

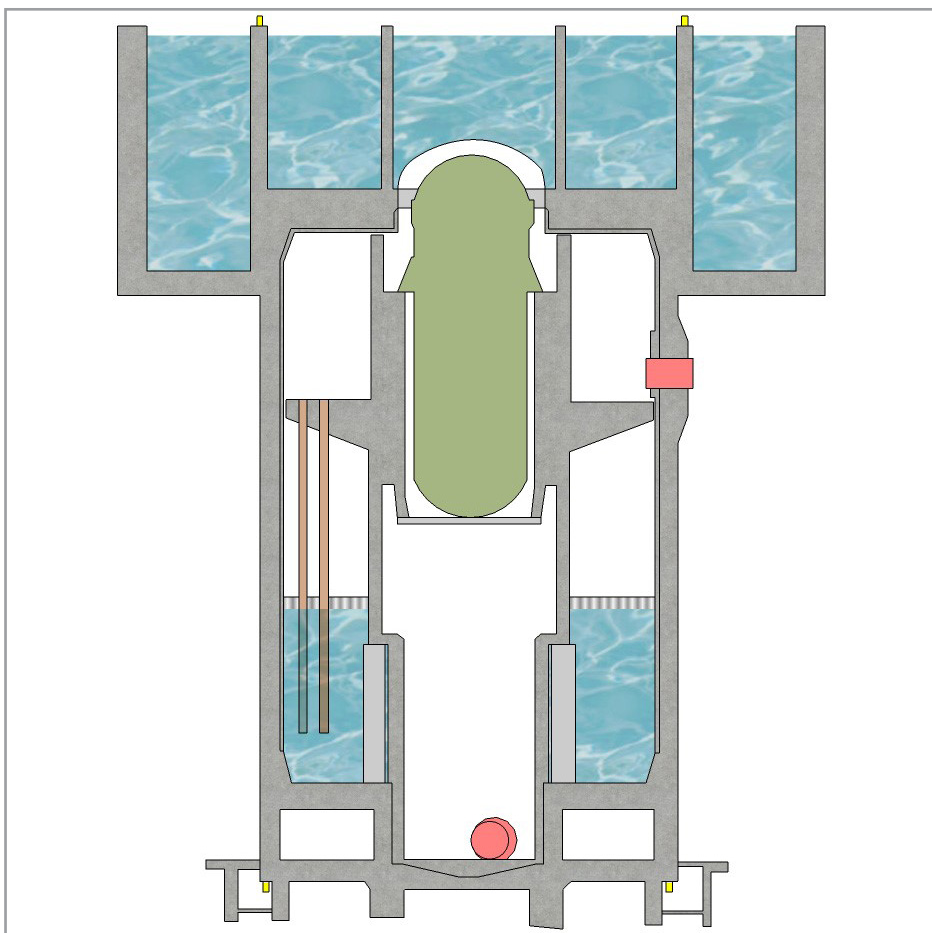
GENOMGÅNG AV POTENTIELLA KORROSIONSRISKER FÖR INGJUTEN TÄTPLÅT I REAKTORINNESLUTNINGAR

RAPPORT 2019:581



BETONGTEKNIK
KÄRNKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



Energiforsk

Genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten tätplåt i reaktorinneslutningar

BERTIL SANDBERG

BROR SEDERHOLM

CLAES TAXEN

JAN TRÄGÅRDH

JOHAN TIDBLAD

Förord

Reaktorinneslutningens tätplåt är den primära barriären för att förhindra, eller minimera, ett läckage av radioaktiva partiklar under drift eller i vid en avvikande händelse. Det är därför viktigt att kunna bedöma plåtens status, och säkerställa att det inte finns risk för korrosion i någon del av plåten.

I denna rapport har en kartläggning genomförts för att identifiera och analysera möjliga korrosionsprocesser, och hur de skulle kunna påverka olika delar av konstruktionen utifrån fuktnivå, lufttillgång och temperatur.

Studien har utförts av seniora forskare på RISE och CBI, med Bertil Sandberg som huvudförfattare. Projektet ingår i Energiforsk Betongtekniskt program kärnkraft, som driver forskning kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet och för att kunna driva en effektiv förvaltning. Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

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

Sammanfattning

Tätplåten är en del av reaktorinneslutningen och dess uppgift är att förhindra, eller minimera, ett läckage av radioaktiva partiklar under drift eller vid en avvikande händelse. I Sverige och Finland är tätplåten, till skillnad mot i övriga världen, till dominerande del ingjuten i betong. Det är av stor vikt att med god grund bedöma dess åldring och risk för degradering.

Syftet med projektet har varit att utvärdera samtliga potentiella korrosionsprocesser aktuella för tätplåten. Baserat på genomförd analys har riskzoner för reaktorinneslutningarnas tätplåtar identifieras.

För en tätplåt ingjuten i defektfri betong avskrivs alla typer av korrosion.

För att korrosion ska kunna uppstå på tätplåten krävs en kavitet. I en sluten och vattenfylld kavitet uppstår ingen korrosion. De uppmätt höga fuktigheterna i betongen indikerar att detta är normaltillståndet.

Om den slutna kaviteten är helt eller delvis luftfylld uppstår en försumbar atmosfärisk korrosion. Är kaviteten delvis vattenfylld kan angrepp initieras i vattenlinjen. För att angreppet ska bli allvarligt krävs en stor kavitet och någon heterogenitet eller främmande föremål som accelererar korrosionen annars avstannar korrosionen pga syrebrist innan allvarligt frät djup uppstått.

Om kaviteten har en direkt kontakt med, utanför betongkonstruktionen omgivande syresatt luft, så ökar den atmosfäriska korrosionen men inte till någon kritisk nivå. Vattenlinjekorrosionen riskerar dock att inte avstanna på motsvarande sätt som i en sluten kavitet.

Om vattnet med otillräckligt högt pH-värde flödar genom kaviteten ökar korrosionsrisken ytterligare.

Korrosionshastigheten på vattenberörda ytor som förlorat sin passivitet kan förstärkas av galvanisk korrosion och/eller korrosion orsakad av makroceller.

Ett antal presumtiva riskzoner har identifierats och redovisas i rapporten.

Summary

The steel liner is a part of the reactor containment and the aim of the lining is to prevent, or to minimize, a leakage of radioactive particles during operation or at a deviating event. In Sweden and Finland, contrary to the rest of the world, the steel liner is casted into concrete. It is of great importance to be able to judge the aging process of the steel liner and the risk for premature degradation.

The aim of the project has been to evaluate all, for the steel liner, possible corrosion processes. Based on the performed analysis areas with increased risk for corrosion have been identified.

For a steel liner casted into concrete, free from defects, all types of corrosion are written off.

For corrosion to take place a cavity must exist in the direct vicinity of the steel liner. In a closed cavity filled with water there will occur no corrosion. The high recorded values of humidity in the concrete indicate that the cavities normally are filled with water.

If the closed cavity is totally or partly filled with air negligible atmospheric corrosion takes place. If the cavity is partly filled with water waterline corrosion can be initiated. For the attack to become serious the cavity must have a large volume and contain some kind of heterogeneity or foreign item increasing the corrosion rate. Otherwise the corrosion attack stops due to lack of oxygen before the corrosion depth becomes critical.

If the cavity has a direct contact with, outside the concrete structure ambient oxygen containing air, the atmospheric corrosion increases but not to any critical level. The waterline corrosion may however not slow down in the same way as if the cavity was closed.

If water with insufficiently high pH value flows through the cavity the corrosion risk increases additional.

The corrosion rate on surfaces having lost its passivity can increase due to galvanic corrosion and/or corrosion caused by to macro cells.

A number of prospective danger zones have been identified and presented in the report.

Innehåll

1	Inledning	8
2	Syfte	9
3	Studerade reaktortyper och klimatförutsättningar	10
3.1	Konstruktiv utformning av inneslutningar i svenska och finska kärnkraftverk	10
3.2	Klimatförhållanden	18
4	Möjliga korrosionsprocesser	23
4.1	Intakt opåverkad betong utan kaviteter	25
4.1.1	Förlorad passivitet	25
4.1.2	Galvanisk korrosion	25
4.1.3	Läckström	26
4.1.4	Mikrobiell korrosion	28
4.2	Vid närvaro av kavitet i sprickfri betong	28
4.2.1	Förlorad passivitet	29
4.2.2	Atmosfärisk korrosion	34
4.2.3	Vattenlinjekorrosion	35
4.2.4	Galvanisk korrosion	37
4.2.5	Makro-celler	37
4.2.6	Läckström	38
4.3	Vid närvaro av både kavitet och sprickor	39
4.4	Vid spalt mellan tätplåt och betong	42
4.5	Ingjutet föremål mellan tätplåt och betong	43
4.6	Övergång mellan ingjuten och fritt exponerad tätplåt	45
4.7	Sammanfattning	46
5	Styrande parametrar	48
6	Inträffade korrosionsskador på tätplåtar	52
6.1	Svenska anläggningar	52
6.1.1	Barsebäck 2 genomföring 1993	52
6.1.2	Forsmark 1 toroid 1997	53
6.1.3	Ringhals 2 toroid 2005	55
6.1.4	Forsmark 2 toroid 2006	57
6.1.5	Ringhals 2 bottenplåt 2015	57
6.1.6	Ringhals 1 toroid 2017	59
6.1.7	Sammanfattning av svenska erfarenheter	61
6.2	Internationellt	62
7	Identifiering av olika riskzoner	64
7.1	BWR	65
7.1.1	Utsidan av tätplåt i cylindriska väggen	65
7.1.2	Insidan av tätplåt i cylindriska väggen	68

7.1.3	Bottenplåt	70
7.1.4	Genomföringar	71
7.2	PWR	72
7.2.1	Utsidan av tätplåt i cylindriska väggen	72
7.2.2	Insidan av tätplåt i cylindriska väggen	72
7.2.3	Bottenplåt	73
7.2.4	Genomföringar	74
7.3	Sammanställning	74
8	Diskussion	76
9	Slutsatser	80
10	Referenser	81
11	Bilagor	83
11.1	Bilaga 1 – Risk för att klorider tillförts under byggskedet	83
11.2	Bilaga 2 - Korrosionsmiljön i en kavitet, påverkan av provtryckning	85

1 Inledning

Tätplåten är en del av reaktorinneslutningen och dess uppgift är att förhindra, eller minimera, ett läckage av radioaktiva partiklar under drift eller vid en avvikande händelse. Det är av stor vikt att med god grund bedöma dess åldring och risk för degradering, inte minst med anledning av rådande diskussioner och analyser av förlängd drift. En god kunskap kring potentiella nedbrytningsprocesser och deras styrande parametrar möjliggör bättre riskbedömningar och preventiva åtgärder, vid behov. En frågeställning som tidigare identifierats men inte än till fullo utretts är risken för korrosion av tätplåten, både generell korrosion men även till exempel i en kavitet mellan plåt och betong.

I föreliggande arbete ska samtliga potentiella korrosionsprocesser som är aktuella för tätplåten identifieras. Studien bör visa på vilka korrosionsprocesser som finns och vilka förutsättningar som krävs för att dessa skall initieras eller fortgå samt vilka parametrar som styr dessa processer. Baserat på ovanstående analys ska riskzoner för reaktorinneslutningarnas tätplåtar identifieras.

2 Syfte

Syftet med projektet har varit att genom en teoretisk ansats genomföra en systematisk genomgång av vilka potentiella korrosionsprocesser som kan vara möjliga för ingjutna delar av tätplåten vid de nordiska kärnkraftverken.

Genomgången baseras på historiskt identifierade korrosionsprocesser för liknande miljöer. I studien ingår också att bedöma riskerna för korrosion då t.ex. en kavitet har uppstått mellan metall och betong. Risken för att korrosion ska uppstå i luftfyllda porer har tidigare bedömts vara låg. Detta antagande har baserats på en förväntat torr miljö. Det nu avslutade doktorandprojektet (Climatic conditions inside nuclear reactor containments [1]) visar dock att fuktnivåerna fortsatt ligger i ett intervall där korrosion är möjlig.

Målet med studien är att:

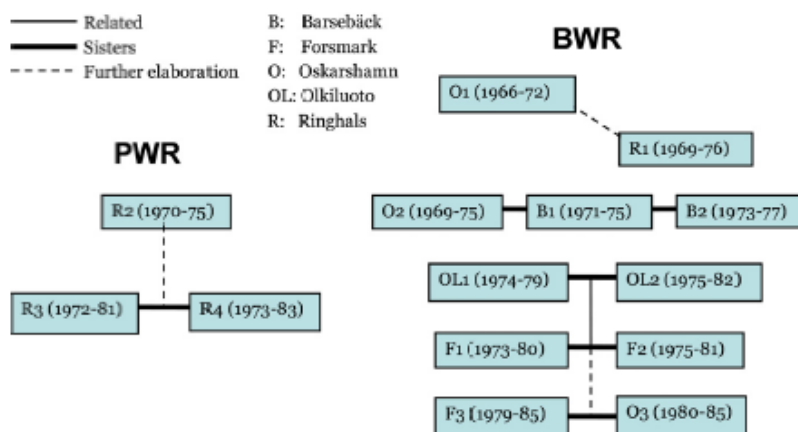
- Kartlägga vilka korrosionsprocesser som är aktuella för ingjutna delar av kärnkraftverkens tätplåtar
- Summera de parametrar som styr de identifierade korrosionsprocesserna
- Bedöma vilka processer som är av sådan dignitet att dessa kan påverka tätplåtens täthet under dess kvarvarande livslängd.

Studien ämnar dessutom avskrika de processer som inte bedöms som teoretiskt möjliga i rådande klimat.

Baserat på ovanstående analys ska potentiella riskzoner identifieras.

3 Studerade reaktortyper och klimatförutsättningar

Föreliggande studie avser de reaktorer som finns i Sverige och Finland, se figur 1, dock inte VVER reaktorer i Loviisa då de saknar inneslutning. I Ringhals finns tre tryckvattenreaktorer (PWR) och resterande reaktorer är av typen kokarreaktorer (BWR).

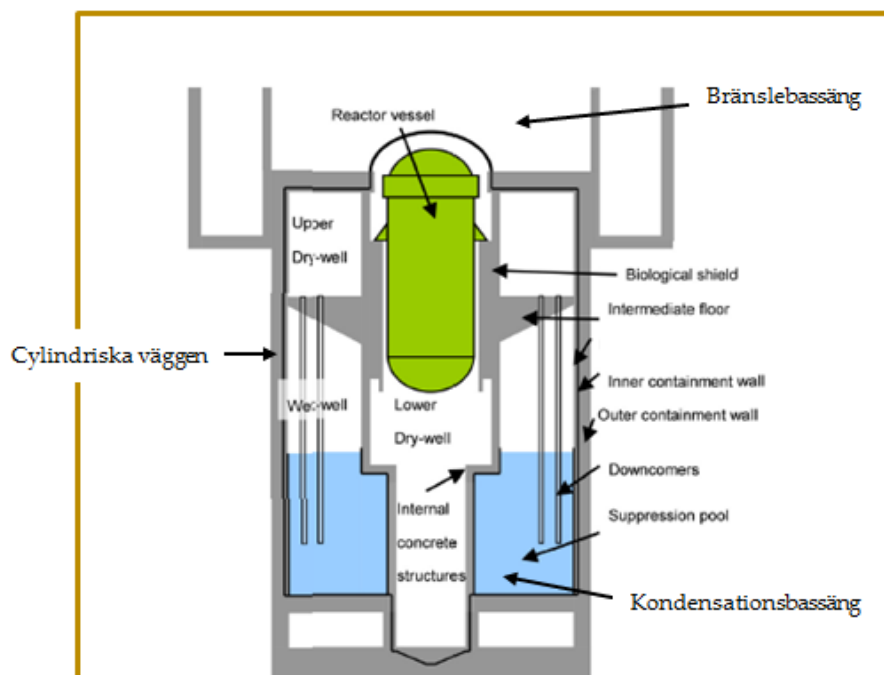


Figur 1. Svenska och finska PWR och BWR reaktorer [1].

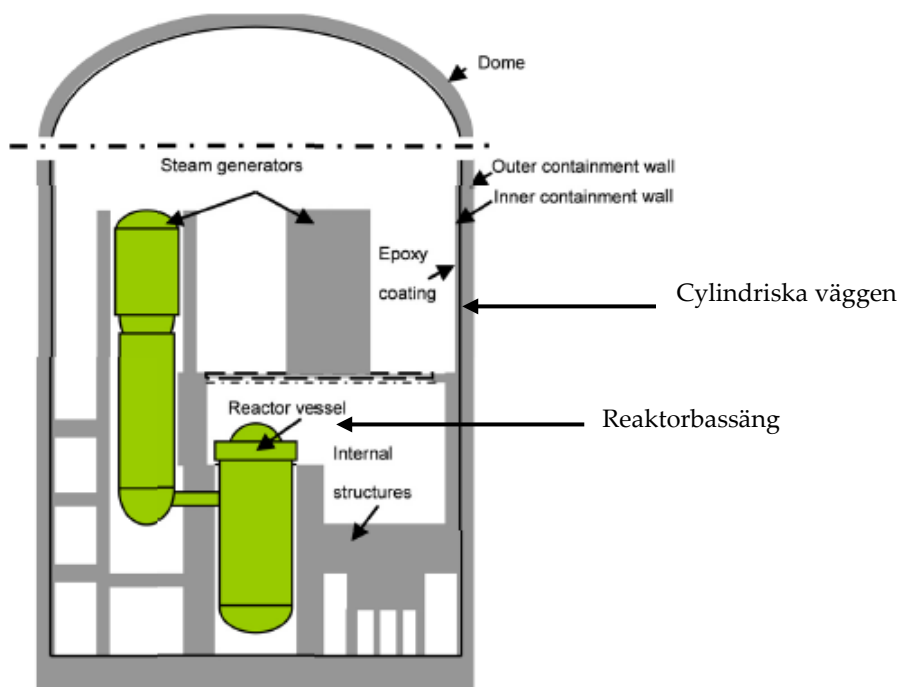
3.1 KONSTRUKTIV UTFORMNING AV INNESLUTNINGAR I SVENSKA OCH FINSKA KÄRNKRAFTVERK

Tätplåten i de båda reaktortyperna utgörs av en stålplåt som till större delen är injuten i betong men också delvis direkt exponerad mot luft eller bassängvatten. Inneslutningarnas cylindriska vägg har gjutits i två delar med en total vägg tjocklek av 1,0-1,5 m. Inre delens tjocklek är 0,2 till 0,3 m. Tätplåten är belägen mellan de två koncentrisk delarna och är 4-10 mm tjock [2].

I BWR reaktorer är inneslutningen helt inomhus d.v.s. även utsidan är exponerad för inomhusklimat, se figur 2. I PWR reaktorer exponeras inneslutningens yttervägg för utomhusklimat, se figur 3. Under drift fylls inneslutningen i BWR reaktorer med kvävgas något som inte sker i PWR reaktorer. I BWR är betongytorna i upper och lower dry-well epoxymålade. I PWR är hela inneslutningens insida målade.



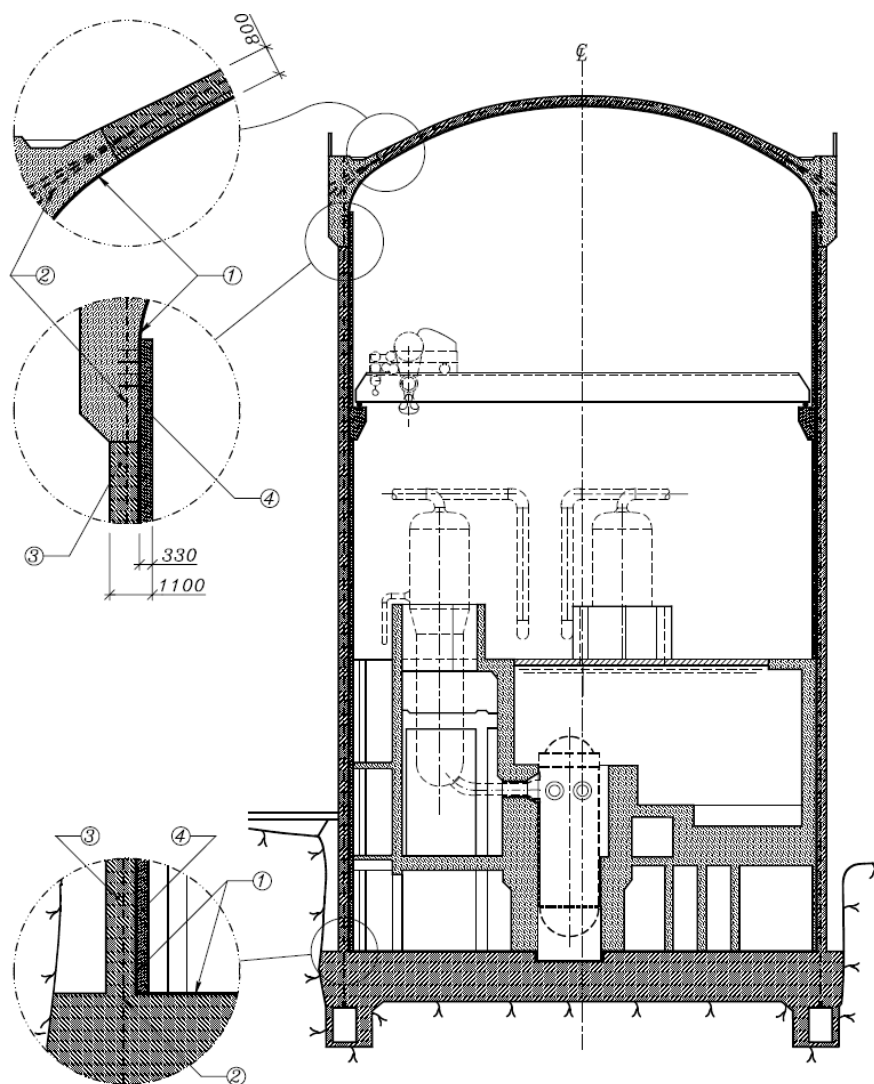
Figur2. Principiell skiss av en BWR reaktor. Svart linje är tätplåt och gråa ytor betong.



Figur 3. Principiell skiss av PWR reaktor. Svart linje är tätplåt och gråa ytor betong.

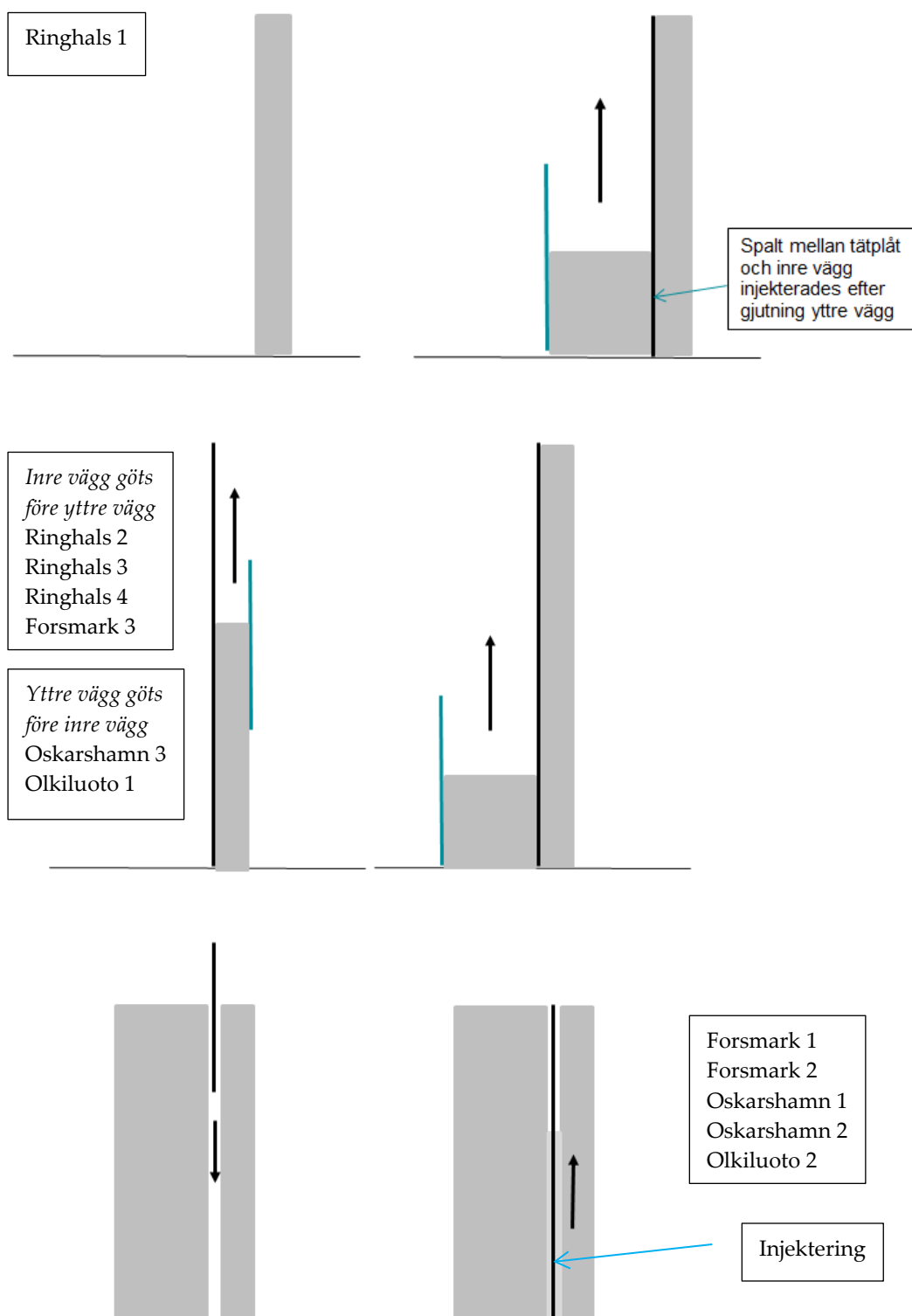
I BWR reaktorer utnyttjas kondensationsbassängens bottenplåt (rostfri) som tätplåt. Denna är ansluten till den vertikala tätplåten av kolstål i den cylindriska väggen. I PWR reaktorer finns ingen kondensationsbassäng. I Ringhals 3 och 4 lades en 8 mm tjock stålplåt, SS 2102, ovanpå bottenplattan. Detta tätskikt svetsades med kälsvets mot i betongplattan ingjutna vinkelstål. Fogarna täcktes därefter med remsor av tunnare stålplåt som kälsvetsades mot tätplåten. På detta sätt utbildades kanaler som kan tjäna till att kontrollera tätplåtens täthet. I Ringhals 2 lades en 5 mm tjock tätplåt, SS2102, på bottenplattan. Denna plåt skyddas med ett 0,2 m tjockt lager expanderande lerkulor (Leca) och 0,3 m skyddsbetong. I efterhand har spalten med Leca fyllts med kalkvatten.

I BWR reaktorer är tätplåten fritt exponerad i vissa av de övre delarna av inneslutningen. Även i sfäriska taket i PWR-inneslutningar är tätplåten fritt exponerad, se figur 4.



Figur 4. Sektion genom Ringhals 3. Siffran 1 är tätplåten. (Tätplåten är inte fritt exponerad i botten utan ligger under en bottenplatta av betong).

Konstruerandet av den cylindriska väggen har skett på olika sätt. De olika metoderna redovisas schematiskt i figur 5.



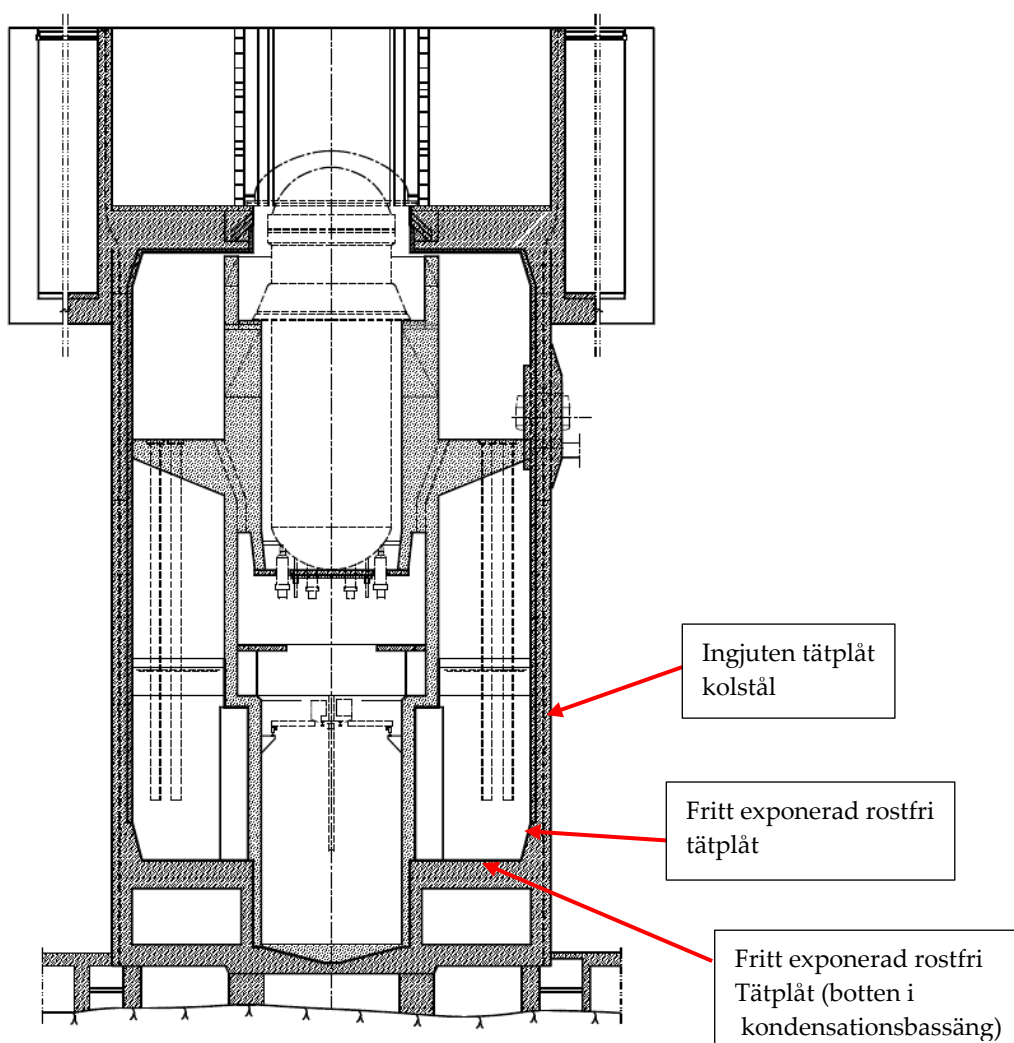
Figur 5. Byggnadstekniker utnyttjade vid konstruerandet av cylinderväggen.

I Ringhals 1 glidformgöts den inre väggen. Därefter tillverkades tätplåten i överkanten på cylinderväggen under successiv nedsänkning. Plåtskalet försågs på utsidan med fästen för ursparingar, spännarmering osv. Efter det att plåtskalet var färdigt göts den yttre lastbärande delen av inneslutningscylindern. Spalten mellan den inre betongcylindern och plåtskalet injekterades.

I Ringhals 2, 3 och 4, Forsmark 3, Oskarshamn 3 samt Olkiluoto 1 tillverkades först stålskalet i sin helhet varefter det inre och det yttre betongskalet åstadkoms med glidformsgjutning. För genomföringar monterades ursparingar på plåten. I Oskarshamn 3 och Olkiluoto 1 göts den yttre väggen först. För övriga verk göts den inre väggen före den yttre.

I Forsmark 1 och 2, Oskarshamn 1 och 2 samt i Olkiluoto 2 glidformsgöts både inre och yttre väggen. I den 0,1-0,12 m breda spalten sänktes tätplåten ner. Den tillverkades i toppen genom successivt påsvetsade plåtar. Genomföringar åstadkoms genom att ursparingar sattes in i glidformsgjutningen.

I Forsmark 1 och 2 är tätplåten på den nedre votade delen belägen innanför den inre väggen dvs utan täcksikt och utförd av rostfritt stål, SS 2343, se figur 6.

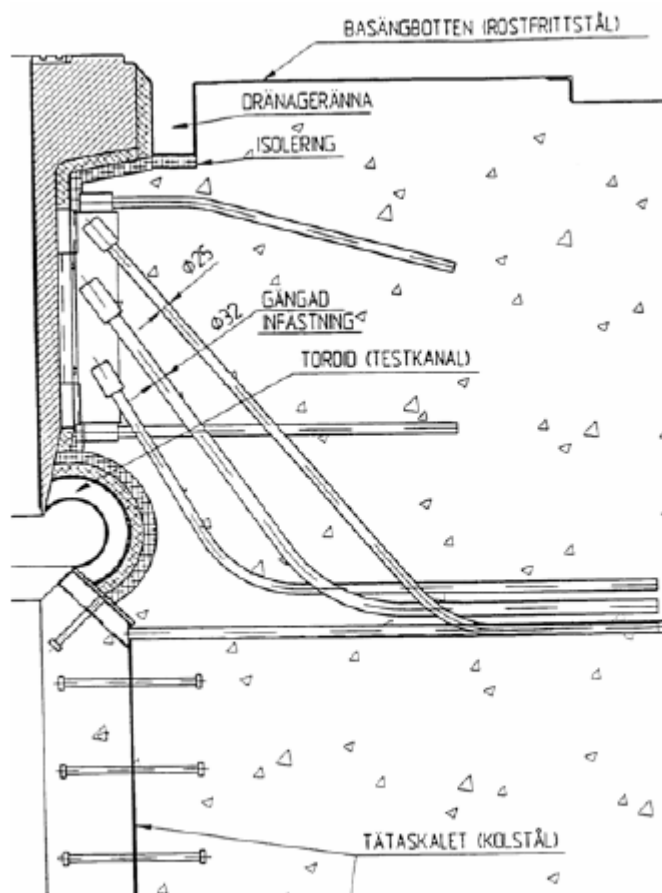


Figur 6. Sektion genom Forsmark 1.

Uppgifter om hur cylinderväggen tillverkades i Barsebäck 1 och 2 har inte påträffats.

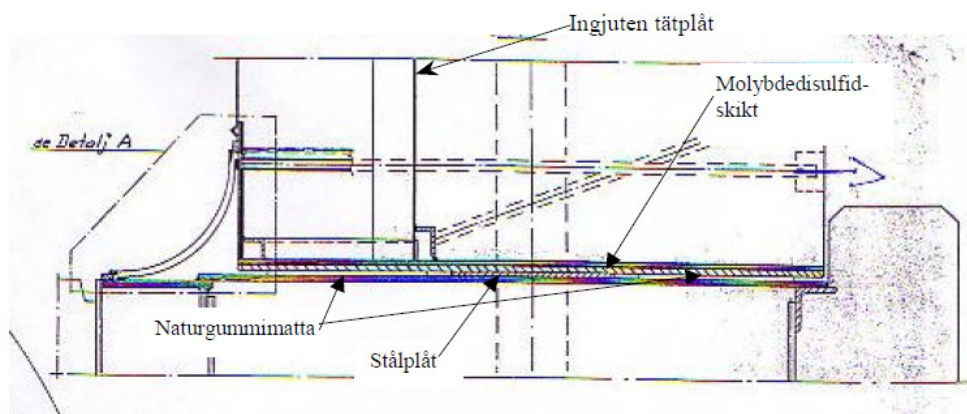
Svetsskarvarna på tätplåten försågs med tätsvetsade profiler för att svetskarvar skulle kunna täthetsprovas främst under byggskedet.

På Forsmark 1, 2 och 3 samt på Ringhals 1 och Oskarshamn 1 har betongen utanför kupolflänsen gjutits mot skivor av mineralull. I flänsens underkant övergår täta skalet i en mer tunnväggig toroid, även den omgiven av mineralull, se figur 7.



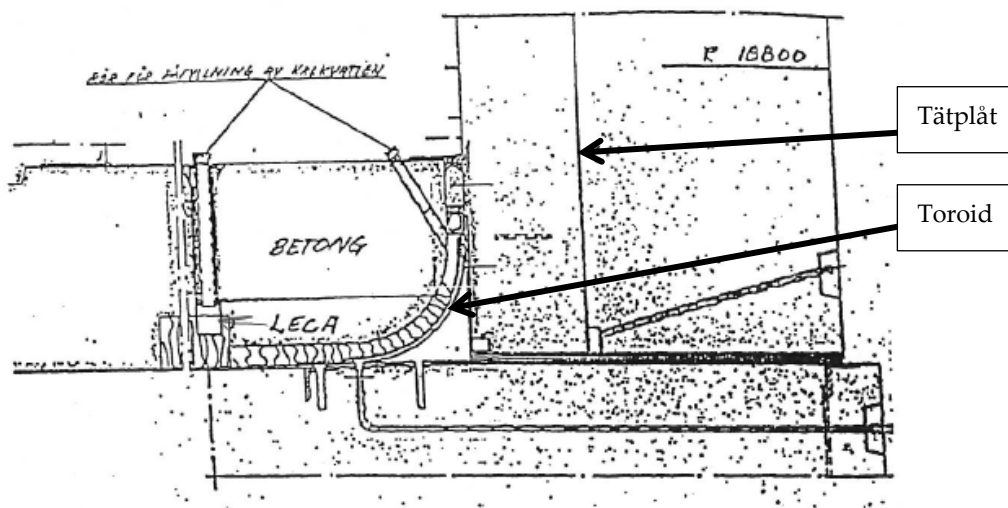
Figur 7. Kupolfläns och toroid Forsmark 2.

I Ringhals 1 finns ytterligare två toroider dels en i anslutningen mellan cylinderväggen och ringplattan dels en mellan cylinderväggen och bottenplattan, se figur 8. Både bottenplatta och toroid är tillverkad i rostfritt (SS 2343).



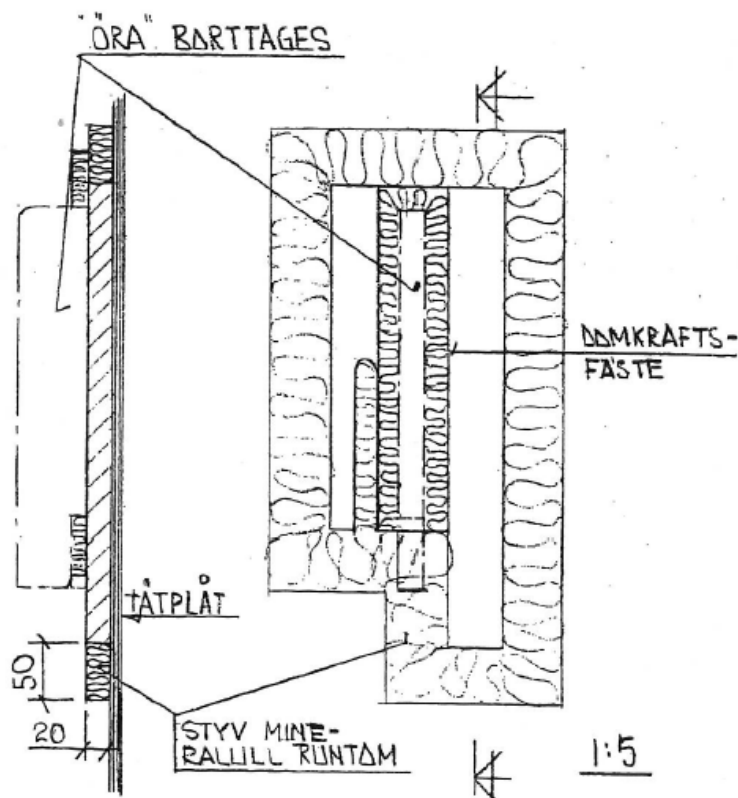
Figur 8. Toroid i anslutningen mellan bottenplatta och cylindervägg i Ringhals 1.

I Ringhals 2 finns en liknande konstruktion i inneslutningens nedersta del men i detta fall är både toroid och bottenplåt av kolstål, se figur 9. Fram till 2005 då toroiden byttes ut fanns mineralull mellan den inre toroiden och betonggolvet. Bottenplåten och toroiden har skyddats mot korrosion genom att kalkvatten med tillsats av hydrazin har fyllts på.



Figur 9. Toroid i anslutning till bottenplatta på Ringhals 2.

På Forsmark 3 finns domkraftsfästen på tätplåtens insida, se figur 10. Håligheterna fylldes med mineralull innan den inre cylinderväggen motgöts. Eftersom tätplåten på Oskarshamn 3 och Ringhals 2-4 tillverkades på samma sätt, genom att cylinderplåten sammansvetsades i markplanet och successivt lyftes uppåt, kan motsvarande domkraftsfästen även finnas på dessa reaktors cylinderväggar.



Figur 10. Domkraftsfästen Forsmark 3.

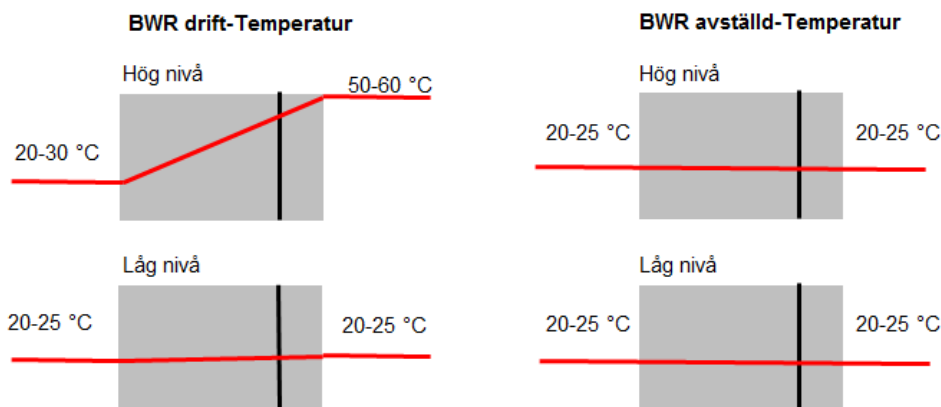
BWR reaktorer har en kondensationsbassäng nederst i inneslutningen vilket inte PWR reaktorer har. För BWR reaktorer skiljer man på externpumps-BWR (R1, O1, O2, B1 och B2) och internpumps-BWR (F1, F2, F3, OL1, OL2 och O3), jämför figur 6 och 14. I en externpumps-BWR finns kondensationsbassäng i botten på hela inneslutningen. I en internpumps-BWR är nedre primärutrymmet en del av botten och kondensationsbassängen är ringformad [18].

Även bränslebassängerna skiljer sig åt. I BWR är dessa placerade ovanför själva inneslutningen och i PWR är de placerade i intilliggande bränslebyggnad. Inuti PWR inneslutningen finns en reaktorbassäng som fylls under revision i samband med bränslebyte.

Miljön inuti en reaktorinneslutning har ingen koppling till omgivande klimat. Den fukt som avges av betongen och bassänger tas upp av luften inuti inneslutningen. För att inte påverka känslig utrustning avfuktas luften i inneslutningen under drift. För BWR reaktorer sker detta i ett system kopplat till kondensationsbassängen. PWR reaktorer saknar en tillgänglig vattenreservoar inne i inneslutningen och det avfuktade vattnet samlas istället upp i en sump i botten av inneslutningen och som töms vid behov.

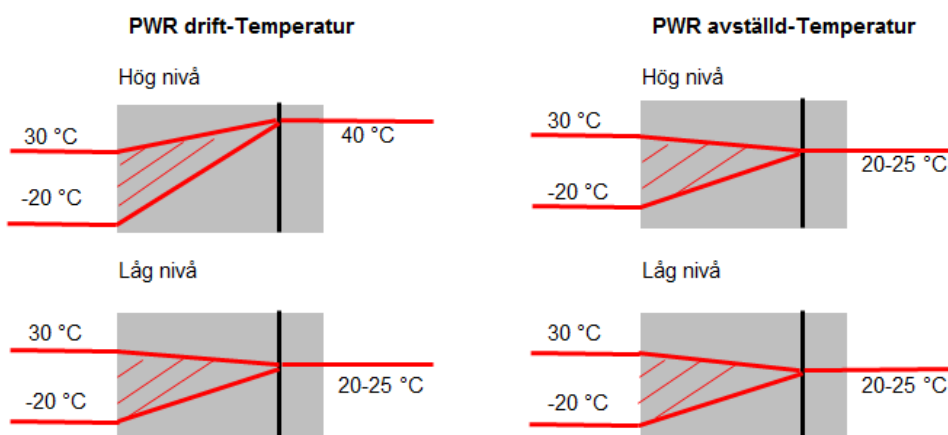
3.2 KLIMATFÖRHÅLLANDEN

I BWR reaktorer existerar ingen signifikant temperaturgradient i inneslutningsväggen vid avställning utan temperaturen ligger på något över 20 °C på båda sidor om väggen. Under drift är temperaturen på insidan något över 20 °C längre ner och 50-60 °C högre upp [1]. I figur 11 redovisas dessa temperaturförhållanden schematiskt.



Figur 11. Temperaturvariationer i cylinderväggen hos BWR reaktorer.

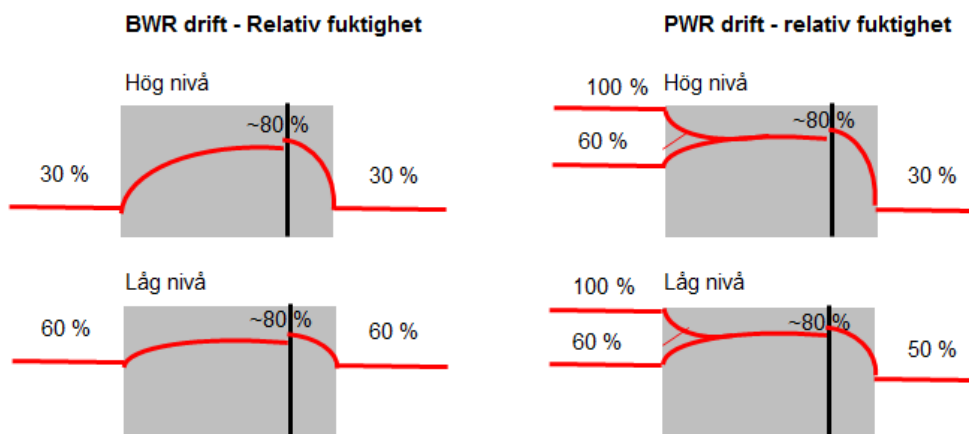
I PWR reaktorer kan temperaturgradienterna i inneslutningsväggen vara stora. På utsidan styr utomhusklimaten och på insidan stiger temperaturen under drift från 20-30 °C på låga nivåer till ca 40 °C högre upp i inneslutningen. Vid avställning ligger temperaturen på insidan på ca 20 °C, se figur 12.



Figur 12. Temperaturvariationer i cylinderväggen hos PWR reaktorer.

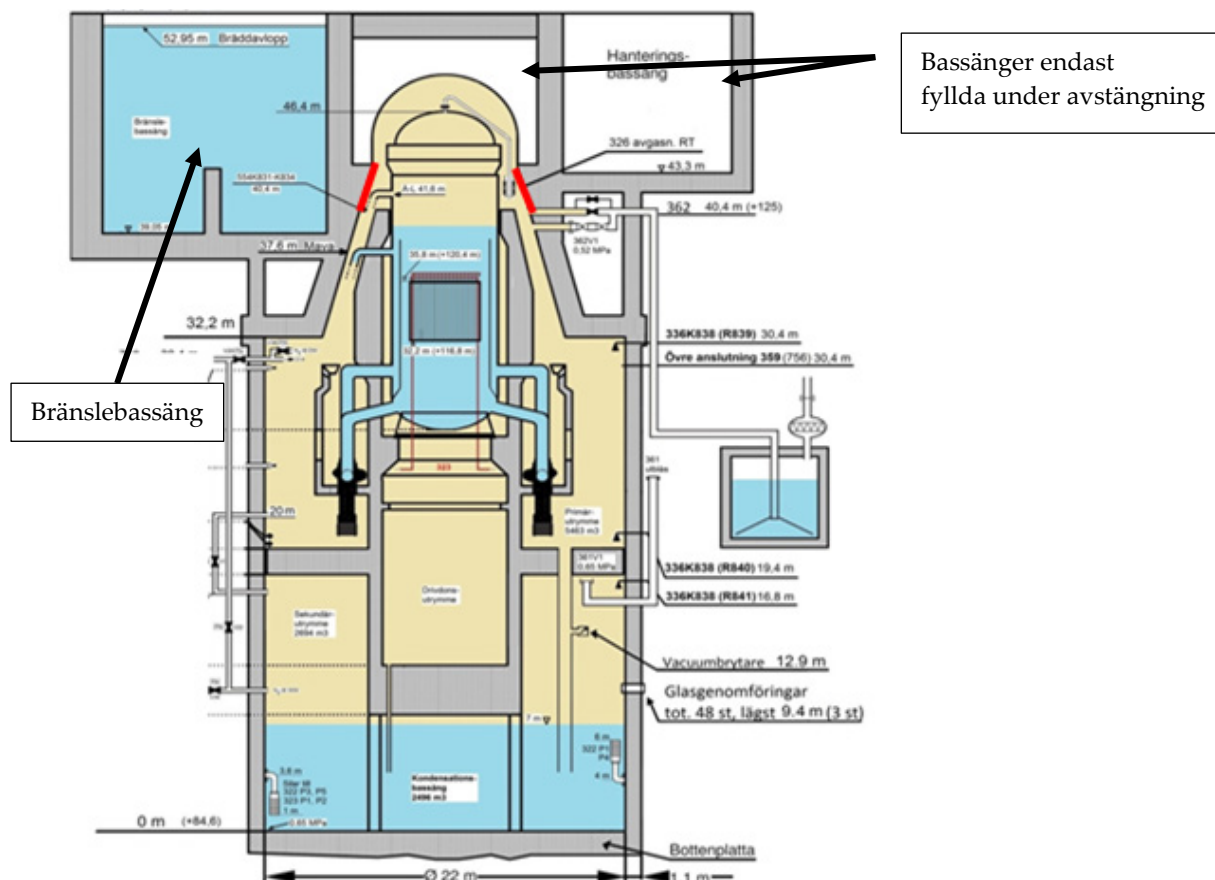
Mätningar utförda i cylinderväggarnas ut- och insidor har visat att den relativa fuktigheten stiger med djupet och är hög 80-85 % närmast tätplåten [1, 3, 7].

Baserat på redovisade resultat har de ungefärliga profiler som presenteras i figur 13 tagits fram.



Figur 13. Relativa fuktigheter i cylinderväggen och omgivande utrymmen i BWR och PWR reaktorer under drift. Principiella figurer baserade på redovisade data (1,3,7).

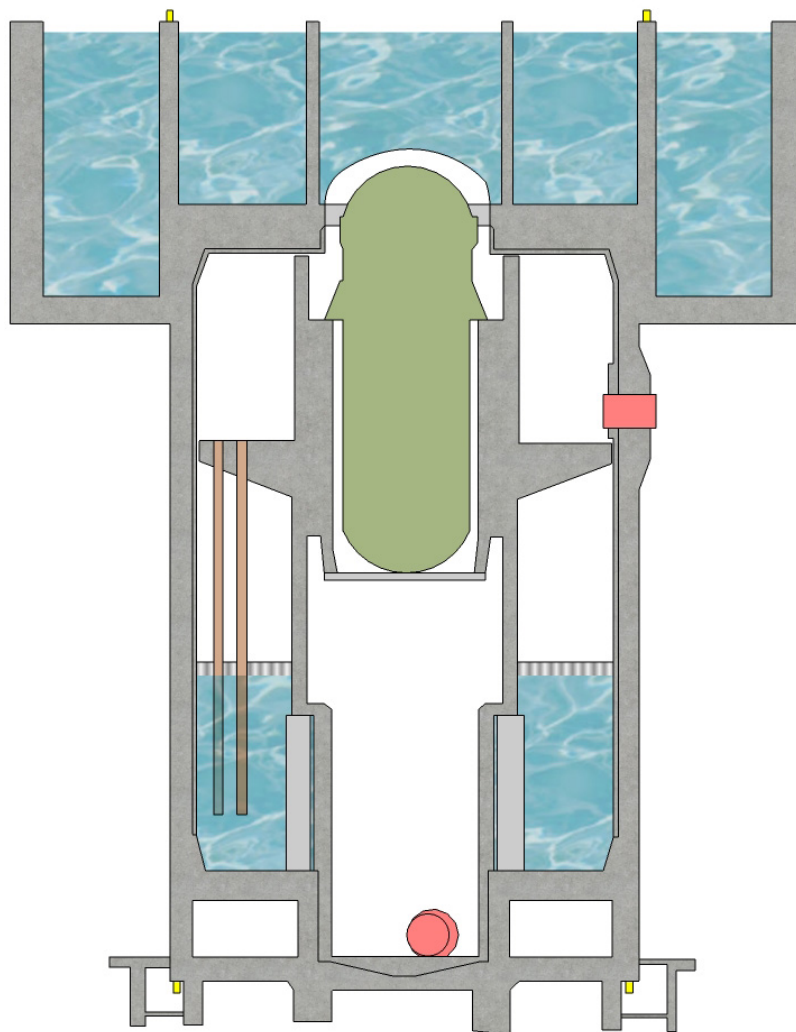
Det är känt att det förekommer svetsdefekter på de rostfria inklädningsplåtarna i vissa bränsle-, hanterings- och kondensationsbassänger. I BWR reaktorer är bränsle- och hanteringsbassänger lokaliserade ovanför inneslutningen, se figur 14 och 15. Eventuella läckage tillför därför vatten till inneslutningens utsida.



Figur 14. Tvärsnitt av Ringhals 1 (BWR) visande bassänger. Röda streck representerar kupolflänsen som ingår i det täta skalet.

Läckage förekommer eller har förekommit på Ringhals 1, Forsmark 1, Forsmark 2, Forsmark 3 och Oskarshamn 1. Inga uppgifter har påträffats om Barsebäck 1 och 2.

Bränslebassängerna är alltid fyllda. I de flesta anläggningarna är även hanterings- och interndelsbassängerna fyllda under drift. Oskarshamn tömmer endast hanteringsbassängerna under revision och Forsmark tömmer endast den mittersta (interndelsbassängen) vid avlockning, se figur 15. På Ringhals 1 är däremot hanterings- och interndelsbassäng tömd under drift, se figur 14. Beroende på dessa olika förfaranden och givetvis inklädnadsplåtarnas täthet varierar eventuella läckagemängder i tiden och från anläggning till anläggning.



Figur 15. Bassänger i Forsmark.

I PWR reaktorer fylls reaktorbassängen endast under revision. Eventuellt läckage som inte tas upp av läckageindikeringskanaler under bassängplåten kan ansamlas på tätplåtens insida i inneslutningens nedre delar. Läckagevägen är dock lång varför det är mer troligt att vattnet absorberas av omgivande betong.

Även vissa kondensationsbassänger i BWR reaktorerna läcker. Detta medför att tätplåten belägen innanför den rostfria inklädningsplåten står i kontakt med vattenmättad betong och därmed att eventuella kaviteter på plåtens insida är vattenfyllda.

Betongytor i Dry well är målade med epoxyfärg vilket fungerar som en diffusionsspärr mot syreinträngning i betongen. I Wet well är inte betongytorna målade men vissa ytor som exponeras för vattensprinkling har ytförseglats.

Inneslutningen i BWR reaktor är fyllda med kvävgas under drift. Motsvarande gäller inte för PWR reaktorer. Luften inuti reaktorbyggnaderna innehåller inga besvärande luftföroreningar som klorider, svaveldioxid eller kväveoxider.

Eventuell atmosfärisk korrosion i kaviteter bestäms därför av rådande temperatur, relativa fuktighet och tillgång till syre.

4 Möjliga korrosionsprocesser

Där tätplåten är ingjuten i betong är den inre väggen ca 25 cm tjock och den yttre ca 1 m tjock. Betongen som användes var av hög kvalitet [4] varför risken för nedbrytning genom urlakning, sulfatangrepp, sura angrepp och alkaliballastreaktioner bedöms vara små [2, 4]. Kokarreaktorernas inneslutningar är helt inomhus och därmed inte känsliga för skademekanismer orsakade av yttre förhållanden som abrasion, erosion eller frostangrepp. Inneslutningarnas utsidor i tryckvattenreaktorer påverkas däremot av utomhusklimatet. De grova dimensionerna i kombination med betongens höga kvalitet gör dock att man inte förväntar sig en nedbrytning av betongen som skulle kunna påverka tätplåtens beständighet. Under normal drift ligger de globala temperaturerna på 20-60 °C. Temperaturer av denna storleksordning bedöms inte påverka betongens egenskaper. Lokalt kan dock temperaturer överstigande 100 °C förekomma, vilket skulle kunna ge upphov till sprickor i betongen. Risken för att korrosion på tätplåten ska inträffa som en direkt konsekvens av betongens nedbrytning bedöms således som liten [2]. Detta förutsätter dock att det inte förekommer några avvikelser från ritningsenligt utförande, såsom kaviteter eller ingjutna främmande föremål.

Korrosion på tätplåten ingjuten i en "defektfri" betong kan ske som en följd av betongens karbonatisering och/eller inträngning av klorider. Karbonatisering är en långsam process och med tanke på väggarnas tjocklek så kommer inte en karbonatiseringsfront att nå tätplåten under reaktorernas livslängd. Utöver detta så är BWR reaktorernas inneslutningar kvävgasfyllda under drift vilket medför att den tunnare väggen på insidan av plåten endast exponeras för CO₂ under ca en månad per år. Allt processvatten är avjoniserat varför exponeringen för kloridjoner är mycket liten. PWR reaktorernas utsidor kan utsättas för salthaltiga aerosoler men risken för att kloriddiffusion genom de tjocka ytterväggarna skulle skapa kritiskt höga kloridhalter bedöms som försumbar [3]. För stål ingjutet i en defektfri betong är risken för **galvanisk korrosion**, **läckströmskorrosion** och **mikrobiell korrosion** liten men riskerna bör ändå belysas i en betraktelse av föreliggande art.

Vi kan således konstatera att de vanliga korrosionsmekanismerna inte förväntas utgöra någon risk för tätplåten i en "defektfri betong". Om det däremot förekommer avvikelser i konstruktionen som kan medföra att stålets passivitet bryts så är korrosion möjlig. Den avvikelse som bedöms som mest relevant för en ökad korrosionsrisk är förekomsten av hålrum mellan plåt och betong. Miljön i hålrummet blir då avgörande för om plåten angrips eller inte. Ett hålrum kan ha olika dimension, ursprung och utformning, allt från stora spalter till mindre kaviteter. Uppkomna hålrum i anslutning till tätplåten i reaktorinneslutningar kan ha förorsakats av t.ex. gjutdefekter, ingjutna objekt, specifika konstruktionsutformningar alternativt om delaminering uppstått mellan tätplåt och betong [3].

Risken för att korrosion ska uppstå i luftfyllda porer har tidigare bedömts vara låg [5]. Detta antagande har baserats på en förväntat torr miljö. De av Oxfall [1] utförda mätningarna visar dock att fuktnivåerna i betongen på inneslutningarnas insida är så höga att **atmosfärisk korrosion** är möjlig. Fuktnivån på utsidan av

tätplåten är lika hög som på insidan [7]. Vidare är det känt att bassängläckage förekommer. Läckage från kondensationsbassänger i BWR reaktorer medför att eventuella kaviteter på tätplåtens insida kan vara helt eller delvis vattenfyllda. Om vattnet har transporterats genom betongen innan det når kaviteten kommer dess pH-värde vara högt även om kavitetens väggar har ett karbonatiserat ytskikt. Har däremot ett från början neutralt vatten istället transporterats direkt in i kaviteten får man räkna med ett pH-värde på ca 9,5 inställer sig efter kontakt med de karbonatiserade ytskikten i kaviteten. Under dessa omständigheter finns en risk för att passiviteten bryts. Störst är risken i vattenlinjen. Här kan lokalt pH-värdet sjunka ytterligare till följd av kontakt med CO₂ i luften ovanför. Om passiviteten bryts gynnas angreppet dessutom av den rikligare tillgången på oxidationsmedel (syre) i vattenlinjen jämfört med längre ner i vattenmassan (**vattenlinjekorrosion**).

På ytor som förlorat sin passivitet och befinner sig i helt eller delvis vattenfyllda kaviteter kan även korrosionen förstärkas till följd av **makroceller** som bildas om stålytan exponeras för olika tillgång på syre (luftningscell) eller olika pH-värden (aktiv/passiv-celler). Eftersom den rostfria bassängplåten är i metallisk kontakt med den ingjutna tätplåten av kolstål så föreligger också risk för galvanisk korrosion. Andra korrosionstyper som bör beaktas är läckströmskorrosion och mikrobiell korrosion.

På motsvarande sätt exponeras tätplåtens utsida i BWR reaktorer för de läckage som sker från bränsle- och hanteringsbassängerna ovanför reaktorn. Kaviteter kan bli helt eller delvis vattenfyllda. Miljön i dessa kaviteter kan vara olika jämfört med miljön i kaviteter på tätplåtens insida, avseende temperatur, syretillgång osv varför risken för samma typer av korrosion kan vara annorlunda vilket måste beaktas. Läckage från reaktorbassänger i PWR reaktorer medför att eventuella kaviteter på tätplåtens insida vattenfylls.

Om kaviteten på något sätt kommunicerar med omgivningen t.ex. genom sprickor i betongen eller närvaron av en spalt mellan tätplåt och betong ökar korrosionsrisken dels genom ökad tillförsel av syre och CO₂ dels genom risk för ökad vattenomsättning och därmed svårighet att bibehålla ett högt pH-värde.

Vid avställning sjunker temperaturen vilket kan leda till kondensation på stålytor exponerade i kaviteter även om den relativa fuktigheten inte var särskilt hög under drift.

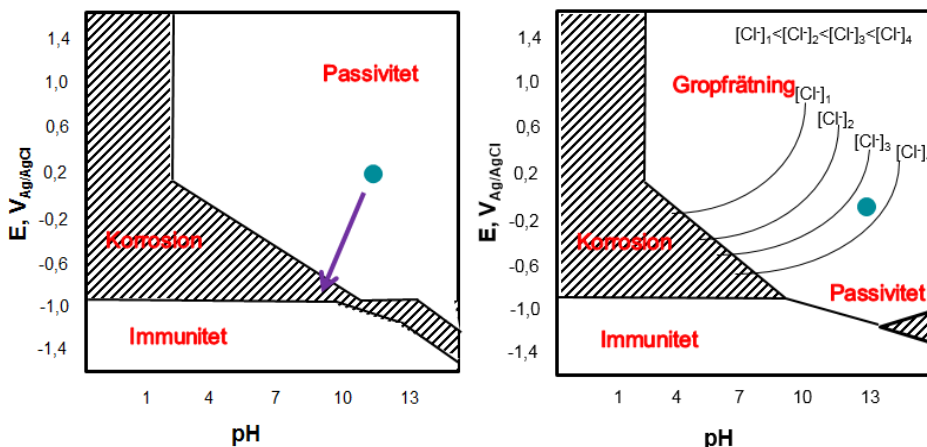
Risk för korrosion föreligger också om något främmande föremål gjuts in i betongen intill tätplåten respektive i övergången mellan ingjuten tätplåt och fritt exponerad tätplåt.

Nedan görs en kritisk granskning av ovan redovisade korrosionstyper och under vilka olika yttre förutsättningar som de kan bli aktuella för en ingjuten tätplåt eller inte.

4.1 INTAKT OPÅVERKAD BETONG UTAN KAVITETER

4.1.1 Förlorad passivitet

Korrosionsförhållandena i betong kan beskrivas med ett så kallat potential-pH diagram. Stålet får en ädel potential vid det höga pH-värdet som råder i betong och blir passivt. Passiviteten kan brytas på två olika sätt antingen genom att pH-värdet sjunker till följd av att betongen karbonatiserar eller genom att kloridhalten blir för hög, se figur 16. Vid karbonatisering förändras stålets potential enligt den vänstra bilden i figur 16. Vid förhöjda kloridhalter i betongen uppstår ett gropfrättningsområde inom det passiva området i diagrammet. Vid en kritisk hög kloridhalt, $[Cl]_4$, hamnar stålet inuti gropfrättningsområdet, se blå prick i den högra bilden i figur 16.

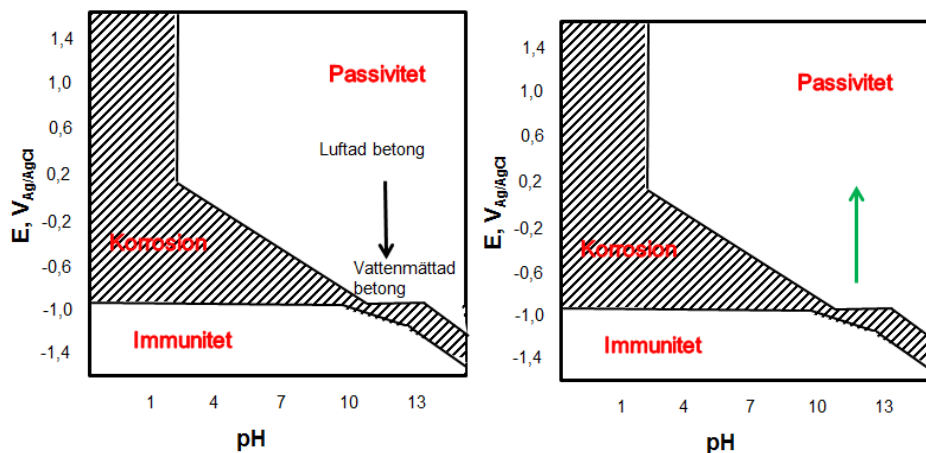


Figur 16. Initiering av korrosion på stål i betong till följd av förlorad passivitet. Till vänster pga karbonatisering och till höger genom inträngande kloridjoner.

Eftersom vi inte förväntar oss vare sig karbonatisering eller kloridinträngning till det djup där tätplåten befinner sig så är korrosion pga "förlorad passivitet i frisk betong" ingen korrosionstyp som behöver beaktas.

4.1.2 Galvanisk korrosion

I atmosfäriskt exponerad "frisk" betong har kolstål samma ädla potential som injutet eller fritt i vatten exponerat rostfritt stål. Att sammankoppla de båda materialen ger, under dessa omständigheter, inte upphov till några galvaniska strömmar och därmed ingen förhöjd korrosion på kolstålet. Vattenmättas betongen så förändras kolstålets potential i negativ riktning, något som inte inträffar på det rostfria stålet. Om vi nu kopplar ihop materialen kommer en galvanisk ström att flyta pga att det existerar en potentialskillnad mellan materialen. Denna potentialskillnad försvinner dock relativt fort utan att ha resulterat i någon korrosion av betydelse eftersom kolstålet hela tiden varit passivt, se figur 17.

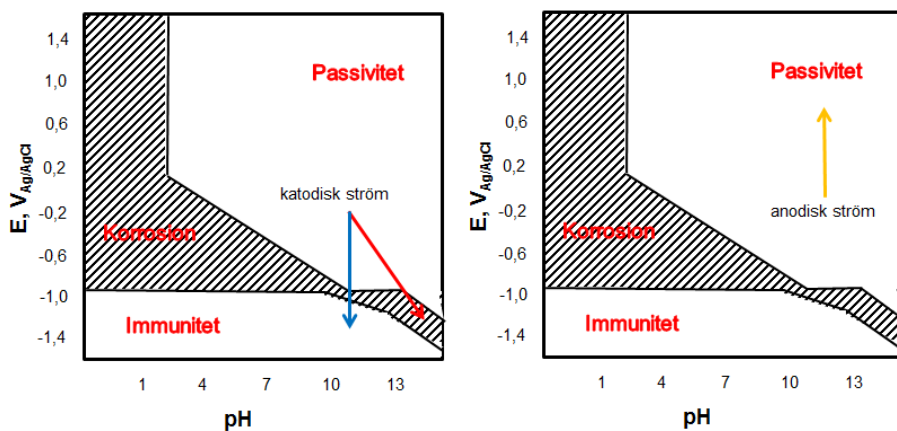


Figur 17. Potentialförändringar hos stålet då betongen övergår från luftad till vattenmättad (vänster) och då stål i vattenmättad betong exponeras för galvanisk korrosion (höger).

Vi kan således utesluta galvanisk korrosion mellan kolstål och rostfritt stål så länge som kolstålet är injutet i betong fri från kaviteter. Detta gäller oberoende av om den rostfria ytan befinner sig i betongen eller i ett omgivande vatten. Galvanisk korrosion kan dock uppstå om stålets passivitet går förlorad av något skäl t.ex. vid närvaro av en kavitet, se kapitel 4.2.

4.1.3 Läckström

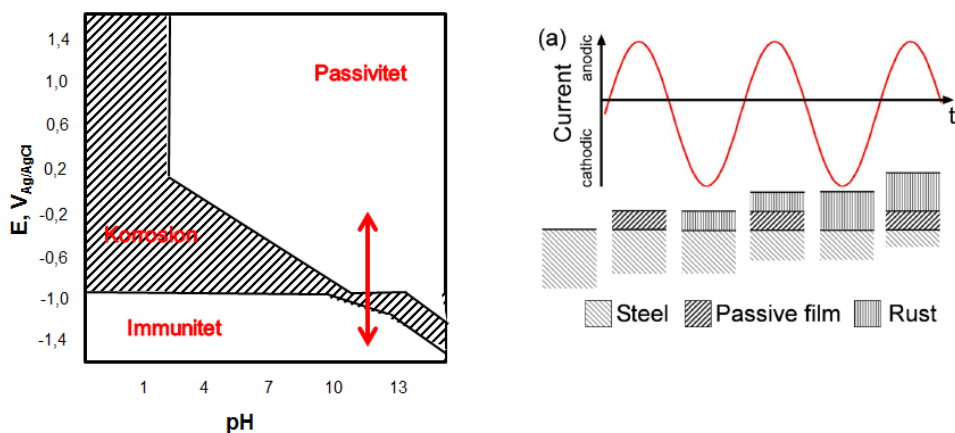
Stål kan påverkas negativt av läckström. Det är i första hand likström som förorsakar korrosion. En strömriktning från betong och in i stålet förändrar stålets potential i negativ riktning vilket bara flyttar stålet från passivitet till immunitet, se blå pil i figur 18. Eftersom en inläckande, så kallad katodisk ström, producerar hydroxidjoner vid stålytan finns en viss risk att stålet hamnar i det högra korrosionsområdet, se röd pil. Den korrosion som uppstår i detta fall blir dock försumbar eftersom den inläckande strömmen förbrukar syret vid stålytan.



Figur 18. Potentialförändringar vid läckströmspåverkan med likström.

Den omvända strömriktningen d.v.s. ut från stålytan, ändrar stålets potential i positiv riktning, se gul pil. Även i detta fall blir korrosionen försumbar eftersom man rör sig inom passivområdet. Vid en mycket kraftig positiv potentialförändring skulle man kunna tänka sig att man når transpassivitet och att syrgas utvecklas på stålytan. Detta skulle i sin tur orsaka en förurning som skulle påverka betongen och i ett senare skede leda till att stålet aktiveras. Några dylika skadefall är inte av oss kända.

Läckströmskorrosion orsakad av växelström är mycket ovanlig och rapporterade fall inskränker sig till katodiskt skyddade, väl belagda, markförlagda högtrycksledningar för naturgas. Då dessa ledningar läggs parallellt med högspänningsledningar induceras växelspanningar i röret. Det faktum att rören är långsträckta, belagda med plast och isolerade från andra jordade konstruktioner gör att spänningssättningen blir hög. I kombination med katodiskt skydd kan detta leda till "växelströmskorrosion". Det katodiska skyddet skapar en kraftigt alkalisk och lågresistiv miljö intill stålytan och växelströmmen gör att stålets potential växlar mellan passivitet och immunitet. Vid mycket höga strömtätheter har detta visat sig orsaka ett korrosionsförlopp beskrivet i figur 19. Under den anodiska cykeln skapas en oxidfilm. Denna reduceras sen till rost under den katodiska cykeln varefter en ny oxidfilm byggs upp under nästa anodiska cykel osv [8].



Figur 19. Mekanismen för växelströmskorrosion.

Tätplåten är inte katodiskt skyddad men det faktum att den är ingjuten i betong och därmed i en alkalisk miljö liknande den som uppstår vid en katodiskt skyddad yta gör att man skulle kunna tänka sig att förutsättningarna för växelströmskorrosion föreligger om plåten är spänningssatt. Den avgörande skillnaden är dock att betongens höga resistivitet reducerar strömtätheten till ofarliga nivåer även vid höga spänningar. Vattenmättad betong har en resistivitet på ca 250 Ωm vilket innebär att en stålyta på 1 m^2 har ett övergångsmotstånd på ca 80 Ω . För att åstadkomma växelströmskorrosion krävs en strömtäthet på minst 30 A/m^2 d.v.s. i vårt fall en ström på 30 A. Stålet måste därför ha en växelspanning på $30 \times 80 = 2400$ V mot omgivande jord vilket givetvis inte är möjligt.

4.1.4 Mikrobiell korrosion

Egentligen är begreppet mikrobiell korrosion missvisande då bakterierna normalt inte deltar direkt i den elektrokemiska processen. Det engelska namnet "Microbiological Influenced Corrosion" ger en mer korrekt bild av fenomenet. Bakterierna skapar antingen voluminösa beläggningar vilket gynnar uppkomsten av avlagringskorrosion alternativt genererar de joner som påverkar elektrolytens korrosivitet. För betong är det främst sulfatreducerande bakterier, SRB, som kan ställa till skada. I deras metabolism omvandlas sulfat till sulfid som tillsammans med vatten och syre skapar svavelsyra som i sin tur kan ge sura angrepp på betong. Detta är ett problem i t.ex. betongrör för spillvatten. En miljö som karakteriseras av ren betong, avjoniserat vatten eller kaviteter helt eller delvis fyllda med betongporvatten är dåligt anpassad för SRB pga vattnets höga pH-värde. Dessutom är sulfat fast bunden i mineraler i betong och inte tillgänglig för bakteriernas metabolism. Mikrobiell korrosion bedöms kunna avskrivas.

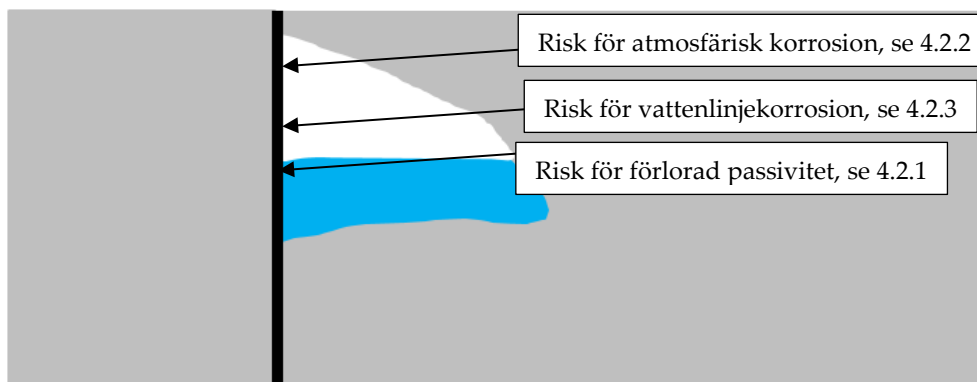
4.2 VID NÄRVARO AV KAVITET I SPRICKFRI BETONG

En kavitet i direkt anslutning till tätplåten kan vara fylld med luft alternativt vara helt eller delvis vattenfylld.

Om kaviteten är helt eller delvis fylld med ett främmande föremål kan detta hindra transporten av hydroxidjoner till stålytan. Detta fall behandlas i avsnitt 4.5.

I en helt eller delvis luftfylld kavitet finns förutsättningar för atmosfärisk korrosion. Om fuktfilmen på stålytan primärt härrör från betongporvatten som rinner ner utmed stålplåtens yta bibehålls stålets passivitet och ingen korrosion initieras. Om fuktfilmen istället uppstått genom kondensation är pH-värdet nära neutralt och stålet inte längre passivt. Vilka atmosfäriska korrosionshastigheter som är att förvänta redovisas i avsnitt 4.2.2.

I en helt eller delvis vattenfylld kavitet kan vattnet utgöras av överskottsvatten från gjutningen eller så har vattnet transporterats till kaviteten genom betongen. I båda fallen har vattnet ett högt pH-värde, ca 12-12,5 och stålet i kontakt med vattnet behåller sin passivitet. Kring vattenlinjen, i en delvis vattenfylld kavitet, kan dock förhållandena bli sådana att korrosion initieras, se avsnitt 4.2.3. Om vattnet bildats genom kondensation är dess pH-värde inledningsvis neutralt men kommer att öka till följd av kontakten med omgivande betongytor. Beroende på om dessa omgivande betongytor är karbonatiserade eller inte så kommer vattnets pH-värde på lång sikt att variera mellan 9,5 och 12,5.



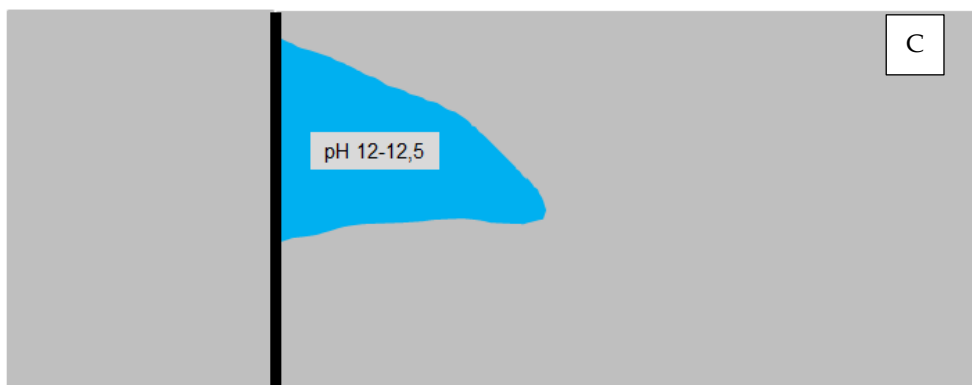
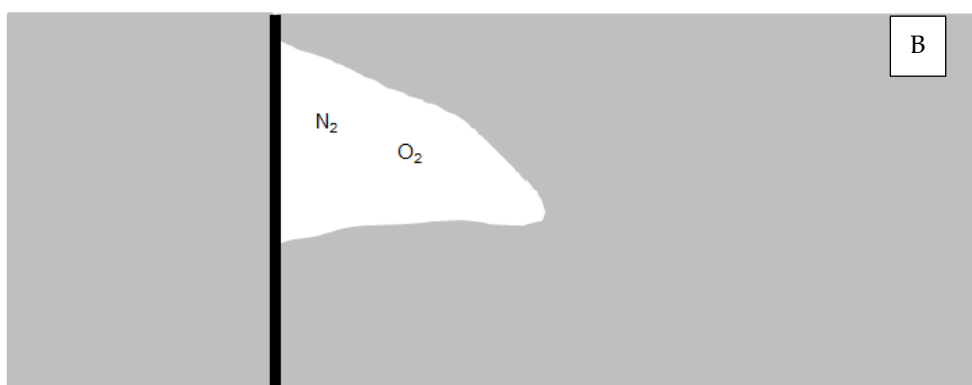
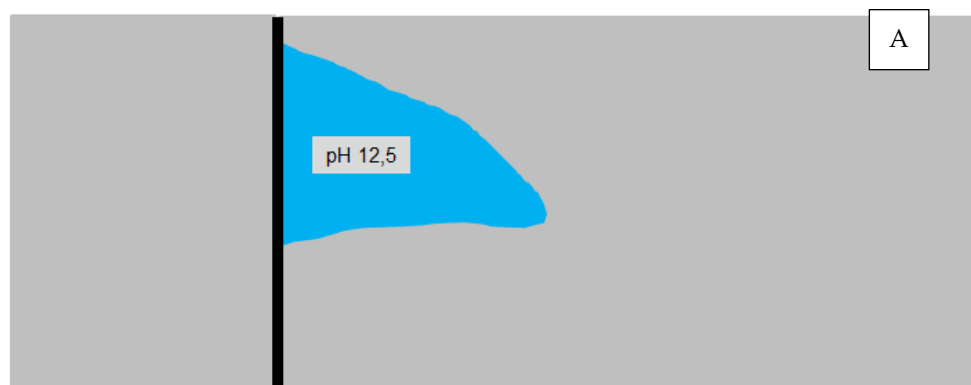
Figur 20. Korrosionsrisker i en sluten kavitet.

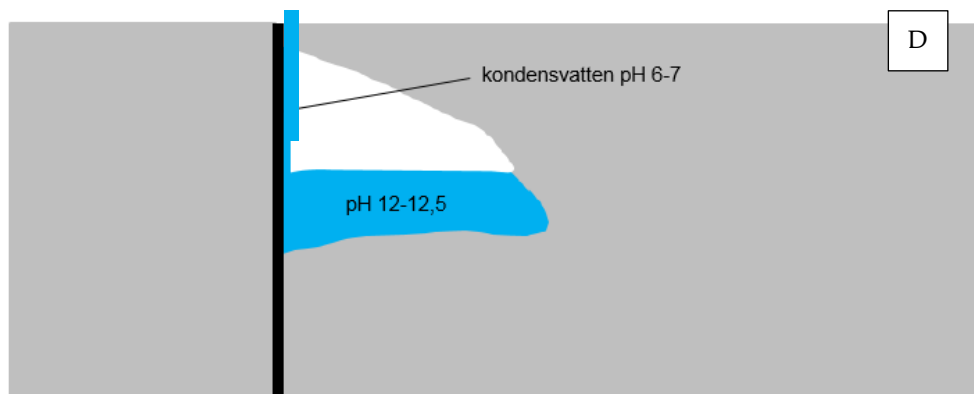
4.2.1 Förlorad passivitet

I detta avsnitt studeras under vilka förhållanden, som den mot vatten exponerade, stålytan i en kavitet riskerar att förlora sin passivitet och därmed bli utsatt för korrosion.

Vattnet kan utgöras av ett överskottsvatten som uppstod vid gjutningen, se figur 21 A. Vattnets pH-värde är då högt och stålet passivt. Bibehålls en hög relativ fuktighet i betongen kommer detta överskottsvatten att bevaras och risken för att korrosion ska initieras är obefintlig. Sugs detta överskottsvatten upp av omgivande betong så bildas en kavitet där betongens ytskikt är okarboniserat ty ingen koldioxid har kunnat nå den slutna kaviteten, se figur 21 B. Nytt vatten som tillförs kaviteten kan endast transporteras genom betongen och kommer därför att ha ett högt pH-värde och stålet behåller sin passivitet, se figur 21 C.

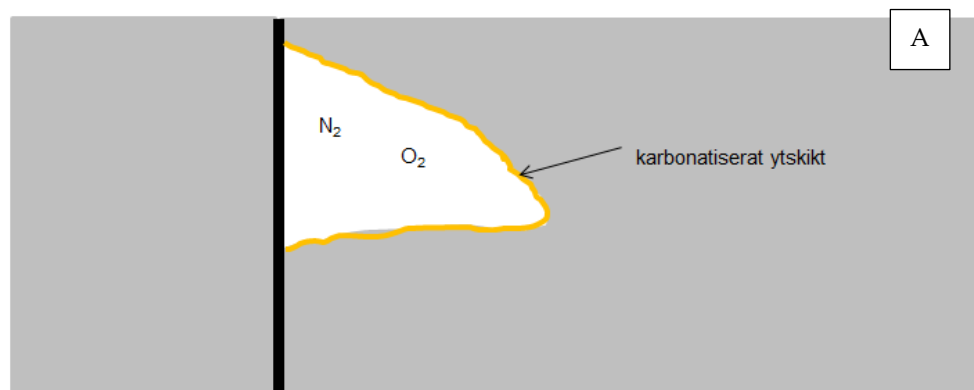
Om kaviteten endast är delvis vattenfylld kan vatten avdunsta och där efter kondensera på stålytan. Detta kondensvatten är neutralt vilket gör att atmosfäriska delar av plåten angrips och att passiviteten kan brytas i vattenlinjen men bulkens pH-värde påverkas inte och därmed förblir stålet i kontakt med vattnet passivt, se figur 21 D.

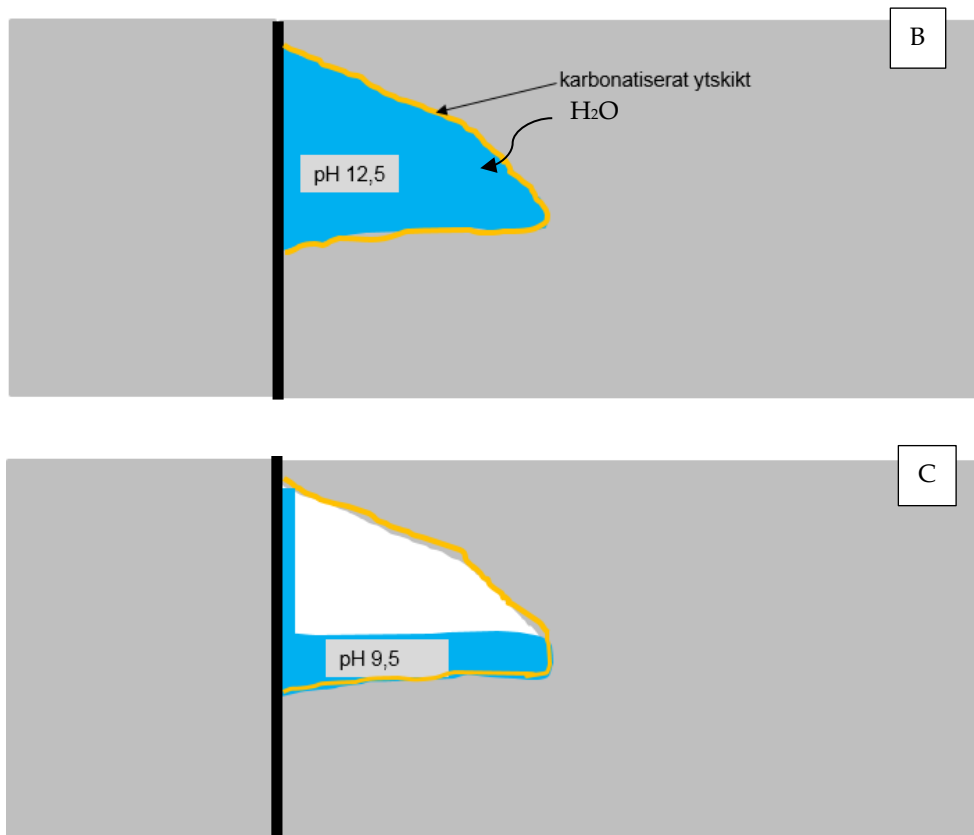




Figur 21. Korrosionsförhållanden i en sluten kavitet från början fylld med överskottsvatten.

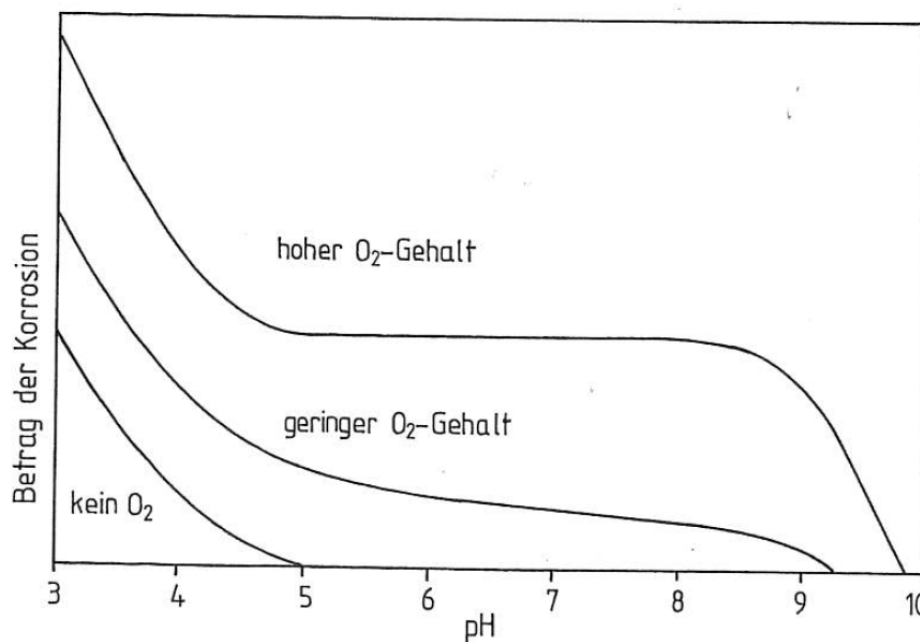
Kaviteten kan också ha varit helt luftfylld från början (plåt installerad mot tidigare glidformsgjuten cylindervägg eller bottenplåt lagd på betongbottenplatta). Betongens ytskikt är i detta fall karbonatiserat, se figur 22 A. Vatten kan ansamlas i kaviteten genom två olika processer, antingen genom transport genom betongens porsystem eller genom att fukt från omgivande betong kondenserar på stålytan, se figur 22 B respektive C. I det första fallet är vattnets pH-värde högt men i det senare fallet neutralt. Ett neutralt kondensvatten som får stå i kontakt med en karbonatiserad betongytan kommer dock att få en relativt högt pH-värde med tiden, ca 9,5. Troligen sker båda processerna parallellt varför vi kan räkna med ett pH-värde i intervallet 9,5-12,5 i förekommande kaviteter.





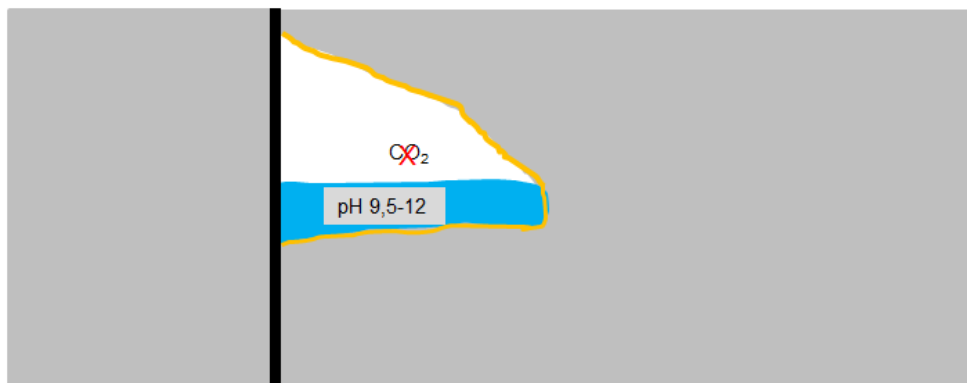
Figur 22. Korrosionsförhållanden i en, från början luftfylld, sluten kavitet.

I extremfallet kan vi således ha ett pH-värde på 9,5 i vattnet i kavitetens nederdel. Det är tveksamt om stålets passivitet kan upprätthållas i en dylik miljö. I ett kloridfritt vatten krävs normalt ett pH-värde över 10 för att passiviteten inte ska förloras. En faktor som dock inte får glömmas bort är att om tillgången på syre är begränsad krävs det ett lägre pH-värde för att initiera en aktivering, se figur 23. I denna tjockväggiga konstruktion och med en hög relativ fuktighet närmast tätplåten kommer syrets diffusion att vara mycket långsam. Vi bedömer därför att stålets passivitet inte kommer att gå förlorad i en sluten kavitet som vattenfylls, oberoende om detta sker genom vattentransport genom betongen eller genom kondensation.



Figur 23. Korrosion av kolstål i vatten med olika pH-värden och tillgång på syrgas [14].

Om kaviteten endast delvis är vattenfylld förändrar inte risken för att passiviteten ska gå förlorad på stålytan i kontakt med vatten. Avsaknaden av CO_2 i luften ovanför vattnet medför att vattnets pH-värde inte kan påverkas och därmed är hela den vattenberörda ytan fortsatt passiv, se figur 24.



Figur 24. Förhållandena i en delvis vattenfylld kavititet.

Vi konstaterade i kapitel 4.1 att vi inte förväntar oss kloridinträngning i dessa tjockväggiga konstruktioner. I kaviteter kan eventuellt förhållandena vara annorlunda. De flesta kaviteterna uppstod sannolikt under byggnadsskedet. Om detta sammanföll med en gjutskarv så kan klorider ha deponerats på betongytan om gjutuppehållet dels varit långvarigt dels inträffat under senhösten/vintern då risken för att hård vind skulle kunna ha fört in klorider från havet. Störst risk bedöms ha förelegat för Ringhals 2. I bilaga 1 görs en beräkning av trolig kloriddeposition under byggnationen och en bedömning av största tänkbara

deposition under svårast tänkbara förhållanden. Slutsatsen blir att kloriddeposition inte bedöms ha haft någon större inverkan.

4.2.2 Atmosfärisk korrosion

Atmosfärisk korrosion sker då fuktigheten överskrider ett "kritiskt" värde på den relativa fuktigheten som ofta anges till 80 % men som kan variera beroende på miljö. Årsmedeltemperaturen under normala förhållanden kan vara upp till 30 °C men det finns inga rapporterade värden som matchar exakt det aktuella fallet, d.v.s. hög fuktighet och temperatur men inga föroreningar, gasformiga eller i partikelform. Därför diskuteras nedan ett antal jämförelsefall

- Beräkning av teoretiska värden på korrosionen enligt ISO 9223 [15]
- Jämförelse med typmiljöer specificerade i ISO 11844 [16]
- Jämförelse med inom och utomhusmiljöer i tropiska klimat

ISO 9223 "Korrosion hos metaller och legeringar – Atmosfärers korrosivitet – Klassificering, bestämning och uppskattning" ger ett beräkningssamband för att uppskatta korrosionen av kolstål under atmosfäriska förhållanden som funktion av temperatur, luftfuktighet, kloriddeponering och svaveldioxidhalt. Vid en fukthalt på 100 % och en temperatur på 30 °C, och om man antar värden på svaveldioxidhalt ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) och kloriddeposition ($1 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$), ger detta en korrosionshastighet i mitten av korrosionsklass C2 ($1,3\text{--}25 \mu\text{m}/\text{år}$). Värdena på svaveldioxidhalt är typisk för en lantatmosfär och värdena på kloriddeposition typisk för en plats långt från kusten. (Lantatmosfär har en svaveldioxidhalt lägre än $10 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{dygn}$ och en kloriddeposition lägre än $5 \text{ mg NaCl}/\text{m}^2/\text{dygn}$).

ISO 11844 "Korrosion hos metaller och legeringar – Klassificering av inomhusatmosfärer med låg korrosivitet" ger beskrivningar av typmiljöer enligt tabell 1. Här finns inte heller en exakt motsvarighet eftersom högre klasser (IC4-IC5) beskriver miljöer med både hög fukthalt och föroreningshalt medan lägre klasser (IC1-IC2) beskriver miljöer med låg fukthalt och låg föroreningshalt. Baserat på beskrivningarna torde den aktuella miljön klassas som mer korrosiv än IC2 men mindre än IC5, d.v.s. IC3-IC4, vilket motsvarar $0,1\text{--}8 \mu\text{m}/\text{år}$.

Tabell 1. Beskrivning av typiska miljöer för uppskattning av inomhuskorrosivitet enligt ISO 11844-1.

Corrosivity category (IC)	Corrosivity	Typical environments
IC 1	very low indoor	<u>Heated spaces</u> with controlled stable relative humidity (< 40 %) without risk of condensation, low levels of pollutants, no specific pollutants, e.g. computer rooms, museums with controlled environment <u>Unheated spaces</u> with dehumidification, low levels of indoor pollution, no specific pollutants e.g. military stores for equipment
IC 2	low indoor	<u>Heated spaces</u> with low relative humidity (< 50 %) with certain fluctuation of relative humidity without risk of condensation, low levels of pollution, without specific pollutants e.g. museums, control rooms <u>Unheated spaces</u> with only temperature and humidity changes, with no risk of condensation, low levels of pollution without specific pollutants, e.g. storage rooms with low frequency of temperature changes
IC 3	medium indoor	<u>Heated spaces</u> with risk of fluctuation of temperature and humidity, medium levels of pollution, certain risks for specific pollutants, e.g. switchboards in the power industry <u>Unheated spaces</u> with elevated relative humidity (> 50 % – 70 %) with periodic fluctuation of relative humidity, without risk of condensation, elevated levels of pollution, low risk of specific pollutants, e.g. churches in non-polluted areas, outdoor telecommunication boxes in rural areas
IC 4	high indoor	<u>Heated spaces</u> with fluctuation of humidity and temperature, elevated levels of pollution including specific pollutants, e.g. electrical service rooms in industrial plants <u>Unheated spaces</u> with high relative humidity (> 70 %) with some risk of condensation, medium levels of pollution, possible effect of specific pollutants, e.g. churches in polluted areas, outdoor boxes for telecommunication in polluted areas
IC 5	very high indoor	<u>Heated spaces</u> with limited influence of relative humidity, higher levels of pollution including specific pollutants like H ₂ S, e.g. electrical service rooms, cross-connection rooms in industries without efficient pollution control <u>Unheated spaces</u> with high relative humidity and risk for condensation, medium and higher levels of pollution, e.g. storage rooms in basements in polluted areas

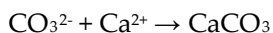
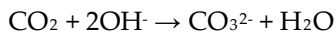
Inomhuskorrosion i tropiska länder, är i detta fall exemplifierat på Kuba [17]. De undersökte inomhuskorrosion i (låg temperatur) och utanför (hög temperatur) ett luftkonditionerat förvaringsutrymme (lantatmosfär) och fann att korrosiviteten för kolstål ökade från IC3 i det konditionerade utrymmet till IC4 utanför det konditionerade utrymmet. I andra utrymmen med naturlig ventilation varierade korrosiviteten också inom IC3 och IC4. Baserat på detta är det rimligt att anta att korrosiviteten i ett varmt fuktigt utrymme ligger i IC4, d.v.s. 1-8 µm/år.

Sammanfattningsvis enligt dessa överväganden ligger korrosionshastigheten troligtvis inom IC4 (1-8 µm/år) eller maximalt inom C2 (upp till 25 µm/år).

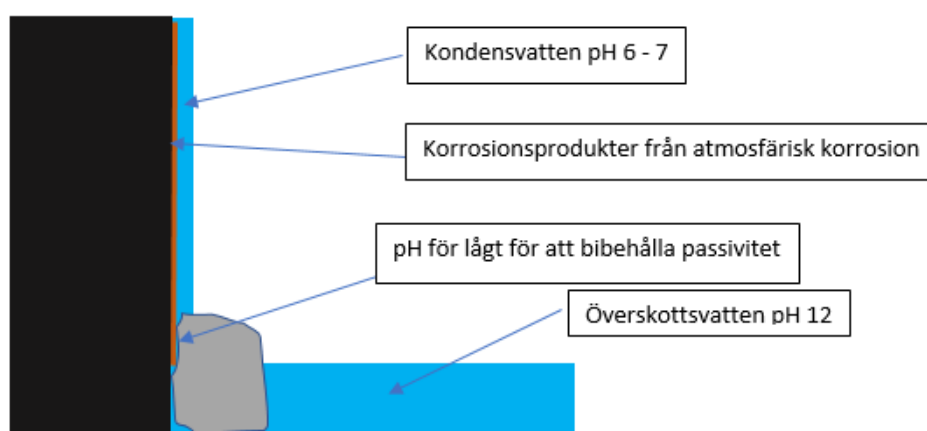
Dessa korrosionshastigheter är representativa för stålytor exponerade för luft med full syresättning. I en sluten kavitet är tillgången på syre kraftigt begränsad. Detta gäller speciellt för insidan på BWR reaktorernas inneslutningar som, under drift, är kvävgasfyllda. De låga korrosionshastigheterna gör att vi avskriver atmosfärisk korrosion som en möjlig orsak till att tätplåten perforeras, även då kaviteten har kontakt med den yttre miljön.

4.2.3 Vattenlinjekorrosion

Vattenlinjekorrosion kan teoretiskt tänkas uppstå i en delvis fylld kavitet. En förutsättning är dock att det lokalt i vattenlinjen uppstår en vattensamling med lågt pH (<9,5). I en sluten kavitet finns ingen koldioxid i luften och ingen ny koldioxid kan transporteras dit genom betongen. Den ursprungliga luften i kaviteten innehöll koldioxid men denna reagerade på kort tid med betongen ytskikt enligt nedanstående reaktioner:



Den lokala pH-sänkningen måste därför ske på något annat sätt. Ett tänkbart scenario visas i figur 25. Ett ballastkorn ligger i vattenlinjen. Dess yta är täckt av cementpasta och stålet i vattenlinjen är passivt. På stålytan ovanför vattensamlingen sker kondensation. Det neutrala kondensvattnet tvättar bort cementpasta från ballastkornet och med tiden uppstår en lokalt surare miljö i vattenlinjen innanför ballastkornet och ett angrepp initieras.



Figur 25. Tänkbar initiering av vattenlinjekorrosion i en sluten kavitet.

Angreppet resulterar i utfällning av $\text{Fe}(\text{OH})_3$ vilket bara sker i syresatt atmosfär. Detta förstärker försmurningen i angreppspunkten, se figur 29. Korrosionshastigheten är inledningsvis hög men avtar allt eftersom syret förbrukas.

Låt oss anta en kavitet där luftdelen har måtten 100x100x100 mm och att vi initierar 2 angreppspunkter i vattenlinjen med en yta av vardera 5x5 mm dvs totalt angripen yta är 50 mm². Angreppen får formen av en kon (volym = basytan x höjden/3).

Luftvolymen 0,001 m³ innehåller 20% syrgas dvs partialtrycket för syre är 0,2 bar = $0,2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ vid normalt atmosfärstryck. Temperaturen antar vi vara 20 °C (293 K). Enligt allmänna gaslagen innehåller luftvolymen n mol syrgas.

$$n = PV/RT = (0,2 \cdot 10^5 \times 0,001)/(8,31 \cdot 293) = 8 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

1 mol syrgas oxiderar 2 mol järn dvs $16 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$ järn eller 0,9 g.

Parallellt med de lokala angreppen i vattenlinjen så kommer det att ske en atmosfärisk korrosion på luftberörda delar av plåten. Med en atmosfärisk korrosionshastighet på 5 µm/år så förbrukas 0,4 g/år ($5 \cdot 10^{-4} \text{ cm/år} \times 100 \text{ cm}^2 \times 8 \text{ g/cm}^3$). Resterande 0,5 g eller 0,0625 cm³ skapar de två koniska frätgroparna med basytan 0,25 cm² och djupet 0,75 mm. Detta innebär att vi måste ha en mycket hög gropfrätningshastighet annars förbrukar den atmosfäriska korrosionen allt syre

innan frätgroparna hinner få något djup av betydelse. Korrosionshastigheter på mm/år kan endast uppstå i aktiv/passiv celler och där elektrolytens resistivitet är mycket låg. De förhållandena har vi en kavitet delvis fylld med överskottsvatten ($0,25 \Omega\text{m}$ jämfört med betongens $250 \Omega\text{m}$) och där vi av någon anledning får en aktivering i t.ex. vattenlinjen.

Om inte angreppen sker snabbt och i samband med byggnationen så krävs en spricka som förser kaviteten med syre. Under de betingelserna kan den atmosfäriska korrosionen och gropfrätningen fortgå parallellt, se avsnitt 4.3.

4.2.4 Galvanisk korrosion

Som framgick av avsnitt 4.1.2. så uppstår ingen galvanisk korrosion på ingjutet kolstål vid kontakt med rostfritt stål så länge kolstålet är passivt. Det krävs således en miljö i kaviteten som möjliggör en aktivering av kolstålsytan. Om så sker kommer korrosionen att accelereras av galvanisk korrosion. Denna acceleration möjliggörs av att katodreaktionen kan ske på andra ytor än på stålytan i kaviteten och därmed inte begränsas av tillgången på syre i kaviteten. Eftersom vi inte kan utesluta att tätplåten kan förlora sin passivitet i vattenlinjen så kan vi inte heller avskriva galvanisk korrosion i en sluten kavitet.

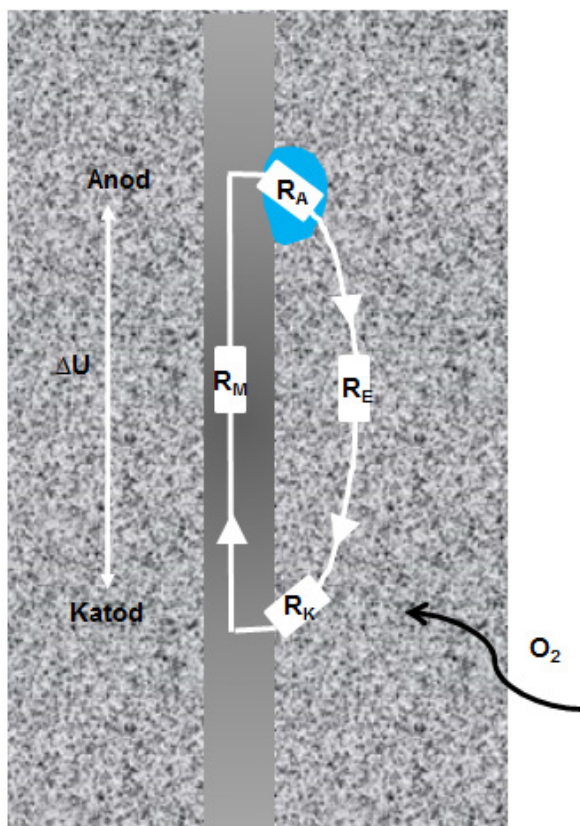
4.2.5 Makro-celler

För att en makrocell ska kunna öka korrosionshastigheten i ett pågående korrosionsangrepp krävs att stålet är aktivt. Detta gäller oberoende om makro-cellen drivs av skillnader i pH (aktiv/passiv-cell) eller skillnader i syrehalt (luftningscell). Hur mycket korrosionshastigheten ökar beror på en rad faktorer, nämligen:

- Potentialskillnaden mellan det aktiva området (anoden) och omgivande passiva ytor (katoden).
- Areaförhållandet mellan anod och katod.
- Resistiviteten i den omgivande elektrolyten.
- Tillgången till oxidationsmedel (syre) vid katoden.

En modell av en makro-cell återges i figur 26. Resistansen i metallen, R_M , kan försummas. Övriga resistanser påverkas starkt av betongens fukthalt.

En luftningscell d.v.s. skillnader i syretillgång på olika delar av tätplåtens yta kan aldrig initiera ett angrepp i en betongmiljö fri från klorider. Det enda sättet som stålet kan aktiveras är genom en sänkning av pH-värdet i vattnet i kaviteten. De makroceller som är aktuella i en kavitet är därför av typen aktiv/passiv-celler. Förlorad passivitet pga för lågt pH-värde kan uppstå i vattenlinjen. Denna vattenlinjekorrosion kan således förstärkas av en aktiv/passiv-cell.



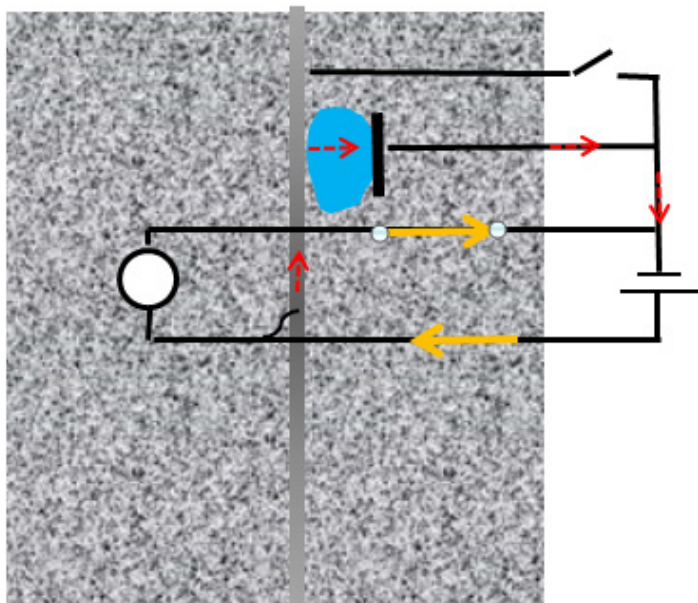
Figur 26. Modell av en makrocell. (R_A =övergångsmotstånd anod/elektrolyt, R_E =motstånd i elektrolyten, R_K =övergångsmotstånd katod/elektrolyt, R_M =Motstånd i metallen).

4.2.6 Läckström

I betong utan vattenfyllda kaviteter kunde vi utesluta risken för växelströmskorrosion eftersom det krävdes en osannolikt hög spänningssättning av stålet, se avsnitt 4.1.3. I en kavitet fylld med alkaliskt och samtidigt lågresistivt betongporvatten sjunker kravet på spänningssättning för att en kritiskt hög strömtäthet ska uppstå. Strömmen måste dock överföras resistivt från någon elektrisk ledare till den jordade tätplåten. Ett dylikt strömflöde innebär ett jordfel och torde detekteras med jordfelsbrytare.

I avsnitt 4.1.3. visade vi att läckströmskorrosion orsakad av likström inte är att förvänta i kloridfri och okarboniserad betong. En förutsättning är således att vi har en kavitet där elektrolyten förlorat sitt höga pH-värde d.v.s. något som vi inte kan utesluta i en vattenlinje. Om vattenlinjekorrosion initierats så skulle ett jordfel kunna ge upphov till en läckströmspåverkan enligt figur 27. En likströmsdriven apparat inuti inneslutningen matas från en strömkälla utanför inneslutningen. Ett jordfel mellan matningskabel och tätplåt spänningssätter plåten. Strömmen leds av via det "sura" och lågresistiva vattnet i kaviteten till en, från tätplåten isolerad, metallyta som i sin tur är förbunden med strömkällans minuspol.

Scenariot bedöms osannolikt men kan inte uteslutas.



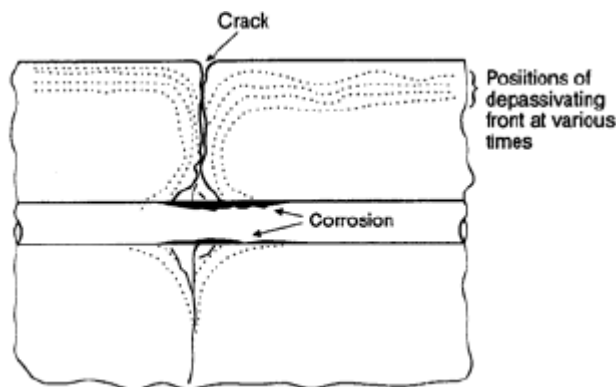
Figur 27. Läckström orsakad av kortslutning mellan likströmskabel och tätplåt.

4.3 VID NÄRVARO AV BÅDE KAVITET OCH SPRICKOR

I avsnittet 4.1 och 4.2 har vi kunnat konstatera att en gemensam förutsättning för alla typer av korrosionsangrepp är att stålet först måste förlora sin passivitet. Således kan vattenlinjekorrosion uppstå som en följd av att kondensvatten lokalt sänker pH-värdet vid en heterogenitet i anslutning till vattenlinjen. Samma kondensvatten har även skapat förutsättningen för den atmosfäriska korrosion som sker ovanför vattenlinjen i en delvis fylld kavitet.

Om kaviteten kommunicerar med omgivningen t.ex. genom en spricka kan både koldioxid och syre föras in till kaviteten, se figur 28.

Normalt förekommande sprickor har en sprickvidd på 0,2 mm eller mindre. I kombination med de tjocka betongväggarna, >200 mm, och konstaterat hög relativ fuktighet djupare in i väggen är det osannolikt att CO₂ når in till en eventuell kavitet, speciellt om väggen är spännarmerad. Om det däremot finns större luftfyllda sprickor eller andra kanaler som förbinder kaviteten med den yttre miljön kan passiviteten brytas om förutsättningarna är de rätta inuti kaviteten.

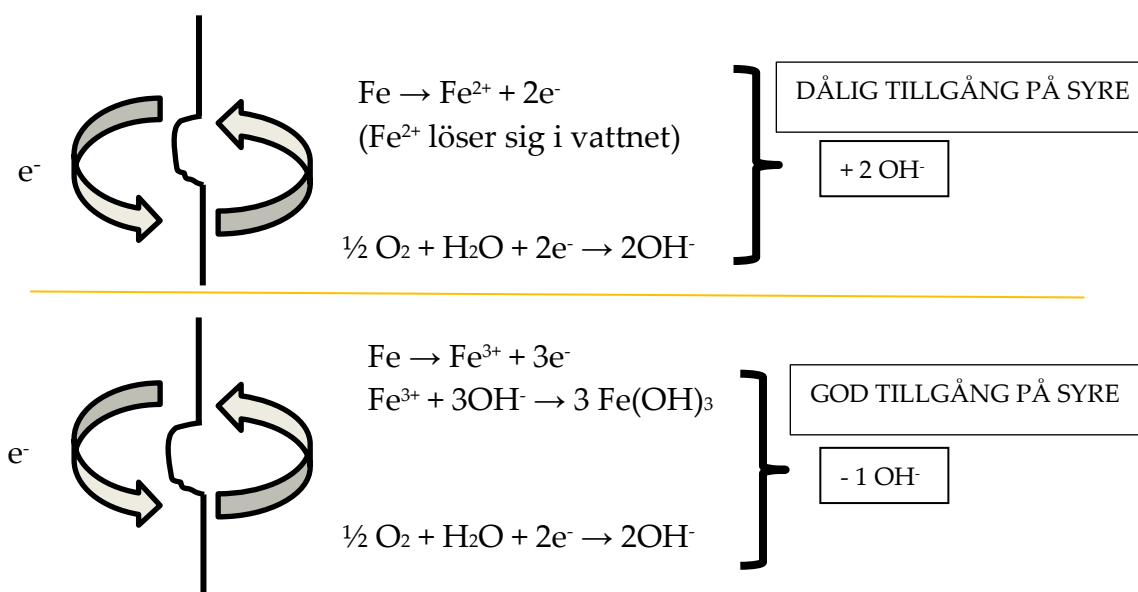


Figur 28. Förlorad passivitet orsakad av en karbonatiseringsfront via en spricka [5].

Om kaviteten kommunicerar med en omgivning med låg relativ fuktighet torde en från början helt vattenfylld kavitet inte kunna fortsätta att vara helt vattenfylld.

I en delvis vattenfylld kavitet uppstår en dragkamp mellan å ena sidan utspädning från kondensvatten i kombination med koldioxidens försurande effekt i vattenlinjen och å andra sidan betongens förmåga att via diffusion av hydroxidjoner neutralisera denna försurning och därmed upprätthålla passiviteten. Risken för vattenlinjekorrosion ökar således pga tillförseln av koldioxid via sprickan.

Även tillförseln av syre via sprickan har en negativ inverkan på stålets passivitet. Vid god tillgång på syre bildas nämligen korrosionsprodukter av trevärt järn, $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Dessa korrosionsprodukter är fasta och minskar därmed halten hydroxid i vattnet, se figur 29.

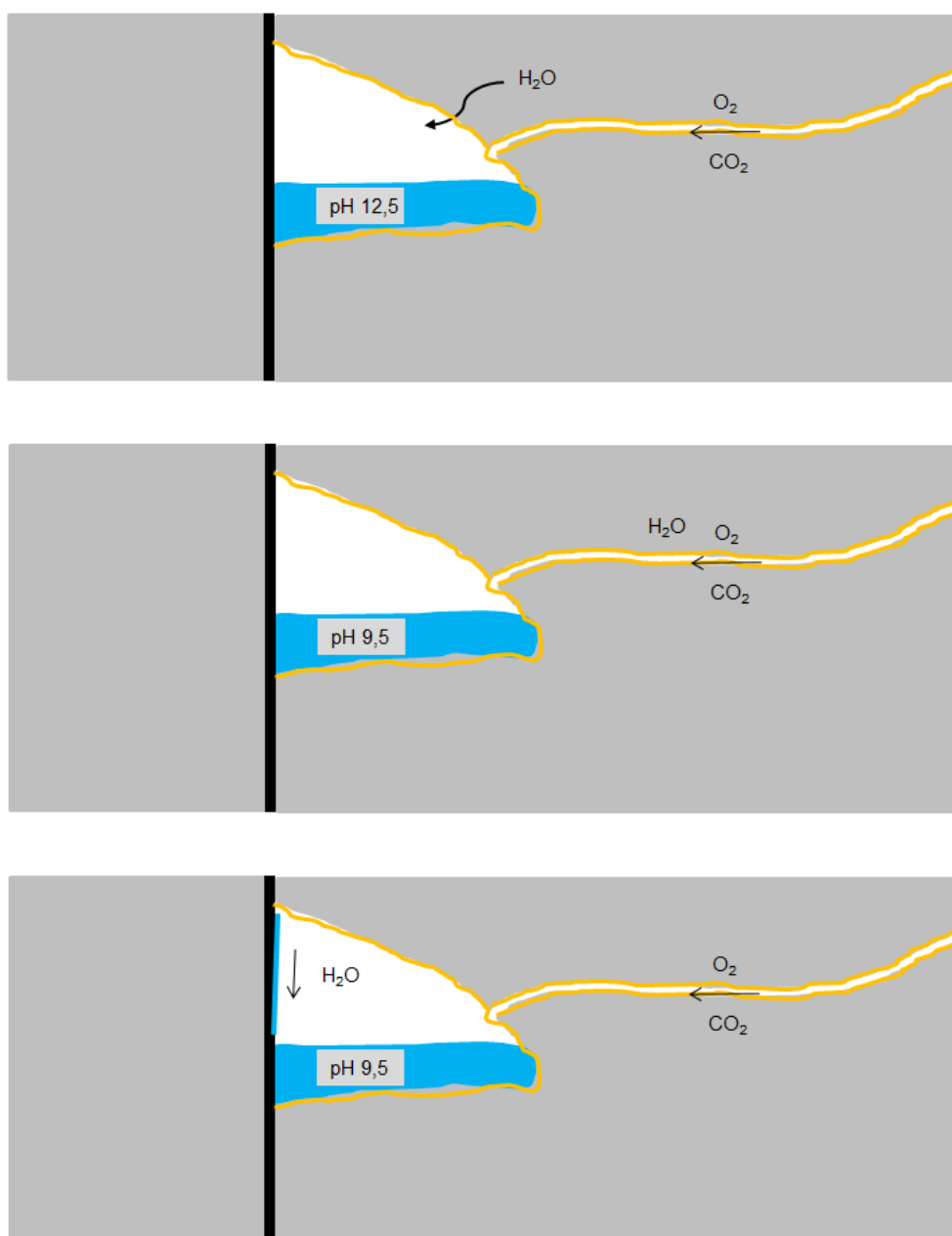


Figur 29. Korrosionsprocesser vid dålig respektive god tillgång på syre.

Vid låg syrehalt bildas istället tvåvärda järnjoner och dessa löser sig i vattnet. I detta fall åstadkommer t.o.m. korrosionsprocessen en alkalisering och möjligheter för stålytan att repassiveras.

En ökad tillförsel av syre medför också att korrosionshastigheten ökar i ett initierat angrepp som en följd av ökad mängd oxidationsmedel.

En viktig faktor är också på vilket sätt vattnet transporterats till kaviteten, se figur 30.



Figur 30. pH-värdet i vattnet som ansamlats i en kavitet förbunden med yttvärlden via en spricka. Översta figuren efter vattentransport genom betong. Mellersta figuren efter vattentransport i kanal med karbonatiserade betongytor. Nedersta figuren efter kondensation på stålytan i kaviteten.

Har vattentransporten skett genom betongens porsystem är pH-värdet och buffringsförmågan hög då vattnet når kaviteten. I detta fall finns eventuellt en risk för vattenlinjekorrosion. Har vattnet istället kommit via en spricka så har vattnet runnit utmed betongytan vars ytskikt är karbonatiserat och därmed avgivit mindre hydroxid. Ett dylikt vatten bör ha ett pH på ca 9,5 och om syretillgången är god kan angrepp initieras. Har vattnet bildats genom kondensation uppnås inte heller ett högre pH-värde än 9,5 då vatten har fått stå en viss tid i kontakt med den karbonatiserade betongytan.

Vi kan således avskriva närvaron av "normala" sprickor som en orsak till ökad risk för korrosion i en kavitet. Om det däremot existerar en stor spricka som kommunicerar med en yttre omgivande atmosfär innehållande både koldioxid och syre så kan angrepp lättare initieras, primärt i vattenlinjen, och möjligheten att korrosionen avstannar eller upphör med tiden minskar. Angreppet kan också accelereras av andra effekter så som makro-cell, galvanisk korrosion eller läckström.

Även om den luftfyllda kanalen medger fri transport av syre till kaviteten så bedöms den atmosfäriska korrosionen i en helt eller delvis tom kavitet bli mycket låg, 1-8 $\mu\text{m}/\text{år}$, se avsnitt 4.2.2.

Syretillförseln via sprickan medger således att en eventuellt initierad gropfrätning vid en heterogenitet i vattenlinjen kan medges propagera. Den parallellt pågående atmosfäriska korrosionen medför inte att gropfrätningen avstannar såsom sker i en sluten kavitet till följd av syrebrist.

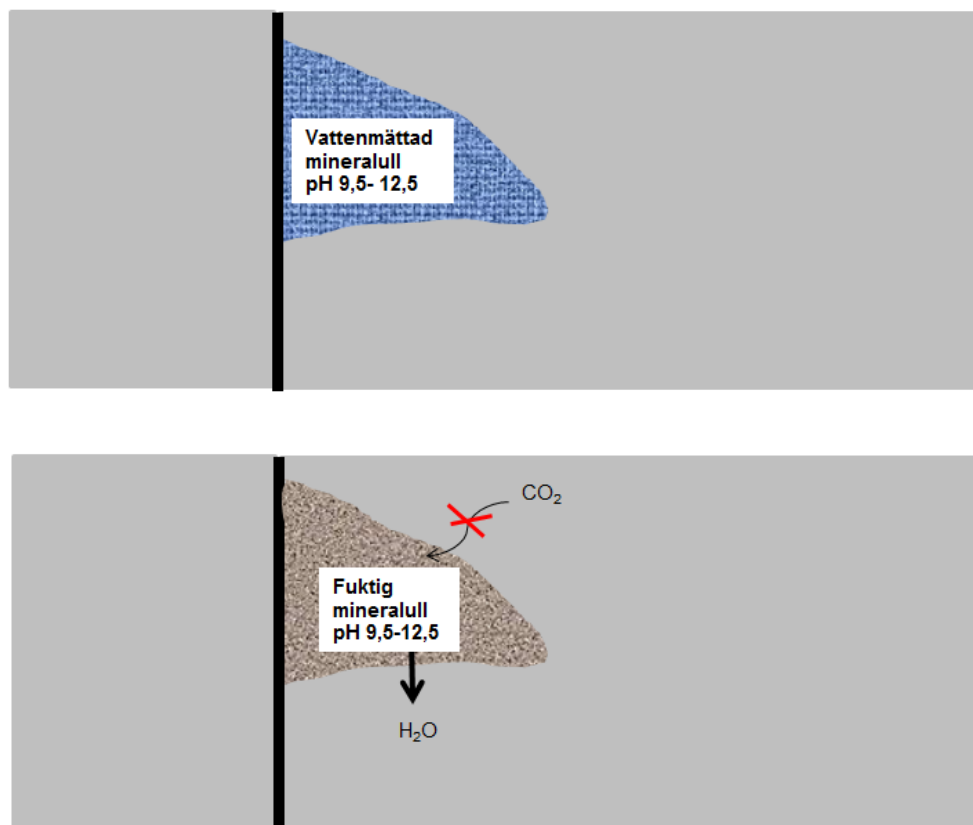
4.4 VID SPALT MELLAN TÄTPLÅT OCH BETONG

Om det existerar en spalt mellan tätplåten och betongen måste vi särskilja mellan följande olika fall:

- Spalten bildar en sluten kavitet d.v.s. vatten och syre kan transporteras genom betongen men ingen CO_2 kan nå utrymmet. Risk för vattenlinjekorrosion föreligger, se avsnitt 4.2.
- Spalten kommunicerar med den yttre miljön. Förutsättningarna blir de samma som för en kavitet som kommunicerar med den yttre miljön via en luftfylld kanal, se avsnitt 4.3.
- Spalten medger transport av läckagevatten från bassänger genom och förbi spalten. I detta fall försämras förutsättningarna för att upprätthålla passiviteten. Det avjoniserade vattnet sköljer bort hydroxidjoner. Passiviteten förloras utan att det krävs en luftfylld kanal d.v.s. det krävs ingen tillgång till CO_2 och bränslet i korrosionsprocessen, syret, kan tillföras via syre löst i vattnet. Korrosionshastigheten bestäms av syrehalten i vattnet och eventuellt förstärkande faktorer såsom makro-celler, galvanisk korrosion eller läckström.

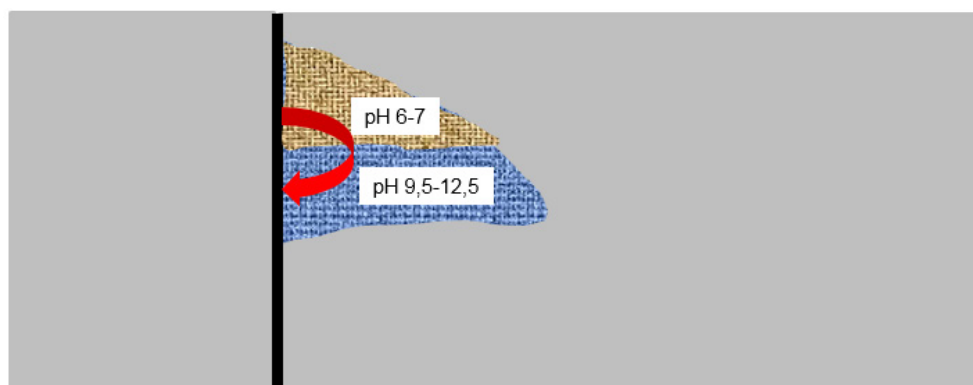
4.5 INGJUTET FÖREMÅL MELLAN TÄTPLÅT OCH BETONG

Närvaron av ett poröst material, såsom mineralull, i kaviteten har visat sig kunna ge upphov till att stål-ytan aktiveras. I en helt vattenfylld och sluten kavitet bibehålls det höga pH-värdet och det porösa materialet har ingen negativ inverkan. Om mineralullen avvattnas sker ingen förändring av vare sig pH eller stålets passivitet i ett första skede, se figur 31.



Figur 31. Förhållandena i vattenmättad respektive fuktig mineralull.

Om det i ett senare skede uppstår kondensation kan detta pH-neutrala vatten tvätta ur hydroxid ur mineralullen. Då pH-värdet sjunkit till en nivå där stålet förlorar sin passivitet kan höga korrosionshastigheter riskeras, se figur 32.



Figur 32. Aktivering av stål i kontakt med avvattnad mineralull som erhållit sänt pH pga bildat kondensvatten.

Torr mineralull har en hög resistivitet och fungerar som en dålig ledare för korrosionsströmmar. Mättas ullen däremot med betongporvatten sjunker resistiviteten till ca 0,25 Ωm vilket motsvarar en elektrisk ledningsförmåga i nivå med havsvatten. Motsvarande resistivitet i ull mättad med avjoniserat vatten ligger på 500 Ωm . Även då ullen avvattnas bibehålls en mycket hög ledningsförmåga. En viss tid efter avvattningen riskerar vi således en miljö där stålytan aktiveras pga att hydroxidjoner tvättats bort av kondensvattnet och korrosionsströmmarna kan lätt flyta pga ullens goda ledningsförmåga vilket är en förutsättning för hög korrosionshastighet.

Om vi har en spricka in till kaviteten ökar risken för initiering genom att, via sprickan, tillförd CO_2 påskyndar försumningen av den fuktiga mineralullen. Graden av karbonatisering/försumning beror dock på tillgång av CO_2 . Vid fri tillgång på luft har vi mätt en pH-förändring från 12,7 till 10,4 på 2 dygn i minerallull som fått självavvattna. Vidare kan syre föras in till kaviteten och därmed underhålla processen som annars hade avstannat efter viss tid pga syrebrist.

Ett poröst material som mineralull som ligger i kontakt med tätplåten vid en motgjutning kommer att bli indränkt med alkaliskt gjutvatten. Ett mindre poröst material som t.ex. trä skulle kunna tänkas bevara en surare miljö i kontaktytan mot plåten och därmed initiera ett angrepp. Om stålytan repassiveras eller inte kommer att bestämmas av de yttre förhållandena. Existerar en luftfylld kanal eller en spalt fram till kaviteten minskar förutsättningarna för repassivering pga den försurande effekten som uppstår då $\text{Fe}(\text{OH})_3$ fälls ut.

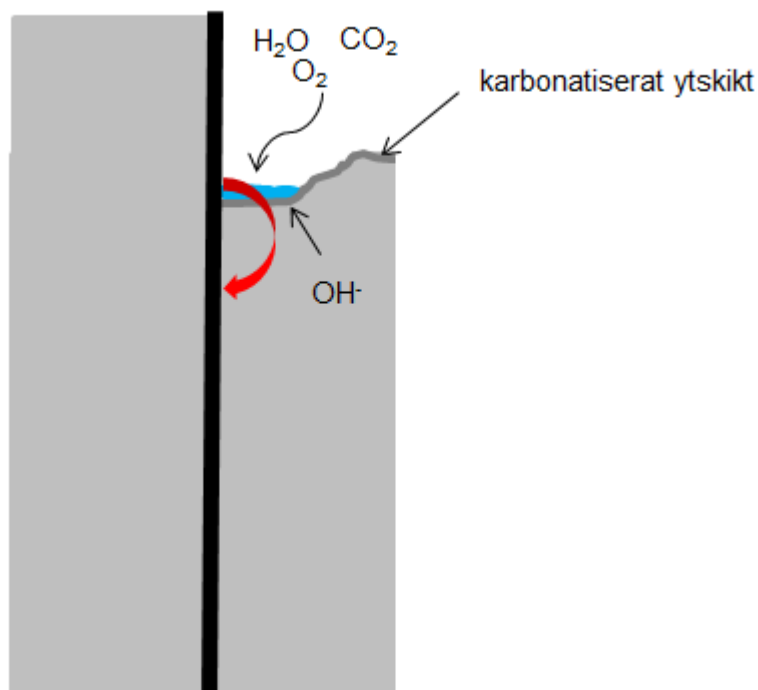
Polymera material utgör ett hinder för transporten av hydroxidjoner men diffusionshastigheten för hydroxid är ändå relativt hög i polymerer varför plast som avsiktligt eller oavsiktligt gjutits in i betongen kan leda till förlorad passivitet för tätplåten men ytan repassiveras om de yttre förhållandena är gynnsamma.

4.6 ÖVERGÅNG MELLAN INGJUTEN OCH FRITT EXPONERAD TÄTPLÅT

Om vatten ansamlas i övergången mellan ingjuten och fritt exponerad tätplåt är korrosionsrisken högre än då vatten transporteras via en kanal in till en i övrigt sluten kavitet. Detta beror på följande faktorer:

- Vatten har inte transporterats i kontakt med betongytor.
- Obehindrad kontakt med omgivande atmosfär (O_2 , CO_2 om inte kvävgasfylld).
- Risk för exponering av yttre korrosiva ämnen (klorider, rengöringsmedel, smuts).

Störst är risken för angrepp i vattenlinjen. Om passiviteten bryts kan även en makrocell av typen aktiv/passiv uppstå, se figur 33.



Figur 33. Möjlig korrosionscell om vattensamling uppstår i övergång mellan ingjuten och fritt exponerad tätplåt.

4.7 SAMMANFATTNING

I intakt opåverkad betong utan några kaviteter avskrivs alla olika typer av korrosion. Således finns ingen risk för att stålet ska förlora sin passivitet. Varken galvanisk eller läckströmskorrosion kan uppstå. Mikrobiell korrosion kan uteslutas vilket även bedöms vara fallet under andra yttre omständigheter.

Vid närvaro av en helt sluten kavitet d.v.s. där det inte finns någon spricka eller spalt som förbinder kaviteten vid tätplåten med miljön utanför betongen så uppstår ingen korrosion om kaviteten är helt fylld med vatten. I en luftfylld eller delvis vattenfylld kavitet sker en försumbar atmosfärisk korrosion. På ytor, i kontakt med vatten eller något poröst och fuktigt material, bedöms angrepp inte initieras trots ett förväntat lägsta pH-värde på 9,5. Bildas kondens på tätplåten i en delvis vattenfylld kavitet kan vattenlinjekorrosion uppstå. Korrosionshastigheten i detta angrepp kan vidare accelereras av galvanisk korrosion och/eller korrosion orsakad av makro-celler.

Normalt förekommande sprickor bedöms inte påverka korrosionsmiljön i en kavitet vid tätplåten. Skulle däremot en större luftfylld spricka existera mellan kaviteten och den yttre miljön så ökar risken för vattenlinjekorrosion i en delvis vattenfylld kavitet. Den atmosfäriska korrosionen blir dock fortsatt försumbar. Angreppen kan vidare accelereras av makro-celler och/eller galvanisk korrosion.

Om det existerar en spalt mellan tätplåt och betong och denna tillåter läckagevatten att passera kan stålets passivitet brytas genom att vattnet sköljer bort

hydroxid. Korrosionsförloppet kan vidare fortgå utan tillförsel av luftsyre. I vattnet löst syrgas räcker för att underhålla processen.

Främmande material som hindrar hydroxid från att nå stålytan kan initiera korrosion och försvåra en annars naturlig repassivering. Mineralull som mättats med betongporvatten och därefter avvattnats och försurats (CO_2 och/eller kondensvatten) kan skapa en mycket korrosiv miljö.

Om vatten eller fuktigt poröst material tillåts stå i en fördjupning där tätplåten övergår från att vara ingjuten till att vara fritt exponerad så kan korrosion uppstå.

5 Styrande parametrar

För att det ska kunna initieras ett korrosionsangrepp på en ingjuten tätplåt måste det existera en kavitet i betongen. I denna kavitet måste det vidare råda ett sådant klimat så att stålets passivitet bryts.

I en tom eller endast delvis fylld kavitet kan passiviteten brytas genom att kondensvatten sänker pH-värdet i fuktfilmen på stålytan. En viss atmosfärisk korrosion uppstår och dess hastighet styrs av följande parametrar:

- Den relativa fuktigheten.
- Temperaturen.
- Temperaturväxlingar.
- Tillgången på syrgas.

Normalt har luftföroreningar stor betydelse för korrosionshastigheten vid atmosfärisk korrosion. I detta speciella fall kan vi dock bortse från denna parameter.

Om kaviteten är helt sluten så blir den atmosfäriska korrosionshastigheten försumbar pga den begränsade tillgången på syre. Existerar en luftfylld spricka mellan kaviteten och en syresatt yttre atmosfär så bedöms korrosionshastigheten bli lägre än 8 $\mu\text{m}/\text{år}$ eller 0,8 mm på 100 år.

På vattenberörda ytor kan korrosionshastigheten bli högre och angreppen mer koncentrerade (gropfrätning). För att allvarlig korrosion ska kunna ske måste stålets passivitet brytas och för detta krävs lokalt ett lågt pH. En pH-sänkning kan uppstå på två principiellt olika sätt, nämligen:

1. Vattnet karbonatiseras genom kontakt med koldioxid.
2. Vatten med lågt eller neutralt pH sköljer bort hydroxidjoner.

I det första fallet måste kaviteten kommunicera med en omgivande atmosfär som innehåller koldioxid. Detta kan ske via en spricka, en spalt mellan tätplåt och betong eller vid en övergång mellan ingjuten och fri tätplåt. Om kaviteten är helt fylld med vatten uppstår inga skillnader i pH utan en förutsättning är att kaviteten endast är delvis vattenfylld. Angreppet uppstår i vattenlinjen.

I det andra fallet kan hydroxidjonerna sköljas bort av kondensvatten som bildas på stålytan ovanför vattenlinjen i en kavitet (fall 2a) eller av läckagevatten från ovanliggande bassänger (fall 2b).

I en sluten kavitet kan ett angrepp initieras om kaviteten endast är delvis vattenfylld och detta sker i så fall i vattenlinjen. Korrosionshastigheten kan inledningsvis vara hög men sjunker allt eftersom syret i ovanliggande luft minskar. Eftersom inneslutningarnas betongväggar är mycket tjocka så kommer det relativt snart att uppstå syrebrist i kaviteten. När så sker upphör bildandet av fasta korrosionsprodukter ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Istället frigörs Fe^{2+} -joner som löser sig i vattnet. Detta leder till en alkalisering eftersom nya hydroxidjoner produceras i katodprocessen. Detta gör att i små slutna kaviteter sker troligen en återpassivering av stålytan.

Sköljs det alkaliska vattnet bort av läckagevatten (fall 2b) måste även vattnet kunna föras bort. Fylls kaviteten av läckagevatten kommer detta att alkaliseras och inte kunna bryta stålets passivitet.

För att ett allvarligt angrepp ska kunna uppstå krävs således antingen en stor sluten kavitet eller en kavitet som kommunicerar med omgivningen via en spricka som antingen leder in läckagevatten eller koldioxid/syre.

Främmande föremål såsom trä eller mineralull underlättar initieringen och kan påskynda korrosionsförloppet.

Vid en aktivering av den normalt passiva stålytan så kan korrosionsförloppet påskyndas av galvanisk korrosion och/eller makro-celler. Dessa mekanismer kan ses som inverkan, inte som korrosionsorsaker eftersom de endast har en påverkan om stålet redan förlorat sin passivitet av annan orsak.

Vissa parametrar styr risken för initiering respektive möjligheten till repassivering och vissa styr korrosionshastigheten vid en propagering. En sammanställning har gjorts i tabell 2-4.

Tabell 2. För initiering/repassivering respektive propagering styrande parametrar i fall 1 dvs då angreppet i vattenlinjen initieras av den försurning som sker då koldioxid förs in till kaviteten via en spricka eller spalt.

Initiering	Propagering
Kavitet som står i kontakt med utsidan via spricka med väggar av inert material eller karbonatiserad betong (förutsättning). Kaviteten är endast delvis vattenfylld (förutsättning). Någon form av heterogenitet som möjliggör att ett lokalt lägre pH uppstår i vattenlinjen (förutsättning). Mängd tillförd koldioxid. Kloridhalt i vattnet. Närvaro av poröst material i kaviteten ökar risken för initiering. Närvaro av ingjutet främmande föremål ökar risken för initiering.	Mängd tillförd luftsyre till kaviteten via spricka. Närvaro av poröst material ökar angripen ytas storlek och sänker resistansen i korrosionscellen (ökar korrosionshastigheten). Vid galvanisk korrosion och/eller makroceller tillkommer: - Betongens RF (hög RF minskar syretillförseln till katodytor, låg RF ökar resistansen och sänker korrosionshastigheten) - Areaförhållande anod/katod. - Ytskikt på betong (epoximålning minskar syrediffusion till omkringliggande katodytor).

Tabell 3. För initiering/repassivering respektive propagering styrande parametrar i fall 2a dvs då angreppet i vattenlinjen initieras av den försurning som sker då kondensvatten lokalt sköljer bort hydroxid. Kaviteten är sluten.

Initiering	Propagering
Kaviteten är endast delvis vattenfylld (förutsättning). Kaviteten är stor (förutsättning) Någon form av heterogenitet som möjliggör att ett lokalt lägre pH uppstår i vattenlinjen (förutsättning). Kloridhalt i vattnet. Närvaro av poröst material i kaviteten ökar risken för initiering. Närvaro av ingjutet främmande föremål ökar risken för initiering.	Betongens RF (hög RF minskar syrediffusion). Betongtjocklek (stor tjocklek minskar syrediffusion). Ytskikt på betong (epoximålning minskar syrediffusion in till kaviteten). Närvaro av poröst material ökar angripen ytas storlek och sänker resistansen i korrosionscellen (ökar korrosionshastigheten). Vid galvanisk korrosion och/eller makroceller tillkommer: - Betongens RF (hög RF minskar syretillförseln till katodytor, låg RF ökar resistansen och sänker korrosionshastigheten) - Areaförhållande anod/katod. - Ytskikt på betong (epoximålning minskar syrediffusion till omkringliggande katodytor).

Tabell 4. För initiering/repassivering respektive propagering styrande parametrar i fall 2b dvs då angreppet i vattenlinjen initieras av den försurning som sker då läckagevatten passerar genom kaviteten.

Initiering	Propagering
Till- och frånflöde så att inte kaviteten vattenfylls helt (förutsättning). Kloridhalt i vattnet. Genomströmningstid (kort tid minskar möjlighet till att vattnet alkaliserar). Närvaro av poröst material ökar risken för initiering.	Mängd tillförd luftsyre till kaviteten via spricka eller spalt. Syrehalt i vattnet. Vattnets flödeshastighet. Närvaro av poröst material ökar angripen ytas storlek och sänker resistansen i korrosionscellen (ökar korrosionshastigheten). Vid galvanisk korrosion och/eller makroceller tillkommer: - Betongens RF (hög RF minskar syretillförseln till katodytor, låg RF ökar resistansen och sänker korrosionshastigheten) - Areaförhållande anod/katod. - Ytskikt på betong (epoximålning minskar syrediffusion till omkringliggande katodytor).

Korrosionshastigheten kommer att styras av tillgången på syre dels i kaviteten (den primära korrosionscellen) dels i omgivande betong (galvanisk korrosion, makro-celler). Vid galvanisk korrosion och makro-celler inverkar även areaförhållanden och omgivande materials resistiviteter. I betong med hög fuktighet begränsas korrosionen av brist på syre och i luftad betong reduceras korrosionshastigheten i en korrosionscell av det höga motståndet i betongen.

Närvaro av kloridjoner sänker pH tröskelvärdet för när angrepp initieras. Förekomsten av klorider bedöms dock vara liten.

Om innerväggen är målad med epoxy eller klädd med rostfri plåt påverkar inte den primära korrosionscellen om den tillförs syre genom en luftfylld spricka eller spalt. Däremot utgör målning/plåtbeklädnad en syrespärr om kaviteten är sluten eller om korrosionen påverkas av galvanisk korrosion eller makro-cell där syretillförseln till kringliggande ingjutet stål bestämmer korrosionshastigheten.

Temperaturen har utelämnats som styrande parameter pga osäker grad av inverkan. Visserligen ökar korrosionsreaktionernas hastighet med temperaturen men samtidigt sjunker vattnets löslighet för syrgas och därmed minskar tillgängligt bränsle för processen.

Läckströmskorrosion utgör ett särfall. Växelströmskorrosion bedöms osannolik och läckströmskorrosion orsakad av likström kan inte uteslutas men borde ge sig till känna genom annan systemkontroll.

6 Inträffade korrosionsskador på tätplåtar

6.1 SVENSKA ANLÄGGNINGAR

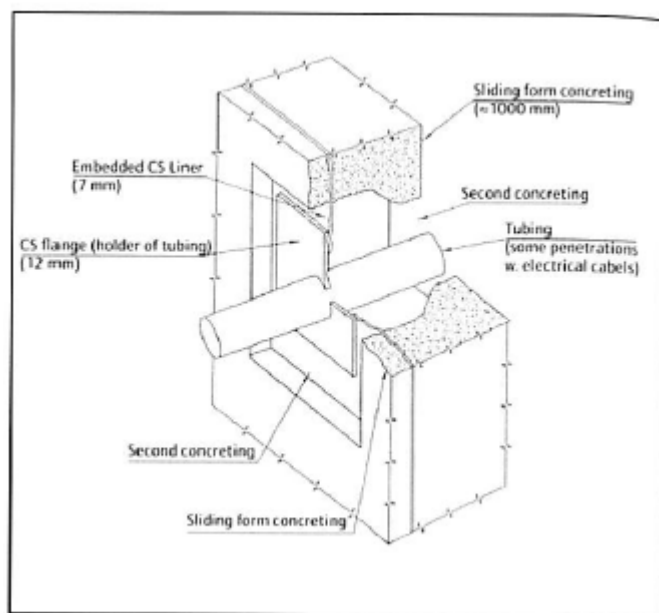
I svenska och några av de finska reaktorinneslutningarna är tätplåten ingjuten i betong med undantag för domen. I omvärlden är tätplåten synlig med undantag från botten i inneslutningen. Plåten är bättre skyddad mot korrosion då den är ingjuten men samtidigt saknas möjlighet för inspektion. Dessa skillnader gör att erfarenheterna av var och hur korrosionsskador uppträder skiljer sig åt mellan Sverige (Finland) och övriga världen.

I det följande redovisas konstaterade korrosionsskador på ingjuten tätplåt dels i Sverige dels internationellt.

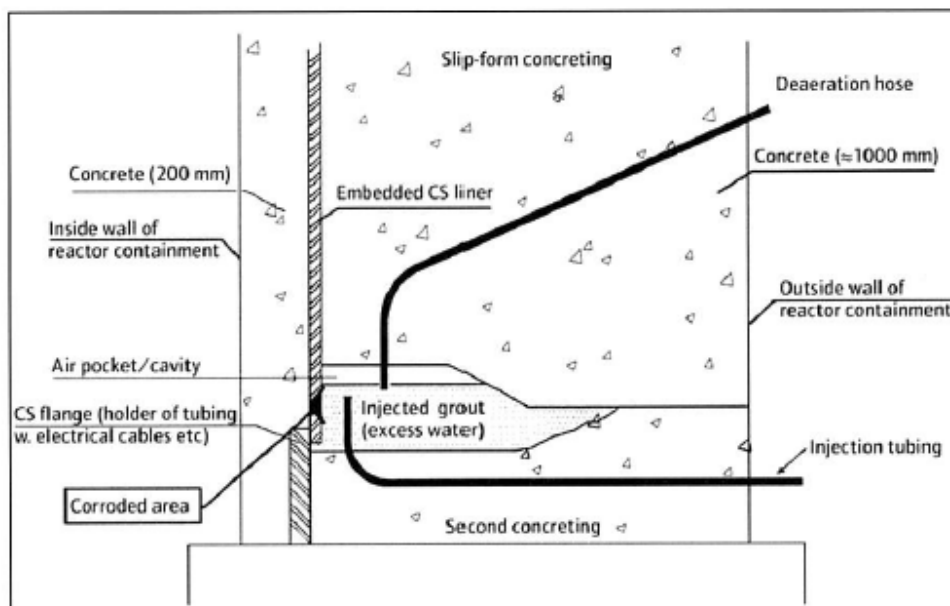
6.1.1 Barsebäck 2 genomföring 1993

I samband med CAT (halvtrycksmätning) konstaterades genomgående hål i tätplåten i anslutning till en genomföring. Kontroll av samtliga 77 genomföringar visade att på 5 ställen fanns angreppsdjup större än 5 mm och på 36 ställen upptäcktes ytliga angrepp, mindre än 1mm. I 14 fall konstaterades håligheter vid tätplåten. Skadeorsaken bedömdes vara att arbetet med att gjuta igen ursparingen inte hade genomförts fackmannamässigt (10).

I figur 34 visas ursparingen och i figur 35 hur injekteringen utfördes.



Figur 34. Ursparing vid genomföring.



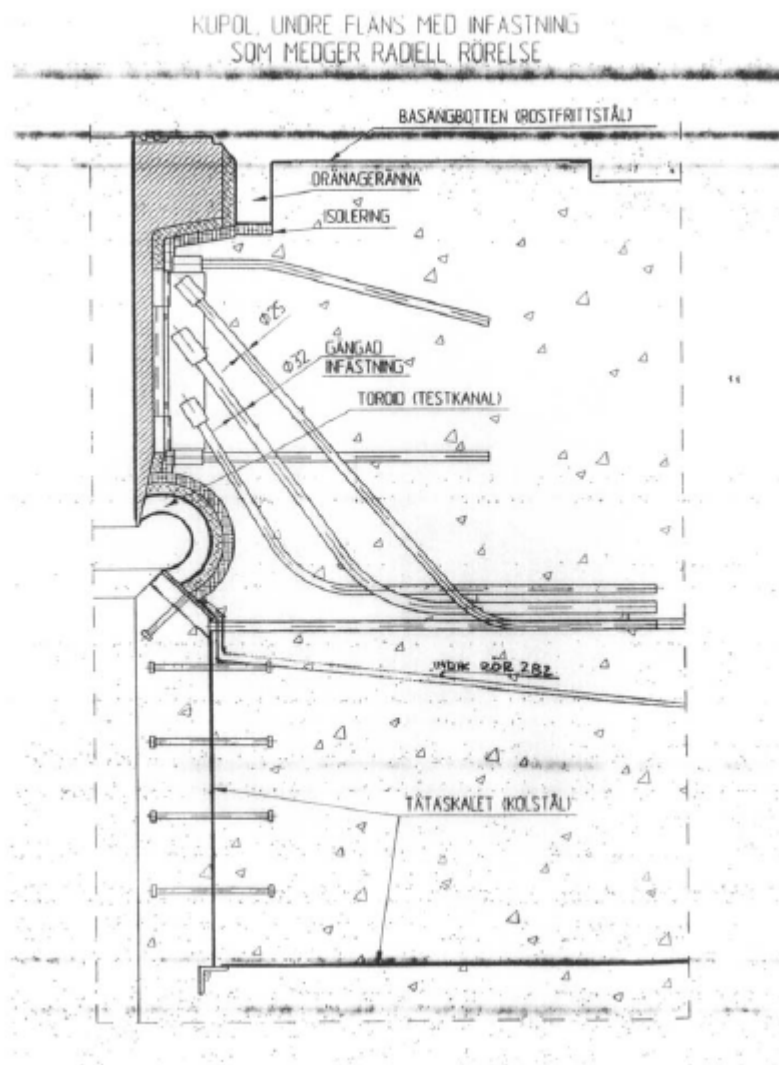
Figur 35. Injektering.

Vid injekteringen bildades dels luftfickor pga felaktigt placerade avluftningsrör dels ett poröst översta lager pga för högt w/c-tal i bruket och för hög koncentration svällningsmedel. Angreppet förmodades ha startat direkt och fortsatt de följande 16 åren dock med successivt lägre hastighet (11).

Det framgår inte av studerade rapporter om avluftningsröret pluggades eller inte efter slutfört arbete. Angreppen kan således ha initierats pga kontakt med koldioxid (fall 1) eller som en följd av att kondensvatten sköljt bort hydroxid (fall 2a).

6.1.2 Forsmark 1 toroid 1997

Även i detta fall uppfylldes inte kraven vid CAT. Orsaken visade sig vara att både inre och yttre toroiden, placerade i kupolflänsens underkant, var perforerade av korrosion. Innan betongväggen göts placerades skivor av mineralull mot flänsens och toroidernas utsidor, detta för att kompensera för temperaturutvidgningar. Både fläns och den yttre toroidens utsida var målad med 600 μm epoxy. Vid gjutningen blev mineralullen indränkt med alkaliskt gjutvatten. Det höga pH-värdet medförde sannolikt att blottlagt stål i eventuella färgskador bibehöll sin passivitet. Med tiden torkade mineralullen. Vatten kunde dräneras ut via ett rör som mynnar utanför den yttre toroidens lägsta punkt, se figur 36.



Figur 36. Kupolfläns med toroider Forsmark 1.

Vid skadeutredningen konstaterades hög fuktighet i isoleringen. Vattnet var aktivt och härrörde från bassängläckage. Vidare låg pH-värdet på det enda tagna vattenprovet på 10 (kan ha varit lägre på andra platser). Skadan orsakades av att vatten läckte från ovanliggande bassänger (9). Detta vatten var från början neutralt och transporterades endast i kontakt med antingen rostfritt stål eller karbonatiserad betong varför dess alkalisering blev måttlig. Dräneringsröret i utrymmets nedre del möjliggjorde vidare ett kontinuerligt flöde vilket dels tillförde syresatt vatten dels motverkade den pH-ökning som hade kunnat ske under stagnanta förhållande. Skadeorsaken kan hänföras till fall 2b i kapitel 5. Eftersom angreppet var lokaliserat på tätplåtens utsida så minskades inte tillförseln av syre genom den kvävgasfyllning som sker inuti inneslutningen under drift. Någon accelererande effekt av galvanisk korrosion bedöms inte ha förelegat. De omgivande betongväggarna är mycket tjocka varför syrehalten i betongen kring närliggande armering bedöms ha varit låg och därmed bör inte förloppet ha påskyndats av makro-celler mellan stål i fläns/toroider och armering. Däremot kan

makro-celler mellan olika ytor på fläns/toroider exponerade för fuktig minerallull med olika pH-värden ha förekommit, så kallade aktiv/passiv-celler. Skillnader i pH kan nämligen ha uppstått beroende på lokala skillnader i mängden läckagevatten och därmed borttransport av alkali.

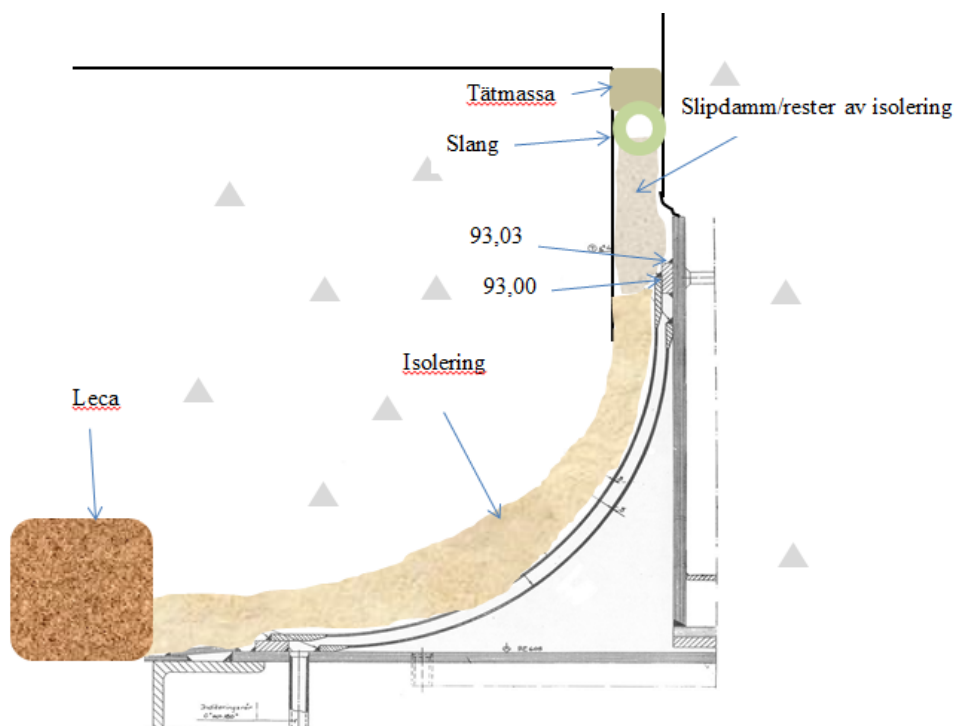
Toroiderna ersattes med en enkel toroid, utrymmet rensades från isolering och ett system för torkad luft installerades.

Motsvarande utrymme, mellan fläns/toroider och betong, på Forsmark 3 inspekterades 1998. Två inspektionshål togs upp. Det visade sig att utrymmet var helt fyllt med vatten. Vattnet hade ett pH-värde på 11,9 och bestod troligen av en blandning av överskottsvatten från gjutningen och läckagevatten från bassängerna (radioaktivt). Att gjutvatten stått kvar berodde på att den dräneringskanal som fanns på Forsmark 1 och 2 saknades på Forsmark 3. Kombinationen högt pH och helt fylld kavitet hade medfört att stålet behållit sin passivitet.

6.1.3 Ringhals 2 toroid 2005

Den nedre delen av täta skalet på Ringhals 2 utgörs av en bottenplåt och en toroid. Utrymmet mellan bottenplattan och betongbjälklaget är fyllt med Leca-block. Närmast toroiden hade gullfibermattor placerats, se figur 37.

Under byggnadstiden ansamlades vatten under betongbjälklaget och det konstaterades även att den inre toroiden var otät. För att säkerställa korrosionsskyddet av bottenplåt/toroid fylldes därför utrymmet från början med ca 20 m³ kalkvatten (10 kg Ca(OH)₂/m³) med tillsats av hydrazin (Levoxin 0,6 kg/m³). Påfyllningen gjordes till ett vattenstånd motsvarande en nivå på ca +92,94 m. Detta innebär att den undre delen av betongen i bjälklaget dränktes in med vatten. Överkanten på den vertikala plåten som toroidplåtarna är svetsade mot befinner sig på nivån +93,03 m. Direkt efter påfyllning av kalkvatten stod vattenytan således 9 cm under överkanten på plåten. Årligen fylls nytt vatten på d.v.s. nivån varierar under året. Enligt ritning skulle befintlig fuktig isolering, i de övre delarna, rensas bort så långt som möjligt efter det att bjälklaget hade gjutits.



Figur 37. Betongbjälklag, isolering vid toroid Ringhals 2.

Den inre toroidplåten var således otät redan från byggtiden, 1973. Detta har resulterat i ett utflöde av kalkvatten genom läckageindikeringsröret från spalten mellan de båda toroidplåtarna. Flödet hade inte förändrats med tiden varför man utgått från att skadan inte förvärrats. 1999/2000 inspekterades trekantsutrymmet mellan yttre toroidplåten, cylinderväggen och bottenplattan varvid konstaterades att inget läckage fanns genom den yttre toroidplåten. I juni 2004 upprepades inspektionen. Denna skulle göras med fiberoptik genom ett inspektionsrör i 180 grader som mynnar i bergsspalten. När pluggen öppnades strömmade det ut vatten som efter analys visade sig härröra från kalkvattnet, indikerande att även den yttre toroidplåten var perforerad. Noggrannare läckagemätningar initierades. Inledningsvis konstaterades läckaget genom den inre toroidplåten vara av samma storleksordning som från starten. I november hade dock flödet ökat med 70 % och i februari 2005 med ändå mer. I detta läge beslutade man att stoppa driften för att lokalisera läckagen. Betongbjälklaget i anslutning till toroiden bilades bort och toroiderna inspekterades. Den inre toroiden var kraftigt korroderad på stora områden. Majoriteten av genomfrätningarna (15-20 st) var i plåtens övre del.

Skadorna orsakades av att spalten mellan bjälklaget och cylinderväggen innehöll slipdamm och rester av isolering. I kombination med att nivån för kalkvattnet inte hade upprätthållits skapades en miljö med fuktig isolering i direkt kontakt med den inre toroidens insida. Fukten i isoleringen karbonatiserades och stålet förlorade sin passivitet. Den låga resistiviteten i isoleringen i kombination med god tillgång på oxidationsmedel (PWR reaktor utan kvävgasfyllning vid drift) samt möjlighet till att utveckla aktiv/passiv-celler, med ytor som stod i kontakt med vattenmättad isolering med högt pH, medförde en förhållandevis hög

propageringshastighet (9). Fallet kan liknas vid fall 1 och där initieringen har underlättats genom att fuktig isolering lättare karbonatiseras än en vattenlinje.

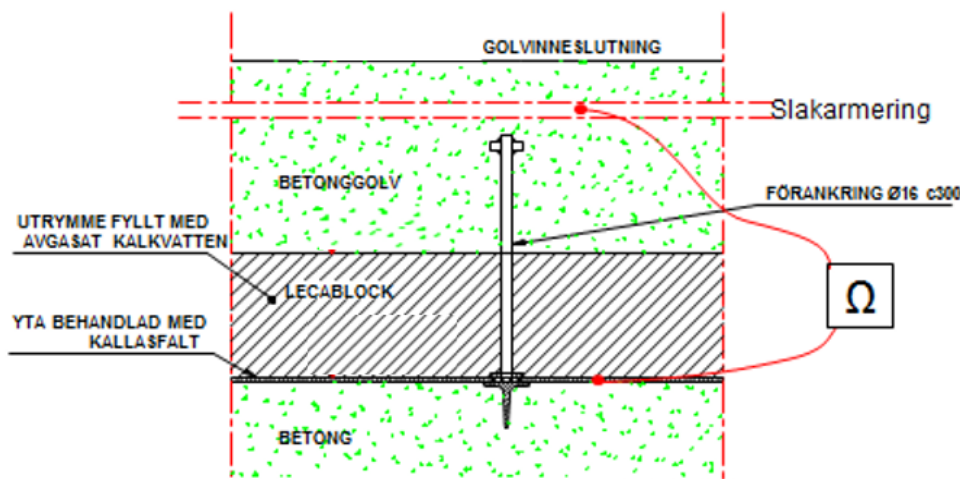
Efter återställning av toroidplåtarna genomfördes en rad förbättringar ur korrosionssynpunkt. Således togs all isolering bort och utrymmet gjordes inspekterbart. Ett kontrollsystem infördes som säkerställer att vattennivån ligger över toroidernas översta punkt och slutligen har luften direkt ovanför vattenlinjen ersatts med kvävgas.

6.1.4 Forsmark 2 toroid 2006

Även Forsmark 2:s toroid och kupolfläns inspekterades 1998. En något förhöjd fuktighet kunde konstateras i utrymmet. Senare konstaterade dock att bassängläckage förekommer och att vattnet rinner ner i utrymmet utanför kupolfläns och toroider. Det beslöts att isoleringen skulle tas bort och korrosionsmiljön kontrolleras med torr luft. Arbetet gjordes 2006 och 23 av 72 ramplattorna monterade på kupolflänsen uppvisade angrepp i färgskador (9). Angreppens omfattning var dock avsevärt mindre än på Forsmark 1 och inte heller i detta fall bedöms galvanisk korrosion påskyndat förloppet. En viss accelererande effekt av makro-celler kan dock inte uteslutas. Eftersom läckagevatten successivt dränerades bort är fallet av typ 2b, se kapitel 5.

6.1.5 Ringhals 2 bottenplåt 2015

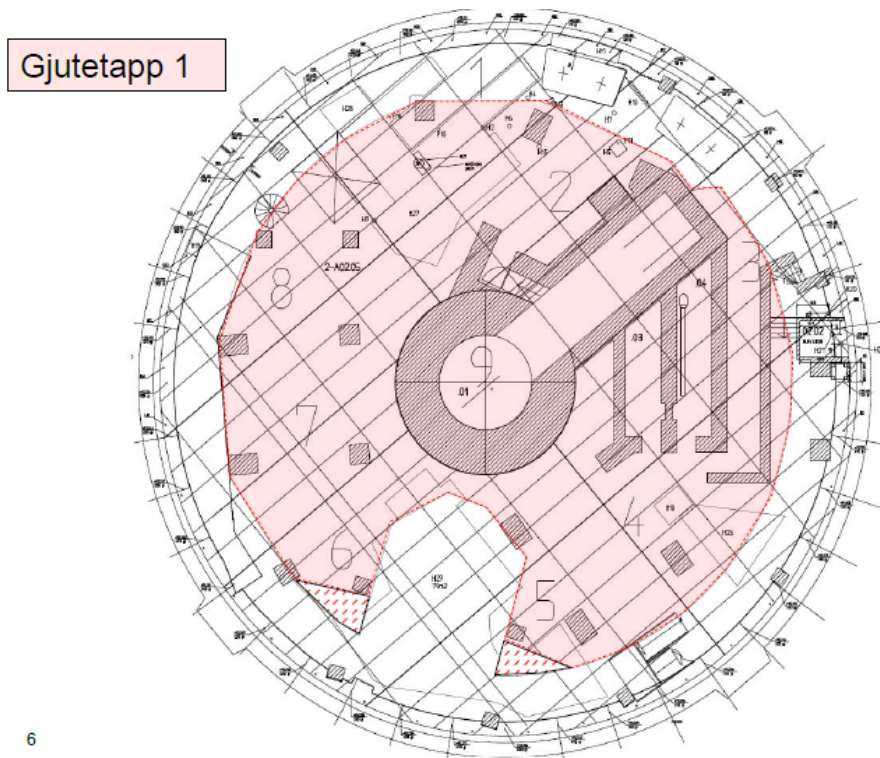
Bottenplattan på Ringhals 2 har en unik utformning. Den är grundlagd på berg och ca 3 m tjock. Ovanpå betongen placerades tätplåten, 5 mm, vilken i sin tur täcktes av Leca-block, höjd 0,15 m, Ovanpå Leca-blocken göts ett 0,3 m tjockt betonggolv, se figur 38.



Figur 38. Bottenplatta Ringhals 2.

Insvetsningen av bottenplåten gjordes i mars/april 1971. Gjutningen av betonggolvet gjordes i två steg, gjutning 1 i juni 1971 och gjutning 2 i februari 1972.

I figur 39 visas omfattningen av gjutning 1. Området utanför detta motsvarar gjutetapp 2.



Figur 39. Gjutetapp 1 av betongbjälklag Ringhals 2.

Under arbetet uppmärksammades att vatten (överskottsvatten från gjutning och eventuellt regnvatten) ansamlades ovanpå tätplåten. Ett omfattande utredningsarbete resulterade i att man beslöt att fylla utrymmet ovanför tätplåten med 20 m³ kalkvatten med tillsats av hydrazin.

2015 konstaterades att läckage existerade i bottenplåten. Läckaget visade sig härröra från ett borrhål som uppstått i samband med att toroiden åtgärdades 2005. Partiell friläggning av bottenplåten påvisade dock omfattande gropfrätning på kringliggande områden. En stor del av bottenplåten frilades och undersökningen visade att i princip hela bottenplåten, utom direktgjutna delar, hade områden med frätgropar. Den mest omfattande korrosionen konstaterades finnas under gjutetapp 2 och i periferin av etapp 1.

Angreppen antas ha uppstått genom att stålet förlorat sin passivitet till följd av att det mot plåten kvarstående gjutvattnet karbonatiserat till följd av långvarig kontakt med luftens koldioxid (9). Processen gick olika fort i olika delar av utrymmet under betonggolvet. Efter gjutetapp 1 gick det snabbast i gjutsektionens periferi. Här dränerades Leca-bädden snabbast genom att vatten rann ut på den fritt exponerade plåten tillhörande gjutetapp 2. Korrosionen påskyndades sannolikt av att en aktiv/passiv-cell bildades, där katodytan låg längre in mot gjutetappens mitt, se figur 40.



Figur 40. Aktiv/passiv-cell.

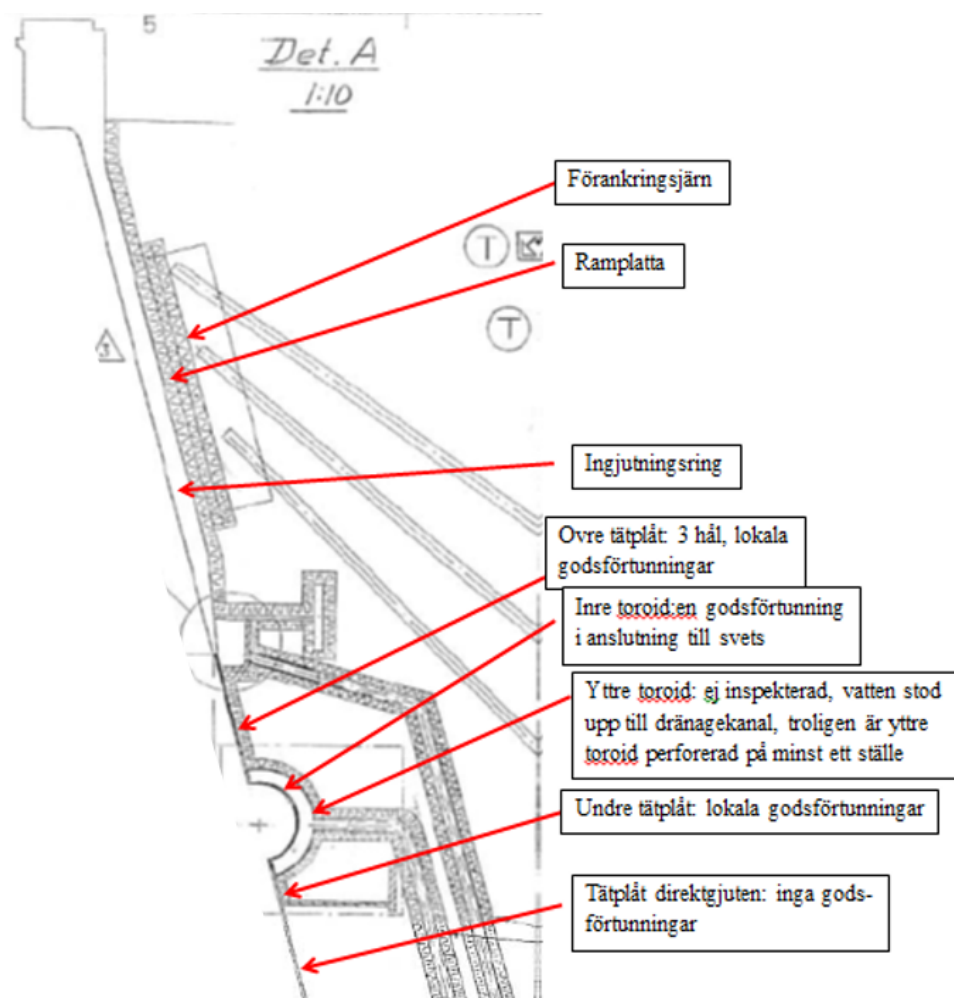
I och med gjutning 2 så tillfördes tätplåten under gjutetapp 1 överskottsvatten från denna senare gjutning och kan mycket väl ha repassiverats. Med tiden började istället områden med förlorad passivitet att uppstå på plåten under gjutetapp 2. Att dessa skador blev störst beror sannolikt på den långa tiden, 22 månader, innan kalkvattnet påfördes och samtliga ytor repassiverades. Skadorna förmodas således ha uppstått under perioden 1972-1973.

Även detta skadefall beskrivs närmast som ett fall 1. Ett alkaliskt vatten som inte står i direkt kontakt med betong förlorar med tiden sitt höga pH-värde om det finns en direkt kontakt med luft.

Kalkvattnets goda skyddsförmåga kunde verifieras under reparationsarbetet 2015. Den toroid som byttes ut 2005 var så när som på lite ytrost helt oskadad 10 år senare.

6.1.6 Ringhals 1 toroid 2017

Vid den inspektion som genomfördes efter täthetsprovningen av reaktorinneslutningen på Ringhals 1, RA17, upptäcktes tre läckageområden i tätplåten strax ovanför toroiden i anslutning till ingjutningsringen (kupolflänsen). Konstruktionen skiljer sig från Forsmarksreaktorerna, se figur 41. I samma figur sammanfattas också skadebilden vid den första inspektionen.

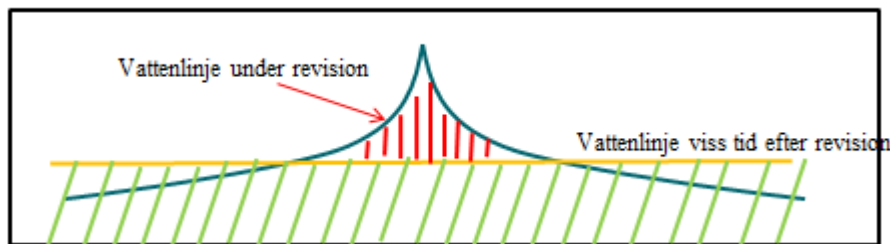


Figur 41. Sammanfattning av skadebild för tätplåtar och toroid Ringhals 1.

Förhållandena vid Ringhals 1 utgör ett mellanting mellan Forsmark 1/2 och Forsmark 3. I Forsmark 1 och 2 uppstod aldrig en tillräckligt alkalisk miljö eftersom läckagevattnet dränerades bort. I Forsmark 3 fylldes utrymmet bakom kupolflänsen successivt och efter viss tid stod alla stältytor i kontakt med ett alkaliskt vatten.

Om vi utgår från att bassängläckaget i Ringhals 1 i första hand kommer från reaktorbassängen så tillförs utrymmet endast läckagevatten under revisionerna. Vattnet transporteras antingen genom sprickor i betongen eller genom isoleringen i spalten bakom kupolflänsen. När det ansamlats i utrymmets nedre delar, utanför tätplåt och toroid, har det sannolikt fått ett relativt högt pH värde. Om vi utgår från att det har funnits ett dominerande läckageställe så uppstår under revisionen en fuktprofil i isoleringen, se blå linje i figur 42. Efter revisionen jämnas vattennivån ut, orange linje. I det grönstreckade området är mineralullen vattenmättad och pH-värdet högt. Om läckagevattnet transporterats genom betongen eller pga kontakt med betong erhållit ett högt pH och en kemisk sammansättning liknande ett betongporvatten så kommer den mineralull i läckageområdet som efter revisionen hamnar ovanför vattenlinjen (röd streckat område) att ha mycket hög konduktivitet. Övriga delar av mineralullen är endast

exponerad för kondensvatten (vitt område). När pH-värdet i ullen sjunker i det rödsträckade området finns goda möjligheter att skapa aktiva korrosionsområden. Anodytor initieras på stålytor med skador i färgskiktet och hela det grönsträckade området utgör katodytor. Korrosionshastigheten blir hög pga den höga konduktiviteten i kombination med den stora tvärsnittsytan på elektrolyten (fuktig ull). I de vita områdena kan också aktiv/passiv-celler uppstå men pga den låga konduktiviteten, en faktor 1000 lägre blir korrosionshastigheten låg.



Figur 42. Tänkt fuktprofil vid revision och i ett senare skede.

Angreppen uppstod på tätplåtens utsida där det är fritt lufttillträde även under drift. Vid god tillgång på syre hydrolyseras de vid korrosionen frigjorda järnjonerna varvid pH värdet sjunker ytterligare. Reaktionen blir därför självunderhållande genom att återpassivering av denna del av stålytan inte kan ske. Processen fortgick troligen till nästa revision. Då tillfördes nytt, troligtvis alkaliskt, vatten och lägre belägna aktiva områden återpassiverades genom att de efter revisionen nu omgavs av mineralull mättat med alkaliskt vatten. För högre belägna områden återupprepad dock processen och korrosionen fortsatte (9).

6.1.7 Sammanfattning av svenska erfarenheter

Skadorna som uppstått i inneslutningarnas övre delar, i anslutning till toroiderna vid kupolflänsen d.v.s. de vid Forsmark 1 och 2 samt Ringhals 1 är alla av den typ som vi kallar fall 2b i kapitel 5. Flödande läckagevatten tvättar ur alkali och sänker därmed pH-värdet i ett poröst material. Angreppen sker från tätplåtens utsida där syre finns tillgängligt via luftfyllda kanaler och även kan tillföras som löst i vattnet. Propageringen påskyndas dels av den goda konduktiviteten i mineralullen (joner från betonggjutvatten) dels av aktiv/passiv-celler som uppstår pga närliggande passiva områden.

Skadorna i Barsebäck 2 var av typen fall 2a. Initieringen möjliggjordes troligen genom att kondensvatten sänkte pH-värdet i det porösa övre lagret som bildats i kavitetens övre del. Korrosionshastigheten var sannolikt hög i början och därefter successivt avtagande pga syrebrist. Att angreppet trots allt kunde penetrera tätplåten bedöms bero på kavitetens storlek.

De båda skadorna i Ringhals 2 kan kategoriseras som angrepp typ fall 1. Initieringen orsakades av att luftens koldioxid karbonatiserade den avvattnade övre delen av isoleringen utanför toroiden respektive den tunna vattenspegeln ovanpå bottenplåten.

6.2 INTERNATIONELLT

SKI gjorde en sammanställning av skador i utländska anläggningar 2003 [2]. Flest skador har rapporterats från amerikanska anläggningar och endast ett mindre antal från europeiska anläggningar. Det har inte kunnat klarläggas om detta beror på att färre skador har inträffat i europeiska anläggningar eller om rapporteringsbenägenheten är lägre.

I USA är tätplåten i väggen och domen synlig och tillgänglig för inspektion. För de flesta amerikanska verk är tätplåten i golvet ingjuten i betong. Minst 66 skador har inträffat under årens lopp. Av dessa har 25 % varit korrosionsskador. I två av fallen hade korrosionsangrepp penetrerat tätplåten. I ytterligare fyra fall hade halva tjockleken av tätplåten korroderat bort.

I Frankrike finns två typer av reaktorinneslutningar. Den ena typen har tätplåt och den andra saknar tätplåt (dubbla betongväggar). I reaktorinneslutningar som har tätplåt är tätplåten synlig i vägg och dom och tillgänglig för inspektion. I golvet är tätplåten ingjuten i betong. De skador som finns rapporterade härrör från korrosion. Skadorna har inträffat huvudsakligen i två områden: längs hela omkretsen av tätplåten i den koniska väggen i närheten av den övre bottenplattan och under övergången mellan den koniska delen och den 1 m tjocka bottenplattan. Orsaken anges bland annat vara stagnation av vätska i testkanaler för täthetskontroller av svetsar under konstruktionen av inneslutningarna. I en del fall har korrosionen penetrerat tätplåten.

Den franska reaktorn Bugley 5 togs i drift i juli 2017 efter nästan två års stillestånd på grund av läckage genom tätplåten [12]. Läckaget var identifierat till botten av reaktorinneslutningen (under golvnivån mot reaktorinneslutningens vägg). Reaktorn är som övriga franska av typen PWR. EDF lyckades inte lokalisera skadan. Man valde att byta ut befintligt material som låg mellan inneslutningens vägg och betonggolv till vatten med högt pH vilket godkändes av franska myndigheten. Iden kom från Ringhals 2 bottenplåt. Med botten täckt med vatten uppfylldes acceptanskravet. Intressant att notera är att man nöjde sig med detta och inte krävde reparation av skadan.

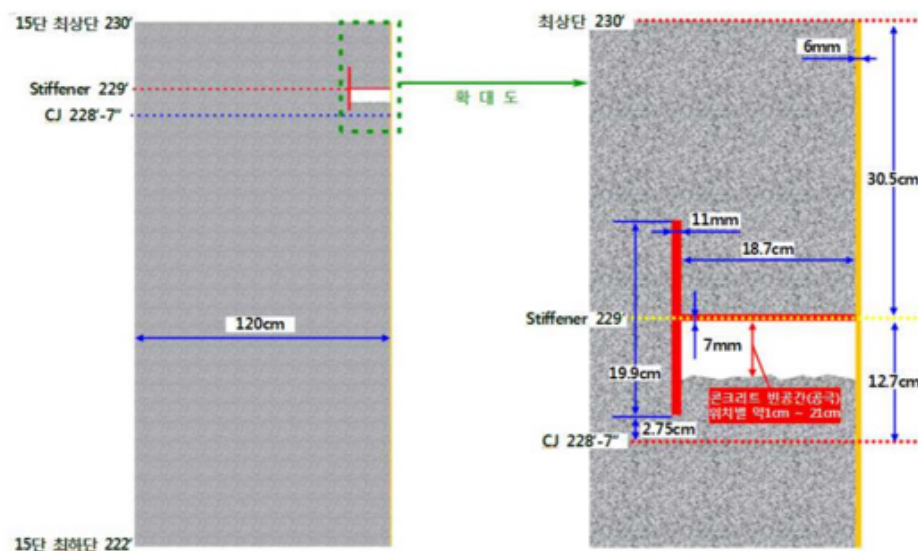
I ett dokument från den amerikanska myndigheten konstateras att det inte är ovanligt med kaviteter vid ingjutna tätplåtar och att detta oftast beror på brister i utförandet [13]. Vidare nämns att korrosion har observerats i området där tätplåten går från luft till att vara ingjuten.

Vid en rutinundersökning med ultraljud identifierades angrepp på tätplåtens baksida i en Sydkoreansk inneslutning [29]. Flera inneslutningar undersöktes och man konstaterade angrepp på flera objekt, se tabell 5. Nominell plåttjocklek var 6 mm. Skadorna sammanföll med gjutskarvar i den yttre cylinderväggen (finns ingen inre cylindervägg) och företrädesvis i övergången mellan cylindervägg och dom. Den dominerande skadeorsaken bedömdes vara att salt och vatten ansamlats vid tätplåtens yta i gjutskarven till följd av att det var ett 2-7 månader långt uppehåll i gjutningsarbetet i detta skede av byggnationen (tung utrustning skulle lyftas in). I ett fall konstaterades trä ligga an mot tätplåten och i ett fall vajerrester. Kraftigast angrepp hade inträffat på Hanbit 4 där plåten var perforerad. En stor kavitet hade bildats under en förstyrningsplåt till följd av en misslyckad

undergjutning, se figur 43. Om det fanns kaviteter i övriga fall framgår inte av rapporteringen.

Tabell 3. Angrepp på baksidan av tätplåtar i Sydkoreanska inneslutningar.

Reaktor	Nivå	Minsta kvarvarande tjocklek, mm	Orsak
Hanbit 1	13	2,53	Långt gjutuppehåll (5,5 månader)
	1	2,84	Trä mellan plåt och betong
Hanul 1	7	2,75	Långt gjutuppehåll (4 månader)
Kori 3	13	1,12	Långt gjutuppehåll (7 månader)
	3-12	2,75	Långt gjutuppehåll (5,5 månader)
	2	2,29	Långt gjutuppehåll (2,7 månader). Vajerrester mellan plåt och betong.
Kori 4	13	5,28	Långt gjutuppehåll (5 månader)
	2	3,31	Långt gjutuppehåll (2,7 månader)
Hanbit 4	15	Perforerad	Misslyckad undergjutning skapat kavitet



Figur 43. Kavitet bildad under förstärkningsplåt pga misslyckad undergjutning. Hanbit 4 i Sydkorea.

7 Identifiering av olika riskzoner

För att korrosion ska kunna initieras på en ingjuten tätplåt krävs en kavitet i betongen. Om kaviteten är sluten måste den ha en tillräckligt stor volym så att det i kaviteten tillgängliga syret respektive det genom diffusion, genom betongen, tillförda syret räcker för att åstadkomma ett kritiskt angrepp. Propageringen kan också åstadkommas om kaviteten har en direkt kontakt med, utanför betongkonstruktionen, omgivande luft. Detta kan ske via en spalt mellan tätplåt och betong, en stor spricka eller ett ingjutet rör. I extremfallet är plåten fritt exponerad d.v.s. en direkt övergång mellan ingjuten tätplåt och inte ingjuten tätplåt.

Kaviteten måste vidare vara endast delvis vattenfylld.

Både risken för initiering och propageringshastigheten minskar om luftens syrehalt sjunker. Inuti inneslutningen på en BWR reaktor är därför risken för initiering mindre, förutsättningarna för repassivering större och propageringshastigheten lägre än på en tätplåt i en PWR reaktor eller på utsidan av en tätplåt i en BWR.

Om vattnet flödar genom kaviteten kan inte stålet behålla sin passivitet och korrosion initieras.

Har stålet förlorat sin passivitet kan korrosionsförloppet accelereras av aktiv/passiv-celler och/eller galvanisk korrosion.

Kaviteter kan i princip ha uppstått var som helst på tätplåten men en kavitet som antingen har stor volym eller har kontakt med omgivningen utanför betongen reducerar antalet riskområden. Följande platser kan identifieras:

- Där man avsiktligt eller oavsiktligt placerat mineralull, trä eller annat poröst material i kontakt med stålet.
- Vid en gjutskarv.
- Där konstruktionen är sådan att det finns risk att en misslyckad undergjutning uppstår.
- Vid genomföringar om injekteringen varit ofullständig eller bristfälligt utförd.
- Vid personslussar.
- Vid övergång mellan ingjuten och fritt exponerad tätplåt.

Klimatförhållandena i en eventuell kavitet och förhållandena i omgivande betong varierar med kavitets position. Således måste vi ta hänsyn till:

- PWR eller BWR.
- Ut- eller insida av tätplåt.
- Nivå i höjddled.
- Drift eller avställning.
- Risk för att exponeras för bassängläckage eller inte.

I det följande gör vi ett försök att bedöma i vilka områden på tätplåten som en potentiell korrosionsrisk kan föreligga. Vi har valt att särskilja BWR och PWR samt för respektive reaktortyp separat studera följande områden:

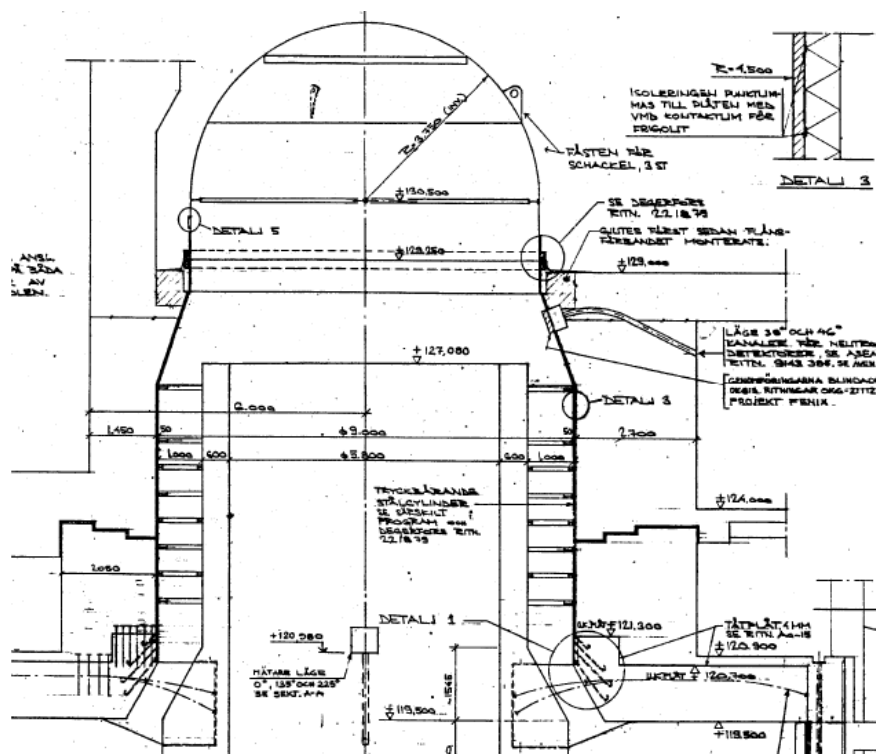
- Utsidan av tätplåt i cylindriska väggen.
- Insidan av tätplåt i cylindriska väggen.
- Bottenplåten.
- Genomföringar.

För varje område tar vi hänsyn till nivå, driftsförhållande, kända konstruktionsutformningar samt om det bedöms föreligga risk för bassängläckage eller inte.

7.1 BWR

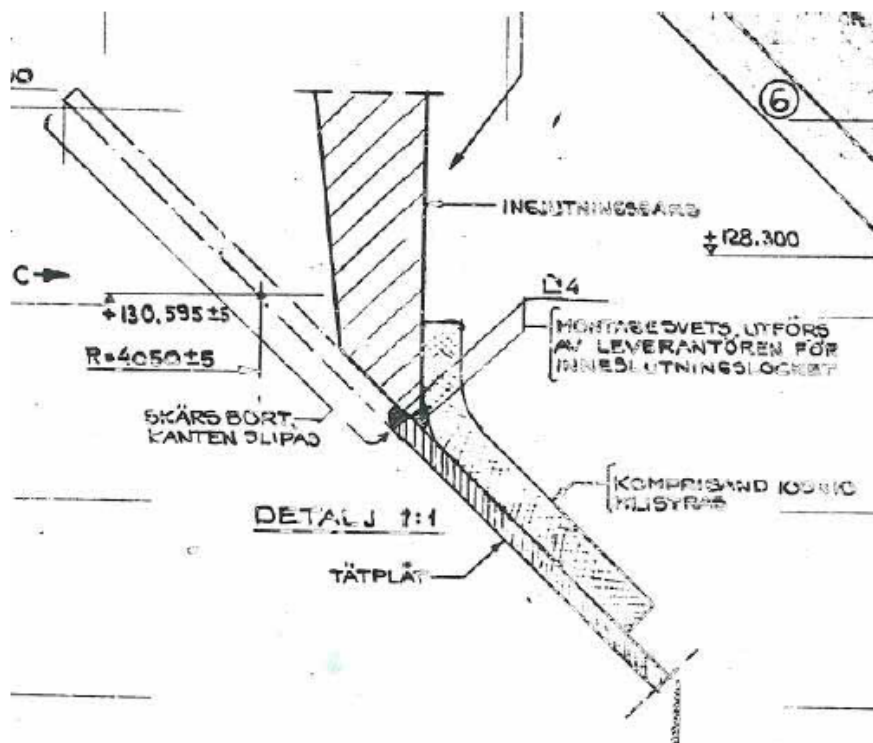
7.1.1 Utsidan av tätplåt i cylindriska väggen

I inneslutningens övre del övergår tätplåten från att utgöras av den cylindriska väggen till att vara en del av kupolflänsen (ingjutningsringen, ingjutningssargen). Ovanför flänsens överkant ligger bränsle- och hanteringsbassänger. Eventuella bassängläckage kommer att påverka tätplåtens utsida. I de fall den yttre väggen gjutits mot skivor av mineralull har risk för korrosion förelagat. Utrymmet har uppfyllt kriterierna för korrosion d.v.s. en kavitet som kommunicerar med omgivningen och där vattnet inte transporterats genom betongen utan via en kanal samt att omgivningen utgörs av en syresatt atmosfär. I de fall vattnet dränerats bort (Forsmark 1, Forsmark 2 och Ringhals 1) har korrosionsskador uppstått. På Forsmark 3 tilläts vatten bli stående. Detta räckte för att stålytor skulle behålla sin passivitet. Detta trots att vattnet troligtvis inte transporterats genom betongen. I Oskarshamn 1 användes frigolit istället för mineralull, se figur 44. Vid bassängläckage skulle detta kunna vara en kritisk punkt.



Figur 44. Ståltryckkärlet Oskarshamn 1 [26].

På Oskarshamn 2 klitrades 20 mm cellplast på ingjutningssargen. Denna cellplast verkar dock inte kommunicera med ovanliggande bassänger via någon kanal, se figur 45. Om den med cellplast fyllda kaviteten endast är delvis vattenfylld kan ett angrepp typ 2a inte uteslutas.



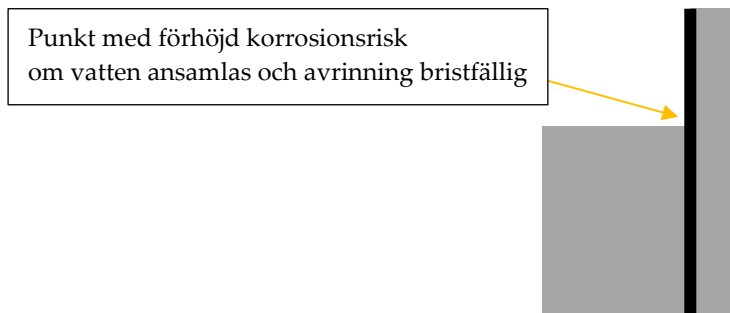
Figur 45. Övre cylinderväggen i Oskarshamn 2. Anslutning mellan tätplåt och inneslutningssarg [27].

På Oskarshamn 3, Barsebäck 1 och 2 samt Olkiluoto 1 och 2 är kupolflänsen stelt fixerad vid betongen varför det inte bör förekomma några större hålrum i anslutning till fläns/tätplåt [20, 22].

På lägre nivåer är tätplåten helt ingjuten. Eventuella kaviteter som uppstod i byggskedet fylldes med överskottsvatten. Eftersom den relativa fuktigheten ligger nära 100% torde dessa kaviteter fortfarande vara helt vattenfyllda och någon korrosionsrisk föreligger inte. Den yttre väggens grova dimension gör det osannolikt att det ska existera genomgående sprickor. Undantaget är i skarvar mellan olika gjutetapper.

I de fall utvändiga testkanaler existerar och fukt kvarstår i dessa kan, enligt franska erfarenheter, penetrerande korrosionsskador uppstå.

Om cylinderväggens tätplåt någonstans inte är ingjuten finns en korrosionskänslig punkt där den övergår till att vara ingjuten om denna ingjutna del ligger lägre, se figur 46. Det är dock tveksamt om det finns några dylika punkter.



Figur 46. Korrosionskänslig punkt där tätplåt övergår från fri exponering till ingjuten.

7.1.2 Insidan av tätplåt i cylindriska väggen

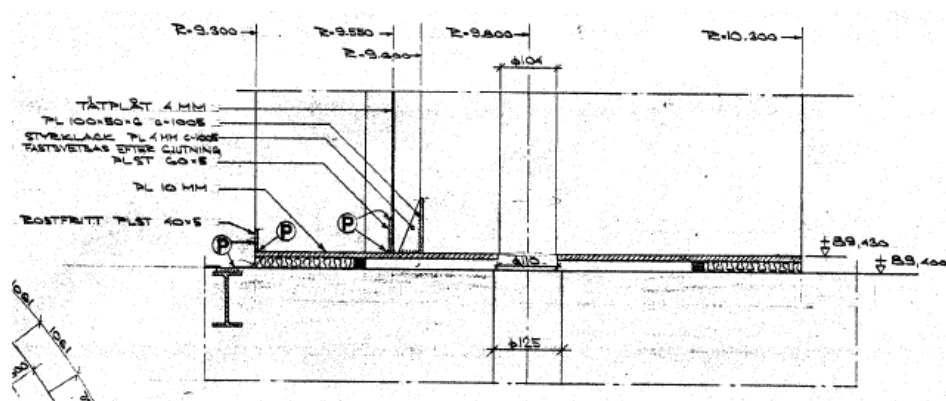
I inneslutningens översta del utgörs tätplåten av kupolflänsen och i förekommande fall den inre av toroiderna. Flänsens och toroidens insida är fritt exponerad men korrosionsmiljön är inte aggressiv och stålytorna målade samt inspekterbara.

Samtliga metoder som utnyttjades vid konstruerandet av cylinderväggen, se figur 5, kan ha skapat kaviteter på tätplåtens insida. Glidformsgjutning utförs med trögflytande betong medförande större risk för gjutfel och efterföljande injektering kan ha haft brister i utförandet. Eventuella kaviteter i betongen i direkt anslutning till tätplåtens insida i primärutrymmet riskerar inte att exponeras för några läckage från ovanliggande bassänger. Däremot kan det inte uteslutas att kondensation uppstår i en sluten kavitet. I och med att inneslutningen är kvävgasfylld under drift är tillförseln av syrgas genom betongen mycket begränsad. Kaviteten måste därför vara mycket stor för att ett allvarligt angrepp ska uppstå med hjälp av det syre som finns i kaviteten. I en kavitet som är förbunden med inneslutningens (i primärutrymmet) torra och kvävgasfyllda luft torde med tiden bli luftfylld och därmed kan inga allvarliga angrepp i vattenlinjen uppstå.

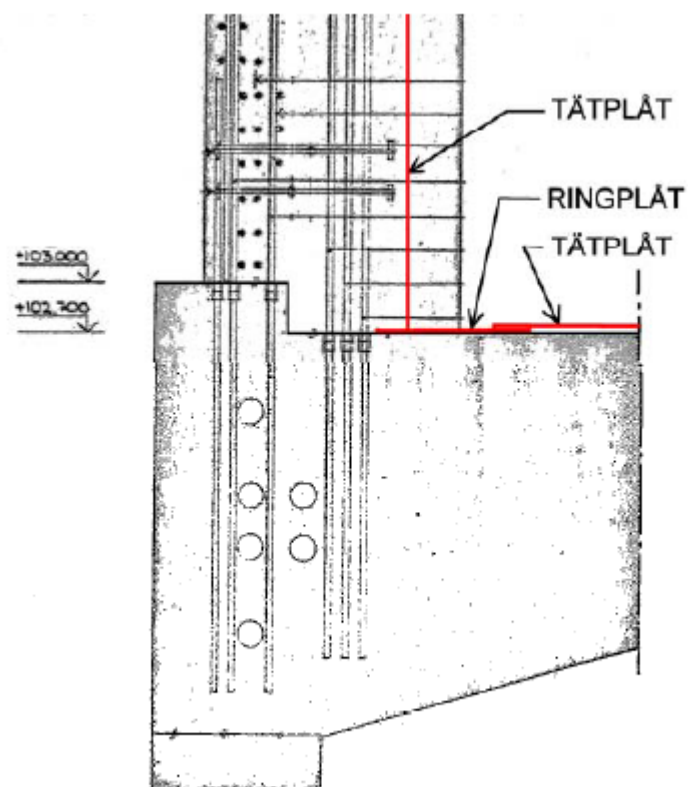
Den yttre och i förekommande fall (internpumps-BWR) även den inre väggen i sekundärutrymmet är klädda med rostfria bassängplåtar som svetsats mot ingjutna vinkelstänger. Läckage av vatten förekommer [19]. Detta har medfört att betongen bakom plåtarna är vattenmättad och att eventuella kaviteter i anslutning till tätplåten (cylindriska väggen) är vattenfyllda. Detta vatten har vandrat genom betong och erhållit ett högt pH. Tätplåten av kolstål behåller därmed sin passivitet och någon galvanisk korrosion uppstår inte trots kontakt med den rostfria bassängplåten. Inspektioner på både Barsebäck av ingjuten tätplåt (6) och Forsmark av domkraftsfästen (9) har visat detta.

Minst risk för att en korrosiv miljö ska uppstå på tätplåten i den cylindriska väggens nedre delar erhålls om man undviker att dränera ut vattnet som står mot tätplåten.

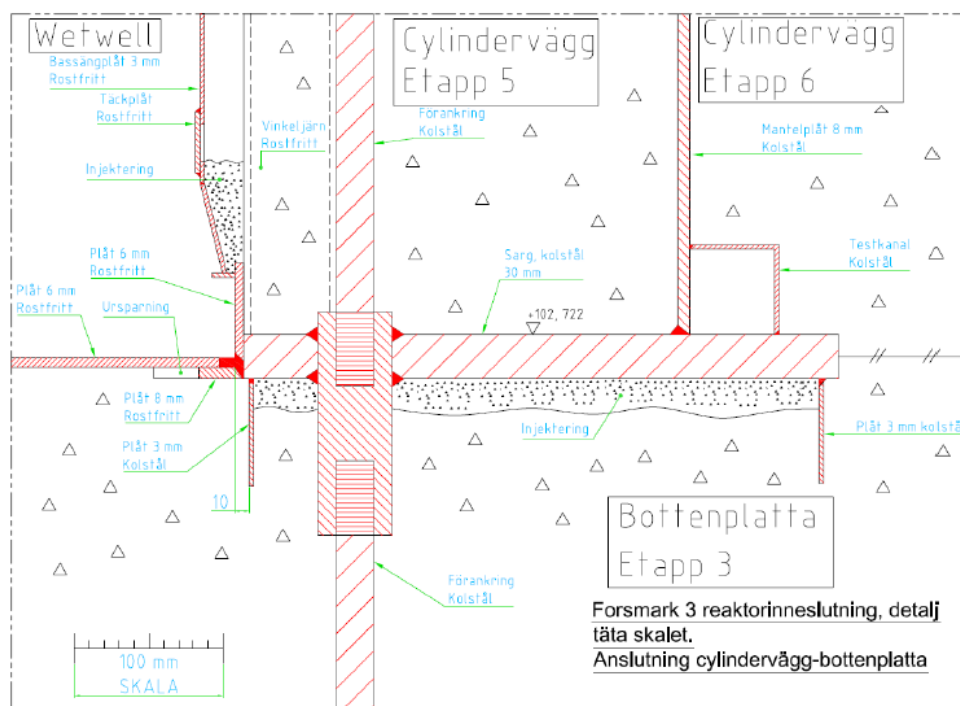
Övergången mellan cylinderväggens tätplåt av kolstål och den rostfria bassängbottenplåten har gjorts på olika sätt. På Ringhals 1 installerades en toroid mellan bottenplåten och plåten på väggens insida, se figur 8, [21]. På övriga anläggningar utfördes övergången som en fast inspänd konstruktion, se exempel i figur 47-49.



Figur 47. Sektion genom nedre delen av cylinderväggen Oskarshamn 1 [26].



Figur 48. Sektion genom nedre delen av cylinderväggen Oskarshamn 3 [28].



Figur 49. Sektion genom nedre delen av cylinderväggen Forsmark 3 [25].

I samtliga konstruktioner finns blandskarvar mellan kolstål och rostfritt. Så länge dessa blandskarvar endast exponeras för betong eller vatten med högt pH-värde sker ingen aktivering av kolstålet och därmed ingen accelererat angrepp pga galvanisk korrosion. Det man måste undvika är att blandskarven exponeras för ett direkt flöde av bassängvatten d.v.s. vatten som inte dess för innan passerat genom en betongvägg.

I sekundärutrymmet ovanför kondensationsbassängen bör eventuella kaviteter vara vattenfyllda pga den höga relativa fuktigheten i luften ovanför bassängerna. Även om så inte är fallet så är tillförseln av syrgas starkt begränsad av hög relativ fuktighet i betongen (sluten kavitet) respektive kvävgasfyllning (spricka in till kavitet)

Kaviteter på tätplåtens insida i cylinderväggen bedöms därför inte utgöra någon korrosionsrisk. Detta gäller även domkraftsfästen med hålrum som fyllts med isolering.

På tätplåtens insida existerar övergång från fritt exponerad tätplåt till ingjuten bara längst upp vid kupolflänsen och där finns ingen risk för att vatten ska ansamlas.

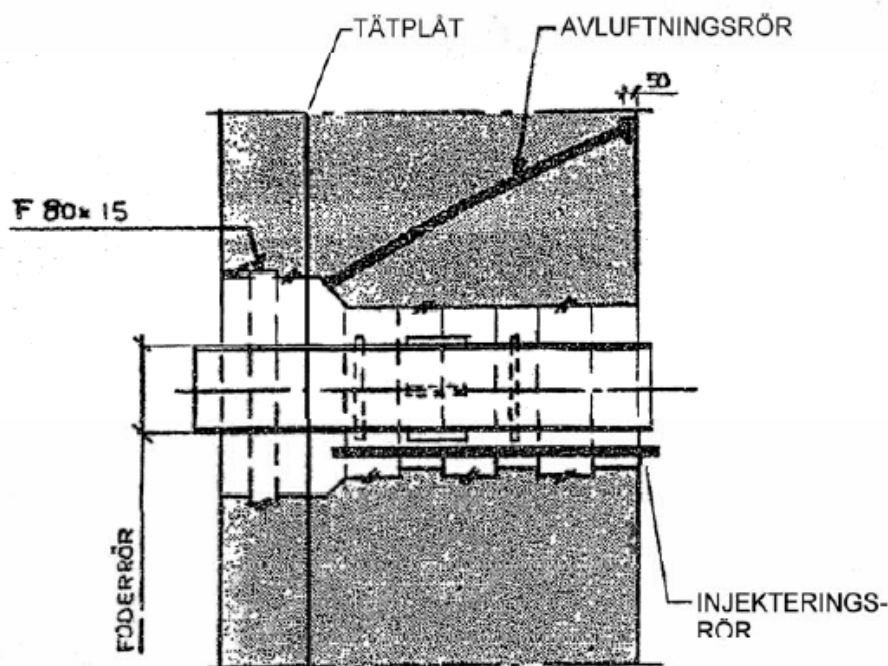
7.1.3 Bottenplåt

I BWR reaktorer utgörs tätplåten i botten av inneslutningen av den rostfria plåten i bassängbotten. Tätplåten är således inte ingjuten och dessutom inspekterbar.

Någon korrosionsrisk föreligger inte men sprickor eller svetsdefekter kan medföra att läckage uppstår. Detta läckagevatten har ett neutralt pH-värde och kan medföra angrepp i läckageindikeringskanalerna under bottenplåt. Undersidan av tätplåten angrips dock inte.

7.1.4 Genomföringar

Erfarenheterna från Barsebäck 2 visar att den största risken för att korrosionsskador ska uppstå vid genomföringar är avvikelser i konstruktion och utförande. Angreppen initierades redan vid byggnationen och inte som en följd av att vatten i ett senare skede ansamlats pga bassängläckage. Detta talar för att eventuella liknande konstruktions- eller utförandefel på andra anläggningars genomföringar borde ha gett sig till känna vid de fortlöpande täthetsprovningar som genomförs. Vidare påstås från övriga verk att utförandet varit bättre bl.a. har avluftningsröret placerats i urspringens högsta punkt, se figur 50.



Figur 50. Principdetalj rör genomföring Oskarshamn 3 [28].

Genomföringar måste trots detta anses vara en svag punkt. Detta gäller även personslussar. Konstruktionerna fungerar som effektiva köldbryggor mellan den kallare utsidan och den varmare insidan. Kondensvatten kan därför bildas i eventuella kaviteter. Om kaviteten är stor eller det finns genomgående sprickor kan korrosion initieras. Primärt är det sprickor mot utsidan som kan vara kritiska (syresatt atmosfär).

7.2 PWR

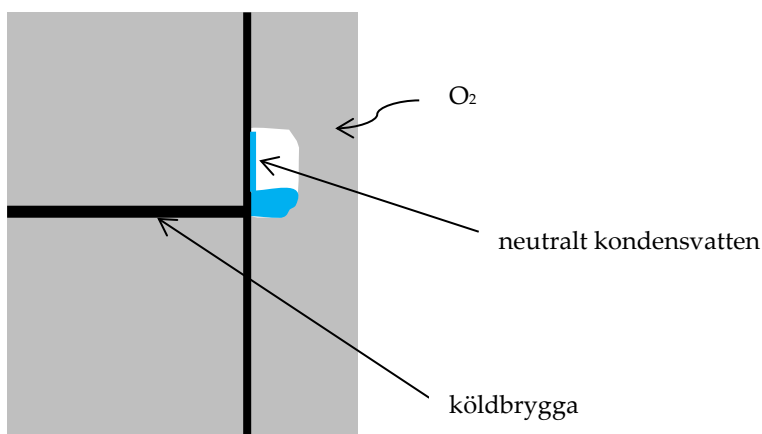
7.2.1 Utsidan av tätplåt i cylindriska väggen

Under den dominerande delen av året är temperaturen högre inuti än utanför inneslutningen. Risken för kondensation i kaviteter på tätplåtens utsida torde därför vara låg. En lokal pH-sänkning i en vattenlinje kan då bara uppstå om koldioxid förs in via en spricka t.ex. en gjutskarv.

I de fall utvändiga testkanaler existerar och fukt kvarstår, kan angrepp inträffa i dessa.

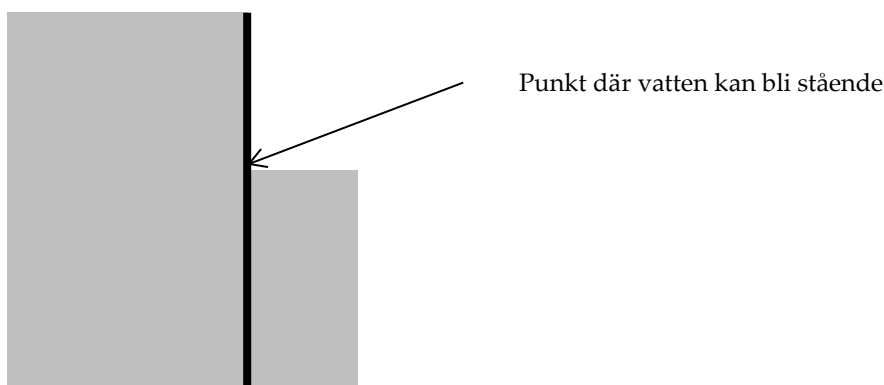
7.2.2 Insidan av tätplåt i cylindriska väggen

Om en kavitet existerar på tätplåtens insida och det samtidigt finns en köldbrygga genom den yttre väggen så kan troligen rikliga mängder kondensvatten uppstå, se figur 51. Kombinationen kall utsida och inte kvävgasfylld inneslutning medför större risk för att korrosion ska uppstå i stora kaviteter på tätplåtens insida på PWR reaktor än på BWR reaktor.



Figur 51. Köldbrygga som ger upphov till kondensation i kavitet på tätplåtens insida.

Finns övergångar från icke ingjuten till ingjuten tätplåt så kan vatten från rengöring eller andra arbeten bli stående och utgöra en potentiell punkt för angrepp, se figur 52.

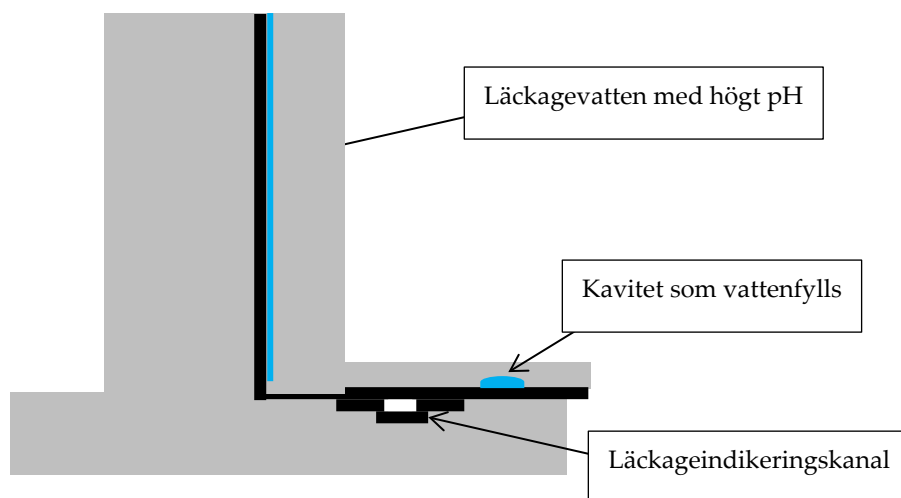


Figur 52. Övergång från fritt exponerad tätplåt till ingjuten där eventuellt vatten från rengöring etc kan tänkas bli stående.

Läckage från reaktorbasängen, som uppstår under revision, kan medföra att vatten transporteras till lägre belägna kaviteter vid tätplåtens inneryta. Vattnet transporteras genom betongen och borde ha ett högt pH-värde. Någon korrosionsrisk bör därför inte föreligga.

7.2.3 Bottenplåt

I Ringhals 2 placerades Leca-block ovanpå bottenplåten av kolstål. Trots påfyllning med kalkvatten konstaterades långt senare korrosionsskador. Dessa hade dock sannolikt uppstått innan kalkvattnet påfördes, se kapitel 6. I Ringhals 3 och 4 är bottenplåten ingjuten, täcksikt 200 mm. Eventuellt läckagevatten från reaktorbasängen kan inte dräneras bort varför eventuella kaviteter på plåtens ovansida fylls med alkaliskt vatten, se figur 53. Någon korrosionsrisk föreligger inte.



Figur 53. Tänkbar läckageväg tätplåtens insida Ringhals 3 och 4 samt korrosion pga kvarvarande fukt i läckageindikeringskanaler.

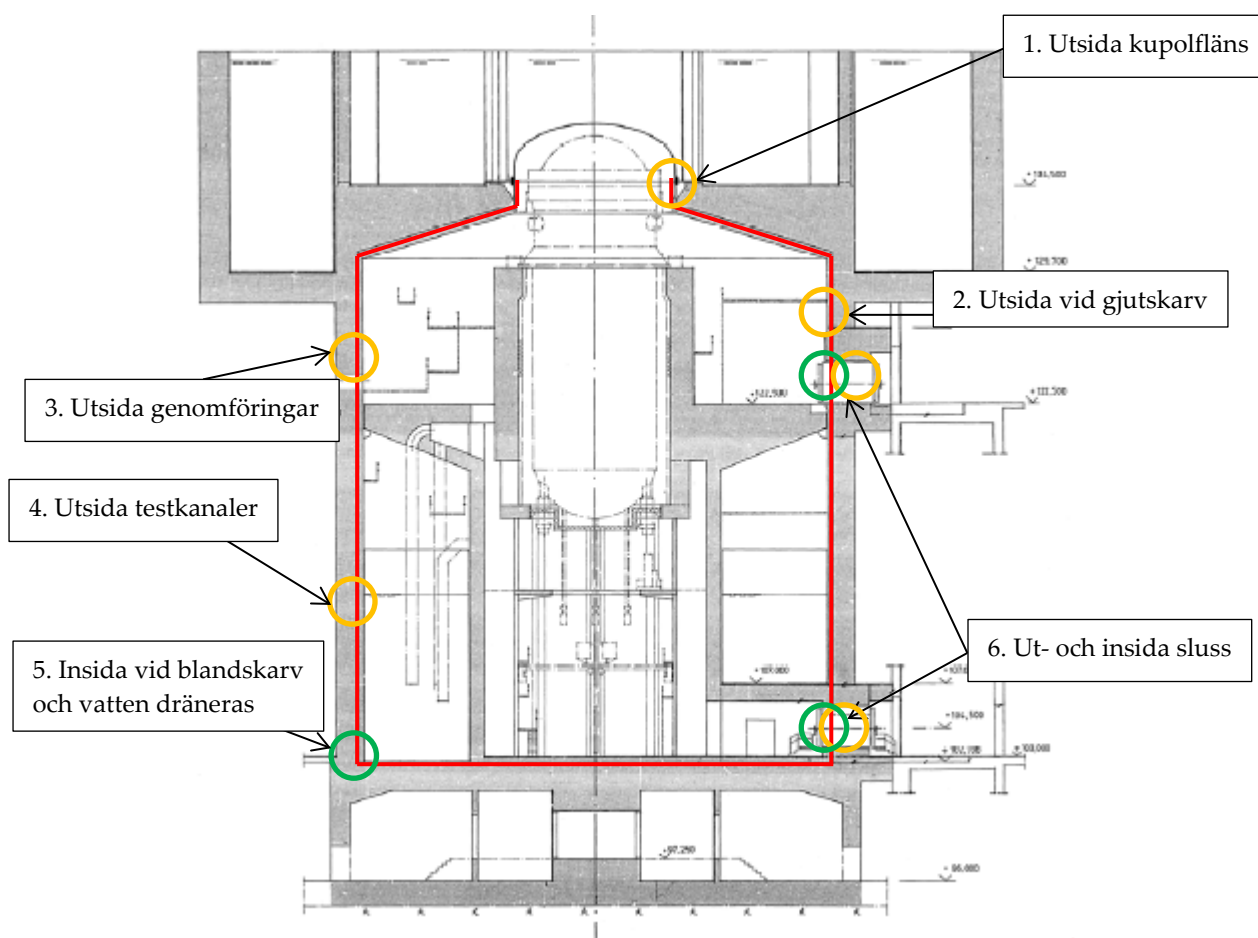
Om fukt står kvar i läckageindikeringskanaler (testkanaler) under bottenplåten så kan också angrepp uppstå inuti dessa.

7.2.4 Genomföringar

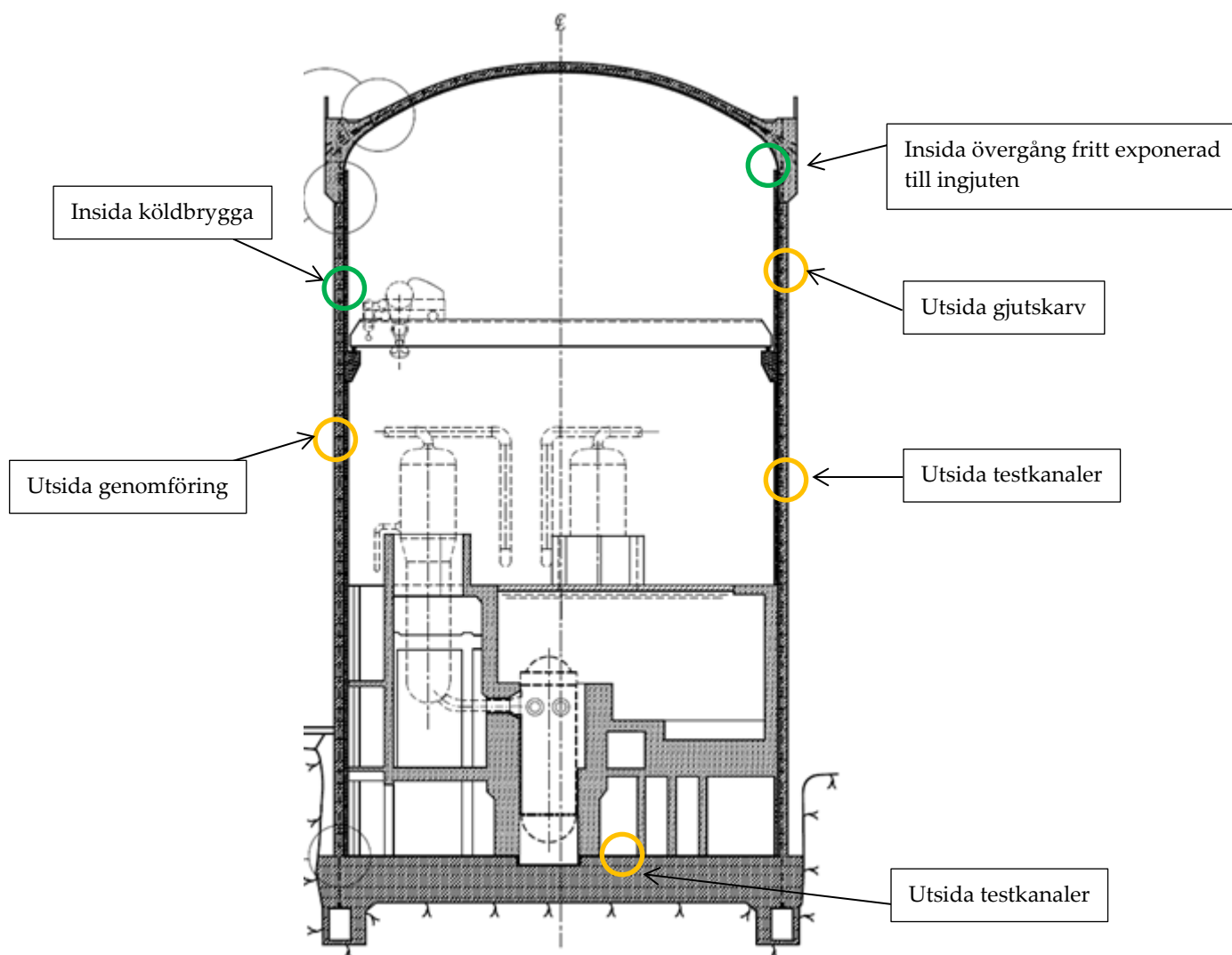
Om det förekommer genomföringar så utgör dessa svaga punkter om konstruktions- eller utförandebrister har förekommit.

7.3 SAMMANSTÄLLNING

För överskådliggigheten skull redovisas de i avsnitt 7.1 och 7.2 identifierade riskområdena grafiskt i nedanstående två figurer.



Figur 54. Punkter med risk för korrosion på tätplåten BWR.



Figur 55. Punkter med risk för korrosion på tätplåten PWR.

Ett antal av de punkter som pekats ut som eventuella riskzoner för korrosion i figur 55 och 56 tillhör inte kategorin "ingjuten tätplåt" men har ändå tagits med i redovisningen.

8 Diskussion

De grova dimensionerna i kombination med betongens höga kvalitet gör att man inte förväntar sig en nedbrytning av betongen som skulle kunna påverka tätplåtens beständighet.

Korrosion på tätplåten ingjuten i en "defektfri" betong kan ske som en följd av betongens karbonatisering och/eller inträngning av klorider. Karbonatisering är en långsam process och med tanke på väggarnas tjocklek så kommer inte en karbonatiseringsfront att nå tätplåten under reaktorernas livslängd.

Allt processvatten är avjoniserat varför exponeringen för kloridjoner är mycket liten. PWR reaktorernas utsidor kan utsättas för salthaltiga aerosoler men risken för att kloriddiffusion genom de tjocka ytterväggarna skulle skapa kritiskt höga kloridhalter bedöms som försumbar. Under byggnadsskedet kan klorider ha ansamlats i gjutskarvar om långa uppehåll förekommit i gjutningsarbetet men utförd bedömning är att sannolikheten är låg.

Vi kan således konstatera att de vanliga korrosionsmekanismerna inte förväntas utgöra någon risk för tätplåten i en "defektfri betong". Alla former av korrosion avskrivs eftersom miljön är sådan att en aktivering av stålytan inte är möjlig.

Om det däremot förekommer avvikelser i konstruktionen som kan medföra att stålets passivitet bryts så är korrosion möjlig. Den avvikelse som bedöms som mest relevant för en ökad korrosionsrisk är förekomsten av kaviteter mellan plåt och betong. Miljön i kaviteten blir då avgörande för om plåten angrips eller inte. En kavitet kan ha olika dimension, ursprung och utformning, allt från stora spalter till mindre kaviteter. Uppkomna kaviteter i anslutning till tätplåten i reaktorinneslutningar kan ha förorsakats av t.ex. gjutdefekter, ingjutna objekt, specifika konstruktionsutformningar alternativt om delaminering uppstått mellan tätplåt och betong.

Vid låg relativ fuktighet i omgivande betong kommer dessa kaviteter att vara luftfyllda och exponerat stål endast vara utsatt för en försumbar atmosfärisk korrosion som inte riskerar att allvarligt skada plåten.

Det har emellertid visat sig att fukthalterna i betongen närmast tätplåten är höga och därmed är sannolikheten stor för att eventuella kaviteter innehåller vatten. Både risken för atmosfärisk korrosion och vattenlinjekorrosion måste beaktas. Uppstår en aktivering av stålytan kan även korrosionen förstärkas av galvanisk korrosion och/eller aktiv/passiv-celler om de yttre förutsättningar är sådana att dessa korrosionstyper kan verka.

De höga fuktnivåerna antas kvarstå från byggnationen. Det är då rimligt att anta att det överskottsvatten som bildades vid gjutningen fyllde upp befintliga kaviteter och att detta vatten fortfarande fyller ut kaviteterna. Omgivande betong har inte kunnat suga upp vattnet. Detta vatten har högt pH-värde och alla typer av korrosion kan avskrivas.

Om överskottsvatten inuti en kavitet sugas upp av omgivande betong kommer kaviteten att bli endast delvis vattenfylld. I luftdelen kommer en viss atmosfärisk

korrosion att ske. Den sker som ett jämnt angrepp och någon risk för att plåten ska perforeras föreligger inte. Den initiala korrosionshastigheten bedöms ligga på 1-8 $\mu\text{m}/\text{år}$ men avtar relativt fort pga den utarmning på syre som uppstår i luften inuti kaviteten. I vattenlinjen kan korrosion initieras om förutsättningarna är sådana att stålet lokalt förlorar sin passivitet. Detta kan tänkas ske om kondensvatten bildas på tätplåten ovanför vattnet. Detta neutrala vatten sänker pH-värdet i vattenlinjen. Under normala förhållanden motverkas denna lokala pH-sänkning av bulkens höga halt av hydroxid. Finns det dock någon heterogenitet, såsom ett främmande material, skulle en lokal aktivering i vattenlinjen kunna ske. I en liten sluten kavitet kommer dock angreppet att avstanna till följd av syrebrist. Syret har en dubbel effekt dels fungerar det som bränsle i korrosionsprocessen dels underlättas utfällning av fasta korrosionsprodukter, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, som verkar ytterligare försurande. Vid låg syrehalt bildas istället tvåvärt järn som löser sig i vattnet. I detta fall höjer korrosionsprocessen vattnets pH-värde och underlättar därmed en repassivering av stålytan.

Om en tom kavitet tillförs nytt vatten och detta transporterats genom betongen kommer dess pH-värde att vara högt (12-12,5) och korrosionsmiljön kan likställas med den som uppstår i en kavitet där omgivande betong suger upp en del av överskottsvattnet.

Om kaviteten varit luftfylld från början så är betongens ytskikt karbonatiserat. Kondensvatten som ansamlas i kavitetens nederdel eller vatten som tillförs kaviteten utan att transporteras genom betongen kommer efter en viss tids kontakt med det karbonatiserade ytskiktet att få ett pH-värde på ca 9,5. I en sluten kavitet med liten tillgång på syre så kommer stålet i kontakt med vatten att behålla sin passivitet men en lokal initiering i vattenlinjen pga nedrinnande kondensvatten underlättas av det lägre pH-värdet i bulken. Även i detta fall krävs dock en förhållandevis stor volym på kaviteten. I annat fall kommer korrosionsprocessen att avstanna pga syrebrist.

En hög relativ fuktighet i betongen är en förutsättning för att korrosion ska uppstå i en sluten kavitet. En mycket hög fuktighet är dock bättre än en något lägre eftersom det vid gjutningen bildade överskottsvattnet inte suges upp av kringliggande betong. Kaviteten förblir vattenfylld och korrosion kan inte initieras. I en delvis vattenfylld kavitet uppstår atmosfärisk korrosion. Denna ger ett jämnt angrepp som inte äventyrar tätplåtens funktion. Det paradoxala är att den atmosfäriska korrosionen förbrukar syret i kaviteten och bromsar därmed hastigheten hos ett eventuellt lokalt angrepp i vattenlinjen. Denna effekt är sannolikt av stor betydelse. Angreppshastigheten i det lokala angreppet måste vara mycket hög och detta kan bara åstadkommas om mediet utanför angreppet har hög konduktivitet. Ett exempel är ett poröst material, indränkt i överskottsvatten som avvattnats och därefter karbonatiserat.

Hitintills har vi diskuterat förhållandena i en sluten kavitet. Vi kan konstatera att ett lokalt angrepp i vattenlinjen kan bara uppstå om kaviteten endast är delvis vattenfylld. Vidare måste kaviteteten ha en stor volym för annars avstannar korrosionen innan något större angreppsdjup bildats. Slutligen krävs någon form av heterogenitet eller främmande material som skapar en miljö vid angreppet som

utmärks av hög konduktivitet och lågt pH. Om ett angrepp initieras kan dess propagering påskyndas av galvanisk korrosion eller aktiv/passiv-celler.

Existerar en luftfylld spricka in till kaviteten så ökar risken för korrosion. Den atmosfäriska korrosionen blir dock fortfarande låg, $< 8 \mu\text{m}/\text{år}$. Den omgivande luften kan transportera in både syre och koldioxid till kaviteten. Detta ökar risken för en lokal förurning i vattenlinjen och medför att den atmosfäriska korrosionen och vattenlinjekorrosionen kan fortgå parallellt.

Om ett läckagevatten med otillräckligt högt pH-värde får flöda genom kaviteten förvärras situationen ytterligare och korrosionsprocessen kan fortgå utan att kaviteten kommunicerar med omgivningen via en luftfylld kanal. Syret löst i vattnet räcker som oxidationsmedel. Om läckagevattnet inte dräneras bort vattenfylls kaviteten och med tiden blir vattnet tillräckligt alkaliskt för att korrosion inte kan uppstå.

De skador som inträffat fram till idag har skett under de ovan beskrivna förhållandena, nämligen:

- Stor sluten kavitet där angrepp uppstått i vattenlinjen.
- Kavitet som kommunicerar med en syresatt omgivning.
- Kavitet som tillåts genomflödas av ett neutralt processvatten.

Läckströmskorrosion har bedömts som mindre sannolikt. För att så ska ske krävs någon form av jordfel och detta förutses upptäckas i annan kontroll.

Av de identifierade riskzonerna ligger de flesta på tätplåtens utsida för BWR reaktorerna. Detta är en konsekvens av risken för vattenläckage från bränslebassängerna, placerade ovanför inneslutningen, i kombination med att utsidan inte exponeras för en kvävgasfylld atmosfär såsom är fallet för insidan. För PWR reaktorerna är riskzonerna mer jämnt fördelade mellan in- och utsida.

Inneslutningarna täthetsprovas var 3:e år. Täthetsprovningen görs med luft och det är därför tänkbart att detta påskyndar eventuell pågående korrosion i kaviteter vid tätplåten. Vår bedömning är att täthetsprovningarna inte har någon stor inverkan på korrosionshastigheten i en kavitet, se bilaga 2. En markant påverkan uppstår dock om täthetsprovningen åstadkommer en sammanhängande spricka fram till kaviteten där en sådan tidigare inte existerade. Då ökar risken för att miljön i kaviteten ska bli sådan att korrosion kan initieras.

Den genomförda analysen bygger till stora delar på teoretiska överväganden. Således saknas atmosfäriska korrosionsdata från en miljö karakteriserad av låga halter luftföroreningar, hög relativ fuktighet och en temperatur på $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Experimentella data skulle relativt lätt kunna tas fram genom provning i klimatskåp.

Av intresse vore också att experimentellt studera alternativt modellera den dragkamp som förväntas uppstå i en vattenlinje mellan förurning orsakad av kondensvatten, luftens koldioxid och utfällning av korrosionsprodukter å ena sidan och alkaliseringen som sker genom diffusion av hydroxid från bulken å andra sidan. Även inverkan av ett poröst material borde studeras dvs hur

avvattning och karbonatisering av mineralull indränkt i överskottsvatten inverkar på initiering och propagering.

Genom att jämföra resultaten från den atmosfäriska korrosionsprovningen med de förknippade med vattenlinjekorrosionen skulle man kunna bilda sig en uppfattning om vilka storlekar på kaviteter som är kritiska.

Provtagning på plats skulle också kunna ge information om förekomsten av mikrosprickor och om betongen kan ha kontaminerats med klorider i gjutskarvar i samband med uppehåll i gjutningsarbetet.

9 Slutsatser

Den genomförda undersökningen medger följande slutsatser:

- För en tätplåt ingjuten i defektfri betong avskrivs alla typer av korrosion.
- För att korrosion ska kunna uppstå på tätplåten krävs en kavitet. I en sluten och vattenfylld kavitet uppstår ingen korrosion. De uppmätt höga fuktigheterna i betongen indikerar att detta är normaltillståndet.
- Om den slutna kaviteten är helt eller delvis luftfylld uppstår en försumbar atmosfärisk korrosion. Är kaviteten delvis vattenfylld kan angrepp initieras i vattenlinjen. För att angreppet ska bli allvarligt krävs en stor kavitet och någon heterogenitet eller främmande föremål som accelererar korrosionen annars avstannar korrosionen pga syrebrist innan allvarligt frätdjup uppstår.
- Om kaviteten har en direkt kontakt med, utanför betongkonstruktionen omgivande syresatt luft, så ökar den atmosfäriska korrosionen men inte till någon kritisk nivå. Vattenlinjekorrosionen riskerar dock att inte avstanna på motsvarande sätt som i en sluten kavitet.
- Om vattnet med otillräckligt högt pH-värde flödar genom kaviteten ökar korrosionsrisken ytterligare.
- Korrosionshastigheten på vattenberörda ytor som förlorat sin passivitet kan förstärkas av galvanisk korrosion och/eller korrosion orsakad av makroceller.
- Ett antal presumtiva riskzoner har identifierats och redovisas i rapporten.

10 Referenser

- [1] M. Oxfall, 2016. *Climatic conditions inside nuclear reactor containments - Evaluation of moisture condition in the concrete within reactor containments and interaction with the ambient compartments*, Doctoral Thesis. Lund University, Lund, Sweden
- [2] G. Barslivo, E. Österberg, och B. Aghili, *Utredning kring reaktorinneslutningar - konstruktion, skador samt kontroller och provning*. SKI Rapport 02:58. 2003.
- [3] M. Oxfall, 2017. *Simulerad uttorkning av betong i reaktorinneslutningar*. Energiforsk Rapport 2017:464.
- [4] T. Roth, J. Silfwerbrand och H. Sundquist. *Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk, en sammanställning över konstruktion och material*. SKI Rapport 02:59. 2002.
- [5] M. Ullberg, *Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar*. SKI rapport 2007:13. 2007.
- [6] B. Sederholm, M. Kalinowski och K. Eistrat. *Studie av vattenlinjekorrosion på tätplåt ingjuten i betong vid kondensationsbassäng*. Elforsk rapport 09:20. 2009.
- [7] L.-O. Nilsson and P. Johansson, *Changes in reactor containments - The drying and climatic conditions in the concrete walls*. Elforsk rapport 09:100. 2009, Lund University, Division of Building Materials: Lund, Sweden.
- [8] M. Buechler. *Field investigation of ac corrosion*. CEOCOR 2011. Paper 2-17. 24-26 May 2011.
- [9] B. Sandberg. *Skadefallsutredningar, inspektioner mm av tätplåtar i svenska kärnkraftverk 1999-2017*.
- [10] B. Wegemar. *Corrosion failure of a BWR embedded reactor containment liner*. J. Phys. IV France 136 (2006) 257-262.
- [11] G. Karlberg. *Mekanism för korrosion av plåt cylindern i PS inneslutningsväggar*. Utredning PB-9310-30.
- [12] K. Enger. *Omvärldserfarenheter avseende defekter i tätplåt*. Rapport Ringhals 2419236/2.0. 2017-12-08.
- [13] US Nuclear Regulatory Commission. *Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete structures – A Review of Pertinent Factors*. NUREG/CR-6927. 2006.
- [14] K. Nürnberger. *Korrosion und korrosionsschutz im Bauwesen*. 1995.
- [15] ISO 9223:2012 *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*.
- [16] ISO 11844-1:2008 *Corrosion of metals and alloys – Classification of low corrosivity of indoor atmospheres – Part 1: Determination and estimation of indoor corrosivity*.

- [17] Corvo F, Torrens, A D, Betancourt N, Pérez E and Gonzalez E. *Indoor atmospheric corrosion in Cuba. A report about indoor localized corrosion*, Corrosion Science 49 (2007) 418-435.
- [18] M. Hassanzadeh, M. Oxfall. *Genomgång av konstruktion av kokvattenreaktorinneslutningar i Norden*. Energiforsk rapport 2017:363.
- [19] M. Hassanzadeh, A. Hejl. *NOG Säkerhet och Miljö. BWR Reaktorinneslutningar i Sverige och Finland – Funktion och Konstruktion*. Vattenfall Research and Development AB. Rapport U 09:85. 2010-02-04.
- [20] A. Engelbrektson. *NOG Säkerhet och Miljö – Reaktorinneslutningar i Nordiska BWR – Funktion och Konstruktion – Delprojekt Erfarenheter från byggtiden*. Rapport NOG 09-012. 2009-06-02.
- [21] J. Gustavsson. *Ringhals 1 reaktorinneslutningen system 142. Utformning och utförande. Från byggtid till nutid*. Ringhals rapport 2031807/2.0. 2009-05-25.
- [22] M Toivanen. *NOG Ri Byggerfarenheter OL1 och OL2*. TVO rapport 129203. 2008-12-02.
- [23] L-E Berglund. *NOG – Reaktorinneslutningar. Erfarenheter från bygg- och driftstiden. Forsmark 1*. Forsmarks Kraftgrupp rapport FT-2008-3532. 2009-06-01.
- [24] L-E Berglund. *Forsmark 2. Erfarenheter från bygg- och driftstiden*. Forsmarks Kraftgrupp rapport FT-2008-3547. 2009-06-01.
- [25] H Roos. *Forsmark 3 Reaktorinneslutning. Erfarenheter från byggtiden och driftstiden*. Forsmarks Kraftgrupp rapport FT-2009-0441. 2009-06-01.
- [26] P Andersson et al. *NOG – Reaktorinneslutningar. Erfarenheter från bygg- och driftstiden. Oskarshamn 1*. Scanscot Technology rapport 08413/R01. 2008-10-23.
- [27] P Andersson et al. *NOG – Reaktorinneslutningar. Erfarenheter från bygg- och driftstiden. Oskarshamn 2*. Scanscot Technology rapport 08413/R02. 2008-12-18.
- [28] P Andersson et al. *NOG – Reaktorinneslutningar. Erfarenheter från bygg- och driftstiden. Oskarshamn 3*. Scanscot Technology rapport 08413/R01. 2009-01-23.
- [29] J Spåls. Personligt meddelande rörande information erhållen från Sydkorea.

11 Bilagor

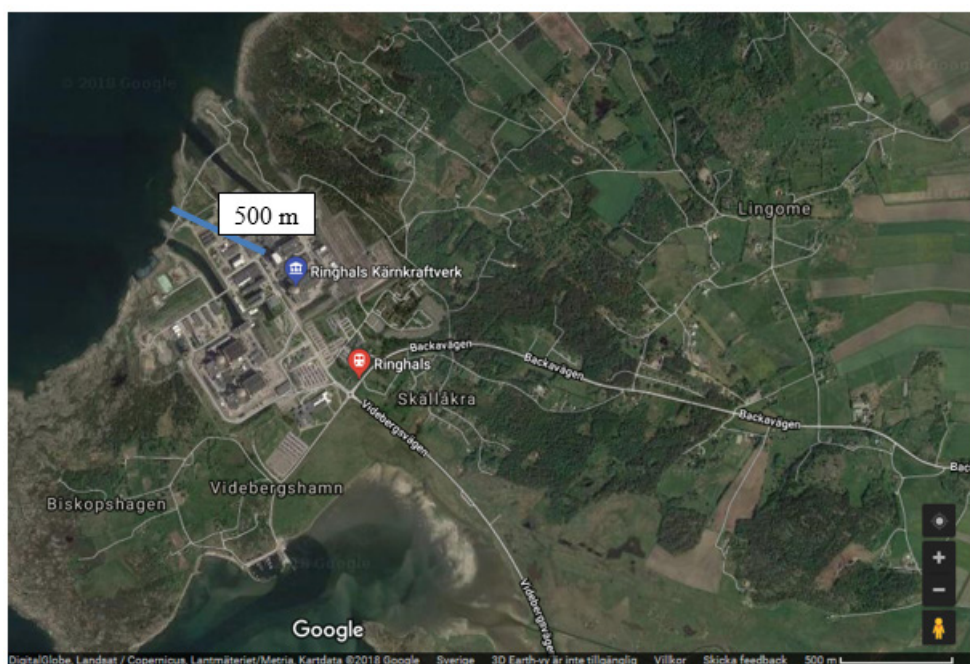
11.1 BILAGA 1 – RISK FÖR ATT KLORIDER TILLFÖRTS UNDER BYGGSKEDET

Det befaras att betongytor i t.ex. gjutskarvar har blivit kontaminerade med klorider som förts in som aerosoler från närliggande hav. Störst bör risken ha varit vid Ringhals och speciellt för Ringhals 2 där byggarbetsplatsen inte var väderskyddad. Bottenplåten installerades i maj/juni 1971. Arbetet med cylinderväggen var då redan påbörjad och bottenplåtskonstruktionen var helt öppen mot den yttre omgivningen. I juni 1971 placerades Leca-blocken ut på de mer centrala delarna av bottenplåten och den första gjutningen av golvbjälklaget utfördes (gjutetapp 1). Sen dröjde det till februari 1972 innan resterande ytor av bottenplåten täcktes av Leca-block och gjutetapp 2 genomfördes. De yttre delarna av plåten tilläts således vara fritt exponerade för väder och vind i ca 8 månader. Eftersom stålplåten inte absorberar några klorider ansamlas de på ytan förutsatt att regn inte tvättar bort dem. Utrymmet under bjälklaget fylldes slutligen med 20 m³ kalkvatten.

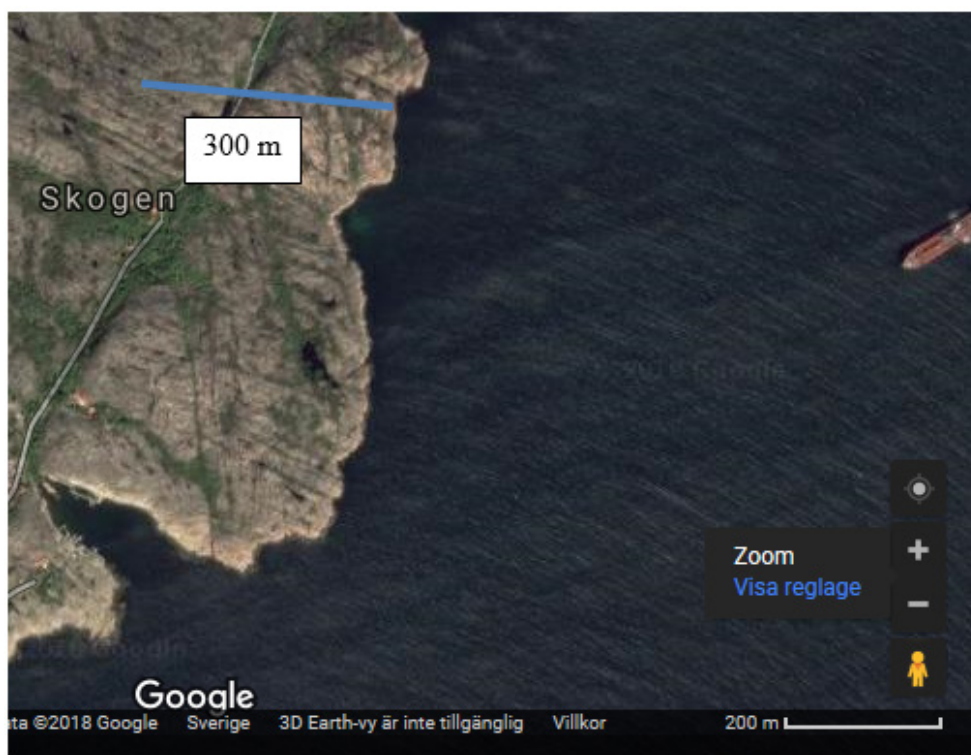
2016 genomfördes en omfattande inspektion/reparation av bottenplåten efter det att man konstaterat korrosionsangrepp. Kloridhalten uppmättes i kalkvattnet till 20-40 ppm. Eftersom vattnet tillretts med avjoniserat vatten ligger det nära till hands att anta att kloriderna tillfördes stålytan under de 8 månaderna som plåten var oskyddad.

Av bottenplåtens totala yta utgör delen med Leca-block ca 675 m² (övriga ytor direktgjutna mot plåt). Det har inte gått att fastställa var gränsen går mellan de båda gjutetapperna men låt oss i denna beräkning anta att gjutetapp 2 hade en yta på 300 m².

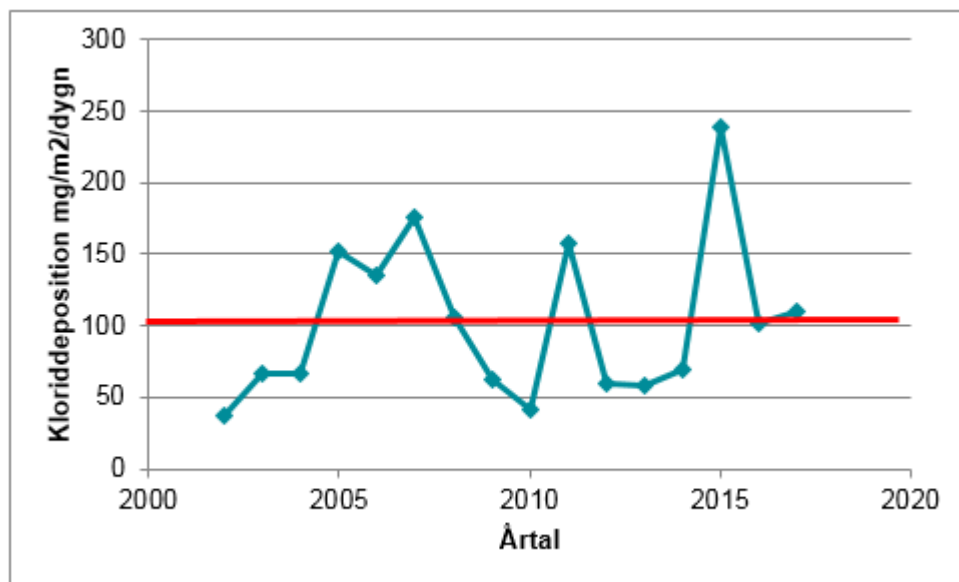
En halt på 40 ppm (mg/l) ger en total kloridmängd av $40 \times 20.000 = 800.000$ mg i 20 m³. Beräknat som kloriddeposition ger detta $800.000 \text{ mg} / 300 \text{ m}^2 / 0,66 \text{ år} = 4000$ mg/m²/år eller 11 mg/m²/dygn. Detta är en faktor 10 lägre än förväntat. Ringhals 2 ligger lite mer än 500 m från stranden, se figur nedan.



Institutet har 3 provningsstationer på Bohus Malmön där vi bl.a. mäter klordepositionen på månadsbasis. Den station som har med Ringhals likartade miljöbetingelser är stationen Kattesand som ligger ca 300 m från havet, se figur nedan.



På Kattesand ligger kloriddepositionen på ca 100 mg/m²/dygn räknat som medelvärde över ett helt år, se figur nedan.



Under perioden september till januari är kloriddepositionen som störst, se figur ovan. Detta förstärker bilden av att det framräknade värdet på 11 mg/m²/dygn är ett lågt värde. Det kan finnas många orsaker till detta. Depositionen var kanske låg under byggnationen, kloriderna kan ha tvättats bort av regn, cylinderväggen kan ha verkat skyddande osv.

Låt oss istället utgå från att vi hade en kloriddeposition under byggnationen motsvarande den på Kattesand. Anta att vi har ett uppehåll mellan två gjutetapper i cylindriska väggen. Upphållet sker under två månader i december-januari då kloriddepositionen är som störst, ca 250 mg/m²/dygn.

Totalt deponeras $60 \times 250 = 15.000$ mg/m². Låt oss vidare anta att all klorid adsorberas och sen löser sig i de närmsta 10 mm av nästa gjutning. Om kloridjonerna fördelar sig jämnt i betongen motsvarar detta en kloridkoncentration i betongen på $15 \cdot 10^{-4}$ g/cm³.

En kloridhalt på 0,4 % av cementvikten anges ofta som ett kritiskt tröskelvärde. Detta motsvarar ca 0,08 % av betongvikten. 1 cm³ betong väger ca 2,4 g. 0,08 % av 2,4 g är $19,2 \cdot 10^{-4}$ g.

Det är således teoretiskt möjligt att uppnå en kritisk kloridhalt om man antar att ett 2 månaders långt uppehåll i arbetet inträffade i dec-jan och att inga klorider tvättades bort. Sannolikheten bedöms dock som liten.

11.2 BILAGA 2 - KORROSIONSMILJÖN I EN KAVITET, PÅVERKAN AV PROVTRYCKNING

Den korrosionshastighet som uppstår om stålet aktiveras i anslutning till en heterogenitet vid vattenlinjen i en delvis vattenfylld kavitet bestäms primärt av

halten löst syre i vattnet. Denna halt beror i sin tur på halten syre i luften i den luftfyllda delen av kaviteten.

Provtryckningar görs med luft och sker 3 gånger per 10 år, två gånger med 2,9 bar och en gång med 4,8 bar (varierar lite från verk till verk). Vid dessa provtryckningar kan syrehalten i kaviteten öka.

Följande faktorer måste beaktas.

- Är kaviteten fylld med vatten, luft eller delvis vattenfylld.
- Finns det någon spricka eller spalt som gör att kaviteten kommunicerar med inneslutningens atmosfär.
- Är inneslutningen normalt fylld med luft (PWR) eller kvävgas (BWR).

Intransporten av syre till en sluten kavitet i sprickfri betong med hög relativ fuktighet är försumbar vid en provtryckning som pågår under ett dygn. Om provtryckningen medför att mikrosprickor utvecklas till genomgående sprickor kan detta medföra en förhöjd korrosionsrisk i en kavitet som därmed får kontakt med inneslutningens atmosfär.

Kommunicerar kaviteten med inneslutningen via en spricka blir påverkan på korrosionshastigheten mätbar.

I en helt luftfylld kavitet så har vi bedömt att vi har en atmosfärisk korrosionshastighet på 1-8 $\mu\text{m}/\text{år}$ under förutsättning att stålet har kontakt med vanlig luftatmosfär via en spricka. Detta är fallet i en PWR inneslutning. Ökar vi partialtrycket för syre med en faktor 3 under provtryckningen så ökar mängden oxidationsmedel (syre) som kan lösa sig i fuktfilmen på stålytan och därmed fungera som bränsle i korrosionsprocessen med en faktor 3. Det är därför rimligt att korrosionshastigheten är en faktor 3 högre under provtryckningsdygnet men att korrosionshastigheten därefter återgår till den normala. Då trycket sänks sjunker syrets löslighet i fuktfilmen till den normala dvs ca 8 mg/l. En tredubblad korrosionshastighet under ett dygn var tredje år motsvarar 0,3 % ökning totalt sett.

I en BWR är inneslutningen kvävgasfylld under drift. Den atmosfäriska korrosionshastigheten i en kavitet som kommunicerar med inneslutningen blir försumbar. Kaviteten tillförs endast syre i samband med revision. Detta innebär att vi har en normal korrosionshastighet (1-8 $\mu\text{m}/\text{år}$) under ca 1 månad per år. Under provtryckningen ökar korrosionshastigheten tillfälligt med en faktor 3. Efter avslutad provtryckning sjunker partialtrycket för syrgas inuti kaviteten till det som gäller under normal revision. Påverkan kan anses vara utan betydelse.

I en helt vattenfylld kavitet, som kommunicerar med inneslutningen via en spricka, så stiger lösligheten för syre under själva provtryckningen men syret avgår från vattnet så fort trycket sänks. Om pH-värdet i vattnet är högt är stålet passivt och korrosionshastigheten påverkas inte av att syrehalten temporärt förhöjs.

I en delvis vattenfylld kavitet där stålet lokalt har förlorat sin passivitet i t.ex. vattenlinjen kan effekten bli en annan. I PWR blir påverkan fortsatt marginell. Här står redan vattnet i kontakt med en syresatt atmosfär under normal drift. Den enda effekt av provtryckningen blir att mängden syre löst i kavitetens vatten temporärt

höjs under själva provtryckningen. Efter provtryckningen återgår syrehalten till det normala.

I en BWR blir påverkan större. Under drift har korrosionshastigheten i ett eventuellt aktivt område successivt sjunkit som en konsekvens av att syreutarmning. I samband med revision tillförs luften i kaviteten åter syre och vattnet mäts med syrgas (ca 8 mg/l). Vid provtryckning ökar tillfälligt halten löst syrgas med en faktor 3 men både denna halt och lufttrycket blir normalt efter avslutat prov. Det är således lufttillförseln vid revisionen snarare än provtryckningen som orsakar en ökad korrosionshastighet.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att provtryckningen inte bedöms ha någon stor inverkan på korrosionshastigheten i en kavitet. En markant påverkan uppstår dock om provtryckningen åstadkommer en sammanhängande spricka fram till kaviteten där en sådan tidigare inte existerade. Då ökar risken för att miljön i kaviteten ska bli sådan att korrosion kan initieras.

GENOMGÅNG AV POTENTIELLA KORROSIONSRISKER FÖR INGJUTEN TÄTPLÅT I REAKTORINNESLUTNINGAR

Här har samtliga potentiella korrosionsprocesser för tätplåt utvärderats och riskzoner identifierats för reaktorinneslutningarnas tätplåtar i de nordiska kärnkraftverken.

Reaktorinneslutningens tätplåt är den primära barriären för att förhindra, eller minimera, ett läckage av radioaktiva partiklar under drift eller i vid en avvikande händelse. Det är därför viktigt att kunna bedöma plåtens status, och säkerställa att det inte finns risk för korrosion i någon del av plåten.

Genomgången visar att det krävs en kavitet i betongen i anslutning till tätplåten, och att den måste kommunicera med omgivningen utanför betongkonstruktionen. I en delvis vattenfylld kavitet uppstår under de här omständigheterna en försumbar atmosfärisk korrosion. På vattenberörda ytor i kaviteten kan korrosion initieras om vattnet transporterats in via en kanal och inte genom betongen.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk