



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare:

Peter Dillström

Forskning

2009:26

Tillämpning av stabil spricktillväxt
vid brottmekanisk bedömning av
defekter i sega material

Titel: Tillämpning av stabil spricktillväxt vid brottmekanisk bedömning av defekter i sega material.
Rapportnummer: 2009:26
Redaktörer: Peter Dillström.
Inspecta Technology AB, Stockholm, Sweden
Datum: Juni 2009

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) och svensk kärnkraftsindustri. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Bakgrund

Vid brottmekaniska analyser studeras i huvudsak haverimekanismerna sprött brott och plastisk kollaps samt kombinationen av dessa. Den styrande mekanismen bestäms av komponentens materialegenskaper, styrande belastning och defektens geometri. Proceduren enligt SKI-rapport 99:49 är idag en av de mest använda metoderna vid brottmekaniska analyser. Proceduren som baseras på den s.k. R6-metoden innehåller även ett deterministiskt säkerhetsvärderingssystem för att erhålla säkerhetsmarginaler mot sprött brott och plastisk kollaps som de man finner i ASME XI och ASME III.

I systemet jämföras initiering av spricktillväxt med instabilt brott. Detta antagande har nu under en längre tid ansetts vara alltför konservativt när det gäller material med segt beteende. Frågan kring möjligheten att tillgodoräkna sig ett visst mått av stabil spricktillväxt har aktualiserat sig i samband med behandling av vissa tillståndsärenden.

Arbetet initierades av Statens kärnkraftinspektion (SKI).

Syfte

Syftet med projektet var att ge en allsidig belysning i denna fråga samt presentera en analysstrategi, baserat på R6-metoden, som tar hänsyn till stabil spricktillväxt. Här skulle bl.a. göras jämförelser mellan hur olika metoder/standarder analyserar defekter i sega material samt ta fram kriterier för bedömning av de materialdata som krävs vid analyser med hänsyn till stabil spricktillväxt.

Resultat

Arbetet har resulterat i följande:

- R6-metoden ger möjlighet att tillgodoräkna sig viss stabil spricktillväxt via val av s.k. analyskategori.
- British Standard BS 7910:1999 och ASME XI Code Case N-494 utgår ifrån den metodik som beskrivs i R6-dokumentet och medger således användning av stabil spricktillväxt. ASME Code Case N-494 är tillämbart för både rostfria och ferritiska rör. Båda dessa standarder förutsätter att man har tillgång till relevanta och giltiga materialdata.
- Enligt ASME XI, IWB-3640, App. C (1998), som behandlar analys av rostfria rör kan tillgodoräknas stabil spricktillväxt upp till c:a 10 mm.

- Enligt ASME XI, IWB-3650, App. H (1998), kan man tillgodoräkna sig stabil spricktillväxt även för ferritiska rör, som är tillräckligt sega.
- Förslag till kriterier om hur man skall ta fram relevanta och giltiga materialdata i form av brottseghet KIC/JIC och JR-curvor att använda vid analys av stabil spricktillväxt.

Effekter på SSM:s tillsynsarbete

Resultaten av detta projekt ligger till grund för de rekommendationer som gäller för stabil spricktillväxt i SSM:s utredningsrapport "Analys av driftinducerade skador i svenska kärntekniska anläggningar" (SSM 2008/232).

Projektinformation

SSM:s projekthandläggare: Kostas Xanthopoulos

Projektnummer: 14.42-011210/02094.

Projektorganisation: Arbetet har utförts av Inspecta Technology AB.

Projektledare var Peter Dillström.

SAMMANFATTNING

Denna rapport går igenom använda metoder / standarder där man tillgodoräknar sig stabil (J -kontrollerad) spricktillväxt. Vi har påvisat följande:

- ASME XI, App. C och App. H, som behandlar analys av rostfria och ferritiska rörsystem, tar hänsyn till stabil tillväxt. I App. C, motsvarar detta att man inkluderar stabil tillväxt upp till $\Delta a \approx 10$ mm.
- R6-metoden, BS 7910:1999 samt ASME XI, Code Case N-494, innehåller en vedertagen formalism för att ta hänsyn till stabil tillväxt. En förutsättning är att man har tillgång till relevanta och giltiga materialdata i form av brottseghet K_{Ic} / J_{Ic} och J_r -kurvor.
- Samtliga ovan nämnda metoder / standarder är tillämpliga i kärnkraftssammanhang.

Vi redovisar även vad som krävs för att ta fram relevanta och giltiga data (brottseghet K_{Ic} / J_{Ic} och J_r -kurvor) att använda vid analys av stabil tillväxt.

I denna rapport anges inte hur mycket stabil spricktillväxt som kan tillgodoräknas vid en säkerhetsvärdering. Rekommendationer rörande detta kommer att utarbetas av SKI.

Innehållsförteckning	Sida
1. INLEDNING	5
2. EXEMPEL SOM BELYSER AKTUELL PROBLEMATIK	6
2.1 Indata - Geometri	6
2.2 Indata - Belastningar	7
2.3 Indata - Materialdata	8
2.4 Resultat - R6-metoden.....	8
2.5 Resultat - ASME XI, IWB 3640, App. C.....	9
2.6 Resultatsammanfattning	9
3. GENOMGÅNG AV HUR OLIKA METODER HANTERAR STABIL TILLVÄXT	10
3.1 R6 – Revision 3	11
3.1.1 Val av R6-kurva / Failure Assessment Diagram	13
3.1.2 Val av analyskategori.....	14
3.2 SINTAP / R6 – Revision 4	17
3.2.1 Reviderade R6-kurvor / Nya analysoptioner.....	17
3.2.2 Analyskategori försvinner / Inför initiering eller stabil tillväxt	20
3.3 Den svenska R6-proceduren med tillhörande program SACC / ProSACC	21
4. GENOMGÅNG AV HUR OLIKA NORMER OCH STANDARDER HANTERAR STABIL TILLVÄXT.....	22
4.1 British Standard BS 7910:1999	22
4.1.1 Att tänka på vid analys av stabil tillväxt	23
4.2 ASME XI – Rostfria rör	25
4.2.1 Z-faktorer, ett sätt att ta hänsyn till stabil tillväxt.....	26
4.3 ASME XI – Ferritiska rör.....	28
4.4 ASME XI – Code Case N-494	28
4.5 ASME XI – Vad är på gång?.....	29
5. BROTTSEGHETSPROVNING AV SEGA MATERIAL.....	31
5.1 Linjär brottseghetsprovning.....	31
5.2 Olinjär brottseghetsprovning	32
5.3 Tillämpningsexempel - Brottseghet för Inconel 182	33
5.3.1 J_{Ic} -värden för Inconel 182 vid 190° C.....	35
5.3.2 J_I -kurvor för Inconel 182 vid 190° C	35
6. SLUTSATSER	37
7. ERKÄNNANDE.....	38
8. REVISIONSFÖRTECKNING.....	39

1. INLEDNING

Vid skadetålighetsanalyser av komponenter med defekter (eller där det postuleras närvaron av defekter) studeras i huvudsak haverimekanismerna sprött brott och plastisk kollaps. Genom att använda moderna beräkningsmetoder (exempelvis R6-metoden [1]) kan man även ta hänsyn till blandformer mellan ovan nämnda mekanismer.

Styrande haverimekanism bestäms av komponentens materialegenskaper (brottseghet, sträck- och brottgräns), styrande belastning (inre tryck, termisk expansion, termiska transienter, svetsegenspänningar etc.) samt komponentens och defektens geometri. En uppdelning med avseende på aktuellt material kan se ut på följande sätt:

- Sprött brott är aktuellt för ferritiska material som arbetar i undre plåtområdet eller i transitionsområdet mellan sprött och segt beteende.
- Plastisk kollaps är exempelvis aktuellt för rena rostfria stål och nickelbaslegeringar. Det är också relevant för sega svetsar i dessa material.
- Blandformer mellan sprött brott och plastisk kollaps är exempelvis aktuellt för ferritiska material som arbetar i det övre plåtområdet samt för vissa typer av svetsar utförda i rostfritt stål eller en nickelbaslegering.

R6-metoden [1] är idag en av de mest använda metoderna för skadetålighetsanalyser av defekter i svenska kärnkraftsanläggningar. En stor fördel med metoden är att den beaktar alla ovan nämnda haverimekanismer. I Sverige har vi infört en egen procedur [2] för skadetålighetsanalyser. Proceduren, som baseras på R6-metoden, innehåller även ett deterministiskt säkerhetsvärderingssystem [3] för att erhålla samma säkerhetsmarginaler mot sprött brott och plastisk kollaps som de man finner i ASME III och ASME XI [4].

Ovan nämnda deterministiska säkerhetsvärderingssystem anger samma säkerhetsmarginal mot brott för både primära och sekundära belastningar. Detta är relevant för material med ett sprött brottbeteende, men kan bli kraftigt överkonservativt för material med ett segt beteende. Syftet med denna rapport är att beskriva varför denna överkonservatism uppstår, samt att gå igenom hur man utför en skadetålighetsanalys som tar hänsyn till ett materials verkliga beteende. Speciellt beaktar vi hur analyser genomförs där man tillgodoräknar sig stabil (*J*-kontrollerad) spricktillväxt, som mer realistiskt tar hänsyn till brottbeteendet hos duktila material.

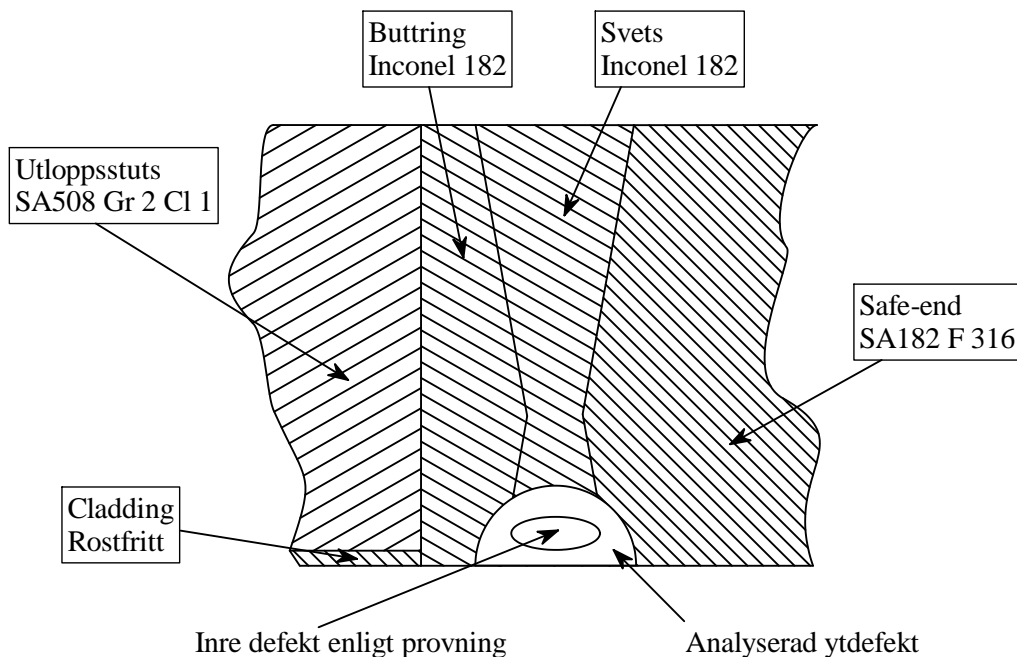
2. EXEMPEL SOM BELYSER AKTUELL PROBLEMATIK

För att belysa det problem som beskrivs i inledningen, väljer vi att betrakta genomförda skadetålighetsanalyser av axiella defekter i svetsen mellan utloppsstuts och safe-end i Ringhals 3 [5].

2.1 Indata - Geometri

I Ringhals 3 var det frågan om inre defekter med det bedömda djupet 4-6 mm och längden 16 mm. Dessa omkaraktiserades som ytgående vid skadetålighetsanalysen (med $a = 13,5$ mm och $l = 29,0$ mm), vilket schematiskt framgår av figur 2.1. Vid provningen ansågs defekterna vara helt inneslutna i svetsen, vilket också är rimligt med hänsyn till aktuell tillväxtmekanism (PWSCC, dvs. spänningsskorrosionstillväxt).

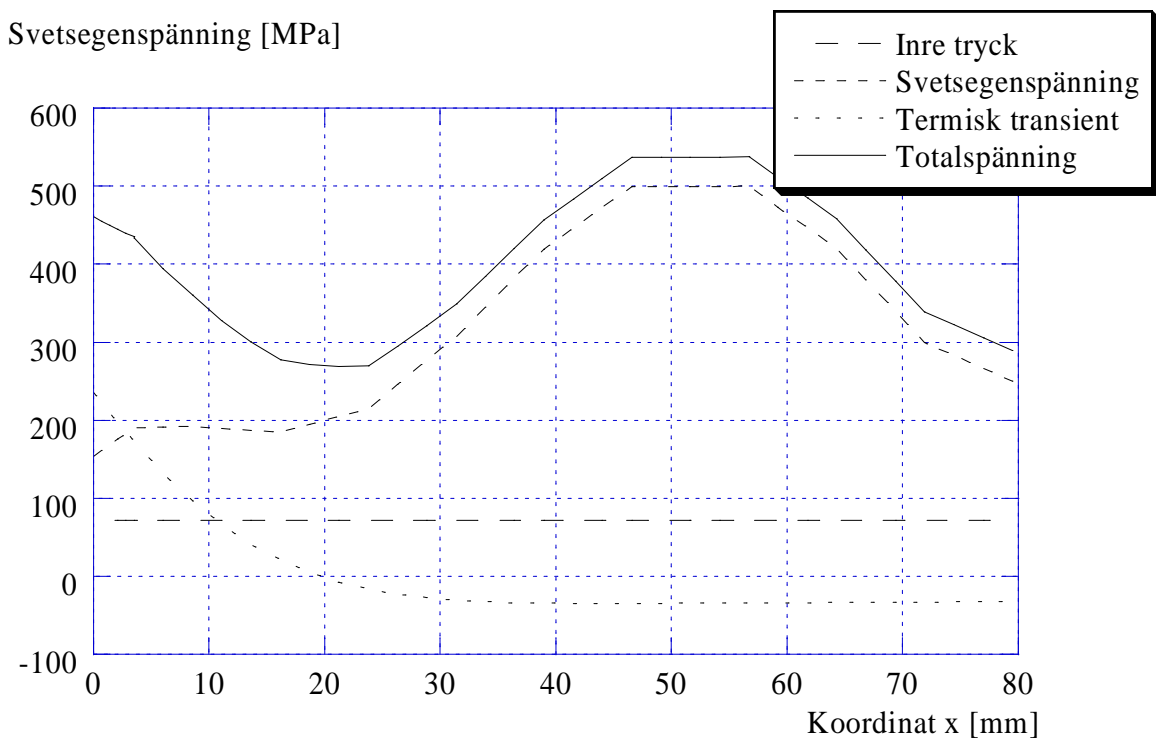
Utloppsstutsen är tillverkad av ett ferritiskt material (med ett rostfritt claddingskikt), safe-end är rostfri och svetsen (inklusive buttring) är utförd i Inconel 182. Även detta framgår av figur 2.1.



Figur 2.1. Defektantagande för skadetålighetsanalysen.

2.2 Indata - Belastningar

Styrande lastfall, gällande för skadetålighetsanalyser, är en kombination av inre tryck, en termisk transient (Loss of Flow) samt svetssegenspänningar [5]. Spänningar p g a dessa belastningar återfinns i figur 2.2 (tagna i centrum av Inconel-svetsen).



Figur 2.2. Spänningar genom godstjockleken (i centrum av Inconel-svetsen).

Figur 2.2 visar följande:

- Att de primära spänningarna från det inre trycket är relativt låga (72 MPa).
- Att den termiska transienten ger en maxspänning på insidan (235 MPa).
- Att svetsgenspänningarna är höga, speciellt en bit in i godset (max 500 MPa).
- Att totalspänningen är hög överallt. På insidan erhålls 461 MPa, på utsidan 289 MPa (max 538 MPa och min 269 MPa).

2.3 Indata - Materialdata

Svetsen och buttringen är utförd i Inconel 182, som är ett mycket segt och defekttåligt material. Vid skadetålighetsanalysen [5] antogs följande materialdata:

- Sträckgränsen varierade mellan 310 MPa (vid rumstemperatur) och 260 MPa (vid driftstemperatur).
- Brottgränsen var konstant lika med 550 MPa.
- Flytgränsen $\sigma_f = 3,0 \cdot S_m = \{I \text{ detta fall}\} = 3,0 \cdot (\sigma_U / 3,0) = 550 \text{ MPa}$. Observera att detta inte gäller generellt.
- Brottseghetsdata anges från en studie på KTH [5-6], där svetsar i Inconel 182 erhåller följande värde vid driftstemperatur ($K_{Ic} = 285 \text{ MPa}$). I samma studie redovisas seghetsvärden motsvarande 2 mm stabil tillväxt ($K_{2mm} = 411 \text{ MPa}\sqrt{m}$).

2.4 Resultat - R6-metoden

Analys av tillåtna och kritiska defektstorlekar, utfördes med hjälp av programmet SACC 4.0 Rev 6 [7]. Analyserna utgick från R6-metoden [1] modifierat med ett deterministiskt säkerhetsvärderingsystem enligt ovan angiven procedur [2]. Detta motsvarar en säkerhetsfaktor mot sprött brott $SF_K = 3,16$ samt en säkerhetsfaktor mot plastisk kollaps $SF_L = 3,0$.

Med spänningar enligt avsnitt 2.2, erhöles följande resultat för den analyserade defekten med $a = 13,5 \text{ mm}$ och $l = 29,0 \text{ mm}$ [5]. Vi har här utgått från $K_{Ic} = 285 \text{ MPa}\sqrt{m}$:

- Kontroll av plastisk kollaps. $L_r^{\max} = \sigma_f / \sigma_Y = 550/260 = 2,115$, med en säkerhetsfaktor SF_L på 3,0 erhålls $L_r^{\text{accept}} = 2,115/3,0 = 0,705$. Detta skall jämföras med pålagt $L_r = 0,283$, vilket alltså motsvarar en säkerhetsmarginal på $2,115/0,283 = 7,5$.
- Kontroll av sprött brott (samt blandformer mellan sprött brott och plastisk kollaps).
 - I djupaste punkten erhöles $K_I^P = 10,01 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_I^S = 39,04 \text{ MPa}\sqrt{m}$ och $\rho = 0,063$, vilket gav $K_r^{\text{kritisk}} = 0,235$. Med en säkerhetsfaktor SF_K på 3,16 (läggs på ρ) erhålls $K_r^{\text{accept}} = 0,193$, detta skall jämföras med $f_{R6}^{\text{accept}} = 0,313$ (SF_K läggs på f_{R6} , där $f_{R6}^{\text{kritisk}} = 0,989$). Eftersom $K_r^{\text{accept}} < f_{R6}^{\text{accept}}$ är defekten ok, med en säkerhetsmarginal på $0,989/0,193 = 5,1$.
 - Mot fria ytan erhöles $K_I^P = 10,54 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_I^S = 54,06 \text{ MPa}\sqrt{m}$ och $\rho = 0,081$, vilket gav $K_r^{\text{kritisk}} = 0,309$. Med en säkerhetsfaktor SF_K på 3,16 erhålls $K_r^{\text{accept}} = 0,253$, detta skall jämföras med $f_{R6}^{\text{accept}} = 0,313$. Eftersom $K_r^{\text{accept}} < f_{R6}^{\text{accept}}$ är defekten ok, med en säkerhetsmarginal på $0,989/0,253 = 3,9$. Det acceptabla defektdjupet, a_{accept} , blir 22,4 mm.

Den funna defekten är alltså acceptabel, men då den anses ytbrytande skall även PWSCC-tillväxt beaktas. Med de tillväxtlagar som användes i analysen [5], erhöles en tillväxt i djupled på

17,7 mm (för en driftsäsong på 8200 timmar). Detta kräver ett acceptabelt defektdjup på 31,2 mm, vilket innebär att den funna defekten formellt ej kan godkännas för ytterligare en driftsäsong.

Det är dock uppenbart att det är de höga sekundära spänningarna som medför att den analyserade defekten inte kan tillåtas. Tar man hänsyn till viss stabil tillväxt (2 mm) ökar den tillåtna defektstorleken från 22,4 mm till 45,3 mm [5]. Denna senare analys speglar bättre materialets verkliga beteende.

2.5 Resultat - ASME XI, IWB 3640, App. C

Som ett alternativ till en R6-analys, kan man för svetsen även genomföra en analys enligt ASME XI, IWB 3640, App. C [4]. Vid denna analys behövs inte brottseghetsdata, eftersom det i princip motsvarar en gränslastanalys.

Här erhålls ett tillåtet defektdjup $a_{accept} > 59,6$ mm, som motsvarar analysbegränsningen 75 % av godstjockleken.

2.6 Resultatsammanfattning

Man anar att analysen enligt ASME XI ovan, motsvarar en R6-analys där man tillåter en viss stabil tillväxt. För att reda ut detta går vi därför i avsnitt 3 igenom R6-metoden (i original och även den svenska proceduren) samt de beräkningsmetoder som finns att tillgå i ASME XI. Vi talar om hur man kan tillämpa respektive metod, samt vilka analysantaganden och begränsningar som är relevanta i vårt fall med sega svetsar (i exemplet utförda i Inconel 182).

3. GENOMGÅNG AV HUR OLIKA METODER HANTERAR STABIL TILLVÄXT

Vid brottmekanisk bedömning av defekter, används ofta en i Sverige framtagen procedur [2] för skadetålighetsanalyser. Proceduren, som baseras på R6-metoden [1], innehåller även ett deterministiskt säkerhetsvärderingssystem [3] för att erhålla samma säkerhetsmarginaler mot sprött brott och plastisk kollaps som de man finner i ASME III och ASME XI [4].

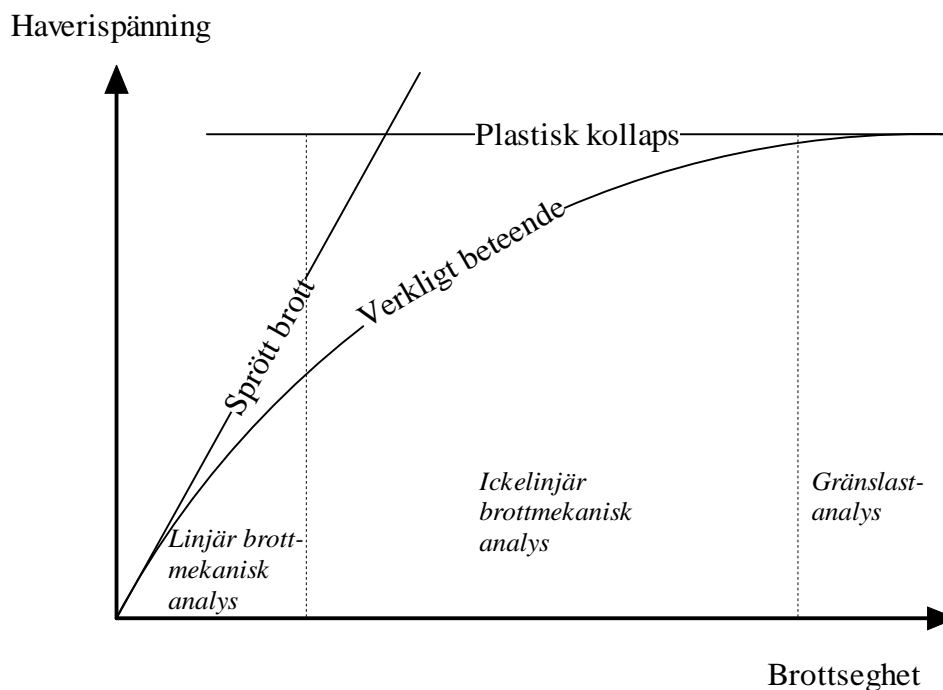
Som nämnts i inledningen och även tydliggjorts med exemplet i avsnitt 2, kan denna procedur ge kraftigt överkonservativa resultat för material med ett segt beteende. Detta beror i huvudsak på att det ingående deterministiska säkerhetsvärderingssystem anger samma säkerhetsmarginal mot brott för både primära och sekundära belastningar, samtidigt som man ej tillgodogör sig materialets verkliga beteende.

I detta och följande avsnitt beskrivs därför hur man genomför analyser där man tillgodoräknar sig stabil (*J*-kontrollerad) spricktillväxt, som mer realistiskt tar hänsyn till brottbeteendet hos duktila material. Vi går igenom följande metoder / standarder:

- Metod – R6, Revision 3 [1, 8].
- Metod – SINTAP [9] som även motsvarar den kommande R6, Revision 4.
- Metod – Den svenska R6-proceduren [2] med tillhörande program SACC/ProSACC [7].
- Standard – British Standard BS 7910:1999 [10].
- Standard – ASME XI, IWB-3640, App. C, analys av rostfria rör [4].
- Standard – ASME XI, IWB-3650, App. H, analys av ferritiska rör [4].
- Standard – ASME XI, Code Case N-494, analys av både rostfria och ferritiska rör [4].

3.1 R6 – Revision 3

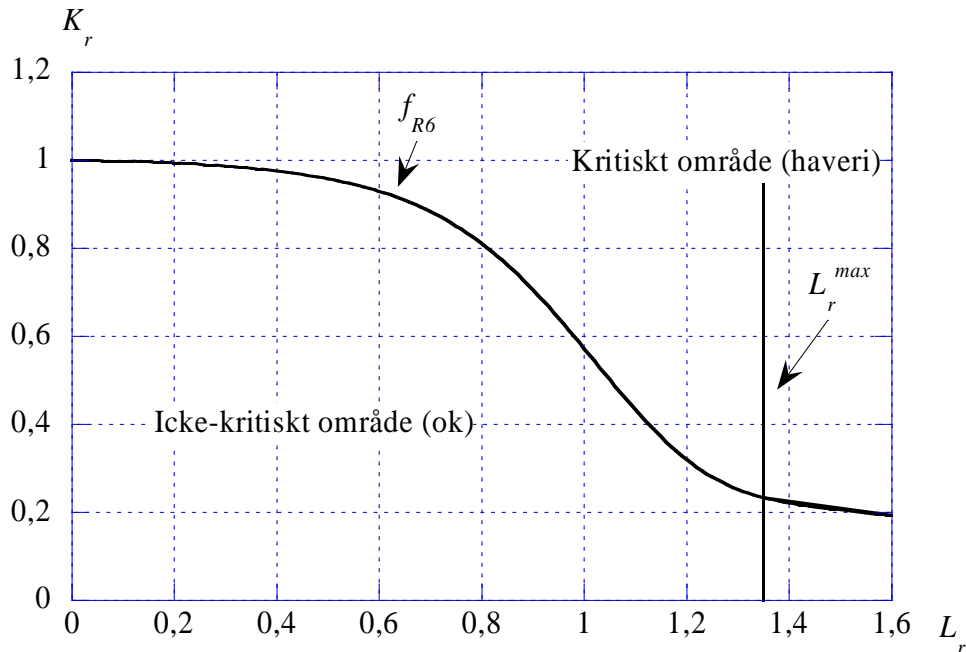
R6-metoden [1, 8] är idag en av de mest använda metoderna för skadetålighetsanalyser av defekter i svenska kärnkraftsanläggningar. En stor fördel med metoden är att den beaktar alla relevanta haverimekanismer inom en och samma procedur, dvs. sprött brott (linjär brottmekanisk analys), plastisk kollaps (gränslastanalys) samt blandformer mellan dessa (ickelinjär brottmekanisk analys). Detta framgår i figur 3.1 som anger en fiktiv haverispänning som funktion av aktuell brottseghet.



Figur 3.1. Haverispänning som funktion av aktuell brottseghet.

Ovanstående kan åskådliggöras på flera sätt, R6-metoden väljer en tvåparameterbeskrivning i form av K_r och L_r . Vidare införs begränsningar för hur stora K_r och L_r får vara vid en skadetålighetsanalys. Detta sammanfattas nedan och i figur 3.2, som anger en R6 FAD – Failure Assessment Diagram:

- K_r är förhållandet mellan pålagd spänningsintensitetsfaktor K_I och materialets brottseghet K_{Ic} .
- L_r är förhållandet mellan pålagd last och aktuell gränslast.
- Enklaste ansatsen för begränsningen i K_r -led är enligt R6-metoden en avtagande funktion i L_r -led, $K_r^{max} = f_{R6}(L_r)$. Detta beskrivs mer ingående i avsnitt 3.1.1.
- Enklaste ansatsen för begränsningen i L_r -led är enligt R6-metoden en rät linje, L_r^{max} , givet som förhållandet mellan flytgränsen och sträckgränsen. Detta beskrivs mer ingående i avsnitt 3.1.1.



Figur 3.2. R6-metoden / Failure Assessment Diagram.

Vid en skadetålighetsanalys för man sedan in punkter i form av pålagda (L_r, K_r). Ifall en punkt hamnar innanför begränsningslinjerna är den analyserade defekten tillåten för fortsatt drift i R6-metodens mening. Ifall en punkt hamnar utanför begränsningslinjerna har man ett brott (haveri) i R6-metodens mening. Detta framgår även av figur 3.2.

Ovanstående anger grunden för en analys enligt R6-metoden, här presenterad i dess enklaste och mest konservativa form. En utvidgad R6-analys anger i huvudsak två olika förändringar:

- Definitionen av begränsningslinjerna i figur 3.2 styrs framförallt av valda material- och analysantaganden. Här finns bland annat en möjlighet att ange en komplett spänningstöjningskurva (i stället för flyt- och sträckgräns). Detta beskrivs mer ingående i avsnitt 3.1.1.
- Vidare innehåller R6-metoden en möjlighet att mer realistiskt ta hänsyn till brottbeteendet hos duktila material, genom att tillgodoräkna sig viss stabil (J -kontrollerad) spricktillväxt. Detta beskrivs mer ingående i avsnitt 3.1.2.

3.1.1 Val av R6-kurva / Failure Assessment Diagram

Definitionen av begränsningslinjerna i figur 3.2 styrs framförallt av valda material- och analysantaganden. Begränsningen i K_r -led hanteras i R6-metoden genom att välja analysoption 1, 2 eller 3 enligt nedanstående definitioner.

För option 1 och 2 krävs spänningar från en elastisk analys av en defektfri komponent. För option 3 krävs både en elastisk och en elastisk-plastisk analys av en komponent, där defekten skall ingå i aktuell idealisering.

R6-FAD – Option 1

I option 1 definieras en generellt användbar kurva enligt ekvation (3.1) och som också visas i figur 3.2. Denna option kräver att man enbart känner sträckgräns (R_{eL} eller $R_{p0,2}$) och flytgräns för det aktuella materialet. Syftet med denna option är att erhålla en enkel analysmodell med en rimlig grad av konservatism.

$$K_r = (1 - 0,14L_r^2) \left[0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6) \right] \quad (3.1)$$

Option 1 kan ge mycket överkonservativa resultat för fall med ett material som uppvisar ett kraftigt hårdnande i början av spänningstöjningskurvan (då bör option 2 användas). För material som uppvisar ett tydligt sträckgränsområde gäller en begränsning på $L_r < 1$ (även här är det bättre att välja option 2).

R6-FAD – Option 2

I option 2 definieras en kurva enligt ekvation (3.2). Denna option kräver kännedom om spänningstöjningskurvan för det aktuella materialet (förutom sträckgräns och flytgräns).

$$K_r = \left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_Y} + \frac{L_r^3\sigma_Y}{2E\varepsilon_{ref}} \right)^{-1/2} \quad (3.2)$$

I ekvation (3.2) är E elasticitetsmodulen, ε_{ref} är den sanna töjning som erhålls från spänningstöjningskurvan vid en sann spänning motsvarande $L_r\sigma_Y$.

Option 2 är tillämpbar för alla typer av metaller oberoende av spänningstöjnings samband. Denna option tar bort en stor del av den konservatism som existerar i den generella option 1, speciellt för material som uppvisar ett kraftigt hårdnande i början av spänningstöjningskurvan.

R6-FAD – Option 3

I option 3 tar man både hänsyn till verkliga materialegenskaper och aktuell geometri. Kräver naturligtvis en detaljerad analys av aktuell komponent där även defekten måste ingå i analysen. Genom att utföra både elastiska analyser (för att beräkna J_e) och elastisk-plastiska analyser (för att beräkna J) för olika L_r -värden kan en kurva definieras enligt ekvation (3.3).

$$K_r = \left(\frac{J_e}{J} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

Begränsning i L_r -led

De begränsningslinjer som definieras i ekvation (3.1-3.3) gäller upp till ett maximalt L_r -värde, L_r^{max} , som definieras enligt ekvation (3.4).

$$L_r^{max} = \frac{\sigma_f}{\sigma_y} \quad (3.4)$$

Rekommendationer rörande val av analysoption

De ovan nämnda analysoptionerna ger olika grad av konservatism i analysen.

- Option 3 kräver en fullständig J -analys där även defekten modelleras. Denna analys innehåller i princip ingen konservatism med avseende på materialdata och definition av aktuell geometri.
- Definitionen av R6-FAD enligt option 2 baseras på ett flertal J -analyser för olika typer av geometrier och belastningar. Man har även jämfört resultat från experiment med böj-, drag- och CT-provstavar. Syftet har i huvudsak varit att få bort geometriberoendet (med en rimlig grad av konservatism) samt ha kvar materialberoendet (via kravet på angiven spänningstöjningskurva).
- R6-FAD enligt option 1 är i princip en undre gränskurva för ett antal olika R6-FAD enligt option 2 (för olika typer av geometrier och belastningar).

För austenitiskt rostfria stål och nickelbasmaterial (exempelvis Inconel 182) är R6-FAD enligt option 1 ett bra val, eftersom man enbart erhåller ett litet hårdnande i närheten av sträckgränsen (dvs, man vinner inte så mycket på att välja option 2 för dessa material).

3.1.2 Val av analyskategori

R6-metoden innehåller en möjlighet att mer realistiskt ta hänsyn till brottbeteendet hos duktila material, genom att tillgodoräkna sig viss stabil (J -kontrollerad) spricktillväxt. Detta hanteras via val av analyskategori.

R6 – Kategori 1 – Ingen stabil tillväxt tillåts

Vid en analys enligt kategori 1 används $K_I = K_{Ic}$ som brottvillkor (i K_r -led). Detta är relevant för material som har ett sprött brottbeteende, eller för fall där man ej önskar ta hänsyn till ett materials sega beteende.

R6 – Kategori 2 – Begränsad stabil tillväxt tillåts

Vid en analys enligt kategori 2 används $K_I = K_g$ som brottvillkor, där K_g inkluderar viss stabil J -kontrollerad tillväxt, vilket är relevant för material som har ett segt brottbeteende. Denna analys kräver ej att man beräknar instabilitetspunkten via J_r -kurvan, utan man väljer istället att trunkera J_r -kurvan vid en begränsad stabil tillväxt.

Att utföra en analys enligt kategori 2 motsvarar alltså en analys enligt kategori 1 där man använder ett seghetsvärde K_g som inkluderar viss stabil J -kontrollerad tillväxt. R6-metoden anger dock att man skall använda specificerade lastrelaterade säkerhetsmarginaler vid denna analys (som ju är en förenklad analys enligt kategori 3). Detta hanteras på följande vis:

- Utför analysen för två punkter i R6-diagrammet. Den ena punkten motsvarar en defektstorlek utan stabil tillväxt, a_0 (med säkerhetsfaktorn F_0^L). Den andra punkten inkluderar en begränsad mängd stabil tillväxt, $a_0 + \Delta a_g$ (med säkerhetsfaktorn F_g^L).
- Kontrollera ifall villkoren $F_g^L = 1,1$ och $F_g^L / F_0^L \geq 1,2$, eller $F_g^L / F_0^L = 1,2$ och $F_g^L \geq 1,1$ är uppfyllda.
- Ifall ovanstående villkor är uppfyllda, säkerställer man att pålagt J inte överstiger aktuellt J_{mat} från J_r -kurvan (via $F_g^L \geq 1,1$) samt att lutningen hos pålagt J inte överstiger lutningen hos J_r -kurvan (via $F_g^L / F_0^L \geq 1,2$).

R6 – Kategori 3 – Stabil tillväxt tillåts

En analys enligt kategori 3 (också relevant för material som har ett segt brottbeteende) kräver en fullständigt specificerad J_r -kurva, där brottvillkoret motsvaras av instabilitetsvillkoret enligt ekvation (3.5-3.6). Denna analys kräver inga extra lastrelaterade säkerhetsmarginaler.

$$J \leq J_{mat} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial J}{\partial a} \leq \frac{\partial J_{mat}}{\partial a} \quad (3.6)$$

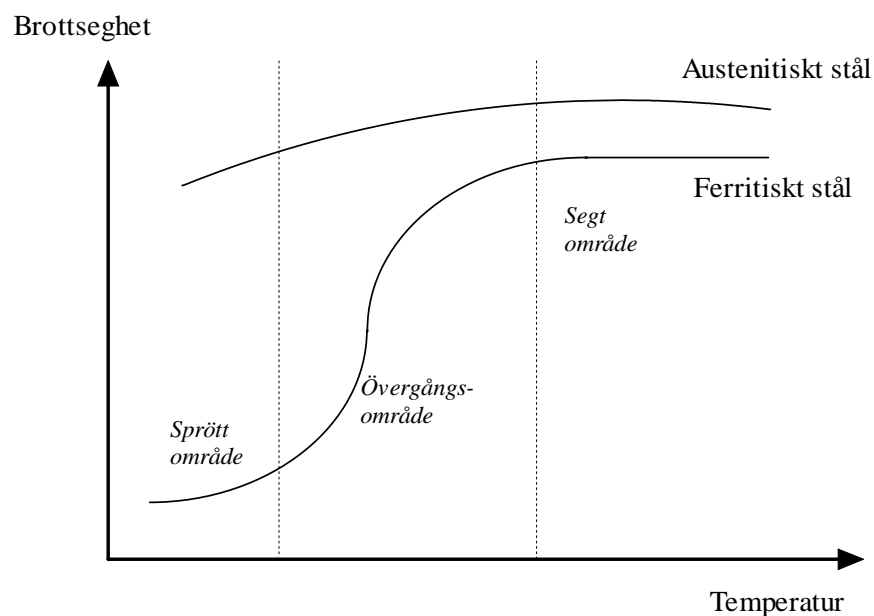
Instabilitetspunkten uppnås då likhetstecknet gäller i ovan angivna villkor.

Rekommendationer rörande val av analyskategori

De ovan nämnda analyskategorierna ger olika grad av konservatism i analysen.

- För material som uppvisar ett sprött brottbeteende (dvs. ferritiska material som arbetar i undre plåtområdet eller i transitionsområdet mellan sprött och segt beteende) är kategori 1 det enda möjliga valet.
- För material som uppvisar ett duktilt brottbeteende (dvs. austenitiskt rostfria stål och nickelbasmaterial) ger kategori 1 en undervärdering av de verkliga brotttegenskaperna. För dessa material rekommenderas att man använder en analys motsvarande kategori 3.
- En analys enligt kategori 2, motsvarar en förenklad analys enligt kategori 3. Denna analyskategori kan exempelvis användas då man ej har en fullständig J_r -kurva.

En jämförelse mellan olika materials brottbeteende visas även i figur 3.3. Här framgår att austenitiskt rostfria stål (och nickelbasmaterial) beter sig segt även i temperaturområden där ferritiska stål tappar sin seghet.



Figur 3.3. Principiellt brottbeteende hos olika material.

3.2 SINTAP / R6 – Revision 4

Det nyligen avslutade EU-projektet SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedure) innehåller flera nyheter när det gäller analys av defekter [9, 11]. SINTAP kommer att utgöra basen för en planerad CEN-standard. Eftersom tongivande individer inom R6 [1, 8], BS 7910 [10] samt ETM [12] deltog inom SINTAP-projektet, kommer även uppdateringar rörande dessa procedurer / standarder färgas av resultaten från SINTAP. Som exempel kan nämnas att den kommande revisionen av R6 (dvs R6, Revision 4) i huvudsak styrs av resultaten från SINTAP [13]. Sammantaget visar detta att vi bör se hur R6-metoden påverkas av dessa förändringar.

3.2.1 Reviderade R6-kurvor / Nya analysoptioner

I revision 3 av R6-metoden definierades begränsningen i K_r -led genom att välja analysoption 1, 2 eller 3. I revision 4 kvarstår analysoption 2 och 3, medan analysoption 1 är förändrad för att erhålla en mer konsistent övergång mellan analysoptionerna 1 och 2. Vidare har en approximativ analysoption 2 tillkommit (som ej kräver kännedom om spänningstöjningskurvan). En annan skillnad är att sträckgränsen numera definieras som $R_{p0,2}$ (oberoende om materialet uppvisar ett sträckgränsområde eller inte). Analysoptionerna sammanfattas nedan:

R6 Rev 4-FAD – Option 1

Option 1 är förändrad för att erhålla en mer konsistent övergång mellan analysoption 1 och 2. Samtidigt tar man bort en stor del av den överkonservatism som tidigare gällde för material som uppvisar ett kraftigt hårdnande i början av spänningstöjningskurvan. Det senare skapas genom att definiera en speciell FAD, gällande för material som uppvisar ett sträckgränsområde (ännu ej klart ifall denna senare FAD kommer med i den slutgiltiga versionen av R6 Rev 4).

För material som uppvisar ett sträckgränsområde gäller ekvation (3.7), som är giltig upp till $L_r = 1$.

$$K_r = \left(1 + \frac{1}{2} L_r^2\right)^{-1/2} \quad (3.7)$$

För material som inte uppvisar ett sträckgränsområde gäller ekvation (3.8), som är giltig upp till L_r^{max} enligt ekvation (3.9).

$$K_r = \left(1 + \frac{1}{2} L_r^2\right)^{-1/2} \left[0,3 + 0,7 \exp(-0,6 L_r^6)\right] \quad (3.8)$$

$$L_r^{max} = 1 + \left(\frac{150}{\sigma_Y}\right)^{2.5} \quad (3.9)$$

R6 Rev 4-FAD – Approximativ option 2

Som nämnts ovan har det tillkommit en approximativ option 2, som ej kräver kännedom om spänningstöjningskurvan. Även här definieras två olika FAD.

För material som uppvisar ett sträckgränsområde gäller samma ekvation (3.7) som i option 1 ovan, som även här är giltig upp till $L_r = 1$. Nyheten är att man tillåter L_r -värden större än 1 och då enligt ekvation (3.10-3.11). Man tillåter dock inte större värden än L_r^{max} enligt ekvation (3.12).

$$\Delta\varepsilon = 0.0375 \left(1 - \frac{\sigma_Y}{1000} \right) ; \quad \lambda = 1 + \frac{E\Delta\varepsilon}{\sigma_Y} ; \quad N = 0,3 \left[1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_U} \right] \quad (3.10)$$

$$K_r = \left[\lambda + \frac{1}{2\lambda} \right]^{-1/2} L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (3.11)$$

$$L_r^{max} = 0,5 \left[1 + \frac{\sigma_U}{\sigma_Y} \right] \quad (3.12)$$

För material som inte uppvisar ett sträckgränsområde gäller ekvation (3.13-3.14), som är giltig upp till $L_r = 1$. För L_r -värden större än 1 gäller ekvation (3.15-3.16). Man tillåter dock inte större värden än L_r^{max} enligt ekvation (3.12).

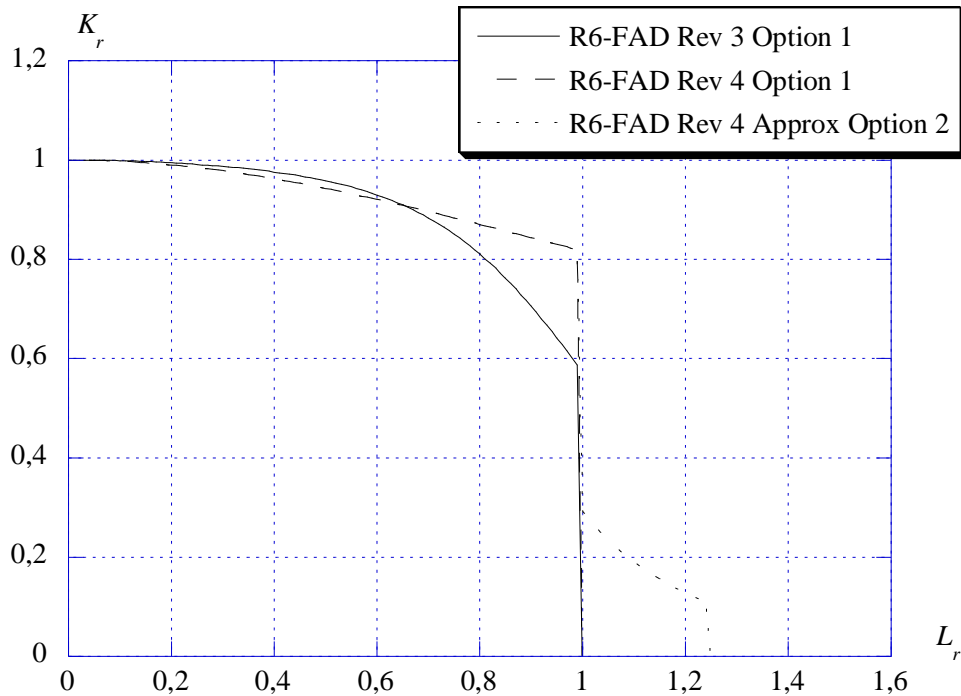
$$\mu = \min \left[0.001 \left(\frac{E}{\sigma_Y} \right) ; 0,6 \right] \quad (3.13)$$

$$K_r = \left(1 + \frac{1}{2} L_r^2 \right)^{-1/2} \left[0,3 + 0,7 \exp(-\mu L_r^6) \right] \quad (3.14)$$

$$N = 0,3 \left[1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_U} \right] \quad (3.15)$$

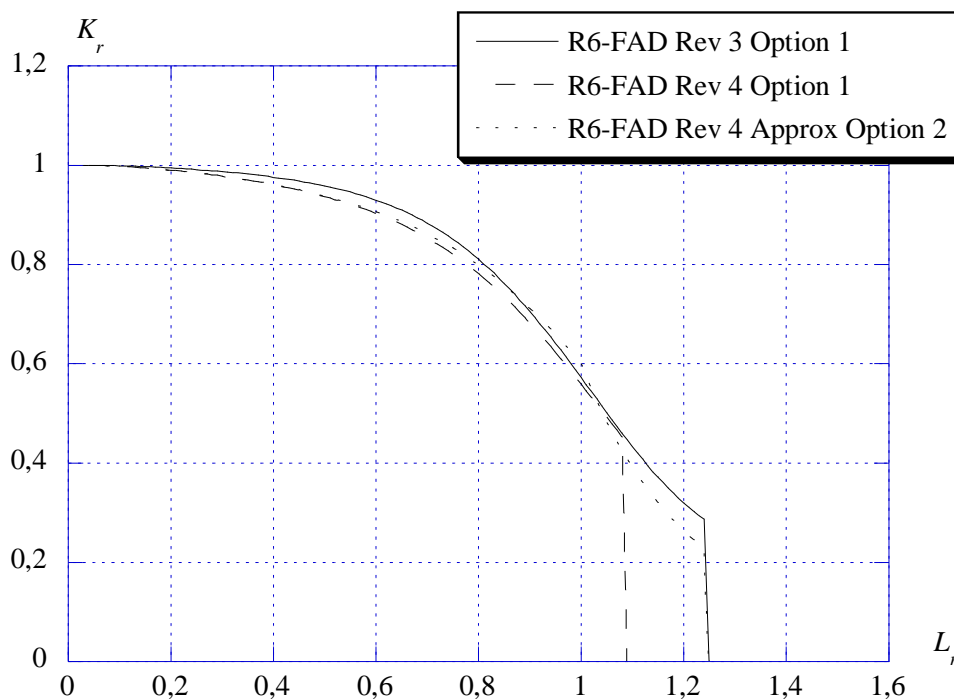
$$K_r = \left(1 + \frac{1}{2} \right)^{-1/2} \left[0,3 + 0,7 \exp(-\mu) \right] L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (3.16)$$

En jämförelse mellan R6 Rev 3 och Rev 4 återfinns i figur 3.4 (för material som uppvisar ett sträckgränsområde) samt i figur 3.5 (för material som inte uppvisar ett sträckgränsområde). Använda materialdata motsvarar de som gäller för Inconel 182.



Figur 3.4. Jämförelse mellan olika R6-FAD (för material som uppvisar ett sträckgränsområde).

Figur 3.4 visar att R6 Rev-4 option 1 får bort en stor del av den överkonservatism som tidigare gällde för material som uppvisar ett kraftigt hårdnande i början av spänningstöjningskurvan. Vidare framgår det att den nya approximativa option 2-kurvan tillåter L_r -värden större än 1.



Figur 3.5. Jämförelse mellan olika R6-FAD (för material som inte uppvisar ett sträckgränsoområde).

Figur 3.5 visar att den nya option 1-kurvan är avsevärt mer konservativ än tidigare (m a p L_r^{max}). Detta beror på att option 1 numera enbart kräver kännedom om sträckgränsdata (brottgräns behövs ej), vilket ger mycket konservativa resultat för austenitiskt rostfria stål och nickelbaslegeringar. För dessa material rekommenderas istället att man använder den nya approximativa option 2-kurvan (som är standardval i SINTAP-proceduren [11]).

3.2.2 Analyiskategorier försvinner / Inför initiering eller stabil tillväxt

I revision 4 avser man att ta bort termen analyskategorier och inför istället följande begrepp [13]:

- Initiering: Motsvarar analyskategori 1 i revision 3 av R6-dokumentet.
- Stabil tillväxt: Motsvarar analyskategori 3 i revision 3 av R6-dokumentet.

Analyskategori 2 försvinner (dvs där man inkluderar en begränsad stabil tillväxt), eftersom man idag kan erhålla tillförlitliga J_r -kurvor för alla intressanta material. För vissa sega material är det exempelvis lättare att ta fram bra J_r -kurvor (med liten spridning), än vad det är att ta fram giltiga K_{Ic} / J_{Ic} -data.

3.3 Den svenska R6-proceduren med tillhörande program SACC / ProSACC

I Sverige har vi infört en egen procedur [2] för skadetålighetsanalyser. Proceduren, som baseras på revision 3 av R6-metoden [8], innehåller även ett deterministiskt säkerhetsvärderingssystem [3] för att erhålla samma säkerhetsmarginaler mot sprött brott och plastisk kollaps som de man finner i ASME III och ASME XI [4].

Proceduren, som senast reviderades 1996 [2], använder följande optioner etc från revision 3 av R6-metoden:

- R6-FAD enligt option 1, dvs en konservativ undre gränskurva för olika typer av geometrier och belastningar.
- R6 kategori 1, dvs ingen stabil tillväxt tillåts.
- Övriga optioner är utelämnade för att erhålla en procedur som är förhållandevis enkel att tillämpa och inte kräver alltför detaljerade materialdata.

En viktig skillnad mot R6-metoden är alltså att proceduren innehåller ett deterministiskt säkerhetsvärderingssystem, som anger samma säkerhetsmarginaler mot sprött brott och plastisk kollaps som de man finner i ASME III och ASME XI. Proceduren anger säkerhetsmarginalerna SF_J (sprött brott) och SF_L (plastisk kollaps) och definieras enligt ekvationerna (3.17-3.18).

$$\frac{K_I}{K_{cr}} + \frac{\rho}{\sqrt{SF_J}} \leq \frac{f_{R6}(L_r)}{\sqrt{SF_J}} \quad (3.17)$$

$$L_r \leq \frac{L_r^{max}}{SF_L} \quad (3.18)$$

Som nämns i proceduren [2] innebär begränsningen till R6 kategori 1 att man i vissa fall erhåller kraftigt överkonservativa resultat för material med ett segt beteende. Det nyligen uppstartade projektet "ProSACC – vidareutveckling av brottmekaniska handboken och programmet SACC" skall se till att man får bort en stor del av denna konservatism då man har tillgång till bra materialdata. ProSACC kommer alltså att innehålla en procedur som mer realistiskt kan ta hänsyn till brottbeteendet hos duktila material, genom att tillgodoräkna sig viss stabil (*J*-kontrollerad) spricktillväxt.

4. GENOMGÅNG AV HUR OLIKA NORMER OCH STANDARDER HANTERAR STABIL TILLVÄXT

De metoder som studerades i avsnitt 3, utgör bakgrundsdokument för hur vissa normer och standarder hanterar stabil tillväxt. Exempelvis utgår British Standard BS 7910:1999 [10] från den metodik som beskrivs ovan nämnda R6-dokument [1, 8]. Även ASME XI, Code Case N-494 [4] utgår ifrån denna metodik.

Inom ASME XI finns det även andra analysmetoder som inkluderar stabil tillväxt. Som exempel tar ASME XI, IWB-3640, App. C hänsyn till stabil tillväxt vid analys av rostfria rörkomponenter. Denna metodik användes exempelvis av Westinghouse [14] då de analyserade olika defekter i Virgil C. Summer (defekterna låg i anslutning till en svets utförd i Inconel 182).

Syftet med genomgången i detta avsnitt är att få kännedom om hur man hanterar stabil tillväxt i BS 7910:1999 (används främst inom offshore, men även inom engelsk kärnkraftsindustri) och ASME XI (används i kärnkraftsbranschen över hela världen).

4.1 British Standard BS 7910:1999

British Standard BS 7910:1999 [10] utgår ifrån den i avsnitt 3.1 beskrivna R6-metoden och ersätter det tidigare utgivna dokumentet PD 6493:1991 [15]. British Standards Institution valde att upphöja dokumentet till en standard för den 15 december 1999. Motivet var att man nu har tillräckligt goda erfarenheter av de beräkningsmetoder som ingår (sen dokumentets första utgåva 1980).

BS 7910:1999 definierar tre analysnivåer som sammanfattas nedan:

- Level 1 En mycket förenklad metod med en FAD som består av två räta linjer motsvarande $K_r^{max} = 0,707$ och $L_r^{max} = 0,8$. Används normalt inte för kärnkraftstillämpningar.
- Level 2 Har två undergrupper (se nedan). Som brottseghet väljs ett initieringsvärde motsvarande R6 – Kategori 1, eller ett värde inkluderande en begränsad stabil tillväxt motsvarande R6 – Kategori 2.
 - Level 2A motsvarar R6-FAD – Option 1 (kräver kännedom om sträckgräns och flytgräns).
 - Level 2B motsvarar R6-FAD – Option 2 (kräver kännedom om hela spännings-töjningskurvan).

- Level 3 Denna nivå motsvarar R6 – Kategori 3, dvs en fullständig J_r -kurva används för att beräkna ett instabilitetsvillkor. Det finns tre undergrupper.
- Level 3A motsvarar R6-FAD – Option 1 (kräver kännedom om sträckgräns och flytgräns).
- Level 3B motsvarar R6-FAD – Option 2 (kräver kännedom om hela spännings-töjningskurvan).
- Level 3C som motsvarar R6-FAD – Option 3 (kräver elastiska och elastisk-plastiska J -beräkningar).

4.1.1 Att tänka på vid analys av stabil tillväxt

Eftersom det är en standard, innehåller BS 7910:1999 rekommendationer rörande data att använda och analysförfarande för de olika analysnivåerna.

BS 7910:1999 kräver att man har utfört minst tre prov, dvs tagit fram minst tre J_r -kurvor, varefter man skall utgå ifrån ett lower bound av dessa tre kurvor. Man påpekar även att man, vid J_{lc} -provning, skall utgå ifrån det minsta värdet (då man utfört 3 till 5 prov), det näst minsta värdet (då man utfört 6 till 10 prov) samt slutligen det tredje minsta värdet (då man utfört 11 till 15 prov). Detta senare resonemang bör även kunna tillämpas för att ta fram den J_r -kurva som skall användas vid en analys av stabil tillväxt.

BS 7910:1999 innehåller även en formalism för hur man genomför en analys av stabil tillväxt. Denna sammanfattas i nedanstående punkter:

- Först definieras det defektdjup som gäller vid början av analysen, a_0 .
- Samtidigt definieras det brottseghetsvärde som gäller vid början av analysen, K_{mat} . Detta värde motsvaras av K_{lc} / J_{lc} .
- Sedan definieras den maximala stabila tillväxt som tillåts ske under analysen, Δa_g . Då man har tillgång till bra J_r -kurvor, motsvaras Δa_g av den maximala stabila tillväxt som sker vid provningen.

- Utgående från storleken på Δa_g bör analysen utföras på följande sätt:
 - Om $\Delta a_g < 1,0$ mm, ta fram (L_r, K_r) -punkter för a_0 och $a_0 + \Delta a_g$.
 - Om $1,0 \text{ mm} < \Delta a_g < 5,0$ mm, ta fram (L_r, K_r) -punkter för a_0 , $a_0 + 1$ mm, $a_0 + 2$ mm, $a_0 + 3$ mm, $a_0 + 4$ mm och $a_0 + 5$ mm (antal punkter styrs av storleken på Δa_g).
 - Om $\Delta a_g > 5,0$ mm, ta fram (L_r, K_r) -punkter för a_0 , $a_0 + 1$ mm, $a_0 + 0,2 \cdot \Delta a_g$, $a_0 + 0,4 \cdot \Delta a_g$, $a_0 + 0,6 \cdot \Delta a_g$, $a_0 + 0,8 \cdot \Delta a_g$ och $a_0 + \Delta a_g$.
- Plotta alla (L_r, K_r) -punkter i aktuellt R6-diagram (motsvarande Level 3A, 3B eller 3C). Ifall de ligger utanför R6-kurvan är den analyserade defekten a_0 inte acceptabel. Ifall de korsar R6-kurvan är den analyserade defekten a_0 acceptabel.
- Genom ett iterativt förfarande kan maximalt tillåten defekt a_0 bestämmas. Den erhålls som den serie (L_r, K_r) -punkter som inte korsar R6-kurvan, utan enbart tangerar densamma.

BS 7910:1999 innehåller inga säkerhetsfaktorer (förutom i den sällan använda Level 1), däremot finns det en formalism beskriven som kopplar partialfaktorer till olika brottsannolikhetsnivåer.

4.2 ASME XI – Rostfria rör

ASME XI, IWB-3640, App. C, behandlar analyser av defekter i rostfria rörkomponenter [4]. För omkretsdefekter kan analyserna sammanfattas enligt följande:

- App. C är giltig för analys av defekter i class 1 rörkomponenter ($D_y > 114$ mm). Både defekter orienterade i omkretsled och i axiell led kan analyseras.
- App. C gäller för analys av defekter i austenitiskt rostfria stål (inkl. svetsar), nickelbaslegeringar (inkl. svetsar) samt för vissa gjutna rostfria stål. Minvärdet på sträckgränsen vid rumstemperatur för inte överstiga 310 MPa.
- Analysen utgår ifrån en gränslastanalys, som modifieras via Z -faktorer (lastfaktorer) för vissa svetstyper. Mer om det i avsnitt 4.2.1 nedan.
- Svetsegenspänningar och spänningar från termiska transienter (sekundära spänningar) ingår inte då man tar fram acceptabla defektstorlekar. Däremot skall man ta hänsyn till sekundära spänningar vid analys av utmattnings- och spänningskorrosionstillväxt.
- Det enda materialdata som krävs är S_m -värdet som erhålls via minvärden på sträck- och brottgräns.
- Analysbegränsningarna är: $a \leq 0,75 \cdot t$ (för både omkretsdefekter och axiella defekter) samt $l \leq l_{crit}$ (enbart för axiella defekter).
- Säkerhetsfaktorer ingår i analysen. För normal / upset är $SF = 2,77$ (omkretsdefekter) eller $SF = 3,0$ (axiella defekter).

Första utgåvan av ASME XI, IWB-3640, App. C (från 1983) utgick från en ren gränslastanalys utan några lastfaktorer. Detta ansågs relevant utifrån det då kända experimentella underlaget [16], där plastisk kollaps var den dominerade haverimekanismen för dessa sega material och svetsar. Senare visade det sig att man för vissa svetstyper erhöll stabil tillväxt före det att man uppnådde en plastisk kollapslast enligt App. C (från 1983). Beslut togs att revidera ASME XI, IWB-3640, App. C för att kunna ta hänsyn till stabil tillväxt för dessa svetstyper [16].

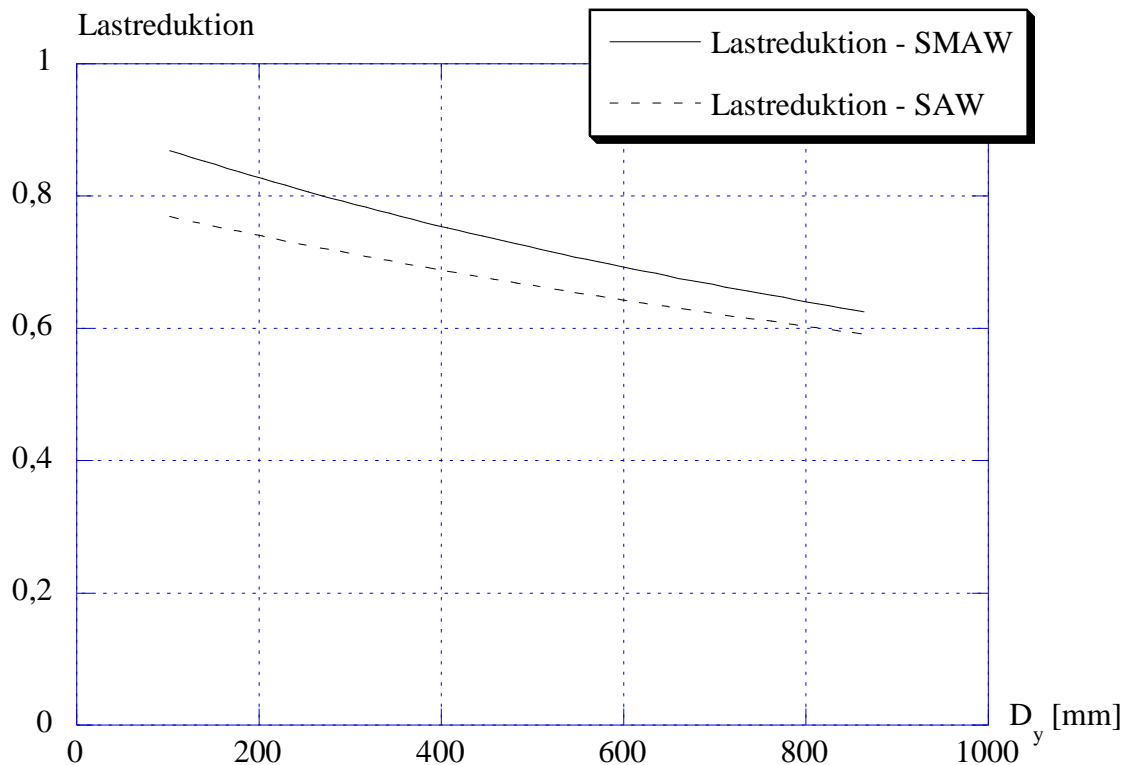
4.2.1 Z-faktorer, ett sätt att ta hänsyn till stabil tillväxt

1985 föreslogs de förändringar som innebär att man idag kan ta hänsyn till stabil tillväxt för vissa svetstyper (SMAW och SAW). För att förenkla analyserna utgår man ifrån en ren gränslastanalys, där man infört Z-faktorer (lastfaktorer som är större än 1) för att ta hänsyn till de data som visar att man erhåller stabil tillväxt före plastisk kollaps. För dessa fall ersätts alltså villkoret plastisk kollaps mot ett instabilitetsvillkor, motsvarande R6-metodens kategori 3 (se ekvation 3.5-3.6). Härledningen av Z-faktorerna sammanfattas enligt följande [16]:

- Provningsdata för vissa svetstyper visar att stabil tillväxt uppträder före plastisk kollaps. Hantera detta genom att skala upp pålagda laster vid en gränslastanalys. Dessa lastfaktorer benämns Z-faktorer.
- Utvärdera provningsdata - 1. Börja med ta fram pålagt J_{app} samt $T_{app} = (dJ_{app}/da)(E/\sigma_f^2)$, som här utfördes med en EPRI-metod. Detta motsvarar vänsterleden i ekvation (3.5-3.6).
- Utvärdera provningsdata - 2. Ta fram materialdata för de aktuella svetstyperna (K_{Ic}/J_{Ic} och J_r -kurvor). Hantera SMAW (K_{Ic} angavs vara $181 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) och SAW (K_{Ic} angavs vara $147 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) separat. Detta motsvarar högerleden i ekvation (3.5-3.6).
- Utvärdera instabilitetsvillkoret enligt ekvation (3.5-3.6). Typiska värden låg kring $K_{Instabilitet} = 310\text{-}355 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (skattade värden från [16]).
- Jämför pålagda laster / moment vid instabilitet mot de som erhålls vid plastisk kollaps. Man finner en reduktion kring 0,6 – 0,8, där den viktigaste parametern är rörets ytterdiameter D_y .
- Definiera lastfaktorer enligt ekvation (4.1-4.2), där D_y skall anges i tum. Reduktion av tillåten last sammanfattas i figur 4.1.

$$Z_{\text{SMAW}} = 1,15 \left[1 + 0,013(D_y - 4) \right] \quad (4.1)$$

$$Z_{\text{SAW}} = 1,30 \left[1 + 0,010(D_y - 4) \right] \quad (4.2)$$



Figur 4.1. Reduktion av tillåten last, med hänsyn till stabil tillväxt.

Ovanstående genomgång, som alltså utgör den tekniska bakgrunden till ASME XI, IWB-3640, App. C, ger ett resultat som kvalitativt överensstämmer med det man ser i verkligheten. Det bör dock påpekas följande:

- För att ta fram ett pålagt J_{app} samt $T_{app} = (dJ_{app}/da)(E/\sigma_f^2)$, med här använd EPRI-metod [16], krävs en anpassning av uppmätta spännings-töjningskurvor till en viss materialmodell. Denna anpassning kunde inte utföras i detta fall, eftersom modellen ursprungligen var framtagen för ferritiska material. För att komma runt detta valde man att anpassa en kurva enbart till ett begränsat töjningsområde [17], och kontrollerade sedan att det gav konsistenta last-förskjutningskurvor.
- Inga av de framtagna J_{Ic} -värdena (eller J_r -kurvorna) var giltiga enligt då aktuell provningsstandard [17].
- För att kunna utvärdera instabilitetsvillkoret enligt ekvation (3.5-3.6), krävdes en extrapolering av samtliga J_r -kurvor [17]. Vid provningen uppmättes en stabil tillväxt upp till 2-5 mm, vid extrapolationen användes data för stabil tillväxt upp till ca 10 mm (skattat värde från [17]). Extrapolationen valdes så att man erhöll konservativa last-förskjutningskurvor.

Som en del av de internationella IPIRG-projekten (IPIRG - International Piping Integrity Research Group) kontrollerade man hur väl olika metoder / standarder kunde prediktera bärformågan hos rörsystem utsatta för komplicerade belastningar [18]. För de redovisade experimenten med ytsprickor i rårör (svetsar eller grundmaterial) eller i svets mellan rårör och rörböj, var analyserna enligt R6-metoden (option 1, kategori 3 dvs. inklusive stabil tillväxt) konservativa liksom motsvarande analyser enligt ASME XI, App. C eller App. H [18]. Vidare var graden av konservatism (utan några säkerhetsfaktorer) mellan R6-metoden och ASME XI av jämförbar storlek [18]. IPIRG visade alltså att ASME XI, App. C (och även R6-metoden, inklusive stabil tillväxt) fungerade väl trots dom påpekanden som nämns ovan.

4.3 ASME XI – Ferritiska rör

Även om inte ferritiska material är av primärt intresse för denna genomgång, är det dock intressant att se hur ASME (dvs. en standard) hanterar ferritiska material i det övre plåtåområdet (enligt metodgenomgången skall man ju kunna tillgodogöra sig stabil tillväxt även i detta fall).

ASME XI, IWB-3650, App. H [4], innehåller regler för analys av ferritiska rör. Hur analysen utförs styrs av ett "screening criteria" SC . Om $SC < 0,2$ genomförs en gränslastanalys, om $SC > 1,8$ blir det frågan om en linjär brottmekanisk analys (enbart relevant för ferritiska material i undre plåtåområdet eller transitionsområdet). Ifall SC hamnar mellan 0,2 och 1,8 anses en icke-linjär brottmekanisk analys vara relevant.

Den icke-linjära brottmekaniska analysen för ferritiska rör [19] utförs i princip på samma sätt som för rostfria rör [16-17]. Detta innebär att man för omkretsdefekter inför Z -faktorer (lastfaktorer), som baseras på instabilitetsvillkoret enligt ekvation (3.5-3.6). För detaljer se avsnitt 4.2 ovan.

Enligt ASME XI kan man alltså tillgodogöra sig stabil tillväxt även för ferritiska rör.

4.4 ASME XI – Code Case N-494

ASME XI innehåller alltså, dolt för användaren, analyser där man tar hänsyn till stabil tillväxt för både rostfria rör (App. C) och ferritiska rör (App. H). Som nämnts i avsnitt 4.2-4.3 innebär detta en förenkling genom införandet av Z -faktorer. I vissa fall önskar man dock få bort en del av den konservatism som finns i inbyggd i Z -faktorkonceptet. ASME har valt att lösa detta via Code Case N-494 [4] som är tillämpligt för både ferritiska och rostfria rör.

ASME, Code Case N-494, innebär i princip en analys enligt R6-metoden, där man kan notera följande:

- En motsvarighet till analysoption 2 används, utgående från olika spännings-töjningskurvor för ferritiska respektive austenitiskt rostfria material.
- Kategori 3 används, dvs en fullständig analys av stabil tillväxt. Analysen genomförs i princip på samma sätt som i BS 7910:1999.
- För ferritiska rör som används vid låga temperaturer (motsvarande undre plåtå- eller transitionsområdet) får man ej tillgodogöra sig någon stabil tillväxt. Detta motsvarar en kategori 1-analys enligt R6-metoden.

4.5 ASME XI – Vad är på gång?

Som framgår av ovanstående genomgång söker ASME XI, exempelvis via Code Case N-494, ta fram en mer enhetlig metodik för analys av rörkomponenter. Följande kan noteras:

- Man avser att slå ihop App. C och App. H till ett nytt App. C för analys av både ferritiskt och austenitiskt rostfria rörkomponenter. Detta arbete är långt kommit och redan godkänt i ASME Section XI Subcommittee [20].
- Det nya App. C kommer att innehålla helt nya säkerhetsfaktorer [21]. Exempelvis särskiljer man mellan membran och böjlaster, där böjlaster erhåller lägre säkerhetsfaktorer än de idag använda. Vidare skiljer man numera mellan normal, upset, emergency och faulted, där upset erhåller lägre säkerhetsfaktorer än normal. Detta sammanfattas i tabell 4.1-4.2.
- Z-faktorer införs för axiella defekter [21].
- Code Case N-494, skall konverteras till ett nytt App. H, "Evaluation procedure for flaws in piping based on failure assessment diagram" [21].

Tabell 4.1. Säkerhetsfaktorer för omkretsdefekter.

ASME Service Level	För membranlast, SF_m		För böjlast, SF_b	
	ASME XI [4]	Nytt förslag [21]	ASME XI [4]	Nytt förslag [21]
A	2,77	2,7	2,77	2,3
B	2,77	2,4	2,77	2,0
C	1,39	1,8	1,39	1,6
D	1,39	1,3	1,39	1,4

Tabell 4.2. Säkerhetsfaktorer för axiella defekter.

ASME Service Level	ASME XI idag [4]	ASME XI, förslag [21]
A	3,0	2,7
B	3,0	2,4
C	1,5	1,8
D	1,5	1,3

Det bör påpekas att det nya App. H, , ”Evaluation procedure for flaws in piping based on failure assessment diagram” påminner om den svenska R6-proceduren [2]. En utav de viktigaste skillnaderna är att ASME genomgående tillåter stabil tillväxt för både ferritiska och rostfria rör.

5. BROTTSEGHETSPROVNING AV SEGA MATERIAL

Ovanstående genomgång av olika metoder / standarder för att ta hänsyn till stabil tillväxt, förutsätter att man har tillgång till relevanta och giltiga materialdata i form av brottseghet K_{Ic}/J_{Ic} och J_r -kurvor. För att bedöma ifall ett framtaget brottseghetsvärde är giltigt eller ej, bör man ta stöd utav en vedertagen provningsstandard. Följande ASTM-standarder (aktuella och/eller väl inarbetade) är av intresse:

Tabell 5.1. Vedertagna provningsstandarder för brottseghetsprovning.

Provningsstandard	Gäller för	Anmärkning
ASTM E 399	Linjär provning, K_{Ic}	—
ASTM E 813	Olinjär provning, J_{Ic}	Ersatt av E 1737
ASTM E 1152	Olinjär provning, J_r -kurvor	Ersatt av E 1737
ASTM E 1737	Olinjär provning, $J_{Ic} + J_r$ -kurvor	Ersatt av E 1820
ASTM E 1820	Olinjär provning, $J_{Ic} + J_r$ -kurvor	Aktuell standard

5.1 Linjär brottseghetsprovning

Linjär brottseghetsprovning, där man bestämmer ett K_{Ic} -värde, ställer hårda krav på provstavens storlek. Exempelvis kräver standarden (E 399 eller E 1820) [22] att dimensionsvillkoret enligt ekvation (5.1) måste vara uppfyllt (a är spricklängden, B är tjockleken, $W - a$ är ligamentet).

$$a, B, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (5.1)$$

Detta dimensionsvillkor innebär följande:

- För ferritiska material i undre plåtområdet ($K_{Ic} \approx 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ och $R_{p0,2} \approx 350 \text{ MPa}$) ger detta ett dimensionskrav på 33 mm, vilket är fullt möjligt att uppnå.
- För sega material, exempelvis Inconel 182 vid driftstemperatur ($K_{Ic} \approx 300 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ och $R_{p0,2} \approx 300 \text{ MPa}$), ger detta ett dimensionskrav på 2500 mm, vilket är praktiskt taget omöjligt att uppnå.

Användandet av en linjär brottseghetsprovningsstandard är alltså inte relevant för sega material, det är omöjligt att erhålla godkända K_{Ic} -värden. Provning av Inconel 182 kräver därmed att man använder en olinjär provningsstandard.

5.2 Olinjär brottseghetsprovning

Olinjär brottseghetsprovning, där man bestämmer ett J_{Ic} -värde, ställer rimligare krav på provstavens storlek [22]. Detta beror på att K_{Ic} -provningen kräver att den plastiska zonen är liten jämfört med övriga dimensioner, medan J_{Ic} -provningen enbart kräver att ränderna (dimensionerna) inte stör den plastiska zonen utbredning alltför mycket. Den viktigaste kraven för att erhålla giltiga data sammanfattas nedan (ASTM E 1820 [22]).

- (i) Sprickfronten skall vara tillräckligt rak.
- (ii) Olika krav rörande skattning av sprickans storlek under provet. Exempelvis finns krav rörande sprickstorlek både efter förutmatning samt efter sista avlastning under provförloppet.
- (iii) Definiera en så kallad ”blunting line” enligt ekvation (5.2) som parallellförskjuts 0,2 mm.

$$J = M\sigma_Y\Delta a \quad \text{där } (M \geq 2) \quad (5.2)$$

- (iv) Definiera ett dimensionskrav för giltiga J_{Ic} -värden (B är tjockleken, b_0 är ligamentet då provet påbörjas).

$$B, b_0 \geq 25 \frac{J_Q}{\sigma_Y} \quad (5.3)$$

- (v) Definiera en begränsningslinje i J -led.

$$J_{limit} = \frac{b_0\sigma_Y}{15} \quad (5.4)$$

- (vi) Kontrollera lutningen hos J_r -kurvan i anslutning till utvärderingspunkten för skattning av brottseghet ($\Delta a_Q, J_Q$).

$$\frac{dJ}{da} < \sigma_Y \quad (5.5)$$

- (vii) Under själva provningen finns det också olika krav rörande antalet utvärderingspunkter samt dess fördelning.

- (viii) Definiera en provningsbegränsning i J -led.

$$J_{max} = \min\left(\frac{b\sigma_Y}{20}, \frac{B\sigma_Y}{20}\right) \quad (5.6)$$

- (ix) Definiera en provningsbegränsning i Δa -led.

$$\Delta a_{max} = 0,25b_0 \quad (5.7)$$

Kraven (i-ii) är främst kopplat till mätnoggrannhet vid bestämning av aktuell sprickstorlek. Definitionen (iii) används för att ta fram ett J_{Ic} -värde, vilket innebär att detta värde är en ingenjörsmässig uppskattning av brottsegheten nära initieringen av stabil tillväxt (0,2 mm tillväxt). Denna definition kan ses som en motsvarighet till hur sträckgränsen anges för sega material, dvs. $\sigma_s = R_{p0,2}$. Kraven (iv-vi) ser till att J ger en korrekt beskrivning av förhållandet vid sprickfronten (för definition av J_{Ic}). Kraven (vii-ix) berör i huvudsak definitionen av en godkänd J_r -kurva.

Ovan redovisade kravbild ger en avsevärd relaxering jämfört med den linjära provningen. Som tidigare nämndes var dimensionskravet vid linjär provning av Inconel 182, $a, B, b_0 \geq 2500$ mm. Motsvarande krav vid icke linjär provning blir $B, b_0 \geq 20$ mm.

5.3 Tillämpningsexempel - Brottseghet för Inconel 182

Som exempel på hur en provning bör genomföras väljs en utvidgad provning av Inconel 182, syftet här var att erhålla giltiga brottseghetsdata och giltiga J_r -kurvor vid högre temperaturer. På uppdrag av Ringhals AB, genomförde KTH – Hållfasthetslära en sådan provning [6]. Provningsen var uppdelad på tre etapper enligt följande:

- Etapp 1. Syftet var att studera provningsutrustningens begränsningar vid olika temperaturer, där egenskaper vid 20° C, 190° C samt 285° C beaktades. Vidare studerades CT-provstavar med olika dimensioner, för att bestämma vilken storlek som krävs för att erhålla giltiga J_{Ic} -värden (och J_r -kurvor).
- Etapp 2. Syftet var att, utgående från etapp 1, erhålla en större provningsserie med flera giltiga J_{Ic} -värden.
- Etapp 3. Syftet var att göra en provning med en avfuktad provstav.

Följande slutsatser kunde dras från etapp 1 och 3:

- Provningsen vid 285° C, som genomfördes i en konvektionsugn, innebar två problem. Dels så kunde enbart mindre provstavar få plats i ugnen, dels så fanns det inte tillgång till spricköppningsmätare som tålde dessa temperaturer (man valde att föra ut rörelsen utanför ugnen och sedan mäta med en konventionell spricköppningsmätare). Detta fungerade inte tillfredställande, mätningen innehöll för mycket stokastiska variationer [6].
- En jämförelse mellan provningen vid 20° C och den vid 285° C visade att segheten ökade kraftigt med temperaturen samt att man erhöll en brantare J_r -kurva vid den högre temperaturen [6].
- För att eliminera de provningstekniska problem som registrerades vid 285° C, genomfördes efterföljande provning vid den högsta temperatur som en konventionell spricköppningsmätare kunde hantera. Detta motsvarade en provning vid 190° C, som också eliminerade de stokastiska variationer som nämns ovan [6].
- Vid 190° C genomfördes prov med två olika CT-provstavar ($W = 50$ mm och $W = 100$ mm). Bägge proven gav bra data, $J_Q = 402-462$ kN/m. Den mindre provstaven uppfyllde dock ej alla standardkrav enligt avsnitt 5.2. Utifrån detta valdes att samtliga prov i etapp 2 skulle genomföras vid 190° C och med $W = 100$ mm. Resultaten från dessa prov är också representativa för egenskaperna hos Inconel 182 vid 285° C [6].
- En jämförelse mellan resultat med och utan avfuktning (provstaven hölls i 50° C under ca 2 dygn) visade att ingen inverkan av avfuktningen kunde uppmätas [6].

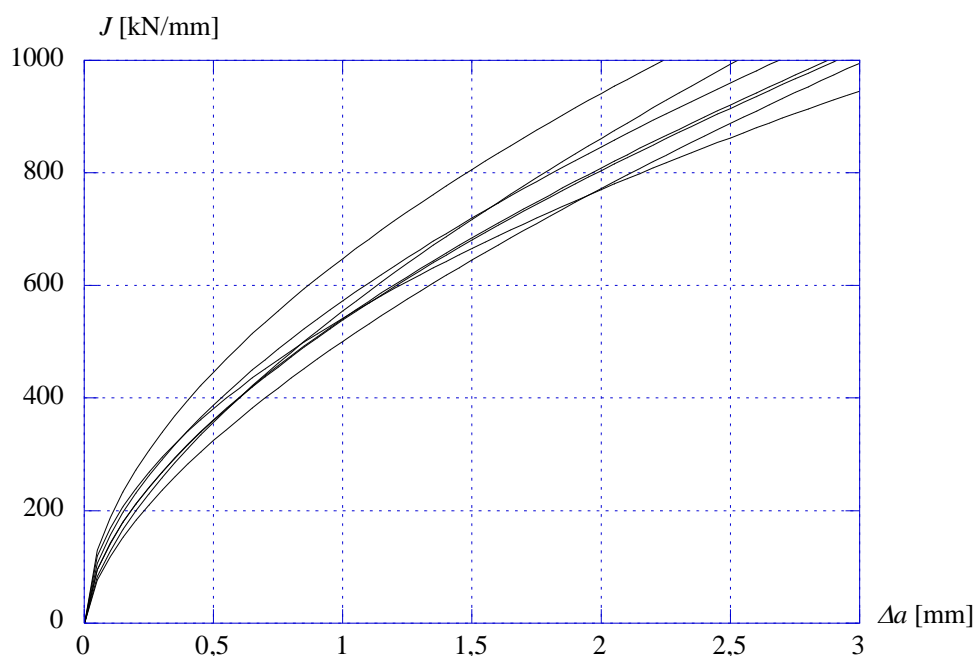
Totalt genomfördes 7 prov vid 190° C och med $W = 100$ mm, samtliga gav giltiga J_{Ic} -värden (och J_r -kurvor upp till cirka 3 mm stabil tillväxt). Resultaten sammanfattas i tabell 5.2 och figur

5.1 i form av de J_r -kurvor som erhålls vid tillämpning av ASTM E 1820, dvs. via ekvation (5.8) där Δa anges i mm och J erhålls i kN/mm [6]. I tabell 5.2 återfinns även de giltiga J_{Ic} -värdena.

$$J_r = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (5.8)$$

Tabell 5.2. Data för giltiga J_{Ic} -värden och giltiga J_r -kurvor vid 190° C [6].

Prov nr	J_{Ic} [kN/m]	Konstanten C_1	Konstanten C_2
7979	402	554,4	0,6357
7998	449	572,6	0,5637
7999	428	541,8	0,5074
8000	401	537,9	0,5796
8001	559	647,8	0,5385
8002	403	540,6	0,5813
8003	341	500,4	0,6258



Figur 5.1. Giltiga J_r -kurvor vid 190° C [6].

5.3.1 J_{Ic} -värden för Inconel 182 vid 190° C

Vilket J_{Ic} -värde skall man då använda vid skadetålighetsanalyser etc? Enligt BS 7910:1999 (se avsnitt 4.1.1) skall man, vid J_{Ic} -provning, utgå ifrån det minsta värdet (då man utfört 3 till 5 prov), det näst minsta värdet (då man utfört 6 till 10 prov) samt slutligen det tredje minsta värdet (då man utfört 11 till 15 prov). Detta medför ett J_{Ic} -värde på 401 kN/m vid 190° C.

Ovanstående sätt, att ta fram ett relevant J_{Ic} -värde, bygger på en förenklad betraktelse där man erhåller ett J_{Ic} -värde med hänsyn till spridningen hos resultaten. Ett problem med metoden är att den inte tar hänsyn till stora avvikelser från medelvärdet (dvs. $J_{Ic} = 426$ kN/m). Önskar man kontrollera detta bör man studera konfidensintervall på ett mer formellt sätt.

En bra skattning erhålls exempelvis via egenskaper hos den så kallade Students t -fördelningen. Ekvation (5.9) anger ett konfidensintervall för J_{Ic} , givet antal prov n , medelvärdet m , standardavvikelsen s samt en viss konfidensnivå $\gamma = 1 - \alpha$.

$$m - t_{\alpha/2, n-1} \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \leq J_{Ic} < m + t_{\alpha/2, n-1} \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (5.9)$$

En undre skattning på J_{Ic} blir därmed 408 kN/m (med 50 % konfidens), 394 kN/m (med 75 % konfidens) samt 377 kN/m (med 90 % konfidens).

Sammanfattningsvis gäller följande för J_{Ic} :

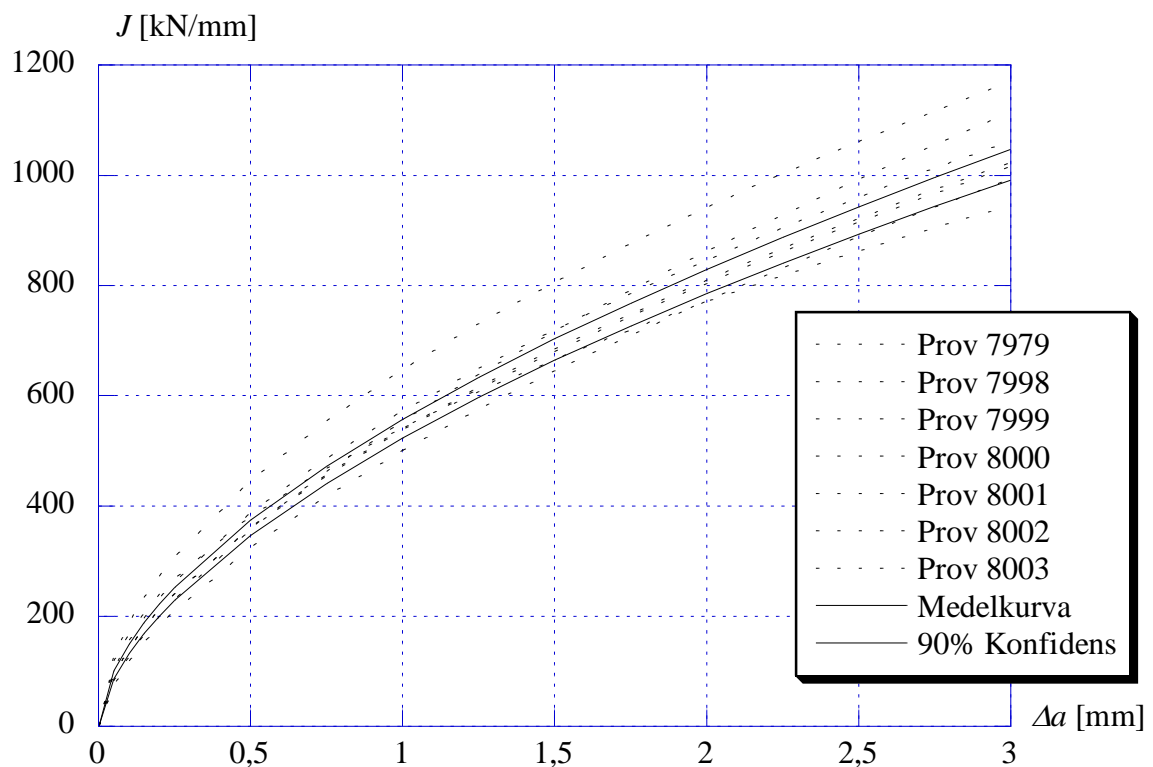
- Vid probabilistiska skadetålighetsanalyser bör man utgå från medelvärdet, dvs $J_{Ic} = 426$ kN/m. Detta motsvarar $K_{Jc} = 303$ MPa \sqrt{m} .
- Vid deterministiska skadetålighetsanalyser bör man utgå från medelvärdet angivet med en viss konfidens.
 - Enligt BS 7910:1999, som använder en förenklad statistisk metodik, erhålls $J_{Ic} = 401$ kN/m. Detta motsvarar $K_{Jc} = 294$ MPa \sqrt{m} .
 - Enligt en mer formell statistisk analys, utgående från 90 % konfidens, erhålls $J_{Ic} = 377$ kN/m. Detta motsvarar $K_{Jc} = 285$ MPa \sqrt{m} .

5.3.2 J_r -kurvor för Inconel 182 vid 190° C

Vilken J_r -kurva skall man då använda vid skadetålighetsanalyser etc? Databehandlingen är ekvivalent med den som beskrivs i avsnitt 5.3.1 ovan. Sammanfattningsvis gäller därmed följande:

- Vid probabilistiska skadetålighetsanalyser bör man utgå från medelvärdet, vilket ger $J_r = C_1 (\Delta a)^{C_2}$ med $C_1 = 557,0$ och $C_2 = 0,5737$ (se figur 5.2).

- Vid deterministiska skadetålighetsanalyser bör man utgå från medelvärdet angivet med en viss konfidens.
 - Enligt BS 7910:1999, som använder en förenklad statistisk metodik, erhålls olika konstanter C_1 och C_2 beroende på vilket intervall man betraktar.
 - Enligt en mer formell statistisk analys, utgående från 90 % konfidens, erhålls $J_r = C_1(\Delta a)^{C_2}$ med $C_1 = 519,7$ och $C_2 = 0,5956$ (se figur 5.2).



Figur 5.2. Statistiskt bearbetade J_r -kurvor (heldragna) jämfört med J_r -kurvor från provning (streckade) vid 190° C.

6. SLUTSATSER

Denna rapport går igenom använda metoder / standarder där man tillgodoräknar sig stabil (J -kontrollerad) spricktillväxt. Vi har påvisat följande:

- ASME XI, App. C och App. H, som behandlar analys av rostfria och ferritiska rörsystem, tar hänsyn till stabil tillväxt. I App. C, motsvarar detta att man inkluderar stabil tillväxt upp till $\Delta a \approx 10$ mm.
- R6-metoden, BS 7910:1999 samt ASME XI, Code Case N-494, innehåller en vedertagen formalism för att ta hänsyn till stabil tillväxt. En förutsättning är att man har tillgång till relevanta och giltiga materialdata i form av brottseghet K_{Ic} / J_{Ic} och J_r -kurvor.
- Samtliga ovan nämnda metoder / standarder är tillämpliga i kärnkraftssammanhang.

Vi redovisar även vad som krävs för att ta fram relevanta och giltiga data (brottseghet K_{Ic} / J_{Ic} och J_r -kurvor) att använda vid analys av stabil tillväxt.

I denna rapport anges inte hur mycket stabil spricktillväxt som kan tillgodoräknas vid en säkerhetsvärdering. Rekommendationer rörande detta kommer att utarbetas av SKI.

7. ERKÄNNANDE

Detta forskningsprojekt har finansierats av Statens Kärnkraftinspektion (SKI). Detta stöd är mycket uppskattat.

8. REVISIONSFÖRTECKNING

Rev	Ändringsorsak / Berörda sidor eller avsnitt	Handläggare	Datum
0	—	Peter Dillström	2003-03-25
1	- Infört skrivningen att SKI kommer att införa en rekommendation rörande hur mycket stabil tillväxt som kan få tillgodoräknas. / Sammanfattning och slutsatser. - Ändrat projektansvarig organisation från Det Norske Veritas till Inspecta Technology AB. / Hela rapporten.	Peter Dillström	2008-05-21

REFERENSER

- [1] MILNE, I., AINSWORTH, R. A., DOWLING, A. R., and A. T. STEWART., (1988), "Assessment of the integrity of structures containing defects", *The International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, p. 3-104.
- [2] ANDERSSON, P., BERGMAN, M., BRICKSTAD, B., DAHLBERG, L., NILSSON, F., and I. SATTARI-FAR., (1996), "A procedure for safety assessment of components with cracks — handbook", SAQ/FoU-Report 96/08, 3rd revised edition, SAQ Kontroll AB.
- [3] BRICKSTAD, B., and M. BERGMAN., (1996), "Development of safety factors to be used for evaluation of cracked nuclear components", SAQ/FoU-Report 96/07, SAQ Kontroll AB.
- [4] —, (1998), ASME Boiler & Pressure Vessel Code, 1998 Edition.
- [5] DILLSTRÖM, P., och P. ANDERSSON., (2001-03-26), "Ringhals 3 – Skadetålighetsanalys och brottsannolikhetsbedömning av funna defekter i svetsen mellan utloppsstuts och safe-end", Teknisk Rapport 10271300-1, Rev 3, Det Norske Veritas AB.
- [6] ÖBERG, H., (2001-03-12), "Brottmekanisk provning av Alloy 182", Rapport DNV0102, Rev. 010312, KTH, Hållfasthetslära.
- [7] BERGMAN, M., (1996), "User`s manual SACC version 4.0", SAQ/FoU-Report 96/09, SAQ Kontroll AB, 9p.
- [8] —, (2000), "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", R/H/6 - Revision 3, Up to amendment record No.11, British Energy Generation Ltd.
- [9] —, (1999), "Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry, SINTAP, Final Report", Editor BANNISTER, A. C., Report BE95-1426/FR, British Steel, Rotherham, United Kingdom, 75p.
- [10] —, (1999), "Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures", British Standard BS 7910:1999, British Standards Institution, 261p.
- [11] —, (2000), "Special Issue on Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry (SINTAP)", Guest Editor Webster, S., *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67, No. 6, p. 479-668.
- [12] SCHWALBE, K-H., ZERBST, O., BROCKS, W., CORNEC, A., HEERENS, J., and H. AMSTUTZ, (1996), "The engineering treatment model for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures", EFAM-ETM 95, GKSS Forschungszentrum.
- [13] AINSWORTH, B., (2000), "R6 Revision 4 Structure", R5 / R6 Newsletter, No. 21, British Energy Generation Ltd.

- [14] BAMFORD, W. H., TUNON-SANJUR, L., and R. HSU., (December 2000), "Integrity Evaluation for Future Operation: Virgil C. Summer Nuclear Plant Reactor Vessel Nozzle to Pipe Weld Regions", WCAP-15617, Rev. 0, Westinghouse Electric Company LLC.
- [15] —, (1991), "Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures", Published Document PD 6493:1991, British Standards Institution.
- [16] —, (1986), "Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping", Trans. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 108, p. 352-366.
- [17] LANDES, J. D., and D. E. MCCABE., (1986), "Toughness of Austenitic Stainless Steel Pipe Welds", EPRI NP-4768, Project 1238-2, Electric Power Research Institute.
- [18] BRICKSTAD, B., (1997), "Utvärdering av IPIRG-2 projektet", SAQ/FoU-Report 97/01, SAQ Kontroll AB, 27s.
- [19] —, (1988), "Evaluation of Flaws in Ferritic Piping", EPRI NP-6045, Project 1757-65, Electric Power Research Institute.
- [20] —, (2001), "ASME Section XI Meetings", Highlights 4th Quarter 2000, Electric Power Research Institute.
- [21] —, (2001-01-17), "Minutes of the December 11, 2000 Meeting in Nashville, TN", ASME, Section XI Working Group on Pipe Flaw Evaluation.
- [22] —, (2000), "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", ASTM Standard E 1820 – 99a.



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-post: registrator@ssm.se
Webb: stralsakerhetsmyndigheten.se