanövrering samt nödmanövreringssystem är tillgängligt för vattenhantering.   |
| Reserv-<br>manövreringssystem  | Reservmanövreringssystemet träder in vid bortfall i de ordinarie elektriska delsystemen. Reservmanövreringssystemen kräver inte lokal närvaro för att aktiveras.  | Reservmanövreringssystemet är viktigt att modellera på ett korrekt sätt. Detta system behöver träda in vid inverkan på det ordinarie manövreringssystemet. Systemet består oftast av redundans i det elektriska delsystemet och träder in vid frånfall av ordinarie kraftmatning eller lokala fel i de elektriska systemen. Testmatrisen bör omfatta tillgängligt och otillgängligt reservmanövreringssystem i samtliga tillämpbara kombinationer av utskov. |
| Överströmningsskydd<br>(ÖSS)   | Överströmningsskyddet är det yttersta skyddet mot överströmning av dammen och är ett lokalt skyddssystem som automatiskt träder i kraft när ordinarie manövreringssystem av någon orsak inte fungerar som tänkt.  | Överströmningsskyddet behöver modelleras så att det dels ligger som ett autonomt system vilket träder i kraft oberoende av yttre funktioner som ordinarie vattennivåmätning och kommunikationsvägar. ÖSS måste dock modelleras så att det endast fungerar om de egna komponenterna (vattennivåmätning, kraftmatning till ÖSS) samt delade komponenter och delsystem (exempelvis ordinarie/reservkraftmatningssystem är tillgängliga).                        |

|                       |  |   |
|-----------------------|--|---|
| Nödmanövreringssystem | Nödmanövreringssystemet är ett lokalt system som vid behov helt eller delvis monteras i syfte att ersätta utebliven funktion i ordinarie och reservmanövreringssystem. | Nödmanövreringssystemet modelleras på sådant vis att det träder i funktion först efter att en driftgrupp kunnat kontaktas, dessa har kunnat ta sig till anläggningen, de har hunnit aktivera nödmanövreringssystemet och detta system har fungerat. |
| Tillfartsvägar        | Tillfartsvägarna är viktiga då detta påverkar åtkomst och inställetid för driftgrupper samt möjlighet att avhjälpa fel vid anläggningen.                               | Tillfartsvägar modelleras så att dess tillgänglighet kan påverkas av yttre faktorer som storm, skogsbrand. Tillfartsvägarna kan även behöva modelleras ur en tidsaspekt, så att avhjälpning inte nödvändigtvis uteblir, utan försenas.              |

## 7.2 METOD 3 – BESKRIVNING AV HOT OCH LASTKOMBINERING

Då metod 3 inte kräver någon större manuell arbetsinsats i varken analys av anläggningsrespons, eller i att besluta om sannolikhets- och frekvenskurvor för respektive hot och händelse behöver ingen omfattande begränsning göras i vilka händelser som tas med i hot och lastkombineringen. I stället kan en stor testmatris sättas upp där en stor mängd scenarion analyseras. Om denna matris tas fram genom att kombinera samtliga möjliga kombinationer av händelser och förhållanden blir matrisen mycket stor och kan innehålla många scenarier som är irrelevanta, som till exempel dimensionerande flöde med isproblematik. Förslagsvis begränsas testmatrisen till att bara innehålla fysiskt rimliga kombinationer.

Det är dock troligtvis lättare att selektera i resultatmatrisen snarare än att selektera i testmatrisen, när scenarier som ligger utanför förväntad förmåga ska analyseras. Få dammägare kräver att en anläggning ska klara dimensionerande flöde, med 50 % drivgodsigensättning, med funktionsfel i flera utskov och varken reservmanövreringssystem, nödmanövreringssystem eller överströmningsskydd tillgängliga. Selektionen av dessa fall görs troligtvis bäst i resultatmatrisen och i den metaanalys av denna som görs initialt i resultatredovisningen, se kapitel 7.6.

Tabell 7-2 har sin utgångspunkt i RIDAS TV4 Bilaga D samt E och kan fungera som inspiration över vilka hot och händelser som kan vara viktiga att implementera i modellen.

Tabell 7-2 Beskrivning av hot och laster som kan vara relevanta att modellera i ett stresstest och genomförbart enligt metod 3.

| Typ av hot                                 | Följdverkningar                        | Behov att modellera för anläggningsrespons  |
|--|--|---|
| <b>Hydrologiska och meteorologiska hot</b> |  |   |
| Höga flöden                                | Höga vattennivåer.                     | Tidsupplösta flödessituationer belastar anläggningen då den är belastad från övriga händelser. Flödena i sig är en del av scenario-beskrivningen och följer en förutbestämd tidsfunktion.   |
| Intensiva regn                             | Erosion och skred.                     | Intensiva regn kan leda till kraftigt ökade flöden och modelleras då enklast genom ett särskilt flödes-scenario. Skredutfall i magasinet modelleras som en tillfällig höjning av magasinsnivån.   |
| Extrem vind                                | Vågbildning, nedfallna träd, drivgods. | Extrem vind kan påverka såväl snedställning, vågor som drivgods. Beroende på hur modellen sätts upp modelleras dessa hot antingen direkt eller indirekt. Drivgods kan exempelvis modelleras genom reducering av utskovskapacitet, snedställning kan modelleras som en tillfällig förändring av magasinsnivån. |
| Åska                                       | Blixtnedslag, elfel, skogsbrand.       | Åska kan slå ut elförsörjning eller andra funktioner i anläggningen. I en icke probabilistisk modell behöver vanligtvis inte åskan modelleras i sig. Effekten av åskan modelleras genom att olika delsystem är utslagna i olika scenarion.  |
| Skogsbrand/<br>Storm                       | Åtkomst till anläggning, strömlöshet.  | På samma sätt som åska är kan skogsbrand hanteras som ett hot som modelleras indirekt. Den indirekta konsekvensen av skogsbrand, strömlöshet, åtkomstproblem, uthållighet med mera täcks av särskilda scenarion.  |

|  |   |  |
|--|---|--|
| Extrema temperaturer                                       | Isläggning, ispåväxt, kravis, frostsprängning, värmeutvidgning. | Modelleras i särskilda fall.   |
| Fel i kraftstation   | Förlorad avlednings/kommunikation/kraftförsörjningsförmåga.     | Olika fel i kraftstationen kan få olika effekter. Exempelvis påverkar fel i aggregat framförallt vattenhantering medan brand i kraftstationen kan påverka åtkomst, kommunikation och kraftförsörjning.   |
| Ras och skred i strandområden, nipor och branter           | Dämning och flytgods.   | Se intensiva regn.   |
| Storm  |   | Se Skogsbrand/storm.   |
| <b>Antagonistiska hot och pandemi.</b>                     |   |  |
| Brottslighet, vandalism, aktivism, terrorism, cyberangrepp | Skadegörelse, Inbrott, stöld, IT-intrång, hot mot personal.     | Det är viktigt att beakta brottslighet och antagonistiska hot i sitt stresstestarbete (se regeringsuppdrag i kapitel 2). Givet att modellen satts upp med samtliga möjliga kombinationer av systembortfall bör de flesta konsekvenser av antagonistiska hot täckas av redan modellerade systembortfall inom t.ex. kommunikation, kraftstation, utskov, reserv- och nödmanövreringssystem, driftgrupp och åtkomst.<br><br>Beaktandet av de antagonistiska hoten görs troligtvis enklast i analysen av resultattabellen där vissa kombinationer av händelser endast anses vara möjliga under antagonistisk påverkan. |
| Pandemi  | Brist på tillgång till personal.                                | Se resursbrist under Inre hot.   |
| <b>Inre hot</b>  |   |  |
| Fel i magasinövervakning.                                  | Felaktig eller brist på information.                            | Fel i magasinövervakningen kan modelleras på sådant sätt att exempelvis DC har en felaktig bild av anläggningen, medan en driftgrupp på plats, alternativt ett ÖSS kan antas upptäcka situationen.   |
| Resursbrist  | Brist på tillgång till personal.                                | En underbemannad, eller otillgänglig, driftgrupp kan få stor inverkan på skadeavhjälpande åtgärder. Detta modelleras antingen genom försenad inställelse eller ökad tid för felavhjälpning.  |

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Fel i larmhantering     | Utebliven larmhantering, aktivering av personal i beredskap, och uppföljning av larm. | Modelleras på samma sätt som resursbrist, försenad inställelsetid alternativt utebliven avhjälpanfunktion.   |
| Genomförande av projekt | Inverkan på dammanläggning med avseende på pågående projekt.                          | Begränsningar i drivvattenföring eller utskovsfunktion kan påverkas av pågående projekt. På samma sätt som för antagonistiska hot hanteras dessa troligtvis bäst i resultatanalysen där särskilda scenarier endast bedöms vara rimliga situationer med pågående projekt. |

För att redovisa hur en testmatris för metod 3 kan tänkas se ut redovisas i Figur 7-2 en förenklad version av en testmatris. Testmatrisen har endast 32 fall, men visar hur samtliga hot och händelser kombineras så att antalet fall blir  $2^x$  där  $x$  är antal hot/händelser (givet att det finns två utfall av händelsen). Respektive scenario analyseras sedan för 5 olika flöden.

| Benämning   | Beskrivning                             | Tillg. Fjärr.    | Tillg. fysisk åtkomst. | Tillg. Kraftstation. | Igensätt. drivgods | Tillg. utskov. |     |
|-------------|---|------------------|------------------------|----------------------|--------------------|----------------|-----|
| Scenario 1  |   | Fjärr = 1        | Fysisk åtkomst=1       | HPP = 1              | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 2  | N-1                                     |                  |                        |                      | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 3  | 25%,                                    |                  |                        |                      | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 4  | 25%, N-1                                |                  |                        | HPP = 0              | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 5  | HPP=0,                                  |                  |                        |                      | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 6  | HPP=0, N-1                              |                  |                        |                      | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 7  | HPP=0, 25%,                             |                  | Fysisk åtkomst=0       | HPP = 1              | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 8  | HPP=0, 25%, N-1                         |                  |                        |                      | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 9  | Åtkomst=0,                              |                  |                        |                      | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 10 | Åtkomst=0, N-1                          |                  |                        | drivgods 25%         | N-1                |                |     |
| Scenario 11 | Åtkomst=0, 25%,                         |                  |                        | HPP = 0              | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 12 | Åtkomst=0, 25%, N-1                     |                  |                        |                      | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 13 | Åtkomst=0, HPP=0,                       |                  | drivgods 00%           |                      | N-0                |                |     |
| Scenario 14 | Åtkomst=0, HPP=0, N-1                   |                  | Fjärr = 0              | Fysisk åtkomst=1     | HPP = 1            | drivgods 00%   | N-0 |
| Scenario 15 | Åtkomst=0, HPP=0, 25%,                  |                  |                        |                      |                    | drivgods 25%   | N-1 |
| Scenario 16 | Åtkomst=0, HPP=0, 25%, N-1              | HPP = 0          |                        |                      |                    | drivgods 00%   | N-0 |
| Scenario 17 | Ingen fjärr,                            |                  |                        |                      | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 18 | Ingen fjärr, N-1                        |                  |                        |                      | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 19 | Ingen fjärr, 25%,                       | HPP = 1          |                        |                      | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 20 | Ingen fjärr, 25%, N-1                   |                  |                        | drivgods 00%         | N-0                |                |     |
| Scenario 21 | Ingen fjärr, HPP=0,                     |                  |                        | drivgods 25%         | N-1                |                |     |
| Scenario 22 | Ingen fjärr, HPP=0, N-1                 | Fysisk åtkomst=0 |                        | HPP = 1              | drivgods 00%       | N-0            |     |
| Scenario 23 | Ingen fjärr, HPP=0, 25%,                |                  |                        |                      | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 24 | Ingen fjärr, HPP=0, 25%, N-1            |                  |                        |                      | HPP = 0            | drivgods 00%   | N-0 |
| Scenario 25 | Ingen fjärr, Åtkomst=0,                 |                  |                        | drivgods 25%         |                    | N-1            |     |
| Scenario 26 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, N-1             |                  |                        | drivgods 00%         |                    | N-0            |     |
| Scenario 27 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, 25%,            |                  |                        | HPP = 1              | drivgods 25%       | N-1            |     |
| Scenario 28 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, 25%, N-1        | drivgods 00%     |                        |                      | N-0                |                |     |
| Scenario 29 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0,          | HPP = 0          | drivgods 25%           |                      | N-1                |                |     |
| Scenario 30 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0, N-1      |                  | drivgods 00%           | N-0                  |                    |                |     |
| Scenario 31 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0, 25%,     |                  | drivgods 25%           | N-1                  |                    |                |     |
| Scenario 32 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0, 25%, N-1 |                  | drivgods 00%           | N-0                  |                    |                |     |



Figur 7-2 Exempel på enkel testmatris om endast 32 fall och en begränsad mängd hot och händelser

### 7.3 METOD 3 – BESKRIVNING AV SYSTEMTILLSTÅND

Anläggningens och dess delsystems tillstånd behöver beskrivas så att ett systems tillstånd kan påverka det egna, eller andra delsystems funktion eller förmåga. Exempelvis kan ett degraderat tillstånd i en energiomvandlare leda till en införd begränsning i avbördningskapacitet.

När anläggningens resiliens ska utvärderas är det viktigt att kunna modellera tidsaspekten för avhjälpande åtgärder. Denna tid kan vara svår att bestämma och kan således behöva vara en del av testmatrisen där olika tid för avhjälpande av särskilda fel modelleras som individuella scenarion. I mer avancerade analyser kan det tänkas att visa tillstånd inte bara är beroende av tid för avhjälpande insatser, utan även yttre förutsättningar som t.ex. låg magasinsnivå eller begränsad avbördning.

### 7.4 METOD 3 – KRAV PÅ FÖRARBETE OCH UNDERLAG

Metoden kräver att en avancerad modell tas fram för anläggningen. Modellen ska klara av att på ett detaljerat sätt beskriva anläggningsresponsen för ett stort antal scenarion med möjlighet till flertal samberoenden mellan olika delsystem. I modelleringen av anläggningsresponsen är metod 1 och metod 3 relativt lika. Metod 3 är dock något förenklad då denna den inte inkluderar sannolikhet för förekomst av händelser och inte heller inkluderar beroende mellan händelser och betingade sannolikheter (dvs att inträffandet av en händelse ökar sannolikheten för att andra händelser ska inträffa), vilket krävs i metod 1.

En stor del av den investerade tiden i att bygga en modell över anläggningen och dess respons återges i ökad kunskap om anläggningen. Anläggningens exakta utformning och samberoenden måste klargöras och implementeras, detta tar tid och är resurskrävande men ger en god förståelse för anläggningens egenskaper.

### 7.5 METOD 3 – KRAV PÅ UTFÖRANDE

Det analyserande arbetet görs automatiskt med simuleringsmodellen. Detta gör att det huvudsakliga arbetet för metod 3 koncentreras till att skapa en bra modell och att analysera resultatmatrisen.

### 7.6 METOD 3 – FÖRVÄNTAT RESULTAT OCH VIDARE ARBETE

En stor del av arbetet i genomförandet av metod 3 är att analysera och sortera beräkningsresultaten. På liknande sätt som i metod 1 kan resultatet analyseras i minst två olika nivåer. På den översta, metanivån, kan en övergripande analys av anläggningens förmåga att hantera olika scenarion göras.

I detta skeende kan det vara lämpligt att dela in sina scenarion i olika scenariokategorier. Dessa kategorier kan vara förknippade med olika kravställningar utifrån dammägarens dammsäkerhetspolicy. En indelningsprincip kan vara att dela in samtliga scenarion i scenariokategorierna 1-3, antagonistiska, samt exkluderade scenarion. För kategorier 1-3 kan det vara lämpligt att bestämma under vilka förutsättningar dammanläggningen ska klara dessa scenarion, detta

kan exempelvis vara att klara kategori 1 vid DG, kategori 2 med marginal till TK, medan kategori 3 exempelvis ska kunna klaras utan allvarlig skada på dammanläggningen. Detta arbete måste automatiseras vid stora resultatmatriser. Visualisering av indelning i kategorier redovisas i Figur 7-3.

Det kan även vara lämpligt att exkludera vissa scenarion. Detta kan exempelvis vara kombinationer av dimensionerande flöden med drivgods och omfattande funktionsfel i utskovsluckorna, men det kan även vara kombinationer som är orimliga av fysikaliska/ meteorologiska förhållanden. Vid exkluderingar av scenarier är det dock viktigt att först beakta om kombinationen är möjligt utifrån effekter av exempelvis antagonistiska hot, dessa scenarion kan då hänföras dit. I kategorin antagonistiska hot bör framförallt scenarion som kombinerar funktionsfel och otillgänglighet under i övrigt normala/yttre förhållanden hänföras.

Observera att visualiseringen i Figur 7-3 inte avser att exemplifiera vilka scenarion som bör hänföras till respektive kategori.

|             |   |                     |
|-------------|---|---------------------|
| Scenario 17 | Ingen fjärr,                            | Scenario kat. 1     |
| Scenario 18 | Ingen fjärr, N-1                        | Scenario kat. 2     |
| Scenario 19 | Ingen fjärr, 25%,                       | Scenario kat. 1     |
| Scenario 20 | Ingen fjärr, 25%, N-1                   | Scenario kat. 3     |
| Scenario 21 | Ingen fjärr, HPP=0,                     | Scenario kat. 1     |
| Scenario 22 | Ingen fjärr, HPP=0, N-1                 | Antagonistiskt hot  |
| Scenario 23 | Ingen fjärr, HPP=0, 25%,                | Scenario kat. 1     |
| Scenario 24 | Ingen fjärr, HPP=0, 25%, N-1            | Scenario kat. 3     |
| Scenario 25 | Ingen fjärr, Åtkomst=0,                 | Scenario kat. 1     |
| Scenario 26 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, N-1             | Scenario kat. 2     |
| Scenario 27 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, 25%,            | Scenario kat. 1     |
| Scenario 28 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, 25%, N-1        | Scenario kat. 3     |
| Scenario 29 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0,          | Scenario kat. 1     |
| Scenario 30 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0, N-1      | Antagonistiskt hot  |
| Scenario 31 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0, 25%,     | Scenario kat. 3     |
| Scenario 32 | Ingen fjärr, Åtkomst=0, HPP=0, 25%, N-1 | Exkluderat scenario |

Figur 7-3 Visualisering av hur scenarion delas in i olika klasser.

## 8 Test och fördjupad analys av metod 3

Då metod 3 innehåller en del arbetsmoment som var svåra att uppskatta under arbetet med rapporten beslutades att genomföra en fördjupad analys av metod 3. Den fördjupade analysen syftade till att

- utvärdera arbetsinsatsen med att ta fram en systembeskrivande modell
- undersöka möjlig storlek på testmatris
- analysera vilka delar av anläggningsrespons som kunde modelleras på ett effektivt sätt och undersöka hur resultatbearbetningen kunde göras.

### 8.1 FRAMTAGANDE AV SYSTEMBESKRIVANDE MODELL

För arbetet med den fördjupade analysen skapades en förenklad simuleringsmodell som testades på en fiktiv anläggning. En testmatris skapades som innehöll ungefär 30 000 scenarier som bestod av olika kombinationer av händelser och tillstånd.

Scenarierna i testmatrisen simulerades över en fiktiv tidsperiod om en vecka med tidssteget 1 h. Från simuleringarna erhöles en resultatmatris där bland annat högsta magasinnivå anges för varje scenario.

I bilaga E ges en detaljerad beskrivning av den fiktiva anläggningen samt analysmetod och resultat

Med hjälp av simuleringsmodellen är det möjligt att genomföra en fördjupad analys av varje enskilt scenario. Exempel på detta visas i avsnitt 8.2 och 8.3 nedan. Mer detaljerade beskrivningar av metoden och resultaten ges i bilaga E.

### 8.2 METAANALYS AV RESULTAT

För att visualisera hur en metaanalys av resultatet kan göras redovisas nedan utdrag ur en begränsad resultatmatris från en förenklad, fiktiv, anläggning. För metaanalys av den i den fördjupade studien framtagna resultatmatrisen, se Bilaga E.

Resultattabellen kan sorteras på respektive scenario, och redovisa högsta magasinsnivån för analyserade scenarion, en sådan resultattabell redovisas i Figur 8-2. Haverier indikeras i figuren genom värdet 999. Anläggningen antas vara säker till nivån 100,00 (säker dämningnivå). I detta fall kan det konstateras

- att anläggningen är säker upp till Q500 flöden för samtliga scenarion (inget scenario har högre magasinsnivå än den säkra nivån 100),
- att samtliga haverier inträffar under drivgodsbekastning eller N-1 scenarion.

| Magasinnivå för respektive scenario |                    |         |              |     | Q <sub>50</sub> | Q <sub>500</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>metod1</sub> |
|-------------------------------------|--------------------|---------|--------------|-----|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Fjärr = 0                           | Fysisk åtkomst = 1 | HPP = 1 | drivgods 00% | N-0 | 96              | 96               | 96                | 97                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 96              | 96               | 97                | 97                  |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 96              | 96               | 96                | 98                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 96              | 97               | 98                | 99                  |
|                                     |                    | HPP = 0 | drivgods 00% | N-0 | 96              | 96               | 96                | 96                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 97              | 97               | 100               | 100                 |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 97              | 98               | 98                | 99                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 97              | 99               | 99                | 100                 |
|                                     | Fysisk åtkomst = 0 | HPP = 1 | drivgods 00% | N-0 | 96              | 96               | 97                | 97                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 98              | 99               | 100               | 100                 |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 98              | 99               | 99                | 100                 |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
|                                     |                    | HPP = 0 | drivgods 00% | N-0 | 99              | 99               | 99                | 99                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 98              | 98               | 99                | 999                 |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 98              | 99               | 999               | 999                 |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
| Fjärr = 1                           | Fysisk åtkomst = 1 | HPP = 1 | drivgods 00% | N-0 | 96              | 96               | 96                | 97                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 96              | 96               | 97                | 97                  |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 96              | 96               | 96                | 98                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 96              | 97               | 98                | 99                  |
|                                     |                    | HPP = 0 | drivgods 00% | N-0 | 96              | 96               | 96                | 96                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 97              | 97               | 100               | 100                 |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 97              | 98               | 98                | 99                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 97              | 99               | 99                | 100                 |
|                                     | Fysisk åtkomst = 0 | HPP = 1 | drivgods 00% | N-0 | 96              | 96               | 97                | 97                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 98              | 99               | 100               | 100                 |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 98              | 99               | 99                | 100                 |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
|                                     |                    | HPP = 0 | drivgods 00% | N-0 | 99              | 99               | 99                | 99                  |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 98              | 98               | 99                | 999                 |
|                                     |                    |         | drivgods 25% | N-0 | 98              | 99               | 999               | 999                 |
|                                     |                    |         |              | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |

Figur 8-1 Exempel på delmängd av resultattabell sorterad på scenario, siffrorna i tabellen redovisar högsta magasinnivå för respektive scenario. Där en rad är ett scenario och en kolumn ett flödesfall för detta scenario, Q<sub>metod1</sub> avser flöden beräknade enligt metod 1 i riktlinjer för dimensionerande flöden<sup>40</sup>. 999 indikerar dammhaveri. 100,00 har angetts som säker dämningnivå.

Ett annat alternativ är att analysera vilka scenarion som föranlett dammhaveri ett sådant exempel redovisas i Figur 8-2. **Fel! Hittar inte referenskälla..** För denna fiktiva anläggning konstateras att

- fjärrkontrollens funktion inte varit avgörande, men fler scenarion sker då fjärrkontrollen varit utslagen
- samtliga dammhaveri skett när driftgruppen inte kunnat ta sig till anläggningen
- kraftstationens tillgänglighet har inte varit avgörande
- drivgods har inverkan, men det sker lika många haverier i scenarion utan drivgods, som med drivgods
- haverier har skett för flöden med 1 000 eller beräknade enligt metod 1<sup>40</sup>.

| Kriterium                    | Antal haveriscenarion |
|------------------------------|-----------------------|
| Fjärr = 0                    | 32                    |
| Fjärr = 1                    | 21                    |
| Fysisk åtkomst till anlägg=0 | 29                    |
| Fysisk åtkomst till anlägg=1 | 0                     |
| kraftstation = 0             | 28                    |
| kraftstation = 1             | 25                    |
| drivgods 00%                 | 26                    |
| drivgods 25%                 | 27                    |
| N-0                          | 26                    |
| N-1                          | 27                    |
| Q <sub>1000</sub>            | 21                    |
| Q <sub>metod1</sub>          | 32                    |

Figur 8-2 Exempel på resultatmatris summerad efter inverkan på haveriscenarion.

Ytterligare ett sätt att analysera resultatet är att fokusera analysen på ett eller fler kriterier. I Figur 8-3 **Fel! Hittar inte referenskälla.** redovisas den fiktiva anläggningens samtliga scenarion med 25 % drivgodsigensättning av utskoven. Där framgår att fysisk åtkomst är avgörande då samtliga haverier under drivgodsbekastning sker när fysisk åtkomst inte är tillgänglig.

| Magasinsnivå för respektive scenario, drivgods = 25% |                    |         |     | Q <sub>50</sub> | Q <sub>500</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>metod1</sub> |
|--|--------------------|---------|-----|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Fjärr = 0  | Fysisk åtkomst = 1 | HPP = 1 | N-0 | 96              | 96               | 96                | 98                  |
|  |                    |         | N-1 | 96              | 97               | 98                | 99                  |
|  |                    | HPP = 0 | N-0 | 97              | 98               | 98                | 99                  |
|  |                    |         | N-1 | 97              | 99               | 99                | 100                 |
|  | Fysisk åtkomst = 0 | HPP = 1 | N-0 | 98              | 99               | 99                | 100                 |
|  |                    |         | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
|  |                    | HPP = 0 | N-0 | 98              | 99               | 999               | 999                 |
|  |                    |         | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
| Fjärr = 1  | Fysisk åtkomst = 1 | HPP = 1 | N-0 | 96              | 96               | 96                | 98                  |
|  |                    |         | N-1 | 96              | 97               | 98                | 99                  |
|  |                    | HPP = 0 | N-0 | 97              | 98               | 98                | 99                  |
|  |                    |         | N-1 | 97              | 99               | 99                | 100                 |
|  | Fysisk åtkomst = 0 | HPP = 1 | N-0 | 98              | 99               | 99                | 100                 |
|  |                    |         | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
|  |                    | HPP = 0 | N-0 | 98              | 99               | 999               | 999                 |
|  |                    |         | N-1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |

Figur 8-3 Resultatmatris för hur den fiktiva anläggningen klarar scenarion givet kriteriet drivgodsigensättning = 25 %. Siffrorna i tabellen redovisar högsta magasinnivå för respektive scenario. Där en rad är ett scenario och en kolumn ett flödesfall för detta scenario.

Riktlinjerna för dimensionerande flöden <sup>40</sup> anger att utskov som kan antas vara tillgängliga får medräknas i anläggningens totala avbördningskapacitet. För att erhålla en större kunskap om anläggningens förmåga att hantera olika scenarion kan det ändå vara intressant att analysera hur anläggningen klarar av att hantera olika flöden med drivgodsigensättning och bortfall av en utskovslucka. För den fiktiva anläggningen framgår att denna kombination kan hanteras

- för flöden upp till  $Q_{500}$  utan fysisk tillgång till anläggningen. I dessa fall har varken fjärrkommunikation eller kraftstationens tillgänglighet stor inverkan på magasinets nivå (scenarion med svart ram i Figur 8-4! **Hittar inte referensskälla.**),
- för flöden upp mot flöden enligt metod 1<sup>40</sup>, även utan kraftstation. Givet att åtkomsten till anläggningen är god (scenarion med blå ram i Figur 8-4! **Hittar inte referensskälla.**),
- med marginal för flöden ända upp till flöden enligt metod 1<sup>40</sup> givet att både fysisk åtkomst är god och att kraftstationen är i drift (scenarion med grön ram i Figur 8-4! **Hittar inte referensskälla.**).

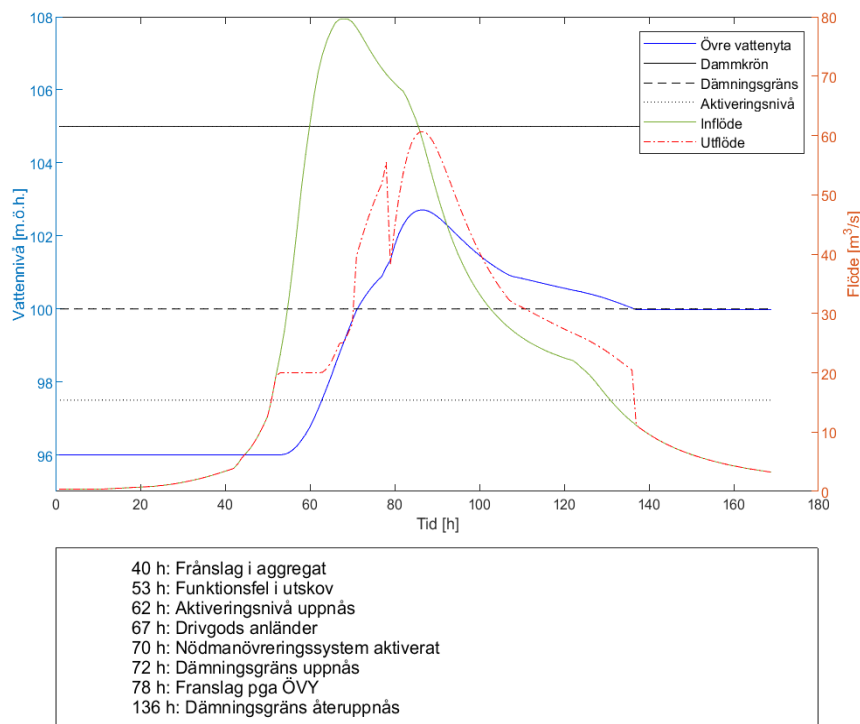
| Magasinsnivå för respektive scenario, drivgods = 25%, N-1. |         |           | Q <sub>50</sub> | Q <sub>500</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>metod1</sub> |
|--|---------|-----------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Fysisk åtkomst = 1   | HPP = 1 | Fjärr = 0 | 96              | 97               | 98                | 99                  |
|  |         | Fjärr = 1 | 96              | 97               | 98                | 99                  |
|  | HPP = 0 | Fjärr = 0 | 97              | 99               | 99                | 100                 |
|  |         | Fjärr = 1 | 97              | 99               | 99                | 100                 |
| Fysisk åtkomst = 0   | HPP = 1 | Fjärr = 0 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
|  |         | Fjärr = 1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
|  | HPP = 0 | Fjärr = 0 | 99              | 100              | 999               | 999                 |
|  |         | Fjärr = 1 | 99              | 100              | 999               | 999                 |

Figur 8-4 Resultatmatris för hur den fiktiva anläggningen klarar scenarion givet kriteriet drivgodsigensättning = 25 % samt ett utskov otillgängligt. Siffrorna i tabellen redovisar högsta magasinets nivå för respektive scenario. Där en rad är ett scenario och en kolumn ett flödesfall för detta scenario.

### 8.3 DETALJERAD RESULTATANALYS

Utöver tidigare metaanalys kan även en detaljerad resultatanalys göras för respektive scenario. Exempel på detta redovisas i Figur 8-5. I detta scenario redovisas hur en fiktiv anläggning klarar av att hantera ett scenario där

- frånslag sker i ett aggregat i kraftstationen, funktionsfel inträffar i ett av utskovet samt att drivgods begränsar avbördningsförmågan.
- en något försenad driftgrupp avhjälpes funktionsfelet med hjälp av nödmanövreringssystemet.
- vattenytan fortsätter stiga och hela kraftstationen slås ut på grund av hög uppströmsvattenyta.
- tillrinningen minskar och anläggningen hanterade situationen med viss överdämning.



Figur 8-5 Resultatexempel med detaljerad information om scenariots händelseförlopp

Fler exempel på resultatanalys redovisas i Bilaga E.

#### 8.4 LÄRDOMAR FRÅN DEN FÖRDJUPADE ANALYSEN

Sammanfattningsvis kan sägas att arbetsinsatsen för att ta fram en systembeskrivande modell kan vara rimlig för anläggningar i dammsäkerhetsklass A och B. Antalet scenarion som kan simuleras är kraftigt beroende på scenariernas längd, tidssteg, komplexitet i modellen och beräkningskraft. I den fördjupade analysen kördes en testmatris med ca 30 000 fall som simulerades över en vecka. Tidssteget var 1h. Detta kördes relativt effektivt på en vanlig dator. Med utgångspunkt från detta ska det inte vara några problem att köra en testmatris bestående av några miljoner fall om en kraftfullare dator med möjlighet till parallellkörning används.

Den fördjupade analysen gav god förståelse för att relativt komplexa förhållanden kan beskrivas med rimliga medel i en simulerande modell. Det är dock viktigt att bestämma nyttan av olika implementeringar som riskerar att ytterligare komplicera modellen. Att modellera enstaka komponenter och dess inverkan på överliggande system kanske inte är relevant när sannolikhets- och återkomstfunktioner inte anges. I stället är det troligtvis mer effektivt att modellera utslagna systems effekt på dammanläggningen, oavsett anledning. Det är på denna nivå den fördjupade analysen genomförts, kraftstation, utskovsluckor, reservmanövrering etcetera har fungerat eller varit otillgängliga i olika scenarion men ingen bakomliggande orsak har kopplats till dess funktion eller brist av kapacitet.

Det har utifrån projektets definition av stresstest fokuserats på att analysera effekten av olika händelser, tillstånd och kombinationer av dessa snarare än att bestämma risken för att dessa uppkommer.



Arbetet med resultatmatrisen i den fördjupade analysen identifierade ett behov av att kategorisera scenarier, se kapitel 7.6. Om resultatmatrisen endast analyseras utan vidare indelning är det svårt att dra slutsatser om anläggningens förmåga i förhållande till kravställning. Det krävs någon form av motstående kravställning eller förväntan på hur anläggningen ska kunna hantera scenariot för att kunna dra slutsatser om anläggningens förmåga. I metod 1 finns sannolikhetsfunktioner, se t.ex. Figur 5-2 samt Figur 5-4, som gör att fall med extrema återkomsttider inträffar få gånger, medan kombinationer av mer vanliga händelser inträffar oftare. Detta leder till en spridning i resultatet som kan visa att den största risken för dammhaveri fås för kombinationer av mer vanliga händelser. Detta sker inte per automatik med metod 3. I denna metod kombineras samtliga möjligheter utan inverkan från frekvens eller återkomsttid. Detta leder till att resultatmatrisen innehåller allt från ordinarie scenarion, till betydligt svårare scenarion än dimensionerande förutsättningar. Därav krävs det en indelning av resultatmatrisen i syfte att kunna identifiera vilka av de scenarion anläggningen förväntas klara som i stället resulterar i allvarlig skada eller haveri.

## 9 Tillämpning

Stresstester kan tillämpas i olika syften i de branscher de används. De stresstester som genomfördes inom kärnkraftsområdet efter Fukushima olyckan syftade till dels att göra en övergripande screening över säkerhetsnivån på de europeiska kärnkraftverken, samt identifiera säkerhetsbrister i individuella verksamheter. I andra verksamheter, som inom den tyska transmissions och distributions myndigheten används stresstester för att analysera pågående händelser. I STREST projektet användes metoden för att ge ökad förståelse för kombinationshändelser och analysera samhällseffekten av händelserna. Genom att bestämma sannolikheten för att händelserna inträffar kunde det bedömas om anläggningen når samhällets krav på säkerhetsnivå.

Inom den svenska vattenkraftsbranschen har följande tillämpningsområden identifierats:

- Möjlighet till screening. En dammägare kan definiera ett antal scenarion med kombinationer av händelser som kan inträffa. Samt applicera dessa scenarion på sin anläggningsportfölj.
- Ökad kunskap om dammanläggningen. Genom att genomföra stresstest kan dammägaren ges en ökad kunskap om sin dammanläggning, specifikt för hur anläggningen klarar att hantera kombinationshändelser av icke extrema händelser.
- Riskidentifieringsmetod. Metoden kan även användas som riskidentifieringsmetod, till exempel i samband med DSU. Detta för att ta fram, eller säkerställa att, DSU arbetet identifierar och hanterar anläggningens mest kritiska risker.
- Analys av åtgärder. Metoden kan användas för att analysera olika åtgärders dammsäkerhetshöjande bidrag och därmed ställas mot varandra. Metoden kan även användas under ombyggnationsfaser för att utvärdera ökad risk under ombyggnationer.

Enligt ovan kan metoden användas som dels en egen analysmetod, på såväl övergripande portföljnivå som på anläggningsnivå. Metoden kan även användas för att bidra till riskidentifieringsprocessen inom DSU och för att analysera olika åtgärders säkerhetshöjande bidrag.

Till viss del tar de föreslagna stresstestmetoderna avstamp i befintliga och vedertagna processer där de faktiska analysmomenten i sig inte nödvändigtvis skiljer sig från tidigare genomförda scenarioanalyser och händelseträdsanalyser. Den skillnad som stresstest utgör mot tidigare genomförda analyser är framförallt

- en analys som fokuserar på anläggningens respons och resiliens för kombinationer av händelser, där hänsyn även tas till uthållighet och förmåga till återhämtning
- att säkerhetsmarginal analyseras
- att, i två av tre metoder, den mänskliga faktorn i bestämmande av scenarioval elimineras.

## 10 Diskussion

Stresstest har använts för att analysera ett systems respons på hot och belastningar inom ett flertal områden, t.ex. elförsörjning, hydrologiska frågor kopplade till klimatförändringar, belastning på kritisk infrastruktur och analyser av finansiella system. Inom EU finns ett tidigare genomfört projekt där även dammsäkerhet analyserats. Syftet med stresstester har varierat men i stort handlat om att utvärdera säkerhet och robusthet, identifiera förhållanden som leder till oacceptabelt beteende och förstå systemets respons för svåra och onormala förhållanden.

Syftet i denna rapport var att beskriva möjliga metoder stresstest för dammanläggningar. Det bedömdes viktigt att ta fram en definition för begreppet stresstest för dammanläggningar. Det definierades i detta projekt som:

*En metod för att analysera anläggningens respons och bedöma dess resiliens och säkerhetsmarginaler mot kombinationer av tillstånd, händelser, faror och förhållanden.*

Definition av bedömning, resiliens, tillstånd, händelse och förhållanden beskrivs i avsnitt 3.

Säkerhetsmarginal är ett centralt begrepp. Det används här för den marginal en anläggning har innan allvarlig skada eller haveri uppstår för ett givet scenario. För att bedöma säkerhetsmarginal behöver gränsvärden definieras för då anläggningen bedöms vara säker från allvarlig skada. Gränsvärden kan vara magasinsnivåer, överdämningstider m.m. Säkerhetsmarginal kan därefter bestämmas för ett visst scenario och uttryckas t.ex. som magasinnivåmarginal, mätt i avstånd från kulminerande vattennivå till säker dämningnivå samt mätt i tid i relation till säker överdämningstid. Att bestämma gränsvärden kan vara svårt och de kan innehålla stor osäkerhet, men det är nödvändigt för att möjliggöra bedömning av säkerhetsmarginal.

Alternativa definitioner av begreppet stresstest är möjliga, men det har inom ramen för detta projekt bedömts att ovanstående definition väl beskriver vad ett stresstest innebär.

Tre olika metoder för att genomföra stresstester för dammanläggningar beskrivs. De har var för sig sina fördelar och nackdelar. De kräver i sin tur olika nivåer av förarbete och varierar i omfattning.

Metod 1 är en probabilistisk metod där anläggningens hot och belastningar genereras utifrån sannolikhetsfunktioner och återkomsttider. Den är mycket avancerad i sin modellering och genererar resultat av hög innehållsgrad. Ett EU projekt (STREST) visar på intressanta resultatredovisningar där sannolikheten för haveri kan redovisas utifrån återkomsttider för olika hot. Vidare ger metoden en inblick i hur sannolika och belastande olika kombinationshändelser är. Metoden kan ge information om anläggningens hotbild överstiger samhällets acceptans. Allt detta kräver dock att ingående sannolikhetsfunktioner och återkomsttider för såväl händelser som beroenden blir korrekt beskrivna. Detta bedöms vara mycket svårt. Osäkerheter i bestämmandet av frekvensfunktioner och återkomsttider har en direkt inverkan på resultatets tillförlitlighet. För vissa funktioner, exempelvis inre erosion redovisas STREST att det saknas tillförlitlig metod att definiera

frekvensfunktionen. Det är troligt att detta gäller även för flertalet andra hot och delsystems tillgänglighet. Detta gör att en korrekt modell enligt denna metod kräver ett stort förarbete när frekvensfunktioner och tillgänglighetsfunktioner för exempelvis drivgods, inre erosion, funktionsfel i ordinarie, reserv-, och nödmanövreringssystem, kommunikationssystem och så vidare måste definieras. Det är troligtvis även så att branschen behöver ta vissa kunskapskliv inom särskilda områden, exempelvis inre erosion, för att möjliggöra korrekt redovisning av detta hot enligt metod 1.

Komplexiteten i denna fråga ökar ytterligare då frekvensfunktioner för olika hot kan påverkas av uppkomna händelser. Exempelvis kan sannolikheten för jordskred med stora drivgodsutfall påverkas av kraftiga regn. Denna multirisik-korrelation som behöver implementeras i modellen är också förknippad med stora osäkerheter.

Osäkerheterna i dessa frekvensfunktioner och tillgänglighetsfunktioner, och korsberoenden, påverkar resultatet i modellen genom ökad osäkerhet i bestämda återkomsttider för haverier och incidenter. Vidare är metoden beräkningstung. Författarna av föreliggande rapport anser att metod 1 kan användas i de fall mycket komplicerade anläggningar ska modelleras, eller där de yttre hoten är väldefinierade och dessa kan ställas upp med korrekta frekvensfunktioner. Detta kan gälla för anläggningar där hotbilden framförallt utgörs av väldefinierade meteorologiska hot.

Metod 2 är ett scenariobaserat stresstest där kritiska scenarion bestäms och anläggningens förmåga att hantera dessa bedöms. Detta är ett relativt enkelt sätt att genomföra stresstest på. Metodens utgångspunkt i befintliga arbetsmetoder och verktyg gör startsträckan relativt kort. Det är dock viktigt att analysen av vilka scenarion som ska utvärderas görs med noggrann omsorg så att stresstestet omfattar de för anläggningen mest kritiska scenariona. Författarna anser att metoden lämpar sig särskilt väl för portföljoverskridande analyser där en dammägare exempelvis vill sammanställa vilka anläggningar som klarar i förhand stipulerade scenarion och krav. Även i fall då ett enklare stresstest behöver genomföras kan denna metod användas.

Metod 3 är ett scenariostyrt stresstest med modellerad anläggningsrespons. En omfattande testmatris upp som kombinerar olika händelser oaktat sannolikheten för att dessa inträffar. Metoden innebär en avancerad modellering av anläggningens respons för ett stort antal scenarion. Arbetet med att sätta upp modellen är relativt arbetskrävande och gör att den kanske inte lämpar sig för att appliceras på hela anläggningsportföljer. Metoden ger dock väldigt bra översyn över vilka scenarion, lastkombinationer och händelser som anläggningen klarar. Metoden ger även bra förståelse för säkerhetsmarginal och hur olika förändringar, till exempel av driftgruppers inställetider, kan påverka säkerheten vid anläggningen. Den kan även användas för att analysera olika dammsäkerhetshöjande åtgärders inverkan på den totala säkerheten. Metoden resulterar i en mycket omfattande resultatmatris som kan vara svårarbetad. Till skillnad mot metod 1 ges ingen sannolikhet för olika scenarions inträffande, istället måste en manuell sortering och gallring genomföras i resultatanalysen. Författarna rekommenderar metod 3 bland annat för de fall där anläggningsägaren vill öka sin kunskap om anläggningens förmåga att hantera ett stort antal scenarion. I bilaga E visas tillämpning av metod 3 på ett fiktivt exempel.

## 11 Referenslista

- BMWK. (2022). FAQs for the second stress test. Hämtat från [https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/S-T/faq-second-stress-test-and-measures-to-safeguard-grid-stability-in-the-winter-of-22-23.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/S-T/faq-second-stress-test-and-measures-to-safeguard-grid-stability-in-the-winter-of-22-23.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- BMWK. (2022). Power system stress test. Hämtat från <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2022/09/20220905-power-system-stress-test.html>
- Bourgin, P.-Y., & Le-Clerc, S. (u.d.). A pragmatic approach to assess the climate resilience of hydro projects.
- Declaration of ENSREG - EU Stress Tests specifications, 31 maj 2011
- Finansinspektionen. (2022). Makrobaserade stresstest av svenska banker.
- IHA. (2019). Climate Resilience Guide. Hämtat från [https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/5fa7e38ce92a9c6b44e63414\\_hydropower\\_sector\\_climate\\_resilience\\_guide.pdf](https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/5fa7e38ce92a9c6b44e63414_hydropower_sector_climate_resilience_guide.pdf)
- IHA. (u.d.). Assessment of climate resilient hydropower. Hämtat från [https://unfccc.int/files/cooperation\\_and\\_support/financial\\_mechanism/standing\\_committee/application/pdf/climate\\_resilience\\_unfccc\\_scf\\_session\\_7\\_sept\\_2017.pdf](https://unfccc.int/files/cooperation_and_support/financial_mechanism/standing_committee/application/pdf/climate_resilience_unfccc_scf_session_7_sept_2017.pdf)
- Kompletterande uppdrag till Strålsäkerhetsmyndigheten med anledning av händelserna i Japan, M2011/1946/Ke, 12 maj 2011
- Pohl (2000). Failure frequency of gates and valves at dams and weirs. *International Journal on Hydropower & Dams*(6):77-81.
- Regeringskansliet. (2023). Uppdrag att uppmuntra och stödja genomförande av stresstester inom energisektorn. Hämtat från <https://www.regeringen.se/regeringsuppdrag/2023/04/uppdrag-att-uppmuntra-och-stodja-genomforande-av-stresstester-inom-energisektorn/>
- Regeringskansliet. (2023). Uppdrag att uppmuntra och stödja genomförande av stresstester inom energisektorn. Hämtat från <https://www.regeringen.se/regeringsuppdrag/2023/04/uppdrag-att-uppmuntra-och-stodja-genomforande-av-stresstester-inom-energisektorn/>
- RIDAS TV9 – Avbördande funktion maj 2021
- Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar, Svenska kraftnät, Energiföretagen, SweMin. 2022.
- SKI Report 02:27 Guidance for External Events Analysis Michael Knochenhauer Pekka Louko February 2003
- Strålsäkerhetsmyndigheten, Sammanfattning av säkerhetsutvärderingar (stresstester) av svenska kärntekniska anläggningar, SSM2010-1557-11, 2012-10-31
- Strålsäkerhetsmyndigheten, Villkor för oberoende härdkylning för Ringhals 3, SSM2012-3023-16, 2014-12-15
- STREST. (2016). Harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards.
- Swedish action plan for nuclear power plants, Response to ENSREG's request within the European Stress test, December 2012, Strålsäkerhetsmyndigheten,
- Uppdrag till Strålsäkerhetsmyndigheten om redovisning av den långsiktiga säkerhetsutvecklingen i den svenska kärnkraften, M2010/2046/Mk, 8 april 2010
- USBR; US Army Corps of engineers; U.S. Department of Energy. (2021). MEMORANDUM OF UNDERSTANDING FOR FEDERAL HYDROPOWER. Hämtat från <https://www.usbr.gov/power/mou-action-plan-2020.pdf>
- USNRC, PRA Procedures Guide – A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants; USNRC; NUREG/CR-2300; 1983

World Bank Group. (2022). HYDROPOWER AND DAMS - Strengthening Climate-Informed Project Design. World Bank. Hämtat från <https://documents1.worldbank.org/curated/en/926391632392943578/pdf/Hydro-power-and-Dams-H-and-D-Strengthening-Climate-Informed-Project-Design.pdf>

## Bilaga A: Säkerhetsmarginaler inom kärnkraft

### DETERMINISTISK SÄKERHETSMARGINAL

Den deterministiska säkerhetsmarginalen utgörs av skillnaden mellan de regulatoriska acceptanskriterierna för en parameter och det faktiska värdet på parametern som erhållits utifrån analyser och beräkningar och redovisas i en anläggnings säkerhetsredovisning. Den deterministiska säkerhetsmarginalen kan förenklat uttryckas som skillnaden eller förhållandet mellan kapacitet och last.

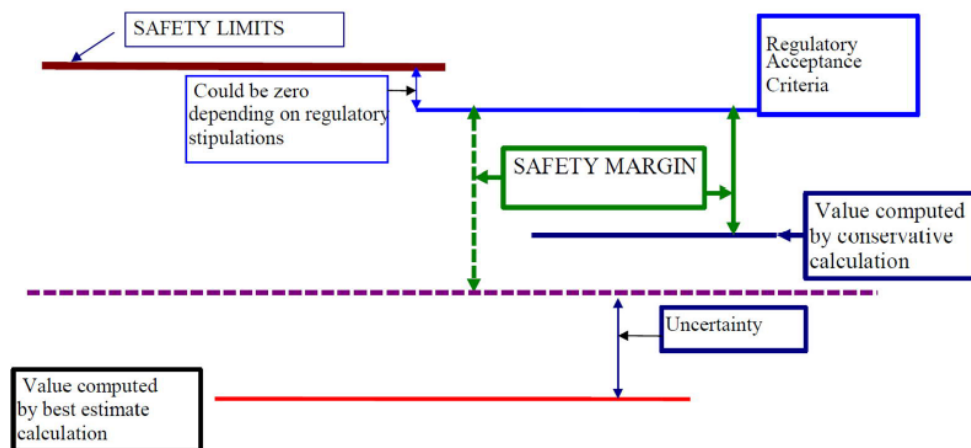
För konstruktionsstyrande händelser (Design Basis Accidents) fastställer de nationella tillsynsmyndigheterna acceptanskriterier för olika typer av parametrar med betydelse för säkerheten på en kärnkraftsanläggning. De regulatoriska acceptanskriterierna sätts normalt med en viss marginal till det gränsvärde som faktiskt innebär att skada kan uppkomma.

De deterministiska acceptanskriterierna och säkerhetsmarginalerna är vanligtvis förknippade med följande fysiska fenomen och anläggningsparametrar (IAEA, 2004):

- a) Förhindrar oavsiktlig kriticitet och överdriven effektökning.
- b) Förebygga eller minska risken för skador på bränslekapslingen.
- c) Begränsa skador på bränslet, inklusive strukturella skador;
- d) Bibehålla primärkretsens integritet.
- e) Bibehålla inneslutningens integritet.
- f) Begränsning av radiologisk påverkan från en olycka.
- g) Ge tillräckligt med tid för olyckshantering.

Tillståndshavarna skall sedan i sin säkerhetsredovisning visa att konstruktionen klarar acceptanskriterierna genom att beräkna anläggningsparametrarna med konservativa antaganden. I dessa beräkningar måste tillståndshavaren framlägga analytiska och/eller experimentella bevis på att acceptanskriterierna är uppfyllda, och detta med tillräckliga marginaler. I vissa fall kan best estimate beräkningar med tillhörande osäkerhetsanalys accepteras för att påvisa tillräcklig säkerhetsmarginal till de regulatoriska acceptanskriterierna.

Säkerhetsmarginalkonceptet illustreras i Figur 11-1.



Figur 11-1 Säkerhetsmarginalbegreppet i deterministisk säkerhetsanalys (IAEA, 2003).

### PROBABILISTISK SÄKERHETSMARGINAL

Genom probabilistisk säkerhetsanalys (PSA) kan säkerhetsmarginaler definieras probabilistiskt som skillnaden mellan det fastställda, och av myndigheten accepterade, säkerhetsmål (frekvens) för olika typer av oönskade konsekvenser, och de med hjälp av PSA realistiskt beräknade värdena för de oönskade konsekvenserna. De beräknade värdena beaktar även osäkerheter i form av parametriska osäkerheter, modellrelaterade osäkerheter samt fullständighetsrelaterade osäkerheter. Det probabilistiska säkerhetsmarginalbegreppet illustreras i Figur 11-2.

Figur 11-2 Probabilistisk säkerhetsmarginal (IAEA, 2003)

Det probabilistiska säkerhetsmarginalbegreppet har grundläggande likheter med det deterministiska säkerhetsmarginalbegreppet. Men i stället för att beräkna skillnaden eller förhållandet mellan kapacitet och last, uttrycks den probabilistiska säkerhetsmarginalen som sannolikheten att en last överskrider kapaciteten. Eftersom parametrarna som representerar riskbegreppet är abstrakta mått, och inte fysiska storheter som ska mätas i verkligheten, behövs viss flexibilitet vid tolkningen av last- och kapacitetsparametrar i samband med probabilistiska säkerhetsmarginaler. De riskparametrar på hög nivå som oftast beaktas vid utvärderingen av probabilistiska säkerhetsmarginaler är härdskadefrekvens (HS) och utsläpp av radioaktivitet till omgivningen.

Fördelen med probabilistisk säkerhetsanalys (PSA) är möjligheten att studera säkerhetsmarginaler för ett brett spektrum av störningar som involverar flera säkerhetsbarriärer och ömsesidigt redundanta och diversifierade system på ett



konsekvent och sammanhängande sätt, samt att relevanta osäkerheters inverkan kan simuleras. PSA tillhandahåller verktyg för att utvärdera komplexa olycksscenarioer där aktiveringen av skyddsfunktionerna sker med viss sannolikhet. På så sätt kan antagandena om konstruktionsgrunden som överförs från den deterministiska säkerhetsanalysen ifrågasättas och riskbetydelsen av olyckor utanför konstruktionsgrunden kan uppskattas.

### **SÄKERHETSMARGINALER INOM MÄNSKKA-TEKNIK-ORGANISATION (MTO)**

För att inkludera mänskliga handlingar i säkerhetsmarginalutvärderingar måste de mänskliga felhandlingarna utvärderas med hjälp av kvalitativa eller kvantitativa attribut. Detta innebär att potentialen för förekomst av mänskligt misslyckande som bidrar till en eventuell minskning av säkerhetsmarginalen måste behandlas på något sätt, antingen deterministiskt eller probabilistiskt. Förhållningssättet till mänskliga faktorer är ungefär som processen för deterministisk eller probabilistisk analys med fokus på säkerhetsmarginaler.

I deterministisk analys är det första steget identifiering av dessa mänskliga handlingar (och motsvarande fel), vilket kan leda till betydande minskning (och möjlig förlust) av säkerhetsmarginal. Denna effekt kan orsakas av initiering av olycksscenarioer med stark inverkan på de typiska parametrar som representerar deterministiska säkerhetsmarginaler. Om driftpersonal påverkar driftklarheten hos ett säkerhetssystem, påverkas säkerhetsmarginalen, ibland avsevärt. Ett annat sätt att minska säkerhetsmarginalen är felaktig respons/åtgärd i ett pågående störningsförlopp.

Det andra steget i MTO-relaterad deterministisk säkerhetsanalys med möjlig inverkan på säkerhetsmarginaler är utvärdering av de faktorer som bidrar till de mänskliga felhandlingarna som identifierades i det första steget. Det finns ett antal sådana faktorer, som till exempel:

- otillräcklig tid för åtgärden
- nivå av stress
- erfarenhetsnivå
- utbildningens kvalitet, inklusive feedback
- kvaliteten på rutinerna
- dåligt lagarbete
- psykologiska profiler av driftpersonalen

Vissa av dessa faktorer är (åtminstone i teorin) mätbara (tid, stressnivå, erfarenhetsnivå), andra inte (kvalitet på procedurer, överbelastning). Varje faktor kan analyseras utifrån dess potentiella bidrag till förekomsten av det mänskligt felhandlande som analyseras och därmed på betydelsen av den givna faktorn med avseende på säkerhetsmarginal (för det givna mänskliga felhandlandet eller totalt).

## Bilaga B: Kriterier för att screena bort händelser

### KRITERIER FÖR ATT SCREENA BORT ENSKILDA HÄNDELSE

Inom kärnkraften har kriterier definierats för att screena bort enskilda, till processen externa och ofta väderrelaterade händelser, från vidare analys. Ett uppfyllt kriterium innebär förenklat att en anläggning inte påverkas, eller endast med mycket liten sannolikhet, av den studerade händelsen. Tillämpade kriterier baseras i första hand på PRA Procedures Guide<sup>42</sup> (kriterier C1 till C4). Dessutom tillämpas normalt i Sverige två ytterligare kriterier (C5 och C6) som utgår ifrån SKI Report 02:27<sup>43</sup>. Kriterierna är till viss del överlappande men det är tillräckligt att föra i bevis att ett kriterium uppfylls för bortscreening av en händelse, se Tabell 11-1.

| C1 /<br>Konsekvens   | C2 /<br>Frekvens   | C3 /<br>Distans  | C4 /<br>Inkludering   | C5 /<br>Varning   | C6 /<br>Tillämpbarhet  |
|--|--|--|---|---|--|
| Händelsen har en potential att skada anläggningen som är mindre eller lika stor som en annan händelse som anläggningen är dimensionerad för. | Händelsen har en signifikant lägre frekvens än händelser med motsvarande osäkerheter och kan inte medföra värre konsekvenser än dessa. | Händelsen kan inte inträffa tillräckligt nära anläggningen för att kunna påverka densamma. | Händelsen kan sägas ingå i definitionen av en annan händelse. | Händelsen utvecklas så långsamt att det finns tid att initiera motåtgärder. | Händelsen kan inte inträffa på eller i närheten av anläggningen. |

Tabell 11-1 Kriterier för att screena bort enskilda händelser

### KRITERIER FÖR ATT SCREENA BORT SAMMANFALLANDE HÄNDELSE

Utöver att studera enskilda externa händelser studeras även möjligheten att få, och effekten av, sammanfallande händelser. En sammanfallande händelse kan ingå i analysen av enskilda händelser, såsom extrem snömängd som normalt utgörs av snöstorm, vilket oftast innebär två potentiellt enskilda händelser, hård vind och snö. Därför är det viktigt att tydligt skilja på de enskilda och de sammanfallande händelserna. Följande förutsättningar beaktas därför vid analys av sammanfallande händelser<sup>43</sup>:

#### 1. Beroenden mellan händelser.

Grunden för att gruppera externa händelser är att inte anta att händelserna som ingår i gruppen är oberoende. Som exempel kan nämnas att tjock is förekommer ca 0,1 % av tiden, vilket är densamma som en lufttemperatur under - 20 °C, vilket också förekommer ca 0,1 % av tiden. Sannolikheten för en kombinerad händelse är med stor säkerhet högre än produkten av dessa sannolikheter ( $1 \cdot 10^{-6}$ ). Kombinationer av oberoende händelser kan vara intressanta, dock kräver detta en förhållandevis hög sannolikhet att händelserna ska inträffa samtidigt, exempelvis p.g.a. en lång exponeringstid och/eller en hög frekvens för händelsen.

<sup>42</sup> USNRC, PRA Procedures Guide – A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants; USNRC; NUREG/CR-2300; 1983 -

<sup>43</sup> SKI Report 02:27 Guidance for External Events Analysis Michael Knochenhauer Pekka Louko February 2003

2. **Olika säkerhetsfunktioner påverkas.**

Om förutsättning 1 är uppfylld måste händelserna resultera i någon förvärrande typ av påverkan på anläggningen. Om händelserna resulterar i samma typ av påverkan måste en ytterligare kontroll genomföras enligt punkt 3 nedan.

3. **Omfattning av påverkan på anläggningens säkerhetsfunktioner.**

Om två externa händelser påverkar samma säkerhetsfunktion, kan de ändå vara en relevant sammanfallande händelse, givet att kombinationen ger en värre konsekvens för funktionen än respektive enskilda händelse.

4. **Enskilda händelsers screeningkriterier.**

Slutligen skall de sammanfallande händelserna kontrolleras mot motsvarande kriterier för enskilda händelser enligt tabell 3 ovan.

Ovanstående innebär att en potentiell sammanfallande händelse enligt förutsättningar ovan kan exkluderas från vidare analys om kriterier i Tabell 11-2 uppfylls.

Tabell 11-2 Kriterier för att screena bort sammanfallande händelser

| <b>M1 /<br/>Oberoende</b>  | <b>M2 /<br/>Definition</b>  | <b>M3 /<br/>Påverkan</b>  | <b>C1 – C6</b>  |
|--|---|---|---|
| Händelserna uppträder i tiden oberoende av varandra<br>OCH<br>Sannolikheten för att de uppträder samtidigt är låg. | Händelserna uppträder i tiden beroende av varandra<br>OCH<br>De kombinerade händelserna ingår i definitionen av en enskild händelse som analyseras. | Händelserna uppträder i tiden beroende av varandra<br>OCH<br>Händelserna påverkar samma säkerhetsfunktion.<br>OCH<br>De kombinerade händelsernas påverkan på säkerhetsfunktionen är inte värre än den mest allvarliga av de enskilda händelserna. | Enskilda händelsers kriterier är även relevanta för de kombinerade händelserna. |

## Bilaga C: Utredningar som SSM förväntade sig av tillståndshavarnas stresstest

SSM sammanfattade omfattningen av stresstester för de svenska kärntekniska anläggningarna i, Swedish action plan, Response to ENSREG's request for nuclear power plants, december 2012 <sup>44</sup>. Nedan sammanfattas utredningarna överskådligt för att ge en uppfattning om vad som inkluderades i de svenska stresstesterna för sin helhet se referens <sup>44</sup>.

### Naturfenomen

- **T1.LA.1 – Jordbävninganalys**  
En postulerad jordbävning med återkomstfrekvens på  $10^{-5}$ /år (med en minsta acceleration på 0,1g) ska användas som underlag för anläggningsgenomgångar/back-fitting.
- **T1.LA.2 – Utredning av sekundära effekter av jordbävning**  
Brand och översvämning som sekundära effekter skulle utredas.
- **T1.LA.3 – Genomgång av jordbävningsovervakning**  
Seismiska övervakningssystem finns installerade på alla svenska anläggningar. De befintliga rutinerna och utbildningsprogrammet för seismisk övervakning skulle granskas och implementeras.
- **T1.LA.4 – Utredning av extrema väderförhållanden**  
En utredning skulle genomföras av extrema väderförhållanden som kan uppkomma där anläggningen ligger. En systematisk analys av kombinationer av extrema väderförhållanden.
- **T1.LA.5 – Utredning av frekvens för extrema vattennivåer**  
En analys av kombinerade effekterna av vågor och högvatten inklusive potentiella dynamiska effekter skulle utföras.
- **T1.LA.6 - Bedömning av översvämningsskador**  
En analys av gradvis ökande översvämningsskador utöver vad kärnkraftverket är konstruerat för skulle genomföras.
- **T1.LA.7 – Utvärdering av koncept med översvämningsskyddad volym**  
En studie skulle göras för att identifiera kritiska områden och utrymmen för översvämning av förläggningssplatsen. Denna studie skulle överväga behovet av att ytterligare förbättra skydd av byggnader som innehåller säkerhetsrelaterad utrustning som finns i lokaler vid eller under marknivå.
- **T1.LA.8 – Utredning av ett förbättrat tidigt varningssystem**  
Utredningar av system för tidig varning av försämrat väder, samt att instruktioner finns och följs av operatörer när varningar kommer.
- **T1.LA.9 – Utredningar av marginaler för externa händelser**  
På samma sätt som bedömning av översvämningsskador skulle marginaler för andra naturfenomen tas fram.
- **T1.LA.10-Utveckla en metod för kvalificerade walk downs (inspektioner av anläggningen)**  
Metod för kvalificerade walk-downs som kunde identifiera brister med avseende på jordbävning, översvämning och extrema väder skulle upprättas.

<sup>44</sup> Swedish action plan for nuclear power plants, Response to ENSREG's request within the European Stress test, December 2012, Strålsäkerhetsmyndigheten,

## Konstruktion

- **T2.LA.1 – Händelser inom design ska redovisas i säkerhetsredovisningen**  
Händelser för bortfall av värmesänka och bortfall av el.
- **T2.LA.2 – Definiera konstruktionsunderlag för alternativ kyla och alternativ resteffekt bortförel**  
Utred alternativa sätt att kyla och föra bort resteffekt från reaktorhårdarna samt från bränslebassänger och alternativa metoder för kylning av säkerhetssystemen skulle utvärderas ytterligare och omvärderas
- **T2.LA.3 – Omvärdera primär och alternativ elförsörjning (AC) och distribuering**  
Robustheten hos elsystemen och deras distribuering skulle utvärderas och omprövas. Utvärderingen skulle definiera tekniska och administrativa åtgärder för att säkerställa att reaktorerne kan bibehålla drift av aktiva säkerhetsrelaterade system under långvariga extrema situationer. Utvärderingarna skulle överväga både primär och alternativ elförsörjning och distribueringssystemens design. Dessutom skulle lagring av bränsle och smörjolja samt möjligheterna till extern support utvärderas ytterligare.
- **T2.LA.4 - Omvärdera primär och alternativ elförsörjning (DC) och distribuering**  
Robustheten hos likströmsförsörjningssystemen och deras distribuering skulle utvärderas och omprövas. Utvärderingen skulle definiera tekniska och administrativa åtgärder för att säkerställa drift av likströmsförsörjning och distribueringssystemen under långvariga extrema situationer. Utvärderingar skulle särskilt överväga batteriernas urladdningstid och förmågan att ladda om batterier och/eller koppla bort mindre viktiga belastningar.
- T2.LA.5 – Omvärdera primärsystemets integritet
- För PWR ska integriteten hos det primärsystemet utvärderas och omprövas för långvariga extrema situationer. Utvärderingen skulle definiera tekniska och administrativa åtgärder för att säkerställa att reaktorerne kan bibehålla integriteten hos det primärsystemet under långvariga extrema situationer. Detta inkluderade särskilt omprövningar av den primära pumptätningen för PWR.
- **T2.LA.6 – Omvärdering av huvudkontrollrummen avseende funktionsduglighet och möjligheten att vistas där under längre tid**  
Driftbarhet och beboelighet i alla kontrollrum skulle utvärderas och omprövas för att säkerställa det under långvariga extrema situationer. Utvärderingen skulle definiera tekniska och administrativa åtgärder för att säkerställa fortsatt driftbarhet och tillräcklig beboelighet i nödkontrollcentret.
- **T2.LA.7 – Omvärdering av instrument och övervakning**  
Instrumentering och övervakningsutrustning skulle utvärderas avseende tillförlitlighet av viktiga parametrar vid extrema händelser

- **T2.LA.8 – Omvärdering av bränslebassängernas integritet**  
Integriteten och robustheten hos de använda bränslebassängerna under långvariga extrema situationer skulle utvärderas och omprövas. Utvärderingen skulle definiera tekniska och administrativa åtgärder för att säkerställa att bränslet i de använda bränslebassängerna är tillräckligt skyddat under alla potentiella situationer.
- **T2.LA.9 – Utvärdera behovet av mobil utrustning**  
Utvärdera robusthet hos befintliga mobila pumpar, nätaggregat och luftkompressorer med förberedda snabbkopplingar, rutiner och personalutbildning.
- **T2.LA.10 – Utvärdera och uppdatera inspektionsprogram för mobilutrustning**  
Regelbundna inspektionsprogram skulle omprövas och om nödvändigt uppdateras för att säkerställa att utrustning och mobila enheter är korrekt installerade och underhållna, särskilt för tillfällig och mobil utrustning och verktyg som är avsedda att användas under långvariga svåra och extrema situationer.
- **T2.LA.11 – Utvärdera och uppdatera träningsprogram för personalen**  
Utvärdera träningsprogram för mobil utrustning i situationer av extrema naturhändelser
- **T2.LA.12 – Utvärdera behovet av förbrukningsvaror**  
Exempelvis färskt vatten, smörjmedel, bränsle mm.
- **T2.LA.13 – Utvärdera behovet av resurser**  
Utvärderingen avser både personal och utrustning som behövs vid extrema situationer vid en naturhändelse.
- **T2.LA.14 – Utvärdera tillgängligheten till viktiga delar av anläggningen vid en extrem naturhändelse**  
Tillgängligheten till viktiga områden på förläggningsplatsen och i reaktorer under olycksscenarioer ska utvärderas och omprövas. Utvärderingen skulle definiera tekniska och administrativa åtgärder för att säkerställa tillräcklig tillgänglighet under alla potentiella situationer.
- **T2.LA.15 – Utred effekterna av att en händelse samtidigt påverkar alla reaktorer på en site**  
Konsekvenserna av samtidiga händelser som påverkar alla reaktorer på förläggningsplatsen och som uppstår från naturliga fenomen och andra händelser skulle utvärderas ytterligare.
- **T2.LA.16 – Omvärdera användningen av de konsekvenslindrande systemen**  
Användningen av de konsekvenslindrande systemen som en värmesänka innan allvarig skada på bränslet har inträffat skulle utvärderas och omprövas. Utvärderingar skulle överväga tillämpningar och strategier för en långvarig användning av de konsekvenslindrande systemen innan allvarig skada på bränslet har inträffat under långvariga svåra och extrema situationer.

- **T2.LA.17 – Utvärdera rutiner och operativ träning vid långvariga extrema naturhändelser**  
Procedurer och operativ träning skulle utvärderas och omprövas för att säkerställa att långvariga extrema situationer som uppstår från naturliga fenomen och andra händelser är lämpligt beaktade.
- **T2.LA.18 – Utvärdera behovet av externa resurser**  
Behovet och möjligheten till externa resurser under långvariga extrema situationer skulle utvärderas och omprövas. Utvärderingen ska definiera tekniska och administrativa åtgärder för att säkerställa nödvändig support under långvariga extrema situationer.
- **T2.LA.19 – Omvärdera risken för kriticitet och återkriticitet**  
Utvärdera och ompröva risken för kriticitet och/eller återkriticitet under långvariga extrema situationer. Utvärderingen skulle definiera tekniska och administrativa åtgärder för att minimera risken för kriticitet och/eller återkriticitet under långvariga extrema situationer. Utvärderingar skulle särskilt överväga risken för kriticitet för PWR vid borutspädning.

## Bilaga D: Förslag på scenarioval för metod 2

| Postulerade scenarion att analysera                                       |            | Beskrivning   |
|---|------------|---|
| <b>1. Kraftförsörjning</b>  |            |   |
|   | Start      | Bortfall av yttre nät till kraftstation (kan innebära att ordinarie kraftmatning till utskovsluckor uteblir, beror av systemuppbyggnad). Startläge vid DG, utbyggnadsvattenföring och 0-tappning. |
|   | Tillägg 1  | Bortfall av ordinarie kraftmatning till utskovsluckor (om det är ett annat system).   |
|   | Tillägg 2  | Bortfall av reservkraft (om flera finns, bortfall av det som matar flest luckor).   |
|   | Tillägg 3a | Bortfall av reservkraft 2 (om det finns flera).   |
|   | Tillägg 3b | Bortfall av reservkraft 3 (om det finns).   |
|   | Tillägg 4a | Dubblerad inställetid.  |
|   | Tillägg 4b | Inställetid kraftigt förlängd pga. väderhändelse (storm el liknande).   |
|   | Tillägg 4c | Personal på plats lyckas ej få upp med nöddriftaggregat på x h (avsaknad instruktioner, fel på aggregat osv.), ev. att det tar extra lång tid.  |
|   | Tillägg 4d | DC kan ej nå personal i beredskap pga. utebliven mobilkommunikation.  |
|   | Tillägg 4e | DC kan ej nå personal i beredskap pga. utebliven RAKEL-kommunikation.   |
| <b>2. Funktionsfel/ igensättning utskovsluckor utbyggnadsvattenföring</b> |            |   |
|   | Start      | Kraftstationsbortfall.<br>Start vid DG, 0-tappning.<br>Utebliven lucköppning minskar kapacitet 25 %.  |
|   | Tillägg 1  | Utebliven lucköppning minskar kapacitet 25 % (50 % kvarvarande kapacitet).  |



|  |           |  |
|--|-----------|--|
|  | Tillägg 3 | Utebliven lucköppning minskar kapacitet 25 % (25 % kvarvarande kapacitet).   |
| <b>3. Funktionsfel/<br/>igensättning<br/>utskovsluckor vid flöde<br/>med återkomsttid 100 år</b> |           |  |
|  | Start     | Flöde med återkomsttid 100 år .  |
|  | Tillägg 1 | Bortfall av 25 % avbördningskapacitet.   |
|  | Tillägg 2 | Bortfall av ytterligare 25 % avbördningskapacitet (50 % kvar).   |
|  | Tillägg 3 | Bortfall av ytterligare 25 % avbördningskapacitet (25 % kvar).   |
| <b>4. Funktionsfel/<br/>igensättning<br/>utskovsluckor vid<br/>dimensionerande flöde</b>         |           |  |
|  | Start     | Dimensionerande flöde .  |
|  | Tillägg 1 | Bortfall av 25 % avbördningskapacitet.   |
|  | Tillägg 2 | Bortfall av ytterligare 25 % avbördningskapacitet (50 % kvar).   |
|  | Tillägg 3 | Bortfall av ytterligare 25 % avbördningskapacitet (25 % kvar).   |
| <b>5. Storm</b>  |           |  |
|  | Start     | Driftsituation definieras beroende på anläggning, exempelvis: Större storm inträffar. Den pågår under 24 h och orsakar omfattande trädfällen längs med vägar (vad är rimligt baserat på Gudrun, hur stora vägar ska påverkas - trädhöjd i förhållande till vägbredd eller liknande? ). Stormen är känd i förväg. |
|  | Tillägg 1 | Stormen är inte känd i förväg.   |
|  | Tillägg 2 | Stormen orsakar kraftbortfall av samtliga yttre nät.   |
|  | Tillägg 3 | Stormen orsakar kommunikationsbortfall mellan DC och anläggningen.   |
|  | Tillägg 4 | Reservkraft startar ej.  |

|   |            |   |
|---|------------|---|
| <b>6. Kommunikationsbortfall</b>              |            |   |
|   | Start      | Driftcentralen tappar ordinarie kommunikation med anläggningen, start vid DG, 0-tappning. |
|   | Tillägg 1  | Driftcentralen tappar reservkommunikation med anläggningen.                               |
|   | Tillägg 2  | Bortfall av kraftstation .  |
|   | Tillägg 3  | Bortfall av ordinarie kraftmatning.   |
|   | Tillägg 4  | Bortfall av reservkraft (om flera finns, bortfall av det som matar flest luckor).         |
|   | Tillägg 5a | Bortfall av reservkraft 2 (om det finns flera).   |
|   | Tillägg 5b | Bortfall av reservkraft 3 (om det finns).   |
|   | Tillägg 6  | Dubblerad inställetid (andra anläggningar, svårt att nå).                                 |
|   | Tillägg 7a | DC kan ej nå personal i beredskap pga. utebliven mobilkommunikation.                      |
|   | Tillägg 7b | DC kan ej nå personal i beredskap pga. utebliven RAKEL-kommunikation.                     |
| <b>7. Fullständigt kommunikationsbortfall</b> |            |   |
|   | Start      | Driftcentralen tappar kommunikation med alla sina anläggningar.                           |
| <b>8. Felaktig vattennivåövervakning</b>      |            |   |
|   | Start      | Utebliven ordinarie vattennivåövervakning.  |
|   | Tillägg 1  | Utebliven vattennivåövervakning reserv.   |
|   | Tillägg 2  | Utebliven vattennivåövervakning reserv.   |
|   | Tillägg 3  | Förändring i flöde som ej upptäcks på DC.   |
| <b>9. Antagonistiska hot</b>                  |            |   |
|   |            | Definieras för respektive anläggning samt övergripande för organisationen.                |

## Bilaga E: Test av metod 3 för en fiktiv anläggning

### METOD

För att djupare analysera behov och möjligheter med metod tre togs en numerisk simuleringsmodell fram. Modellen testas på en fiktiv dammanläggning med egenskaper som beskrivs i Tabell 11-3 till Tabell 11-5. Tabell 11-5 Många av anläggningens egenskaper har förenklats, dessa förenklingar är endast gjorda för att erhålla relevanta data att redovisa i denna rapport till en rimlig omfattning.

Tabell 11-3 Dammegenskaper

|                                      |                              |
|--------------------------------------|------------------------------|
| <b>Dämningsgräns</b>                 | +100,00                      |
| <b>Dammkrön</b>                      | +105,00                      |
| <b>Volym upp till sänkningsgräns</b> | 1,78 miljoner m <sup>3</sup> |
| <b>Volym upp till dämningsgräns</b>  | 4,35 miljoner m <sup>3</sup> |
| <b>Volym upp till dammkrön</b>       | 6,1 miljoner m <sup>3</sup>  |

Tabell 11-4 Beskrivning av kraftstation

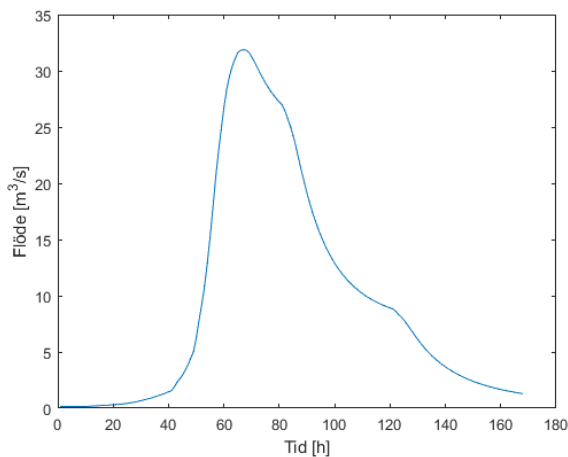
| <b>Aggregat</b> | <b>Utbyggnadsvattenföring [m<sup>3</sup>/s]</b> |
|-----------------|---|
| 1               | 20  |
| 2               | 20  |
| Totalt          | 40  |

Tabell 11-5 Beskrivning av utskovens avbördningskapaciteter vid DG.

| <b>Utskov</b> | <b>Max. avbördningskapacitet [m<sup>3</sup>/s]</b> |
|---------------|--|
| 1             | 71   |
| 2             | 71   |
| 3             | 71   |
| Totalt        | Ca 213   |

I varje tidssteg beräknar modellen volymförändringen i magasinet genom att jämföra inflöde och utflöde. Utifrån en magasinskurva över volym och magasinsnivå beräknas sedan förändringen i vattennivå.

Vid test av modellen bestäms inflödet till magasinet av en hydrograf som representerar en vårflod. Storleken på inflödet varierar mellan olika scenarier och därför multipliceras flödet från hydrografen med olika skalärer i olika fall. Hydrografen visas i Figur 11-3.

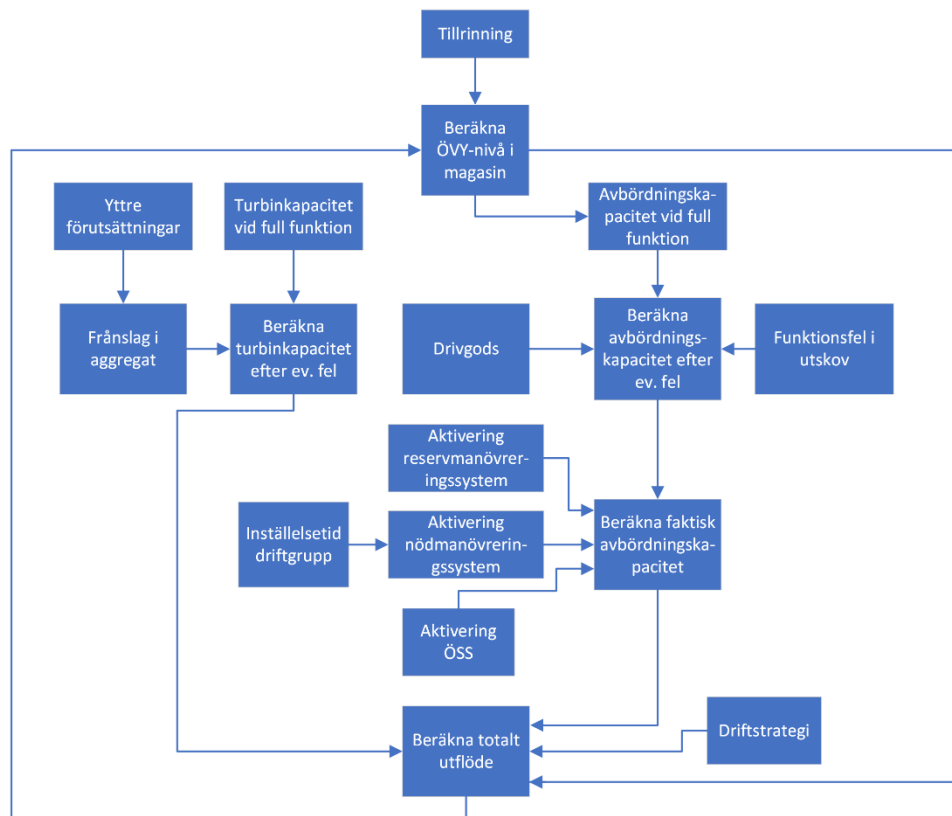


Figur 11-3 Hydrograf över inflödet till magasinet.

Utfödet ur magasinet under varje tidssteg bestäms med hjälp av de parametrar som beskrivs nedan:

- utskovens tillgänglighet samt eventuell drivgodsigensättning
- utskovens avbördningskapacitet
- aggregatens tillgänglighet
- aggregatens utbyggnadsvattenföring
- driftstrategin vid den aktuella vattennivån.

Ett översiktligt flödesschema över modellen visas i Figur 11-4. I en verklig anläggning skulle ytterligare förhållanden och system behöva modelleras.



Figur 11-4 Flödesschema över modellen.

För att analysera olika scenarier varierar ett antal parametrar mellan olika simuleringsfall. Dessa beskrivs nedan.

- Inflödet som visas i Figur 11-3 kan vara multiplicerat med mellan 1 och 6 i steg om 0,5. Dessa flöden motsvarar i stort spannet från drivvattenföring till dimensionerande flöde.
- Utskoven kan bli igensatta av drivgods till 0 %, 25 %, 50 %, 75 % eller 100 % vilket reducerar dess avbördningskapacitet med samma värde.
- Kraftstationen kan få frånslag i ett 0, 1 eller 2 aggregat. Detta syftar till att simulera effekt av frånfall av yttre nät, eller plötsligt uppkomna fel på enskilda aggregat.
- Kraftstationen slås dessutom ut vid höga flöden eller höga magasinsnivåer. Detta för att modellera inverkan på kraftstation av hög ÖVY eller ansamling av drivgods meddrivet av höga flöden.
- 0, 1, 2 eller 3 av utskoven kan vara otillgängliga på grund av funktionsfel i luckorna.
- 0, 1, 2 eller 3 av de eventuella funktionsfelen kan bli avhjälpade med hjälp av reservmanövreringssystem.
- 0, 1, 2 eller 3 av de eventuella funktionsfelen kan bli avhjälpade med hjälp av nödmanövreringssystem, med en viss fördröjning efter att driftgruppen anlant.
- 0 eller 1 av de eventuella funktionsfelen kan bli avhjälpade med hjälp av överströmningsskydd.
- Driftgruppen kan försenas med 0 till 10 timmar utifrån dess ordinarie inställetid.

En testmatris skapas som består av samtliga möjliga kombinationer av ovanstående parametrar. Testmatrisen rensas på fall som är irrelevanta, exempelvis fall där fler avhjälpande åtgärder aktiveras än det finns utskovsfel<sup>45</sup>. Detta resulterar i en testmatris bestående av 28 050 scenarier.

För varje fall i testmatrisen görs en körning av simuleringsmodellen från vilken utdata sparas. Utdata inkluderar tidsserier över inflöde, utflöde, turbinvattenföring, avbördning och magasinnivå. Andra värden som sparas är högsta magasinnivå, hur länge magasinnivån låg över dämningssgräns, samt vid vilka tidpunkter vissa händelser inträffade. En resultatmatris skapas där högsta magasinnivå samt tid över dämningssgräns för varje scenario presenteras. För djupare analys av specifika scenarier kan det sparade resultatet analyseras i efterhand i simuleringsprogrammet.

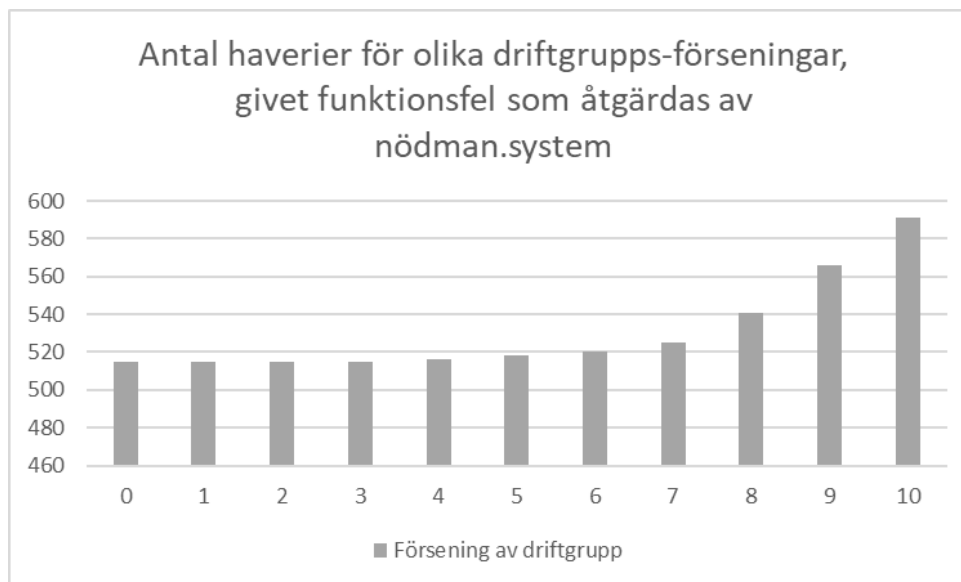
För de resultat som presenterats i avsnitt 16.2 är tidsteget i modellen 1 timme. Tidssteget kan ändras i modellen om mer noggranna resultat önskas, dock på bekostnad av ökad modelleringstid.

---

<sup>45</sup> Modellen är byggd på sådant vis att det inte går att återställa fler utskov än som skadats. Modellen i dessa fall skulle i dessa fall producera identiska resultat vilket endast resulterar i ökad beräkningstid.

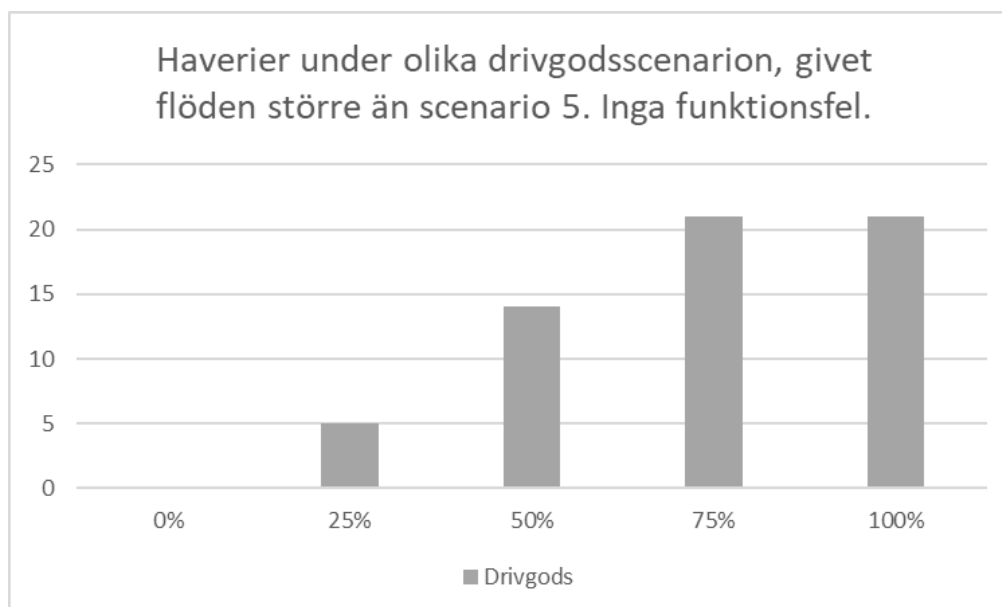
## RESULTATEXEMPEL – META ANALYS

I kapitel 8.2 redovisades resultatanalys för en förenklad fiktiv anläggning med fiktiva resultat, detta gjordes för att belysas hur metaanalysen kan genomföras och vilka slutsatser som kan dras från detta. I detta kapitel redovisas hur metaanalysen genomförts för den fördjupade analysen där resultatet verklighetstroget modellerats för en fiktiv anläggning.



Figur 11-5 Resultatanalys för försening av driftgruppen. Observera att y-axeln börjar på 460.

I Figur 11-5 redovisas hur driftgruppens försening påverkar antalet haverier under premisen att det inträffat en funktionsfel, samt att detta åtgärdats av driftgruppen och inte av reservmanövreringssystemet. Ur resultatet kan det konstateras att det inte är någon större ökning i haverier mellan 0 och 4 timmars försening av driftgruppen, medan när förseningen överstiger 6 h börjar en större mängd haverier att inträffa. Detta beror troligtvis på att de ca 500 scenarion som leder till haveri oavsett driftgruppens inställetid är ohanterbara för anläggningen oavsett inställetid.



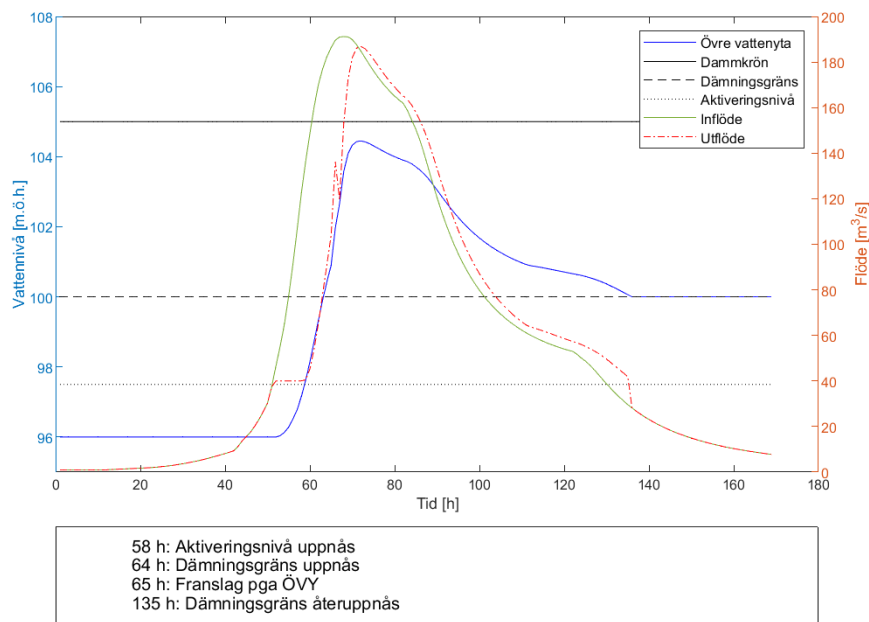
Figur 11-6 Antal haverier under höglödessituationer med olika drivgodsigensättningar givet att inga funktionsfel inträffar

I Figur 11-6 redovisas hur antalet haverier ökar med olika drivgodsscenarion, under premissen höglöde och inga funktionsfel. I exemplet redovisas att anläggningen klarar många scenarion med 25 % drivgodsigensättning, men att det vid igensättning om 75 % leder till lika många haverier som 100 % igensättning.

#### RESULTATEXEMPEL – DETALJERAD ANALYS

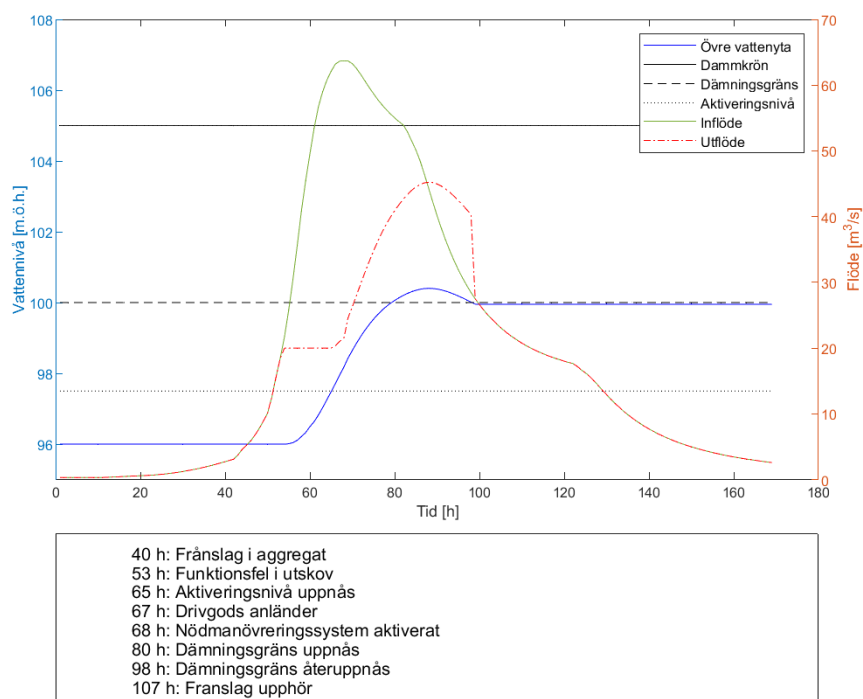
I detta avsnitt presenteras exempel på hur resultaten för varje testfall kan illustreras grafiskt. I varje figur visas inflöde och utflöde till magasinet under varje tidssteg samt nivån för övre vattenyta (ÖVY). Även aktiveringsnivå, dämningssgräns och dammkrön finns utskrivet. Under grafen presenteras en ruta med händelser som sker under tidsserien. Aktiveringsnivå är en i driftstrategin bestämd nivå som påverkar när anläggningen påbörjar avbördning under vårflood. I Figur 11-7 kan driftstrategins inverkan identifieras. Inledningsvis (timme 0-50) körs allt tillgängligt vatten genom kraftstationen, efter detta (timme ca 50-58) överstiger tillrinningen turbinvattenföringen och magasinet stiger. Magasinet når aktiveringsnivån (timme 58). Då börjar anläggningen avbörda delar av avbördningskapaciteten. När magasinet närmar sig DG nyttjas hela avbördningskapaciteten.

I Figur 11-7 presenteras ett exempel på resultat för när inflödet multipliceras med 6. I övrigt uppstår inga problem. I detta fall överskrider dämningssgräns rejält och dammkrön uppnås nästan. Anläggningens förmåga att hantera scenariot är beroende på dammens förmåga till överdämning.



Figur 11-7 Resultatexempel för högt flöde utan övriga problem.

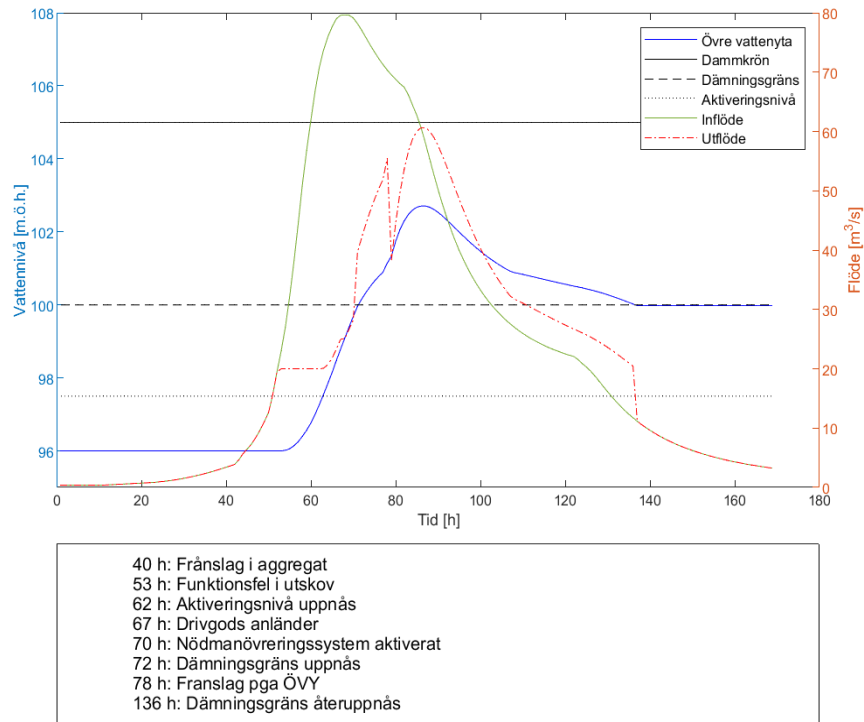
I Figur 11-8 presenteras ett annat exempel på resultat. I detta fall är flödet multiplicerat med 2,0, vilket motsvarar ca 1,5 turbinvattenföring i peakflöde. Utskovsluckorna blir igentäppta av drivgods till 25 %. 1 aggregatfranslag sker. Funktionsfel sker i 2 av utskovsluckorna. Inget reservmanövreringssystem eller ÖSS aktiveras. Ett av felen avhjälpas med hjälp av nödmanövreringssystem och det andra avhjälpas inte. Driftgruppen är försenad med 2 timmar. I detta fall överskrids dämningssgräns med ca 40 cm.



Figur 11-8 Resultatexempel med parametrar beskrivna ovanför.

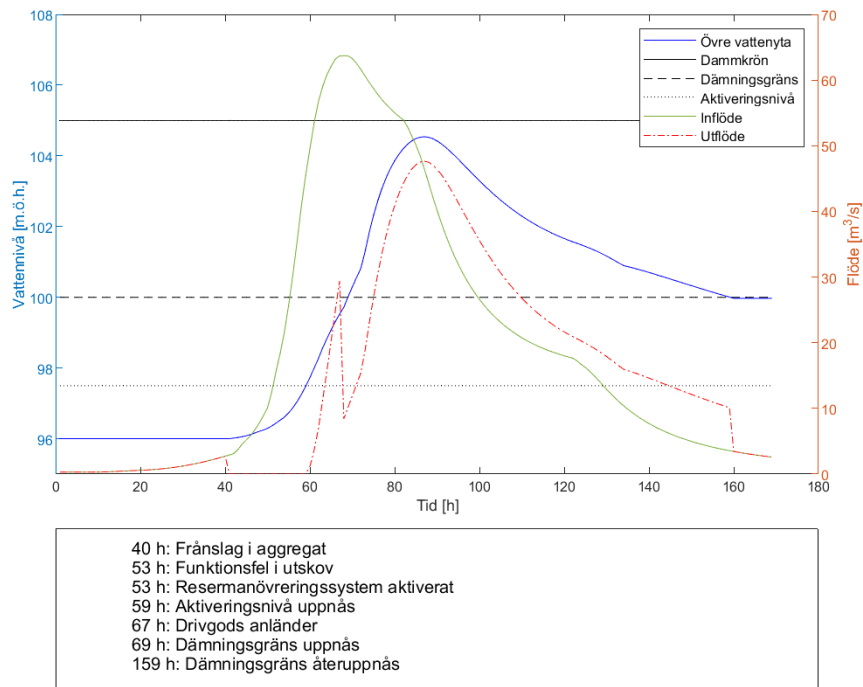


I Figur 11-9 presenteras ett annat exempel på resultat. Exemplet är liknande det som presenterades i föregående exempel. Skillnaden är att flödet är multiplicerat med 2,5 samt att driftgruppen nu är hela 7 timmar försenad. I det här fallet överskrids dämningens gränshöjd med ca 2,7 m.



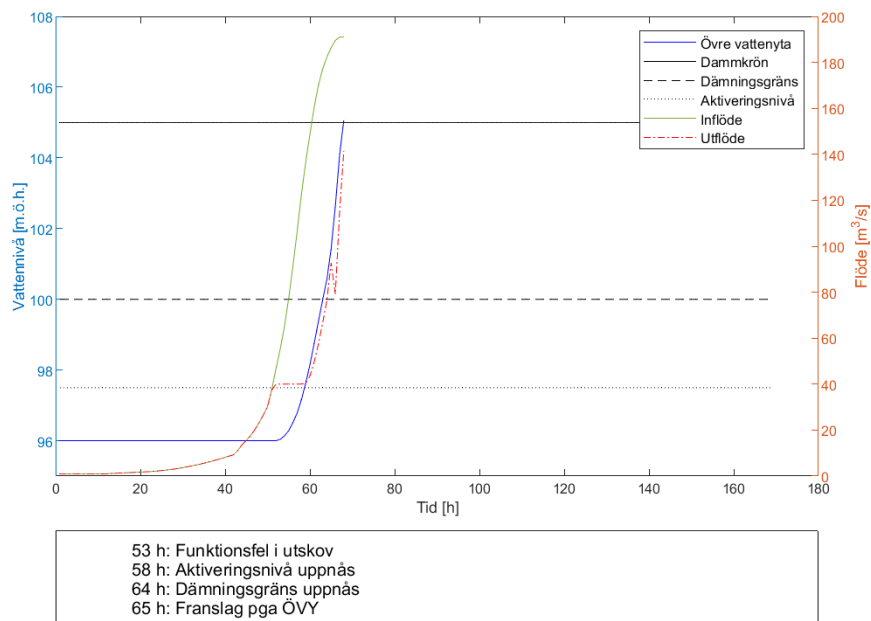
Figur 11-9 Resultatexempel med parametrar beskrivna ovanför.

I Figur 11-10 presenteras ett annat exempel på resultat. I det här fallet multipliceras inflödet med 2,0. Utskoven blir igentäppta med drivgods till 75 %. Frånslag sker i båda aggregat. Funktionsfel sker i en lucka som avhjälpas av reservmanövreringssystem. I detta fall överskrids dämmningsgräns med ca 4,5 m.



Figur 11-10 Resultatexempel med parametrar beskrivna ovanför.

I Figur 11-11 visas ett exempel på resultat där flödet är multiplicerat med 6 och ett utskovsfel sker som inte kan avhjälpas. I det fallet överskrider vattennivån dammkrönet.



Figur 11-11 Resultatexempel med parametrar beskrivna ovanför.

# STRESSTEST AV DAMMANLÄGGNINGAR

Genom att genomföra ett stresstest för dammanläggningar kan dammägaren få en fördjupad förståelse för sin dammanläggnings förmåga att hantera kombinationshändelser och förstå anläggningens säkerhetsmarginaler. Metoden kan användas som en riskidentifieringsmetod eller som en screeningmetod för att få en portföljövergripande säkerhetskontroll i linje med vad som gjordes inom det europeiska kärnkraftsområdet efter Fukushimaolyckan.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på [energiforsk.se](http://energiforsk.se).

