

## Forskning

---

# Haverihantering

En sammanställning och värdering av kunskapsläget  
om haverifenomen och haverihantering

APRI 4 - Rapport

Veine Gustavsson

November 2002



Forskningsprojektet APRI 4 har genomförts i samarbete med mellan följande organisationer:

- Statens kärnkraftinspektion
- Ringhals AB
- OKG Aktiebolag
- Forsmarks Kraftgrupp AB
- Barsebäck Kraft AB
- Teollisuuden Voima Oy (TVO)

Projektet har varit underställd en styrgrupp med representanter från SKI och kraftbolagen enligt följande:

Mauritz Gärdinge, OKG (ordförande)

Oddbjörn Sandervåg, SKI

Ninos Garis, SKI

Anders Henoch, Ringhals

Ingvar Berglund, FKA

Erik Larsen, BKAB

Heikki Sjövall, TVO

Stig Rolandsson, Safetech Engineering (projektledare)



## Forskning

---

### **Haverihantering**

En sammanställning och värdering av kunskapsläget om haverifenomen och haverihantering

APRI 4 - Rapport

Veine Gustavsson

SwedPower AB  
Box 528  
162 16 Stockholm

November 2002

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Statens kärnkraftinspektion, SKI. Slutsatser och åsikter som framförs i rapporten är författarens/författarnas egna och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med SKI:s.



## SAMMANFATTNING

Målet med detta arbete är att sammanställa resultat av de senaste årens forskning om svåra haverier och vidare bedöma möjligheterna till förbättringar av nuvarande strategier för haverihantering i svenska och finska BWR. Ett annat syfte har varit att undersöka vad vi kan lära oss av deltagandet i BWROG (BWR Owners Group), speciellt vad gäller strukturering och validering av dokumentation för hantering av svåra haverier.

Större delen av projektet har omfattat följande haverifenomen/frågeställningar:

- Tidig tryckavlastning på grund av hög vätgasproduktion
- Återkriticitet vid återflödning av skadad härd
- Tankgenomsmältning
- Ångexplosion efter tankgenomsmältning
- Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning
- Vätgasbrand i reaktorinneslutningen
- Läckande inneslutning
- Vätgasbrand i reaktorbyggnaden
- Långtidsförloppet efter ett svårt haveri
- Haveri under revisionsavställning
- Behov av information för att genomföra åtgärder

Utgående från dagens kunskapsläge bedöms, för vart och ett av dessa områden, möjligheterna att förbättra strategierna för haverihanteringen.

Den genomgång som gjorts har gett som resultat att kunskaperna är tillräckliga på följande områden: tidig tryckavlastning på grund av hög vätgasproduktion, återkriticitet vid återflödning av skadad härd, ångexplosion efter tankgenomsmältning, vätgasbrand i reaktorinneslutningen och vätgasbrand i reaktorbyggnaden. Haverihanteringen är vidare väl utvecklad för att ta hand om dessa frågor. De förbättringar som är möjliga att åstadkomma är oftast anläggnings specifika.

För de övriga områdena finns däremot motiv att driva forskningen vidare. Det finns frågeställningar, där ett bättre kunskapsläge kan ge underlag för att utveckla strategierna för haverihantering. Slutsatser och rekommendationer ges i denna rapport.

En del av detta projekt gällde hur vi drar nytta av vårt medlemskap i BWROG, som under de senaste åren använt stora resurser för att utveckla haverihantering för BWR i USA.

Vi har jämfört vår dokumentation för hantering av svåra haverier med motsvarande material från BWROG. En tydlig skillnad är att BWROG har en mera omfattande och mera systematiskt ordnad dokumentation än vad vi har. Detta gäller både underlag för framtagning av störningsinstruktioner och beslutsstöd till den tekniska stödcentralen.





## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>MÅL OCH PROJEKTORGANISATION</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>AVGRÄNSNINGAR</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>PROBLEMOMRÅDEN</b> .....	<b>9</b>
4.1	Tidig tryckavlastning på grund av hög vätgasproduktion .....	9
4.2	Återkriticitet vid återflödning av skadad härd .....	10
4.3	Tankgenomsmältning.....	12
4.4	Ångexplosion efter tankgenomsmältning .....	16
4.5	Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning.....	19
4.6	Vätgasbrand i reaktorinneslutningen .....	24
4.7	Läckande inneslutning .....	27
4.8	Vätgasbrand i reaktorbyggnaden .....	28
4.9	Långtidsförloppet efter ett svårt haveri.....	30
4.10	Haveri under revisionsavställning .....	32
4.11	Behov av information för att genomföra åtgärder .....	35
<b>5</b>	<b>SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER</b> .....	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>REFERENSER</b> .....	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>APPENDIX A: STÖRNINGSINSTRUKTIONER</b> .....	<b>40</b>



## 1 INLEDNING

Den större delen av detta projekt omfattar två aktiviteter. Den första innehåller sammanställning av dagens kunskapsläge inom ett antal utvalda områden. I den andra görs, utgående från dagens kunskapsläge, bedömningar av möjligheterna att förbättra strategierna för hantering av svåra haverier i svenska och finska BWR.

En annan (mindre och fristående del av projektet) beskrivs i ett appendix till denna rapport, som handlar om vad vi kan lära oss av BWROG inom svåra haverier.

I samband med införandet av konsekvenslindrande system vid de svenska kärnkraftverken och TVO utvecklades också nya strategier och instruktioner för hantering av svåra haverier.

Sedan detta program genomförts har insatserna i Norden varit relativt begränsade vad gäller utvecklingen av strategierna. En omfattande forskning har dock bedrivits för att få bättre kunskaper om olika fenomen (smältans kylbarhet, ångexplosioner, vätgasförbränning osv.) för att öka förståelsen för händelseförlopp under svåra haverier.

Nuvarande strategier för haverihantering är till stor del baserade på RAMA-projekten, som genomfördes innan de konsekvenslindrande systemen för svåra haverier infördes, se RAMA slutrapport [1].

Arbetet inom RAMA genomfördes under följande förutsättningar:

- Tankgenomsmältning förutsattes ske sedan härdsador inträffat.
- Smältan förutsattes vara kylbar efter tankgenomsmältning.
- Större ångexplosioner som kan allvarligt skada inneslutningen förutsattes inte ske.

Därför inriktades ansträngningarna på att bevara inneslutningen intakt som en barriär mot omgivningen. Under senare år har en omsvängning skett vad gäller möjligheterna att kyla den skadade härden i reaktortanken. Sannolikheten för genomsmältning av tanken bedöms som lägre än då de konsekvenslindrande systemen togs fram. Detta innebär generellt att inneslutningsfenomen inte är lika betydelsefulla som tidigare.

Strategin för haverihanteringen har som mål att återställa kylningen av den skadade härden och att bibehålla inneslutningens integritet. Under det inledande skedet av haveriet har kylning av den skadade härden i reaktortanken högsta prioritet. Om detta inte lyckas, dvs. om tankgenomsmältning inträffar, sprinklas inneslutningen för att motverka tryckuppbyggnaden och tvätta ut aerosoler ur atmosfären i inneslutningen. Målet är då att uppnå ett stabilt sluttillstånd, som innebär att härdresterna är kylda. Därigenom skyddas också bottenplattan mot genomsmältning.

## 2 MÅL OCH PROJEKTORGANISATION

Följande mål gäller:

- Att ta fram underlag för att bättre strukturera vår dokumentation och validera våra strategier för haverihantering.

- Att gå igenom de senaste årens forskning om svåra haverier och sammanställa resultat av betydelse för hantering av svåra haverier.
- Att utgående från denna sammanställning bedöma möjligheterna till förbättringar av nuvarande strategier i svenska och finska BWR.

Projektet leddes av Veine Gustavsson, SwedPower. Vidare fanns en projektgrupp med följande medlemmar: Wiktor Frid SKI, Ninos Garis SKI, Heikki Sjövall TVO, Carl-Johan Kemgren OKG, Joachim Bende FKA, Henri Skrede Ringhals och Ulf Soldéus Barsebäck. Tidigare deltog Håkan Almroth Ringhals och Carl-Göran Lindvall Barsebäck. Gruppen har gett värdefulla synpunkter på innehållet i denna rapport.

### **3 AVGRÄNSNINGAR**

Beskrivningen av dagens kunskapsläge för de olika områden som tas upp i det följande avgränsas till vad som är av intresse för haverihanteringen i svenska och finska BWR. Detta betyder att kunskapsläget beskrivs relativt koncentrerat i denna rapport.

I projektet tas följande problemområden upp:

- Tidig tryckavlastning på grund av hög vätgasproduktion
- Återkriticitet vid återflödning av skadad härd
- Tankgenomsmältning
- Ångexplosion efter tankgenomsmältning
- Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning
- Vätgasbrand i reaktorinneslutningen
- Läckande inneslutning
- Vätgasbrand i reaktorbyggnaden
- Långtidsförloppet efter ett svårt haveri
- Haveri under revisionsavställning
- Behov av information för att genomföra åtgärder

Utgående från kunskapsläget bedöms, för vart och ett av dessa problemområden, möjligheterna att förbättra haverihanteringen. De förslag som tas fram skall vara generella och gälla BWR i Sverige och Finland.

Några av problemområdena är inbördes beroende. Detta gäller tex. tankgenomsmältning och återkriticitet under återflödning av skadad härd. I de fall då dessa beroenden är av betydelse för haverihanteringen beaktas de i denna rapport.

För några av de områden, som angetts ovan är det inte möjligt att ge förslag till förbättringar av haverihanteringen. I dessa fall ges en sammanfattning av dagens kunskapsläge samt en kortfattad beskrivning av nuvarande haverihantering.

## 4 PROBLEMMOMRÅDEN

### 4.1 Tidig tryckavlastning på grund av hög vätgasproduktion

#### 4.1.1 Bakgrund

Om det sker en kraftig vätgasproduktion under ett svårt haveri kommer tryckuppbyggnaden i inneslutningen att snabbas upp och förstärkas. Detta kan leda till en tidig aktivering av skrubbern.

#### 4.1.2 Kunskapsläge

Tidig tryckavlastning till följd av kraftig vätgasgenerering har analyserats för Forsmark 1-2 med hjälp av MAAP. Detta arbete finns avrapporterat i [2].

Som referensfall i dessa beräkningar valdes ett totalt elbortfall, där vätgasmängden beräknad med MAAP blir 765 kg, vilket motsvarar 34% Zr-oxidation. Tryckavlastning av inneslutningen aktiveras via system 362 när inneslutningens absoluttryck överstiger 0,57 MPa. Tankgenomsältning sker i detta fall 6,4 h efter inledande händelse. System 362 (skrubbern) aktiveras 9,8 h efter inledande händelse.

För att studera vad som händer om mera vätgas tillförs har ett fall, utgående från referensfallet, körts med vätgas motsvarande 100% Zr-oxidation, 2280 kg vätgas. Den extra vätgasmängden har tillförts till inneslutningen omedelbart efter tankgenomsältningen. Detta ger till resultat att skrubbern aktiveras 7,3 h efter inledande händelse, dvs. 2,5 h tidigare än i referensfallet.

I de båda fallen ovan har det förutsatts att system 365 för sprinkling av inneslutningen inte används. Detta har stor betydelse för tryckuppbyggnaden. Ett fall, utgående från referensfallet, har därför körts med system 365 aktiverat 4 timmar efter inledande händelse fram till den tidpunkt (ca 20 h efter inledande händelse) då nivån i kondensationsbassängen når vakuumbrytarna. System 365 har en kapacitet av 75 kg/s. Aktivering av skrubbern sker i detta fall först 18,1 h efter inledande händelse. Sprinkling av inneslutningen fördröjer alltså tryckavlastningen med mer än 8 h i detta fall.

Ytterligare ett fall med sprinkling av inneslutningen har körts, utgående från fallet ovan med 2280 kg vätgas. Även här aktiverades system 365 efter 4 h räknat från inledande händelse. I detta fall aktiverades skrubbern 12,1 h efter inledande händelse. Detta innebär att sprinklingen gav en fördröjning av tryckavlastningen med nästan 5 h.

#### 4.1.3 Haverihantering

I haverihanteringen ingår användning av systemet för sprinkling av inneslutningen för att motverka tryckuppbyggnaden och för att tvätta ner aerosoler till sumpen. Sprinklingen bidrar till att fördröja tryckavlastning på grund av kraftig vätgasgenerering tidigt under haveriet.

#### 4.1.4 Slutsatser

En kraftig vätgasbildning tidigt under ett haveri kan leda till en tidigare aktivering av skrubbern än fall med lägre vätgasbildning. Av större betydelse har dock användning av inneslutnings sprinklingen för att fördröja tryckavlastning.

## 4.2 Återkriticitet vid återflödning av skadad härd

### 4.2.1 Bakgrund

Under nedsmältning av härden smälter styrstavarna före bränslet eftersom styrstavsmaterialet har lägre smältpunkt än bränslet. Detta innebär att det kan bildas styrstavs fria regioner i härden med i det närmaste intakt bränslegeometri. Om kylning av bränslet startas genom inpumpning av borfritt vatten under dessa förhållanden kommer sannolikt återkriticitet att inträffa.

Sannolikheten för återkriticitet är beroende av när inpumpningen av vatten startas. Det tidsintervall, som är mest kritiskt, börjar då en stor del av styrstavarna smält och sträcker sig fram till den tidpunkt då bränslet i härden börjar degraderas kraftigt.

Om återkriticitet inträffar kommer effekten i bränslet att öka. Detta kan både ske kortvarigt som en effektspik (eventuellt prompt kriticitet) och mera utdraget. Under effekttoppen i början av återflödningen kommer effektutvecklingen snabbt att dämpas av de negativa reaktivitetskoefficienterna.

Prompt kriticitet anses inte utgöra ett hot mot reaktortanken eller inneslutningen och leder alltså inte till utsläpp till omgivningen. Däremot kan återkriticitet ge upphov till ett tillstånd i härden med en effektutveckling av upp till 20% av nominell effekt. Om då inte inneslutningen kyls tillräckligt kan brottrycket överskridas.

### 4.2.2 Kunskapsläge

Som beskrivits ovan smälter styrstavarna före bränslet. Detta innebär att sannolikheten för återkriticitet är hög om borfritt vatten tillförs för att kyla den skadade härden.

Under nedsmältningsförloppet kan tre tidsintervall identifieras:

- Fram till den tidpunkt då styrstavarna i övre delen av härden börjar smälta.
- Från början av härdnedsmältning och fram till kraftig degradering av härden.
- Efter kraftig degradering av härden.

Om återkriticitet inträffar, sker det i det andra av dessa tidsintervall. Detta leder till en effektutveckling i bränslet, som dock dämpas på grund av negativ reaktivitetsåterkoppling, främst den negativa bränsletemperaturkoefficienten.

Återflödning av en skadad härd leder också till en ökad oxidation av kapslingen genom reaktion mellan vattenånga och zirkonium. Denna reaktion är exotermisk och medför att nedsmältningsförloppet snabbas upp.

För återkriticitet är det lämpligt att skilja mellan snabba och långsamma förlopp. Omedelbart då borfritt vatten tillförs en styrstavs fri härd uppkommer en snabb effekthöjning. Därefter kan effektutvecklingen fortsätta om vatten tillförs härden och inga stora förändringar i geometrin inträffar.

Ett stort antal analyser av återkriticitet i samband med återflödning i BWR har genomförts. Ett exempel finns i [3]. I denna rapport ges följande resultat:

- Att återkriticitet orsakar brott på reaktortanken är osannolikt.
- Att återkriticitet kan ge ett tillstånd i reaktor med en effektutveckling i härden av ca 20% av nominell effekt. I detta fall måste inneslutningen kylas för att inte brottrycket skall överskridas.

Det bör betonas att de analyser som ges i [3] är utförda med konservativa förutsättningar. Därför är det realistiskt att räkna med lägre effekt än 20%.

För att bibehålla ett detta tillstånd måste vatten kontinuerligt tillföras till reaktortanken. Dessutom krävs att bränslegeometrin är tillräckligt stabil. I annat fall kommer den att förändras mot ett underkritiskt tillstånd.

Återkriticitet i BWR har vidare analyserats i EU-projektet SARA, som finns avrapporterat i [4] och [10]. Beräkningar har utförts för reaktorerna Oskarshamn 3 och Olkiluoto 1 med programmen SIMULATE-3K, APROS och RECRIT.

Följande frågeställningar har studerats i SARA:

- Energiutveckling under prompt kriticitet.
- Effektutveckling under tiden efter initialskedet.
- Åtgärder för att lindra konsekvenserna av återkriticitet.

De resultat som erhållits i SARA-projektet överensstämmer i allt väsentligt med vad som kommit fram i tidigare analyser. Karakteristiskt för denna typ av återkriticitet är en kortvarig effekttopp, som sedan kan övergå i effektutveckling, som är högre än resteffekten.

En skillnad mellan resultaten från SARA och från tidigare studier är att energiutvecklingen under den inledande effekttoppen är högre. Detta kan ge en snabbare degradering av hårdheten. Förloppet har dock inte undersökts närmare.

Om återflödning av skadad hård ger ett tillstånd med konstant effektutveckling, som är större än resteffekten, finns risk för långsam övertryckning av inneslutningen. Filtreerad tryckavlastning kommer att motverka tryckökningen, men om reaktoreffekten är tillräckligt hög kommer så småningom brottrycket för inneslutningen att överskridas.

Ett sådant scenario har analyserats för Olkiluoto 1 och 2. Detta har avrapporterats i [5]. Det scenario, som valts är en station blackout där växelspänningen återkommer efter 4000s. Trycknedtagning av primärsystemet sker 1800s efter inledande händelse.

Reaktoreffekten under den inledande kriticiteten har beräknats med programmen RECRIT och APROS. Dessa beräkningar visade att den totala energin som utvecklas under denna effektspik var mindre än en fulleffektsekund, dvs. mycket liten. Vidare indikerar resultaten från RECRIT och APROS att reaktoreffekten stabiliserar sig på en nivå av 10-20% av nominell effekt.

MELCOR har använts för att beräkna tryckuppbyggnaden i inneslutningen. På grund av osäkerheterna i effektnivå har dessa beräkningar utförts för 8%, 10%, 14% och 19% av nominell reaktoreffekt.

I alla dessa fyra fall sker en uppvärmning av kondensationsbassängen, som sedan börjar koka. Detta leder till att inneslutningssprinklingen slutar fungera på grund av pumpkavitation. Filtreerad tryckavlastning aktiveras, men är dimensionerad för att ta hand om 1% av nominell effekt och räcker alltså inte till för att hindra att trycket i inneslutningen stiger.

För fallet med 8% effekt börjar kondensationsbassängen koka efter 1,3h och övertryckning av inneslutningen inträffar efter 4,2h (vid 10 bar). Motsvarande för fallet med 19% effekt är 34 minuter och 1,3 timmar.

Ett annat resultat från SARA-projektet är att återkriticitet inträffar tidigare ju högre kylflödet är. Vidare blir effektutvecklingen högre i det fortsatta förloppet. Det bör dock

observeras att dessa resultat inte utan vidare kan extrapoleras till en fullskaleanläggning. För att få fram underlag till förbättringar av haverihanteringen skulle det därför krävas ytterligare arbete.

Återkriticitet finns med som ett av de haverifenomen, som kan hota inneslutningens integritet i PSA nivå 2 studien för Ringhals 1, avrapporterad i [6]. Det bidrag som återkriticitet ger till brott på inneslutningen är relaterat till att ett tillstånd med en effektutveckling av 10-20% råder under så lång tid att värmesänkan (kondensationsbassängen) går förlorad.

#### **4.2.3 Haverihantering**

SARA-projektet ger följande förslag för att motverka återkriticitet under återflödning av skadad BWR-härd:

- Uppgradering av borinsprutningssystemet så att det startar automatiskt på högt neutronflöde efter snabbstopp.
- Begränsa kylningen av den skadade härden om det är troligt att styrostavarna börjat smälta.
- Fördröja trycknedtagning för att motverka relokering av styrostavar.

Haverihanteringen innehåller, med undantag av TVO, inga speciella instruktioner för att hantera en återkriticitet. För Olkiluoto har möjligheten att detektera återkriticitet med hjälp av SIRM-detektorerna analyserats och bedömts som en möjlig metod.

#### **4.2.4 Slutsatser**

Följande slutsatser kan dras:

- Då en härd med i stort sett intakt bränsle, men med nedsmälta styrostavar, kyls med borfritt vatten är sannolikheten för återkriticitet stor. Om detta leder till en långvarig effektutveckling, som är högre än resteffekten finns risk för långsam övertryckning av inneslutningen.
- I de flesta fall beaktas inte återkriticitet i instruktionerna för haverihantering.
- Återkriticitet går att förhindra med hjälp av ett snabbt verkande borsystem.
- Genom reducering av kylflödet till den skadade härden kan återkriticitet fördröjas. Om en sådan åtgärd utförs måste kylflödet hållas tillräckligt högt för att kyla härden. Vidare kräver detta ytterligare analyser som underlag till ändringar i instruktionerna för haverihanteringen.
- Mätningar för att detektera återkriticitet är ett värdefullt stöd i haverihanteringen.

### **4.3 Tankgenomsmältning**

#### **4.3.1 Bakgrund**

Reaktortanken är en viktig barriär för utsläpp till inneslutningen under ett haveri. Genom att den skadade härden innehålls i reaktortanken kommer påkänningarna på inneslutningen att bli mindre än om tankgenomsmältning inträffar. Därigenom minskar sannolikheten för större utsläpp av aktivitet till omgivningen.

Tankgenomsmältning kan ske på två sätt, lokalt eller globalt. I det första fallet angriper smältan en genomföring i botten av reaktortanken. Om genomsmältning sker strömmar



smältan ut via genomföringen. Global tankgenomsmältning innebär att en större del av reaktortanken lösgörs på grund av krypbrott. I detta fall kommer stora mängder smälta att momentant strömma ut i inneslutningen. En utförlig genomgång av tankgenomsmältning, avrapporterad i [7], gjordes inom APRI 3.

Frågan om tankgenomsmältning är av betydelse för utformningen av haverihanteringen. Om sannolikheten för tankgenomsmältning kan visas vara mycket liten kan haverihanteringen förenklas. Ifall smältan hålls kvar i reaktortanken kommer haverifenomen som vätgasförbränning, ångexplosioner i inneslutningen och genomsmältning av bottenplattan att sakna betydelse. Detsamma gäller större och mindre otätheter i inneslutningen mot omgivningen. Däremot kvarstår bypass sekvenser.

Två principiellt olika sätt finns för att hindra tankgenomsmältning. Det första innebär att smältan kyls genom att vatten tillförs till reaktortanken. I det andra fallet kyls reaktortanken underifrån med vatten. I våra reaktorer används den första metoden, dvs. tillförsel av vatten till primärsystemet. Den andra metoden är mer användbar i anläggningar med lägre effekttäthet än i våra lättvattenreaktorer.

#### 4.3.2 Kunskapsläge

I beskrivningen av dagens kunskapsläge är det lämpligt att skilja mellan de båda metoderna, som angetts ovan, för att hindra tankgenomsmältning, dvs. att tillföra vatten till primärsystemet eller att kyla tanken underifrån med vatten.

##### *Kylning genom att tillföra vatten till primärsystemet*

Tidsmässigt kan kylningen av smälta i reaktortanken genom tillförsel av vatten delas upp i två huvuddelar:

- Nedsmältningsförloppet och omfördelning av smälta ned mot tankbotten
- Växelvekan mellan smältan och tankbotten.

Den tidiga delen av nedsmältningsförloppet kan numera med tillräcklig noggrannhet simuleras med de beräkningsprogram, som finns tillgängliga.

Den senare delen av nedsmältningsförloppet är däremot svårare att förutsäga med beräkningar. Forskningen om härdnedsmältning har därför på senare tid alltmer koncentrerats på denna del.

Ett stort antal internationella forskningsprogram har genomförts om härdnedsmältning och gett intressant kunskap inom detta område.

Om kylningen av härden försämrats kommer säkerhetssystem att aktiveras så att vatten tillförs till primärsystemet för att återfå normal temperatur i bränslet.

En komplikation är att återflödning kan ge ökad oxidation av kapslingen och produktion av vätgas. Detta är en exotermisk reaktion, som alltså påskyndar nedsmältningsförloppet.

Ett av experimentprogrammen för att studera återflödning av skadad härd har bedrivits i försöksuppställningen QUENCH i Karlsruhe, Tyskland. Resultat från dessa experiment finns rapporterade i [8] och presenterades vid CSARP-mötet 1999. Ett bränsleknippe (vanligen 20 stavar med längden 2,5 m) uppvärmdes elektriskt och kylades sedan snabbt ner genom att en omgivande behållare fylld med vatten snabbt fördes upp längs knippet. Mängden vätgas, som bildades uppmättes.

Resultaten av dessa experiment har använts för validering av beräkningsprogram, bl.a. SCDAP/RELAP. En rapport [9] om detta presenterades också under CSARP-mötet. Fram till återflödningen var överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta vätgasmängder god. Däremot behöver modellerna för återflödning förbättras.

Ett annat problem, som är speciellt för BWR, är att återflödning kan leda till återkriticitet. Detta sammanhänger med att styrvägar har lägre smältpunkt än bränslet. Om återflödning sker vid en tidpunkt då bränslet i stort sett är intakt, men styrvägar nedsmälta, kan en del av kärnan bli överkritisk. Denna frågeställning har undersökts i EU-projektet SARA, som avrapporterades i [4] och [10]. Som referensreaktorer i denna studie användes Oskarshamn 3 och Olkiluoto 1.

I SARA-projektet genomfördes beräkningar på sekvenser, där den inledande händelsen var total station blackout, men elmatningen återställdes sedan styrvägar i kärnan smält. Den effekttopp, som erhöles genom återkriticitet, analyserades (med avseende på tids- och rumsberoende) med programmen SIMULATE-3K, APROS och RECRIT.

Inom APRI 3 genomfördes en serie småskaliga experiment för att studera kylningen av reaktortanken och tankgenomföringar vid kärnsmälda.

Dessa experiment, som utfördes av FAI, syftade till att undersöka möjligheterna att förhindra tankgenomsmältning i en ABB Atom BWR. I dessa försök användes en tank med en inre diameter av ca 30 cm och försedd med en neutrondetektorgenomföring i botten. Totalt nio experiment utfördes med termitsmälda (en blandning av aluminiumoxid och järn) för att simulera kärnsmälda.

Ett intressant resultat från de inledande experimenten var att det bildades en krusta mellan tankväggen och smältan så att smältan inte fastnade på tankväggen. Därigenom kunde tankväggen röra sig genom krypning så att ett gap bildades mellan krustan och tankväggen. Denna mekanism anses som en trolig orsak till att tankgenomsmältning inte inträffade i TMI-2. Det förutsätts dock att det från början finns vatten i botten på tanken.

OECD genomför ett forskningsprogram om tankgenomsmältning kallat "OECD Lower Head Failure Program" eller OLHF. Läget för OLHF presenterades under CSARP-mötet 8-11 maj, 2000, Bethesda, MD, USA. Detta program syftar till att få fram mera kunskaper om tidsförlopp och felmoder under tankgenomsmältning med högt tryck i primärsystemet.

Under CSARP-mötet redovisades resultat från 8 experiment, varav 7 genomförts vid 10 MPa och ett vid 5 MPa. Resultaten ger bland annat information om temperaturer då krypning initieras och då tankgenomsmältning inträffar. I detta program användes prototypiskt material för PWR-tank i experimentupställningen.

Ett annat viktigt forskningsprogram på detta område är FOREVER (Failure Of Reactor Vessel Retention), som drivs av KTH. Detta ingår i APRI-4 och rapporteras separat.

En sammanställning och värdering av kunskapsläget om smältans kylbarhet i reaktortanken ges i [11]. I denna rapport konstateras att osäkerheterna är stora när det gäller att analysera kärnsnedsmältningens förlopp och tankgenomsmältning. Begränsande faktorer i kunskapsuppbyggnaden är att det i praktiken inte är möjligt att genomföra fullskaleexperiment och att småskaliga försök oftast ger resultat som är svåra att överföra till fullskaleanläggningar.

En annan möjlighet att tillföra vatten för att kyla den skadade kärnan finns via styrvägar genomföringar. Detta har undersökts i ett experimentprogram vid KTH och

finns avrapporterat i [12]. Resultaten från dessa experiment visar att detta sätt att kyla ger ett signifikant bidrag till kylningen av den skadade härden.

### *Kylning av reaktortanken underifrån med vatten*

Ett alternativ till att kyla smältan genom att tillföra vatten till primärsystemet är att kyla reaktortanken underifrån genom att fylla upp nedre delen av inneslutningen med vatten. Detta koncept, som kallas IVR= In-Vessel-Retention, är särskilt användbart i reaktorer med låg effekttäthet eftersom det då krävs att en relativt låg effekt bortförs för att tankbotten skall hållas tillräckligt kyld.

En översikt av denna metod för att hålla smältan kvar i tanken, med särskilt betoning på återstående oklarheter i kunskapsläget, ges i [13]. IVR har införts i haverihanteringen för Loviisa i Finland. Vidare är IVR tänkt att ingå i haverihanteringen för den avancerade passiva reaktorn AP-600.

En viktig frågeställning i samband med IVR är variationen av ytvärmeflödet på ytan av tankbotten. Denna har undersökts i olika experimentprogram, bla COPO i Finland. Resultat från COPO presenterades vid CSARP-mötet i maj, 2000. Dessa stöder möjligheterna att använda konceptet för Loviisa.

IVR innehåller ett stort antal frågeställningar, som undersökts i experimentella forskningsprogram. En del av dessa är relativt väl utforskade medan det fortfarande finns kunskapsluckor inom andra. Som exempel på frågor, där forskningen kommit ganska långt kan nämnas:

- Bildandet av smältpöl på botten av reaktortanken
- Värmeförluster genom strålning från övre ytan av smältan.
- Inverkan av krusta på värmetransporten.

Det finns också en rad exempel på delfrågor, där kunskaperna är mera begränsade, t ex.:

- Resteffektens fördelning i en stratifierad pöl av smälta
- Växelverkan mellan smälta och strukturer
- Avgivning av fissionsprodukter.

Dagens kunskaper om svåra haverier bygger på resultat från ett stort antal småskaliga experiment. För att tillämpa resultaten på kraftreaktorer behövs en uppskalning. De problem, som är förknippade med detta, beskrivs i [14]. Som exempel på de svårigheter som uppkommer kan nämnas:

- Viktiga fenomen är inte tillräckligt väl kända.
- Övergångar mellan olika faser i en haverisekvens är ofta svåra att beskriva.
- Tidsskalan som karakteriserar viktiga fenomen kan skilja sig kraftigt (t ex millisekunder för ångexplosion och månader för resteffekt).

### **4.3.3 Haverihantering**

Haverihanteringen syftar i första hand till att förhindra tankgenomsmältning. Kylningen av reaktortanken kan ske på två sätt:

- Genom inpumpning av vatten så att smältan i tanken hålls kyld.
- Genom uppfyllning av vatten underifrån så att tankbotten kyls utifrån.

Den förra av dessa metoder används i våra reaktorer medan den andra tillämpas i vissa reaktorer med lägre effekttäthet, t.ex. Loviisa i Finland. Den följande beskrivningen gäller för våra reaktorer.

Under normal drift är härden kyld av vatten från de ordinarie spädmatningssystemen. Om dessa system, på grund av någon felfunktion i anläggningen, inte har tillräcklig kapacitet att hålla härden kyld kommer säkerhetssystem att aktiveras. De vanligaste felfunktionerna är rörbrott i primärsystemet eller elbortfall.

Omedelbart efter en händelse, som leder till försämrad kylning av härden från ordinarie spädmatning, aktiveras system för högtrycksinsprutning av vatten i reaktortanken. Tvångsnedblåsning startas automatiskt på signal om kylmedelsförlusten är så stor att det finns risk att härden förlorar kylningen vid fullt reaktortryck. Genom nedtagning av trycket i primärsystemet elimineras risken för genomsmältning av reaktortanken vid högt tryck. Vidare möjliggörs användning av lågtryckssystem för kylning av härden.

För att åstadkomma en kylbar smälta genom tillförsel av vatten till reaktortanken har tidsförloppet en avgörande betydelse. Om vatten tillförs i tid och i tillräcklig mängd under nedsmältningsförloppet kommer smältan att kunna kylas och tankgenomsmältning förhindras.

#### **4.3.4 Slutsatser**

Följande slutsatser kan dras:

- Det finns en stor mängd resultat från forskningen inom svåra haverier, som belyser möjligheterna att bibehålla reaktortanken intakt genom att tillföra vatten till den skadade härden.
- Det är svårt att utgående från dagens kunskapsläge föreslå förbättringar av nuvarande haverihantering.
- Det finns inbördes beroenden mellan olika problemområden, t.ex. tankgenomsmältning och återkriticitet i BWR. Detta måste beaktas om haverihanteringen för att hindra tankgenomsmältning ändras.

### **4.4 Ångexplosion efter tankgenomsmältning**

#### **4.4.1 Bakgrund**

Ångexplosion kan äga rum om smälta kommer i kontakt med vatten. Detta kan inträffa såväl i reaktortanken som i inneslutningen, dvs. efter tankgenomsmältning. I detta avsnitt behandlas det senare fallet.

För att kyla smältan efter tankgenomsmältning ingår det i haverihanteringen för internpumpsreaktorerna att fylla nedre drywell med vatten före befarad tankgenomsmältning. Motivet till detta är att skydda bottenplattan från genomsmältning.

Eftersom utrymmet under reaktortanken är vattenfyllt vid tankgenomsmältning kan ångexplosion inträffa förutsatt att kontakten mellan smältpartiklarna och vattnet blir tillräckligt effektiv.

#### **4.4.2 Kunskapsläge**

Ångexplosioner har varit föremål för omfattande forskning under flera decennier. Växelverkan mellan smälta och vatten har studerats både experimentellt och analytiskt.

Förloppet vid en ångexplosion kan indelas i följande faser:

- Växelverkan initialt
- Premixing
- Triggning
- Fragmentering
- Expansion

Med växelverkan initialt avses växelverkan mellan vatten och smältstråle när denna träffar vattenytan. Detta leder till en första grov fragmentering av smältan.

Under premixing sker en omblandning av smälta och vatten utan att någon snabb överföring av energi äger rum. Detta är möjligt på grund av den relativt stabila ångfilm, som omger smältpartiklarna.

Under triggningen bryts ångfilmen som omger ett stort antal bränslepartiklar upp. Därigenom initieras lokalt en kraftig växelverkan mellan vatten och bränslepartiklarna, som fragmenteras till mindre partiklar. Triggning kan antingen ske spontant eller orsakas av en yttre tryckpuls.

Fragmentering innebär att den andel av smältan som deltar i ångexplosionen finfördelas. En tryckvåg bildas, som rör sig genom det område där premixing ägt rum. Därigenom påverkas ytterligare bränslepartiklar så att ångfilmen kollapsar och finfragmentering sker. På detta sätt utvecklas en detonationsvåg, som utbreder sig mycket snabbt.

Den energi som frigörs leder till en expansion på grund av snabb och kraftig utveckling av ånga. Expansionen ger upphov till en impuls, som medför påkänningar på omgivande konstruktioner och väggar.

Ex-vessel ångexplosion i BWR fanns med som ett av de riskdominerande fenomen som undersöktes i APRI-3. Detta finns beskrivet i [7].

En sammanfattning av läget inom MFCI (melt-fuel-coolant-interaction) ges i [15]. I denna rapport betonas smältans tillstånd (mekaniska, kemiska och fysikaliska egenskaper) i samband med möjligheterna till ångexplosion.

Experiment i KROTOS och FARO har visat att det är svårt att trigga en ångexplosion om smältan består av oxidblandningen  $UO_2-ZrO_2$ . Dessa resultat står i skarp kontrast till de fall då ren metallsmälta av aluminium använts.

En slutsats i [15] är vidare att vi idag inte vet tillräckligt om de komplexa förlopp som ingår i MFCI. Stora osäkerheter finns både vad gäller sannolikheten för ångexplosion och energiutbytet om en sådan inträffar. Därför blir extrapolationer, baserade på dagens kunskaper, till fullskaleanläggning behäftade med stora osäkerheter.

Energiutbytet under en ångexplosion beror av följande två faktorer:

- Den mängd smälta som växelverkar
- Energiutbytet/viktsenhet smälta

Båda dessa faktorer är svåra att uppskatta.

För att bedöma om en ångexplosion utgör ett hot mot inneslutningens integritet krävs det förutom energiutbytet från ångexplosionen en beräkning av hur tryckpulsen fortplantar sig till närmaste svaga punkt i inneslutningen.

Sannolikheten för och energiutbytet av ångexplosion bestäms främst av följande parametrar:

- Smältans temperatur
- Smältans sammansättning
- Smältans massa
- Utströmningshastighet till vattenvolymen under reaktortanken
- Vattnets temperatur och massa
- Omgivande tryck

Dessa parametrar bestäms i hög grad av haverisekvensen. Beträffande sammansättningen av smältan är andelen icke oxiderad metall (främst zirkonium) av betydelse för sannolikheten för ångexplosion. En hög andel zirkonium ger en högre benägenhet för ångexplosion än en mera oxidisk smälta. Vid senaste CSARP-mötet (6-8 Maj, 2002, Albuquerque, NM, USA) presenterades dock resultat från experiment vid KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute), där även ren oxidsmälta visat hög benägenhet för ångexplosioner. En trolig förklaring till detta är att försöken hos KAERI utförts med betydligt högre smälttemperatur än tidigare experiment. Därför går det inte att dra några bestämda slutsatser av KAERI's resultat.

Utströmningshastigheten till vattenvolymen under reaktortanken påverkas förutom av haverisekvensen av inneslutningens utformning. I externpumpsreaktorer har smältan svårare att nå ner till kondensationsbassängen eftersom den först måste passera ett dräneringshål i en betongplatta under reaktortanken. I internpumpsreaktorerna når smälta lättare och snabbare ner till botten av inneslutningen. Sannolikheten för en kraftig ångexplosion i dessa reaktorer bör därför vara större än i externpumpsreaktorerna.

En genomgång av ångexplosionsfrågan med tonvikt på ex-vessel ångexplosioner i svenska och finska BWR finns avrapporterad i [16]. I denna rapport påpekas att det trots omfattande forskningsprogram fortfarande finns stora osäkerheter i två grundläggande fenomen, som är styrande för förloppet, nämligen premixing och trigging. Vidare ger ångexplosioner upphov till finare partiklar, som kan försämra smältans kylbarhet. Slutligen visar de beräkningar som ges i [16] lägre dynamiska belastningar på inneslutningen än tidigare analyser.

Massan av vattnet, som kan växelverka med smältan är av betydelse för sannolikheten och styrkan av en ångexplosion. För externpumpsreaktorer ges denna av nivån i kondensationsbassängen. För internpumpsreaktorerna sker däremot en uppfyllning av nedre drywell efter inneslutningsisolering. I detta fall är det möjligt att välja en något lägre vattennivå för att minska sannolikheten för ångexplosion. Detta får dock inte drivas så långt att kylningen av smältan nämnvärt försämras.

Ytterligare en faktor, som påverkar sannolikheten för ångexplosion är vattenkemin. För att trigga ångexplosion måste ångfilmen runt smältpartiklarna brytas upp. Detta försvåras om vattnet innehåller en tillsats, tex. tensider, som minskar ytspänningen.

Experiment har genomförts för att närmare undersöka dessa fenomen. Ett av dessa arbeten finns avrapporterat i [17]. De flesta försök stöder teorin att tillsatser av tensider till vattnet minskar sannolikheten för ångexplosion. Sammantaget har dock resultaten inte varit tillräckligt övertygande för att motivera ett införande av detta koncept i våra anläggningar.

#### 4.4.3 Haverihantering

Det finns inga instruktioner som behandlar ångexplosioner i haverihanteringen. Gällande haverihantering syftar i första hand till att säkerställa kylningen av händresterna för att undvika genomsmältning av bottenplattan.

En möjlig åtgärd i internpumpsreaktorer är att välja en lägre vattennivå i nedre drywell, som beskrivits ovan, för att minska sannolikheten för ångexplosioner. Innan ett sådant koncept införs måste det dock visas att kylningen av smältan, för att skydda bottenplattan, inte nämnvärt försämras.

#### 4.4.4 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras:

- Haverihanteringen med vattenfyllning av utrymmet under reaktortanken före eventuell tankgenomsmältning ger möjlighet till ex-vessel ångexplosion.
- Om analyser visar att ex-vessel ångexplosioner är ett hot mot inneslutningens integritet bör de svaga punkterna förstärkas.
- Möjligheter finns att modifiera haverihanteringen så att sannolikheten för ångexplosioner minskar. Tillsats av tensider till vattnet i botten av inneslutningen eller lägre vattennivå i nedre drywell i internpumpsreaktorer kommer ifråga. Om något av dessa koncept skall införas i haverihanteringen måste det först undersökas noggrant med hänsyn till både för- och nackdelar.

### 4.5 Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning

#### 4.5.1 Bakgrund

Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning är en central fråga både för hantering av svåra haverier och för utförande av PSA nivå 2 analyser. Detta har motiverat de omfattande forskningsprogram som genomförts för att få kunskaper inom området. Det finns trots detta fortfarande frågetecken kvar och insatser pågår för att förbättra kunskapsläget.

Frågan om smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning är mycket komplex. Detta beror i hög grad på att flera, var för sig komplicerade, delar behövs för att beskriva helheten. Exempel på detta är smältans fragmentering och fördelning av smältpartiklar med avseende på storlek. Andra faktorer som spelar roll är smältbäddens geometriska form, stratifiering (hur olika stora partiklar fördelas i höjdlid) och krustbildning i smältans övre del. Av stor betydelse för kylbarheten är dessutom hur stor andel av härden som samlas på botten av inneslutningen. Detta beror i sin tur av haveriförloppet fram till tankgenomsmältning.

Haverihanteringen för svenska och finska BWR är utformad så att smältan på botten av inneslutningen skall hållas kyld och genomsmältning av bottenplattan förhindras. En åtgärd som vidtas är att utrymmet under reaktortanken delvis fylls med vatten före befarad tankgenomsmältning. Vidare ingår det i haverihanteringen att, om tankgenomsmältning inträffat, pumpa in vatten så att smältan täcks med vatten för att den skall hållas kyld.

Genom dessa åtgärder i haverihanteringen är möjligheterna relativt goda att kyla smältan och skydda bottenplattan. På grund av de luckor och oklarheter, som finns i

dagens kunskapsläge om ex-vessel kylbarhet, är det dock inte helt säkert att denna strategi alltid leder till framgång.

Ytterligare forskning bedrivs för att säkrare kunna bedöma möjligheterna att kyla smältan med den strategi, som beskrivits ovan. Vidare har, för framtida reaktorer, ett stort utvecklingsarbete genomförts för att redan i design tillgodose krav på ex-vessel kylbarhet.

Ny kunskap, som erhållits genom dessa insatser, är möjlig att utnyttja för att uppgradera nuvarande anläggningar.

#### *4.5.2 Kunskapsläge*

Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning är ett viktigt område inom svåra haverier. Stora insatser har genomförts och arbete pågår fortfarande för att förbättra kunskapsläget. En central del i denna verksamhet är experimentprogram, som ofta är mycket dyrbara att genomföra. Därför har ett omfattande internationellt samarbete utvecklats för att hålla nere kostnaderna.

Den workshop som ägde rum i Karlsruhe 15-18 November 1999 gav en god bild av kunskapsläget beträffande smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning. Proceedings från detta möte finns i [18] och en kort sammanfattning i [19]. Vidare ger [20] en översikt av kylbarhetsfrågan med särskild betoning på våra internpumpsreaktorer.

Under nämnda workshop deltog mer än 80 specialister från 13 OECD-länder och 48 bidrag presenterades. Mötet syftade till att ge en aktuell bild av kunskapsläget, identifiera de viktigaste återstående osäkerheterna och att diskutera inriktningen av fortsatt arbete.

Utgående från tidsförloppet kan smältans kylbarhet i inneslutningen delas upp i tre delar:

- Utströmning av smältan från reaktortanken
- Transport av smälta ned till inneslutningens botten
- Kylning av händresterna.

#### *Utströmning av smälta från reaktortanken*

Förutsättningarna för smältans kylbarhet ex-vessel bestäms i hög grad av nedsmältningsförloppet och hur tankgenomsmältning sker. Följande faktorer är av betydelse:

- Mängd, utströmningshastighet och sammansättning av smälta som lämnar reaktortanken
- Trycket i reaktortanken vid genomsmältning
- Hur tankgenomsmältning inträffar
- Var på tankbotten som genomsmältning inträffar.

Ju större mängd smälta som strömmar ut desto större blir problemen att kyla den. För att få ett konservativt fall förutsätts som regel att all smälta strömmar ut från reaktortanken. I praktiken kommer däremot en del av händren, främst randpatronerna, att vara kvar i reaktortanken.



Vidare är smältans utströmningshastighet av betydelse för kylbarheten. Om smältan strömmar ut snabbt blir det svårare att kyla den än om förloppet är långsamt.

En hög andel icke oxiderad metall (främst zirkonium) leder till kraftig oxidation efter tankgenomsmältning. Detta resulterar i ett snabbare smälta/betongangrepp än med ett lägre innehåll av metall i smältan.

Utströmningen av smälta från reaktortanken påverkas vidare av trycket i primärsystemet vid genomsmältningen. Eftersom trycknedtagningen av primärsystemet är mycket tillförlitlig är dock sannolikheten låg för att högtrycksgenomsmältning sker. Även om detta skulle inträffa skulle det för övrigt snarast vara till fördel när det gäller att kyla smältan ex-vessel eftersom härdresterna skulle spridas ut mer i inneslutningen än under genomsmältning av reaktortanken med lågt tryck i primärsystemet.

Tankgenomsmältning kan ske på flera sätt. Två huvudfall finns:

- Lokal genomsmältning, som inträffar vid en genomföring i tankbotten
- Global genomsmältning, som sker genom krypbrott.

Under APRI-3 projektet analyserades global tankgenomsmältning som ett riskdominerande fenomen. I detta arbete, som finns avrapporterat i [7], bedöms sannolikheten för global genomsmältning ha en sannolikhet av högst 0,001- givet att tankgenomsmältning sker.

Den helt dominerande typen av tankgenomsmältning bedöms alltså äga rum vid en genomföring. Även detta förlopp kan leda till att stora smältmängder snabbt överförs till utrymmet under reaktortanken. En faktor som kan snabba upp utströmningen är att hålet i botten av tanken gröps ur, dvs. förstoras, vilket kallas ablation.

Tankbotten innehåller ett stort antal genomföringar. Genomsmältning kan inträffa antingen i en centralt belägen genomföring eller mera perifert. Detta kan ha betydelse för hur den utströmmade smälta fördelas på botten av inneslutningen. Den geometriska formen på smältan inverkar på möjligheterna att kyla den.

De faktorer som beskrivits ovan är relaterade till haveriscenariot och ger i hög grad förutsättningarna för att hålla smältan kyld. I det följande kommer främst fenomen av betydelse för kylbarheten att tas upp.

### *Transport av smälta ned till botten av inneslutningen*

I samband med transporten av smältan från reaktortanken till botten av inneslutningen finns det framför allt två haverifenomen av betydelse nämligen smältans fragmentering och spridningen av smältan i inneslutningen.

Eftersom nedre delen av inneslutningen är fylld med vatten före tankgenomsmältning kommer smältan att passera vatten innan det samlas på botten av inneslutningen. Kontakten mellan smältstrålen och vatten leder till att denna delvis fragmenteras. Storleksfördelningen av bränslepartiklarna då de samlats på botten av inneslutningen är av betydelse för smältans kylbarhet. Generellt är det svårare att kyla en smälta ju mindre partiklarna är. Detta sammanhänger med att vatten inte så lätt tränger in mellan partiklarna i detta fall.

När smältan samlas på botten av inneslutningen kommer sannolikt en skiktning att inträffa så att de största partiklarna hamnar längst ner och de mindre lagras ovanpå. Detta skulle i så fall motverka kylning ovanifrån, eftersom de mindre partiklarna försvårar inträngning av vatten i smältan.

Smältans spridning på botten av inneslutningen bestämmer den geometriska formen, vilket är av stor betydelse för kylbarheten. En smälta, som sprids ut över en större yta, är lättare att kyla än den som upptar ett mindre område. Detta innebär att inneslutningen geometri, som ju är anläggningsberoende, inverkar på kylbarheten. Två fenomen är styrande för hur smältan sprids på botten av inneslutningen, nämligen:

- Smältans omfördelning, som är ett hydrodynamiskt förlopp
- Stelnande av smältan medan den omfördelas på botten av inneslutningen.

För smältans omfördelning är dess viskositet av stor betydelse. Stelningsprocessen påverkas både av strömningar inuti smältan och av värmeavgivning från dess gränssytor mot omgivningen.

### *Kylning av härdresterna*

Kylning av härdresterna sker i våra BWR genom att nedre delen av inneslutningen är vattenfylld då tankgenomsmältning sker och att ytterligare vatten därefter tillförs ovanifrån.

För kylbarheten under dessa förhållanden spelar följande haverifenomen roll:

- Initial kontakt mellan smälta och vatten före bildning av krusta
- Bildande av krusta på smältans ovasida
- Stabilitet hos denna krusta
- Värmeledning genom krustan.

I programmet MACE (Melt Attack and Coolability Experiments) har en serie experiment genomförts vid Argonne National Laboratories i USA för att undersöka smältans kylbarhet genom tillförsel av vatten ovanifrån. Dessa experiment har utförts med prototypiskt material och med en kvadratisk bottenyta upp till 1,2x1,2m. Resultaten från MACE har varit svåra att tolka och överföra till fullskalanläggning. Arbetet inom MACE fortsätter.

En genomgång av resultat från kylbarhetsexperiment ges i [20], där även kylbarhetsfrågan för våra internpumpsreaktorer diskuteras. Denna visar stor spridning i data, vilket kan bero på att det är svårt att åstadkomma väldefinierade experimentella förhållanden. Fragmentering av smältstråle i vatten har undersökts i ett stort antal experiment, både med olika simulanter och med prototypiskt material. Dock har inte inverkan av metall (speciellt zirkonium) i smältan studerats. Metall i smältan ökar sannolikheten för ångexplosioner, vilket medverkar till bildning av fina partiklar. Detta i sin tur försämrar kylbarheten. Slutsatsen beträffande våra internpumpsreaktorer är att smältan troligen är kylbar i Olkiluoto, Forsmark 3 och Oskarshamn 3. För Forsmark 1 och 2 är läget oklart. Dessa skillnader beror på storleken av de ytor som smältan fördelas över och smältans volym. För F1/F2 är den initiala höjden av smältan på inneslutningens botten ca dubbelt så hög som i F3/O3 eller i Olkiluoto.

Frågan om smältans kylbarhet är komplex och innefattar ett stort antal haverifenomen där i många fall osäkerheterna är stora trots att stora forskningsprogram genomförts. Problematiken med ex-vessel kylbarhet i nya reaktorer, t ex EPR (European Pressurised Water Reactor), utvecklad av Siemens och Framatom beaktas redan vid konstruktionen. För att säkra kylbarheten efter tankgenomsmältning är detta koncept utrustat med core catcher. Grundtanken är att vatten tillförs smältan underifrån, vilket ger en betydligt

mera effektiv kylning än om vatten tillförs uppifrån. Ett antal bidrag om detta presenterades under ovan nämnda workshop om ex-vessel kylbarhet i Karlsruhe.

### 4.5.3 Haverihantering

Haverihanteringen syftar till att kyla härdresterna för att förhindra genomsmältning av bottenplattan.

I våra BWR kyls smältan efter tankgenomsmältning genom att vatten tillförs till utrymmet under reaktortanken. Därigenom kommer smältan att på sin väg mot botten av inneslutningen att passera ett stort vattendjup och kylas ner.

I externpumpsreaktorerna är utrymmet under reaktortanken vattenfyllt under normal drift. I internpumpsreaktorerna är däremot detta utrymme, nedre drywell, torrt men omgivet av en annulär vattenbassäng, wet well.

I samband med införandet av konsekvenslindrande system infördes i internpumpsreaktorerna ett system för vattenfyllning av nedre drywell med vatten från wet well. Detta system, som består av två redundanta stråk, aktiveras automatiskt 30 min. efter I-isolering. Systemet kan också manövreras från det centrala kontrollrummet och från lokala manöverplatser.

Om tankgenomsmältning inträffar kommer dessutom vatten att pumpas in till inneslutningen med hjälp av sprinklingssystemet. Detta sker för att åstadkomma ett stabilt sluttillstånd med härdresterna kylda i botten av inneslutningen. Den slutnivå för inpumpning av vatten, som väljs kan skilja sig mellan olika verk.

Den strategi vi avser att använda om en tankgenomsmältning skulle inträffa är enkel att tillämpa, eftersom den inte kräver några operatörsingrepp under de första timmarna av haveriet. Däremot finns, som beskrivits i tidigare avsnitt, återstående osäkerheter rörande de fenomen som är av vikt för kylbarheten. Detta innebär att det inte är helt säkert att den beskrivna strategin alltid leder till ett stabilt sluttillstånd med kyld smälta.

Det är knappast möjligt att förbättra vår haverihantering, när det gäller att kyla härdresterna efter tankgenomsmältning, utan att göra ombyggnader i anläggningarna. Ett sätt att förbättra kylbarheten vore att införa ”downcomers” genom vilka vatten skulle tillföras härdresterna underifrån, vilket skulle ge en effektivare kylning än i nuläget. Det ligger dock utanför detta projekt att utvärdera om införande av downcomers är motiverat som en säkerhetshöjande åtgärd.

### 4.5.4 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras:

- Trots att omfattande forskningsprogram genomförts finns många kvarstående osäkerheter i de fenomen som är av betydelse för smältans kylbarhet.
- Den strategi för haverihantering, som gäller i våra BWR, prioriterar kylning av härdresterna efter tankgenomsmältning framför att undvika ångexplosion efter tankgenomsmältning.
- För nya reaktorkoncept konstrueras anläggningen så att den klarar svåra haverier och med core catcher för att säkerställa härdresternas kylning efter tankgenomsmältning.
- En möjlighet att lösa frågan om smältans kylbarhet i nuvarande anläggningar är att införa downcomers så att härdresterna kyls underifrån med vatten.

## 4.6 Vätgasbrand i reaktorinneslutningen

### 4.6.1 Bakgrund

Under normal drift är inneslutningarna i våra BWR fyllda med kvävgas, vilket förhindrar vätgasbrand. Däremot förekommer kortare perioder i samband med upp- och nedgång i effekt då inneslutningen är luftfylld.

Om ett svårt haveri inträffar bildas stora kvantiteter vätgas. Om inneslutningen då är luftfylld kommer gasblandningen att bli brännbar om ånghalten inte överstiger 55%(vol.).

Ifall inneslutningsatmosfären är brännbar och tändkälla finns kommer vätgasförbränning att äga rum. I så fall kan trycket i inneslutningen komma att överskrida brottrycket. Konsekvenserna vad gäller utsläpp till omgivningen kan blir stora i ett sådant scenario.

### 4.6.2 Kunskapsläge

Kunskapsläget omfattar följande delområden, som alla är av vikt för att kunna bedöma i vad mån vätgasbrand är ett hot mot inneslutningens integritet:

- Vätgasproduktion
- Omfördelning av vätgas i inneslutningen
- Vätgasförbränning
- Tryck i inneslutningen vid vätgasbrand

#### *Vätgasproduktion*

Vätgasproduktion uppdelas i vad som bildas in-vessel (före tankgenomsmltning) och ex-vessel. I [21] ges en aktuell bild av kunskapsläget beträffande vätgasproduktion.

In-vessel vätgasproduktion sker i huvudsak genom oxidation av zirkonium i härden, men också genom oxidation av stål. I referens [21] anges att 10-15% av den totala vätgasproduktionen kan komma från oxidation av stål.

Avgörande för vätgasproduktion in-vessel är tillgång till vattenånga i reaktortanken och kontakten mellan ånga och zirkonium. Förloppet vid härtnedsmältning är därför av stor betydelse för produktionen av vätgas.

I sekvenser där den skadade härden återflödas kommer en stor del av vattnet att förångas och reagera med zirkonium. I detta fall bildas i allmänhet relativt stora mängder vätgas. Detta gäller särskilt om nedsmältningförloppet är utdraget i tiden. Om däremot en stor del av den skadade härden samlas på tankbotten på ett tidigt stadium kommer mängden vätgas att bli mindre på grund av mindre tillgång till ånga som kan reagera med zirkonium.

Ex-vessel vätgasproduktion, i det korta tidsperspektiv som det här gäller, äger rum genom två processer: FCI (fuel-coolant-interaction) och smälta-betongreaktion. Eftersom utrymmena närmast inneslutningens botten kommer att vara vattenfyllda före en eventuell tankgenomsmltning är FCI mest intressant för vår del. Det dominerande bidraget till vätgasproduktion genom FCI erhålls genom oxidation av zirkonium i smältan när den kommer i kontakt med vatten.

De båda bidragen från FCI och smälta-betongreaktioner är svåra att kvantifiera.

Eftersom oxidation av zirkonium är den viktigaste reaktionen vid vätgasproduktion blir den mängd vätgas som genereras ex-vessel att vara beroende av hur mycket vätgas som bildats in-vessel.

Av störst vikt i haverisammanhang är den totala mängd vätgas som bildas fram till den tidpunkt då förbränning av vätgas inträffar. Om detta sker efter tankgenomsmältning är den mängd vätgas som är aktuell summan av bidragen från in-vessel och ex-vessel reaktionerna.

På grund av de stora felkällor som finns beträffande bildning av vätgas, såväl in-vessel som ex-vessel, blir även den totala mängden vätgas osäker. En ansats, som kommer att användas i detta avsnitt, är att den mängd vätgas som bildas motsvarar oxidation av all zirkonium i härden.

Beräkningar av den mängd vätgas som bildas om all zirkonium i härden oxideras redovisas i [22] för våra BWR. För Forsmark 1-2 erhålls 2280 kg och för F3/O3 2360 kg.

### *Omfördelning av vätgas i inneslutningen*

Omfördelning av vätgas i inneslutningen spelar roll på två sätt:

- Mängden vätgas fördelas på olika utrymmen i inneslutningen dvs. drywell och wetwell.
- Den mängd vätgas som finns i ett utrymme kan vara skiktad (stratifierad).

Vätgasfrågan för BWR studerades i APRI 3 och detta arbete finns avrapporterat i [22]. I denna referens behandlas alla viktiga aspekter av vätgasfrågan, dvs. även omfördelning av vätgas i inneslutningen.

Frigörelse av vätgas till inneslutningen är i hög grad beroende av haverisekvensen. I sekvenser med intakt primärsystem kommer den vätgas som bildas in-vessel att strömma ut i inneslutningen via avblåsningsventilerna till kondensationsbassängen och delvis vidare till drywell via vakuumbrytarna.

För LOCA-sekvenser kommer vätgas att övergå från primärsystemet till inneslutningen via brottstället. Vidare kommer vätgas att lämna primärsystemet via avblåsningsventilerna och strömma till kondensationsbassängen.

I ett givet utrymme kan stratifiering uppkomma, vilket innebär att lättare gaser ackumuleras upptill och tyngre nedtill. Detta innebär även en skiktning av vätgas så att koncentrationen är högst i övre delen av utrymmet.

Stratifiering motverkas dels av strömningar som uppstår på grund av temperaturgradienter och tryckskillnader i inneslutningen, dels på grund av användning av systemet för sprinkling av inneslutningen.

### *Vätgasförbränning*

För att vätgasförbränning skall ske krävs både brännbar gasblandning och en tändkälla. Gasblandningen är brännbar om följande villkor är uppfyllda:

- Vätgashalten > 4% (vol.)
- Syrgashalten > 5% (vol.)
- Ånghalten < 55% (vol.)

Med de vätgasmängder som bildas under ett svårt haveri i BWR och med luftfylld inneslutning är de båda första villkoren uppfyllda. Ånghalten är beroende av tidpunkt, haveriförlopp och vilket utrymme i inneslutningen det är frågan om. Om villkoret för inert inneslutning (i olika utrymmen) på grund av hög ånghalt är uppfyllt kan, för en given haverisekvens, undersökas genom beräkningar med MAAP. Här förutsätts att ånghalten är lägre än 55%, dvs. att gasblandningen i inneslutningen är brännbar.

Om vätgasförbränning inträffar kan förloppet bli av två slag: deflagration eller detonation. Deflagration utmärks av att flamfronten utbreder sig långsammare än ljudhastigheten. Detonation är ett mer turbulent förlopp, där flamfronten överstiger ljudets hastighet.

Under vissa förutsättningar kan deflagration övergå i detonation, vilket kallas DDT (Deflagration to Detonation Transition). DDT är ett betydligt mera sannolikt scenario än att en detonation initieras direkt, vilket kräver att en relativt stor mängd energi tillförs momentant.

Förutom brännbar gasblandning är ett villkor för vätgasförbränning att en tändkälla finns. För att starta en deflagration räcker det med en mindre gnista. Exempel på tändkällor i inneslutningen är gnistor från magnetventiler, elektriskt manövrerade ventiler och indikeringar samt TV-kameror. Även smältpartiklar vid tankgenomsältning kan utgöra tändkällor. Allmänt är sannolikheten för antändning högre om el finns tillgänglig än vid elbortfall.

### *Tryck i inneslutningen vid vätgasbrand*

Det maximala trycket i inneslutningen vid deflagration är summan av initialtrycket och den tryckspik som förbränningen ger upphov till. Initialtrycket byggs upp av de ingående gasernas partialtryck. Faktorer av betydelse är temperaturen i inneslutningen, ånghalten och mängden vätgas.

Tryckspiken beror främst av initialtrycket och av den mängd vätgas som förbränns. En enkel och samtidigt konservativ metod för beräkning av tryckspik är AICC (Adiabatic Isochoric Constant volume Combustion), där förbränningen förutsätts ske momentant och utan värmeutbyte med omgivningen. Med denna metod blir tryckspiken proportionell mot begynnelsestrycket i inneslutningen. Exempel på uppskattningar av maximalt tryck vid vätgasbrand i svenska BWR-inneslutningar ges i [22]. En begränsande faktor vid vätgasförbränning i BWR är ofta tillgången på syrgas.

Slutsatsen av dessa beräkningar är att det finns en risk för brott på inneslutningen på grund av deflagration eller DDT under ett svårt haveri. Det är dock inte möjligt att utgående från dagens kunskapsläge (annat än mycket grovt) kvantifiera sannolikheten för brott på inneslutningen. Detta sammanhänger med de stora osäkerheter som fortfarande finns i de haverifenomen som är styrande, dvs. vätgasbildning, omfördelning av vätgas och förbränningsförlopp.

### **4.6.3 Haverihantering**

Utom för TVO saknas dokumentation för undvikande av svåra haverier i samband med upp- och nedgång i effekt.

#### 4.6.4 Slutsatser

- Haveriinstruktioner bör tas fram för upp- och nedgång i effekt. Möjligheterna att med hjälp av de konsekvenslindrande systemen (speciellt skrubbern) begränsa trycket i inneslutningen bör undersökas.
- Den tid som inneslutningen inte är inert bör minimeras. Därigenom minskar sannolikheten för scenariot härdsmälta med åtföljande vätgasbrand i samband med upp- och nedgång i effekt.
- I utvärderingen av sannolikheten för brott på inneslutningen på grund av vätgasbrand finns osäkerheter, som delvis beror på ofullständiga kunskaper om vätgasfenomen. En noggrannare analys baserat på ett bättre kunskapsläge skulle minska osäkerheterna.

### 4.7 Läckande inneslutning

#### 4.7.1 Bakgrund

I detta avsnitt beskrivs fall med läckande inneslutning som inte är direkt orsakade av haverifenomen. Oftast beror dessa läckage på att system som ansluter till inneslutningen inte isolerats. Utsläpp börjar då så snart det finns ett drivtryck.

En naturlig uppdelning av läckage från inneslutningen är stort, medelstort och litet läckage. Denna indelning används i den PSA-studie, som beskrivs närmare i nästa avsnitt.

Då ett litet läckage från inneslutningen är summan av bidrag från flera läckageställen brukar det kallas diffust läckage. Detta har i allmänhet små konsekvenser för omgivningen. Däremot kan diffust läckage ge upphov till dosrater i anläggningen så att tillträddbarheten begränsas.

#### 4.7.2 Kunskapsläge

I den senast genomförda PSA-studien för Ringhals 1, avrapporterad i [6], finns stort, medelstort och litet läckage behandlat. För vart och ett av dessa fall finns två möjligheter: med resp. utan sprinkling av inneslutningen. Detta ger då sex utsläppskategorier.

Som exempel på stort, medelstort och litet läckage, hämtade från [6] ges följande:

Stort läckage- oisolerat 415 (mavasystem). Rördiametern är i detta fall ca 40 cm. Detta ger en utsläppsväg via turbinsystemen via läckande ventiler och turbinernas axeltätningar.

Medelstort läckage- utebliven isolering eller ventilfel i hjälpmavasystem 416. Läckagearean bedöms ha en diameter större än 1 cm men mindre än 3 cm.

Litet läckage- oisolerat varmhållningsflöde för ångledning till system 323 (nödkylsystem för härden) eller 416 (hjälpmava).

I PSA-studien för Ringhals 1 har felträd tagits fram för ett antal olika system med indelning i tre grupper med avseende på läckagets storlek. Sannolikheter har sedan beräknats för var och en av dessa utsläppskategorier.

Utsläppsberäkningar har genomförts med MAAP. Resultaten presenteras i [6] uppdelade på läckage med begränsade utsläpp (mindre än 0,06% av CsI-inventariet i härden) och stora utsläpp. Begränsade utsläpp har en frekvens av  $3,7E-8$ /år och stora utsläpp  $5,3E-9$ /år.

Radiologiska konsekvenser av diffust läckage har undersökts för Forsmark 1-2 och avrapporterats i [23]. Scenariot är totalt elbortfall, dvs. nödventilationen (system 749) är inte i drift. Om inneslutningen inte är tät kommer gasformig aktivitet (ädelgaser och jod) att läcka ut, främst via skalventiler.

Beräkningar med MAAP genomfördes för att få aktivitetskoncentrationen i inneslutningen. Läckagemängder från inneslutningen genom skalventilerna uppskattades. Hänsyn har då tagits till tryck- och aktivitetsfördelning i inneslutningen under haveriförloppet. Läckagevägar till byggnader där lokala manöver- och kontrollplatser är belägna har analyserats. Tillträddbarhet krävs till dessa utrymmen för att hantera sekvensen totalt elbortfall.

En modell för beräkning av aktivitetstransporten i anläggningen har framtagits och dosrater från externstrålning och inhalation har beräknats. Allmänt kan konstateras att det diffusa läckaget kan bli ett besvärande problem med avseende på personsäkerheten vid ett totalt elbortfall. Dosraterna varierar mellan 2-25 mSv/h beroende på manöverplats.

En motsvarande utredning av diffust läckage har genomförts för Forsmark 3 och avrapporterats i [24]. Dosraterna vid manöverplatserna, som är viktiga för haverihanteringen, är ungefär desamma som för Forsmark 1-2.

I EU-projektet OPTSAM (Optimisation of Severe Accident Management Strategies for the Control of Radiological Releases) [25] undersöks hur haverihanteringen påverkar utsläppen till omgivningen under ett svårt haveri. Som en del i OPTSAM ingår att studera hur de konsekvenslindrande systemen (filtrerad tryckavlastning och sprinkling av inneslutningen med redundant vattentillförsel) kan användas för att få ett lägre tryck i inneslutningen och på så sätt reducera det diffusa läckaget.

### **4.7.3 Haverihantering**

I haverihanteringen är det generellt en viktig åtgärd att minska drivtrycket om läckage från inneslutningen uppstår. Vilka åtgärder som bör vidtas beror av scenariot. Om det gäller diffust läckage från inneslutningen kan de konsekvenslindrande systemen användas för att minska drivtrycket och därmed läckaget.

### **4.7.4 Slutsatser**

Läckage från inneslutningen under ett svårt haveri kan leda till otillåtet höga utsläpp till omgivningen och dessutom försvåra arbetet i anläggningen. Diffust läckage kan mildras med hjälp av de konsekvenslindrande systemen.

## **4.8 Vätgasbrand i reaktorbyggnaden**

### **4.8.1 Bakgrund**

Vätgas i reaktorinneslutningen i samband med ett svårt haveri under effektdrift kan läcka ut till reaktorbyggnaden genom otäta genomföringar. Eftersom reaktorbyggnaden är luftfylld kan då en brännbar eller detonierbar gasblandning bildas, speciellt i övre



delarna av reaktorbyggnaden. Om en detonation inträffar finns risk att genomföringar till inneslutningen skadas vilket kan leda till aktivitetsutsläpp till omgivningen.

#### 4.8.2 Kunskapsläge

Frågan om vätgasbrand i reaktorbyggnaden har studerats av VTT inom ramen för NKS (nordiskt samarbete om kärnkraftssäkerhet). Detta arbete har avrapporterats i [26], [27] och [28].

Som haverisekvens i dessa studier valdes ett totalt elbortfall, där det förutsattes att all zirkonium i härden oxiderades. Detta ger en vätgasmängd av 1900 kg i reaktorinneslutningen.

En mindre del av denna vätgas antas läcka ut till reaktorbyggnaden. Två läckageareor ansattes, en mindre med 2 mm<sup>2</sup> area och en större med 20 mm<sup>2</sup>. Den mindre av dessa motsvarar nominellt tillåtet läckage från inneslutningen.

I reaktorbyggnaden sker en stratifiering av den vätgas, som läckt ut så att koncentrationen blir störst mot byggnadens tak. Detta leder till att det, även med relativt små kvantiteter vätgas, kan uppkomma en detonerbar blandning i övre delen av reaktorbyggnaden. Beräkningar av läckage från inneslutningen till reaktorbyggnaden har genomförts med programmet MELCOR. Omblandningen och stratifiering har beräknats med koden FLUENT.

Detonationsberäkningar i [27] har genomförts med programmet DET3D, utvecklad vid Forschungszentrum Karlsruhe (FzK). DET3D är en tredimensionell kod som använder finit differens metodik. Detonationsförloppet som beräknas i DET3D initieras direkt genom en momentan tillförsel av energi. DDT (detonation-to-deflagration-transition), dvs. övergång från deflagration till detonation behandlas inte i DET3D.

Fem fall har analyserats i [27]. Följande storheter har varierats:

- Mängd vätgas i reaktorbyggnaden (1,4-3,2 kg)
- Tidpunkt för detonation, räknat från att vätgas börjar läcka ut (2-4 h)
- Läckage area (2 resp. 20 mm<sup>2</sup>)

Den högsta tryckspiken, som uppnåddes under dessa simuleringar, blev 10,6 MPa. Detta värde erhöles i det övre hörnet i ett rum som gränsar till inneslutningsväggen. Den högsta tryckpulsen som erhöles under denna beräkning var 30-35 kP-s.

Dessa analyser har senare kompletterats med beräkningar med ABAQUS för att få fram påkänningar på strukturer. Detta arbete finns avrapporterat i [28]. Slutsatsen blev att vätgasbrand eller detonation inte utgör något hot mot inneslutningen eller dess genomföringar. Det finns därför inga skäl att bearbeta denna fråga vidare.

#### 4.8.3 Haverihantering

Vätgasbrand/detonation i reaktorbyggnaden beaktas inte i haverihanteringen.

#### 4.8.4 Slutsatser

Frågan om vätgasbrand i reaktorbyggnaden har uppmärksamats senare än övriga haverifenomen som behandlas i denna rapport. En viktig slutsats av de studier som genomförts är att även relativt små mängder vätgas som detonerar kan ge upphov till höga tryck och tryckpulser.

Dessa analyser har kompletterats med beräkningar för att få fram påkänningar på strukturer, främst genomföringar genom inneslutningen. Slutsatsen av dessa undersökningar är att vätgasbrand eller detonation i reaktorbyggnaden inte är ett hot mot inneslutningen.

## **4.9 Långtidsförloppet efter ett svårt haveri**

### **4.9.1 Bakgrund**

I samband med införandet av konsekvenslindrande system utvecklades också dokumentation för hantering av svåra haverier. I detta arbete fokuserades på det närmaste dygnet efter inledande händelse. De främsta syftena med haverihanteringen var att minimera utsläpp av aktivitet till omgivningen och att etablera ett stabilt sluttillstånd. Då ansågs det inte motiverat att närmare studera långtidsförloppet efter ett svårt haveri, dvs. vad som kan inträffa på något eller några års sikt.

Under 1989-1991 genomfördes ett projekt kallat FRIPP (Forsmark Ringhals Post Accident Project), där långtidsförloppet efter ett svårt haveri studerades. Exempel på frågor, som togs upp i FRIPP är kylning av inneslutningen, vattenuppfyllnad av inneslutningen och kemi i inneslutningen.

I samband med FRIPP uppmärksammades att det finns åtgärder i haverihanteringen, som får konsekvenser inte bara under de närmaste dygnet utan även i ett betydligt längre tidsperspektiv. Det är då rimligt att hänsyn tas till detta när det gäller att utforma strategierna.

### **4.9.2 Kunskapsläge**

Kunskapsläget, som beskrivs i detta avsnitt baseras till största delen på FRIPP. Detta projekt finns avrapporterat i [29] och [30]. Målen med FRIPP var följande:

- Att öka kunskaperna om de problem som uppstår i ett långtidsperspektiv (upp till fem år) efter ett svårt haveri avseende omhändertagande av anläggningen.
- Att använda de nya kunskaperna för att förbättra instruktionerna för hantering av ett svårt haveri.
- Att utreda avfallsfrågorna i samband med ett haveri med 10% bränsleskador.

De båda första av dessa mål är relevanta i detta sammanhang.

För att belysa olika problemområden, som är av intresse efter ett svårt haveri, delades FRIPP upp i delprojekt där följande områden behandlades:

- Källtermer och strålning
- Kylbehov av reaktorinneslutningen
- Vätgas- och syrgasgenerering genom radiolys i inneslutningen
- Vattenkemi i inneslutningen
- Systemanalys
- Avfallshantering efter svårt haveri
- Avfallshantering efter 10% bränsleskador

Källtermer och strålning är ett delprojekt, som är av betydelse genom att det ger indata till flera av de övriga delprojekten. Exempelvis är bildning av vätgas och syrgas genom radiolys beroende av strålningsnivån i inneslutningen.

För att inte trycket skall stiga till alltför höga nivåer i inneslutningen krävs kylning. Så länge systemet för sprinkling av inneslutningen, genom återcirkulation av vatten från sumpen, fungerar kommer trycket att kunna hållas tillräckligt lågt. Om däremot inga system för bortkylning av resteffekten fungerar kommer trycket att stiga. Den passiva kylning som äger rum genom värmeförluster genom tak, golv och väggar räcker inte för att kyla bort resteffekten förrän efter mycket lång tid efter haveriets början. Som exempel kan nämnas att om all aktiv kylning i Forsmark 1-2 bortfaller 7 dygn efter inledande händelse kommer trycket i inneslutningen efter 30 timmar att ha stigit till 0,57MPa och tryckavlastning sker via system 362.

Vätgas och syrgas bildas i sumpen i inneslutningen genom radiolys av vatten. Efter lång tid kan atmosfären i inneslutningen bli brännbar. Uppskattningar gjordes i FRIPP av de kvantiteter som kan bildas. Som exempel uppskattades mängden vätgas efter 3 månader till 360 kg i Forsmark 1-2. Detta är dock konservativt. Vätgasfrågan i långtidsförloppet måste hanteras, även om den förmodligen inte är ett dominerande problem.

Vattenkemin i inneslutningen är viktig av flera skäl. Korrosions hastigheten i stålkomponenter och jods beteende påverkas av vattenkemin.

En inventering av material i inneslutningen genomfördes i FRIPP och pH i vattnet i inneslutningen uppskattades efter uppnådd jämvikt. För Forsmark 1-2 identifierades två huvudalternativ, där aluminium och zink dominerade i det ena fallet och koldioxid (från kablar och målning) i det andra. pH i dessa fall uppskattades till 6 resp. 8,5 vid temperaturen 25 grader C i inneslutningen. Även för PWR finns två möjligheter beroende på vilka reaktioner som dominerar och ungefär samma pH som i BWR förväntas.

Rekommendationen är att se till att pH i inneslutningen blir ca 10. Detta medverkar till att minimera både korrosion och frigörelse av jod.

I delprojektet systemanalys undersöktes två huvudfrågor. Den första gäller hur läckage från inneslutningen (speciellt högaktivt vatten) minimeras och den andra hur inneslutningen kan kylas i långtidsförloppet.

Läckage av högaktivt vatten från inneslutningen måste minimeras eftersom det annars kommer att starkt begränsa tillträddbarheten i anläggningen. I längden är det oklart om inneslutningens genomföringar håller tätt. Uppskattningar av läckagemängder har gjorts i FRIPP. Dessa är givetvis behäftade med stora osäkerheter, eftersom det är osäkert hur tätheten av inneslutningens genomföringar ändras med tiden och vidare vilka möjligheter det kommer att finnas att täta läckande genomföringar.

Kylbehovet av inneslutningen har diskuterats ovan. För Forsmark 1-2 behövs aktiv kylning under minst ett år för att inte trycket i inneslutningen skall stiga så att skrubbern aktiveras. En slutsats från delprojektet systemanalys är dock att det knappast är troligt att systemen för inneslutningssprinkling för att kyla inneslutningen kommer att fungera tillräckligt länge för att undvika aktivering av skrubbern. Ett sätt att förlänga drifttiden kan vara att använda olika kretsar alternerande.

Som ett resultat av systemanalysen rekommenderas att vattenuppfyllnad av inneslutningen sker till en nivå ca 1 m ovanför reaktortankens botten. Om en högre

vattennivå väljs kommer fler genomföringar att bli vattentäckta och läckagemängden ökar.

FRIPP har presenterats internationellt i ett antal sammanhang och mött intresse och uppskattning. Första gången var ett bidrag [31] till ett CSNI-möte om haverihantering i Rom, 1991. Ett antal år senare togs det upp på nytt inom CSNI i en av dess arbetsgrupper. I detta sammanhang gjordes en inventering av frågeställningar som kommenterades kortfattat. Arbetet finns avrapporterat i [32]. Utöver de frågor som hanterats i FRIPP och beskrivits ovan togs följande upp i [32]:

- Vattenfyllning av kaviteten under reaktortanken
- Vattenfyllning av ånggeneratorerna i PWR
- Filtreerad tryckavlastning
- Användning av inneslutningssprinkling

Innehållet i [32] är inte tillräckligt utvecklat för tillämpning på haverihantering. Däremot ger det en del nya infallsvinklar, som kan bearbetas vidare.

#### **4.9.3 Haverihantering**

Som stöd för anläggningsledaren finns kunskapsbaserade handböcker i Forsmark (THAL) och för Ringhals PWR (HSB-P) och Ringhals BWR (HSB-B). Underlaget till dessa handböcker har till stor del hämtats från FRIPP. Åtgärder i haverihanteringen i dessa dokument uppdelas i åtgärder på kort sikt och på lång sikt.

Exempel på centrala frågeställningar där dessa dokument skall ge stöd är:

- Vattenfyllning av inneslutningen
- pH-kontroll
- Kylning av inneslutningen

En presentation av haverihanteringen i Forsmark ges i [33].

#### **4.9.4 Slutsatser**

Följande slutsatser kan dras av FRIPP och fortsatt arbete därefter:

- Åtgärder i det korta perspektivet efter inledande händelse kan ha långsiktiga verkningar.
- Det kan finnas områden som inte finns med i FRIPP, som bör beaktas tidigt i haverihanteringen, på grund av att åtgärder får verkningar på sikt.
- I haverihanteringen bör en helhetssyn eftersträvas, genom att både negativa och positiva effekter tas med i bedömningen innan en åtgärd vidtas.

### **4.10 Haveri under revisionsavställning**

#### **4.10.1 Bakgrund**

Under revisionsavställning pågår, under en stor del av tiden, arbeten i reaktorinneslutningen och i primärsystemet. Detta medför att de barriärer för inneslutning av aktiviteten i bränslet inte kan tillgodoräknas på samma sätt som vid normal effektdrift. Ett haveri under dessa förhållande kan därför ge stora utsläpp och därmed få allvarliga konsekvenser både inom och utanför anläggningen.

Avsikten med detta avsnitt var från början att genomföra utsläppsberäkningar med användning av MAAP för några representativa haverier under revisionsavställning. Det visade sig dock att MAAP inte ger tillförlitliga resultat vad gäller utsläpp i dessa fall. Därför utfördes inga beräkningar utan i stället gjordes en genomgång av kunskapsläget utgående från befintligt material med referenser enligt nästa avsnitt.

#### 4.10.2 Kunskapsläge

Detta avsnitt bygger på material från referenserna [34], [35] och [36]. Referens [34] innehåller en genomgång av haverier under revisionsavställning för svenska BWR och Olkiluoto. Referens [35] beskriver arbetet vid revisionsavställning i Olkiluoto 1-2, medan [36] är en genomgång av haverifall under avställning för Forsmark 1-2.

I referens [34] ges en beskrivning av möjligheterna till RA-LOCA för svenska BWR och Olkiluoto. Riskerna för kylmedelsförlust bedöms som betydligt lägre när bränslet flyttats till bränslebassängen jämfört med då det står kvar i reaktortanken. Det finns inga gemensamma regler för var bränslet skall förvaras under revisionsavställning. För de flesta reaktorer gäller att det står kvar i reaktortanken under revision.

Referens [35] ger en översiktlig beskrivning av hur TVO arbetar under revisionsavställning i Olkiluoto 1-2 med tonvikt på säkerhetsfrågorna. För att hålla en hög nivå på säkerheten är motivationen och kompetensen hos personalen avgörande. Centrala delar i förberedelserna för revision är därför träning och utbildning av personal för att öka kunskaperna både om anläggningen och om de procedurer, som gäller.

Regelverket för drift av anläggningen finns i STF, som kompletterats med ett avsnitt om kall avställning och bränslebyte. I en del fall kan STF vara svår att tillämpa. Då skapas speciella procedurer, som först behandlas av säkerhetsorganisationen på verket och sedan lämnas till STUK för granskning och godkännande.

PSA-studierna för Olkiluoto har kompletterats med analys för revision. Bidraget till härdskadefrekvensen under revision är lågt, mindre än 1% av det totala värdet. Däremot kan utsläppen av flyktiga nuklider uppgå till ca 30% av härdinventariet. Detta beror på att inneslutningen inte kan tillgodoräknas under större delen av revisionen.

Två användningsområden finns för PSA-studierna i Olkiluoto. För det första ger de en bild av hur sannolikheten för haveri varierar beroende på situationen i anläggningen i olika skeden av revisionen. För det andra har dessa studier använts för att förbättra procedurer så att sannolikheten för haveri reduceras.

Ett av de mest intressanta haverifallen är stor LOCA under service av HC-pumpar. I detta fall uppkommer ett stort läckageflöde via axelgenomföringarna. För att det skall vara möjligt att hålla härden vattentäckt är det ett villkor att inneslutningen är tillräckligt tät. För att ersätta resteffekten behövs en vattentillförsel av 12 kg/s i början av avställningen och 6 kg/s i slutet.

Följande primära säkerhetsfunktioner måste uppfyllas under revision:

- Kylning av resteffekten
- Bibehållande av kylmedelsinventarium
- Reaktivitetskontroll

Kylning av resteffekten skall kunna upprätthållas även om en aktiv komponent felfungerar. Även bibehållande av kylmedelsinventarium skall klaras inom enkelfelskriteriet. Det mest kritiska av dessa fall är möjligheten till stort bottenläckage i

samband med underhåll av HC-pumpar. I detta fall vidtas åtgärder för att inneslutningen skall vara tät under hårdnivå genom att personslussen i nedre drywell hålls stängd.

För reaktivitetskontroll gäller att en avstängningsmarginal på minst 1% skall finnas under hela avställningen. Olika fall av felladdning och otillåten styrstavsdragning analyseras i förväg. Som underlag till PSA-studien ingår också mänskligt felhandlande. Riskbidraget från bristande reaktivitetskontroll är litet.

I referens [36] ges en översikt av haverifall under revision utgående från senaste PSA-studien för Forsmark 1-2, dvs PSA 2000.

För dessa sekvenser finns tre möjliga konsekvenser:

- Success- ingen härdskada eller förhöjd strålningsnivå i reaktorhallen.
- Success med ökad aktivitetsnivå – ingen härdskada men vattennivån ovanför härden så låg att den inte ger önskvärd strålskydd.
- Härdskada- härdfriläggning och bränsleskador, som leder till att aktivitet frigörs.

Det andra av dessa utfall, dvs. ökad strålningsnivå i reaktorhallen, är av betydelse för personalen i anläggningen då haveriet inträffar.

Härdskada ger större utsläpp till omgivningen än om samma härdskada skulle ägt rum under normaldrift med intakta barriärer mot utsläpp.

Ett exempel från F1/F1, hämtat från [36] är följande: stor LOCA i samband med service på HC-pumpar. Nedre slussen och bassängportarna stängs. Bränslet i härden kyls med system 323 och i bassängen med system 324. Dörrarna till wet-well och övre slussen stängs. Inneslutningen fylls med bassängvatten och samtidigt pumpas vatten in med 323. Vattenytan stabiliserar sig på hårdkantens övre nivå. Konsekvensen blir ökad strålningsnivå.

#### **4.10.3 Haverihantering**

Rutiner finns framtagna för att hålla nere sannolikheten för haveri under revision. Dessa är särskilt väl utvecklade hos TVO. Däremot finns inte dokumentation för att ta hand om konsekvenserna om ett haveri verkligen skulle inträffa.

För Forsmark 1-3 finns en generell administrativ föreskrift, som säger att inneslutningens nedre slussport skall vara stängd under tiden man arbetar med HC-pumparna.

#### **4.10.4 Slutsatser**

Även om sannolikheten för härdskador under revision är lägre än vid normaldrift blir riskbidraget relativt högt. Detta sammanhänger med att barriärerna mot utsläpp till omgivningen har nedsatt funktion.

De radiologiska konsekvenserna av ett haveri under revision kan bli svåra. Detta gäller både i omgivningen och för personalen som är inom anläggningen.

Därför är det viktigt att arbeta förebyggande, dvs. så att sannolikheten för ett haveri blir låg.

Det är motiverat att arbeta vidare med utveckling av dokumentation för hantering av haveri under revision, både förebyggande och konsekvenslindrande.

## **4.11 Behov av information för att genomföra åtgärder**

### **4.11.1 Bakgrund**

För att genomföra åtgärder inom haverihanteringen krävs aktuell och tillförlitlig information om anläggningens status. För att kontrollera att detta är uppfyllt fordras både en genomgång av vilken information som haverihanteringen behöver och dessutom bedömning av tillförlitligheten av informationen. I detta projekt har den första av dessa delar genomförts med Forsmark 1 som referensreaktor. Detta arbete har avrapporterats i [37].

### **4.11.2 Kunskapsläge**

För Forsmarksreaktorerna är ÖSI och THAL de viktigaste dokumenten för haverihantering. Den genomgång av behov av information som behövs för haverihanteringen, avrapporterad i [37] utgår från dessa båda dokument med Forsmark1 som referensreaktor.

Som ett första steg har den information som efterfrågas i ÖSI och THAL listats. Därefter har variablerna indelats i kategorier i två steg. Först har en uppdelning gjorts med avseende på de kritiska säkerhetsfunktionerna reaktivitet, härdkylning, aktivitetsbarriärer, värmesänka och utsläpp. Därefter har en uppdelning gjorts (med hänsyn till vilken typ av information det gäller) i följande tre grupper:

- Värdebaserad information, tex. uppmätt temperatur
- Binära data, beskriver ett tillstånd, som kan vara växande eller avtagande
- Systemtillstånd, tex. om ett system är tillgängligt eller ej

Den genomgång som dokumenterats i [37] är en inventering av vilken information som behövs i haverihanteringen då ÖSI och THAL används. Däremot innehåller den inga bedömningar om tillförlitlighet av informationen. Detta är en fråga som skulle kräva mer tid att reda ut.

En väsentlig förutsättning när det gäller att bedöma tillförlitligheten av uppmätt information är på vilket sätt instrumenteringen är kvalificerad. I samband med införandet av konsekvenslindrande system uppgraderades också instrumenteringen i inneslutningen i anläggningarna. Mätutrustning kvalificerad för svåra haverier infördes för vattennivå, tryck, temperatur och aktivitet.

Mätningen av vattennivå i reaktortanken under ett haveri anses inte tillförlitlig. Detta är en svag punkt i informationen om tillståndet i härden. En annan oklarhet är i vilken utsträckning haveriprovtagning fungerar i ett svårt haveri.

### **4.11.3 Haverihantering**

Haverihanteringen förutsätter kontinuerlig tillgång till aktuell och korrekt information om anläggningens status.

### **4.11.4 Slutsatser**

Den genomgång som gjorts i detta projekt av behovet av information omfattar en kartläggning av vad som krävs för att genomföra haverihanteringen enligt ÖSI och THAL. Däremot innehåller den inga bedömningar beträffande tillförlitligheten av informationen. Det går därför inte att dra någon slutsats mer än att detta område bör undersökas ytterligare.

## **5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER**

Följande områden har bearbetats:

- Tidig tryckavlastning på grund av hög vätgasproduktion
- Återkriticitet vid återflödning av skadad härd
- Tankgenomsmältning
- Ångexplosion efter tankgenomsmältning
- Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning
- Vätgasbrand i reaktorinneslutningen
- Läckande inneslutning
- Vätgasbrand i reaktorbyggnaden
- Långtidsförloppet efter ett svårt haveri
- Haveri under revisionsavställning
- Behov av information för att genomföra åtgärder.

Slutsatser och rekommendationer sammanfattas i tabell 1.



Tabell 1. Sammanfattning av slutsatser och rekommendationer.

Frågeställning	Avslutad fråga	Kommentarer
Tidig tryckavlastning på grund av hög vätgasproduktion	Ja	Tidpunkten för tryckavlastning påverkas av inneslutningssprinklingen. Tidig tryckavlastning är inte ett hot mot inneslutningen.
Återkriticitet vid återflödning av skadad härd	Ja	Övertryckning av inneslutningen har låg sannolikhet. Temperaturen i kondensationsbassängen är en viktig information. Borsystemet kan användas för att få härden underkritisk.
Tankgenomsmältning	Nej	Alternativa möjligheter att kyla härden bör undersökas mer, tex. kylning via styrstavsgenomföringar
Ångexplosion efter tankgenomsmältning	Ja	Det bör kontrolleras hur stora tryckpulser inneslutningen tål. Ev. kan det finnas skäl att förstärka svaga punkter. Detta problem är anläggnings specifikt.
Smältans kylbarhet efter tankgenomsmältning	Nej	Det är svårt att visa att smältan är kylbar efter tankgenomsmältning. För att skydda bottenplattan kommer därför införande av downcomers eller core catcher ifråga. Detta kräver ytterligare forskning.
Vätgasbrand i reaktorinneslutningen	Ja	Om tiden då inneslutningen är luftfylld minimeras blir sannolikheten för detta scenario låg.
Läckande inneslutning	Nej	Diffust läckage och hur detta kan reduceras är ett exempel på frågor som bör undersökas mer.
Vätgasbrand i reaktorbyggnaden	Ja	Denna frågeställning är nu utforskad och det anses inte finnas något hot mot inneslutningen.
Långtidsförloppet efter ett svårt haveri	Nej	Allmänt gäller detta hur åtgärder i ett kort tidsperspektiv kan få effekter (positiva eller negativa) på lång sikt. Ett exempel på en fråga som skulle behöva undersökas mer är vattenfyllning av inneslutningen efter tankgenomsmältning.
Haveri under revisionsavställning	Nej	Ett skelett för ÖSI bör tas fram.
Behov av information för att genomföra åtgärder	Nej	Bör bearbetas vidare. Ett exempel är frågan om operatören får tillräcklig information under härnedsmältning.

## 6 REFERENSER

1. E. Söderman, L. Hammar, W. Frid, J-O Liljenzin, O. Sandervåg, K. Johansson, Handbok över haveriförlopp i svenska reaktorer- Slutrapport från RAMA-3, Dec-89.
2. H. Wennerström, F1/F2- MAAP4-Analys av tidig tryckavlastning, Rapport T-SEKT 16/2002
3. W. B. Scott et al, Recriticality in a BWR Following a Core Damage Event, NUREG/CR-5653, December 1990
4. W. Frid et al, Severe Accident Recriticality Analysis (SARA), Work Performed under EC Contract No. FI4SCT960027, November 1999, SKI Report 99:32
5. I. Lindholm, Studies on BWR containment response to a postulated recriticality event, VTT Technical report, ROIMA-14/98
6. S-O Andersson, V. Gustavsson, A. Hallman, P. Hellström, G. Jung, H. Strümpel, U-K Wendt, Ringhals 1- PSA nivå 2, Rapport GE 34/96
7. B.R. Sehgal, T. N. Dinh, V. A. Bui, R. R. Nourgaliev, Investigation of Risk-dominating Phenomena in Swedish LWR's, December 12, 1998.
8. P. Hoffman et. al, Flooding Experiments on the Determination of the Hydrogen Source Term, presented at CSARP, Albuquerque, New Mexico, May 3-6, 1999.
9. W. Hering et. al, SCDAP/RELAP Code Validation and Core Degradation Analysis, presented at CSARP, Albuquerque, New Mexico, May 3-6, 1999.
10. W. Frid, F. Höjerup, I. Lindholm, L. Nilsson, H. Sjövall, Severe Accident Recriticality Analysis (SARA), FISA, Luxemburg, 29 Nov-1 Dec. 1999.
11. F. Müller, Smältans kylbarhet i reaktortanken, SKI Rapport 02:15, APRI 4-Rapport
12. M. J. Konovalikhin, A. Jasiulevicius and B. R. Sehgal, Heat Removal through Control Rod Guide Tubes in BWR Lower Head during a Severe Accident
13. V. Asmolov, V. Strizhov, B. R. Sehgal, Challenges left in the area of in-vessel melt retention, FISA, Luxemburg, 29 Nov-1 Dec 1999.
14. J. M. Seiler, Methodology for Analysis of R&D Needs in Severe Accidents, Material Effects on Severely Damaged Core Phenomena, FISA, Luxemburg, 29 Nov-1 Dec. 1999.
15. D. Magallon et al. "Molten Fuel Coolant Interaction (MFCI), FISA, Luxemburg, 29 Nov-1 Dec 1999
16. B. R. Sehgal, H. O. Haraldsson, Z. L. Yang, A Review of Steam Explosions with Special Emphasis on the Swedish and Finnish BWRs, SKI Report 02:16, APRI 4, Phase 2 Report
17. K. M. Becker & H. Ölander, An experimental investigation of the effect of tensides on the rise velocity of nitrogen bubbles in the water, KTH-NEL-45, May 1988.
18. H. Alsmeyer, Proceedings of the OECD Workshop on Ex-vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November 1999.
19. Ex-vessel Debris Coolability, Summary and Recommendations, OECD/CSNI Workshop, 15-18 November 1999, Karlsruhe, Germany, Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2000)14.

20. I. Lindholm, A Review of Dryout Heat Fluxes and Coolability of Particle Beds, SKI Report 02:17, APRI 4, Stage 2 Report
21. In-vessel and Ex-vessel Hydrogen Sources- Report by NEA Groups of Experts, NEA/CSNI/R(2001)15, Oct-2001
22. T. Okkonen, APRI 3, Subproject RAF, Hydrogen-related severe accident phenomena in BWRs, ABBAAtom Report PAC 97-217
23. E. Appelgren, L-O. Höglund, V. Gustavsson, FRISK- Radiologiska konsekvenser av diffust läckage, Forsmark 1 och 2, Rapport PK-126/87
24. V. Gustavsson, Radiologiska konsekvenser av diffust läckage i Forsmark 3 vid FRISK designfall, Rapport PK 61/88
25. Project on Optimisation of Severe Accident Management Strategies for the Control of Radiological Releases (OPTSAM), CEC Project FIKS-CT1999-00013
26. A. Silde, I. Lindholm VTT Energy Finland, On Detonation Dynamics in Hydrogen-Air-Steam Mixtures: Theory and Application to Olkiluoto Ractor Building, NKS-9, February 2000
27. A. Silde VTT, R. Redlinger FzK, Three-dimensional Simulation of Hydrogen Detonations in the Olkiluoto BWR Reactor Building, NKS-27, January 2001
28. A. Saarenheimo, A. Silde, Kim Calonius, Structural integrity of a reinforced concrete structure and a pipe outlet under hydrogen detonation conditions, NKS-73, May 2002
29. V. Gustavsson, G. Hultqvist, L-E Folkesson, Slutrapport för FRIPP för Forsmark 1-2, Rapport PK-41/91
30. V. Gustavsson, G. Hultqvist, L-E Folkesson, Slutrapport för FRIPP för Ringhals 3-4, Rapport PK-78/91
31. V. Gustavsson, FRIPP- A Project Concerning Long Term Effects of a Severe Accident, presentation at a CSNI Specialist Meeting, Rome, 23-25 September, 1991
32. V. Gustavsson, J. Rhode GRS, M. Vidard EdF, Impact of Short Term Severe Accident Management Actions in a Long Term Perspective, NEA/CSNI/R(2000)8, March 2000
33. G. Löwenhielm, B. Jansson, V. Gustavsson, New Ideas about Procedures and Handbooks for Severe Accidents, paper presented at NUTHOS-5, Beijing, China, April 14-18, 1997
34. F. Müller, M. Sjöberg, Förstudie av haverifallet kylmedelsförlust under revisionsavställning, SKI Rapport 02:5, januari 2002
35. M. Mustonen, S. Koski, M. Koskonen, R. Himanen, M. Hakola, Olkiluoto 1 and 2- Safety Practices During Planned Outages, Proceedings of ICONE 8, 8<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA
36. E. Möller, Studie av haveri under revisionsavställning- underlagsrapport för APRI-4, Rapport T-SEKA-02/20
37. E. Möller, Behov av information för åtgärder under haverihantering- underlagsrapport för APRI-4, T-SEKA 02/37

## **7 APPENDIX A: STÖRNINGSINSTRUKTIONER**

### **A.1 INLEDNING**

I samband med införandet av konsekvenslindrande system vid de svenska kärnkraftverken och TVO utvecklades också strategier och instruktioner för hantering av svåra haverier.

Sedan detta program genomförts har insatserna i Norden på detta område varit relativt begränsade. Däremot har aktiviteten internationellt, speciellt i USA, ökat vad gäller utveckling och implementering av instruktioner för hantering av svåra haverier. För kokarvattenreaktorer är BWROG (BWR Owners Group), där även de svenska verken och TVO ingår, en ledande organisation i detta arbete.

I utvecklingen av instruktioner för hantering av svåra haverier är, förutom det tekniska innehållet, strukturering och validering av materialet väsentligt.

En instruktion måste vara väl strukturerad för att uppfylla kravet på användarvänlighet. Ett vanligt sätt att arbeta för att få instruktionerna tydliga är att använda flödesscheman.

Validering är en aktivitet, som utförs för att demonstrera instruktionernas användbarhet i ett skarp läge. Ett ofta använt sätt att utföra en validering är att, med ett utvalt skiftlag, simulera en haverisekvens i en fullskalesimulator. En sådan övning ger information om instruktionens användbarhet för att hantera den valda sekvensen.

Observationer under valideringen dokumenteras av det team som tillsammans med skiftlaget genomför övningen. Därefter sammanställs resultaten i en rapport. Frågan om instruktionen behöver revideras eller inte avgörs sedan beroende på resultatet av valideringen.

### **A.2 MÅL OCH PROJEKTORGANISATION**

Målet med denna del av projektet är att ta fram underlag för att bättre strukturera vår dokumentation och validera våra strategier för haverihantering.

Projektet leddes av Veine Gustavsson, SwedPower. Vidare fanns en projektgrupp med följande medlemmar: Wiktor Frid SKI, Ninos Garis SKI, Heikki Sjövall TVO, Carl-Johan Kemgren OKG, Joachim Bende FKA, Henri Skrede Ringhals och Ulf Soldéus Barsebäck. När projektet startades deltog i stället Håkan Almroth, Ringhals och Carl-Göran Lindvall, Barsebäck.

Gruppen har två huvuduppgifter. Den skall vara en länk mellan uppdragsgivarna och projektet. Detta innebär att delta i diskussioner om inriktning och innehåll i projektet samt att ge synpunkter på rapporter som kommer fram i projektet. Den skall vidare verka för att beställarna hålls informerade om projektet.

### **A.3 STÖRNINGSINSTRUKTIONER VID VÅRA VERK**

Den viktigaste dokumentationen för hantering av svåra haverier är de övergripande störningsinstruktionerna (ÖSI), som finns på alla verk. Därutöver finns annan

dokumentation, t.ex. THAL (Teknisk Handbok för AnläggningsLedare) i Forsmark. Detta är en kunskapsbaserad handbok som är avsedd att användas av anläggningsledaren i KC (kommandocentral) och avsedd som beslutsstöd i långtidsförloppet då ÖSI inte längre kan tillämpas.

Det bör observeras att ÖSI för en del verk (främst OKG och Ringhals) täcker in händelser utanför design.

ÖSI är baserad på begreppet kritiska säkerhetsfunktioner. För BWR kan följande kritiska säkerhetsfunktioner användas: reaktivitet, härdkylning, aktivitetsbarriärer och värmesänka.

För att få överskådlighet och användarvänlighet är ÖSI utformade som flödesscheman. För varje kritisk säkerhetsfunktion finns ett schema, som är uppbyggt av en sekvens av frågor. Svaret (ja eller nej) på en given fråga styr den väg, och därmed vilka åtgärder, användaren av ÖSI väljer.

ÖSI vid de olika verken bygger på samma grundläggande principer och har en utformning som uppvisar stora likheter. Utvecklingen har dock bedrivits självständigt av kraftföretagen och detta har naturligt lett till skillnader.

### **A.3.1 Översiktlig beskrivning av ÖSI vid de olika verken**

I detta avsnitt ges en översiktlig beskrivning av ÖSI, övergripande störningsinstruktioner, såsom de är utformade på de olika verken.

#### **Forsmark, ÖSI, övergripande störningsinstruktioner**

ÖSI bygger på de fyra kritiska säkerhetsfunktionerna reaktivitet, härdkylning, aktivitetsbarriärer och värmesänka och innehåller i stor utsträckning flödesscheman.

ÖSI innehåller förutom avsnitten om de kritiska säkerhetsfunktionerna följande delar:

- Kontroller efter störning
- Kriterier för haverilarm resp. höjd beredskap
- Åtgärder för larmning
- Personsäkerhetsåtgärder
- Uppföljning av processparametrar efter larmning
- Konsekvensbegränsande åtgärder
- Checklista för avlämning Skiftenjör-driftledning

ÖSI för blocken i Forsmark finns beskrivna i [1], [2] och [3]. Konsekvensbegränsande åtgärder vidtas i samråd med anläggningsledaren (AL) sedan haverilarm är utlöst. Som beslutsstöd används THAL, teknisk handbok för AL.

#### **Oskarshamn, ÖSI, övergripande störningsinstruktioner**

Dessa är uppbyggda genom att anläggningen delas upp i tre delar: reaktortank, reaktorinneslutning och maskinstation.

För varje del har de parametrar valts ut som är väsentliga för integritet hos var och en av dessa. Varje parameter har åsatts ett gränsvärde.

Ingången till ÖSI utgörs av ett översiktsblad som innehåller samtliga parametrar.

Exempel, hämtade från block 1:

Symptom för reaktortank: utebliven snabbstoppsfunktion, låg nivå i reaktortanken, högt tryck i reaktortanken.

Symptom för reaktorinneslutning: högt tryck i reaktorinneslutningen, hög temperatur i wet-well.

Symptom för maskinstation: läckage i maskinstation, aktivitet i maskinstation.

Följande åtta instruktioner finns:

- Symptomkontroll
- Utebliven SS-funktion
- Högt tryck i R-tank
- Låg nivå i R-tank
- Hög temperatur i wet-well
- Högt tryck i PS
- Aktivitet i maskinstation
- Läckage i maskinstation

Alla dessa instruktioner är utformade som flödesscheman.

Skiftingenjören använder ÖSI och följande kriterier gäller:

- ÖSI's symptomkontrollblad går igenom vid varje snabbstopp
- De övriga ÖSI-sidorna används när något kritiskt gränsvärde överskrids
- ÖSI's symptomkontrollblad används om skiftingenjören anser att störningsbilden är oöverskådligt komplicerad.

ÖSI för Oskarshamn finns dokumenterade i [4], [5], [6] och [7].

### **Barsebäck, ÖSI, övergripande störningsinstruktioner**

Ingångarna till ÖSI är följande:

- Reaktivitet
- Onormal vattennivå i reaktortanken
- Onormalt tryck i reaktortanken
- Onormal temperatur i kondensationsbassängen
- Onormalt låg vattennivå i kondensationsbassängen
- Onormalt hög vattennivå i kondensationsbassängen
- Förhöjd aktivitet i reaktorinneslutningen

För var och en av dessa ingångar finns en instruktion i form av flödesschema och tillhörande stödjande information.

Kopplingen mellan haverihantering och haveriberedskap är särskilt tydlig i Barsebäck genom att larmkriterier för höjd beredskap och haverilarm arbetats in i ÖSI.

ÖSI för Barsebäck finns dokumenterade i [8].

### **Ringhals 1, Generalen**

Generalen består av flödesscheman med text för följande områden:

- Reaktivitet
- Härdkylning
- Tryckkontroll
- Värmesänkor
- PMR

PMR står för Post Mitra Ringhals och avser användning av de konsekvenslindrande systemen, d.v.s.:

361- tryckavsäkring av inneslutningen

362- tryckavlastning av inneslutningen

365/367- system för redundant vattentillförsel till sprinkling av inneslutningen

System 361 används för att förhindra snabb övertryckning av inneslutningen i ett haveriscenario med stor LOCA och läckande mellanbjälklag. Detta system används endast i fall då aktiviteten i inneslutningen är försumbar.

Skrubbern (system 362) är avsedd att förhindra långsam övertryckning av inneslutningen och ger låga utsläpp till omgivningen.

Systemen 365 och 367 har till uppgift att utgöra redundant vattentillförsel till system för sprinkling av inneslutningen.

ÖSI för Ringhals 1 beskrivs i [9].

### **TVO**

ÖSI för TVO består av 12 procedurer varav en för följdning av störning, fem för reaktorn, fyra för inneslutningen, en för hantering av svåra haverier och en för återställning av kraftmatning.

För reaktorn finns:

- Scram fungerar inte
- Låg nivå i härden
- Hög nivå i härden
- Högt tryck i reaktorn
- Lågt tryck i reaktorn

Och för inneslutningen:

- Högt tryck i primärutrymmet
- Hög temperatur i drywell
- Hög temperatur i kondensationsbassängen

- Hög eller låg nivå i kondensationsbassängen

Alla nio ovannämnda ÖSI och den generella följningsinstruktionen har validerats i övningskörningar med fullskalesimulatorn. Återställning av kraftmatning har validerats med en demonstration i anläggningen. ÖSI för svåra haverier har validerats i beredskapsövningar.

Moderniseringsprojektet har genomförts vid TVO, som beaktats i senare omarbetningar av ÖSI. Ett exempel är att förbindelsen från övre drywell till filtret hålls öppen från början av haveriet. Denna ändring motiveras av att man vill förhindra snabb övertryckning av inneslutningen på grund av icke kondenserbara gaser.

En översiktlig beskrivning av ÖSI för TVO ges i [10].

ÖSI för hantering av svåra haverier motsvarar severe management guide. Den innehåller detaljerade instruktioner för operatörer. Beredskapsorganisationen utnyttjar utom ÖSI analyser av svåra haverier (FSAR-analyser och PSA nivå 2) där ÖSI-åtgärder motiveras. Beredskapsplanen ger metoder för uppskattning av härdsador och radiologiska förhållanden inom anläggningen och i omgivningen.

### **A.3.2 Validering av ÖSI**

Sedan instruktionerna för haverihantering utvecklats efter införande av konsekvenslindrande system genomfördes program såväl för utbildning som för validering och verifikation av dessa.

Valideringar har utförts i fullskalesimulatorer för att kontrollera instruktionernas användbarhet för att hantera ett haveri och återföra anläggningen till ett stabilt och säkert tillstånd. Denna typ av övningar har genomförts med ett stort antal skiftlag och olika haverisekvenser.

Under dessa valideringar har MTO-experten medverkat i planering och genomförandet. Vidare har frågeformulär använts för att fånga upp eventuella problem under användning av instruktionerna. I den mån brister i instruktionerna identifierats har dessa åtgärdats.

Förutom validering har verifikation av instruktionerna utförts. I [11] ges följande definitioner av validering respektive verifikation:

Validering: ”Bekräftelse genom framläggande av bevis att de särskilda kraven för en specifik, avsedd användning har uppfyllts”

Verifikation: ”Genom observation/test kontrollera att en produkt uppfyller en viss egenskap genom att jämföra mot specifikation”

Validering gör vi alltså i vårt fall för att få en uppfattning om användbarheten av ÖSI i ett skarpt läge. Till exempel skall en validering ge svar på om ÖSI är användarvänlig och begriplig eller om den är lätt att misstolka.

Verifikation är däremot en ren kontroll att uppgifter som ges är riktiga, t ex att givna gränsvärden stämmer med specifikationer.

Om en instruktion skall verifieras och valideras så skall verifikationen ske först.

Denna rapport handlar främst om validering.



I det följande ges två exempel på valideringar, som genomförts under senare år. Avsikten är att med dessa exempel ge en uppfattning om den nivå våra valideringar ligger på för att senare kunna dra paralleller med BWROG's motsvarande aktiviteter.

### **Validering av Generalen**

Under hösten 1998 utfördes en omfattande validering av Generalen, som är störningsinstruktion för Ringhals 1. Detta arbete finns rapporterat i [11].

Avsikten med valideringen var att ge svar på frågan hur väl instruktionen stödjer skiftlaget i dess arbete vid en störning.

Valideringsprocessen bestod av tre delar:

- Ta fram en valideringsplan
- Genomföra valideringen
- Skriva en rapport om valideringen

I planeringen av valideringen ingick bl.a. följande moment:

- Formulera mål och avgränsningar
- Välja metoder
- Organisera ett team som utför valideringen
- Välja ut skiftlag som skall delta
- Ta fram haverisekvenser

Det övergripande målet för valideringen var att undersöka om Generalen ger ett fullgott stöd till skiftlaget för att återföra anläggningen till ett säkert tillstånd efter snabbstopp även i fall som avviker från konstruktionsförutsättningarna.

Målet delas upp i tio delmål, där dessa båda ingick:

- Visa att Generalen hänvisar till relevanta instruktioner
- Visa att Generalen är enkel och effektiv att använda för sitt syfte

En avgränsning i valideringen var att ett driftfall per kritisk säkerhetsfunktion kördes. Generalen innehåller fem huvudfunktioner: reaktivitet, härdkylning, tryckkontroll, värmesänkor och PMR. Tryckkontroll avser primärsystemet och PMR (Post Mitra Ringhals) de konsekvenslindrande systemen (skrubbern och redundant vattentillförsel till inneslutningssprinkling). För var och en av dessa huvudfunktioner har en haverisekvens använts i valideringen.

Valideringsgruppen var sammansatt av personer med kompetens från följande områden: drifterfarenhet, systemkunskap, kunskap om metoder för test och utvärdering och MTO-kunskap. Valideringen pågick i skift uppdelade på 8 veckor och med 5 deltagare i varje övning. I varje lag av testpersoner har skiftchefer och reaktoroperatörer ingått men även övrig bemanning i skiftlaget för att kunna studera hur Generalen medverkar till samarbete inom gruppen.

En förutsättning var också att all verifiering har utförts före valideringen. Annars finns risk att brister upptäcks som borde åtgärdats efter verifiering.

Den metod som använts byggde på användning av ett antal hypoteser som testats under valideringen. Dessa hypoteser var kopplade till ovan nämnda delmål. Som exempel på

detta ges hypotesen ”Generalen underlättar att ta fram den information som behövs” som är kopplad till delmålet ”Visa att Generalen hänvisar till relevanta instruktioner”. Ett annat exempel är hypotesen ”Generalen är tydlig, entydig och enkel att tolka” som är länkad till delmålet ”Visa att Generalen är enkel och effektiv att använda för sitt syfte”.

För att testa om de uppsatta hypoteserna var riktiga behövdes ett antal kriterier som går att avläsa och dokumentera under valideringen. Som viktiga exempel på kriterier kan nämnas situationsmedvetande och kontrollerbarhet.

Situationsmedvetandet kan mätas genom att låta skiftlaget redogöra för tillståndet i anläggningen (tex. värdet på viktiga processparametrar) vid valda tidpunkter under valideringen.

Kontrollerbarhet avser skiftlagets känsla för vad som skall göras för att reda upp en besvärlig situation. God kontrollerbarhet innebär att det finns en medvetenhet om olika möjliga vägar att nå målet. Vidare behövs praktisk kunskap om olika sätt att gå tillväga.

Under valideringen samlades stora mängder information in genom diskussioner, iakttagelser, anteckningar, samtal och enkäter. Valideringen av Generalen gav ca 10000 data att samla in och utvärdera.

Allmänt gav valideringen till resultat att Generalen är ett gott stöd till skiftlaget även om en del förslag till förbättringar identifierades.

En negativ synpunkt som kom fram var att det ibland tar för lång tid att komma fram till rätt avsnitt i Generalen. Skiftlaget vet var problemet finns och skulle vilja komma fram till det aktuella avsnittet direkt. Att detta tar tid hänger samman med att instruktionen skall vara heltäckande.

Resultaten från valideringen har sammanställts och överlämnats till Ringhals i en rapport, där förslag till förbättringar av Generalen ges.

### **Validering av Säkerhets- och ÖSI-panelen i Barsebäck**

Under 1997 genomfördes en validering av Säkerhets- och ÖSI-panelen i Barsebäck, som finns rapporterad i [12].

Valideringen syftade till att ge svar på två frågor:

- Ger panelerna relevant information för skiftchefen i en störningssituation?
- Förbättrar informationen skiftchefens hantering av störningen?

För att få fram betydelsen av panelerna genomfördes körningar med resp. utan paneler. Sex skift deltog och varje skift körde två scenarier. Körningarna utfördes i fullskalesimulator och efteråt intervjuades operatörerna. Frågorna var uppdelade på följande teman:

- Skiftets tolkning av situationen
- Händelser under störningsförloppet, speciellt observationer och beslut
- Bedömning av panelernas betydelse

Övningarna spelades in på band och video, som sedan användes under utvärderingen.

Varje körning utvärderades först genom beskrivning av operatörernas agerande. Därefter utvärderades skiftets förmåga att hantera störningen med hjälp av ett antal på förhand definierade kriterier.

De kriterier som använts kan sammanfattas så:

- Helhetsbild av läget och förståelse av situationen (sätt att fatta beslut)
- Enhetlig uttolkning av situationen och enhetligt agerande (sätt att samarbeta)
- Situationsanpassad användning av egna resurser (sätt att hantera problem)

Kriterierna delades i sin tur upp i ett antal variabler, som utvärderades enligt en tregradig skala. Dessa resultat bearbetades sedan med statistiska metoder för att få fram slutsatser.

Två huvudsakliga slutsatser kom fram av valideringen:

- Panelerna ger relevant information och upplevs minska stressen i en störningssituation
- Panelernas användbarhet varierar beroende på situationen.

#### **A.4 UTVECKLING AV STÖRNINGSINSTRUKTIONER, BWROG**

Under de senaste fem åren har ett omfattande arbete bedrivits i USA inom BWROG för att ta fram dokumentation för hantering av svåra haverier för kokarvattenreaktorer. En viktig drivkraft i denna utveckling har varit pressen från NRC på kraftföretagen.

Tillsynsmyndigheten, HSK, i Schweiz arrangerade ett möte de 19 januari 1998, där två konsulter var inbjudna för att presentera detta arbete. Förutom HSK deltog representanter från kraftindustrin i Schweiz och från Sverige, Oddbjörn Sandervåg, SKI och författaren.

En del av det material som använts för att ta fram denna rapport kommer från ovan nämnda möte, som finns rapporterat i [13]. Vid ett tidigare tillfälle gavs en presentation om BWROG Accident Management Guidance för Leibstadt. Även detta material delades ut vid mötet med HSK och finns i [14].

Dokumentationen utvecklad inom BWROG för hantering av svåra haverier består av två huvuddelar, EOP's (Emergency Operating Procedures) och SAG's (Severe Accident Guidelines).

Utvecklingen av EOP's och SAG's har genomförts i följande steg:

- Insamling av bakgrundsdokument
- Dra ut lärdomar av dessa dokument
- Ta fram strategier
- Utformning av generiska EOP's och SAG's

Gemensamt för EOP's och SAG är att båda bygger på ett symptom-baserat synsätt. Övergång mellan EOP och SAG sker när vattennivån sjunkit till 2/3 av hårdhöjden.

Implementering av EOP's och SAG omfattar följande fyra etapper:

- Överföra generiska EOP och SAG till anläggnings-specifik dokumentation
- Utforma övergång mellan EOP's och SAG's

- Identifiera TSC's (tekniska stödcentralens) behov av hjälpmedel och information
- Ta fram övningsmaterial och träna både operatörer och TSC
- Genomföra verifikation och valideringsprogram
- Oberoende kontroll

Såväl EOP's som SAG's ges som flödesscheman, som delades ut till deltagarna i ovan nämnda möte. Dessa gäller för anläggningen Duane Arnold, som är en BWR-3 (GE-design) med MARK-1 inneslutning.

BWROG har vidare utvecklat en dokumentation kallad "Technical Support Guidelines" (TSG's) som är avsedda som underlag till det tekniska stödet och beslutsfattare för att understödja skiftlaget i haverihanteringen. Dessa behandlas i följande avsnitt.

#### **A.4.1 Strukturering av störningsinstruktioner, BWROG**

I detta avsnitt visas exempel på utformning av EOP's och SAG's, så som de presenterades vid ovan nämnda möte hos HSK.

Översiktligt består EOP's av följande delar:

- EOP1- RPV kontroll
- EOP2- kontroll av primärinneslutning
- EOP3- kontroll av sekundärinneslutning
- EOP4- kontroll av radioaktiva utsläpp

Dessutom finns följande procedurer:

- ATWS- RPV kontroll
- ALC- alternativ nivåkontroll
- ED- emergency depressurisation
- RPV/F- flödning av reaktortanken

Tre delar av SAG finns, som kallas SAG-1 osv.:

- SAG-1 för flödning av primärinneslutningen
- SAG-2 för kontroll av aktivitetsutsläpp
- SAG-3 för kontroll av vätgas

Såväl EOP's som SAG's finns som flödesscheman på ungefär samma sätt som våra ÖSI. Användaren har att svara ja eller nej på frågor och svaret bestämmer vägvalet i instruktionen.

SAG-1 behandlar flödning av primärinneslutningen. Det finns två huvudfall beroende på om tankgenomsältning inträffat eller inte. De frågor som hanteras av SAG-1, oberoende av om tankgenomsältning inträffat, är följande:

- Tillförsel av vatten till reaktortank/inneslutning
- Vattennivå och tryck i inneslutning
- Vädring av reaktortanken
- Vädring av inneslutningen

- Sprinkling i drywell
- Sprinkling i torus

För hantering av dessa frågor finns villkor inlagda i flödesschemat för SAG-1. Det finns dessutom kopplingar mellan SAG-1, SAG-2 och SAG-3.

Som stöd i användningen av EOP's och SAG's har Technical Support Guidelines, TSG's utvecklats. Dessa dokument är i motsats till EOP och SAG inte instruktioner utan ett kunskapsbaserat beslutsstöd.

TSG's är relativt omfattande och utförliga dokument. De består av två pärmar, där den ena [15] innehåller historik, bakgrundsmaterial och översikter. Den andra [16] innehåller själva guidelines. Ett exempel på innehåll i TSG ges i bilaga 1.

TSG's består av fyra guidelines:

- The Control Parameter Assessment Guideline (CPAG), för att utvärdera funktion och tillförlitlighet hos instrumentering som används för bestämning av kontrollparametrar, som är kopplade till de kritiska säkerhetsfunktionerna.
- The Plant Status Assessment Guideline (PSAG), som används för att prediktera utvecklingen av kontrollparametrarna och eventuellt ta fram alternativa scenarios.
- The System Status Assessment Guideline (SSAG), för att utvärdera funktion och tillförlitlighet hos system som kommer ifråga för att utföra åtgärder inom haverihanteringen.
- The EOP Action Assessment Guideline (EAAG), för att bestämma prioritet för att reparera system som slutat fungera och avgöra när åtgärder i haverihanteringen bäst vidtas.

TSG's är alltså uppdelade i fyra huvuddelar:

- Utvärdering av parametrar
- Utvärdering av anläggningens status
- Utvärdering av systemstatus
- Utvärdering av åtgärder

Utvärdering av parametrar syftar till att ge best estimate-värden på mätvärden av betydelse för tillämpning av EOP's och SAG's. Bedömning av noggrannhet och användbarhet för den instrumentering som kan bidra med information är av stor vikt. I vissa fall kan beräkningshjälpmedel utnyttjas som ett sätt att få fram indirekt information. Denna kan vara användbar för bedömning av trender.

Utvärdering av anläggningens status avser att ge underlag till EOP och även åtgärder inom haveriberedskap. Det gäller både att identifiera redan inträffade händelser i anläggningen och att extrapolera trender. Exempel på den förra frågan är tillträddbarhet till olika delar av anläggningen och att avgöra om tankgenomsmltning inträffat eller inte. Bedömning av trender bygger på extrapolation av rådande trender, planerade ingrepp och kännedom om haveriförloppets karaktär.

Motiven till att utvärdera systemstatus är att få grepp om vilka system som är tillgängliga och möjligheterna att återställa system som inte fungerar. Denna utvärdering omfattar bl. a. bedömningar av resurser som behövs för att återstarta system och begränsningar i tillträddbarhet.

Utvärdering av åtgärder görs av följande skäl:

- Verifiera respons från anläggningen
- Ge rekommendationer om tidpunkt för kommande åtgärder
- Ge underlag för att prioritera användning av alternativa system

Om vi jämför ÖSI med BWROG enligt ovan kan åtminstone två viktiga likheter observeras:

- Instruktionerna ges som flödesscheman i båda fallen.
- De är symptombaserade.

Det finns dock även skillnader. Den mest påtagliga är att BWROG:

- Har guidelines i form av flödesscheman för det sena skedet i ett svårt haveri.
- Dokumentationen till stöd för tekniska stödcentralen är mera omfattande än hos oss.

#### **A.4.2 Validering av BWROG störningsinstruktioner**

Sedan BWROG utvecklat EOP's och SAG's har ett stort arbete lagts ner på att ta fram övningsmaterial, träna potentiella användare och att validera instruktionerna. I detta avsnitt ges en sammanfattning av principerna för valideringen utgående från DAEC.

Underlaget till detta avsnitt är hämtat från en valideringsövning som ägde rum hos DAEC, 15-19 December 1997. Under denna vecka deltog förutom DAEC observatörer från andra BWR i USA och från Europa: George Vayssier (från Nederländernas säkerhetsmyndighet), Charles Wike (konsult), Patrik Meyer (från HSK, Schweiz), Wiktor Frid, SKI och Roger Flinta, OKG.

Från denna övning finns dels ett antal reserapporter [17], [18] och [19], dels material som delats ut. Detta avsnitt bygger på dessa referenser och annan dokumentation som vi fått från BWROG, speciellt [20] och [21], som är procedurer för validering.

Under den vecka som övningen ägde rum varvades genomgångar av EOP's och SAG's med testerna där procedurerna validerades i fullskalesimulatorens vid DAEC.

De EOP's som BWROG utvecklat är av hög klass. Det finns hela tiden en spårbarhet så att det går att få fram bakgrund och motiv bakom åtgärderna i instruktionerna. Arbetet är mer formellt upplagt än vad vi är vana vid och det gäller också valideringarna.

Bland observationerna från övningen (från de europeiska deltagarnas sida) märktes:

- Kvaliteten och kvantiteten på arbetet vad gäller utveckling och validering av EOP's och SAG's är imponerande.
- Valideringen gjordes med en haverisekvens och med en grupp av användare (skiftlag och tekniskt stöd). Därför blir slutsatserna begränsade till dessa omständigheter.
- I det valda scenariot var förloppet tydligt och alla relevanta instrument gav användbara utslag. I ett verkligt fall kan situationen vara mer förvirrad och information från instrument saknas eller vara missvisande.
- Rollfördelningen mellan skiftchef och skiftlaget borde vara mera tydlig. Skiftchefen skulle agerat mera som ledare.

- Under övningen användes inte guidelines för TSC (teknisk stödcentral). Dessa innehåller anvisningar för att kontrollera tillförlitligheten av instrumentutslag.

Två manualer, som beskriver principerna för validering, användes i planering och genomförande av övningen som beskrivits ovan. Den första av dessa [20] behandlar validering av SAG's och den andra [21] validering av flödesscheman.

Den första av manualerna innehåller till att börja med en rad definitioner, bl a av validering.

Med validering menas en process för att bekräfta användbarhet och ”operativ korrekthet” (operational correctness) genom fullskalesimulatorövning, skrivbordstest eller PC.

Användbarhet avser i vilken grad informationen som instruktionerna innehåller är begriplig, tillräckligt detaljerad och lätt att använda.

Operativ korrekthet – i vad mån instruktionerna är kompatibla med anläggningens utformning och dess respons, annan dokumentation för haverihantering och bemanningen i organisationen.

Tre allmänna krav ställs upp i samband med validering:

- Nya eller reviderade instruktioner valideras med användning av fullskalesimulator, ”torrsim” eller PC
- Om validering krävs skall den göras före implementering av instruktionerna
- Om både verifiering och validering skall göras så skall verifiering utföras först.

I första hand rekommenderas validering i fullskalesimulator. Detta är det mest realistiska. De övriga sätten, dvs. torrsim och körning på PC kan användas som komplement.

Det finns dock fall då torrsim är bästa metoden. Detta gäller då fullskalesimulatorn inte klarar av att simulera de haverifall (tex. tankgenomsmältning) som man önskar validera. Likaså kan det förekomma att instrumentutslag som behövs för att följa procedureerna inte finns modellerade i fullskalesimulatorn.

Förberedelserna för validering beskrivs och blir beroende av vilken metod som används. Vanligtvis leder validering i fullskalesimulator till mest arbete före en övning. En viktig del är att välja och arbeta igenom det scenario som skall användas under övningen.

Dokumentationen i samband med en validering följer givna regler såväl för planering som genomförande och utvärdering.

Det förefaller som om validering innehåller ungefär samma moment och genomförs samt utvärderas på i stort sett likvärdigt sätt hos oss och BWROG.

Den största skillnaden verkar vara att BWROG arbetar på ett mera formellt sätt, dvs med mera fastställda procedurer än vad vi har.

## **A.5 SLUTSATSER**

Ett allmänt intryck av arbetet inom BWROG för att ta fram procedurer för hantering av svåra haverier är att det är omfattande och högklassigt. Ett stort arbete har lagts ner på att dokumentera allt av betydelse och att se till att motiveringarna till de åtgärder, som beskrivs i procedurerna är spårbara.

För vårt projekt är det främst av intresse vad vi kan lära oss av BWROG när det gäller strukturering och validering av våra strategier för haverihantering. De slutsatser vi kan dra av jämförelserna med det material som varit tillgängligt från BWROG är följande.

### **Strukturering**

- Procedurerna för hantering av svåra haverier ges både hos oss och BWROG på ett överskådligt sätt i form av flödesscheman.
- ÖSI vid våra verk är på ungefär samma nivå som motsvarande procedurer hos BWROG vad gäller strukturering och användarvänlighet.
- Ett symptombaserat synsätt används både av oss och BWROG.
- BWROG har i högre utsträckning än vi utvecklat och systematiserat dokumentation för hantering av svåra haverier i form av beslutsstöd till den tekniska stödcentralen. En stor del av detta material ges i form av flödesscheman på samma sätt som EOP's.
- BWROG hade ett mera omfattande underlag att utgå från vid framtagning av senaste revisionen av EOP's och SAG's än vad vi hade då ÖSI togs fram.

### **Validering**

- Validering av procedurerna förefaller vara på ungefär likvärdig nivå.
- Vid validering hos BWROG används ett mera standardiserat arbetssätt än hos oss. Skriftliga instruktioner finns för hur validering skall göras.

### **Övrigt**

Målet med projektet, som beskrivs i denna rapport, är att dra nytta av BWROG's arbete beträffande strukturering och validering av strategier för hantering av svåra haverier.

I materialet, som använts som underlag, ingår ÖSI och rapporter om validering av ÖSI från de svenska verken och TVO. Därför ges möjligheter till jämförelser inte bara med BWROG utan också inbördes mellan kraftverken.

ÖSI förefaller vara i stort sett på samma nivå på de olika verken. Dessa instruktioner är pedagogiskt utformade och bygger i samliga fall på ett symptombaserat tänkande i haverihanteringen.

Skillnader mellan verken finns däremot vad gäller kunskapsbaserat material, avsett som stöd till anläggningsledaren, i ett senare skede i haveriet då ÖSI inte längre kan tillämpas. I Forsmark finns THAL (Teknisk Handbok för AnläggningsLedare) och för Ringhals 1 kallas den HSB-B (Handbok Stöd åt Blockledning BWR).

Någon motsvarighet till dessa dokument för de övriga verken har inte kommit fram i detta projekt. En genomgång av läget på detta område är motiverad. Om ett utvecklingsarbete genomförs skulle detta kunna samordnas mellan de svenska verken och TVO.



## A.6 REFERENSER

1. Forsmark 1, Övergripande störningsinstruktion för driftvakt, ÖSI 900:16, 2000-03-31
2. Forsmark 2, Övergripande störningsinstruktion för driftvakt, ÖSI 900:10, 2000-10-18
3. Forsmark 3, Övergripande störningsinstruktion för driftvakt, ÖSI 099:9, 1999-10-09
4. OKG, Block 1, Övergripande störningsinstruktioner (ÖSI), Reg. nr 1-D12.1, utgåva 3, 1995-10-20
5. OKG, Block 2, Övergripande störningsinstruktioner (ÖSI), Reg. nr 1-D12.1, utgåva 5, 1994-12-05
6. OKG, Block 2, Bakgrundsmaterial (basis) till ÖSI, Reg. nr 2-D12.8, utgåva 4, 1994-12-05
7. OKG, Block 3, Övergripande störningsinstruktioner (ÖSI), Reg. nr 3-D12.1, utgåva 8, 1997-06-26
8. Barsebäck, Övergripande störningsinstruktion och larmkriterium, D Nr: 1-DB-1, utgåva 4, 1995-01-12
9. Ringhals 1, "Generalen" Riktlinjer vid incidenter, 1-D6-171, utgåva 3, 1994-09-01
10. M. Friberg and S. Koski, New Symptom-Based EOP's for TVO, Nuclear Europé 5-6/1989
11. K. Bladh och A. Borg, Valideringsrapport för Instruktion 1-D6-171, Ringhals 1 Generalen- Riktlinjer vid incidenter, 1999-05-18
12. L. Norros, J. Holmberg, K. Hukki och M. Nuutinen, Slutrapport om validering av Säkerhets- och ÖSI-panelen, Rapport TAU-7011/97
13. V. Gustavsson, Reserapport från möte om SAG för BWR i Brugg, 19 Jan. 1998 Rapport GES 4/98
14. R. Hill, BWR Owner's Group Accident Management Guidance, Presentation to KKL, November 12-13, 1997
15. Technical Support Guidelines (TSG's) Training, DAEC, December 1997
16. Technical Support Guidelines (TSG), DAEC, December 1997
17. R. Flinta, Oskarshamn 3, Validering av EOP (ÖSI) och SAG vid "Duane Arnold" i USA, Reserapport, 1998-01-08
18. P. Meyer, Report from the SAG/EOP Validation Exercise at Duane Arnold NPP, USA. December 15-19, 1997, HSK

19. G. Vayssier m. fl., Comments on Duane Arnold workshop, December 19, 1997
20. Validation Program for Severe Accident Guidelines, DAEC, December 15, 1997
21. Validation Program for Emergency Operating Procedure Flowcharts, DAEC, December 15, 1997

## BILAGA

En viktig del av TSG är utvärdering av tillförlitlighet av utslag från instrumentering. Ett system för denna utvärdering har tagits fram av BWROG. Detta kallas PAT (Parameter Acceptance Table). Avsikten är att PAT skall kunna användas för att identifiera vilka instrument som kan användas för att mäta en viss parameter.

För varje instrument som finns med i PAT har följande information sammanställts:

- Identifikation för instrumenteringen
- Placering av avläsningen för instrumenteringen
- Elmatning (samt alternativ elmatning) till instrumenteringen
- Begränsningar för instrumenteringen, som inte har att göra med mätmiljön
- Placeringen av sensor och transmitter
- Begränsningar för instrumenteringen, som har att göra med mätmiljön

Instrumentering listad i PAT är uppdelad i två grupper: primära resp. alternativa. Med primära menas instrumentering, som direkt mäter en given parameter och kan avläsas i kontrollrummet. All annan instrumentering kallas alternativ och kan tex innebära att mätinformation kombineras med enkla beräkningsprogram för att ge resultatet.

Reg Guide 1.97 används för att utvärdera och kvalificera viktig instrumentering för haveriförhållanden.

För utvärdering av anläggningens status används sk kontrollparametrar. Dessa är relaterade till de kritiska säkerhetsfunktionerna. Ett exempel är nivån i reaktortanken, som är en avgörande parameter för härdens kylning.

En viktig del i PSAG (Plant Status Assessment Guideline) är prediktering av kontrollparametrarna. En metod som används för detta är extrapolation av den rådande trenden. Det finns inga avancerade beräkningsverktyg i dagsläget för detta för tillämpning under haveriförhållanden.

Ett starkt motiv till att prediktering av kontrollparametrar ingår i PSAG är att resultat från dessa extrapolationer kan användas för att planera åtgärder inom anläggningen och dessutom ge en uppfattning om risken för utsläpp till omgivningen.

TSG innehåller procedurer för uppskattning av bränsleskador (Fuel Damage Assessment). Detta påminner mycket om de metoder vi har för uppskattning av härdskadorna, dvs ”Core Damage Assessment”.

