

# Erosionkorrosion

Behnaz Aghili

Maj 1999

# Erosionkorrosion

Behnaz Aghili

Statens kärnkraftinspektion  
Enheten för hållfasthet och material, 106 58 Stockholm

Maj 1999

# Innehållsförteckning

INNEHÅLLSFÖRTECKNING .....	3
SAMMANFATTNING.....	5
1. INLEDNING OCH MÅL .....	6
2. HISTORIK .....	7
3. BAKGRUND .....	8
3.1. JÄRNETS KORROSIONEGENSKAPER I VATTEN .....	8
4. FAKTORER SOM PÅVERKAR EROSIONKORROSION .....	11
4.1. MILJÖFAKTORER.....	11
4.1.1. <i>Flödets temperatur</i> .....	11
4.1.2. <i>Syrehalt och pH</i> .....	12
4.1.3. <i>Föroreningar i vatten</i> .....	15
4.2. HYDRODYNAMISKA FAKTORER.....	15
4.2.1. <i>Flödeshastighet, rörageometri</i> .....	15
4.2.2. <i>Fukthalt</i> .....	18
4.3. MATERIALETS KEMISKA SAMMANSÄTTNING .....	18
4.4. PÅVERKANDE FAKTORER, SAMMANFATTNING.....	20
4.5. ÄNDRINGAR I DRIFTFÖRHÅLLANDENA .....	20
4.5.1. <i>Ökad flödeshastighet</i> .....	20
4.5.2. <i>Korrigerig av rörageometrin</i> .....	20
5. OLIKHETERNA I DE MILJÖBETINGADE FÖRHÅLLANDENA I BWR OCH PWR .....	21
6. ÅTGÄRDER FÖR ATT UNDVIKA EC.....	22
6.1. KORRIGERING AV PH .....	23
6.2. TILLSATS AV SYRE .....	24
6.3. BYTE AV MATERIAL TILL EC-RESISTENT MATERIAL.....	25
6.4. KONSTRUKTIONSÄNDRINGAR OCH FÖRBÄTTRING AV GEOMETRIN .....	26
7. KONTROLL AV EROSIONKORROSIONSKÄNSLIGA OMRÅDEN.....	27
7.1. KONTROLLPROGRAM .....	27
7.1.1. <i>Val av inspektionsområden</i> .....	27
7.1.2. <i>Inspektionsmetod och acceptanskriterier</i> .....	28
7.2. INSPEKTIONSMETOD ENLIGT NUMARC .....	29
7.2.1. <i>Val av inspektionsområden</i> .....	29
7.2.2. <i>Acceptanskriterier</i> .....	29
7.2.3. <i>Inspektionsschema</i> .....	30
7.3. DE SVENSKA VERKENS INSPEKTIONSMETODER .....	30
8. BERÄKNINGSMODELLER FÖR EC.....	31
8.1. CHECK OCH CHECKMATE .....	31
8.2. WATHEC, ( <u>W</u> ALL <u>T</u> HINNING DUE TO <u>E</u> ROSION <u>C</u> ORROSION) .....	33
8.3. GRUNDERNA FÖR DATAPROGRAMMEN .....	33
8.3.1. <i>EDF-modellen</i> .....	33
8.3.2. <i>Kastner-modellen</i> .....	34
8.3.3. <i>Virginia Power Company Method</i> .....	34
8.3.4. <i>KWU-metoden</i> .....	35
8.3.5. <i>BRT-CICERO Koden</i> .....	35
9. INTRÄFFADE HÄNDELSER.....	37
9.1. SURRY-2 .....	37
9.2. OCONEE-2.....	37
9.3. TROJAN.....	37

9.4. LOVIISA 1 OCH 2.....	38
<b>REFERENSFÖRTECKNING:.....</b>	<b>40</b>
<b>BILAGOR .....</b>	<b>43</b>
BILAGA 1: DATABAS; PIPING FAILURES .....	43
BILAGA 2: DATABAS; STRYK.....	43

# Sammanfattning

Denna rapport innehåller en beskrivning av den mekanism som ligger bakom fenomenet erosionkorrosion och de händelser som har varit anledning till att detta fenomen har fått stor uppmärksamhet och har studerats grundligt.

Rapporten beskriver också de olika faktorer som påverkar erosionkorrosion och vilka åtgärder som kan vidtas för att eliminera eller mildra effekten av denna skademekanism. Olika materials beständighet mot erosionkorrosion belystes också i möjligaste mån.

Effekten av ändringar i driftförhållandena kan vara av särskilt intresse då en strävan mot effektivisering av energiproduktionen har märkts hos kraftindustrin under de senaste åren. I detta sammanhang kan ökning av flödes hastigheten vara ett intressant alternativ. Degradering på grund av erosionkorrosion ökar olika mycket för olika material, när flödes hastigheten ökar. Vid beräkning av flödes hastigheten måste dessutom den aktuella geometrin och eventuella turbulenser på grund av denna beaktas. Dessa förhållanden behandlas i rapporten men mera ingående undersökningar och forskningsinsatser kan vara nödvändiga.

Rapporten tar också upp ett antal kontrollprogram för erosionkorrosion och berör kortfattat de program som används i svenska anläggningar vilket i författarens tycke behöver undersökas och belysas mera grundligt.

På marknaden finns det flera datorprogram för identifiering av utsatta punkter och kontroll av erosionkorrosion. Ett par av dessa berörs i rapporten. Även de teoretiska modeller som ligger till grund för dessa program behandlas.

Ett par exemplar av de databaser som behandlar de rapporterade skadorna orsakade av erosionkorrosion, vilka har tagits fram hos SKI, finns som bilagor (bilagor 1 och 2).

# 1. Inledning och mål

En litteraturstudie har genomförts om erosionkorrosion (EC) eller strömningsinducerad korrosion i kärnkraftindustrin. Målet med studien har varit att ge en aktuell bild av denna degraderingsmekanism och därmed belysa följande:

1. de faktorer som påverkar EC,
2. metoder att förhindra eller minska EC i kärnkraftverken,
3. EC-hastighetens materialberoende,
4. de inträffade händelserna, både i svenska och utländska kärnkraftverk,
5. faktorer som behöver beaktas för att få effektiva kontrollprogram,
6. de svenska verkens kontrollprogram kontra de utländska.

Littratorsökningen genomfördes med hjälp av Studsvikbiblioteket. Över 150 artiklar gick igenom varav 32 klassades som mycket intressanta och användbara artiklar, och har använts för sammanställning av denna rapport. Trots den omfattande mängden av artiklar har det varit svårt att få information i vissa områden.

## 2. Historik

Erosionkorrosion (EC) av rör tillverkade i kolstål och låglegerat stål har sedan länge varit ett känt problem i kärnkraftverken, speciellt i tryckvattenreaktorer, PWR, och i tvåfasset system. Fenomenet fick helt andra dimensioner efter det att ett rör i enfasset systemet, plötsligt gick av i Surry (USA) och ledde till flera människors död. Denna händelse följdes av att tillsynsmyndigheten Nuclear Regulatory Commission (NRC), krävde att den amerikanska kärnkraftindustrin skulle redovisa sina metoder för kontroll och åtgärd av EC. Sammanställning av industrins redovisning visade att problemet var både känt och frekvent. Det noterades också ett stort behov av att förstå orsakerna till fenomenet och att utveckla metoder för att undvika, åtgärda och kontrollera EC i rör tillverkade i kolstål och låglegerat stål.

Flera olika forskningsprogram sattes igång för att belysa problemet och för att åstadkomma tillförlitliga kontrollmetoder och inspektionsprogram. Man kan säga att de största insatserna gjordes under slutet av 80-talet och början av 90-talet. Dessa insatser har resulterat i att förståelsen för fenomenet har ökat väsentligt. Nu för tiden vet man ganska säkert varför EC uppträder, vilka komponenter som är mest utsatta för mekanismen och hur denna kan undvikas.

Dessutom utvecklades kontrollsystemet genom att de s k ASME normerna kompletterades dels med Code Case N-480 och dels ett nytt avsnitt ASME Sektion XI som även beskriver hur skadorna ska bedömas och när de ska åtgärdas. Det utvecklades också flera beräkningsmodeller och dataprogram för att kontrollera och bygga upp en bra inspektionsprogram.

Det bör ändå påpekas att problemet därmed inte är löst. Detta beror på att driftförhållandena i kärnkraftverken är sådana att det inte går att undvika erosionkorrosion helt och hållet. När man ändrar förhållandena, t ex om man i strävan att förbättra verkningsgraden ökar flödes hastigheten, försämras driftförhållandena på sådant sätt att ökade skador på grund av erosionkorrosion kan förväntas. Alla dessa faktorer gör att problemet i högsta grad är aktuellt även idag.

## 3. Bakgrund

Kolstål och låglegerat stål används som rörmaterial i många kärnkraftverk. Bruket av dessa material i korroderande miljöer är möjligt då ett skyddande oxidskikt bildas på metallytan efter det att metallytan har exponerats för den korroderande miljön en kort tid. Om oxidskiktet är tillräckligt tjockt och förblir intakt stannar korrosionen av. Bildas det ett tunt och poröst oxidskikt eller om oxidskiktet av någon anledning avlägsnas från ytan, fortgår korrosionen tills all metall är förbrukat eller tills korrosionsförhållandena förändrats radikalt.

I vattenmiljöer med låga flödes hastigheter är korrosionsegenskaperna av kolstål och låglegerat stål direkt kopplade till magnetitens löslighet i vattnet. Uppbyggnad av magnetit kräver tillgång på löst syre, det vill säga är direkt beroende av vattnets syrehalt. Magnetitens löslighet når ett maximum i vatten med mindre än 3 ppb  $O_2$  vid ca 100 °C. Först när syrehalten överskrider 15 ppb  $O_2$  är uppbyggnad av **ett fullständigt skyddande magnetitskikt** och en effektiv minskning av järnhalten i vätskan, möjligt, ref 8.

### 3.1. Järnets korrosionsegenskaper i vatten

Järn upplöses och bildar järnhydroxid,  $Fe(OH)_2$ , i vatten med små halter av löst syre och vid temperaturer lägre än 100 °C. Då järnhydroxiden karakteriseras av hög porositet, bristfällig vidhäftning vid metallytan och dåliga mekaniska egenskaper, utgör den ett tämligen dåligt skydd mot den fortsatta korrosionen.

Vid temperaturer över 100 °C bildas  $Fe(OH)_2$  snabbare och omvandlas därefter till magnetit,  $Fe_3O_4$ .

Vid ännu högre temperaturer (överstigande 200 °C) bildas magnetiten direkt vid kontaktytan mellan metall och oxid. Denna typ av magnetit är normalt mer tätslutande och ger ett bättre skydd mot vidare korrosion än den magnetit som bildas via järnhydroxid.

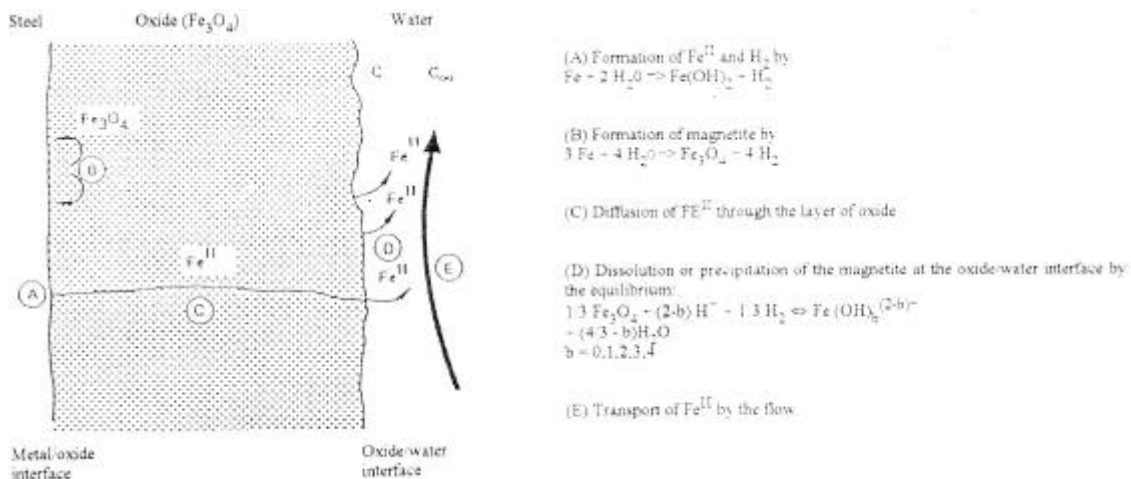
Alla ovannämnda processer är beroende av Fe-jonernas diffusion ut ur metallen till gränsytan metall/vätska. När flödes hastigheten är låg blir vätskan i omedelbar närhet av oxidskiktet, snabbt mättad på Fe-jonerna. Detta leder till att ett yttre skikt av magnetit kärnbildas och växer ovanpå det inre oxidskiktet. Resultatet blir ett oxid bestående av två skikt där det innersta skiktet växer in i metallen i takt med att den oxiderar. Närvaro av löst väte och rådande pH i miljön, avgör om magnetitskiktet växer vid kontaktytan oxid/vätska eller om det löses upp och omvandlas till järnhydroxid.

Vid låg flödes hastighet eller vid stagnerad vätska, och när atomisk väte kan diffundera in i metallen, bildas ett tätt, icke poröst oxidskikt som försvårar vidare korrosion av den underliggande metallen. Med hög vätehalt men i övrigt samma förhållanden, bildas ett poröst oxidskikt som tillåter fortsatt korrosion av metallen.

Ovanstående diskussion är grunden för förståelsen av fenomenet EC. Under åren har flera olika mekanismer diskuterats som anledning till EC. Den mest accepterade



mekanismen, för erosionkorrosion av kolstål i syrefattigt vatten vid högtemperatur och hög flödes hastighet, är upplösningen av magnetitskiktet och bortförslagen av de resulterande  $\text{Fe}^{2+}$ -jonerna genom masstransport. Om bortförslagen av  $\text{Fe}^{2+}$ -jonerna accelereras på grund av hög flödes hastighet, fortsätter upplösningen av magnetitskiktet med fortsatt korrosion av den underliggande metallen som följd. Under dessa förhållanden bildas inget yttre oxidskikt. EC uppträder då det magnetitskikt som bildas upplöses omedelbart vilket resulterar i en fortgående metallförlust då metallen fortsätter att oxideras för att ersätta det upplösta oxidskiktet, ref 8. Figur 1, nedan åskådliggör ovanstående resonemang, ref. 9.



Figur 1: Den kemisk-fysikaliska mekanismen för erosionkorrosion (ref. 9).

Antar man att hela processen styrs enbart av masstransport i vätskan, kan metallförlusten beskrivas med hjälp av följande ekvation:

$$dm/dt = K(C-C_b)$$

där  $C$  är  $\text{Fe}^{2+}$ -jonernas koncentration i vätskan vid gränsytan oxid/vätska,  $C_b$  är koncentrationen av  $\text{Fe}^{2+}$ -jonerna i hela vätskan och  $K$  är koefficienten för masstransport.  $K$  varierar med de lokala hydrodynamiska förhållandena.

Med detta resonemang som bakgrund, är det möjligt att diskutera de olika faktorer som påverkar förekomst av EC. Dessa faktorer kan klassas enligt följande:

1. hydrodynamiska faktorer (flödes hastighet, rörageometri)
2. miljöfaktorer (temperatur, pH, syrehalt, andelen föroreningar i vattnet)
3. metallurgiska faktorer (huvudsakligen stålets sammansättning och dess halt av legeringsämnen), ref 8.

Bland andra mekanismer som har diskuterats som orsak till att oxidskiktet slits bort kan borttagning genom mekaniska krafter (t ex kollision av vattendroppar på ytan), eller effekten av eroderande partiklar nämnas. Eroderande partiklar förekommer nästan aldrig i det högre vattnet i kärnkraftverken. Teorin om vattendroppar har inte heller kunnat bevisas då det inte har varit möjligt att påvisa några tecken på mekanisk påverkan på det underliggande materialet, där man har undersökt ytor med EC-angrepp. Det faktum att EC även i tvåfasset, inträffar enbart i närvaro av våtånga visar att förekomst av en vattenfilm är nödvändigt för processen. Det höga pH- och syrehalt-beroendet förstärker också teorin med upplösning av oxidskiktet och dess bortförel med hjälp av vattenflödet, ref. 3.

## 4. Faktorer som påverkar erosionkorrosion

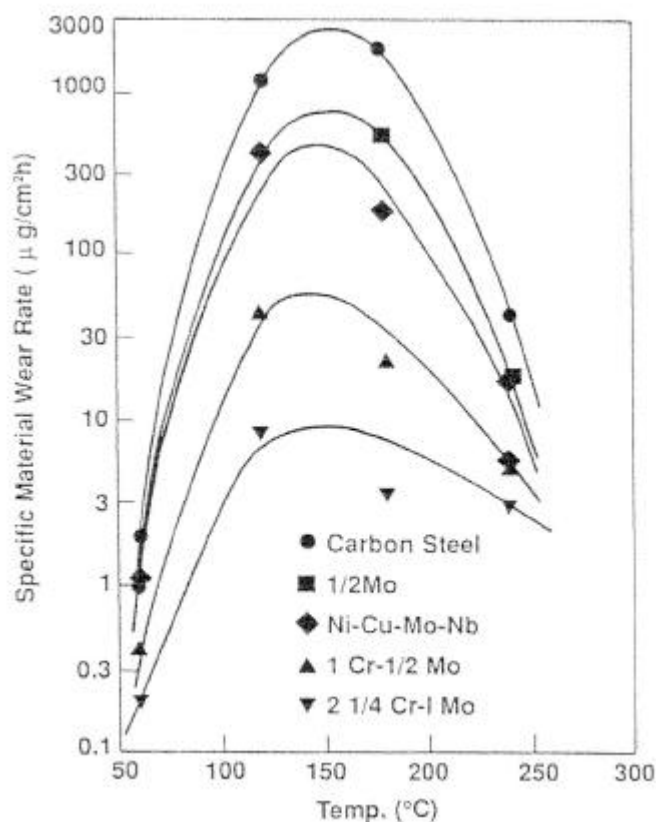
Som påpekades ovan kan man, med utgångspunkt från magnetitens upplösning, transport av  $\text{Fe}^{+2}$ -joner (masstransport) och oxidskiktets egenskaper, dela in de faktorer som påverkar EC i tre huvudgrupper. Dessa grupper behandlas mera ingående nedan.

### 4.1. Miljöfaktorer

Miljöfaktorer påverkar erosionkorrosionshastigheten genom att de påverkar magnetitens löslighet.

#### 4.1.1. Flödets temperatur

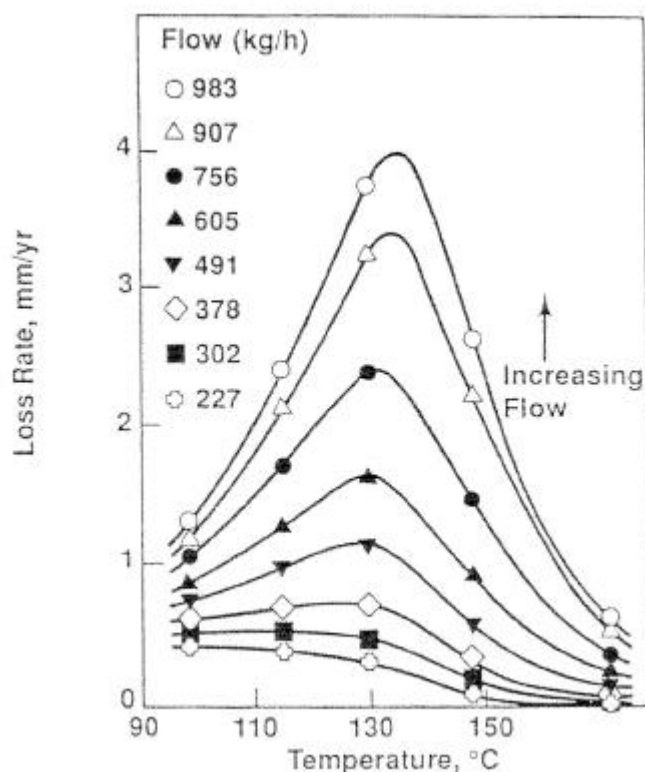
Avverkning genom EC visar ett starkt temperaturberoende. De flesta rapporterade skadorna på grund av EC i enfasströmning har inträffat i temperaturområdet 80 till 230 °C. För tvåfas strömning ligger temperaturområdet något högre, 140-260 °C. Laboratieförsöken har visat att EC minskar drastiskt i både högre och lägre temperaturer än ovannämnda, med en markant topp däremellan. Den exakta placeringen av maximum ser ut att variera med pH och andra miljöfaktorer men i enfasströmning uppnås största avverkningen genom EC vid ca 130-150 °C och för tvåfas strömning vid ca 180 °C, ref 8. Figur 2 och 3 nedan visar temperaturberoendet för olika material i BWR- (fig. 2) och PWR-miljö (fig. 3)



Figur 2: Effekten av temperatur och legeringshalt på erosionkorrosion vid:

- $\text{pH}=7$
- $\text{flödes hastighet}=35\text{m/s}$
- $\text{Syrehalt}< 40\text{ppb}$

(ref. 7)



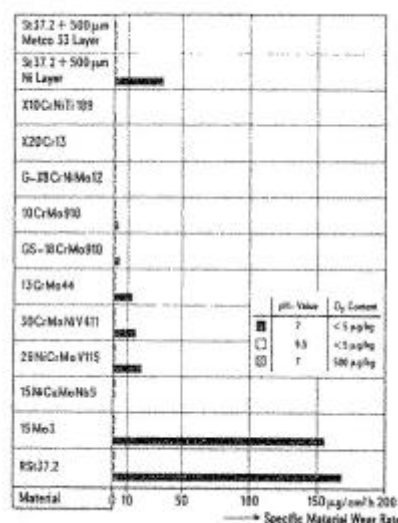
Figur 3: Effekten av temperatur på erosionkorrosion för kolstål vid pH=9,05 (ref. 7).

Temperaturberoendet har förklarats på många olika sätt. I ett förslag förklaras den lägre graden av EC vid högre temperaturer med magnetitens avtagande löslighet vid dessa temperaturer. Vid lägre temperatur förklaras detsamma med att lösligheten är kinetisk begränsad på grund av hög löslighetsjämvikt. En annan model föreslår att låg EC vid låga temperaturer beror på löslighetskinetiken, medan det snabba avtagandet av EC vid höga temperaturer föreslås bero på mindre poröst oxid som förhindrar korrosionsmediet att nå metallytan, ref 8, 3, 4.

#### 4.1.2. Syrehalt och pH

I neutralt vatten som innehåller lägre än 5 µg/kg löst syre är EC högst för alla material. Tendensen till EC blir lägre när vattnets pH ökar till 9,5 med bibehållet syrehalt. Detsamma gäller om syrehalten ökar dramatiskt (till 500 µg/kg) i neutralt vatten, se vidstående figur.

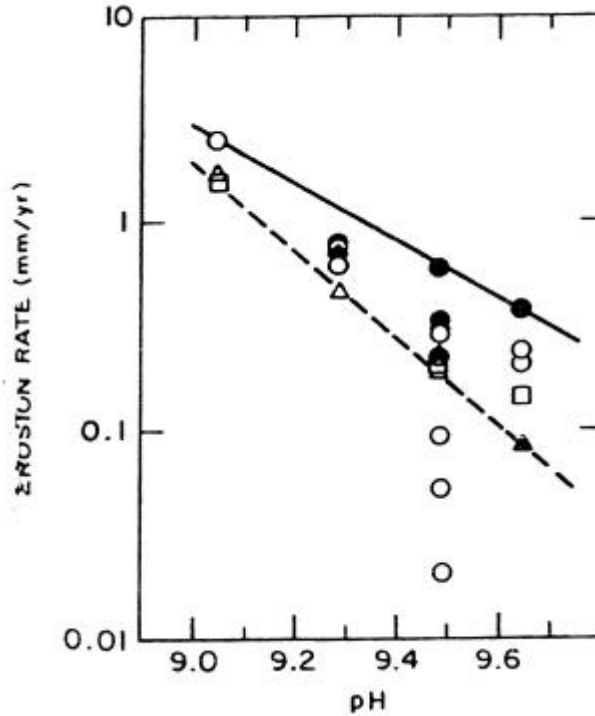
Med andra ord är avverkningsgraden genom erosionkorrosion, för ett visst material, starkt beroende av vattnets pH och syrehalt. Små halter av löst syre (i storleksordningen 2-10 ppb), i vatten med ammoniak tillsats (pH ~ 9 vid 25 °C), har visat sig att ha en mycket dramatisk fördröjande effekt på EC. I neutralt vatten har ännu lägre halter av löst syre visat sig att ha en förmildrande effekt på EC i kolstål.



Figur 4: materialavverknning p.g.a. EC för olika material p=40 bar, T=180 °C, v=20m/s

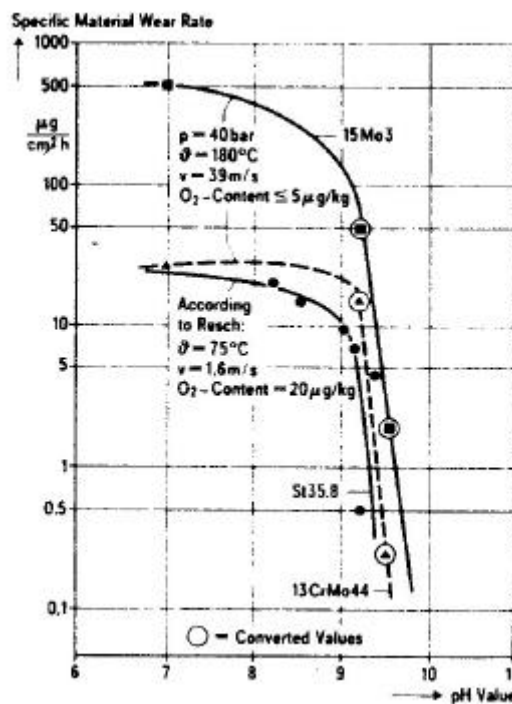
Tröskelvärde för halten löst syre som åstadkommer detta i neutralt vatten, är inte lika välkänt som tröskelvärde för alkaliskt vatten.

Figur 5 nedan visar effekten av pH på EC för en komponent tillverkad i kolstål i syrefritt vatten och vid 148 °C.



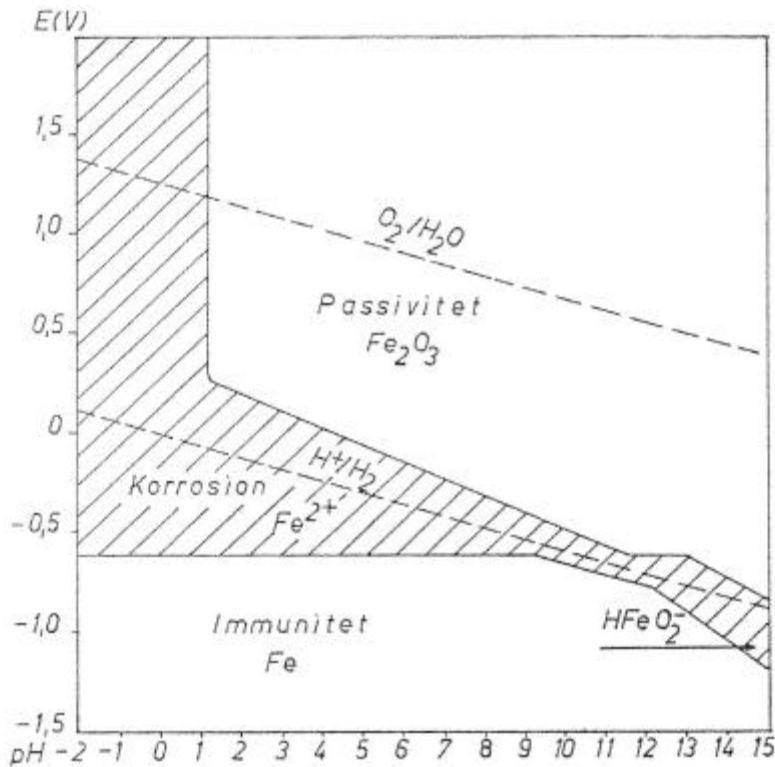
Figur 5: Effekten av pH på erosionkorrosion för kolstål (ref. 8).

Figur 6 visar effekten av pH på EC för olika material och under olika förhållanden. Notera att i figur 6 är kurvan för kolstål St 35.8, framtaget med lägre flödes hastighet än de andra två materialen.



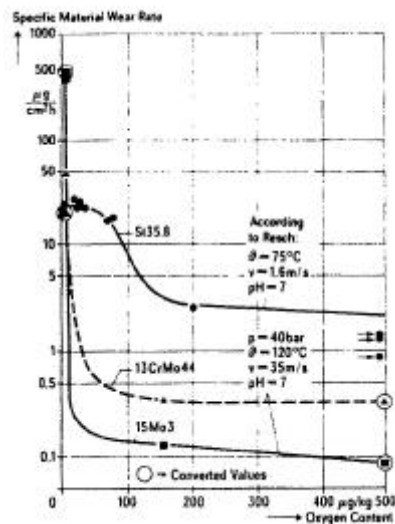
Figur 6. Effekt av pH på erosionkorrosion för olika material (ref. 8).

Erosionkorrosionens pH-beroende följer i stort samma mönster som pH-s inverkan på magnetitens löslighet och kan även förklaras med hjälp av järnets potential-pH-diagram, se fig. 7.



Figur 7: Järnets potential-pH diagram (ref. 2).

Effekten av löst syre på EC kan förklaras genom dess påverkan på oxidskiktet. I närvaro av syre består skiktet förutom magnetit även av hematit. Eftersom hematitens löslighet är mycket lägre än magnetitens, blir oxidskiktet mer resistent mot EC, ref. 3, 4, 6, 8. Se figur 4 ovan. Figur 8 nedan visar erosionskorrosionens beroende av syrehalt för olika material.



Figur 8. Effekt av syrehalt på erosionkorrosion för olika material (ref. 1).

Det bör påpekas att i tvåfasssystem är det vätskefasens pH som är kritisk. Detta kan påverkas starkt av olika modifieringstillsetser och deras tendens att anrikas i vätske- eller ångfasen.

### 4.1.3. Föroreningar i vatten

Hittills har inga undersökningar studerat effekten av föroreningar i vatten på EC. Det kan förväntas att anjoner som  $\text{Cl}^-$  eller  $\text{SO}_4^{2-}$ , som påverkar magnetitens löslighet påverkar även EC. Vilka föroreningar som helst som bidrar till att magnetit löses upp och bildar järnhydroxid, bidrar också till ökning av EC. Detta gäller speciellt för sura joner i neutralt matarvatten. I kärnkraftverken kan det vara särskilt allvarligt med luftläckage genom condensatorn, eftersom möjligheten att  $\text{CO}_2$  blandas i vattnet är inte försumbar då.  $\text{CO}_2$  kan bildas även genom sönderfall av ättiksyra eller andra organiska föroreningar. Organiska syror som ättiksyra är mycket stabila även i höga temperaturer och tillräcklig sura för att öka magnetitens löslighet, ref. 8,4.

## 4.2. Hydrodynamiska faktorer

### 4.2.1. Flödes hastighet, rörgeometri

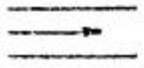

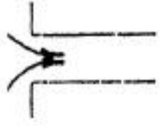
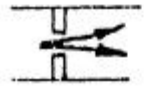

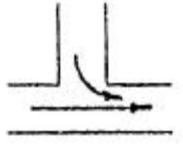
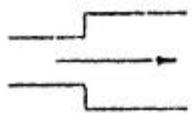
Som påpekades tidigare är transport av  $\text{Fe}^{2+}$ -joner en nyckelfaktor i EC-processen. De hydrodynamiska faktorerna, det vill säga flödes hastigheten och rörgeometrin (turbulens), påverkar transporten av  $\text{Fe}^{2+}$ -jonerna och därmed har stor effekt på EC.

Flödets effekt förklaras bäst genom koefficienten för masstransport,  $k$ , som är en funktion av flödets hastighet och temperatur och rörgeometrin. Vid nominellt flödeskondition för rör i PWRs sekundärsystem har  $k$  ett värde mellan  $1-3 \text{ mm s}^{-1}$ .

När turbulensen ökar på grund av rörgeometrin blir också den effektiva koefficienten för masstransport högre än den som gäller för rårör. De flesta upptäckta EC-skador har också inträffat där flödets väg har ej varit kontinuerlig. Det finns en del tillgänglig data som relaterar koefficienten för masstransport till flödets hastigheten och geometrin för en del konfigurationer. Nämnade data föreslår att vid kopplingar, T-stycken och knän, kan  $k$  bli 1-5 ggr större än  $k$  för rårör. Att hitta en giltig  $k$  är emellertid mycket svårt för de flesta rörgeometrier.

Tabell 4.1, nedan visar några exempel på rörkonfigurationer och k-värdet för dessa konfigurationer.

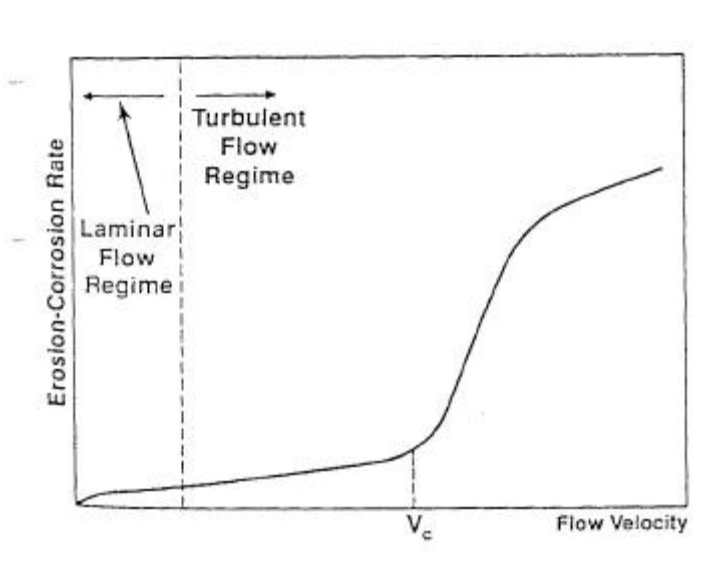
Tabell 4.1(ref. 13).

	Pipework Configuration	Reference Flow	Maximum Local Mass Transfer Coefficient Enhancement, $E_{FLG}$ (compared to straight pipe)	Reference
Straight Pipe		Pipe flow	1	
Smooth Bend		"	1.7 max. (see footnote)	Coney, 1981
Pipe Entry		Downstream pipe	2.3 max.	"
Post-Orifice*		"	3 to 4 (varies with orifice shape & Reynolds No.)	Coney, 1981,
T-piece		"	2.5 max.	Assumed same as pipe entry
T-piece		"	2.0 max.	Sparrow and Kemink, 1979
Pipe-Expansion		"	2.0 max. (varies with shape of expansion and Reynolds No.)	Sydberger and Lotz, 1982

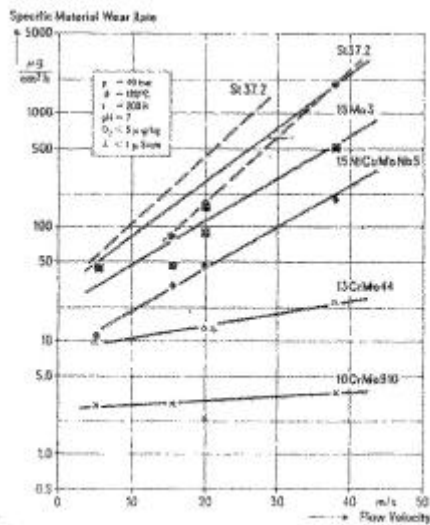
Allmänt gäller att koefficienten för masstransport är högre i tvåfasset än i enfasset vid samma masstransporttal. Detta beror på att tvåfassetets lägre densitet leder i allmänhet till högre flödes hastigheter.



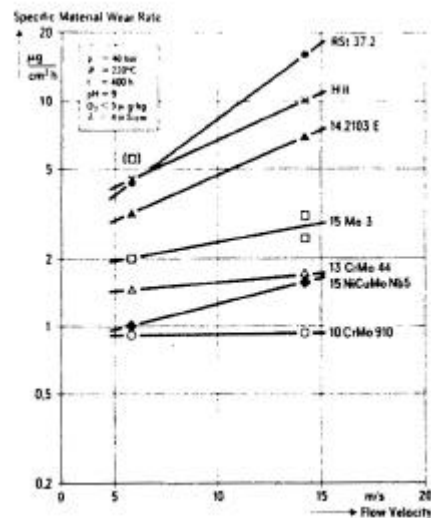
Figur 9, 10 och 11 visar hur avverkningshastigheten ökar med ökande flödes hastighet i olika miljöer. Av figur 11 och 12 framgår också att effekten är betydligt större på kolstål och stål legerade med 0,5% Mo än stål innehållande 1% Cr eller mer, ref 1, 4.



Figur 9: Schematiskt diagram som visar effekten av flödes hastigheten på EC (ref. 8).



Figur 10: Effekten av flödes hastighet på EC, alkaliskt vatten (ref. 1).



Figur 11: Effekten av flödes hastighet på EC vid pH=7 (ref. 1).

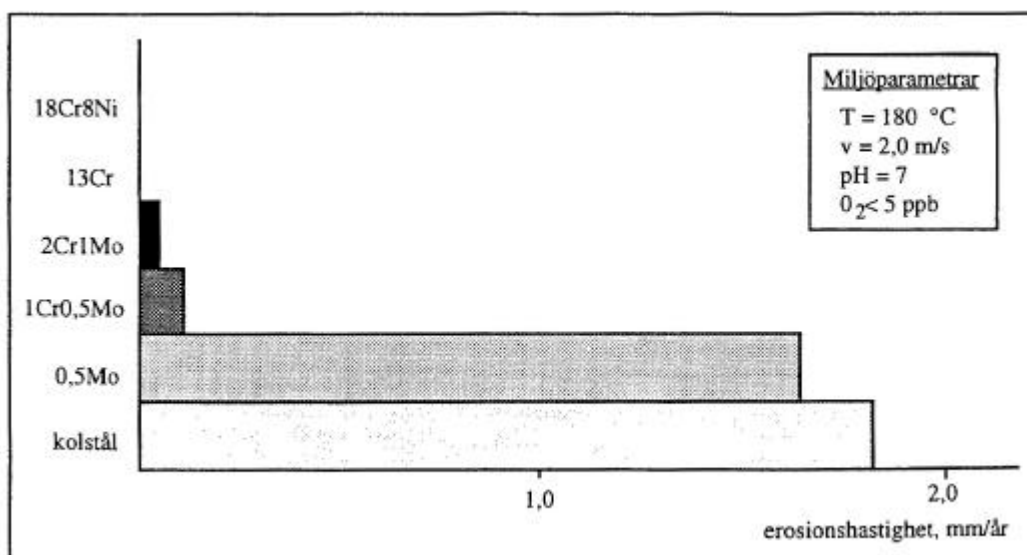
De flesta experimentella resultat understryker effekten av flödes hastighet. Man bör alltid vara medveten om att flödes hastigheten i en komponent behöver inte vara, och sällan är, densamma som systemet flödes hastighet i medeltal, utan är en lokal hastighet. När den lokala hastigheten anges ska man ta hänsyn till rörgeometrin och eventuell turbulens orsakad av den. Inspektionsrapporter tyder på att EC är mest förekommande där den lokala flödes hastigheten är hög, t ex vid T-stycken, böjar och dylikt, ref 5.

#### 4.2.2. Fukthalt

EC har inte påträffats i något system med torr ånga. På grund av detta anser man att förekomst av vatten är en av de viktigaste anledningarna till EC i tvåfasssystem. Rapporter från oförstörande provning i anläggningarna, tyder på att EC-skador förekommer på system med så låga fukthåll som 2 procent. Enligt dessa rapporter är EC mera omfattande ju högre fukthalten är, ref 5.

### 4.3. Materialets kemiska sammansättning

Förutom miljöbetingade och hydrodynamiska faktorer som diskuterades ovan, är avverkningsgraden genom EC starkt beroende av materialets kemiska sammansättning. Medan kolstål är mycket känsligt för EC är låglegerade stål med några procent Cr, Mo och Cu betydligt mindre känsliga och rostfria stål i princip immuna mot EC. Figur 12 visar erosionshastigheten, mm/år, för några olika stålsorter, se även fig.4 och 8 ovan, ref. 4, 8, 3, 5.

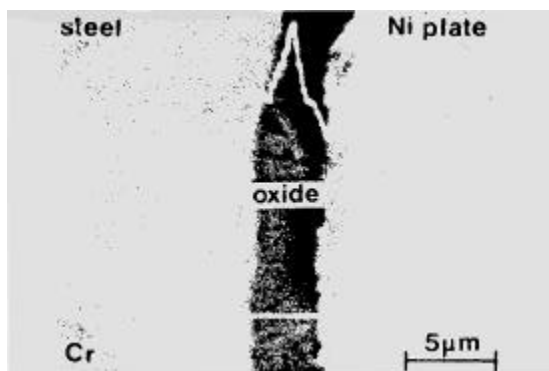


Figur 12: Härdighet mot erosionkorrosion (ref. 4).

Den kemiska sammansättningen påverkar oxidskiktets kvalitet och löslighet i den rådande miljön. Hos kolstål som är utsatt för neutralt vatten bildas ett poröst och lättlösligt magnetiskt skikt. Oxidskiktet hos rostfritt stål i samma miljö, består däremot av ett tätslutande, svårlösligt skikt som är rikt på kromoxider.

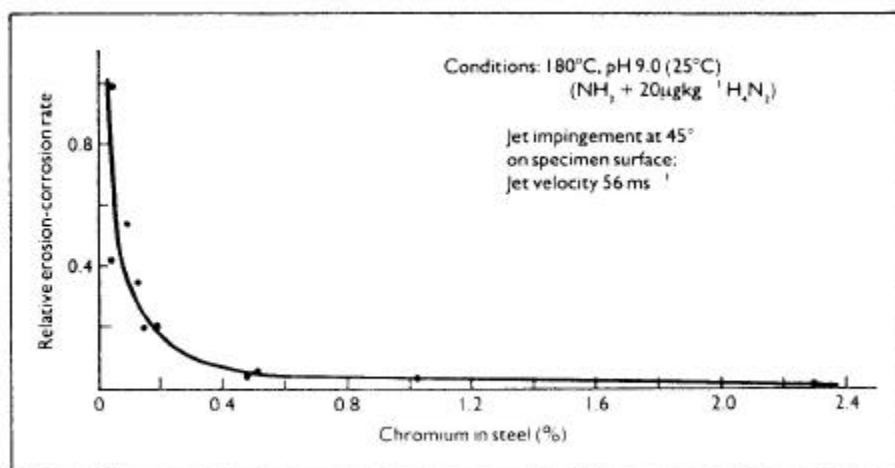
Även vid förhållandevis små mängder av legeringsämnen i materialet blir det betydligt mindre känsligt mot EC. Detta gäller speciellt när materialet är legerat med krom. Kromhaltens tydliga effekt på EC har förklarats med att detta ämne anrikas i oxidskiktet. Oxidskiktet som bildas är då rikt på krom och därmed svårlösligt och beständigt mot EC, ref. 8, 4, 3, 14, 15.

Figur 13 visar en EPMA linjescanning med hänsyn till krom. Som synes är kromhalten i oxidskiktet betydligt högre än i stålet i övrigt.



Figur 13: EPMA linjescan, krom (ref. 15).

Figur 14 visar effekten av stålets kromhalt på avverkningsgraden genom EC. Även andra legeringsämnen, t ex molybden och koppar, har visat sig att minska avverkningsgraden. Mekanismen enligt vilken dessa legeringselement påverkar EC har inte klarlagts. Å andra sidan är deras effekt på EC betydligt mindre uttalat, ref 3.



Figur 14: Effekten av kromhalt på EC för kolstål samt låglegerat stål (ref. 28).

Fälterfarenheter visar att när stålet innehåller 0,02% krom eller mindre, är EC-resistensen liten. Med andra ord är erosionkorrosionangreppen med stor sannolikhet fokuserade på dessa rörsystem, ref 5.

Olika rörsystem i samma verk eller liknande rörsystem i olika verk har visat stora skillnader i förmågan att motstå erosionkorrosion. Detta gäller främst rörsystem tillverkade i kolstål. Som påpekades ovan kan små mängder av legeringsämnen, som Cr, Mo och Cu, ha en avgörande effekt på materialets resistens mot EC. Effekten är särskilt uttalad när det gäller Cr. I kolstål förekommer dessa ämnen som föroreningar vilka ståltillverkaren försöker att bli av med under tillverkningsprocessen. Hur stor mängd av nämnda ämnen som är kvar i materialet beror på hur pass bra man har lyckats med reningsprocessen under ståltillverkningen. Detta betyder att föroreningsmängden i samma stålqualität kan variera från tillverkare till tillverkare och från charge till charge hos samma tillverkare. Dessutom kan små mikroskopiska variationer förekomma i

samma charge, på grund av segringar och dylikt. Dessa variationer kan leda till mycket lokala angrepp i samma rör.

## 4.4. Påverkande faktorer, sammanfattning

Följande tabell är en sammanfattning av de påverkande faktorer och deras effekt på avverkningsgraden på grund av erosionkorrosion, ref 7, 17:

Påverkande faktorn	Avverkningsgraden p g a EC ökar om den påverkande faktorn är
Flödes hastighet	högre
Flödets pH	lägre
Flödets syrehalt	lägre
Flödestemperatur	120-200 °C
Komponentens geometri	så att den orsakar turbulens
Materialets Cr-halt	lägre
Materialets Mo-halt	lägre
Materialets Cu-halt	lägre
Fukthalt (endast i tvåfasssystem)	högre

## 4.5. Ändringar i driftförhållandena

Med hjälp av de påverkande faktorer som har beskrivits ovan ska effekten av eventuella ändringar i driftförhållandena, i strävan att öka verkningsgraden, belysas här. De driftförhållanden som överhuvudtaget kan ändras är ökning av flödes hastighet eller ändringar i rörkonfigurationen. De andra parametrarna kan oftast av driftekniska skäl inte ändras nämnvärt.

### 4.5.1. Ökad flödes hastighet

Att öka flödes hastigheten i rören kan låta lockande i detta sammanhang. Figur 10 och 11 visar hur avverkningsgraden på grund av erosionkorrosion påverkas av ökande flödes hastighet för olika material. Medan kolstålets (RSt 37.2, H11, 14.2103 E) avverknings hastighet ökar dramatiskt med ökande flödes hastighet, förblir avverknings hastigheten nästan konstant för rostfritt stål. Ökning av flödes hastighet i de system där rör tillverkade i kolstål förekommer, kan med andra ord ha ödesdigra konsekvenser ur erosionssynpunkt.

### 4.5.2. Korrigering av rörgeometrin

En annan åtgärd som kan vidtas, för att förbättra verkningsgraden, är korrigeringar av rörgeometrin. Om rörgeometrin förändras på sådant sätt att turbulens minskar förbättras även verkningsgraden. Den minskade turbulensen betyder också att den lokala flödes hastigheten minskar med bättre resistens mot erosionkorrosion som följd.

## **5. Olikheterna i de miljöbetingade förhållandena i BWR och PWR**

De miljöbetingade förhållandena i kokvattenreaktorer (BWR) och tryckvattenreaktorer (PWR) skiljer sig i vissa avseenden.

Neutralt vattenkemi, pH 7, råder i större delen av rörsystemet i BWR-anläggningar. Dessutom har primärsystemet en hög syrehalt (10-20 ppm).

I en PWR-anläggning kan pH-värdet i stora delar av rörsystemen regleras så att värdet överstiger pH 9. Syrehalten i PWR hålls däremot ofta mycket låg i avsikt att undvika korrosion i ånggeneratorernas olika delar, ref 4, 6.

## 6. Åtgärder för att undvika EC

Som sagts tidigare påverkar följande parametrar graden av EC:

- fukthalt
- temperatur
- syrehalt
- flödets pH
- flödets hastighet och rörgeometri
- materialets sammansättning

Bland de nämnda faktorerna erbjuder följande faktorer de största möjligheterna i kampen mot EC:

- korrigering av pH (enbart PWR),
- tillsats av syre (enbart BWR)
- byte av material mot ett material med bättre resistens mot EC,
- förbättring av flödets väg, geometri

Ändring i driftförhållandena t ex fukthalt, temperatur och hastighet erbjuder inte så stora förbättringar eller rent av är inte möjliga av ekonomiska och/eller drifttekniska skäl. Att separera bort fukten med hjälp av separatorer eller att ändra temperaturen erbjuder inte så stora förbättringar då dessa parametrar inte kan korrigeras i stor skala. Även om fuktseparatorer installeras i varje enhet förbättras inte situationen i stor skala. Ändring av systemets temperatur är också omöjlig på grund av de termodynamiska förhållandena. Att minska flödes hastigheten är inte så populärt då det betyder försämrad ekonomi. En höjning av syrehalten genom injektion av syre i systemet har sina begränsningar både i BWR och PWR. Även om högre syrehalter i BWR har visat sig vara fördelaktigt ur EC-synpunkt, leder det till sämre förhållanden för interkristallin spänningsskorrosion (IGSCC). I PWR kan högre syrehalt påverka ånggeneratorns rörsystem negativt om kopparlegeringar förekommer i dessa. Att uppnå höga syrehalter i systemet är dessutom svårt i praktiken. Orsaken är att mängden syre som måste tillsättas blir väldigt stor då syrets löslighet i vatten avtar med ökande temperatur, ref. 5, 16.

De modifikationer som kan vidtas för att förbättra systemets EC-resistens diskuteras mer i detalj nedan.

## 6.1. Korrigering av pH

Korrigering av pH till högsta möjliga värde i PWR-anläggningar är ett attraktivt sätt för kontroll av EC, då det är ett relativt enkelt metod för att förlänga det befintliga rörsystemets livslängd. Resultaten från flera olika projekt har, som framgått tidigare, visat att med ökad pH minskar EC.

Korrigering av pH är inte möjlig i BWR-anläggningar då dessa system kräver drift vid pH-neutralt vatten.

Forskningsorganisationen Electric Power Research Institute (EPRI) rekommenderar pH-värden mellan 8,8-9,6 för PWR. Det maximala tillåtna pH-värdet för varje anläggning beror förstås på de förhållanden som råder i den aktuella anläggningen och vilka material som finns representerade i huvudsystemet. I system bestående av enbart stål, kan pH mellan 9,3-9,6 användas. När koppar förekommer i systemet måste pH-värdet hållas vid 8,8-9,2 för att undvika korrosion av kopparrören. Kopparrören korroderar när pH är högre än 9 (8,8-9,2). Ett alternativ kan vara att byta kopparrören mot titanrör i kondensatorn. När titan används i stället för koppar, finns det inga korrosionsproblem även om pH överstiger 9. Rör tillverkade i titan används redan i kondensatorer i några verk och mer omfattande användning förväntas i framtiden, ref 7, 5, 6, 19.

Korrigering av pH i PWR görs genom tillsats av ammoniak eller morfolin till systemet. De flesta forskare är överens om att morfolin är att föredra som pH-reglerande tillsats då den resulterar i högre pH vid förhöjd temperatur. Vid tillsats av morfolin och ammoniak i syrefritt vatten så att samma pH erhöles vid 25 °C, blev pH-värdet vid 225 °C högre med morfolin jämfört med ammoniak. Detta ledde till lägre avverkning genom EC i rörsystemet (ca 5 ggr lägre), ref.8. En annan orsak, till de bättre erhållna resultaten med morfolin, är att morfolin fördelar sig jämnare mellan vatten och ånga i tvåfasssystem. Ammoniak anrikas däremot främst i ångan i sistnämnda system, ref 6, 7, 8.

Hydrazin har tillsats i PWR-anläggningar för kontroll av syrehalten. När hydrazin används måste extra hänsyn tas till hydrazinets sönderfall. Hydrazin sönderfaller och resulterar i ammoniak i systemet. Om denna ammoniak inte avlägsnas från systemet, kommer den att anrikas i vattenfasen. I system där morfolin används som pH-reglerande tillsats, kommer denna ammoniak att gradvis ersätta den morfolin som finns i vattenfasen. Vattenfasens pH-värde blir då lägre än förväntat med högre EC som följd.

Som påpekades ovan anrikas ammoniak i ångfasen. PH-värdet i ångsystemet och i fuktseparatorernas dräneringsskal kommer därmed att vara lägre än i kondensatorn och i matarvattnet, då ammoniak har använts som pH-kontrollerande tillsats. Den kombinerade effekten av låg pH och försumbar syrehalt i linjer bärande våtånga och i fuktseparatorns dräneringsskal, gör dessa delar mer känsliga för EC än andra delar, ref.6.

## 6.2. Tillsats av syre

Som sagts tidigare är BWR-anläggningar konstruerade för drift vid pH 7. Därmed blir korrigerande av pH för att reducera graden av EC i dessa anläggningar, en omöjlig åtgärd. Kemiska tillsatser som ammoniak och morfolin förekommer alltså inte i BWR.

Även om syrehalten i de flesta anläggningar kan vara tillräcklig för att ge ett tillfredsställande skydd mot EC, är ökning av syrehalten i BWR, i syfte att förbättra systemets resistens mot EC, en möjlig åtgärd. Bra resultat har erhållits genom tillsats av syre (i gasform) till kondensatorn och mavasystemet. Tillsats av syre till tvåfasssystem har inte lett till några stora förbättringar i praktiken. Orsaken till detta är att syret anrikas i ångfasen med otillräckligt syrehalt i vattenfasen som resultat. I sådana system, kan tillsats av väteperoxid vara ett bättre alternativ, men resultaten från fält har inte varit tillfredsställande än, ref 20.

De flesta artikelförfattarna är överens om att en syrehalt av ca 50 ppb är tillräcklig för att minska risken för degradering genom EC i enfasssystem, ref 7, 10, 17, 19. Det råder däremot en stor osäkerhet om var den lägre gränsen för syrehalten, ligger. Medan en del forskare menar att den befintliga mängden syre i BWR-anläggningar kan vara helt tillräcklig för att stoppa EC i kolstälrören, ref 8, påstår andra att först vid syrehalter >100 ppb kan en tillräcklig minskning av EC i nämnda rör uppnås, ref 1, 4.

Forskningsrapporter pekar på att vid pH  $\approx$  9, är en syrehalt av 5 ppb tillräckligt för att stoppa EC. Om detta gäller även för neutralt vatten betyder det att det syre som finns i BWR-systemen är i princip tillräckligt för att skydda kolstälrören mot EC, ref 8.

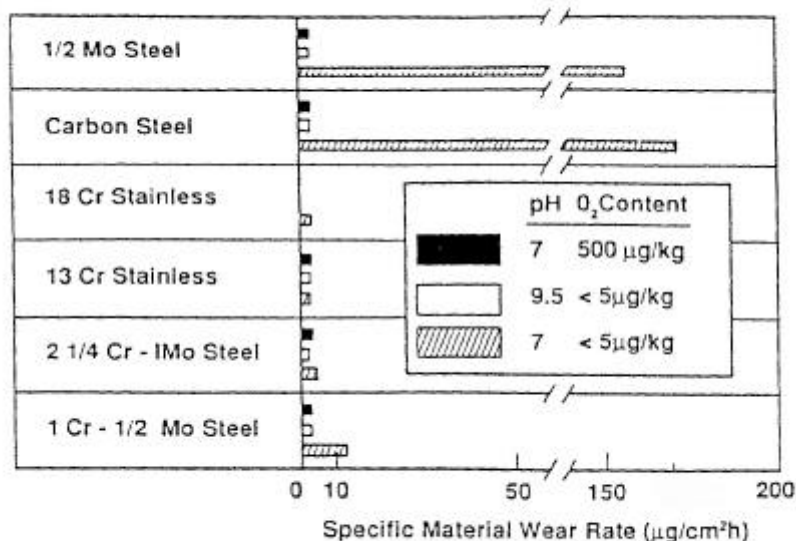
En annan aspekt som måste beaktas är vätekemi (HWC). I försök att minska degradering av materialen på grund av spänningskorrosion, har man ofta strävat efter att få en så låg syrehalt som möjligt genom dosering av väte (HWC). Detta har däremot en förödande effekt på rörsystemens EC-resistens. När det tillgängliga lösta syret minskar blir det omöjligt att bygga upp ett heltäckande, skyddande oxidskikt. Detta leder till kontinuerlig upplösning av det underliggande materialet, ref 14.

Andra aspekter som måste beaktas vid tillsatts av syre, är andelen föroreningar i vattnet och risken för interkristallin spänningskorrosion. Andelen föroreningar måste hållas lågt. Små mängder av anjoner som  $\text{Cl}^-$  eller  $\text{SO}_4^{2-}$ , kan i kombination med den höga syrehalten leda till att kraftig korrosion uppkommer i systemet, ref 8. Dessutom kan tillsats av syre öka risken för interkristallin spänningskorrosion, ref 5.



### 6.3. Byte av material till EC-resistent material

Den mest effektiva metoden för att undvika EC är att byta material till material med högre EC-resistent. Medan kolstål som är utsatt för EC i neutralt vatten med <5 ppm syre, kan erodera upp till 170  $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$ , eroderar rostfritt stål (13%Cr) enbart 2  $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$  under i övrigt samma förhållanden, se fig.15.



Figur 15: Erosionkorrosion av olika material för olika pH och syrehalt (ref. 7).

Byte av kolstålrör mot rör tillverkade i låglegerade stål erbjuder förmildrande omständigheter ur EC-synpunkt. De existerande forskningsresultaten och även resultat från fältförsök tyder på att ett låglegerat stål med 0,5-1% Cr erbjuder tillräckligt resistens mot EC i enfasssystem. De två mest intressanta låglegerade stålen är 1-1/4 Cr-1/2 Mo (P11) och 2-1/4 Cr-1 Mo (P22). Båda dessa material har använts i system med våt ånga under flera år och visat bra egenskaper ur EC-synpunkt. P22 är lättare att få tag på och används därför i större omfattning. De låglegerade stålen kan användas under samma driftförhållanden och med samma geometriska konfigurationer som kolstål eftersom deras mekaniska egenskaper är nästan desamma som kolstålets. Då dessutom koefficienten för värmeutvidgning för nämnda material, är av samma storleksordning som kolstålets, blir även värmespanningarna för kolstål och låglegerade stål nästan lika stora. Belastningsberäkningarna, som ursprungligen har utförts för kolstål, behöver därför inte upprepas i de flesta fall även om små justeringar kan vara nödvändiga. En nackdel vid användning av låglegerade stål är dock att dessa kräver förvärmning och efterföljande värmebehandling i samband med svetsning, ref 7, 19, 4, 5, 6, 20, 17.

Austenitiska rostfria stål erbjuder utomordentligt bra resistens mot EC, både i enfass- och tvåfasssystem. Material som 304 och 316 (och även de lågkolhaltiga varianterna 304L och 316L eller 304NG och 316NG) har mycket bra resistens mot EC. Dessa material har med framgång använts av industrin. När rostfria stål används för att ersätta kolstål, måste emellertid alltid risken för spänningskorrosion, som är en annan ofta förekommande degraderingsmekanism för material i kärnkraftverk, iaktas. De lågkolhaltiga varianterna är därför att föredra då de dessutom erbjuder bättre resistens

mot detta fenomen. För att undvika spänningskorrosion bör viss försiktighet beaktas även vid svetsning av rostfritt stål mot den befintliga konstruktionen. Ingen förvärmning eller värmebehandling efter svetsning krävs i allmänhet. Nackdelen med rostfria stål är däremot att koefficienten för värmeutvidgning är större för dessa stål jämfört med kolstål (ca 1,4 ggr kolståls). Detta betyder att konstruktionsberäkningarna måste göras om med ändringar i den befintliga configurationen som resultat. Även om rostfria stål har högre kilopris än de låglegerade stålen (P11 och P22) kan de vara ekonomisk fördelaktiga då den högre kilopriset kompenseras ofta av de enklare svetsförfarandena och längre livslängd, ref 5, 7, 17, 20, 6, 19, 4.

Bästa möjliga resistens mot EC uppnås om svetsfogen mellan kolstål och låglegerade stål/ rostfritt stål är så slät som möjligt på insidan av röret. En slät övergång förhindrar lokala turbulenser som annars kan leda till större EC-angrepp på kolstålet, ref 5.

Ett alternativ till byte av material är att belägga röret invändigt med ett tunt skikt av EC-resistent material. Två olika metoder har använts i Europa där den ena använder sig av rostfritt stål som skyddande skikt medan den andra använder en Ni-legering med hög nickelhalt. I båda metoderna beläggs ytan genom flamsprutning och med en treskikts-beläggning. Första skiktet består av en legering som erbjuder bra vidhäftning mot det underliggande materialet, som oftast är kolstål, och sista lagret görs i det EC-resistenta materialet, ref 19, 20.

## **6.4. Konstruktionsändringar och förbättring av geometrin**

Artikelförfattarna är rörande överens om att förbättring av dålig röргеometri, är en av de viktigaste metoderna för att förhindra degradering p g a EC, ref 17, 18, 19, 7, 10, 6, 4. Alla ändringar i röргеometrin som leder till mindre turbulens i flödet bidrar till att förbättra systemets EC-resistens. Förutom bättre EC-resistens kan man även uppnå bättre verkningsgrad i systemet då flödet strömmar lättare, ref 5.

De områden som förväntas vara mer drabbade av EC är där turbulensen är störst och även intilliggande områden. Högre turbulens uppträder oftast där flödet ändrar riktning, t ex vid böjar, T-stycken, strypningar och diameterövergångar. Efter ett sådant område stabiliseras det turbulenta flödet, först efter att det har tillryggalagt ett avstånd av ca 10 ggr rördiametern. För tvåfassystem är förgreningar vid sidan eller nedströms mer utsatta för EC då det samlas mer vätska i dessa områden. Man bör därför tillåta förgreningar enbart uppströms. I praktiken är det inte möjligt att eliminera alla kopplingar och configurationer som medför turbulens i systemet, men en klar förbättring uppnås även om bara en del av några närliggande kopplingar elimineras, ref.5.

## 7. Kontroll av erosionkorrosionskänsliga områden

Erosionkorrosion är en degraderingsmekanism som har lett till förlust av människoliv i kärnkraftindustrin. Problemet har varit känt men fick helt andra dimensioner efter de katastrofala händelserna i Surry, 1986, och Trojan, 1985. Ett bra och fungerande kontrollprogram är därför nödvändigt för att upptäcka skadorna i tid så att lämpliga åtgärder kan vidtas. Kapitel 7.1. ger en beskrivning av hur ett sådant kontrollprogram kan utformas. I kapitel 7.2. beskrivs inspektionsprogrammet enligt NUMARCs rekommendationer, kortfattat.

### 7.1. Kontrollprogram

Ref 24 beskriver ett bra kontrollprogram både för enfas- som för tvåfasssystem i PWR- och BWR-anläggningar.

#### 7.1.1. Val av inspektionsområden

Enligt ovannämnda referens bör följande delar ingå i kontrollprogrammet:

##### *Tvåfasssystem*

a) De systemdelar som ingår i ”balance of plant” och som är tillverkade i kolstål och leder våtånga.

De system som uppfyller båda dessa villkor är vanligen:

- huvudångsystemet
- system för utvinning av ånga
- uppvärmare och dräneringsystem
- kondensatorer

b) Delar av system där den cirkulerande ångan har några av följande egenskaper:

- fukthalt högre än 2%
- temperatur mellan 80 – 195 °C
- flödes hastighet högre än 45 m/s

c) Områden som har sådan geometri som orsakar turbulens, t ex:

- böjar,
- kopplingar,
- rakrör nedströms från mynningar och kontrollventiler,

d) Slutligen bör de områden som liknar erosionkorrosionsdrabbade områden i andra verk, tas med i kontrollprogrammet.

### ***Enfassystem:***

- a) De system och undersystem med delar i kolstål.
- b) System som åtminstone uppfyller något av följande villkor:
  - temperatur mellan 100 – 160 °C,
  - pH lägre än 9,5 (PWR),
  - syrehalt lägre än 5 ppm,
  - flödes hastighet större eller lika med 3,5 m/s
- c) Se punkt c) för tvåfassystem
- d) Se punkt d) för tvåfassystem

När alla ovannämnda områden räknas in, kommer antalet inspektionsområden att vara ca 2000 stycken.

För en tillfredsställande inspektion i samband med varje återstart måste kontrollprogrammet, för både enfassystem som tvåfassystem, bestå både av en initialprovning och återkommande provning enligt nedan:

- 1- Basinspektion: Välj ca 10% av alla misstänkta områden så att alla berörda system och de mest känsliga områdena, det vill säga områden med hög vätskehalt och flödes hastighet är representerade. Dessutom måste inspektionsprogrammet inkludera ett representativt antal av alla ovannämnda kategorier.
- 2- Efterföljande inspektioner: Alla områden som har klassats som gul eller röd (se tabell 7-1 nedan) ska inspekteras. Inkludera alla områden som liknar EC-drabbade områden i andra enheter eller andra verk. Slutligen ska en viss procent av den totala antalet system inkluderas och inspekteras.

#### **7.1.2. Inspektionsmetod och acceptanskriterier**

Den mest utbredda inspektionsmetoden är mätning av vägg tjocklek m h a ultraljud men även visuell kontroll och röntgen förekommer. Vid provningstillfället appliceras ett rutnät av mätpunkter på provområdet. Rörets vägg tjocklek mäts och registreras där linjerna korsar varandra. Bedömningskriterier och åtgärdsplan ska arbetas fram.

Nedan följer ett förslag på bedömningskriterier och åtgärdsplan:

Tabell 7-1:

Kategori	Kriterium	Åtgärd
icke acceptabelt	$T \leq$ en operationscykel	reparera/byt
röd alarm	$1 \text{ cykel} < T \leq 2 \text{ cykel}$	inspektera vid nästa inspektionstillfälle
gul alarm	$2 \text{ cykler} < T \leq 4 \text{ cykler}$	inspektera vid andra inspektionstillfälle (2 cykler)
accepterat	$4 \text{ cykler} < T$	ta bort från inspektionsprogrammet

**T är den kvarstående tiden tills detaljen når sin beräknade min. tjocklek, ref 24.**

## 7.2. Inspektionsmetod enligt NUMARC

### 7.2.1. Val av inspektionsområden

Den kartläggning som utfördes efter händelserna i Surry och Trojan visade att de inspektionsprogram som används (i USA) är oftast i enlighet med NUMARCs rekommendationer.

Enligt NUMARCs rekommendationer ska den första inspektionen omfatta minst 15 komponenter. De första tio komponenterna väljs bland de mest EC-känsliga detaljerna. De återstående fem väljes där speciella förhållanden råder. Resultaten av den första inspektionen är sedan avgörande för utvidgning eller begränsning av de efterföljande inspektionerna.

Vid inspektionstillfället ska ett rutnät av punkter inspekteras. Tjockleksmätningar görs där linjerna korsar varandra. Rutorna ska inte vara större än  $2\sqrt{(Rt)}$ , där R är rörets ytterdiameter och t är rörets nominella tjocklek. Rutorna ska dessutom inte vara mindre än 1 tum och större än 6 tum. Dessa rutnät ska appliceras på sådant sätt att efterföljande inspektioner av samma punkter blir möjligt, ref 5.

### 7.2.2. Acceptanskriterier

Acceptanskriterier är baserade på jämförelser mellan den uppmätta tjockleken ( $t_{meas}$ ), och den predikterade tjockleken ( $t_p$ ) för en komponent med den minimala tillåtna vägg tjockleken ( $t_{min}$ ) ( i enlighet med hållfasthetsberäkningarna). Den uppmätta vägg tjockleken är komponentens verkliga vägg tjocklek som har mätts upp vid den senaste inspektionen. Den predikterade vägg tjockleken är komponentens beräknade vägg tjocklek vid nästa inspektionstillfälle med hänsyn till förekommande EC.

- Om  $t_{meas} > t_{nom}$ , är rörkomponenten godkänd.
- Om  $t_p > t_{min}$ , är komponenten godkänd men bör inspekteras vid senare tillfälle.
- Om  $t_p < t_{min}$ , följande utredningen görs för att kunna bestämma huruvida komponenten är godkänd eller ej:

- a. Om erosionkorrosion förekommer allmänt över inspektionsområdet, måste komponenten bytas ut.
- b. Om EC-skadorna är lokala, beräknas den tillåtna vägg tjockleken med hänsyn till de lokala spänningarna (enligt ASME). Beroende på den lokala godsförtunningen kan mindre konservativa resultat uppnås (tunnare tillåtet tjocklek  $t_{\min}$ ) än den konventionella metoden. Om detta är fallet används den omberäknade tillåtna vägg tjockleken ( $t_{\text{aloc}}$ ) för att bestämma om komponenten är godkänd eller ej. Detta presenteras i ASME Section XI, ref 5.

### 7.2.3. Inspektionsschema

Den första inspektionen i service ska göras mellan 12-24 månader efter den första initiala provningen. Om resultaten från den initiala provningen pekar på icke acceptabla vägg tjocklekar måste förstås första inspektionen göras efter kortare intervall. Samma komponenter som ingick i den initiala inspektionen, ska kontrolleras.

Inspektionsintervallen ska alltid baseras på resultaten från föregående inspektion. Undersökningarna ska alltid ta hänsyn till eventuella ändringar i driftförhållandena som kan påverka EC. Allmänt gäller att inspektionsintervallen bestäms med hänsyn till  $t_p$  och den återstående tiden tills komponenten når  $t_{\min}$ , ref 5.

## 7.3. De svenska verkens inspektionsmetoder

De svenska kärnkraftverken kontaktades under projektets gång för att reda ut vilka kontrollmetoder som används i dessa och jämföra dessa metoder med NUMARC och ASME Code Case. Utredningen var mycket enkel och en mera omfattande utredning kan vara befogad. Resultatet av denna enkla utredning visade att de metoder som används i de svenska kärnkraftverken, har stora likheter med de ovannämnda metoderna. De områden som behöver inspekteras har kartlagts med hjälp av leverantören och de förhållanden som råder i varje verk och med hänsyn till problemområden i andra verk. Både ingenjörsmässiga bedömningar och dataprogram som WATHEC, se avsnitt 8.2, förekommer vid urval av inspektionsområdena.

Inspektionsmetoden är för det mesta ultraljudprovning men även visuell undersökning och röntgen förekommer. De bedömningskriterier som används påminner också väldigt mycket om vad som anges i ASME Code Case N-480 och ASME Section XI.

## 8. Beräkningsmodeller för EC

De stora insatser som gjordes efter Surry händelsen i avsikt att förstå och kunna förutsäga erosionkorrosion i olika rördelar, ledde till utveckling av ett antal modeller för prediktering av EC. Eftersom de faktorer som påverkar EC påverkar även varandra sinsemellan är det väldigt svårt att beskriva EC med en enkel matematisk modell. Av denna anledning har forskarna varit tvungna att ta fram eller korrigera modellerna även med hjälp av empiriska metoder och resultat från fält- och laboratorieförsök.

Dessa modeller är grunden till de dataprogram som har utvecklats för prediktering och kontroll av erosionkorrosion. Några av dessa modeller berörs i kapitel 8.3. Nedan följer en beskrivning av några av de mest använda dataprogrammen i industrin.

### 8.1. CHECK och CHECKMATE

CHECK och CHECKMATE är de mest accepterade och mest använda programmen åtminstone i USA. EPRI utvecklade CHECK och CHECKMATE med utgångspunkt från den matematiska modell som EDF (Electricité de France) hade tagit fram. Modellen korrigerades och kompletterades sedan med hjälp av erhållna resultat från fält- och laboratorieförsök och de experiment som erhållits genom mätningar av godstjocklek vid industrin, ref 19.

Programmen utvecklades för att tillgodose industrins behov av tillförlitliga metoder för prediktering av EC.

Formeln för CHECK består av en del faktorer som multiplicerat med varandra anger den predikterade EC-hastigheten. Som nämndes ovan är modellen inte linjär eftersom en del faktorer påverkar varandra inbördes. Formeln för CHECK har följande principform:

$$E = F_1(T) * F_2(AC) * F_3(MT) * F_4(O_2) * F_5(pH) * F_6(G)$$

Där:

E = EC-hastighet, predikterad

F<sub>1</sub>(T) = faktor för temperatureffekten

F<sub>2</sub>(AC) = faktor för effekten av andelen legeringsämnen (Cr, Mo, Cu) i materialet

F<sub>3</sub>(MT) = faktor för effekten av masstransport (flödes hastighet, rördiametern)

F<sub>4</sub>(O<sub>2</sub>) = faktor för effekten av syrehalt

F<sub>5</sub>(pH) = faktor för effekten av pH

F<sub>6</sub>(G) = faktor för effekten av geometrin.

CHECK är framtagen för att förutsäga EC i enfassystem. CHECKMATE är en vidareutveckling av CHECK och kan prediktera EC både i enfas- som tvåfasystem, ref 19.

Modellering genom CHECK och CHECKMATE kan ske i tre olika nivåer:

- för hela systemet,
- för olika linjer var för sig och
- för varje komponent för sig.

Med hjälp av dessa program beräknas de olika faktorer som styr EC:

- Void beräknas för tvåfasströmning inom de tryck, temperatur och mediablandningar som kan förekomma inom en kraftstation.
- Flöden beräknas med temperatur, hastighet, tryck mm. Rörsystemets geometri, isolering, komponenter och ytfinitet beaktas.
- Vattenkemimodulen kartlägger variationen av pH och syrehalt i systemet. Olika tillsatsmedels påverkan beräknas.
- Olika legeringsämnen inverkan beräknas.
- EC-hastigheten beräknas utgående från resultatet i ovanstående och anges.
- Provningsresultaten kan hanteras, lagras, bearbetas och presenteras.

Dessa delar är redan utprovade och i bruk i CHECKMATE och CHECK.

Som sagts ovan beräknar CHECK godsförtunning orsakad av enfasströmning. Indata utgörs av antal drifttimmar, pH, pH-styrande tillsatser, syrehalt, tryck, temperatur, flödes hastighet och rörledningsdata såsom materialsammansättning, dimensioner, typ av rördel eller rårör.

Första steget i analysen sorterar kopplingar och rördelar efter storleken på den förväntade godsförtunningen och den tid som förväntas åtgå tills minsta tillåtna godstjocklek uppnås. Dessa värden skall sedan användas till att planera och styra den första besiktningen.

Efter första kontrollen används mätvärdena till att korrigera beräkningarna och att förutsäga drifttider till minsta tillåtna godstjocklek för olika rördelar. Bägge stegen ger en lista över de rördelar som bör kontrolleras vid nästa provningstillfälle.

CHECKMATE beräknar godsförtunning orsakad av tvåfasströmning. Analysen behöver förutom de ovanstående indata även en systemberäkning. Programmet beräknar sedan de termodynamiska storheterna i systemet. Resultatet kan sedan presenteras på samma sätt som för CHECK.

Resultatet från bägge programmen kan bearbetas vidare för att visualisera skadorna, att simulera utbyte med olika materialalternativ, att simulera ändrade driftförhållanden och att bygga upp en databas för erfarenhetsåterföring, ref 4, 19, 23.



## 8.2. WATHEC, (Wall Thinning due to Erosion Corrosion)

Detta är ett jämförbart program som har utvecklats av Siemens/KWU och är baserat på teoretiska utredningar och praktiska försök sedan 1973.

- Programmet är uppbyggt på motsvarande sätt och kräver motsvarande indata som CHECK och CHECKMATE.
- Programmet kan kopplas till program för hantering av mätvärden erhållna vid tjockleksmätning med ultraljud.
- Mätvärdena används sedan för att korrigera den första beräkningen av korrosionshastigheten.
- Programmet förutsäger risk för kavitation eller impingment men beräknar ej avverkningsgraden därav.
- Inverkan av korrigerande åtgärder som materialbyte, dimensionsändring, ändring av dosering, med mera kan beräknas.
- Resultatet av mätningar och beräkningar kan presenteras i 3-D grafik, ref 4.

## 8.3. Grunderna för dataprogrammen

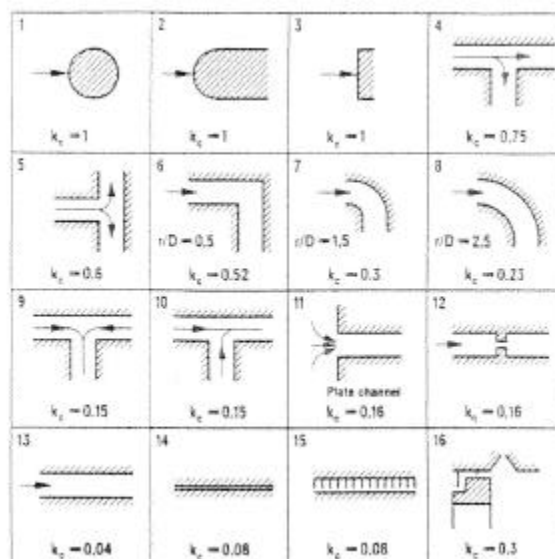
### 8.3.1 EDF-modellen

En hel del empiriska modeller för att förutsäga EC har tagits fram. Den model som forskarna på Electric de France (EDF) har utvecklat och har använts i US för att utveckla NUMARC har följande form:

$$m^{\circ} = F(k) * FG * FT * FC * FR$$

där F(K) beskriver masstransport beroendet, FG är en geometrisk faktor, framtagna av Keller, se figur 16, som är normaliserade så att FG blir lika med 1 för rakt rör, FT är faktorn för temperaturberoendet och FC är faktorn för vattenkemin (pH) och FR är faktorn för materialets sammansättning, ref 3.

*Figur 16: Geometrifaktorer enligt Keller (ref. 6).*



### 8.3.2. Kastner-modellen

Kastner, har utvecklat en annan modell. I motsats till EDF-modellen där varje faktor verkar självständigt, är variablerna i Kastner-modellen beroende av varandra. Dessutom tar modellen hänsyn till flödes hastigheten. För den geometri, vattenkemi och flöde som gällde i Surry Unit 2, föreslår Kastner-modellen godsfortunning på 1,3 mm/år på grund av EC. Den beräknade godsfortunningen enligt EDF-modellen är 1,4 mm/år för samma förhållanden. Båda dessa modeller förutsäger alltså godsfortunning som är väldigt nära det verkliga i detta fall. Även om båda modellerna ger rimliga resultat för Surry-fallet måste man vara observant på den osäkerhet som sådana beräkningar innebär. En stor nackdel med båda modellerna är att de tar mycket lite hänsyn till komplexa rörgeometrier. Ett rör ska inte betraktas isolerat utan man måste ta hänsyn till den turbulens som uppkommer på grund av närliggande kopplingar och dylikt.

En annan svaghet är att även för ett isolerat rör är geometrifaktorn som finns i dessa modeller baserat på Kellers geometrifaktorer som egentligen är framtagna för tvåfasssystem och kan inte anses stämma fullständigt för enfasssystem, ref 3.

### 8.3.3. Virginia Power Company Method

Nämnda företag utvecklade en semi-empirisk metod för att rangordna områden med hänsyn till EC i enfasssystem. Metoden är baserad på Kellers ekvation som tar hänsyn till den lokala flödes hastigheten, temperatur, geometri och fukthalt:

$$s = f(T) \cdot q(x) \cdot c \cdot (K_c) - K_s$$

Där  $s$  är den maximala lokala materialförlusten,  $f(T)$  är en temperaturfaktor,  $q(x)$  en faktor som varierar med fukthalten,  $c$  är flödes hastigheten,  $K_c$  är en variabel som tar hänsyn till den lokala geometrin, se figur 17 ovan, och  $K_s$  är ett tröskelvärde som måste överskridas innan EC över huvudtaget kan uppträda.

Eftersom Kellers ekvation inte tar hänsyn till materialsammansättning eller vattenkemi är de resultat som erhålls inte pålitliga när vattenkemi eller materialsammansättningen förändras, ref 6.

#### 8.3.4. KWU-metoden

KWU utvecklade Kellers metod så att den även tog hänsyn till syrehalt, pH och summan av Cr- och Mo-halten upp till 5% i materialet. Detta gjordes m h a data samlade från olika kärnkraftverk och från KWU-s egna laboratorieförsök. KWU-ekvationen beräknar EC-hastigheten i enfassystem i  $\mu\text{g/hr/cm}^2$ . Ekvationen kan användas inte bara för att hitta drabbade områden utan även för att prediktera EC-hastigheten för ett visst rör. Ändå är kanske ekvationens förmåga att kunna åskådliggöra effekten av olika åtgärder som ändring i materialsammansättning, pH, temperatur, konfiguration etc, som är dess starkaste sida, ref 6.

Formeln har följande principform:

$$\Delta s = k_c * f_1(W,T,h) * f_2(\text{pH}) * f_3(\text{O}_2) * f_4(t)$$

Där godsförtunning  $\Delta s$  är en funktion av följande parametrar:

- flödes hastighet, W
- temperatur, T
- flödets pH vid 25 °C, pH
- syrehalten i flödet, O<sub>2</sub>
- materialets sammansättning, Cr-, Mo-, och Cu-halt, h
- geometriska faktorer, k<sub>c</sub>
- tid, t

Denna ekvation är i första hand tillämplig för enfassystem. Det har ändå gjorts en modifiering så att ekvationen kan fungera även för tvåfasssystem förutsatt att metallytan är utsatt för en vattenfilm som hela tiden är i rörelse, ref 12.

#### 8.3.5. BRT-CICERO Koden

EDF har vidareutvecklat den tidigare modellen för prediktering av EC. Metoden är baserad på följande:

- oxidering av legeringen i gränsområdet metall/oxid och bildandet av magnetit,
- diffusion av korrosionsprodukter genom porerna i oxidskiktet,
- diffusion av väte genom oxidskiktet till metallytan. Detta påverkar oxidskiktets porositet,
- upplösning av magnetit genom reduktion med hjälp av väte,
- bortförsl av järnjonerna.

EC-hastigheten bestäms m h a följande formel:

$$V_{PE} = (\Theta^*(C_{eq} - C_{\infty})) / (1/K + 0,5(1/k + \delta/D))$$

Där:

- $\Theta$  anger oxidens porositet,
- $C_{eq}$  är koncentrationen av löst järn vid jämvikt,
- $C_{\infty}$  är koncentrationen av löst järn i kylmedlet,
- $K$  är kinetisk konstant för oxidationreaktionen av Fe,
- $k$  är koefficienten för masstransport av järnjoner,
- $\delta$  är oxidskiktets tjocklek,
- och  $D$  är Fe-jonernas diffusionskoefficient i vatten.

Denna metod används sedan 1994 i Frankrike, ref 25.

## 9. Inträffade händelser

Bilaga 1 visar utskrift av en databas som har arbetats fram på SKI-s uppdrag. Databasen behandlar främst de händelser som har inträffat i de utländska kärnkraftverken. Bilaga 2 är ett exempel på de information som kan erhållas från en databas (STRYK) som håller på att utvecklas hos SKI (lista på rapporterade händelser på erosionkorrosion i Barsebäck). Databasen innehåller fler uppgifter än det som visas i bilaga 2. Till exempel materialets kemiska sammansättning kan framgå. Denna databas kommer att bearbetas vidare under innevarande år och kompletteras allt eftersom nya uppgifter tillkommer. Förhoppningen är att dessa databaser ska vara effektiva verktyg för systematisk erfarenhetsåterföring kring EC likväl andra degraderingsmekanismer.

Nedan följer några av de mest uppmärksammade händelserna som har orsakats av erosionkorrosion i kärnkraftindustrin.

### 9.1. Surry-2

9/12 1986: En ångventil ökade trycket i en del av rörsystemet med 20%. Detta var tillräckligt för att en 90-gradig böj i BOP-systemet (balance of plant), av ett mavasystem med diametern 457 mm, skulle gå av. En bit av röret, ca 60-90 cm flög iväg och resulterade i att röret separerades helt. Reaktionskrafterna flyttade röret ca 180 cm. Fyra av åtta arbetare som var i området dog till följd av brännskador. Alla personskadorna orsakades av den heta (ca 188 °C) högtrycksångan. Eftersom brottet skedde i BOP-systemet betyder det att EC-brott har förekommit i enfasssystem i klass-2 säkerhetssystem, ref 7, 31.

### 9.2. Oconee-2

28/6 1982: Ett rör med diametern 24-tum (ca 610 mm) i en del av rörsystemet för ångutvinning gick av. Två människor fick brännskador som krävde sjukhusbehandling, till följd av denna händelse. Brottet inträffade i den utvändiga radien av en ca 10 mm tjock 90-gradig böj. Röret ( $\phi$  24 tum) slog sönder en 42 tum (ca 1070 mm) utsugningstrumma till högtrycksturbinen. Brottytan var ca 2\*2 ft (610\*610 mm). En intressant aspekt var att ultraljudprovning utförd under mars 1982 hade visat att röret hade varit utsatt för korrosion med förtunning som följd. Väggtjockleken hade då mätts till 0,17 tum (ca 4,3 mm). Därmed bedömdes röret funktionsduglig. Mätning av väggtjockleken efter haveriet visade att den låg på 0,017 tum (ca 0,43 mm). Troligen hade man missat att mäta det tunnaste området vid inspektionen, ref 7.

### 9.3. Trojan

9/3 1985: Ett rörsektion (dräneringsrör för uppvärmare), 14 tum (ca 356 mm) i diametern, gick av på grund av erosionkorrosion. Ångan som var 350 °F (ca 177 °C) varm sprutade ut i turbinhallen. En av personalen fick brännskador. Rörväggen hade eroderat från en nominell tjocklek av 0,375 tum (9,53 mm) till 0,098 tum (2,5 mm).

Flödes hastigheten i detta område var 20-24 ft/sec (6-7,3 m/s). Röret hade installerats som en hjälprör och var egentligen inte avsett att användas för fullständigt vätskeflöde vid normalt driftläge. Röret blev däremot den normala flödespassagen på grund av driftstörningar. Efterföljande undersökningar i anläggningen visade att enbart ett ytterligare område var drabbat av EC. Detta var ett expanderrör (10-14 tum = 254-356 mm) nedströms från en 10 tum (254 mm) kontrollventil. Dessa delar byttes ut även om rörets tjocklek fortfarande överskred  $t_{min}$ .

June 1987: Det upptäcktes att åtminstone två områden med rårör i mavasystemet var drabbade av godsförtunning. De drabbade områdena sträckte sig ca 7 ggr rördiametern nedströms från böjar eller andra kopplingar (som kan orsaka turbulens), både i vertikala och horisontella rör. Som CHECK-programmet var utformat vid nämnda datum, krävde det ingen inspektion av dessa delar. Efterföljande inspektioner visade att godsförtunning förekom även i kondensatorn och i mavasystemet. Metallografisk undersökning av dessa rör visade att orsaken till godsförtunning var erosionkorrosion som hade förekommit på grund av höga flödes hastigheter och ogynnsamma hydrodynamiska förhållanden, ref. 30.

## 9.4. Loviisa 1 och 2

Två rör i mavasystemet brast i Loviisa 1 och 2, 1990 och 1993. Detta hände trots ett omfattande kontrollprogram för att undvika EC. Loviisaverken skiljer sig från de västerländska PWR-verken enligt följande:

- pH hålls neutralt (ca 7),
- material och design (t.ex. horisontella ånggeneratorer med rostfria rör i värmeväxlaren)

Vattnets pH hålls neutralt för att skydda de viktiga komponenterna i sekundärsystemet (genom att hålla ledningsförmågan så låg som möjligt). Detta ökar däremot sekundärsystemets känslighet mot EC dramatiskt. Redan i början av 80-talet uppmärksammade man detta problem och ett omfattande kontrollprogram för upptäckt och åtgärd av EC sattes in. I takt med att EC upptäcktes i olika komponenter, utvidgades kontrollprogrammet så att det innefattade fler och fler komponenter. Trots det omfattande programmet gick alltså ett rör sönder i Loviisa 1 under 1990. EC-hastigheten hade antagits vara lägre i detta rör än i andra delar som T-rör och liknande. Materialundersökning av materialet i röret visade att detta hade en mycket låg Cr-halt (0,03% Cr). Efterföljande analyser m h a WATHEC visade att sådana rör var mycket känsliga för EC. Därför byttes liknande rörsystem i Loviisa 1 under 1992.

Man planerade också att byta motsvarande delar i Loviisa 2 vid revisionen 1994 men ett rör hann gå av innan dess. Det hade varit svårt att kontrollera den brustna rördelen under den föregående inspektionen. Dessutom hade EC-angreppet varit mer omfattande i detta rör än i de närliggande rören. Det finns säkert flera orsaker för detta men ändå är det svårt att förklara olika omfattande angrepp i exakt likadana rördelar i samma system. Dessa erfarenheter visar att omfattningen av EC i olika delar är svårt att förutsäga och att angreppen kan vara väldigt lokala.

Följande åtgärder har vidtagits i Loviisa:

- Inspektionsprogrammet har blivit mycket omfattande.
- Vattenkemi har ändrats i Loviisa 2 genom tillsats av hydrazin.
- Utsatta delar har bytts ut mot nya delar i liknande material eller i rostfritt stål.
- Ångseparator har installerats.
- Rören har belagts med EC-beständigt material.

Ref. 32.

## Referensförteckning:

- 1- Heitmann, H.G., Schub, P., "Initial experience gained with a high pH value in the secondary system of PWRs", Water chemistry of nuclear reactor systems 3 vol. 1. Proceedings of an international conference organised by the British Nuclear Energy Society, 17-21 October 1983. p.243-252.
- 2- Gösta Wranglén, "METALLERNAS KORROSION OCH YTSKYDD".
- 3- Schack, W.J., "An overview of environmental degradation of materials in nuclear power plant piping systems", Proceedings of the third international symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems. Traverse City, MI(USA). 30 Aug- 3 Sep 1987. P 55-64.
- 4- Peter Almkvist och Jan Wåle, SA/FoU-rapport 93/06, "Erosionskorrosion – urvalskriterier och metoder för återkommande kontroll".
- 5- Haramis, V.G., "Methodology for addressing erosion/corrosion piping inspection program", 4<sup>th</sup> international power generation exhibition and conference. Tampa, FL (USA), 4-6 Dec 1991. POWER-GEN'91 conference papers: Vol 11 and 12. Penn Well Conferences and Exhibitions Co. 1991.500 p. p 1971-1986.
- 6- Shor, S.W.W., Osbourne, M.R., Wilzbach, J.H., Fried, S.H., " PWR secondary system pipe thinning", Proceedings of the American Power Conference (1998). v.50, p. 647-654.
- 7- "Nuclear piping criteria for Advanced Light-Water Reactors, Volume 1, Failure mechanisms and corrective actions", Welding Research Council Bulletin, Jan 1993, no 382, p 1-45.
- 8- Cragolino, G., Czajkowski, C., Schack, W.J., "Review of erosion-corrosion in single-phase flows", Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC(USA), Argonne National Lab., IL(USA), Apr 1988, 107p.
- 9- Emmanuel, A., Michel, B., "Probabilistic evaluation of flow-accelerated corrosion i French PWR", Kisisel, I.T., et al, "Plant system/components aging management 1994. PVP-Vol. 283. New York, NY(USA). American Society of Mechanical Engineers. 1994, p. 69-77.
- 10- Kastner, W., Nopper, H., Riesner, R., "Protection of piping from corrosion erosion", Atomic Energy New York (Apr 1994), v 75(4), p. 791-799.
- 11- Wu, P.C.S., "Pipe wall thinning in US light water reactors", Corrosion and erosion aspects in pressure boundary components of light water reactors, Proceedings of a specialist meeting organized by the International Atomic Energy Agency, Vienna 12-14 Sep. 1988. p.41-42.



12- Kastner, W., Erve, M., Henzel, N., Stellwag, B., "Erosion corrosion in power plant piping systems- Calculation code for predicting wall thinning", Corrosion and erosion aspects in pressure boundary components of light water reactors, Proceedings of a specialist meeting organized by the International Atomic Energy Agency, Vienna 12-14 Sep. 1988. p. 49-59.

13- Woolsey, I.S., "Assessment and avoidance of erosion-corrosion damage in PWR feedpipework", Corrosion and erosion aspects in pressure boundary components of light water reactors, Proceedings of a specialist meeting organized by the International Atomic Energy Agency, Vienna 12-14 Sep. 1988. p. 60-66.

14- Chakravarti, B., "Clad piping- a novel approach for solving nuclear plant service water and erosion-corrosion problems", Proceedings of the fifth international symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems- water reactors. La Grange Park, IL (United States), American Nuclear Society, Inc. 1992, p. 436-441.

15- Tomlinson, L. Ashmore, C.B., "Erosion-corrosion of carbon and low alloy steels by water at 300 °C", British Corrosion Journal UK. (1987), v.22(1), p. 45-52.

16- Izumiya, M., Minato, A., Hataya, F., Oshima, K., Oshima, Y., Ueda, S., "Corrosion and/or erosion in BWR plants and their countermeasures", Proceedings of an international symposium on water chemistry and corrosion problems of nuclear reactor systems and components organised by IAEA and held in Vienna, 22-26 Nov 1982, p 61-71.

17- Bush, S.H., "Wall thinning in nuclear piping. Status and ASME Section XI activities", Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA), Post-SMIRT conference No. 2. Monterey, CA (USA), 21-22 Aug 1989.

18- Bouchacourt, M., "Flow assisted corrosion in power plants- Part 1: The EDF research programme", Corrosion and erosion aspects in pressure boundary components of light water reactors, Proceedings of a specialist meeting organized by the International Atomic Energy Agency, Vienna 12-14 Sep. 1988. p. 19-26.

19- Bush, S.H., Chexal, B., "Wall thinning in nuclear piping, status and ASME Section XI activities", Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA). International nuclear power plant aging symposium. Bethesda, MD (USA). 30 Aug – 1 Sep 1988.

20- "How stainless steel coating combats erosion/corrosion in wet steam. Nuclear Engineering International, May 1989, v. 34 (418) p. 16-18.

21- McCracken, C. E., Wu, P.C.S., "Erosion/corrosion experience in US LWRs", Proceedings of the American Power Conference (1988), v.50, p. 982-991.

22- Gerber, T.L., Richardella, P.C., Kuo, A.Y., Pitcairn, D.R., "Acceptance criteria for structural evaluation of erosion-corrosion thinning in carbon steel piping: Final report", Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA), Structural Integrity Associates, San Jose, CA (USA), Jul 1988, 30 p.

- 23- Vermaut, M., Baltus, R., Rotary, D.H., Pete, D., "Erosion-corrosion prediction and inspection program for Krsko NPP", European Nuclear Society (ENS), Bern (Switzerland), Czech Nuclear Society, Prague (Czech Republic), Slovak Nuclear Society, Bratislava (Slovakia). Topform '92: the safe and reliable operation of LWR NPPs. Vol.II, Poster papers. Jan 1993, 245 p. p. 89-95.
- 24- Tanarro, A., González, E., "Erosion-corrosion in wet steam and single phase lines in nuclear power plants", Proceedings of Specialist meeting on Erosion and Corrosion of Nuclear Power Plant Materials, p. 295-304.
- 25- Bouchcourt, M., Boyelle, H., Gauchet, J.P., Lenormand, A., Sychala, B., "The BRT-cicero code, an exhaustive approach to predict the flow accelerated corrosion", Societe Francaise d'Énergie Nucleaire (SFEN), 75- Paris (France), Contribution of materials investigation to the resolution of problems encountered in pressurized water reactors. Volume 2. Paris (France). Societe Francaise d'Énergie Nucleaire. 1994. 434p. p.761-768.
- 26- Cragolino, G., "Erosion-corrosion in nuclear power systems- An overview", Corrosion 87, san Francisco, CA (USA). 9-13 Mar 1987. Houston TX (USA). national Assoc. of Corrosion Engineers. 1987. 12p.
- 27- Stancavage, P.P., "Analytical assessment of the aging status of the whole nuclear power plant", SVA further education course: power upgrading and lifespan expansion of nuclear power plants. Bern (switzerland). Schweizerische Vereinigung fuer Atomenergie(SVA). 1990. vp. p. D-3.1-D-3.11.
- 28- Gemmill, M.G., "Materials for the power generation industry", Metall and Materials (Dec 1985). v.1(12) p. 759-763.
- 29- Gerber, T.L., Deardorff, A.F., Norris, D.M., Lucas, W.F., "Acceptance criteria for structural evaluation of erosion/corrosion thinning in carbon steel piping", Hadjian, A.H., Transactions of the 10<sup>th</sup> international conference on structural mechanics in reactor technology. Volume D. Los Angeles, CA(USA). American Association for Structural Mechanics in Reactor technology. 1989, p. 93-102.
- 30- Wu, P.C., "Erosion/corrosion induced pipe wall thinning in US Nuclear Power Plants", NUREG-1344, Apr 1989.
- 31- Taboada, A., Shao, L.C., Vollmer, R.H., "Piping issues in nuclear systems in the USA", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1988, v.34, p. 309-313.
- 32- Heitanen, O., "A case study on plant safety self assessment. Feed water line breaks at Loviisa NPP", Topsafe '95 Vol. 1. BERNE (Switzerland), European Nuclear Society 1995. (220 p), p. 56-67.

# **Bilagor**

**Bilaga 1: Databas; Piping Failures**

**Bilaga 2: Databas; STRYK**