



Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Kjell Spång  
Gunnar Ståhl

# 2013:10s

Kvalificering av elkomponenter  
i kärnkraftverk  
Hantering av åldring



## Abstrakt

Rapporten behandlar program och verktyg för värdering av leverantörers dokumentation av kvalificering med avseende på åldring av elektriska komponenter och för utveckling av kompletterande program för hantering av åldring. Utöver beskrivning av kompletta program för hantering av åldring innehåller rapporten även verktyg för värdering av åldringsstatus hos installerade ("gamla") komponenter och, vid behov, komplettering av deras kvalificering.

Rapporten begränsas till säkerhetsrelaterade komponenter som innehåller åldringskänsliga delar, huvudsakligen organiska material. Till denna kategori hör kablar och kabelskarvar, samt ett antal komponenter som innehåller oljor, tätningar (o-ringar), etc. För komponenter placerade innanför reaktorinneslutningen är möjligheterna till kontinuerlig övervakning begränsade. Tillgängligheten för regelbundna inspektioner är även begränsad i många fall. Huvuddelen av denna rapport behandlar kvalificering av sådana komponenter.

En del säkerhetsrelaterade komponenter utanför reaktorinneslutningen kan vara installerade i utrymmen där de utsätts för höga temperaturer och andra kraftiga miljöpåkänningar under normal drift och i utrymmen som är påverkade vid konstruktionsstyrande händelser. Därför innehåller rapporten även en del material avseende kvalificering av komponenter utanför reaktorinneslutningen där man har bättre möjligheter till täta inspektioner och övervakning.

Rapportens första del (del 1) utgör en sammanfattning som riktar sig till beslutsfattare och som ger en allmän översikt över metoder och tillämpningar. Den mer detaljerade beskrivningen av program och underliggande material, användbara data, etc. finns i rapportens andra del (del 2). Arbetet med rapport 01:17 finansierades gemensamt av Forsmark Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag, Ringhals AB, Barsebäck Kraft AB samt Statens Kärnkraftinspektion. För projektets styrning och uppföljning svarade en kommitté med följande sammansättning:

Jan Bendiksen, Ringhals AB

Reinhold Delwall, Forsmark Kraftgrupp AB

Karel Fors, Barsebäck Kraft AB

Lars-Olof Stähle, OKG Aktiebolag

Bo Liwång, Statens Kärnkraftinspektion

Vid genomförandet av revisionsarbetet har kraftbolagens representanter i styrgruppen varit:

Kenneth Skoglund, Ringhals AB

Sven-Olof Palm, Forsmark Kraftgrupp AB

Karl-Erik Eriksson, OKG Aktiebolag

## **Bakgrund**

Hantering av åldringsfrågor är en viktig aspekt för säkerhetsarbetet vid kärnkraftverken. Under flera år har de svenska kraftbolagen och SKI gemensamt bedrivit ett forskningsprojekt inom området.

## **Syfte**

Syftet med arbetet har varit att skapa ett underlag att användas vid planering av arbetet med miljökvalificering av framför allt komponenter i inneslutningen. Principerna är även tillämpbara utanför inneslutningen i områden som kommer att utsättas för ökad miljöpåkänning i samband med olika händelser.

Rapporten är i två delar: en översiktlig sammanfattning för beslutsfattare och en detaljerad beskrivning av program och bakgrund för hantering av åldring.

## **Resultat**

Arbetet är avslutat och har tidigare, år 2000, publicerats som Ingemansson Rapport H-14061-r-I. Då det genomförda arbetet bedömdes som intressant för en vidare spridning och för att öka spårbarheten presenterades det som SKI Rapport 01:17 i maj 2002. Detta i sig innebar inte någon förändrad status utan arbetet är ett forskningsarbete och är inte ett uttryck för en officiell ståndpunkt från SKI. För att kunna utnyttjas i det internationella samarbetet gjorde SKI en engelsk översättning som utgavs samtidigt som SKI Report 02:4.

Denna rapport ersätter SKI Rapport 01:17 och tar hänsyn till senare erfarenheter och utveckling av metoder för tillståndsmätningar och deras användning i samband med hantering av åldring. Statens Kärnkraftinspektion är numera en del av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

## **Konklusioner**

Syftet med arbetet har inte varit att direkt påverka SSM:s verksamhet utan att utgöra ett underlag för kraftbolagens strategier och genomförande av olika miljökvalificeringsprogram. Verksamhetsuppföljning av deras arbete kommer att ske på ett likartat sätt som deras övriga verksamheter av betydelse för säkerheten.

Revisionen har genomförts i ett samarbete mellan de svenska kärnkraftverken och SSM. SSM:s handläggare vid framtagning av rapporten har varit Bo Liwång.

Rapporten grundar sig delvis på Ingemansson Rapport H-14061-r-I, som därutöver innehåller fyra bilagor med detaljerad information gällande teknik och system för mätning av miljö i kärnkraftverk, beskrivning av mätmetoder för tillståndsmätningar, polymerers uppbyggnad och egenskaper samt bestämning av aktiveringsenergier.

## **Projektinformation**

Kontaktperson SSM: Bo Liwång

Referens: SSM2012-2594, aktivitetsnummer 2040047-05



Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: TKjell Spång och Gunnar Ståhl  
KS miltek och Westinghouse Electric Sweden AB

# 2013:10s

Kvalificering av elkomponenter  
i kärnkraftverk  
Hantering av åldring

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

# **Kvalificering av elkomponenter i kärnkraftverk**

**Hantering av åldring**

**Del 1. Sammanfattning för beslutsfattare**





## Innehåll

1	Allmänt .....	2
2	Terminologi .....	2
2.1	Källor från vilka definitionerna hämtats.....	2
2.2	Definitioner.....	2
2.3	Referenser.....	3
3	Syften och grundläggande element för hantering av åldring.....	3
4	Begränsningar i kvalificerad livslängd .....	5
5	Tillståndsmätningar som komplement eller alternativ till fastställande och .....	
	kontroll av kvalificerad livslängd .....	6
6	Förlängning av kvalificerad livslängd .....	7
7	Verifiering och validering av kvalificerad livslängd i samband med .....	
	anskaffning ("ny" komponent) .....	8
7.1	Miljöprediktering och krav på funktion och kvalificerad livslängd.....	8
7.2	Användning av erfarenhetsdata och materialkännedom.....	8
7.3	Bedömning av kvalifikationsdokumentering som tillhandahålls av .....	
	komponentleverantören .....	8
7.4	Bedömning av vilka miljöfaktorer som är av betydelse för komponentens .....	
	åldring.....	9
7.5	Bedömning av kvalificerad livslängd och dess verifiering samt av behov av ....	
	program för uppföljning efter installation .....	9
7.6	Framtagning och genomförande av uppföljande program för .....	
	åldringshantering efter installation .....	10
8	Uppdatering av kvalificering av installerad komponent ("gammal"	
	komponent) .....	11

## 1 Allmänt

Denna del av rapporten ger en allmän överblick av metoder för hantering av åldring av säkerhetsklassade elkomponenter i kärnkraftverk. Den riktar sig till personer som önskar en allmän insikt i metoder som möjliggör kontroll av komponenternas funktionalitet med avseende på nedbrytning av material på grund av åldring. Rapporten fokuserar huvudsakligen på aktiviteter efter installation som syftar till att förbättra och upprätthålla kvalificering och för förlängning av kvalificerad livstid. Detaljerade program och underlag ges i del 2.

## 2 Terminologi

### 2.1 Källor från vilka definitionerna hämtats

Termerna som används i del 1 och 2 förklaras nedan. Inom parentes har angetts från vilken källa definitionen härrör. I mån av tillgänglighet har termer och definitioner i IAEA Safety Glossary 2007 använts. I de fall lämplig term inte varit tillgänglig i denna har terminologin i IEC och IEEE standarder använts.

Översättning av termerna och definitionerna till svenska från det engelskspråkiga originalet har utförts av författarna.

### 2.2 Definitioner

#### *accelererad åldring*

Accelererad process syftande till att simulera ett framskridet tillstånd på kort tid. Sker genom att en komponent utsätts för stresspåverkan enligt kända mätbara fysiska eller kemiska lagar för nedbrytning med syfte att uppnå fysiskt och elektriskt tillstånd hos komponenten som är likartat med det den skulle ha vid en framskriden ålder under förväntade operativa förhållanden (från [2.2]).

#### *tillståndsindikator*

Karakteristika hos en struktur, ett system eller en komponent som kan observeras, mätas eller följas med syfte att dra slutsatser om eller direkt indikera aktuell och framtida förmåga hos strukturen, systemet eller komponenten att fungera inom sina acceptanskriterier (från [2.1]).

#### *tillståndsmätning*

Kontinuerliga eller periodiska tester, inspektioner, mätningar eller trendstudie av prestanda eller fysiska egenskaper hos strukturer, system och komponenter med syfte att indikera aktuella och framtida prestanda och potentiell felfunktion (från [2.1]).

#### *konstruktionsstyrande händelser (design basis events – DBE)*

Händelser använda i konstruktionsförutsättningarna för att fastställa acceptabla prestationskrav hos strukturer, system och komponenter (från[2.4]).

Anm. I denna rapport inkluderas post-DBE i DBE där det är relevant.

#### *diffusionsbegränsad oxidation*

Begränsning av förmågan hos syre att diffundera in i material, orsakad av bildande av ett diffusionsskyddande ytlager vid exponering för höga hastigheter hos joniserande strålning eller för höga temperaturer.

#### *kvalificerat tillstånd*

Tillstånd hos en komponent, före start av DBE, för vilket komponenten har påvisats uppfylla konstruktionskraven för specificerad funktion (från [2.3]).

#### *kvalificerad livslängd*

Tidsperiod för vilken en struktur, ett system eller en komponent har påvisats, genom provning, analys eller erfarenhet, att vara kapabel att fungera inom acceptanskriterier under specifika funktionsförhållanden och bibehålla förmågan att utföra sin säkerhetsfunktion under DBE (från[2.1]).

#### *installerad livstid*

Tidsperiod från installation till slutligt avlägsnande från service av en struktur, ett system eller en komponent (från [2.1]).

### **2.3 Referenser**

[2.1] IAEA Safety Glossary. Terminology used in nuclear safety and radiation protection. 2007 edition. International Atomic Energy Agency

[2.2] IEC 60780 ”Qualification of electrical equipment of the safety system for nuclear power plants, ed. 2, 1997

[2.3] IEC/IEEE 62582-1 Nuclear power plants – instrumentation and control important for safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part1:General

[2.4] IEEE 323-2003 ”Standard for qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations”, IEEE Power Engineering Society

### **3 Syften och grundläggande element för hantering av åldring**

Syftet med hantering av åldring är att fastställa en kvalificerad livslängd, eventuellt kompletterad med ett kvalificerat tillstånd, samt att konstruera och implementera ett program för uppföljning och kontroll av åldring efter installation. I de fall då önskad installerad livstid är längre än initialt fastställd kvalificerad livslängd kan ett av syftena med aktiviteter efter installation också vara att förlänga kvalificerad livslängd. De huvudsakliga elementen vid hantering av åldring inkluderar:

- Målsättning för kvalificerad livslängd.
- Prediktering av miljöförhållanden under normal drift i utrymmen där komponenterna är installerade. Identifiering av utrymmen där komponenterna

är exponerade för de strängaste miljöförhållandena, främst temperatur och joniserande strålning, under normal drift. Miljöförhållandena i dessa utrymmen läggs till grund för val av exponering vid simulering av åldring i samband med initial kvalificering.

- Funktionskrav för åldrad komponent under DBE.
- Initial kvalifikationsprovning, inkluderande fastställande av kvalificerad livslängd genom laboratorieprovning av komponentexemplar. Inverkan av åldringsspåverkande miljö simuleras enligt någon metod som accelererar åldringen, varefter provföremålets förmåga att fungera under simulerad DBE och, om så krävs, under post-DBE, verifieras. Åldringssimuleringen kan åtföljas av intermitterant eller kontinuerlig mätning av utvecklingen av en eller flera tillståndsindikatorer och fastställande av kvalificerat tillstånd.

Anm. För säkerhetsklassade komponenter i svenska kärnkraftverk finns ett krav att begränsa accelerationsfaktorn vid artificiell termisk åldring till 250 om man inte genom undersökningar kan visa att högre accelerationsfaktorer kan användas med acceptabel jämförbarhet med åldring i fält. Sådana undersökningar bör inkludera att man visar att använda lagar (vanligtvis Arrhenius ekvation) kan tillämpas på temperaturspannet mellan den temperatur som används vid den artificiella åldringen och temperaturen under normal drift samt en analys av effekten av diffusionsbegränsad oxidation.

- Lagring av komponentexemplar i klimatkontrollerade förråd för användning i framtida kompletterande provning och undersökningar och/eller för att ersätta komponenter som tas ut för kontroll av deras åldringsstatus vid olika tidpunkter efter installation.
- Deponering av extra komponentexemplar i utrymmen som är representativa för de installerade komponenter som utsätts för högst exponering för miljöförhållanden under normal drift.
- Användning av höga accelerationsfaktorer innebär ett antal osäkerheter i applikation av lagar bakom beräkning av kvalificerad livslängd. Detta, kombinerat med begränsningar i tillgänglig tid för initial kvalificering, tas i beaktande genom användning av mycket konservativ beräkning av kvalificerad livslängd eller kvalificering för en livslängd som är väsentligt kortare än önskad installerad livstid. Längre kvalificerad livslängd kan fastställas genom tilläggsqualificering med användning av längre tider för simulering av åldring (och tillståndsmätningar), vilket även tillåter mindre konservatism i beräkning av kvalificerad livslängd på grund av användning av lägre accelerationsfaktorer.
- Regelbunden kontroll av åldringsstatus hos komponenter placerade i de strängast miljöexponerade utrymmena.

I de fall kvalificeringen enbart baseras på bestämning av kvalificerad livslängd kan det erfordras upprepad provning inklusive artificiell accelererad åldring och DBE-simulering av deponerade komponentexemplar eller av

installerade komponenter som ersätts. Sådan provning kan, om den genomförs när installerad tid närmar sig kvalificerad livslängd, användas till att förlänga kvalificerad livslängd.

I de fall kvalificerat tillstånd har fastställts i samband med den initiala kvalificeringen baseras kontrollen huvudsakligen på regelbundna tillståndsmätningar. I några få fall är det möjligt att tillämpa tillståndsmätningar på installerade komponenter (icke-förstörande tillståndsmätningar på tillgängliga komponentytor). I övriga fall fordrar mätningarna tillgång till deponerade komponentexemplar eller installerade komponenter som ersätts med identiska nya eller lagrade komponenter.

Ju mer komplex komponenten är ur åldringssynpunkt (sammansatt av flera material med olika åldringsegenskaper) eller ju mindre kunskaper man har om ingående materials åldringsegenskaper, desto mer viktigt är det med uppföljande aktiviteter efter installation (t.ex. genom tillståndsmätningar). En annan faktor som ökar betydelsen av uppföljande aktiviteter efter installation kan vara brist på kunskaper om synergiska effekter mellan närliggande material. Ett välkänt exempel är den så kallade kiselinfektionen orsakad av ett överskott av merer i kiselgummi som diffunderar i form av gas och kontaminerar omgivande komponenter.

#### **4 Begränsningar i kvalificerad livslängd**

Målsättningen för initialt kvalificerad livslängd begränsas till vad som kan verifieras med laboriemässig provning före installation av komponenten. Den livslängd komponenten med god säkerhet kan anses kvalificerad för begränsas av tillämpbarheten hos metoder för accelererad artificiell åldring samt av den tid man kan anslå för sådan.

De viktigaste begränsningarna vid beräkning av kvalificerad livslängd från laboriemässiga prov är:

- Begränsade kunskaper om miljöförhållandena som komponenterna utsätts för under normal drift. Temperaturen hos en komponent påverkas inte enbart av omgivningstemperaturen utan kan även påverkas av värmestrålning från omgivande ytor.
- Begränsningar i tillämpbarheten av lagar som tillämpas vid användning av korttidsåldring vid förhöjd miljöstränghet, i första hand förhöjd temperatur och doshastighet hos joniserande strålning, för simulering av långtidsexponering under fältförhållanden.
- Effekter av diffusionsbegränsad oxidation, vilket innebär en risk för överskattning av kvalificerad livslängd och kvalificerat tillstånd.
- Begränsade kunskaper om värden hos parametrar som är relaterade till sammansättningen av de polymera material som ingår i komponenten och som

är betydelsefulla för beräkning av accelerationsfaktorer, speciellt aktiveringsenergierna.

- Komponentens komplexitet, speciellt om den är sammansatt av olika material, inklusive additiver, som påverkas av åldring.

Det är inte alltid möjligt att konstruera artificiella prov för en komponent som säkerställer en kvalificerad livslängd som är lika med önskad installerad livstid. En gradvis förlängning av kvalificerad livslängd kan åstadkommas efter installation genom fortlöpande kvalificering.

## **5 Tillståndsmätningar som komplement eller alternativ till fastställande och kontroll av kvalificerad livslängd**

Tillståndsmätning erbjuder ett sätt att ta sig förbi de flesta av begränsningarna vid fastställande och kontroll av kvalificerad livslängd. En förutsättning för att tillståndsmätningar skall kunna användas är att man har tillgång till en användbar tillståndsindikator med vilken man kan mäta komponentens degradering. I samband med initial kvalificering visas att komponenten vid en viss degraderingsnivå, mätt med denna indikator, fortfarande klarar att utsättas för föreskriven DBE och därvid fungerar på avsett sätt och innehåller de egenskaper (t.ex. värden på dielektriska parametrar) som krävs under DBE. Åldringen av komponenten efter installation följs upp med mätning av samma tillståndsindikator vid bestämda tidpunkter och dess värde jämförs med det värde man uppmätt i samband med den initiala kvalificeringen. Tillståndsmätningen används för att säkerställa att degradationen av komponenten efter installation inte går så långt att dess avsedda funktion under DBE är osäker.

Även om det kvalificerade tillståndet bestämmer den definitiva livslängden hos komponenten behövs en beräkning av en konservativt fastställd kvalificerad livslängd för att man före installation skall kunna uppskatta en tidsrymd efter installation då man kan räkna med att den användbara livslängden hos komponenten inte är förbrukad.

Den största fördelen med att använda kvalificerat tillstånd är att det inte är beroende av parametrar som krävs för att fastställa en kvalificerad livslängd och som man har ofullständiga kunskaper om. Dessa inkluderar prognos för miljöförhållandena under normal drift, tillämpbarheten hos lagar på vilka accelerationen vid simulerad åldring grundas, parametrar hos material som ingår i komponenten (t.ex. aktiveringsenergi), etc. Användning av kvalificerat tillstånd tar emellertid inte hand om problem med effekter av diffusionsbegränsad oxidation vid användning av häftigt förhöjda miljöförhållanden (höga temperaturer, höga doshastigheter) vid simulering av åldring i samband med typprovning.

Möjligheten att inkludera tillståndsbaserad kvalificering beror av tillgången till användbara tillståndsindikatorer för den aktuella komponenttypen. Det beror också av tillgängligheten i fält till komponentdelar på vilka icke-förstörande tillståndsmätningar

kan utföras, eller möjligheter att genomföra tillståndsmätningar (förstörande eller icke-förstörande) i laboratorium på komponentexemplar från deposition i representativa utrymmen i kärnkraftverket eller på installerade komponenter som ersätts.

Kriterierna på en användbar tillståndsindikator är att den indikerar degradering på grund av åldring på ett korrekt och känsligt sätt och att den ändras monotont med exponeringstiden.

De vanligast använda tillståndsindikatorerna är:

- Indentermodul;
- Brottöjning ( $e/e_0$ );
- OIT och OITP;
- Dielektrisk förlustfaktor.

Tillämpbarheten hos olika typer av tillståndsindikatorer diskuteras i detalj i del 2, kapitel 7. Det är mycket viktigt att reproducerbarhet och jämförbarhet hos de metoder som används för tillståndsmätningar är hög. Detta kräver detaljerade anvisningar för metodernas användning, inklusive snäva toleranser hos betydelsefulla mätparametrar, samt kompetent personal som genomför mätningarna och analyserar mätresultaten. I de fall standarder inom IEC/IEEE 62582 serien, utgivna gemensamt av IEC och IEEE, är tillgängliga, bör dessa användas.

## 6 Förlängning av kvalificerad livslängd

När en komponents drifttid närmar sig den i laboratorieprov verifierade kvalificerade livslängden kan denna förlängas på i huvudsak två olika sätt:

- genom att komponentexemplar i de mest utsatta positionerna (antingen ordinarie exemplar som ersätts eller speciellt för ändamålet deponerade extra exemplar) tas ut och utsätts för accelererad artificiell tilläggsåldring för en viss tilläggslevslängd, följt av DBE-prov. Om de uttagna exemplaren klarar detta prov anses övriga med dessa identiska komponenter i reaktorinneslutningen kvalificerade för tilläggslevslängden.

I de fall man har möjlighet att utnyttja extra komponentexemplar placerade i utrymmen av reaktorinneslutningen med strängare miljö (högre temperatur, högre stråldoshastighet) än i de utrymmen där de säkerhetsklassade komponenterna har sin placering kan metoden användas utan att DBE-provet föregås av tilläggsåldring.

- Genom tillståndsmätning på lämpliga tillståndsindikatorer och jämförelse med kvalificerat tillstånd. Kvalificerad livslängd kan förlängas fram till den tidpunkt då uppmätta tillstånd närmar sig kvalificerat tillstånd.

## **7 Verifiering och validering av kvalificerad livslängd i samband med anskaffning ("ny" komponent)**

### **7.1 Miljöprediktering och krav på funktion och kvalificerad livslängd**

För hänsynstagande till åldring vid upphandling av en komponenttyp för installation i kärnkraftverk behövs en miljöprognos för långtidsverkande (åldringpåverkande) miljöfaktorer i de mest utsatta tänkta placeringarna. Prognosen anger miljöstränghet under normal drift. Miljöprognosen bör omfatta samtliga miljöfaktorer som kan vara aktuella i för komponenttypen aktuella positioner. Del 2, kapitel 6 ger vägledning för bedömning av vilka miljöfaktorer som kan behöva beaktas.

Anm. Med miljöprognos avses förutsagda miljöförhållanden under produktens livstid efter vilka utvecklings-, konstruktions- och provningsarbetet anpassas. Med miljöfaktor avses miljöbestämmande yttre förhållanden som kännetecknas av en eller ett fåtal fysikaliska eller kemiska storheter (exempelvis temperatur, fuktighet, vibration). Miljöfaktorns stränghet (miljösträngheten) är i regel bestämd av dessa storheters mätvärden.

Vidare behövs uppgift om önskad installerad livstid och funktionskrav med acceptanskriterier vid DBE.

### **7.2 Användning av erfarenhetsdata och materialkännedom**

Databaser som innehåller komponent- och materialegenskaper som härrör från fälterfarenheter och provning kan vara till värdefull hjälp för en första bedömning av komponenter av intresse på marknaden. Materialkunskaper, speciellt kunskaper om åldringsegenskaper hos polymerer, är en annan betydelsefull bas för bedömning av komponenter på marknaden. Egna och andras erfarenheter bör således inventeras och studeras i samband med anskaffning.

### **7.3 Bedömning av kvalifikationsdokumentering som tillhandahålls av komponentleverantören**

I normalfallet innehåller komponentleverantörens dokumentation typprovningsprogram och typprovningsprotokoll som innefattar miljökvalificering. För att bedöma av komponentleverantören redovisad kvalificering med avseende på åldring är följande uppgifter väsentliga:

- Komponentdata;
  - Ingående delkomponenter och material
- Miljöprovningsdata;
  - Miljöfaktorer
  - Miljösträngheter
- Provmeter;
- Funktionskontroller och acceptanskriterier;



- Tillståndsmätningar, om sådana genomförts.

#### **7.4 Bedömning av vilka miljöfaktorer som är av betydelse för komponentens åldring**

Typprovningen inkluderar verifiering av komponentens livslängd genom artificiell åldring följt av DBE-simulering inklusive funktionskontroller enligt de krav som krediteringen av komponenten i säkerhetsanalysen ställer. Valet av miljöfaktorer som skall simuleras vid den artificiella åldringen baseras på en bedömning av vilka miljöfaktorer som kan påverka åldringen av komponenten.

Vilka miljöfaktorer som är av intresse ur åldringssynpunkt beror således inte endast av var komponenten skall placeras utan även av komponentens uppbyggnad och materialsammansättning, speciellt ingående polymerer.

#### **7.5 Bedömning av kvalificerad livslängd och dess verifiering samt av behov av program för uppföljning efter installation**

Miljösträngheten bestäms normalt av nivån på miljöfaktorn (exempelvis temperatur) och exponeringstid. Bestämning av accelerationsfaktorn för den artificiella åldringen grundas på egenskaper av betydelse för åldring hos ingående material – för termisk åldring normalt aktiveringsenergi, för åldring i joniserande strålning påverkan av doshastighet. Från leverantören bör man därför efterfråga underlag till accelerationsfaktorn, exempelvis

- Vald aktiveringsenergi och underlag till denna;
- Information om doshastighetseffekter för ingående strålningskänsliga material, om sådan information är tillgänglig.

Provmethod bör anges. Om hänvisning finns till känd standard, exempelvis IEC 60068-2-2 för termisk åldring, framgår provningstoleranser etc. ur denna. Om ingen referens ges bör leverantören lämna uppgift om innehållna provningstoleranser etc.

Funktionsdata före, under och efter DBE och hur funktionsmätning har gått till utgör en väsentlig information för att bedöma miljökvalificeringens relevans för avsedd användning och som underlag till ev. fortlöpande kvalificering.

Information bör finnas om antal provade exemplar och spridningen i resultat med avseende på funktionsdata före/under/efter DBE.

Tillståndsmätningar kan användas som en väsentlig del i kvalificering och hantering av åldring efter installation. För att klargöra förutsättningarna för detta för aktuell komponent bör efterfrågas:

- Om data finns från tillståndsmätningar i samband med den artificiella åldringen och före DBE-provningen.

- Materialdata av betydelse för val av metod för tillståndsmätningar, exempelvis tillsatser (bl.a. antioxidanter, som möjliggör OIT-mätningar) i ingående polymerer.

Det kan även vara av intresse att undersöka om komponentens uppbyggnad är sådan att icke förstörande tillståndsmätning kan genomföras och om delar som påverkas av åldring är rimligt lätt åtkomliga för tillståndsmätningar.

Inhämtande av dessa data från leverantören behövs för att kraftbolaget skall kunna göra en egen bedömning av

- Kvalificerad livslängd i den miljö komponenten väntas utsättas för under normal drift (följt av DBE)
- Förutsättningar för och behov av tillståndskontroll eller fortlöpande kvalificering

Den kvalificerade livslängd man kommit fram till kan bedömas som:

- Säker, dvs fastställd med erforderliga marginaler, verifierade aktiveringsenergi, doshastighetseffekter, etc. Förutsätter även att man har tillräckliga kunskaper om väntad miljö
- Mindre säker, genom att genomförd verifiering bedöms otillfredsställande, exempelvis genom att man använt extremt höga accelerationsfaktorer, dåligt underbyggda aktiveringsenergi, ingen hänsyn till doshastighetseffekter. I detta fall kan det vara nödvändigt att göra en mer konservativ bedömning av kvalificerad livslängd än den leverantören tillhandahåller.

I en del fall kan det vara omöjligt att komma fram till någon kvalificerad livslängd med utgångspunkt från leverantörens data.

## **7.6 Framtagning och genomförande av uppföljande program för åldringshantering efter installation**

Även vid användning av konservativt framtagen kvalificerad livslängd rekommenderas att aktiviteter för hantering av åldring genomförs periodiskt efter installation. Som ett minimum bör dessa inkludera visuell inspektion där man söker efter färgförändringar hos isolermaterial etc., om möjligt kompletterat med någon form av tillståndsmätningar.

Om den kvalificerade livslängden är kortare än önskad installerad livstid, bör aktiviteter för förlängning av kvalificerad livslängd planeras in som ett led i programmet för hantering av åldring efter installation.

Anm. I de fall de komponentdelar som påverkas av åldring är utbytbara kan man istället införa program för utbyte av dessa i god tid innan kvalificerad livslängd löpt ut.

Om den kvalificerade livslängden är mindre säker, t.ex. på grund av att den baseras på prov med extrema accelerationsfaktorer, kan man skaffa sig ett bättre underlag

genom kompletterande typprovning (t.ex. under längre tid med lägre accelerationsfaktorer). Detta förutsätter ett komplett prov inklusive DBE-simulering.

Periodiska tillståndsmätningar efter installation är ett mycket värdefullt verktyg för att tillförsäkra kvalificerat status genom hela den installerade livstiden. Om den simulerade åldringen i samband med typprovningen har genomförts och rapporterats av leverantören på ett tillförlitligt sätt, bl.a. med moderata temperaturer och doshastigheter, men utan att man genomfört några tillståndsmätningar, kan man ta fram ett kvalificerat tillstånd genom att genomföra en åldringssimulering på samma sätt som leverantören presenterat och mäta tillståndet under och efter denna simulering. Man kan då anse komponenten kvalificerad för tillståndet efter simuleringen, förutsatt att tillståndet mäts i delar av komponenten som är avgörande för dess funktion vid DBE (se anm. nedan).

Anm. Om den termiska åldringen genomförs med alltför hög temperatur kan åldringsmekanismen vara en annan än under driftmiljö. Vidare kan användning av alltför höga accelerationsfaktorer medföra att ytskiktet hos organiska material åldrats kraftigt medan dess inre (för funktion väsentliga) delar åldrats betydligt mindre än vid motsvarande tillstånd hos ytskiktet under drift. Detta beror på heterogen oxidation vid användning av höga temperaturer och korta åldringstider. Motsvarande fenomen kan uppträda vid åldring i joniserande strålning (doshastighetseffekter). Dessa effekter kan leda till att man överskattar funktionsförmågan i drift hos en komponent som uppvisar en viss degradation (tillstånd) på ytan. Detta gäller exempelvis kablar, om tillståndet mäts i ytskiktet av manteln. Avgörande för funktionen i DBE är tillståndet hos ledarisoleringen som således för ett och samma tillstånd hos manteln kan vara betydligt bättre vid artificiell åldring med höga accelerationsfaktorer än i drift.

Om leverantörens dokumentation och data inte ger underlag för bedömning av kvalificerad livslängd är man hänvisad till införande av komplett typprovning med åldringssimulering följt av DBE-simulering.

Även om man inte vid upphandlingstillfället ser ett direkt behov av program för tillståndsmätningar eller fortlöpande kvalificering är det klokt att inhandla ett antal extra komponentexemplar som förvaras i kontrollerad (mild) miljö. Behov av kompletterande provning, införande av tillståndsmätningar eller fortlöpande kvalificering kan uppkomma senare.

## **8 Uppdatering av kvalificering av installerad komponent ("gammal" komponent)**

En komponent som finns installerad kan behöva uppdateras beträffande kvalificering för långtidseffekter av miljöpåkänningar (åldring). Tänkbara orsaker till att man vill ta fram ett program för sådan uppdatering kan vara:

- Miljödata har visat sig avvika från de som förutsatts vid fastställande av kvalificerad livslängd. Uppdatering av kvalificerad livslängd kan göras enkelt genom insättning av de nya miljösträngheterna i den formel för som använts för beräkning av accelerationsfaktor.

- Omprövning av kvalificerad livslängd från tidigare dokumenterad verifiering på grund av att man använt alltför höga accelerationsfaktorer eller icke tillräckligt konservativa antaganden om aktiveringsenergier, inte tagit hänsyn till doshastighetseffekter etc.
- Behov av att uppdatera kvalificerad livslängd på grund av nya kunskaper inom området.
- Kvalificerad livslängd är på väg att löpa ut.
- Installerad livstid är längre än från början förutsatts, vilket innebär krav på en förlängning av kvalificerad livslängd.

En uppdatering av kvalificerad livslängd kan grundas på

- Analys
- Miljömätningar
- Kompletterande undersökningar av ingående materials åldringsegenskaper och åldringsparametrar (exempelvis aktiveringsenergier, doshastighetsberoenden)
- Tillståndskontroll, i de fall underlag finns för detta i kvalificeringsdokumentationen (vilket mycket sällan är fallet). Om inte, kan ett kvalificerat tillstånd tas fram på det sätt som beskrivs i 7.6, beroende av tillgång till nya eller lagrade identiska komponenter.

En förlängning av kvalificerad livslängd kan genomföras på samma sätt som för ”nya” komponenter, förutsatt att det finns tillgång till nya eller lagrade identiska komponenter.

Detaljer kring kvalificering av ”gamla” komponenter finns i del 2, kapitel 4.

# **Kvalificering av elkomponenter i kärnkraftverk**

**Hantering av åldring**

**Del 2. Program och underlag**



## Innehåll

1	Introduktion .....	4
1.1	Allmänt .....	4
1.2	Referenser .....	4
2	Strategier och program för kvalificering av komponenter med hänsyn till åldring .....	5
2.1	Syften med program för hantering av åldring .....	5
2.2	Åldringspåverkande faktorer .....	5
2.3	Strategi för kvalificering .....	5
2.4	Referenser .....	6
3	Hantering av åldring av ny komponent .....	7
3.1	Aktiviteter inkluderade i hantering av åldring .....	7
3.2	Prediktering av förväntad miljö under normal drift .....	7
3.3	Fastställande av målsättning för kvalificerad livslängd .....	8
3.4	Fastställande av funktionskrav under normal drift och vid DBE .....	9
3.5	Program för initial kvalificering (typprovning) .....	10
3.5.1	Allmänt .....	10
3.5.2	Program för artificiell åldring i samband med typprovning .....	11
3.5.3	DBE-provning .....	25
3.5.4	Provningstoleranser .....	26
3.5.5	Antal provade exemplar .....	26
3.6	Installation och lagring av komponenter för applicering av tillståndsbaserad kvalificering och för fortlöpande kvalificering .....	26
3.7	Aktiviteter efter installation för att upprätthålla kvalificering genom kompletterande provning och kontrollmätningar .....	27
3.7.1	Allmänt .....	27
3.7.2	Åtgärder efter installation för att reducera osäkerheter vid beräkning av kvalificerad livslängd och för att motivera mindre konservativa antaganden .....	28
3.7.3	Förlängning av kvalificerad livslängd genom fortlöpande kvalificering .....	28
3.7.4	Användning av tillståndsmätningar för hantering av åldring .....	31
3.7.5	Referenser .....	36
4	Hantering av åldring av ”gammal” komponent .....	37
4.1	Allmänt .....	37

4.2	Omräkning av kvalificerad livslängd.....	37
4.3	Kompletterande laboratorieprovning.....	38
4.4	Förlängning av kvalificerad livslängd genom fortlöpande kvalificering ...	38
4.4.1	Allmänt .....	38
4.4.2	Användning av installerade komponenter som tas ut, kvalificeras för förlängd kvalificerad livslängd och ersätts .....	38
4.4.3	Kvalificering för förlängning av kvalificerad livslängd utan uttag av installerade komponenter .....	39
4.5	Tillämpning av metoden för kvalificerat tillstånd på ”gammal” komponent .....	39
5	Komponenter utanför reaktorinneslutningen .....	42
5.1	Hantering av åldring .....	42
5.2	Referenser .....	44
6	Metodik för mätning av komponenters driftmiljö .....	44
6.1	Bakgrund.....	44
6.2	Temperatur, mätkrav.....	45
6.2.1	Lufttemperaturen.....	45
6.2.2	Strålning från omgivande ytor .....	45
6.2.3	Mätning av temperatur hos värmeavgivande komponenter .....	46
6.3	Mätning av joniserande strålning.....	47
6.4	Övriga miljöfaktorer, förekomst.....	47
6.5	Lokalisering av hot spots .....	47
6.6	Referenser .....	47
7	Metodik för bestämning av polymerers åldringsrelaterade egenskaper (tillståndsindikatorer).....	48
7.1	Allmänt .....	48
7.2	Icke förstörande tillståndsmätningar (non-destructive) .....	48
7.3	Påverkande tillståndsmätningar (destructive).....	49
7.4	Samband mellan värden på tillståndsparametrar före haveri och funktion under DBE .....	49
7.5	Tillståndsindikatorer som kan komma till användning i samband med kvalificering för och kontroll av åldring.....	50
7.6	Sammanfattning av metodernas tillämpbarhet .....	50
7.7	Referenser .....	53



8	Slutsatser.....	53
	Annex A Ett exempel på relationen mellan isolationsresistans hos termiskt åldrade kablar före och efter LOCA	
	Annex B Kortfattad beskrivning av elektriska metoder och IR för tillståndsmätning	

# 1 Introduktion

## 1.1 Allmänt

Denna rapport behandlar hantering av åldring av säkerhetsklassade elektriska komponenter i kärnkraftverk. Den beskriver aktiviteter, program och verktyg för hänsyn till åldring i samband med initial miljöklassificering (typprovning) och efter installation. Även verktyg för komplettering av klassificeringen av redan installerade komponenter behandlas.

Medan del 1 av rapporten sammanfattar metoder för hantering av åldring beskriver denna del av rapporten metoderna mer i detalj och inkluderar en del bakgrundsmaterial.

Tillståndsmätningar utgör ett viktigt verktyg för hantering av åldring. Metoder för tillståndsmätningar är väsentligen användbara för komponenter för vilka det är möjligt att identifiera och utföra mätningar på delar och material vars egenskaper kan påverkas av åldring. Den komponenttyp för vilken icke-förstörande mätningar på installerade komponenter i fält är möjligt är i huvudsak begränsad till åtkomliga kablar. En bredare grupp komponenter kan mätas (förstörande) i laboratorium, ev. efter demontering för att komma åt åldringskänsliga delar. För komponenter för vilka åldringskänsliga delar inte är åtkomliga för tillståndsmätningar begränsas normalt aktiviteterna efter installation till kompletterande initial klassificering, kontroll av aktuella miljöförhållanden och förlängning av klassificerad livslängd genom fortlöpande klassificering.

Rapporten begränsas till åldringsrelaterade frågor, men även kortvariga miljöpåverkningar kan påverka åldringskänsligheten. Termiskt åldrade komponenter kan vara mer känsliga för mekaniska stötar och slag än icke åldrade komponenter. Detta gäller även hantering, t.ex. böjning av kablar, demontering för byte av o-ringar, etc. Det kan därför vara viktigt att vissa prov för klassificering för inverkan av kortvariga miljöpåverkningar görs på komponenter efter åldring. Miljödata för kortvariga miljöer finns i Akustikbyrån TR 5.082.01 [1.1] (komponenter innanför reaktorinneslutningen) och TR 5.125.01 [1.2] (komponenter utanför reaktorinneslutningen). Provmetoder för kortvariga miljöpåverkningar finns i IEC Publikation 60068 (Environmental Testing Procedures), [1.3].

## 1.2 Referenser

[1.1] Krosness A., Spång K. "Miljöklassificering av komponenter i kärnkraftverk. Del I: Komponenter i reaktorinneslutningen", IFM Akustikbyrån TR 5.082.01, andra upplagan, september 1980

[1.2] Westin, L. "Miljöklassificering av komponenter i kärnkraftverk. Del 2: Komponenter utanför reaktorinneslutningen", IFM Akustikbyrån TR 5.125.01, december 1980

[1.3] International Electrotechnical Commission IEC Publication 60068  
"Environmental testing procedures"

## 2 Strategier och program för kvalificering av komponenter med hänsyn till åldring

### 2.1 Syften med program för hantering av åldring

Syftet med program för hantering av åldring av säkerhetsklassade komponenter är att säkerställa att komponenterna klarar att fungera under normal drift, extrem drift samt vid DBE när som helst under sin installerade tid. Komponenter som innehåller organiska material (polymerer, oljor, etc.) åldras vid påverkan av bl.a. värme och joniserande strålning. För komponenter som innehåller för funktionen väsentliga organiska material utgör hantering av åldring därför en mycket väsentlig del av kvalificeringsarbetet. Fuktig atmosfär och mekanisk miljöpåverkan (t.ex. vibration) kan accelerera åldringen. Även påverkan av kemikalier, såsom lösningmedel och smörjmedel, kan påskynda materialens åldrande.

### 2.2 Åldringspåverkande faktorer

Åldring av polymerer påverkar hårdhet, brottöjning, elasticitetsmodul, kompressionstålighet, isolationsresistans, spänningstålighet, tålighet mot kemikalier, tålighet mot aggressiva gaser, vibrationstålighet, färg, dielektricitetskonstant, fasjämvikt mm. Åldringen påverkas av vilka additiver som används i polymeren. Tabell 2.1 nedan sammanfattar positiv och negativ påverkan av olika faktorer.

Tabell 2.1 Olika faktorerers påverkan på komponenters åldring

Värme	Fukt	Inert gas <sup>1)</sup>	Strålning	Katalysator	Antioxidant
Starkt negativt	Starkt negativt	positivt	Starkt negativt	negativt	Starkt positivt

1) Undersökningar, redovisade i SKI 97:40 [2.1] visar att kvävgas i reaktorinneslutningen minskar den oxidativa termiska åldringen påtagligt.

Även om en ökning av temperatur och doshastighet resulterar i snabbare nedbrytning av polymerer måste applicering av lagar för jämförelse av grad av åldring vid höga och låga strängheter ta hänsyn till effekter av diffusionsbegränsad oxidation vid höga temperaturer och doshastigheter. Detta är välkänt då det gäller höga doshastigheter men samma effekter uppträder vid applicering av höga temperaturer, vilket bl.a. är rapporterat i en studie vid Sandia [2.2].

### 2.3 Strategi för kvalificering

Komponenters förmåga att i slutet av sin livstid fungera på avsett sätt i en av haveri påverkad miljö kan inte bedömas med utgångspunkt från enbart erfarenhet, eftersom det finns ringa praktisk erfarenhet av komponenters funktion under

haveriförhållanden. Laboratoriemässiga prov och uppföljning av komponenters tillstånd i drift används för att säkerställa deras förmåga att fungera under DBE.

För att verifiera att komponenterna klarar haveri när som helst efter installation åldras de artificiellt innan de utsätts för funktionprovning under simulerad DBE. Om det visas att den artificiellt åldrade komponenten klarar föreskriven säkerhetsfunktion under DBE kan den anses vara kvalificerad för det åldrade tillstånd den befann sig i då den genomgick DBE-provet. Det finns två sätt att definiera kvalificeringsstatus:

- a) Att beräkna en tidsperiod i normal drift motsvarande den tid den artificiella åldringsexponeringen skett. Denna tidsperiod betraktas som kvalificerad livslängd (anges i år).
- b) Att genomföra tillståndsmätningar under den artificiella åldringsexponeringen. Det tillstånd som uppmätts i slutet av den artificiella åldringen betraktas som kvalificerat tillstånd (anges som ett värde på den tillståndsindikator som uppmätts).

Oavsett vilken av definitionerna som används för att definiera kvalificeringsstatus rekommenderas att inkludera tillståndsmätningar under den artificiella åldringen där man fastställer utvecklingen av värdet på en lämplig tillståndsindikator under åldringen, vilket möjliggör uppföljningsaktiviteter efter installation för att tillförsäkra att komponenten inte vid någon tidpunkt har åldrats mer än till det tillstånd den hade då den utsattes för DBE-provning.

DBE-provning sker normalt genom att komponenterna först exponeras för en dos av joniserande strålning som motsvarar DBE-dosen, därefter (i autoklav) för ett temperatur-tryck förlopp i oftast överhettad ånga som skall simulera omgivningmiljön i samband med DBE. I vissa fall ingår även sprinkling som en del av haveriförloppet. Komponenter som skall kvalificeras för jordbävning utsätts även för ett jordbävningssimulerande (seismiskt) prov före DBE-provet.

I denna rapport behandlas element som kan ingå i program för åldringshantering, dels för tillämpning vid planering av prov och uppföljande aktiviteter hos nya komponenter som skall installeras ("nya komponenter"), dels för tillämpning på redan installerade komponenter ("gamla komponenter").

## 2.4 Referenser

[2.1] Spång, K. "Ageing of electrical components in nuclear power plants; Relationships between mechanical and chemical degradation after artificial ageing and dielectric behaviour during LOCA", SKI Report 97:40, October 1997

[2.2] Kenneth T. Gillen, Mat Celina and Roger L. Clough "Limitations of the Arrhenius Methodology", WRSF Information Meeting, Bethesda, Maryland, October 26-28, 1998

## **3 Hantering av åldring av ny komponent**

### **3.1 Aktiviteter inkluderade i hantering av åldring**

Hantering av åldring inkluderar följande aktiviteter:

- Prediktering av miljöförhållanden under normal drift;
- Fastställande av mål för installerad livstid;
- Beskrivning av funktionskrav under DBE (inkl post-DBE, om relevant) och hur dess kontrolleras;
- Program för artificiell åldring som del av initial kvalificering;
- Program för aktiviteter efter installation för kontroll och förbättring av underlaget för den kvalificerade livslängd som fastställts vid den initiala kvalificeringen;
- Program för aktiviteter efter installation för periodisk kontroll av status hos komponenten i relation till dess kvalificerade status;
- Om kvalificerad livslängd är kortare än målsättningen för installerad livstid: Program för aktiviteter med syfte att förlänga kvalificerad livslängd.

### **3.2 Prediktering av förväntad miljö under normal drift.**

Information sammanställs från mätningar och en genomgång görs av förhållanden på de platser där komponenttypen skall installeras. Om kunskaperna är begränsade måste detta kompenseras med konservatism i bedömningarna. Det kan löna sig att lägga ner en hel del arbete på insamling av mätdata och noggrann genomgång av förhållandena på de platser där komponenten skall placeras för att öka säkerheten och minska behovet av marginaler. En relativt snäv prediktering med begränsade marginaler kan vara rimlig om programmet för hantering av åldringen av komponenten inkluderar framtida miljömätningar.

Det är speciellt viktigt att identifiera placeringar av komponenter i utrymmen med de strängaste miljöförhållandena (t.ex. i hot-spots).

I kapitel 7 redogörs för vad som bör iakttas vid bestämning av miljösträngheter för komponenter i reaktorinneslutningen.

I fall med betydande värmekällor i den nära omgivningen som komponenten inte är avskärmad för eller i de fall komponenten är självuppvärmd är kännedom om omgivningstemperaturen inte tillräckligt för att bestämma den termiska miljön. Se 6.2.2 och 6.2.3 som beskriver hur man fastställer en lämplig provningstemperatur som tar hänsyn till dessa förhållanden.

Prediktering av doshastigheter för joniserande strålning under normal drift behövs som bas för kvalificeringen. I svenska kärnkraftverk är doshastigheten för gamma-

strålning normalt mycket under 0,1 Gy/h i de flesta utrymmen inom reaktorinneslutningen. I de mest exponerade placeringarna (nära ångledningarna och i övre delen av reaktorinneslutningen) kan doshastigheten uppgå till högre värden (i området 1 Gy/h [3.1]).

Generell miljöspecifikation för normal driftmiljö, väsentligen baserad på IEC 60721-3-3 [3.2], finns i TBE 101 [3.3].

### **3.3 Fastställande av målsättning för kvalificerad livslängd**

För att komma fram till ett realistiskt krav som kan verifieras på ett betryggande sätt vid den initiala kvalificeringen krävs en genomgång av komponenten med kartläggning av material och funktionsegenskaper som kan påverkas av åldring, speciellt kartläggning av ingående polymera material. Detta kan omfatta införskaffande av uppgifter om materialen och deras sammansättning från producenten eller leverantören, inventering av erfarenheter från egna eller andras undersökningar och prov samt egna kompletterande undersökningar och prov. Även om drifterfarenheter från lång tids användning av komponenten i andra applikationer än i kärnkraftverk kan ge indikationer om komponentens robusthet gentemot lång tids åldring, ger det normalt inget svar på om komponenten kommer att fungera på ett säkert sätt under DBE i åldrat tillstånd. Exempelvis är försämringen av resistansen hos en kabelisolering efter lång tids åldring ofta inte mätbar i normala driftförhållanden men kan ändå medföra att resistansen inte håller sig inom acceptabla värden under DBE.

Exempel på materialberoende parametrar av intresse är:

- För termisk åldring: materialens aktiveringsenergi;
- För termisk åldring: Temperaturintervall, inom vilket de lagar man använder för att beräkna kvalificerad livslängd ur artificiell accelererad åldring är applicerbara;
- För termisk åldring och åldring i joniserande strålning: effekten av diffusionsbegränsad oxidation, vilken kan medföra överskattning av kvalificerad livslängd och kvalificerat tillstånd.

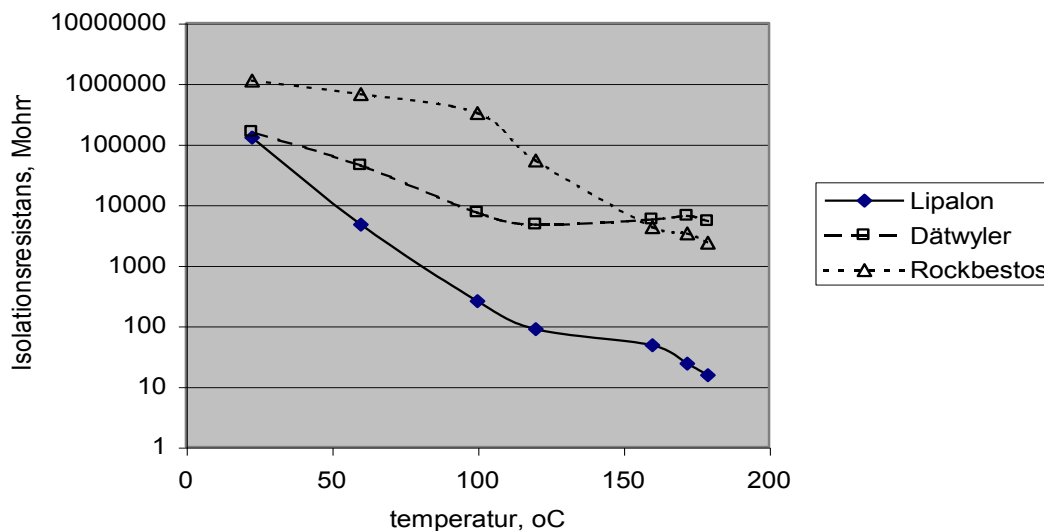
Det är inte alltid utförbart att ha som målsättning en kvalificerad livslängd som uppfyller önskad installerad livstid för komponenten och som kan verifieras med hög konfidens i samband med den initiala kvalificeringen. Det kan då vara lämpligt att definiera en nivå på kvalificerad livslängd som kan verifieras med hög konfidens under initial kvalificering före installation, och ett mål baserat på önskad installerad livstid som inte kan verifieras med tillräckligt hög konfidens i samband med den initiala kvalificeringen men som kan verifieras successivt med hjälp av en procedur för åldringshantering som implementeras efter installation.

### 3.4 Fastställande av funktionskrav under normal drift och vid DBE

Kraven på komponentens funktion definieras av det system den ingår i samt dess uppgift, för säkerhetsklassade komponenter speciellt dess uppgift under DBE. För att få en funktionsmässig marginal föreskrivs oftast även egenskaper som är av betydelse för funktionssäkerheten, t.ex. täthet hos avtätningar (o-ringar etc.), dielektriska egenskaper hos isolation, vanligtvis isolationsresistanser.

Isolationsresistanser anges mellan ledare eller mellan ledare och jord. För kablar är det viktigt att det klart framgår för vilken kabellängd det föreskrivna minimivärdet för isolationsresistansen gäller.

Som framgår av Figur 3.1 nedan från mätningar, redovisade i SKI Report 97:40 [3.4] avtar isolationsresistansen vid stigande temperatur. Dessutom avtar isolationsresistansen när isoleringsmaterialet utsätts för fukt, speciellt om det som i DBE sker under högt tryck. Detta innebär att isolationsresistansen under DBE är flera tiopotenser lägre än vid normala driftförhållanden även för icke åldrat isoleringsmaterial. Om tillgängligheten av komponenter för typprovning medger kan det därför vara av betydande intresse att parallellt med att man utsätter artificiellt åldrade komponentexemplar för simulerad DBE även ha med något icke åldrat komponentexemplar för att få information om komponentens dielektriska egenskaper påverkats av åldringen eller enbart av haverimiljön.



Figur 3.1. Isolationsresistansens temperaturberoende, uppmätt mellan ledare och jord på 1m kabel; ur [3.4]

En noggrann analys rekommenderas innan acceptanskriterier för erforderliga dielektriska karaktäristika under DBE fastställs. Användning av generella krav kan innebära över- eller underskattning i det enskilda fallet av risk för felfunktion. Det vanligen använda kravet på en isoleringsresistans på minst 1 M $\Omega$ m för kablar är för

en del applikationer överdrivet konservativt, för andra applikationer för lågt satt, beroende på funktionskrav och typ av komponent. Överdrivet konservativa krav kan resultera i onödigt underkännande av komponenter vid den initiala kvalificeringen (typprovningen) eller fördröjning av godkännande genom att man måste avvakta kretsananlys och ändring av kriterier i efterhand. Byte till modernare komponenter (exempelvis moderna reläer) kan medföra att kraven på isolationsresistans vid DBE behöver ökas.

Vid uppmätning av isolationsresistanser hos kablar och relatering av dessa till funktionskrav bör man ta hänsyn till hur lång kabelbit man provar och mäter på i relation till kabellängden för vilken funktionskraven gäller. Ett sätt är att alltid uppge kravet på isolationsresistans i  $\Omega\text{m}$  eller  $\text{M}\Omega\text{km}$ .

### **3.5 Program för initial kvalificering (typprovning)**

#### **3.5.1 Allmänt**

Vid typprovning (initial kvalificering) skall visas att komponenten upprätthåller sin funktion under normal drift samt vid DBE i slutet av sin kvalificerade livslängd.

För komponenter som påverkas av åldring inkluderar typprovningen artificiellt accelererad åldring. Vid typprovningen fastställs och verifieras en kvalificerad livslängd. För att uppnå en lång kvalificerad livslängd med ett relativt kortvarigt prov används höga accelerationsfaktorer, vilket bl.a. förutsätter höga temperaturer och höga stråldoshastigheter i förhållande till de som komponenten utsätts för under normal drift.

Typprovning genomförs ofta på grundval av relativt allmänna underlag och metoder. En stor andel av de komponenter som erbjuds av leverantörer är miljökvalificerade enligt IEEE 323-1974 [3.5], IEEE 323-1983 [3.6], IEEE 323-2003 [3.7] eller IEC 60780 [3.8]. Hänvisning görs även till speciella komponentstandarder, exempelvis IEEE 383-1974 [3.9] för kablar.

De svenska kraftverken har tagit fram riktlinjer för typprovning av komponenter, exempelvis KBE EP-154 (1996) [3.10]

Hänvisning kan även ske till andra nationella standarder och regler, exempelvis KTA 3706 [3.11].

I nedanstående genomgång av initial kvalificering har pågående arbeten för revidering av IEC 60780 och IEEE 323 beaktats, liksom det omfattande arbete som gjorts inom IAEA expertgrupp för kabelåldring, rapporterat i [3.12].



## 3.5.2 Program för artificiell åldring i samband med typprovning

### 3.5.2.1 Allmänt

Initial kvalificering av säkerhetsklassade komponenter som innehåller organiska material eller polymerer inkluderar artificiell åldring innan komponenten utsätts för simulerad DBE. Syftet med den artificiella åldringen är att försätta de organiska materialen eller polymererna i ett tillstånd som motsvarar deras tillstånd i slutet av den önskade kvalificerade livslängden hos komponenten. För att åstadkomma detta på kort tid sker åldringen vid högre stränghet hos miljöfaktorer som komponenten utsätts för i normal drift och som är betydelsefulla för degradering av komponenten på grund av åldring. För komponenter i reaktorinneslutningen är värme och joniserande strålning de miljöfaktorer som normal påverkar åldringen mest. Även en del andra miljöfaktorer kan vara av betydelse för åldringen, exempelvis hög luftfuktighet, intermittenta eller kontinuerliga vibrationer, kemiska faktorer, men huvuddelen av komponenterna i reaktorinneslutningen är inte utsatta för dessa under normal drift.

### 3.5.2.2 Begränsning av accelerationsfaktorer som används vid artificiell åldring

Tillgänglig tid i samband med typprovning medger vanligtvis inte åldringstider längre än en eller två månader för den accelererade åldringen före DBE-simulering. Därför används ofta extrema nivåer på temperatur och stråldoshastigheter vid den artificiella åldringen för att uppnå höga accelerationsfaktorer. Användning av höga temperaturer och doshastigheter innebär emellertid en risk för betydande fel vid bedömning av kvalificerad livslängd och kvalificerat tillstånd, huvudsakligen av följande skäl:

- De lagar som används för beräkning av accelerationsfaktor baseras på vissa villkor som kan vara ogiltiga vid de höga nivåer hos miljöparametrar som använts för accelereringen, i första hand höga temperaturer (termisk åldring) och höga doshastigheter (åldring i joniserande atmosfär). Vid beräkning av kvalificerad livslängd från accelererad termisk åldring antas ett Arrheniusuppträdande i hela temperaturområdet från temperaturen i komponentens placering under normal drift till den temperatur som använts vid den artificiella åldringen. Detta gäller endast i ett begränsat intervall, beroende av de additiver som ingår i materialen.
- De yttre delarna av en polymer, t.ex. en kabelmantel, exponeras för syre innan syret diffunderar in till de centrala delarna av polymeren. Diffusionsbegränsad oxidation uppkommer när hastigheten hos syrekonsumtionen i materialet är högre än den hastighet med vilken den kan ersättas genom diffusion från syre som tränger in i polymeren. Detta uppkommer när en hög accelerationsfaktor används. Syreinträngningen in i polymeren begränsas på grund av den snabba syrekonsumtionen vid höga temperaturer och doshastigheter. I fältförhållandena med mer moderat temperatur uppkommer en balans mellan syrekonsumtion och tillförsel av syre. Användning av hög accelerationsfaktor kan resultera i allvarlig underskattning av degradationen i

det inre av polymeren. Detta betyder en överskattning av såväl kvalificerad livslängd som kvalificerat tillstånd.

- På grund av desorption och diffusion av stabilisatorer såsom antioxidanter i en polymer har egenskaper och koncentration av additiver starkt inflytande på den termo-oxidativa degraderingen av materialet. Praktisk livslängd hos materialet (d.v.s. då det inte är degraderat i en utsträckning som leder till felfunktion under DBE) beror av återstående koncentration hos de aktiva additiverna i materialet. Om en kort provtid användes i artificiell accelererad åldring konsumeras endast additiverna nära utskiktet medan de inre delarna lämnas opåverkade. Detta har en likartad effekt på överskattning av kvalificerad livslängd som den ovan diskuterade för diffusionsbegränsad oxidation.

### 3.5.2.3 Artificiell termisk åldring

#### 3.5.2.3.1 Modell för accelererad termisk åldring

Acceleration erhålls genom förhöjd temperatur. Det förutsätts att relationen mellan temperatur och degradationshastighet följer Arrhenius formel

$$r = Ae^{-\frac{E}{kT}} \quad (3.1)$$

där

$A$  är en materialberoende konstant;

$E$  är aktiveringsenergin för processen (i eV);

$k$  är Boltzman's konstant ( $0,86 \cdot 10^{-4}$  eV/K);

$T$  är temperaturen (i K).

Accelerationsfaktorn  $F$  är kvoten mellan degradationshastigheten vid förhöjd temperatur och degradationshastigheten vid temperaturen under normal drift. Den beräknas ur Arrhenius formel enligt följande:

$$F = \frac{r_2}{r_1} = e^{\frac{E}{k} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]} \quad (3.2)$$

där

$r_1$  = degradationshastigheten vid exponering för normal drifttemperatur;

$r_2$  = degradationshastigheten vid provtemperaturen;

$T_1$  = temperatur (i K) vid normal drift;

$T_2$  = provningstemperatur.

Den kvalificerade livslängden  $t_{kval}$  är lika med  $F \cdot t_{prov}$ , där  $t_{prov}$  är tiden för exponeringen för provtemperaturen.

En säkerhetsmarginal bör läggas till provningstemperaturen eller provningstiden. Storleken hos säkerhetsmarginalen beror av ett antal faktorer, bl.a.

- Kunskap om komponentens temperatur under normal drift. Marginalen kan göras mindre om temperaturen kontrolleras (och mäts).
- Kunskaper om egenskaperna hos ingående organiska material, speciellt tillgång till uppmätta aktiveringsenergies inom aktuellt temperaturområde.
- Provningstoleranser, t.ex. toleranser på temperaturen i nyttoutrymmet hos klimatkammaren.
- Antalet komponentexemplar som provas.

#### 3.5.2.3.2 Tillförlitligheten vid verifiering av kvalificerad livslängd vid användning av Arrhenius formel

Tillförlitligheten vid verifiering av kvalificerad livslängd begränsas av ovanstående faktorer men även av osäkerhet vid applicering av Arrhenius formel på komplexa komponenter, t.ex. komponenter som innehåller material med olika aktiveringsenergies. Osäkerheten ökar med ökad accelerationsfaktor, d.v.s. med ökad skillnad mellan provningstemperatur och drifttemperatur. Andra kemiska processer kan äga rum vid högre temperaturer än vid lägre temperaturer vilket betyder att den accelererade åldringsprocessen i ett högt temperaturintervall och den naturliga åldringsprocessen vid moderat drifttemperatur inte är parallella. Detta sätter en gräns för den accelerationsfaktor man kan tillämpa med en acceptabel konfidensgrad vid accelererad åldring.

Studier på kablar som används i svenska kärnkraftverk har indikerat att de isolermaterial som ingår i dessa följer ett Arrhenius-samband inom ett moderat temperaturintervall. Baserat på dessa studier och för att begränsa effekterna av diffusionsbegränsad oxidation och diffusion av stabilisatorer har man rekommenderat begränsning av accelerationsfaktorn vid beräkning av kvalificerad livslängd till 250 i de fall man inte kan visa att högre accelerationsfaktorer kan användas för den aktuella komponenten med bibehållen konfidens. För att visa att högre accelerationsfaktor kan krediteras måste man visa att Arrhenius-sambandet gäller i ett temperaturintervall som sträcker sig från temperaturer nära normal drifttemperatur till ganska extrema temperaturer. En marginal måste fortfarande inkluderas för att kompensera effekter av diffusionsbegränsad oxidation.

Begränsningen av accelerationsfaktorn till 250 betyder att om målsättningen för kvalificerad livslängd är 40 år måste den artificiella åldringen pågå under nästan 60

dagar. I de fall då temperatur som resulterar i en accelerationsfaktor över 250 används vid den artificiella åldringen skall endast faktorn 250 krediteras vid beräkning av kvalificerad livslängd.

Valet av begränsningen till 250 innebär inte att användning av lägre accelerationsfaktor är ”säker” och över 250 är ”osäker”. Den exakta gränsen mellan ”säker” och ”osäker” applicering av Arrhenius formel varierar med material, temperaturområde etc. Det är inte rimligt att begära en fullständig undersökning av lämplig gräns i varje individuellt fall. Begränsningen till 250 är satt som en rimlig begränsning för de flesta material men det kan ändå finnas material och förhållanden då även 250 är för högt, speciellt för att undvika överskattning av kvalificerad livslängd eller kvalificerat tillstånd på grund av effekterna av diffusionsbegränsad oxidation.

Det är förstås under alla förhållanden oacceptabelt att använda temperaturer för artificiellt accelererad åldring som resulterar i helt avvikande beteende hos materialet än vid normal drifttemperatur, t.ex. genom att materialet når sin kristallina smältpunkt.

Nedan illustreras med ett exempel vad kunskaper om materialparametrar och miljö betyder för kvalificerad livslängd ur artificiell termisk åldring

#### Exempel:

En viss komponent innehåller en för funktionen viktig beståndsdel som utgörs av ett polymert material (exempelvis en elektrisk isolering eller en tätning). Begränsade kunskaper finns om temperaturen och strålningen under normal drift på den plats där komponenten skall placeras. Vidare finns inga prov redovisade på ingående polymers aktiveringsenergi och doshastighetseffekter på materialets nedbrytning.

Eftersom informationen om temperatur under normal drift där komponenten är placerad väljs ett konservativt värde, +55 °C, baserat på mätningar i andra liknande positioner och spridning av temperaturer inom reaktorinneslutningen.

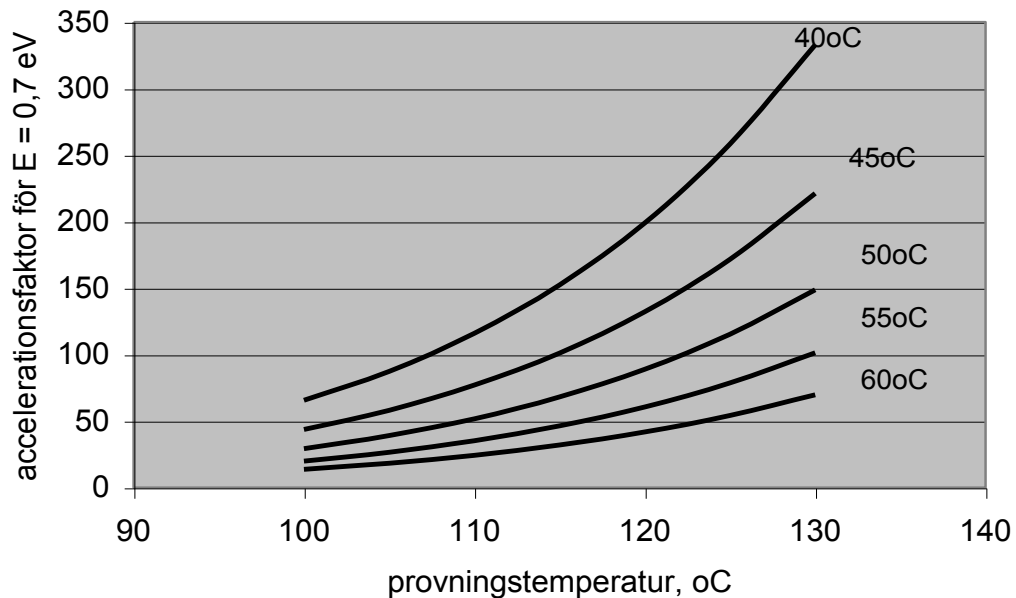
Om inga mätningar av aktiveringsenergi för den speciella sammansättningen av isolermaterialet som används i komponenten är tillgängliga används värden från en genomgång av rapporter som redovisar aktiveringsenergi för likartade polymerer. Genomgången visar på värden från 0,75 eV till 1,6 eV, beroende på exakt sammansättning av polymeren och i vilket temperaturintervall aktiveringsenergin bestämts. Man väljer ett konservativt värde 0,7 eV.

Man saknar kunskaper om i vilket temperaturområde ett Arrhenius-samband har påvisats för isolermaterialet med den sammansättning som används i komponenten och därför sätts även temperaturen vid den artificiella åldringen till ett konservativt värde, säg +110 °C. Med detta värde antar man att effekten av diffusionsbegränsad oxidation är liten.

Avsaknaden av goda kunskaper om relevanta parametrar hos isolationsmaterialet, miljön under normal drift etc. kompenseras således med användning av mycket konservativa värden, vilket kan resultera i en kvalificerad livslängd som väsentligt underskattar möjlig livstid efter installation.

Med de antaganden som gjorts erhålls en accelerationsfaktor 35, vilket betyder att man måste åldra termiskt under 7 månader för att uppnå en kvalificerad livslängd lika med 20 år.

Betydelsen av antagandet av normal drifttemperatur som använts för den artificiella åldringen: Figur 3.2 visar hur accelerationsfaktorn varierar med ansatt drifttemperatur och provningstemperatur.



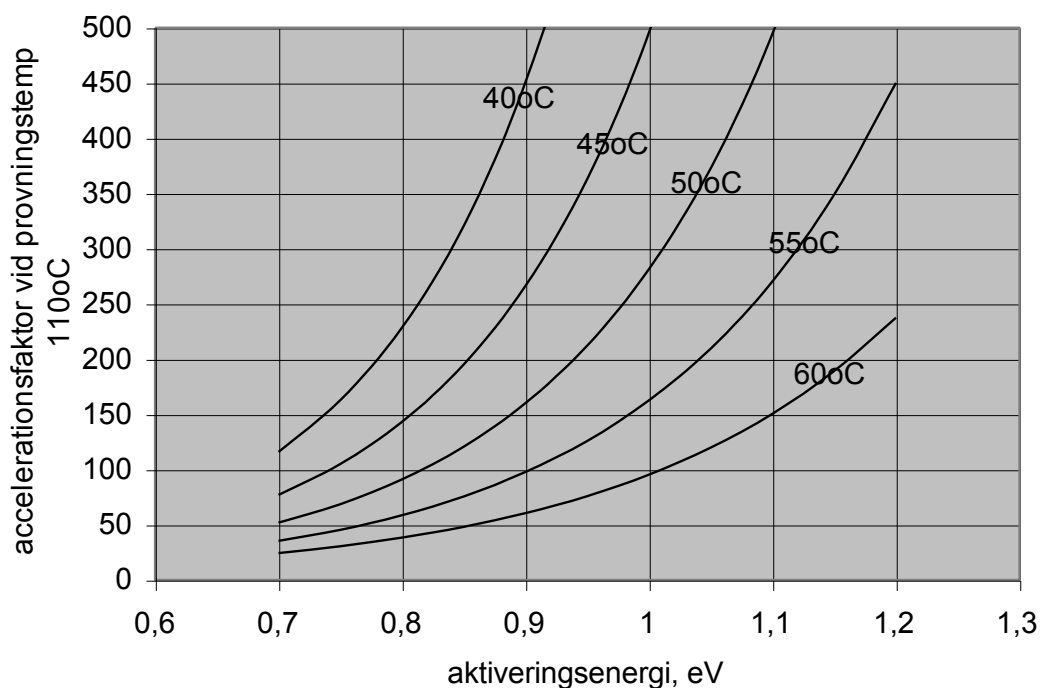
Figur 3.2. Inverkan av provningstemperatur för termisk åldring (från 100 °C till 130 °C) och drifttemperatur (från 40 °C till 60 °C) på accelerationsfaktorn vid termisk åldring hos ett material med aktiveringsenergin  $E=0,7$  eV.

Ur diagrammet kan man utläsa hur man kan öka accelerationsfaktorn genom att minska konservatismen i predikterad drifttemperatur och/eller tillåta högre provningstemperatur. Ökning i provningstemperaturen förutsätter dock att man förvissat sig om att inga mekanismer påverkar komponenten på annat sätt än vid normal drifttemperatur och kunskaper om känslighet för diffusionsbegränsad oxidation.

Om man t.ex. kan minska predikterad temperatur under normal drift till 45 °C genom noggrannare studier eller alternativt val av placering, ökar accelerationsfaktorn i exemplet till 77.

Om man dessutom genom noggrannare undersökning av materialet finner att man kan öka temperaturen under termisk åldring till 120 °C, ökar accelerationsfaktorn till 132. Detta betyder att målsättningen för kvalificerad livslängd lika med 20 år kan verifieras genom att den artificiella åldringen pågår under 56 dygn.

Inflytande av antagen aktiveringsenergi: Mätning av aktiveringsenergin inom aktuellt temperaturintervall är ännu ett steg mot minskning av erforderlig konservatism. Figur 3.3 visar hur höjning av värdet på aktiveringsenergin påverkar accelerationsfaktorn.



Figur 3.3. Inverkan av aktiveringsenergi vid olika drifttemperaturer (från 40 °C till 60 °C) på accelerationsfaktorn vid termisk åldring utförd vid +110 °C.

Antag att man genom mätningar i det relevanta temperaturintervallet finner ett värde på aktiveringsenergin som ligger nära 1 eV och väljer 0,9 för beräkning av accelerationsfaktorn. Accelerationsfaktorn blir då drygt 250. Artificiell åldring vid 110 °C under en månad ger en kvalificerad livslängd av 20 år.

Exemplet illustrerar hur en kombination av ett högt krav på säkerhet i bestämningen av kvalificerad livslängd och dåliga kunskaper om driftförhållanden och viktiga egenskaper hos åldringskänsliga material resulterar i orealistiska provningskrav. Utöver den konservatism som krävs vid användning av provningsparametrar och beräkningar ställer även användningen av ett litet antal provexemplar och provningstoleranser krav på marginaler.

Slutsatsen är att applicering av kvalificerad livslängd som grundläggande (och enda) kriterium för hantering av åldring är realistisk endast om den baseras på goda kunskaper hos de parametrar som är involverade. För några av dessa parametrar, exempelvis miljöförhållandena under normal drift, kan tämligen exakta värden erhållas, men för andra parametrar av betydelse för beräkning av kvalificerad livslängd kan det vara omöjligt att få fram ett mer exakt värde. Exempel på de senare

är aktiveringsenergi och effekter av diffusionsbegränsad oxidation. Inkluderande av tillståndsbaserad kvalificering erbjuder en möjlighet att hantera åldringen utan kunskaper om en del av dessa parametrar, exempelvis normal drifttemperatur och aktiveringsenergi. Man bör dock ha klart för sig att det inte hanterar problemet med diffusionsbegränsad oxidation vid användning av höga temperaturer och höga doshastigheter.

#### 3.5.2.3.3 Val av aktiveringsenergi vid beräkning av kvalificerad livslängd

Som visats i Figur 3.3 beror bestämning av kvalificerad livslängd ur artificiell termisk åldring i hög grad av den ansatta aktiveringsenergin.

Aktiveringsenergin kan variera kraftigt för en och samma polymer beroende på additiver i form av färgpigment, mjukgörare, brandhämmare, antioxidanter m.m. Det är därför mycket osäkert att använda data som hämtas ur rapporter från mätningar som inte gjorts på exakt samma materialkombination. Om sådana data skall användas bör man ha information från många olika mätningar på polymeren i olika sammansättningar och välja ett konservativt värde ur dessa. KBE EP-154 [3.10] anger att om inte aktiveringsenergin är känd skall 0,8 eV användas.

Som framgår av en rad utredningar, bl.a. SKI Report 97:40 [3.4], kan aktiveringsenergin variera med temperaturen och sannolikt även med grad av degradering. Man bör därför använda en aktiveringsenergi som är representativ för de förhållanden som gäller för provningen.

Om komponenten innehåller flera åldringskänsliga detaljer, kan man använda aktiveringsenergin för det material som har lägst sådan. Detta kan i vissa fall innebära en kraftig överprovning av de ingående material som har högre aktiveringsenergi. Man kan minska denna genom att först åldra de detaljer som har lägst aktiveringsenergi, montera in dem och sedan åldra den hopmonterade komponenten. Ett typiskt exempel redovisas nedan.

##### Exempel:

En PS-genomföring innehåller de åldringskänsliga materialen epoxy (ingjutning), EPR (o-ringar) och silikongummi (o-ringar). Medeltemperaturen i genomföringen vid normal drift beräknas vara +55 °C. Genom mätningar och en konservativ bedömning av resultaten av dessa har man funnit att aktiveringsenergin för epoxyn är 1,2 eV, för o-ringarna av EPR 0,95 eV samt för o-ringarna av kiselgummi 0,85 eV. Genomföringarna är komplicerade att ta ut och prova. Installation av extra exemplar för fortlöpande kvalificering är inte realistiskt på grund av att de dels är komplexa och skrymmande, dels används för genomföring av kablar som belastas med 500-550 A vid slutet av bränslecykeln och därmed egenuppvärms, vilket gör det komplicerat att installera extra exemplar. Man vill därför kvalificera initialt med sikte på 40 år och verifiera successivt efter installation med hjälp av tillståndskontroll.

En begränsning av accelerationsfaktorn till 250 innebär en provningstid om minst  $40 \cdot 365 / 250 = 60$  dygn. Med hjälp av Arrhenius formel räknas ut att man för epoxyn (aktiveringsenergin 1,2 eV) behöver en provningstemperatur om 105 °C för att uppnå

accelerationsfaktorn 250 (ger accelerationsfaktorn 278). Man väljer då denna temperatur för provning av hela den sammanbyggda enheten. För o-ringarna av EPR (aktiveringsenergi 0,95 eV) innebär provning vid 105 °C accelerationsfaktorn 86 och den kvalificerade livslängden vid provning under 60 dygn blir då endast 14 år. Motsvarande kvalificerad livslängd för kiselgummit blir 9 år (aktiveringsenergi 0,85 eV, accelerationsfaktorn drygt 54). För att uppnå en kvalificerad livslängd om 40 år för hela genomföringen behöver man åldra o-ringarna av EPR resp kiselgummit motsvarande 26 resp 31 års exponering vid +55 °C innan de monteras in i den kompletta genomföringen (som därefter åldras under 60 dygn vid +105 °C före DBE-provningen). För att uppnå detta kan man åldra o-ringarna av EPR och kiselgummit under 38 dygn vid +120 °C resp. 45 dygn vid +130 °C innan de monteras in i den kompletta genomföringen.

För en del komponenter är det endast vissa av ingående polymermaterial som är intressanta ur integritetssynpunkt. För en kabel är exempelvis ledarisoleringens integritet av stor betydelse för kabelns funktion, medan manteln utgör ett mekaniskt skydd. Man bör dock observera att i vissa applikationer, exempelvis där kabelns täthet mellan dry-well och wet-well i ett BWR-kraftverk är betydelsefull, kan tillståndet hos kabelmanteln vara en säkerhetsfråga.

Sättningen hos o-ringar på grund av åldring påverkas av inspänningen, vilken därför kan behöva simuleras vid artificiell åldring för att ge tillräcklig information om påverkan på o-ringens funktion.

#### 3.5.2.3.4 Bedömning av aktiveringsenergies, lämnade av komponentleverantören

Komponentleverantörer tillhandahåller ibland uppgifter om aktiveringsenergies för ingående polymerer. Uppgifterna är viktiga bl. a. som information om leverantörens grund för angivna livslängdsuppgifter. Det kan emellertid vara viktigt att ta reda på vad leverantörens antaganden om aktiveringsenergies grundas på. Den för bedömning av åldring intressanta aktiveringsenergies kan exempelvis avvika från leverantörsuppgifterna beroende på att de senare ofta baseras på brottöjningsdata framtagna från provning av folier degraderade vid relativt höga temperaturer.

Aktiveringsenergies bestämd på folier av använt material kan dessutom avvika från de värden vi är intresserade av på grund av hög temperatur på t.ex. en termoplast vid extrudering, tillsats av stabilisatorer, smörjning av verktyg vid komponenttillverkning, borring, fräsning, stansning av komponenten osv. Leverantörens uppgifter kan normalt användas som riktvärde eller jämförelsetal för att identifiera det material som begränsar komponentens livslängd. Det livslängdsbegränsade materialet (materialen) bör därefter undersökas med avseende på aktiveringsenergies i sin leveransform. Denna aktiveringsenergies kan användas för en noggrannare livslängdsbestämning och dessutom utgöra en stabil grund för bestämning av kontrollintervall då komponenten skall ingå i ett tillståndskontrollprogram. Säkrare värden på aktiveringsenergies medför att intervallen för tillståndskontroller kan optimeras och att marginaler för osäkerhet i bestämning av livslängd kan fastställas.



#### 3.5.2.4 Artificiell åldring i joniserande strålning

Artificiellt accelererad provning för verifiering av åldringseffekter av joniserande strålning inkluderar utsättande av provobjektet för den totala förväntade livslängdsdosen (före DBE) på kort tid, vilket innebär kraftigt förhöjd doshastighet i förhållande till den som förekommer under normal drift. Accelerationsfaktorn definieras som kvoten mellan doshastigheten vid provning och doshastigheten under normal drift.

Den säkerhetsmarginal som bör läggas till vid verifiering av kvalificerad livslängd beror av en rad faktorer, inklusive

- Kunskap om doshastighet under normal drift. Mindre marginal fordras om doshastigheten kontrolleras (och mäts) under hela den kvalificerade livslängden;
- Kunskap om inverkan av doshastigheten på degraderingen av i komponenten ingående material, speciellt känsligheten för diffusionsbegränsad oxidation;
- Provningstoleranser, t.ex. toleranser på grund av osäkerhet i doshastighet och inhomogenitet i bestrålningen;
- Antal komponentexemplar som provas.

I allmänhet gäller för komponenter att man inte kunnat påvisa någon betydande påverkan från strålning vid totaldoser under 1 kGy [3.13]. Undantag är komponenter som innehåller Teflon (känslighetströskel ned till några kGy) eller vanliga mikroprocessorer (känslighetströskel några Gy). [3.13] anger följande tröskelvärden för polymerer, under vilka strålningen kan anses ha försumbar inverkan.

Tabell 3.1 Tröskelvärden för joniserande strålning (ur [3.13])

<b>Elastomerer</b>		<b>Termoplaster</b>		<b>Hartser</b>	
<i>Material</i>	<i>kGy</i>	<i>Material</i>	<i>kGy</i>	<i>Material</i>	<i>kGy</i>
EPR/EPDM	10	XLPE/XLPO	10	Epoxy	2000
Neopren	10	PVC	1	Polyimid (Kapton),PI	100
CSPE	5	Polyeten, PE	3,8	Fenol	3-3900
Nitril (Buna N)	10	ETFE (Tefsel)	10	Polyester	1-790
Butyl	7			Melamin	67
Viton	1				
Silikon	10				

Tröskelvärdena varierar med sammansättningen av materialet, inklusive additiver såsom antioxidanter, brandhämmare, färgpigment etc. Westinghouse Sweden har gjort motsvarande bedömningar, som bl.a. omfattar huvuddelen av materialen i tabellen ovan. De överensstämmer väl med värdena i tabellen frånsett PVC och Polyeten (PE), där Westinghouse anger 10 kGy resp. 100 kGy som tröskelvärden. Därutöver ger Westinghouse följande tröskelvärden:

PEEK, PEAK	100 kGy
PTFE	1 kGy
EVA	10 kGy

För de flesta organiska material beror degradationen orsakad av en given total strålningsdos av doshastigheten. Olika praxis tillämpas i olika länder. IEEE 323 begränsar doshastigheten till 10 kGy/h, KTA [3.11] föreskriver 0,5 kGy/h (100 h) för simulering av åldringsdos, i Japan föreskrivs 1 kGy/h. KBE EP-154 [3.10] anger 1 kGy/h. Senare tiders undersökningar med mycket låga doshastigheter i England, Tyskland och Frankrike visar på doshastighetseffekter som kräver mycket lägre doshastigheter, av storleksordningen 3-10 Gy/h för att framträda fullt ut. För vissa material är beroendet relativt måttligt.

Doshastighetsberoendet är mindre om materialet är väl stabiliserat med antioxidanter.

Tabell 3.2 visar en sammanställning av tillgängliga data om doshastighetsberoende för material av det slag som förekommer i kablar och andra isoleringar och o-ringar i kärnkraftverk.

Tabell 3.2 Doshastighetsberoenden

<i>Material</i>	<i>Doshastighetsberoende vid jämförelse mellan hög och medelhög doshastighet<sup>1)</sup></i>	<i>Doshastighetsberoende vid jämförelse mellan hög och låg doshastighet<sup>1)</sup></i>
EVA	liten	Stor (30)
EPR/EPDM	liten	Måttlig till stor (3-8)
XLPE	liten	Måttlig till stor (3-10)
SiR	Måttlig (3)	Stor (12)
Viton		Stor
PEEK	Liten	Liten

1) Med hög, medelhög och låg doshastighet avses 1-10 kGy/h, omkring 100 Gy/h respektive 1-10 Gy/h.

Faktorerna inom parentes är kvoter mellan de totaldoser som för olika doshastigheter krävs för att minska kvoten för brottöjning ( $e/e_0$ ) med 50 %, vid användning av höga doshastigheter och medelhöga doshastigheter ( i den vänstra kolumnen) eller höga doshastigheter och låga doshastigheter (i den högra kolumnen).

De totaldoser (under 3 kGy) vi kan räkna med under normal drift för huvuddelen av placeringar av säkerhetsklassade komponenter i svenska kärnkraftverk leder för de flesta komponenter ej till nämnvärd degradering, även om man tar hänsyn till doshastighetseffekten. För komponenter som är placerade så att de är exponerade för högre dos under normal drift bör man beräkna totaldosen och jämföra med den dos komponenten utsätts för under DBE. Om den senare är minst en 10-faktor högre kan man för de flesta komponenter nöja sig med att simulera haverimiljödosen (med doshastighet motsvarande DBE-förhållandet). För enstaka material (t.ex. EVA, PVC) kan man behöva en skillnad på mer än en 10-faktor för att dosen under normal drift och därmed doshastighetseffekten skall kunna försummas.

Om komponenten endast skall fungera i initialskedet av DBE kan dosen under normal drift bli dimensionerande, varvid man måste ta till erforderlig marginal för att ta hänsyn till doshastighetseffekter.

#### *3.5.2.5 Andra miljöfaktorer som kan vara av betydelse för nedbrytningen på grund av åldring*

Fukt kan medföra att åldringshastigheten ökar, vilket framgår av en rad undersökningar som bl.a. redovisats i IFM Akustikbyrån TR 5.299.03 [3.14]. Normalt utsätts inte våra säkerhetsklassade komponenter i reaktorinneslutningen för fuktig atmosfär vid normal drift. I de fall en betydande tids exponering mot fukt konstateras, exempelvis från läckande ångledningar, kan den risk som uppkommit på grund av detta behöva observeras.

Exponering för svaveldioxid kan leda till ändringar i kontaktresistans hos kontaktytor av alla metaller utom ädelmetaller. Svavelväte påverkar i första hand silver och silverlegeringar. Acceleration av korrosiv miljö kan ske genom

- Förhöjd temperatur;
- Förhöjd relativ fuktighet;
- Ökning av förutsättningarna för kondensation (snabb temperaturhöjning vid hög relativ fuktighet);
- Ökning av koncentrationen av korrosiva gaser/substanser;
- Mekanisk stress.

Metoder för acceleration och provning i korrosiva miljöer (saltdimma, svaveldioxid, svavelväte, m.m.) återfinns i olika delar av IEC 60068.

Ozonhalten i luft är oftast högre i kustområden (där våra kärnkraftverk är placerade) än i inlandet. Orsaken är att ozon absorberas mer vid transport över landområden än över vatten. Betydande halter av ozon kan förekomma i utrymmen utanför reaktorinneslutningen. Ozon bryter framför allt ner elastomerer.

Mekanisk åldring avser egenskapsförändringar orsakade av mekanisk påverkan såsom:

- Böjning kan orsaka sprickor eller göra materialet sprött;
- Slitage påverkar såväl den elektriska som mekaniska hållfastheten;
- Yttre påverkan såsom slag kan ge permanenta skador t.ex. hack eller jack som påverkar i första hand materialets elektriska egenskaper;
- Vibrationer kan orsaka nötning vilket leder till försämring av såväl mekaniska som elektriska egenskaper;
- Statisk last ger en komprimering av de flesta polymerer vilket leder till att komponenten deformeras permanent.

Provresultat som redovisas i SKI Report 97:40 [3.4] tyder på att termiskt åldrade kablar som utsätts för kraftig vibration intermittent under drift riskerar att uppvisa sämre isolation under DBE än sådana som ej vibrerats. Provingarna är begränsade, men innebär ändå att man bör vara observant på en risk för minskad åldringstålighet hos komponenter som sitter monterade i vibrerande struktur eller av någon annan anledning kommer att utsättas för kraftiga vibrationer.

#### *3.5.2.6 Provningssekvens och kombinerade miljöfaktorer*

I driftmiljön förekommer joniserande strålning och förhöjd temperatur samtidigt. Vid artificiell åldring i laboratorium appliceras miljöfaktorerna vanligtvis i sekvens. Ett antal studier har genomförts som för vissa material visar att hög temperatur och joniserande strålning samverkar så att den nedbrytande effekten är påtagligt större om de förekommer samtidigt än om de appliceras i följd. Om det inte är möjligt att applicera miljöerna simultant får man applicera dem i den följd som ger störst påverkan samt lägga till en marginal för att täcka in synergieffekter.

Exempel finns även på undersökningar som visar att kombinerad åldring vid hög temperatur och doshastighet ger upphov till mindre degradation än om den utförs som sekvens. Det är alltså inte säkert att ett kombinerat prov ger mer konservativa resultat. Om strålningen skall simulera exponeringen under DBE skall den alltid utföras efter den termiska åldringen.

En rad studier har även genomförts som jämför påverkan på nedbrytningen av organiska material av sekvensen hög temperatur - joniserande strålning och sekvensen joniserande strålning - hög temperatur. Det anses vanligast att sekvensen joniserande strålning - termisk åldring leder till störst påverkan, vilket kan vara en lämplig utgångspunkt om uppgift saknas. Dock uppvisar t.ex. våra egna mätningar på

kablar typ Hypalon (CSPE/CSPE), Dätwyler (EPDM/EPDM) och Rockbestos (CSPE/XLPE) en varierande bild [3.15].

### *3.5.2.7 Införande av kvalificerat tillstånd som alternativ eller komplement till kvalificerad livslängd*

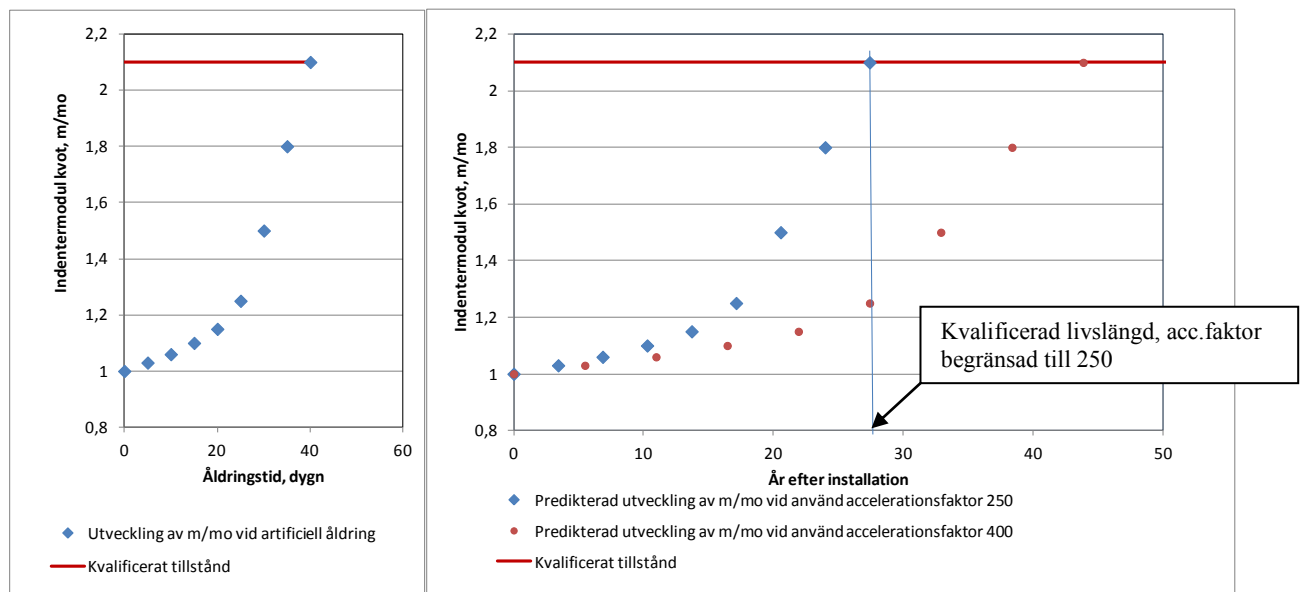
#### 3.5.2.7.1 Metodik

Som visats ovan resulterar bristande kunskaper, osäkerheter och begränsningar i lagar för beräkning av kvalificerad livslängd från artificiell accelererad åldring i samband med initial kvalificering till stora osäkerheter i den tid den artificiella åldringen motsvarar i fältförhållanden. Detta leder till användning av kraftig konservatism och stora marginaler vid bedömning av kvalificerad livslängd. Komponenterna kommer därför att i normalfallet kunna fungera i DBE efter en tidsperiod som är betydligt längre än dess kvalificerade livslängd. I undantagsfall kan den vara kortare. Under alla omständigheter finns det behov att följa åldringen genom regelbundna åtgärder efter installation. Metoder för detta beskrivs i kapitel 4.

Applicering av tillståndsbaserad kvalificering medger direkt uppföljning av degraderingen av komponenten i fält på grund av åldring och jämförelse med den degraderingsnivå för vilken den initiala kvalificeringen verifierat att den fortfarande klarar sin funktion under DBE. Genom denna metod kan det vara möjligt att förlänga den kvalificerade livslängden utöver det värde som ursprungligen beräknats vid den initiala kvalificeringen.

Kvalificerat tillstånd fastställs i den initiala kvalificeringen genom mätning av en eller flera utvalda tillståndsindikatorer under den artificiella åldringen. Det värde som uppmäts i slutet av den artificiella åldringen utgör det kvalificerade tillståndet, förutsatt att komponentens förmåga att fungera i enlighet med sin specifikation under DBE (och post-DBE om så krävs) demonstrerats. Upprättandet av kvalificerat tillstånd och relationen till kvalificerad livslängd illustreras i figur 3.4.

Det uppmätta värdet skall inkludera marginal för mättoleranser.



Figur 3.4. Framtagning av kvalificerat tillstånd. Det vänstra diagrammet visar utvecklingen av indentermodul under artificiell accelererad åldring före DBE provning. Det högra diagrammet visar predikterad utveckling i fält för olika accelerationsfaktorer. I exemplet är 400 accelerationsfaktorn som erhålls med antagen aktiveringsenergi och temperatur under normal drift. Vid beräkningen av kvalificerad livslängd har endast accelerationsfaktorn 250 krediterats.

### 3.5.2.7.2 Val av tillståndsindikatorer

Om tillståndskontroll skall inkluderas i program för upprätthållande av kvalificerad livslängd är det nödvändigt att:

- identifiera tillståndsindikatorer som är tillämpliga för komponenten;
- ta fram information om hur värdena på dessa indikatorer förändras med åldring;
- fastställa gränsvärde på tillståndsindikatorerna för vilket säker funktion i DBE är verifierad.

Tillståndsindikator som väljs för kvalificerat tillstånd skall variera med åldringstiden på ett enhetligt sätt (monotont) och vara relaterad till degraderingen av egenskaper hos komponenten som är av betydelse för dess funktionssäkerhet.

En fördel är om mätning kan ske utan att komponenten påverkas (icke-förstörande mätning). Detta minskar omfattning av arbete i samband med bestämning av förändring med åldring, fastställande av gränsvärde och tillståndsmätningar i fält. Det bör dock noteras att man även kan använda metoder som är förstörande.

Val av tillståndsindikatorer diskuteras mer i detalj i kapitel 7.

### 3.5.2.7.3 Fördelar med användning av kvalificerat tillstånd

Användning av kvalificerat tillstånd löser problemen med beroende av lagar för beräkning av accelerationsfaktorer vid artificiell accelererad åldring och av parametervärden såsom aktiveringsenergi, prediktering av miljösträngheter i fält (temperaturer, doshastigheter, fuktnivåer, etc.). Det löser även problemet med synergism mellan samtidigt verkande miljöfaktorer. Detta innebär mycket väsentliga fördelar för hantering av åldring.

Emellertid löser användning av kvalificerat tillstånd inte problem med effekter av diffusionsbegränsad oxidation. Detta måste fortfarande hanteras genom insamling av information om inblandade material och applicering av moderata miljösträngheter vid artificiell åldring.

Vibration av polymerdetaljer som utsatts för termisk åldring eller åldring i joniserande strålning kan ge upphov till sprickbildning i polymeren som kan påverka deras dielektriska egenskaper under DBE. Komponenter i reaktorinneslutningen utsätts i allmänhet inte för nämnvärd vibration. I de fall detta sker skall man dock vara observant på att tillståndsmätningar normalt inte ger information om sprickbildning i polymerer. Nedsättning av dielektriska egenskaper på grund av sprickbildning visar sig endast vid mätning i fuktig miljö, speciellt under DBE-förhållanden. Det är därför viktigt att vara medveten om risken för reduktion av funktionsförmågan under DBE hos komponent som vid något tillfälle har utsatts för vibration, t.ex. från externa eller interna händelser.

### 3.5.3 DBE-provning

Komponenter som skall fungera under DBE utsätts för en DBE-simulerande provning efter åldring, som normalt omfattar bestrålning till en dos motsvarande den som erhålls under DBE inklusive marginal, ev. inkluderande total förväntad livstidsdos under normal drift, följt av ett termodynamiskt prov i het ånga under högt tryck enligt en specificerad profil. Miljöförhållanden under haveri för våra kärnkraftverk beskrivs i TBE 102:1, [3.16] och motsvarande profiler för DBE-provning beskrivs i KBE EP-154, [3.10].

Doshastigheten kan göras lika med den under DBE förväntade (eller högre för att inkludera post-DBE). Eventuell synergism mellan strålning och den termodynamiska exponeringen under DBE tas normalt hänsyn till genom marginaler vid val av stråldosen för DBE-simuleringen.

För vissa komponenter i svenska kraftverk av BWR-typ gäller krav på funktion under 30 dygn i post-DBE. Accelererad termisk åldring rekommenderas inte för simulering av post-DBE i BWR eftersom det är möjligt att genomföra simuleringen med verklig tid (30 dygn). För PWR kan kraven på post-DBE sträcka sig upp till 1 år. Då måste man acceptera användning av accelererad åldring för simulering av post-DBE, vilket inkluderar en kombination av hög temperatur och hög fuktighet. Metoder för

acceleration av fukteffekter finns angivna i [3.14], men de är i allmänhet komponentspecifika och inte generellt tillämpbara.

### **3.5.4 Provningsstoleranser**

IEC 60068-2-2 Tests B: Dry heat [3.17] används för värmeprovning av komponenter i de flesta miljöprovningstillämpningar. Provkammare av god kvalitet klarar normalt att innehålla de krav på temperaturtoleranser m.m. som anges i denna norm. Det innebär att man kan räkna med att provningstemperaturen ligger inom  $\pm 2$  °C av specificerat värde. De marginaler man måste ta till för att kompensera för provningsstoleranserna är således små och kan normalt försummas i relation till andra osäkerheter.

### **3.5.5 Antal provade exemplar**

Få undersökningar är kända som redovisar spridningen i nedbrytning på grund av åldring hos olika komponentexemplar som utsätts för samma termiska åldringsprov. I SKI Report 93:39 [3.15] görs en genomgång av hur marginaler på grund av begränsat antal provexemplar kan beräknas.

Det är ekonomiskt och praktiskt möjligt att inkludera ett tillräckligt antal exemplar vid initial kvalificering för några få typer av komponenter, exempelvis kablar, för att tillåta en statistisk behandling av variationen i värden för funktionsparametrar hos åldrade exemplar under DBE och beräkning av risken att ett enskilt exemplar faller utanför funktionskraven.

För mer komplexa komponenter är det i allmänhet inte realistiskt att kräva ett tillräckligt antal provexemplar för den initiala kvalificeringen för att tillåta en statistisk behandling. Det är ändå viktigt att använda åtminstone tre exemplar för att få en indikation av om det finns anledning att förvänta sig en betydande variation av degraderingen på grund av åldring och av funktionsegenskaper under DBE. Om så är fallet behöver man göra en analys av risken att åldrade komponenter faller utanför funktionskraven under DBE, eventuellt inkluderande prov på fler exemplar.

SKI rapport 93:39 [3.15] visar hur marginaler som beräknats från resultaten av avvikelser i degradation mellan provade exemplar kan transformeras till marginaler på provningstemperatur. Rapporten visar också resultat av applikation av metoden på beräkning av marginaler på experimentella data från prov på tre typer av kablar, två typer av o-ringar och en typ av spole, samtliga utsatta för +120 °C under 48 dygn. Resultaten indikerar att skillnaden i degradation mellan olika exemplar inte är försumbar även i de fall komponenterna tagits ut från samma tillverkningsserie.

## **3.6 Installation och lagring av komponenter för applicering av tillståndsbaserad kvalificering och för fortlöpande kvalificering**

De olika metoderna för tillförsäkring av att komponenterna håller sig inom kvalificerat tillstånd och för förlängning av kvalificerad livslängd kräver normalt komponentexemplar som lagrats i utrymmen som är representativa för de mest



exponerade komponentplaceringarna eller, som minimum, lagring av komponentexemplar i klimatkontrollerade lagringslokaler, i vilka man sett till att de inte utsatts för mer än för laboratorier normala nivåer på temperatur och fuktighet och varit skyddade mot andra signifikanta åldringssmiljöer såsom aggressiva luftföroreningar, vibrationer, vårdslös hantering. Syftet med detta är att ha tillgång till utbytesenheter i de fall man är hänvisad till att använda ordinarie installerade komponenter för fortlöpande kvalificering eller förstörande tillståndsmätning. Det gör det också möjligt att gå tillbaks till orginalkomponenter som är mindre åldrade än installerade komponenter i syfte att genomföra kompletterande studier, applicera nya kunskaper, etc.

Det är viktigt att komponenterna som lagras är väl dokumenterade beträffande identitet med de som genomgått initial kvalificering (typprovning) och med de som installerats.

Det skall vara möjligt att spåra miljöhistoriken för de lagrade komponenterna, helst från miljömätningar i de lokaler där de förvarats. Som framgår nedan kan man ersätta artificiell åldring som ett led i upprepad provning vid fortlöpande kvalificering med att utnyttja komponenter som utsatts för strängare miljö under normal drift (i hot-spots) än de som skall kvalificeras. Om man installerar komponenter för detta ändamål är det extra viktigt att man har kontroll på vilken miljö de utsätts för.

### **3.7 Aktiviteter efter installation för att upprätthålla kvalificering genom kompletterande provning och kontrollmätningar**

#### **3.7.1 Allmänt**

Typprovning av komponenter före installation ger en viss grad av säkerhet att komponenten klarar att fungera tillfredsställande i olika situationer inklusive under DBE. Brist på detaljerade kunskaper om betydelsefulla parametrar och begränsningar i appliceringen av lagar för beräkning av accelerationsfaktorer i de individuella fallen kompenseras genom användning av en hög grad av konservatism och stora marginaler vid fastställande av kvalificerad livslängd. Den kvalificerade livslängden är också begränsad på grund av begränsningar i den tid som är tillgänglig för artificiell åldring i samband med initial kvalificering.

Tillgängliga metoder för att efter installation förbättra tillförlitligheten i initialt framtagen kvalificerad livslängd och eventuellt förlänga kvalificerad livslängd beskrivs nedan. De kan användas som element i ett fullt program i vilket initial kvalificering och uppföljande kvalificeringsarbete efter installation utgör kompletterande element. De kan även användas för att komplettera kvalificeringsarbetet för installerade komponenter för vilka en värdering av utförd initial kvalificering visar på ett behov av kompletterande kvalificering.

Målsättningen för hantering och provning av säkerhetsklassade komponenter efter installation är att tillförsäkra att de inte degraderar i en utsträckning som faller utanför det status för vilket de har verifierats uppfylla sina konstruktionskriterier under DBE.

Graden av åldringskänslighet, komplexitet, tekniska förutsättningar och möjligheter, kostnader för uppföljande mätningar och provning i relation till kostnaderna för utbyte av komponenter m.m. påverkar omfattningen och utformningen av kompletterande program för att upprätthålla kvalificerad livslängd.

### **3.7.2 Åtgärder efter installation för att reducera osäkerheter vid beräkning av kvalificerad livslängd och för att motivera mindre konservativa antaganden**

Efter installation kan ett underlag till omräkning av kvalificerad livslängd genom användning av mer exakta data tas fram enligt följande:

- a) Mät miljön som komponenten utsätts för i fält (fr.a. temperatur och joniserande strålning). Mätningar av miljön för komponenter i fält behandlas i kapitel 6.
- b) Undersök egenskaper hos komponentens åldringskänsliga material. Exempel: aktiveringsenergi, inflytande av diffusionsbegränsad oxidation, synergieffekter av kombination av temperatur och joniserande strålning.
- c) Upprepa den initiala kvalificeringen med användning av längre varaktighet hos artificiell åldring, eventuellt med mindre extrema temperaturer och doshastigheter med syfte att förlänga kvalificerad livslängd och minska kraven på marginaler som använts för kompensation för icke-Arrhenius beteende och effekter av diffusionsbegränsad oxidation.

Dessa åtgärder kan motivera en omräkning av kvalificerad livslängd med mindre konservativa antaganden med bibehållen hög grad av säkerhet att komponenten klarar sina funktionskrav under DBE när som helst under sin kvalificerade livslängd.

Fastställande av lämpliga tillståndsindikatorer och hur de varierar med tid under artificiell accelererad åldring är tidsödande och kan därför vara svårt att genomföra i samband med typprovning. Om syftet är att använda tillståndsmätningar för att följa åldringen efter installation (t.ex. införa tillståndsbaserad kvalificering) kan istället de undersökningar som behövs för val av tillståndsindikatorer och mätning av deras förändringar med åldringstid göras i samband med repetition av den initiala kvalificeringen eller enbart repetition av den åldring som genomfördes vid den initiala kvalificeringen.

### **3.7.3 Förlängning av kvalificerad livslängd genom fortlöpande kvalificering**

Som indikerats ovan medför den konservatism som används vid framtagning av kvalificerad livslängd att komponenten normalt klarar att fungera som krävs under DBE betydligt senare än vid slutet av dess kvalificerade livslängd. Utöver med de åtgärder som beskrivits i 3.7.2. kan den kvalificerade livslängden förlängas genom att man vid tidpunkten  $t_1$  före utgången av kvalificerad livslängd tar ut komponenter som varit placerade på platser som är representativa för de hårdast miljöexponerade komponenterna och utsätter dem för följande provning:

- Artificiell åldring i laboratorium vid en miljöstränghet (temperatur, stråldoshastighet) och varaktighet som motsvarar önskad förlängning av kvalificerad livslängd med  $\Delta t$ , följt av
- kontroll av dess funktion under simulerad DBE.

Om denna procedur verifierar att komponentexemplaren efter den artificiella åldringen fungerar under DBE i enlighet med sina krav är den kvalificerade livslängden utökad med  $\Delta t$ .

Denna procedur genomförs första gången när komponenten närmar sig den kvalificerade livslängden och upprepas sedan med fastställda tidsintervall till dess den inte längre klarar förlängd kvalificering eller av andra orsaker byts ut.

I de fall komponentexemplar har lagrats i hot-spot områden kan den artificiella åldringen som ett led i förlängningen av kvalificerad livslängd ersättas med att man betraktar exponering i hot-spot som en acceleration av åldringen. Skillnaden mellan miljösträngheten i hot-spot och i de hårdast exponerade ordinarie komponentplaceringarna används som bas för beräkning av förlängd kvalificerad livslängd. I detta fall beräknas  $\Delta t$  på följande sätt:

- A. Om temperaturen är den avgörande faktorn för åldringen (normalfallet i svenska kärnkraftverk) beräknas den termiska accelerationsfaktorn  $F_{termisk}$  orsakad av temperaturen i hot spot, jämfört med den högsta temperaturen i ordinarie komponentplaceringar

$$F_{termisk} = e^{\frac{E}{k} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]} \quad (3.3)$$

där

$T_2$  är temperaturen som komponentexemplaren i hot spot har utsatts för under normal drift

$T_1$  är den högsta temperaturen under normal drift som är representativ för de områden där ordinarie komponenter är placerade

$\Delta t$  beräknas som

$$\Delta t = (F_{termisk} - 1) * t_1 \quad (3.4)$$

där

$t_1$  är tiden från installation till uttaget av komponentexemplaret i hot spot området

- B. Om strålning är den avgörande faktorn för åldringen används samma princip med

$$F_{strålning} = \frac{d_2}{d_1} \quad (3.5)$$

där

$d_1$  är doshastigheten i område representativt för de kraftigast exponerade ordinarie komponentplaceringarna

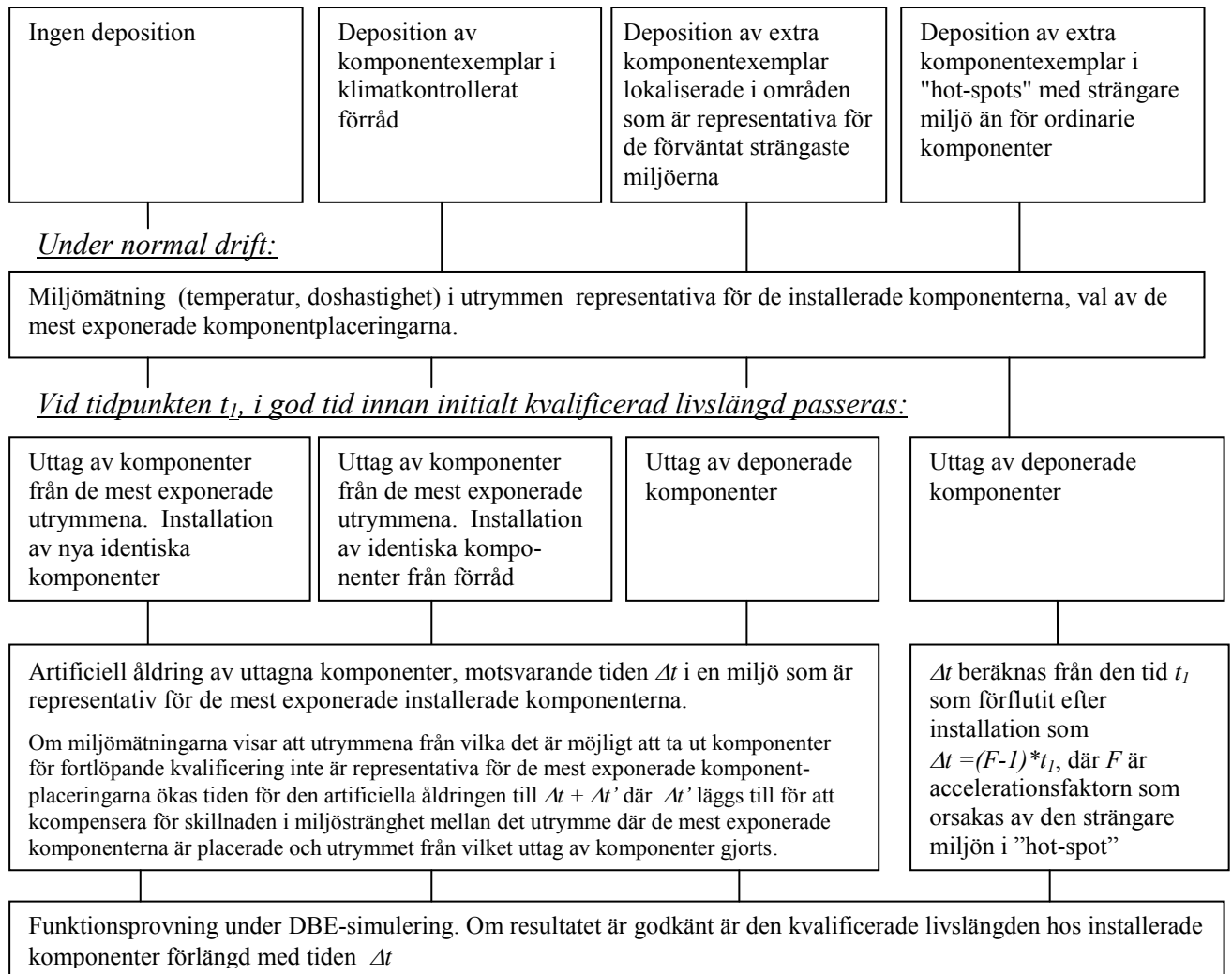
$d_2$  är doshastigheten i hot spot från vilket de provade exemplaren tagits ut

$\Delta t$  beräknas då som

$$\Delta t = (F_{strålning} - 1) * t_1 \quad (3.6)$$

Metoderna för förlängning av kvalificerad livslängd illustreras i figur 3.5.

Vid installation



Figur 3.5. Schema som illustrerar metoder för förlängning av kvalificerad livslängd.

SKI rapport 93:39 [3.15] jämför prov med låg accelerationsfaktor och provningstid som är kortare än vad som krävs för en viss installerad livstid  $t$ , följd av en fortlöpande kvalificering, med typprov som använder hög accelerationsfaktor och en provningstid motsvarande  $t$ . För att kunna jämföra med verkliga driftförhållanden gjordes ett jämförande prov med lång tids exponering. De resultat som redovisas visar att metoden med låg accelerationsfaktor plus fortlöpande kvalificering betydligt bättre motsvarar långtidsexponeringen än metoden med hög accelerationsfaktor. Konklusionen som dras är

att användning av fortlöpande kvalificering på ett signifikant sätt ökar realismen. I en del fall (t.ex. på kabel typ Hypalon) innebar artificiell åldring med höga accelerationsfaktorer mycket mindre påverkan än motsvarande fortlöpande kvalificering trots relativt konservativa antaganden om aktiveringsenergi.

Det är av vikt att känna till miljöhistoriken för de komponenter som tas ut för fortlöpande kvalificering och för typiska placeringar av de installerade komponenter som skall kvalificeras, speciellt för de strängast miljöexponerade utrymmena. Om de komponenter som tas ut inte varit utsatta för miljöer som är representativa för de strängast miljöexponerade utrymmena leder fortlöpande kvalificering till överskattning av återstående kvalificerad livslängd hos komponenterna i de mest utsatta utrymmena.

### **3.7.4 Användning av tillståndsmätningar för hantering av åldring**

#### *3.7.4.1 Allmänt*

Artificiell provning i laboratorium ger, om den utförs med måttliga accelerationsfaktorer och i övrigt efter väl underbyggda miljöprognoser och provningsmetoder, en hög grad av säkerhet att komponenterna fungerar under normal drift, extrem drift och DBE under begränsad installerad tid (kvalificerad livslängd). Allteftersom installerad tid ökar, ökar graden av åldringsbetingade materialförändringar.

Tillståndsmätningar och inspektioner är verktyg för att bekräfta att åldringen efter längre installerad tid inte har fortskridit snabbare än förutsatt. Tillståndsmätningar kan användas för att bibehålla och eventuellt förlänga kvalificerad livslängd och säkerställa att komponenten inte degraderar mer än vad som motsvarar dess kvalificerade tillstånd.

När tillståndsmätning inkluderas i kvalificeringsprogrammet har den initiala kvalificeringen inkluderat följande steg (se 3.5.2.6.1 ovan):

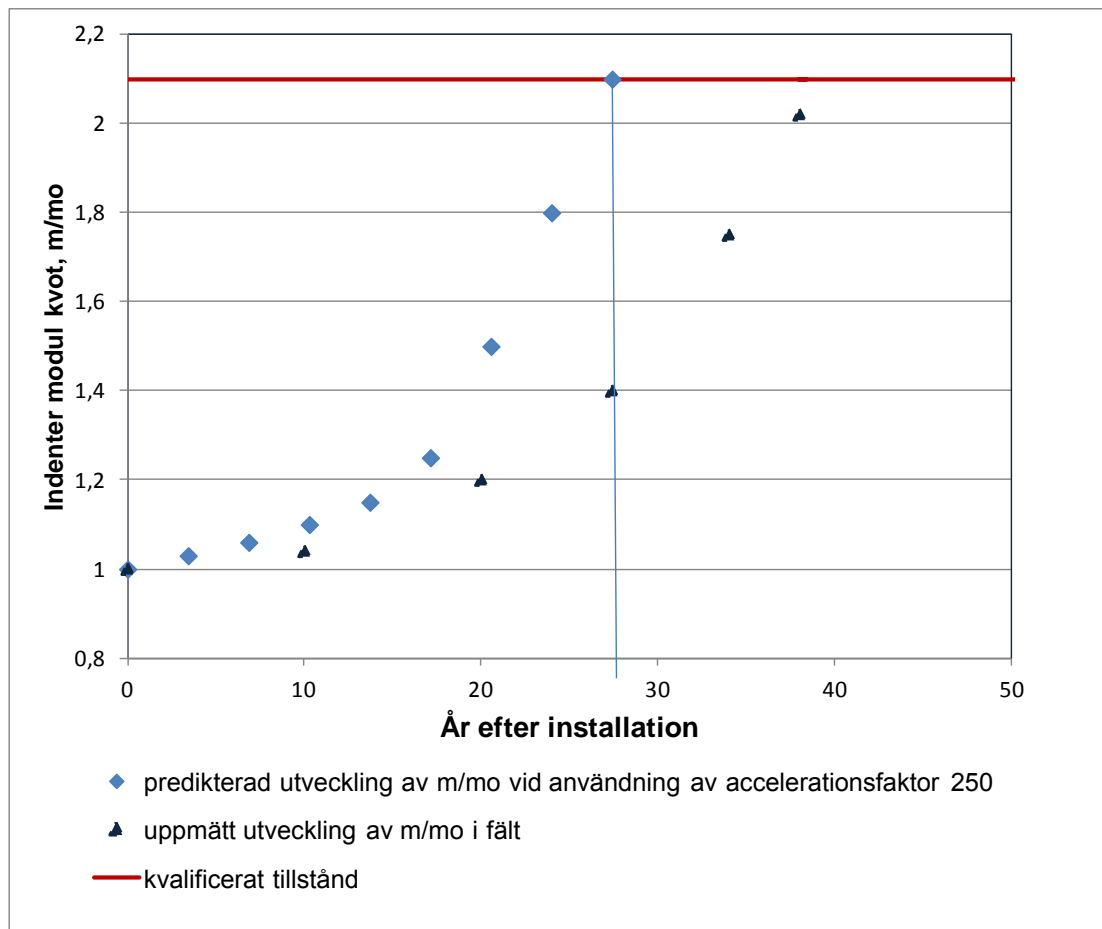
- Identifiering, val och mätning av tillståndsmätningar som är applicerbara på komponenten;
- Registrering av hur tillståndsmätningarnas värden förändras med tiden under den artificiella åldringen som ingår i den initiala kvalificeringen;
- Fastställande av värden på tillståndsmätningarna (kvalificerat tillstånd) i slutet av den artificiella åldringen innan funktionen i DBE verifieras.

Efter installation görs identiska tillståndsmätningar regelbundet på representativa komponentexemplar och värdena jämförs med kvalificerat tillstånd.

Inspektioner i samband med revisionsavställningar är ett viktigt komplement till tillståndsmätningar. Sådana inspektioner kan utnyttjas för att identifiera utrymmen med förhöjd miljö, s.k. hot spots. Vid inspektioner kan man identifiera miljöinducerad påverkan på kablar och komponenter, skador på termisk isolering av

varma rörledningar etc., som kan förvärma hot spots, m.m. Bl.a. följande observationer på kablar etc. kan indikera hot spots: Missfärgning, utträngning av mjukgörare, sprickor i ytmaterial, styvhet. Även observationer på omgivande struktur (färgförändringar, etc.) kan avslöja hot spots.

Figur 3.6 illustrerar resultat av mätning av en utvald tillståndsindikator vid specificerade tidsintervall efter installation och jämförelse med predikerad utveckling av värdet på tillståndsindikatorn från resultaten av mätningarna under den artificiella åldringen vid den initiala kvalificeringen.



Figur 3.6 Användning av kvalificerat tillstånd

I (det hypotetiska) exemplet i figur 3.4 beräknades den kvalificerade livslängden till 28 år. Den första mätningen av indentermodulen är i vårt exempel (se figur 3.6) utförd efter 10 år och visar ett värde som är lägre än det förväntade. Nästa mätning görs efter 20 år och konfirmerar trenden som pekar mot en livslängd som är längre än den kvalificerade. Den tredje mätningen har gjorts efter 28 år, d.v.s. vid utgången av kvalificerad livslängd och trenden fortsätter att utvisa att en förlängning av kvalificerad livslängd är motiverad. Den förlängs till 40 år, motsvarande installerad

livstid under förutsättning att nästa mätning görs inom 6 år och en omprövning av förlängningen av den kvalificerade livslängden till 40 år görs, baserad på resultatet av denna. Nästa mätning görs 34 år efter installation. Eftersom en extrapolering av trenden nu visar att det finns en risk att det kvalificerade tillståndet nås före 40 år efter installation beslutas att göra en ny mätning inom 4 år. Resultatet av denna visar att komponenten är nära sitt kvalificerade tillstånd och man tar beslutet att antingen byta ut komponenterna eller följa utvecklingen under resterande installerad tid med tätare mätningar.

#### *3.7.4.2 Val av tidsintervall mellan tillståndsmätningar i fält*

När tillståndsbaserad kvalificering används måste beslut tas om intervall mellan tillståndsmätningar i fält.

I de fall tillståndsmätningarna utförs i fält med metoder som kan accepteras som icke förstörande kan man normalt göra relativt täta mätningar av utvecklingen av tillståndsindikatorerna. I de fall mätningarna utförs på komponentexemplar som tas ut från representativa placeringar i fält begränsas antal mättillfällen av tillgången till deponerade komponenter eller installerade komponenter som ersätts.

Under alla förhållanden bör de första mätningarna genomföras betydligt tidigare än vid utgången av kvalificerad livslängd. Om tillståndsindikatorns förändring med tiden har registrerats vid den initiala kvalificeringen kan den registrerade kurvan användas för att fastställa tidpunkten för nästa mätning genom matchning med denna.

Om mätningarna på komponentexemplar uttagna från fält görs i laboratorium är ett sätt att fastställa tidsintervallet  $\Delta t$  till nästa mätning att genomföra en artificiell åldring av det uttagna exemplaret motsvarande  $\Delta t$  plus marginal innan tillståndsmätningen görs.

#### *3.7.4.3 Kontroll av kvalificerat tillstånd när icke-förstörande mätningat kan användas*

Den största fördelen med användning av icke-förstörande tillståndsmätningar är att mer frekventa mätningar är möjliga eftersom man inte är beroende av tillgång till deponerade komponentexemplar eller nya lagrade exemplar för ersättning av ordinarie installerade komponenter som tas ut. Metoden för fastställande av tidsintervall till nästa mätning enligt sista stycket i 3.7.4.2 kan inte användas men man kan ha råd med större konservatism genom val av kortare tidsintervall mellan mätningarna.

Figur 3.7 illustrerar användning av metod för kontroll av kvalificerat tillstånd för detta fall.

I samband med artificiell accelererad åldring som ett led i initial kvalificering (eller vid kompletterande mätningar efter den initiala kvalificeringen)

Fastställande av kvalificerat tillstånd i tillägg till kvalificerad livslängd genom värdet av tillståndsindikator som function av tid  $c(t)$  i samband med artificiell åldring. Slutvärdet före genomförande av simulated DBE-provning med godkänt resultat,  $c_{slut}$ , är det kvalificerade tillståndet

Under normal drift:

Miljömätning (temperatur, doshastighet) i utrymmen som är representativa för de installerade komponenterna, bestämning av de mest exponerade placeringarna. Val av utrymmen i vilka tillståndsmätningar på installerade komponenter skall genomföras

Vid tidpunkten  $t_1$  efter installation:

Icke-förstörande tillståndsmätningar i fält vid tidpunkten  $t_1$ , uppmätt värde på tillståndsindikatorn =  $c_1$

Beslut om tidsintervall  $\Delta t_1$  inom vilket nästa mätning skall genomföras, baserat på jämförelse av  $c_1$  with  $c(t)$  och dess avstånd till  $c_{slut}$

Vid tidpunkten  $t_n = t_{n-1} + \Delta t_n$ :

Proceduren upprepas till dess resultaten visar att det finns en risk att det kvalificerade tillståndet överskrids före nästa tidpunkt då mätningar kan utföras. Komponenten har då uppnått slutet på sin livstid och måste bytas ut.

Även om kvalificerad livslängd har överkridits kan komponenterna vara kvar tills mätningarna visar att det finns en risk att kvalificerat tillstånd överskrids före nästa tidpunkt då mätningar kan genomföras.

Figur 3.7. Schema som illustrerar de olika stegen vid kontroll av kvalificerat tillstånd genom uppföljning med (icke-förstörande) mätningar i fält.

#### 3.7.4.4 Kontroll av kvalificerat tillstånd när förstörande mätningar används

Tillståndsmätningar i fält kan endast utföras med metoder som kan accepteras som icke-förstörande. Även i de fall metoder kan användas på installerade komponenter på ett icke-förstörande sätt är det i flertalet fall endast möjligt eller åtminstone mer bekvämt att utföra mätningarna på komponenter eller delar av komponenter som tagits in på ett laboratorium där det är lättare att kontrollera tillståndsmätningarnas utförande.

Figur 3.8 illustrerar användning av metod för kontroll av kvalificerat tillstånd i dessa fall



I samband med artificiell accelererad åldring som ett led i initial kvalificering (eller vid kompletterande mätningar efter den initiala kvalificeringen)

Fastställande av kvalificerat tillstånd i tillägg till kvalificerad livslängd genom värdet av tillståndsindikator som funktion av tid  $c(t)$  i samband med artificiell åldring. Slutvärdet före genomförande av simulated DBE-provning med godkänt resultat,  $c_{slut}$ , är det kvalificerade tillståndet

Vid installation

Ingen deposition	Deposition av komponentexemplar i klimatkontrollerat förråd	Deposition av extra komponentexemplar i områden som är representativa för de förväntat strängaste miljöerna	Deposition av extra komponentexemplar i "hot spots" med strängare miljö än för ordinarie komponenter
------------------	---	---	--

Under normal drift:

Miljömätning (temperatur, doshastighet) i utrymmen som är representativa för de installerade komponenterna, bestämning av de mest exponerade placeringarna. Val av utrymmen i vilka tillståndsmätningar på installerade komponenter skall genomföras. I de fall extra komponentexemplar placerade i "hot spots" används skall även miljö i detta utrymme mätas. I detta fall beräknas en tilläggstid  $\Delta t_0$  genom jämförelse av miljön i "hot spot" med miljön i de mest exponerade utrymmena där ordinarie komponenter är placerade på samma sätt som redovisats i 3.7.3 för beräkning av  $\Delta t$ .

Vid tidpunkten  $t_1$ , i god tid innan initialt kvalificerad livslängd passerar:

Uttag av komponenter från de mest exponerade utrymmena. Installation av nya identiska komponenter	Uttag av komponenter från de mest exponerade utrymmena. Installation av identiska komponenter från förråd	Uttag av deponerade komponenter	Uttag av deponerade komponenter
Tillståndsmätningar i laboratorium på uttagna komponenter; mätt värde på indikatorn = $c_1$ .			
Beslut om tidsintervallet $\Delta t_1$ inom vilket nästa mätning skall göras, baserat på jämförelse av $c_1$ med $c(t)$ och dess avstånd till $c_{slut}$			

Vid tidpunkten  $t_n = t_{n-1} + \Delta t_n$ :

Proceduren upprepas till dess resultaten visar att det finns en risk att det kvalificerade tillståndet överskrider före nästa tidpunkt då mätningar kan utföras. Komponenten har då uppnått slutet på sin livstid och måste bytas ut. I de fall man använt komponentexemplar från deponering i "hot spot" är komponenten kvalificerad för användning under tiden  $\Delta t_0$  efter det man kommit fram till en tidpunkt då mätningarna visar att det finns risk att det kvalificerade tillståndet överskrider före nästa tidpunkt då mätningar kan utföras.

Figur 3.8. Schema som illustrerar de olika stegen vid kontroll av kvalificerat tillstånd genom uppföljande tillståndsmätningar på uttagna komponentexemplar i laboratorium

### 3.7.5 Referenser

- [3.1] Krosness A., Spång K. ”Miljökvalificering av komponenter i kärnkraftverk. Del I: Komponenter i reaktorinneslutningen”, IFM Akustikbyrå TR 5.082.01, utgåva 2, September 1980
- [3.2] IEC 60721-3-3 Classification of environmental conditions – Part 3  
Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 3: stationary use at weather-protected locations
- [3.3] TBE 101(E) ”Environmental Specification for Normal Operation”, Svenska kärnkraftverken, 1996
- [3.4] Spång, K. ”Ageing of electrical components in nuclear power plants; Relationships between mechanical and chemical degradation after artificial ageing and dielectric behaviour during LOCA”, SKI Report 97:40, October 1997
- [3.5] IEEE 323-1974 ”Standard for qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- [3.6] IEEE 323-1983 ”Standard for qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- [3.7] IEEE 323-2003 ”Standard for qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations”, IEEE Power Engineering Society.
- [3.8] IEC 60780 ”Qualification of electrical equipment of the safety system for nuclear power plants, 1997
- [3.9] IEEE 383-2003 ” Standard for qualifying class 1E electric cables and field splices for nuclear power generating stations”, IEEE Power Engineering Society.
- [3.10] KBE EP-154 (E) ”Environmental Qualification for Accident Conditions”, Svenska kärnkraftverken, 1996.
- [3.11] KTA 3706 ”Wiederkehrender Nachweis der Kühlmittelverlust-Störfallfestigkeit von elektro- und leittechnischen Komponenten des Sicherheitssystems”, Kerntechnischer Ausschuss (KTA).
- [3.12] IAEA-TECDOC-1188 Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables. Volume I and II. International Atomic Energy Agency, December 2000
- [3.13] Aging Management Guidelines for Commercial Nuclear Power plants – Electrical cable and Terminations. Contractor Report SAND96-0344, September 1996 (Specified dissemination)
- [3.14] Spång, K. ”Långtidsverkan av miljöpåverkningar på säkerhetsrelaterade elkompontener i kärnkraftverk. State-of-the-art”, IFM Akustikbyrå TR 5.299.03, September 1984

[3.15] Spång, K. "Methodology for artificial ageing of electrical components in nuclear power plants; Results of experimental studies", SKI Report 93:39, Dec. 1993

[3.16] TBE 102:1(E) "Environmental Specification for Accident Conditions", Svenska kärnkraftverken, 1996

[3.17] IEC 60068-2-2 Environmental Testing – Part 2: Tests. Tests B: Dry Heat

***Andra rapporter av intresse relaterat till innehållet i kapitel 3, men som inte refereras till i texten:***

[3.18] NUREG/CR-4301, SAND85-1309 "Status Report on Equipment Qualification Issues Research and Resolution", Sandia National Laboratories, November 1986

[3.19] EPRI NP-2129 "Radiation Effects on Organic Materials in Nuclear Plants", prepared by Georgia Institute of Technology, November 1981

[3.20] "Effects of low irradiation dose rates on microprocessors to simulate operation in nuclear installations. A safety approach", A. Laviron m.fl. Proceeding Opera 89, September 1989, pp 137-144

[3.21] Operability of Nuclear Power Systems in Normal and Adverse Environments. Albuquerque, New Mexico, September 20-October 3, 1986 Proceedings

[3.22] K.T. Gillen and R.L. Clough "Occurrence and implications of radiation dose-rate effects for material aging studies" Radiat. Phys. Chem, 18, 679 (1981)

## **4 Hantering av åldring av "gammal" komponent**

### **4.1 Allmänt**

På grundval av tillämpliga delar av den metodik som beskrivs i kapitel 3 kan kompletta program för hantering av åldringsproblematiken tas fram i samband med inköp och kvalificering av nya komponenter som skall installeras i kärnkraftverk. För komponenter som redan är installerade ("gamla komponenter") och för vilka man önskar följa upp och komplettera befintlig kvalificering eller utöka kvalificerad livslängd kan man också välja ut lämpliga delar ur tidigare beskriven metodik. Här görs en sammanfattande översikt av möjligheterna.

De flesta metoderna i kapitel 3 kan appliceras på "gamla" komponenter om identiska nya komponenter från tillverkaren eller från förråd är tillgängliga och kan användas för kompletterande provning eller utbyte av installerade komponenter som tas ut för kompletterande provning.

### **4.2 Omräkning av kvalificerad livslängd**

Underlag till omräkning av kvalificerad livslängd genom användning av mer exakta data kan erhållas på det sätt som beskrivs i 3.7.2, inklusive ett eller flera av följande element:

- Mätning i fält av miljöförhållandena under normal drift
- Undersökning av egenskaper hos åldringskänsliga material som ingår i komponenten, t.ex. aktiveringsenergi, inflytande av diffusionsbegränsad oxidation, etc.

Dessa aktiviteter kan användas för att förstärka konfidensen hos fastställd kvalificerad livslängd och eventuellt försvara en förlängning av kvalificerad livslängd.

### **4.3 Kompletterande laboratorieprovning**

I de fall då kvalificeringen av den ”gamla” komponenten har baserats på artificiell accelererad åldring vid temperaturer och doshastigheter som innebär en väsentlig osäkerhet hos kvalificerad livslängd kan en upprepning av den initiala kvalificeringen med användning av artificiell åldring med längre tider och mindre extrema miljöförhållanden användas för att medge en mer realistisk beräkning av kvalificerad livslängd. Detta förutsätter tillgång till identiska nya komponenter eller komponenter som förvarats i klimatkontrollerade förråd.

Osäkerheterna på grund av användning av extrema miljöförhållanden vid den initiala kvalificeringen har vanligtvis kompenserats för genom mycket konservativa beräkningar av kvalificerad livslängd. Den kompletterande provningen kan användas för att undersöka möjligheten att förlänga den kvalificerade livslängden genom att använda mindre konservatism i beräkningarna.

Om initial kvalificering upprepas rekommenderas att man om möjligt inkluderar tillståndsmätningar och fastställer kvalificerat tillstånd i enlighet med 3.5.2.7.

### **4.4 Förlängning av kvalificerad livslängd genom fortlöpande kvalificering**

#### **4.4.1 Allmänt**

Fortlöpande kvalificering för förlängning av kvalificerad livslängd hos ”gamla” komponenter kräver tillgång till förrådsförvarade identiska komponentexemplar eller nya komponenter som kan ersätta sådana som tas ut för prov för förlängning av kvalificerad livslängd.

Innan laboratorieprov påbörjas för förlängning av kvalificerad livslängd bör mer precisa och korrekta uppgifter om komponentmiljön inhämtas genom mätning under normal drift i utsatta komponentpositioner. Resultaten av dessa mätningar utnyttjas för bestämning av accelerationsfaktorer vid laboratorieprovningen.

#### **4.4.2 Användning av installerade komponenter som tas ut, kvalificeras för förlängd kvalificerad livslängd och ersätts**

Om uttag av samples av installerade exemplar, som byts ut mot förrådsförvarade eller nya kan genomföras, kan fortlöpande kvalificering utföras på samma sätt som för ”nya” komponenter, beskrivet i 3.7.3. Uttagna samples åldras artificiellt (vid förhöjd

temperatur) motsvarande tiden  $\Delta t$  i verklig miljö, varefter de utsätts för funktionsprov under DBE-simulering. Vid godkänt resultat är den kvalificerade livslängden för installerade komponenter förlängd med tiden  $\Delta t$ .

#### 4.4.3 Kvalificering för förlängning av kvalificerad livslängd utan uttag av installerade komponenter

Om uttag av installerade komponenter från de mest exponerade placeringarna inte är möjlig men identiska förrådsförvarade eller nya komponenter är tillgängliga kan man artificiellt åldra sådana komponenter till en åldringsgrad som minst motsvarar åldringen hos de komponenter som är installerade i de mest exponerade placeringarna. Metoderna för artificiell accelererad åldring beskrivna tidigare i denna rapport kan användas för detta. Om möjligt bör man göra en kontroll av att de artificiellt åldrade komponenterna nått en degradation på grund av åldring som inte är mindre än den hos komponenterna i de mest exponerade placeringarna genom att göra icke-förstörande mätningar på såväl de artificiellt åldrade som de installerade komponenterna och jämföra dessa.

Proceduren illustreras i figur 4.1 där de installerade komponenterna antas ha varit i funtion (installerade) under tidsrymden  $t_0$ .

*Förberedelse för att möjliggöra fortlöpande kvalificering (görs vid tidpunkten  $t_0$ ):*

Extra exemplar ur förråd åldras artificiellt till en tid motsvarande tiden från installation till $t_0$ , varefter de installeras på platser representativa för de strängaste miljöerna.	Extra exemplar ur förråd åldras artificiellt till en tid motsvarande tiden från installation till $t_0$ , varefter de installeras i "hot spots" med strängare miljö än den för ordinarie komponenter
--	--

*Vid tidpunkten  $t_1$ , i god tid innan initialt kvalificerad livslängd löpt ut:*

Uttag av installerade extra exemplar vid tiden $t_1$ för förlängd kvalificering. Artificiell åldring av dessa motsvarande tiden $\Delta t$ i verklig miljö	$\Delta t$ beräknas från tiden $t_1$ efter installation som $\Delta t = (F-1)*(t_1-t_0)$ , där $F$ är accelerationsfaktorn som orsakas av den strängare miljön
Funktionsprov under DBE-simulering. Vid godkänt resultat är den kvalificerade livslängden för installerade komponenter förlängd med tiden	Funktionsprov under DBE-simulering. Vid godkänt resultat är den kvalificerade livslängden för installerade komponenter förlängd med tiden

Figur 4.1. "Gamla" komponenter. Metod för förlängning av kvalificerad livslängd då installerade komponenter inte kan tas ut för provning och ersättas.

#### 4.5 Tillämpning av metoden för kvalificerat tillstånd på "gammal" komponent

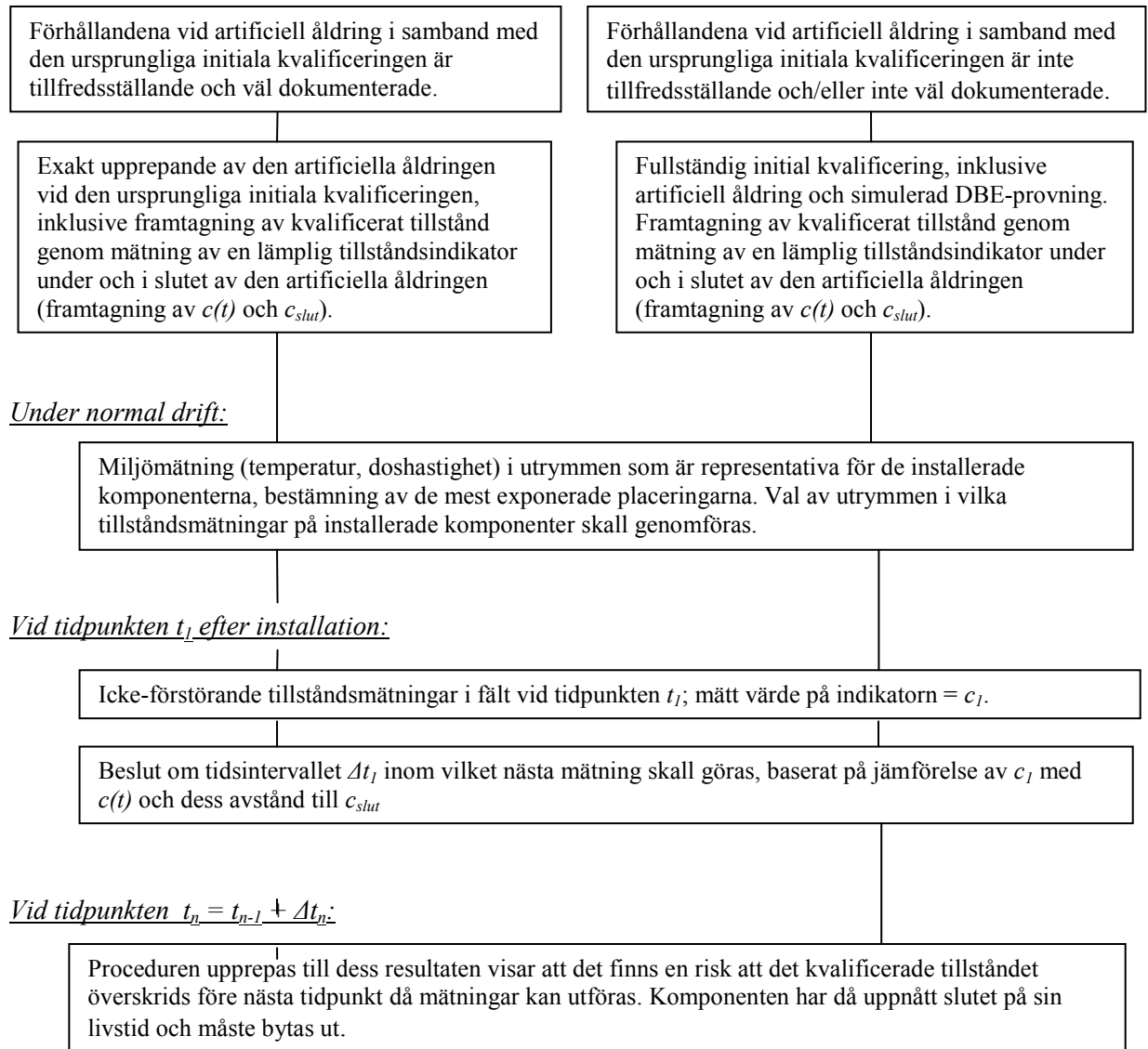
Om identiska komponenter har lagrats i klimatkontrollerat utrymme eller nya identiska komponenter är tillgängliga är det möjligt att tillämpa metoden för kvalificerat tillstånd även på komponenter för vilka kvalificerat tillstånd inte har fastställts i samband med initial kvalificering. Två metoder är tillgängliga, beroende

av vilken information som finns tillgänglig om den artificiella åldringen som använts vid initial kvalificering.

- a. Metod där endast den artificiella åldringen vid den initiala kvalificeringen upprepas. Den dyraste och mest komplicerade delen av den initiala kvalificeringen är normalt DBE-provningen. Data för användning av tillståndsbaserad kvalificering som bas för fortlöpande kvalificering efter installation, ev. med förlängning av kvalificerad livslängd, kan erhållas genom en exakt repetition av den exponering som använts vid den ursprungliga initiala kvalificeringen. Det är inte nödvändigt att inkludera DBE-provning eftersom komponenten redan är kvalificerad för DBE vid dess tillstånd i slutet av den artificiella åldringen.
- b. Metod som inkluderar komplett initial kvalificering. Om den exponering som använts för den artificiella åldringen vid den initiala kvalificeringen inte är dokumenterad tillräckligt väl för användning av metoden a. eller inte är tillfredsställande, exempelvis genom att man använt alltför höga temperaturer och doshastigheter innebärande en risk för signifikant diffusionsbegränsad oxidation, kan en komplett omkvalificering med fastställande av kvalificerad livslängd och kvalificerat tillstånd erfordras.

Metoderna beskrivs av schemat i figur 4.2.

Helt eller delvis förnyad initial kvalificering, genomförd på lagrade eller nya identiska komponenter



Även om kvalificerad livslängd har överkridits kan komponenterna vara kvar tills mätningarna visar att det finns en risk att kvalificerat tillstånd överskrids före nästa tidpunkt då mätningar kan genomföras.

Figur 4.2. Schema som illustrerar de olika stegen vid applicering av kvalificerat tillstånd på "gammal" komponent.

## 5 Komponenter utanför reaktorinneslutningen

### 5.1 Hantering av åldring

En omfattande studie av miljöförhållanden för säkerhetsklassade komponenter som är placerade utanför reaktorinneslutningen genomfördes under 1980 och finns redovisad i IFM Akustikbyrån TR 5.125.01 [5.1]. TBE 101 [5.2] specificerar två klasser av normal driftmiljö utanför reaktorinneslutningen (Stränghet A: utrymmen där inga varma processsystem är installerade, Stränghet B: varma processutrymmen).

Effekterna av långtidsverkan kan behöva beaktas för komponenter som skall fungera under lång tid, speciellt sådana som är placerade i utrymmen som berörs av haveri. För komponenter som är placerade i utrymmen som inte berörs av haveri bedöms åldringsprovning normalt inte nödvändig. Det bör vara tillräckligt med kvalificering genom analys samt regelbundna funktionskontroller och inspektioner.

Övervakning av komponenternas funktioner är dock inte alltid tillräckligt. Man kan behöva införa periodiskt inspektionsprogram där komponenterna demonteras och kritiska komponenter (med t.ex. silverbeläggning) inspekteras och utbyts då tillämpliga korrosionsgränsvärden uppnåts. Nedbrytning av elastomerer (t.ex. O-ringar) kan påskyndas om förvaringen är olämplig eller om elastomeren (O-ring) monterats i "varma" elkomponenter utanför kritiska utrymmen.

För komponenter som är placerade i utrymmen som berörs av haveri är sådana kontroller inte tillräckliga eftersom de inte visar om komponenten är i stånd att fungera på avsett sätt i samband med haveri. Det finns för dessa komponenter anledning att genom kunskaper om ingående materials åldringsbeständighet eller helst genom artificiell åldring och prov i simulerad haverimiljö, ev. kombinerat med tillståndskontroller enligt tidigare kapitel, säkerställa funktion i haverimiljö vid slutet av kvalificerad livslängd.

Varierande miljöer uppträder i utrymmen utanför inneslutningen i samband med haverier. Stora variationer föreligger mellan olika haveriflöpp och olika kärnkraftverk. Även inom ett och samma utrymme förekommer lokala variationer. I TR 5.125.01 [5.1] görs en uppdelning av de utrymmen som påverkas av haveri i

- Primärhändelserum – utrymme innehållande varma, trycksatta system eller kalla system där rörbrott kan inträffa. Komponenter placerade i närheten av brottställe i primärhändelserum är utsatta för den strängaste haverimiljön.
- Avlastningsväg – kan utgöras av flera utrymmen i en kedja. För avlastningsvägar förutsätts att utflödet i samband med haveri pågår minst så länge att jämvikt uppnås. Spridning kan även ske direkt via ventilationskanaler och över avloppssystem.
- Genomströmningsutrymme – utrymme anslutet till avlastningsväg med inströmningsmöjlighet och med möjlighet till genomströmning. Miljöspridning till utrymmet antas ske aktivt med ventilationssystem från



avlastningsväg med gas/ånga. För vätskor blir nivåskillnaden den drivande kraften.

- ”Blindtarm” – utrymme anslutet till avlastningsväg med inströmningsmöjlighet men inte med möjlighet till genomströmning. Hit räknas anslutande korridor till avlastningsväg, etc.
- Läckageutrymme – utrymme som riskerar att utsättas för läckage från något av övriga utrymmen i en haverisituation, främst från avlastningsväg. Läckage av gas/ånga kan ske genom dörrspringor o.dyl. Vattenläckage kan ske genom sprickor och tätningar i bjälklag m.m.

Integrerad 40-årsdos av joniserande strålning (gammastrålning) i utrymmen gränsande till reaktorinneslutningen under normal drift anges i TR 5.125.01 [5.1] till 50 Gy, i övriga utrymmen mindre än 5 Gy. I utrymmen med filterceller, jonbytare, avklingningstankar kan högre integrerade doser förekomma. Detta gäller även utrymmen nära ångledningar.

Dessa strålningsdoser ligger betydligt under vad som normalt påverkar nedbrytningen av organiska material med undantag av vissa teflonmaterial (PTFE) och några liknande fluorpolymerer.

Den integrerade dosen i samband med haveri kan uppgå till 40 kGy omedelbart intill rörledning som cirkulerar vatten innehållande fissionsprodukter. 1 m från rörledningen är nivån en tiopotens lägre. I övriga utrymmen är haveridosen väsentligt lägre – av storleksordningen några tiotal Gy. Endast för komponenter i speciellt utsatta positioner behöver således haverimiljöprovning inkludera (föregås av) joniserande strålning.

Komponenter placerade i utrymmen utomhus eller delvis öppna och ventilerade utrymmen kan utsättas för svavelväte, klorider (saltdimma), sand och damm. Tillsammans med fukt kan detta leda till korrosion och kemisk påverkan som minskar livslängden.

Komponenterna kan tillfälligt utsättas för svetsgaser (fluorider, kvävedioxid, ozon, fosgen, etc.) samt rök och sot i samband med revisioner. Detta kan bidra till nedbrytningen. Nedbrytningen kan även påverkas av förekomst av höga ozon-halter i luften.

Förhöjda temperaturer under normal drift kan föreligga på grund av strålningsvärme från varma system. I utrymmen som inte innehåller varma system bör man kunna räkna med 25 °C på sommaren, något lägre på vintern, förutsatt att komponenten inte är placerad nära ett fönster så att den exponeras för solstrålning. Termisk åldring kan försummas i dessa fall.

Undersökningar redovisade i SKI Report 97:40 [5.3] indikerar att intermittent vibration kan påtagligt minska isolationsresistanser i haverimiljö hos termiskt åldrade kablar. Komponenter placerade utanför reaktorinneslutningen kan utsättas för vibrationer. Detta kan gälla komponenter som är monterade i samma struktur som

vibrerande maskiner (motorer, pumpar, etc.) eller som utgör underlag för trycksatta mediaförande ledningar, samt komponenter som är monterade på trycksatta mediaförande ledningar. Komponenter innehållande organiskt material som åldrats termiskt kan även försämra sina funktionsegenskaper om de utsätts för slag och tillfälliga stötar.

Kvalificeringsprogram för hantering av åldring bör således genomföras för säkerhetsklassade komponenter i utrymmen som utsätts för påtaglig påverkan av haverimiljö. För säkerhetsklassade komponenter i utrymmen som inte påtagligt påverkas av haverimiljö bör det vara tillräckligt att göra regelmässiga kontroller av komponenternas funktion.

## 5.2 Referenser

[5.1] Westin, L. ”Miljöklassificering av komponenter i kärnkraftverk. Del 2: Komponenter utanför reaktorinneslutningen”, IFM Akustikbyrå TR 5.125.01, December 1980

[5.2] TBE 101 ”Miljöspecifikation för normal driftmiljö”, 1996-12-12

[5.3] Spång, K. ”Ageing of electrical components in nuclear power plants; Relationships between mechanical and chemical degradation after artificial ageing and dielectric behaviour during LOCA”, SKI Report 97:40, October 1997.

## 6 Metodik för mätning av komponenters driftmiljö

### 6.1 Bakgrund

Prediktering av en komponents kvalificerade livslängd bygger på antaganden om miljön för komponenten under normal drift. Begränsningar i kunskaper om och kontroll av driftmiljön måste kompenseras med marginaler på antagna miljösträngheter vilket resulterar i ett konservativt mått på den kvalificerade livslängden. Mätning och kontroll av driftmiljön är således ett viktigt instrument för att begränsa graden av konservatism utan att minska säkerheten i den predikterade kvalificerade livslängden. Den uppmätta och kontrollerade miljön är normalt mildare än den man förutsatt vid predikteringen, vilket innebär att den från typprovningen verifierade livslängden kan förlängas som följd av mätresultaten.

De miljöfaktorer som i första hand bidrar till åldring av komponenter i reaktorinneslutningen är temperatur och joniserande strålning. Det är därför speciellt viktigt att kontrollera dessa faktorer. I vissa placeringar, och/eller under vissa omständigheter, kan det vara av intresse att även kontrollera andra faktorer, exempelvis relativ fuktighet, föroreningar och vibration. Detta kapitel beskriver metoder och teknik för miljömätningar med tillämpning på kontroll av miljön hos komponenter i kärnkraftverk.

En tillfredsställande information om fördelning av temperaturer och joniserande strålning i reaktorinneslutningen kan fås om temperaturgivare och dosimetrar placeras på de mest utsatta komponentplaceringarna samt ett urval av övriga platser vilkas miljö är representativ för flertalet komponentplaceringar. Mätningarna bör omfatta minst två hela perioder mellan avställningar, vilka bör täcka in normala kortvariga fluktuationer samt påverkan av årstid.

## **6.2 Temperatur, mätkrav**

Temperaturen hos en passiv (icke egenuppvärmd) komponent bestäms helt av omgivningen. Två faktorer dominerar: den omgivande luftens temperatur och omgivande ytors värmeutstrålning. Enbart kunskaper om den omgivande luftens temperatur är således inte tillräckligt för att bestämma temperaturmiljön för en komponent om det finns betydande värmekällor i närheten som komponenten inte är avskärmd från.

Temperaturen hos en aktiv (egenuppvärmd) komponent bestäms dessutom av egenuppvärmningen och avledning av värme från komponenten till omgivningen genom konvektion, strålning och värmeledning.

### **6.2.1 Lufttemperaturen**

Mätning av lufttemperaturen bör göras med givare som är skärmd från värmeutstrålning från omgivande ytor. Om luften är tämligen stillastående, d.v.s. luftförelserna i huvudsak bestäms av konvektion, kan lufttemperaturen variera avsevärt lokalt beroende på närhet till värmekällor. Man kan därför behöva flera givare i ett utrymme för att få fram värden på lufttemperaturen som är lämpliga att använda för bestämning av de temperaturer komponenterna utsätts för i normal drift.

### **6.2.2 Strålning från omgivande ytor**

Om komponenten är direkt exponerad för ytor i närheten som är varmare än lufttemperaturen blir komponenttemperaturen högre än den som ges av enbart lufttemperaturen. Hur mycket värmeutstrålningen påverkar komponentens temperatur beror i första hand av luftcirkulationen omkring komponenten (ju högre luftcirkulation desto mindre inflytande av värmeutstrålningen) och av värmeabsorptionskoefficienterna hos strålande och mottagande ytor. Om strålande och mottagande ytor inte är blankpolerade kan absorptionskoefficienten konservativt antas nära 1. Teoretiska beräkningar av resulterande komponenttemperatur från kännedom om lufttemperatur, luftflöden och absorptionskoefficienter samt geometri hos värmeutstrålande ytor och mottagarytor är möjliga men tämligen komplicerade och bygger på data som oftast inte fullt ut är tillgängliga eller som är osäkra.

Mätning av komponentens temperatur är oftast ett enklare och mer tillförlitligt sätt men innebär att man måste placera givare på representativa ytor hos alla intressanta komponenter som är så placerade att de utsätts för värmeutstrålning. Man kan också

tänka sig att använda någon form av globtermometer som mäter en ekvivalent temperatur som kombinerar lufttemperaturen med strålningsinverkan.

För att erhålla en lång livslängd hos åldringskänsliga komponenter är det naturligtvis bäst om man kan placera dem så att de är avskärmade från värmestrålning från omgivande ytor.

### 6.2.3 Mätning av temperatur hos värmeavgivande komponenter

Accelerationsfaktorn enligt Arrhenius formel för termisk åldring baseras vanligtvis på skillnaden mellan omgivningstemperatur under normal drift och provkammarens temperatur vid accelererad termisk åldring. För en egenuppvärmd komponent innebär detta en överskattning av accelerationsfaktorn av två skäl:

- Accelerationsfaktorn är lägre för en viss given temperaturskillnad i ett högre än ett lägre temperaturintervall.
- En egenuppvärmd komponent avger värme till omgivningen genom konvektion, strålning och ledning. Egenuppvärmningens betydelse för komponenttemperaturen avtar med ökad omgivningstemperatur. Detta innebär att skillnaden mellan omgivningstemperaturen och komponentens temperatur vid provning är lägre än vid drift

Sammantaget innebär detta att den faktiska accelerationsfaktorn som använts vid provning är lägre än den man beräknar ur Arrheniusformel om man sätter in provningstemperatur och drifttemperatur. Om man genomför artificiell åldring vid en viss omgivningstemperatur som är högre än drifttemperaturen och fastställer accelerationsfaktorn med hjälp av Arrhenius formel måste således en kompensation införas om man inte skall underskatta åldringen under drift. Detta illustreras med exemplet nedan.

#### Exempel:

En komponent har yttemperaturen 70 °C vid omgivningstemperaturen 40 °C (omgivande luft antas icke forcerat cirkulerad, enbart egenkonvektion). Om den utsätts för omgivningstemperaturen 100 °C i en kammare utan forcerad luftcirkulation blir yttemperaturen ca 124 °C (fås genom extrapolering av nomogrammet i IEC 60068-2-2, Appendix A, [6.1]). Komponenttemperaturens differens mellan accelererad termisk åldring och drift är således 54 °C medan provningstemperaturen skiljer sig 60 °C från drifttemperaturen.

Problemet löses enklast genom att man före åldringsprovningen mäter komponentens temperatur vid en provkammartemperatur som är lika med drifttemperaturen. Vid beräkning av accelerationsfaktorn används komponenttemperaturen istället för omgivningstemperaturen.

I exemplet ovan gäller, om vi använder komponenttemperaturerna för beräkning av accelerationsfaktorn, vid ett antagande om en aktiveringsenergi lika med 0,8 eV:

$$F = e^{\frac{E}{k} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]} \quad (6.1)$$

där  $T_1 = 343$ ,  $T_2 = 397$ ,  $E = 0,8$  och  $k = 0,86 \cdot 10^{-4}$ , vilket ger  $F = 40$

Om man istället skulle jämföra kammartemperaturen vid provning ( $T_2$  lika med 373) med omgivningstemperaturen under drift ( $T_1$  lika med 313) får man accelerationsfaktorn  $F = 119,2$ . Den kvalificerade livslängden överskattas således med en faktor tre.

### 6.3 Mätning av joniserande strålning

Eftersom strålningsfältet kan variera avsevärt inom reaktorinneslutningen behöver mätningar utföras i närheten av åldringskritiska komponenter, inte enbart i allmänna utrymmen. Generellt gäller att strålningsdoser av betydelse för åldringen endast förekommer för ett fåtal komponentplaceringar, normalt i en sektor på maximalt ett par meters avstånd från primärkretsar och ånggeneratorer samt i övre delen av PS. Det bör således vara tillräckligt att mäta stråldoser på sådana ställen.

Påverkan på åldringen av organiska material av aktuella flöden av termiska och snabba neutroner är försumbar jämfört med gammastrålningen.

### 6.4 Övriga miljöfaktorer, förekomst

Vibration förekommer endast undantagsvis vid normal drift. Under normal drift är den relativa fuktigheten låg, typiskt under 20%, (gäller säkerhetsklassade komponenter, vilka inte förekommer i wet-well i våra BWR). Även förekomsten av föroreningar är låg.

### 6.5 Lokalisering av hot spots

Lokalt kan förekomma miljösträngheter (temperatur, strålning, fuktighet, kemiska föroreningar, vibration) som är högre än de som gäller för normala placeringar. Kartläggning av eventuella hot spots är ett viktigt led i hantering av åldringsproblematiken. Vägledning för upptäckt och hantering av hot spots finns i en EPRI TR-109619, [6.2]. Av störst betydelse för upptäckt av hot spots är visuell inspektion av komponenter och synliga kablar i samband med revisionsavställningar (se 3.7.4.1).

### 6.6 Referenser

- [6.1] IEC 60068-2-2 Environmental Testing – Part 2: Tests. Tests B: Dry Heat
- [6.2] Electric Power Research Institute EPRI Report TR-109619 (1999) "Weinacht, R. "Guideline for the management of adverse localised equipment"

## **7 Metodik för bestämning av polymerers åldringsrelaterade egenskaper (tillståndsindikatorer)**

### **7.1 Allmänt**

Mätning av tillståndsindikatorer är användbart som ett led i hantering av åldring av komponenter, förutsatt att man kan komma åt att göra tillståndsmätningar på komponentdelar som är av betydelse för åldringen. I de fall förstörande (destructive) mätningar kan användas kan tillståndsmätningar vara aktuellt även för relativt komplexa komponenter. Icke förstörande (non-destructive) mätningar begränsas i stort sett till komponenter för vilka åldringen kan hänföras till för mätning eller mikro-sampling åtkomliga delar, vanligtvis ytan (t.ex. kablar).

### **7.2 Icke förstörande tillståndsmätningar (non-destructive)**

Identifiering och mätning av tillståndsindikatorer som är kopplade till komponenters åldring utgör en mycket väsentlig komponent i kvalificeringsarbetet enligt tidigare kapitel. Icke förstörande mätningar, d.v.s. mätningar som inte riskerar att skada komponenten, är speciellt intressanta. De kan användas vid det initiala kvalificeringsarbetet för att på en och samma komponent följa förändringarna i tillståndsindikatorns värde som funktion av tid vid accelererad termisk åldring och för tillståndsmätning på installerade komponenter utan att dessa behöver bytas ut.

Ett problem med icke förstörande mätningar är att dessa endast kan utföras på ytan av mätobjektet. Detta innebär att man endast mäter tillståndet hos yttre delar, exempelvis manteln till en kabel. Det är i huvudsak ledarisoleringens dielektriska egenskaper som avgör funktion under haveri. Mantelns tillstånd är inte nödvändigtvis representativt för ledarisoleringens tillstånd. Mantelisolering och ledarisolering är inte alltid samma material och mantelisoleringens yta är exponerad mot omgivningsatmosfären, vilket ofta innebär snabbare nedbrytning på grund av oxidation av manteln än av ledarisoleringen.

Det finns emellertid god anledning att anta att det finns en positiv korrelation mellan mantelns och ledarisoleringens degradation som följd av åldring. Om manteln vid en viss tidpunkt uppvisar ett värde på tillståndsindikatorn som indikerar en mindre degradation än den för vilken kabeln DBE-kvalificerats så kan man anta att även ledarisoleringen är i ett bättre skick än då kabeln DBE-kvalificerades. Detta är ett hållbart antagande, förutsatt att den artificiella accelererade åldringen inte innebär ett problem på grund av doshastighetseffekter och motsvarande effekter vid termisk provning (diffusionsbegränsad oxidation). Om så är fallet leder förhöjd temperatur och förhöjd doshastighet till att vi får en gradient av oxidationen från ytan till inre delar som är större vid provning än i verklig driftmiljö. De inre delarna av kabeln, d.v.s. ledarisoleringen, har degraderat längre i fält än vid provning vid ett visst värde på tillståndsindikatorn, mätt på manteln. Detta understryker vikten av att man vid provningen undviker extremt höga accelerationsfaktorer.

### **7.3 Påverkande tillståndsmätningar (destructive)**

Användning av påverkande tillståndsmätningar medger dels ett större urval av metoder, dels att man kan komma tillrätta med det gradientproblem som beskrevs i förra avsnittet. Man kan då mäta djupare i materialet, t.ex. för kablar tillståndet hos ledarisoleringen. Nackdelen är att det är mer komplicerat att få fram degradation-åldringsförloppet i samband med initial kvalificering och att det krävs utbyteskomponenter eller extra deponerade exemplar för tillståndsmätning i fält.

Vid mätning av tidsförloppet av tillståndet som funktion av åldringstid vid artificiell accelererad åldring före haverimiljöprovning kan man använda sig av ett antal extra komponentexemplar som följer med i åldringen men inte genomgår DBE-provning. Vid varje tidpunkt som skall motsvara en punkt på degradation-tid kurvan tas ett exemplar ut och används för tillståndsmätningen. Det sista extra exemplaret tas ut sedan åldringen slutförts före haverimiljöprovningen. Detta får då anses ha ett tillstånd som komponenten är kvalificerad för (förutsatt att provningen i DBE ger godkänt resultat).

Höga temperaturer kan innebära problem även genom att materialet reagerar på annat sätt över än under en viss temperatur. Detta kan inte lösas enbart med tillståndsmätning på inre materialdelar vid provning och i drift. Däremot borde det vara möjligt att helt komma förbi problemen med doshastighetseffekter om man mäter på inre delar och ersätter kvalificerad livslängd med kvalificerat tillstånd.

### **7.4 Samband mellan värden på tillståndsp parametrar före haveri och funktion under DBE**

Det är mycket tunt med systematiska studier om relationer mellan grad av degradation, mätt med någon tillståndsindikator, och beteende (exempelvis isolationsvärden) vid DBE. Våra egna undersökningar, redovisade i SKI Report 97:40 [7.1] är de enda publicerade som vi känner till. Dessa uppvisar en skiftande bild, men det finns en positiv korrelation i varje fall för en del av de metoder som beskrivs nedan.

Det är av betydande värde om en sådan korrelation finns, eftersom man då kan extrapolera mätresultaten. Det är dock inte en förutsättning att en sådan korrelation finns för att man skall kunna använda tillståndsmätning som kontroll av att komponenten vid ett visst tillfälle inte åldrats utöver dess tillstånd vid kvalificeringen i DBE-prov. Det är tillräckligt att tillståndsvärdet är korrelerat till åldringsgraden, vilket kan förutsättas gälla för de tillståndsindikatorer som redovisas nedan.

En viktig egenskap hos en praktiskt användbar tillståndsindikator är att den visar en degradationstrend som förändras successivt. Indikering av trender som inte förändras under lång tid för att sedan genomgå en plötslig, drastisk förändring är inte användbara för fältmätningar. De medger inte att man från en viss marginal till det värde som komponenten kvalificerats för genom haverimiljöprov, indikerad vid ett

visst mättillfälle, kan visa att komponenten klarar sin funktion om ett haveri skulle inträffa före nästa mättillfälle (exempelvis före nästa revision).

### **7.5 Tillståndsindikatorer som kan komma till användning i samband med kvalificering för och kontroll av åldring**

Under senare år har hos oss och andra bedrivits omfattande studier och praktiska prov med ett stort antal tillståndsindikatorer. De som vi funnit av störst intresse beskrivs nedan. Tillståndsindikatorerna kan klassificeras enligt följande.

- Kemiska indikatorer – mikrokalorimetri, DSC-OIT (Differential Scanning – Oxidation Induction Time), TGA-OIT (Thermogravimetric – Oxidation Induction Time), IR (Infrared Spectrometry);
- Mekaniska indikatorer – brottöjning, indenter, mikrohårdhet;
- Dielektriska indikatorer – isolationsresistans, dielektrisk förlustfaktor, etc.;
- Elektriska indikatorer – TDR (Time Domain Reflectometry), FDR (Frequency Domain Reflectometry), LIRA (Line Resonance Analysis);
- Optiska fiberindikatorer – OTDR (Optical Time Domain Reflectometry).

Internationella gemensamma IEC/IEEE standarder finns tillgängliga eller är under framtagning för några av metoderna ([7.2] – [7.6]). Annex B innehåller en beskrivning av elektriska indikatorer.

### **7.6 Sammanfattning av metodernas tillämpbarhet**

Tabell 7.1 och 7.2 sammanfattar de viktigaste egenskaperna hos tillståndsindikatorer och deras användbarhet.



Tabell 7.1 Egenskaper hos tillståndsindikatorer

Metod	Förstörande metod?	Provtagning eller provnings svårighet	Provning med komp i drift	Tillförlitlighet	Lämplig vid tillstånds-kontroll?	Anmärkning
Mikro-kalorimetri	Ja. 1-2gram material behövs	Medel	Nej	Mycket god	Icke lämplig - dyr	Kan genom sin känslighet användas för material som andra metoder inte klarar
DSC-OIT	Nej. 10mg material behövs	Enkel	Nej	Mycket god	Mycket lämplig	Beprövad metod
Termo-gravimetri	Nej. 10mg material behövs	Enkel	Nej	God	Lämplig	DSC-OIT är bättre
Brottöjning	Ja	Medel	Nej	Mycket god	Mycket lämplig	Beprövad industri standard
Indenter	Nej	Enkel	Ja	Mycket god	Mycket lämplig	Beprövad metod. Inte polyolefiner. Portabel
Mirohårdhet	Ja	Medel	Nej	Mycket god	Lämplig	Bra på mindre eller komplexa komponenter
Dielekt.spek-troskopi	Nej	Svår	Ja	Medel	Icke lämplig	Portabel
Isolations-resistans.	Nej	Enkel	Ja	God	Mätning vid förhöjd temp kan användas	Används metoden för mätning vid förhöjd temp krävs provning på demonterad komponent
Nära IR	Nej	Enkel	Ja	Mycket god	Icke lämplig - under utveckling	Portabel. Erfarenhet saknas
Strömanalys	Nej	Svår	Nej	Låg	Icke lämplig	Svårtolkat resultat
Vridning	Ja	Svår	Nej	Mycket låg	Icke lämplig	
Bobbinprov	Ja	Enkel	Nej	Låg	Icke lämplig	Ger endast godkänd/icke godkänd
LIRA	Nej	Enkel	Nej	Låg för bestämning av global degradation	Metoden fortfarande under utveckling	God känslighet som möjliggör att kartlägga hot spots och lokala skillnader
FDR/TDR	Nej	Enkel	Nej	Låg för bestämning av global degradation	Nya analysverktyg öppnar nya användningsfält	God känslighet som möjliggör att kartlägga hot spots och lokala skillnader
IR	Ja	Enkel	Nej	Mycket god	Lämplig	Beprövad metod. Kräver kemisk analys under hela den artificiella åldringen
OTDR	Nej	Medium	Nej	God	Begränsad till optiska kablar	God känslighet som möjliggör att kartlägga hot spots och lokala skillnader

Tabell 7.2. Tillståndsindikatorers användbarhet (korrelation mellan mätvärde och graden av exponering för åldringpåverkande miljöfaktorer) för olika material

Material	Mikro-kalorimetri	OIT	Brottöjning	Mikrohårdhet	Dielektrisk spektroskopi	Indenter
EPDM	God korrelation	Mycket god korrelation*	Mycket god korrelation*	Okänt	God korrelation	Mycket god korrelation
XLPE	Okänt	Mycket god korrelation*	Svag till god korrelation	Låg korrelation	God korrelation	Svag korrelation
CSPE	Mycket god korrelation*	Kan användas om materialet innehåller antioxidanter eller vissa andra stabilisatorer.	God korrelation	God korrelation	Okänt	Mycket god korrelation
EPR	Okänt	Mycket god korrelation	Mycket god korrelation	Okänt	Okänt	Mycket god korrelation
EVA	God korrelation	God korrelation	God korrelation	Okänt	Okänt	Mycket god korrelation
SIR	Okänt	God korrelation	God korrelation	Mycket god korrelation. Speciellt lämplig för mycket små komp.*	Okänt	Mycket god korrelation
PEEK	Okänt	Okänt	God korrelation *	Okänt	Okänt	Okänt
PI	Okänt	Okänt	God korrelation	God korrelation	Okänt	Okänt
Viton	Okänt	Måttlig korrelation (Beror på Vitontypen)	God korrelation	Mycket god korrelation	Okänt	God korrelation
PVC	Okänt	God korrelation	God korrelation	Okänt	Okänt	God korrelation

\* Tydliga resultat från arbeten genomförda inom Westinghouse.

Utöver de egenskaper som redovisas i tabellen är det av intresse om man kan ange ett gränsvärde på en tillståndsindikator som erfarenhetsmässigt innebär att komponenten är funktionsduglig så länge gränsvärdet inte överskrids. Sådana gränsvärden förekommer ofta för brottöjning. I våra studier av åldringens inverkan på brottöjning har vi genomgående relaterat till kvoten mellan brottöjning för åldrat och icke åldrat material,  $e/e_0$ . För flertalet isolermaterial anger de flesta källor att materialet kan anses acceptabelt om  $e/e_0$  överskrider 0,5. En del källor anger 0,2 som acceptabelt värde. Det finns emellertid inga omfattande undersökningar som kopplar dessa värden till beteende under DBE-simulering.

I [7.1] visas att ett typiskt värde på kvoten mellan indentermodul för åldrat och icke åldrat material,  $M/M_0$ , motsvarande  $e/e_0$  lika med 0,5, är  $M/M_0 = 1,5$ . Typiskt värde motsvarande  $e/e_0$  lika med 0,2 är  $M/M_0 = 2,5$ . Dessa värden kan med ungefär samma fog användas som gränsvärden. Gränsvärden av detta slag kan ha ett intresse vid en första kontroll men bör inte ersätta provning som inkluderar DBE-simulering.

## 7.7 Referenser

[7.1] Spång, K. "Ageing of electrical components in nuclear power plants; Relationships between mechanical and chemical degradation after artificial ageing and dielectric behaviour during LOCA", SKI Report 97:40, October 1997.

[7.2] IEC/IEEE 62582-1, Nuclear Power Plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 1: General

[7.3] IEC/IEEE 62582-2, Nuclear Power Plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 2: Indenter modulus

[7.4] IEC/IEEE 62582-2, Nuclear Power Plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 3: Elongation at break

[7.5] IEC/IEEE 62582-2, Nuclear Power Plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 4: Oxidation induction techniques

[7.6] IEC/IEEE 62582-2, Nuclear Power Plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 5: Optical time domain reflectometry

## 8 Slutsatser

Denna rapport ger underlag och verktyg för val av strategier och program samt en del data av betydelse för bestämning av kvalificerad livslängd från typprovning och för val av tillståndsindikatorer i den uppföljande kvalificeringen.

Program för kvalificering av åldringskänsliga komponenter i kärnkraftverk som skall klara att i slutet av sin installerade tid fungera under haveri kan erfordra att initial kvalificering med accelererad åldring följt av DBE-provning kombineras med uppföljande aktiviteter efter installation. Det är en i forskningskretsar inom området vedertagen uppfattning att enbart initial kvalificering endast kan garantera en begränsad livslängd, som oftast är kortare än den avsedda installerade livstiden. Metoder för uppföljande kvalificering har gått omsorgsfullt igenom och beskrivits i en rapport från IAEA's expertgrupp för hantering av åldring av kablar i kärnkraftverk.

Det finns idag ett tillfredsställande underlag i form av forskningsresultat för att man skall kunna utforma fungerande strategier och kompletta program för hänsynstagande till åldring under installerad tid vid anskaffning och installation av nya komponenter. De metoder för uppföljande kvalificering efter installation som utvecklats kan även användas för att uppdatera och komplettera kvalificeringen av sedan en längre tid i drift varande komponenter, förutsatt tillgänglighet av komponenter som kan ersätta

exemplar som tas ut för provning. Utvecklingen av sådana metoder har utgjort ett viktigt inslag i arbetet med förlängning av kvalificerad livslängd.

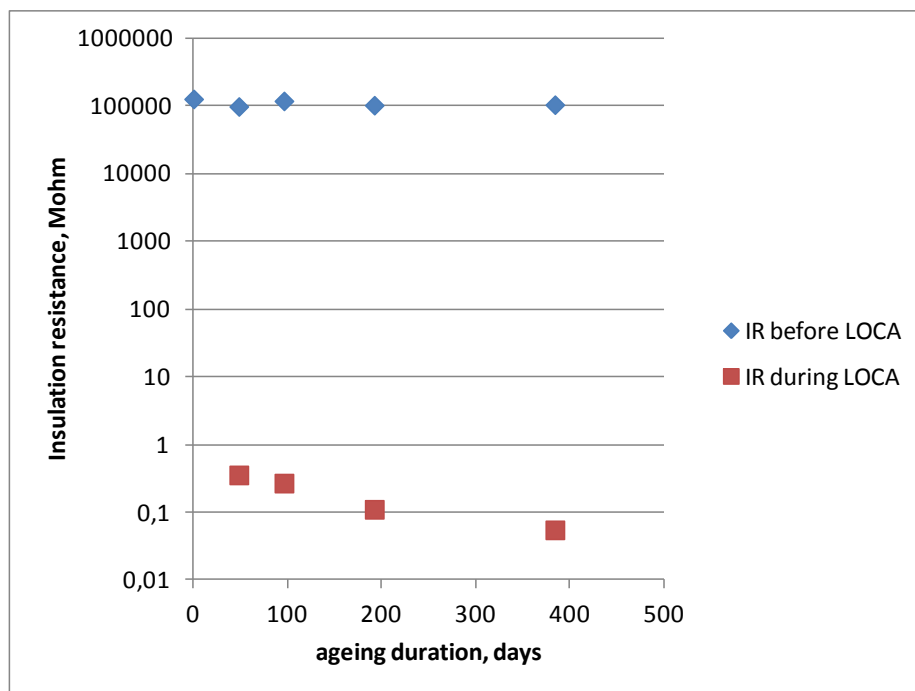
## Annex A

### Ett exempel på relationen mellan isolationsresistans hos termiskt åldrade kablar före och efter LOCA

Figur A1 visar resultatet av en studie av resistansen hos ledarisolering i termiskt och strålningsmässigt åldrade Lipalon-kablar (CSPE) före och under LOCA, genomförd 1996-97. Den utgör en del av de studier som presenterats i SKI rapport 97:40 i oktober 1997. Kablarna utsattes för termisk åldring genom exponering för 95 °C under 48, 96, 192 och 384 dygn, följt av joniserande strålning under 50 h med doshastighet 10 kGy/h, vilken inkluderade förväntad stråldos under en LOCA. De blå punkterna visar isolationsresistansen mätt efter termisk åldring och strålning men före exponering i LOCA-kammaren. De röda punkterna visar de lägsta värdena hos isolationsresistansen uppmätta under exponeringen i LOCA-kammaren.

Resultaten visar att den termiska åldringen inte hade någon märkbar inverkan på den isolationsresistans som uppmättes före exponeringen i LOCA-kammaren men den hade en mycket signifikant effekt på isolationsresistansen mätt under LOCA (från 356 kΩ för kablar som hade exponerats för 95 °C under 48 dagar till 55 kΩ för kablar som hade exponerats för 95 °C under 385 dygn).

Exemplet illustrerar att åldring av en kabel kan ha betydelse för dess funktion under LOCA även om funktionsförmågan under normala förhållanden inte påverkats av åldringen.



Figur A.1. Isolationsresistans hos termiskt och strålningsmässigt åldrad ledarisolering före och under exponering i LOCA-kammare

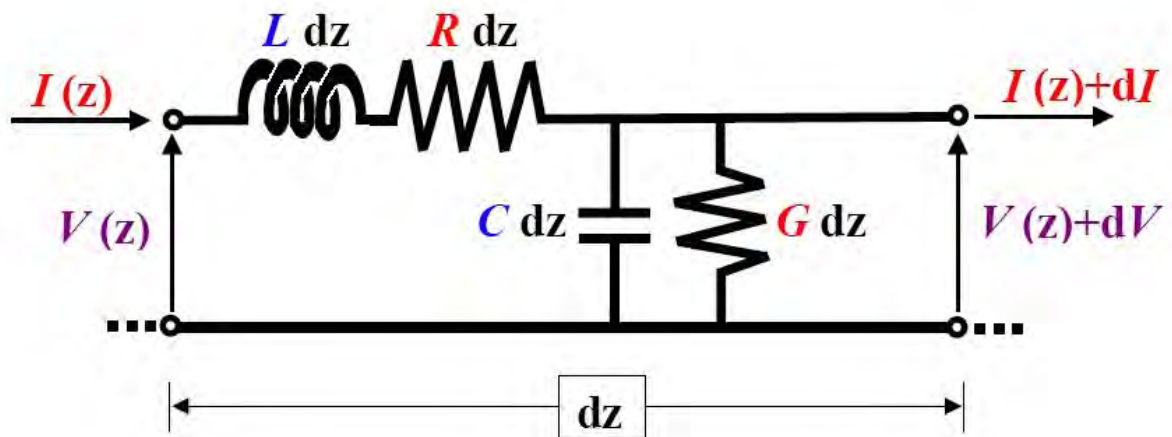
## Annex B

### Kortfattad beskrivning av elektriska metoder och IR för tillståndsmätning

#### **B.1. Line Resonance Analysis (LIRA)**

Metoden baseras på transmissionslinjeteori som används för undersökning av en kabels egenskaper. Transmissionslinjen är länken mellan en signalkälla och en last. Transmissionslinjens beteende beror av dess längd i jämförelse med våglängden  $\lambda$  hos den elektriska signal som går fram genom den. När en högfrekvent bruskälla används är upplösningen över kabelns längd bättre än om en lågfrekvent bruskälla används. Den typiska upplösningen vid användning av en källa som ger ett brus kring 100 MHz, exempelvis  $2 \times 10^8$  datapunkter per s, är 3 m. Upplösningen är även beroende av signalhastigheten i kabeln.

LIRA-mjukvaran är konstruerad att undersöka beteendet hos en transmissionslinje vid höga frekvenser. En transmissionsekvivalent krets illustreras i figur B.1.



Figur B.1. Ekvivalent transmissionskrets (LIRA)

Förändringar i dielektriska egenskaper hos isolermaterial, exempelvis ledarisolering, fyllnadsmaterial och mantel kan upptäckas efter beräkningar som utförs av systemets mjukvara. Systemet kan upptäcka degradering i isoleringen på grund av värme, böjning, repor, annan mekanisk åverkan, utmattning, korrosion, vatteninträning, vattenträd, etc. Ändringar hos kabelanslutningar och kabelskarvar kan även upptäckas. Känsligheten är relativt god för upptäckt av lokala avvikelser och inverkan av placering i "hot spots". Förmågan att upptäcka global degradering och bestämning av kabelns kvalificerade livslängd eller kvalificerade tillstånd beror i hög grad av tillgänglighet till baslinjedata. Två olika ekvationer för beräkning av globalt tillstånd används.

A. – CBAC2 beräknas genom uppskattning (användning av frekvensanalys) av:

1. Högfrekvensattenuering (analys av 3:e övertonen)
2. Kabelns karaktäristiska impedans  $Z_0$
3. Signalens fashastighet VR

B – CBAC är Central Band Attenuation for Capacitance

Kabelns degradering kan för en del kabelkonstruktioner upptäckas genom mätning och beräkning av dämpning av bredbandigt brus i kabeln. Ekvationen är

$$\alpha(\text{dB} / \text{km}) = Kf^\alpha \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{B.1})$$

Där  $K$  är en konstant som beror av kabelns konstruktion och geometri och baseras på likströms-motståndet.  $f$  är frekvensen hos signalen och exponenten  $\alpha$  är ett yteffektvärde mellan 0,5 och 1.

### **B.2. Time Domain Relectometry (TDR)**

Metoden baseras på en impulssignal som injekteras i en kabel. Tiden till reflexioner från pulsen eller delar av pulsen mäts. Storleken hos reflexionerna beror av den lokala impedansen och små ändringar kan upptäckas. Egenskaper såsom ståendevågvot, impedanskvoter, förluster hos återvändande puls, reflexionskoefficienter, förluster i impedans, likformighet hos impedans för den återvändande pulsen, och position hos fel kan uppmätas och beräknas. Detta gör metoden lämplig för att finna förändringar eller diskontinuiteter hos kabeln från ursprungligt tillstånd vid installation till motsvarande tillstånd eller diskontinuiteter efter en tid i drift.

Genom att jämföra plottade baslinjedata (fingeravtryck) med motsvarande aktuella data kan förändringar i egenskaper identifieras. Metoden fordrar två eller flera ledare eller en eller flera ledare plus skärm, armering eller motsvarande. Provobjektet måste lossas i en ände och strömtillförseln avbrytas innan TDR-instrumentet ansluts. Metoden är användbar för felsökning och lokalisering av defekter hos kablar. Korroderade kopplingar, lösa kopplingar, kabelskarvar och kabelbölder kan upptäckas.

Metoden har inte varit framgångsrik för mätning av degradering av kablar med lång installationstid. Metoden kan emellertid betraktas som en kompletterande metod för tillståndsmätning av kabelsystem, speciellt när signaturdata eller fingeravtryck har tagits fram när kabel och kopplingar etc. kvalificerats.

### **B.3. Frequency Domain Reflectometry (FDR)**

Metoden baseras på injektion av bredbandigt brus eller en frekvenssvept sinussignal i kabeln. Metoden är mycket lik TDR och provobjektet måste ha minst två ledare eller en ledare och en skärm. Kabeln måste lossas och strömtillförseln avbrytas när mätningen genomförs. Istället för att injektera pulser i kabeln används vitt bredbandigt brus eller sinussvep. Responsen (impedansen)

presenteras i frekvensdomänen efter signalbehandling såsom med fouriertransformering.

Mätningarna kan genomföras med hjälp av en VNA (Vector Network Analyzer). FDR metoden har modifierats och utvecklats. Denna utveckling har lett fram till metoder såsom STDR (Sequence Time Domain Reflectometry), baserade på injektion av pseudo-random brus i en kabel och korrelationsanalys av signalen för att lokalisera olikformighet i de elektriska egenskaperna hos kabeln. En liknande metod är JTFDR (Joint Time Frequency Domain Reflectometry).

Alla varianter av metoden kan användas för att identifiera och lokalisera avvikande punkter i kabelns impedans. Grundläggande krav för sampling, anti aliasing och filtrering måste tas i beaktande vid analys av responssignalen. Metoden har på samma sätt som TDR inte visats vara framgångsrik för mätning av degradering av installerade kablar. Metoden är i allmänhet mer tillförlitlig för att identifiera avstånd till felställen. Fel eller defekter som detekteras kan exempelvis vara korroderade kontakter, lösa kontakter, skarvar och kabelskador. Metoden är under utveckling och framsteg har rapporterats.

#### **B.4. Infrared spectroscopy (IR)**

Infraröd spektroskopi är en gemensam benämning för ett antal metoder för undersökning av polymerers innehåll. Metoden kan baseras på reflexion, transmission, absorption etc. De optiska egenskaperna hos grundläggande material, tillståndet hos materialet och alla additiver samt mängden av dessa analyseras med metoden och ett IR-spektrum genereras. Formen på spektrum med toppar och dalar är karaktäristisk för innehållet i det prov som analyseras. Metoden är väl etablerad för identifiering av polymerer och kan användas för att bestämma materialens degradering. De spektrum som används för analyserna är inom området från omkring  $12000 \text{ cm}^{-1}$  till  $50 \text{ cm}^{-1}$ . En del metoder kan genomföras med mycket små samples (i mg-området) och kan därför betraktas som icke-förstörande. Metoden kan användas för tillståndskontroll av flera polymerer om baslinjedata tagits fram i samband med kvalificeringen.







2013:10s

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

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

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 250 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

**Strålsäkerhetsmyndigheten**  
**Swedish Radiation Safety Authority**

SE-171 16 Stockholm  
Solna strandväg 96

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

**E-mail:** [registrator@ssm.se](mailto:registrator@ssm.se)  
**Web:** [stralsakerhetsmyndigheten.se](http://stralsakerhetsmyndigheten.se)