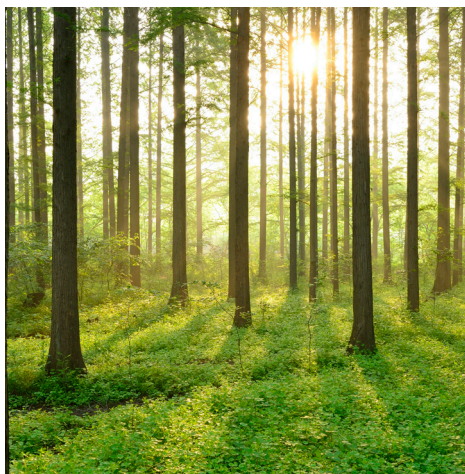


# SYRETRANSPORT GENOM REAKTORINNESLUTNINGAR OCH KORROSION AV INGJUTNA TÄTPLÅTAR

RAPPORT 2021:786





# Syretransport genom reaktorinneslutningar och korrosion av ingjutna tätplåtar

RICHARD MALM  
MAGNUS ÅHS  
MANOUCHEHR HASSANZADEH



## Förord

**Risken för att korrosion ska uppstå i den ingjutna tätplåten i nordiska reaktorinneslutningar har studerats i flera olika projekt i Betongtekniskt program kärnkraft. I detta projekt undersöks hur risken för korrosion påverkas av att nytt syre trycks in i inneslutningskonstruktionen i samband med trycktest.**

Projektet har utförts av seniorforskarna Magnus Åhs från LTH, Richard Malm från KTH/Sweco samt Manouchehr Hassanzadeh från Sweco. Studien 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

Vid svenska reaktorinneslutningar är tätplåten ingjuten för att på så sätt skyddas mot potentiella skador. För att kontrollera tätplåtens tätande funktion så genomförs kontinuerligt återkommande trycktester (täthetsprovningar). Vid dessa trycktester ökas inre trycket i reaktorinneslutningen enligt ett föreskrivet protokoll och bibehålls under en viss given period för att slutligen sänkas. Under trycktestet genomförs mätningar för att kontrollera att läckage i inneslutningen inte uppstår.

Frågeställningen som initierade detta projekt var att utreda vilken mängd syre som kan transporteras fram till tätplåten i samband med trycktester. Tillgång till syre är en viktig förutsättning för att en eventuell korrosionsprocess ska kunna uppstå.

I detta projekt har därför olika elementarfall analyserats i syfte att utreda mängden syre som transporteras till tätplåten i samband med trycktester. Elementarfallen motsvarar olika typer av potentiella skador i reaktorinneslutningens inre betongskikt. Dessa skador har antagits vara finfördelade sprickor i täcksikt, genomgående spricka respektive en bred ytspricka som avtar med sprickdjup. I analyserna som inkluderar uttorkningsprocessen så har även inverkan av åldring av reaktorinneslutningen beaktats.

Resultaten från föreliggande projekt visar att för osprucken, relativt nybyggd betong, sker gastransporten mycket långsamt vilket till stor del beror på att betongens porvolym till stor del är fylld med vatten. Allt eftersom betongen torkar ut så minskar porvattenvolymen och därmed ökar gastransporten. Inverkan från potentiella skador påverkar gastransporten framförallt när betongen är relativt ny men i takt med att anläggningen åldras så blir den relativa skillnaden mellan transport i intakt betong och via sprickor mindre.

Den långsamma gastransporten i nybyggd, intakt, inneslutning innebär att en liten mängd syre kommer att transporteras till tätplåten vid trycktester, dock så kommer en förhöjd nivå bibehållas under lång period (flera månader). Vid ökad gastransport i en äldre anläggning med eller utan skador, ökar syremängden vid tätplåten men denna förhöjda nivå utjämnas snabbt (enstaka dagar) efter trycktestet är avslutat.

Analysen visar också att om det finns förutsättningar för korrosion så kommer endast en liten mängd syre att behövas för att driva korrosionsprocessen. Det är därför viktigt att fortsatt forskning studerar hur korrosionsprocessen kan ske i dessa fall då syremängden förväntas finnas tillgänglig under relativt kortvariga förlopp.

## Summary

In Swedish nuclear reactor containment buildings, the steel liner is embedded in concrete to protect it from potential damage. To verify the function of the steel liner, leakage tests are continuously performed on the containment buildings. In these tests, the internal pressure is increased according to a prescribed level and maintained for a certain period and finally reduced again. During these tests, measurements are performed to monitor the leakage of the containment building does not occur.

This project was initiated by a question regarding the amount of oxygen that can be transported through the concrete to the steel liner during these leakage tests. Oxygen is an important precondition for corrosion of the steel liner to occur.

In this project, different elementary cases have been analysed with the purpose to determine the amount of oxygen that can be transported to the steel liner for different types of damage in the concrete. The types of damage that have been considered are superficial cracking of the concrete cover, a through crack from the surface to the liner, and a wide crack at the surface that is reduced in width as a function of the depth. The analyses have also considered the influence of aging of the concrete due to drying.

The results from this project show that for uncracked, relatively new concrete, the transport of gas is very slow primarily as a result of the pore volume being filled with water. As the concrete is subjected to drying shrinkage, the amount of water in the pores is reduced and hence, the gas transport is increased through the concrete. The influence from a potential damage primarily influences the transport process in newly built containment buildings, while the relative difference between undamaged and damaged concrete is smaller for older structures.

The slow transport of gas in newly built and undamaged concrete results in low concentration of oxygen adjacent to the steel liner. However, in this case, the increased oxygen concentration will be maintained for a long period (several months). For old containment buildings, with or without damage, the increased gas transport results in a significantly increased concentration of oxygen near the liner. This high concentration is however only maintained for a short period, typically in the range of days after the leakage test has been performed.

The analyses also show that if the conditions for corrosion are satisfied, only small amount of oxygen is required to fuel the corrosion process. It is therefore important that further research is conducted to study corrosion processes in these cases to determine the risk of corrosion damage where the amount of oxygen is present for only a short duration.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>8</b>
1.1	Inledning	8
1.2	Reaktorinneslutningar	9
1.2.1	Omgivningsklimat	11
1.2.2	Observerad korrosion vid tätplåten	13
1.3	Gastransport genom reaktorinneslutningar	13
1.4	Syfte och Mål	15
1.5	Metodik	15
1.6	Avgränsningar	15
<b>2</b>	<b>Transportprocesser i betong</b>	<b>16</b>
2.1	Värmeledning	16
2.2	Fukttransport	16
2.2.1	Fukttransport genom gasövertryck	17
2.3	Gastransport	18
2.3.1	Gastransport i porösa material	19
2.3.2	Syrekoncentration	21
<b>3</b>	<b>Korrosion och dess inverkan på armerade betongkonstruktioner</b>	<b>22</b>
3.1	Beskrivning av korrosionsprocessen	22
3.1.1	Initiering av korrosion	24
3.1.2	Korrosionshastighet	24
3.2	Inverkan på materialegenskaper	25
3.2.1	Förändringen av stålets egenskaper	26
3.2.2	Förändring av betongens egenskaper	26
<b>4</b>	<b>Fallstudie</b>	<b>27</b>
4.1	Geometri	27
4.2	Elementindelning	28
4.3	Materialegenskaper	28
4.3.1	Betong28	
4.3.2	Luft 32	
4.4	Randvillkor (Temp, Fukt, Tryck)	33
<b>5</b>	<b>Resultat från elementarfall</b>	<b>36</b>
5.1	Fuktfördelning	36
5.2	Tryckfördelning	37
5.3	Tryck vid tätplåt	39
5.4	Syrekoncentration vid tätplåt	41
<b>6</b>	<b>Åtgång av syre vid korrosionsprocess</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Slutsatser och fortsatt forskning</b>	<b>48</b>
7.1	Fortsatt forskning	49
<b>8</b>	<b>Referenser</b>	<b>50</b>



## Sökord

Betong, reaktorinneslutning, trycktester, täthet, gastransport

# 1 Bakgrund

**I föreliggande avsnitt ges en kortfattad introduktion till svenska reaktorinneslutningar och hur de är utformade.**

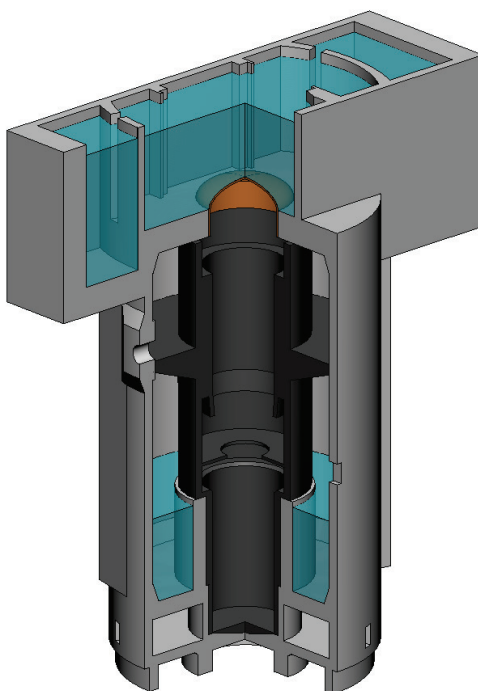
## 1.1 INLEDNING

Sverige har genom tiderna haft totalt 12 större kärnkraftsreaktorer i kommersiell drift och utöver detta även två forskningsanläggningar R1 vid KTH, R2 vid Studsvik samt R3 vid Ågestaverket som producerade både el och fjärrvärme. Idag är endast reaktorerna vid Forsmark (I tom III), Ringhals (I, III och IV) samt Oskarshamn (III) i drift, varav Ringhals I kommer att stängas av vid årsskiftet 2020/2021. Samtliga av dessa anläggningar driftsattes under 70- och 80-talet.

Som en kontinuerlig del i säkerhetsarbetet med dessa reaktorer så genomförs återkommande trycktester (täthetsprovning) på inneslutningarna. Dessa trycktester utgör ett viktigt täthetsprov i syfte att säkerställa att inga läckage sker från reaktorinneslutningen. Trycktestet kan även användas att verifiera konstruktionens respons vid en föreskriven last, för att säkerställa att inga direkta förändringar av konstruktionens mekaniska egenskaper har skett. I föreliggande rapport används begreppet trycktest för att beskriva dessa typer av återkommande kontroller på reaktorinneslutningarna.

I Figur 1-1 illustreras en principiell uppbyggnad av en reaktorinneslutning, i detta fall en kokvattenreaktor, se avsnitt 1.2 för mer information.

Reaktorinneslutningarna består av spännarmerad och armerad betong, där det även finns en ingjuten tätplåt.



Figur 1-1 Illustration av en reaktorinneslutning, från Hassanzadeh m.fl (202x).

I takt med att anläggningarna åldras och utsätts för klimatpåverkan så kan olika typer av nedbrytningsprocesser uppstå i betong och/eller stålmaterial. I rapporten av Roth m.fl. (2002) listas följande problem och frågeställningar som kan vara viktiga att bevaka för dessa betonginneslutningar;

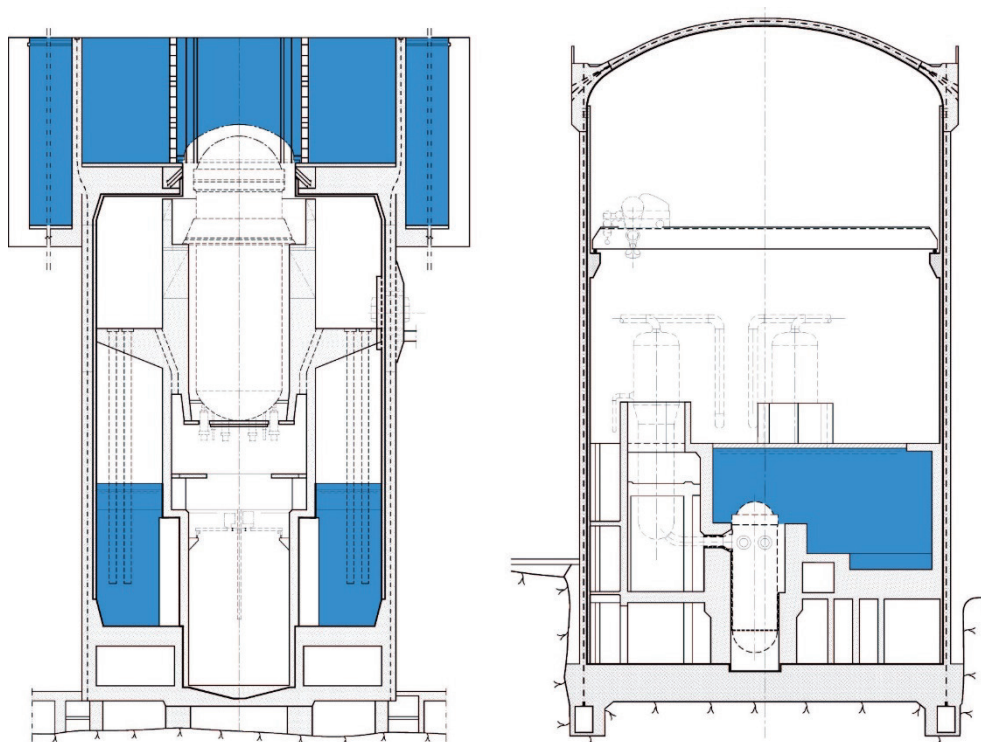
- För de kärnkraftverk där reaktorinneslutningen ej är inbyggd (dvs tryckvattenreaktorer, se avsnitt 1.2) finns risk för kloridinitierad armeringskorrosion på grund av luftburna föroreningar och havssalt.
- För de kärnkraftverk, där frågan genom lämpligt val av cementkvalitet och ballast ej utesluts, finns risk för alkali-ballastreaktioner.
- Vid ofullständig kringgjutning eller injektering av ingjutningsgods vid genomföringar och spännarmeringsenheter kan korrosion uppstå.
- Roth m.fl. (2002) skrev även att detta samtidigt innebär att
  - × karboniseringsproblem sannolikt på grund av valda goda betongkvaliteter är mindre viktiga att bevaka samt att
  - × icke-injekterade spännarmeringsenheter får tack vare pågående systematiska avfuktungs-, mättnings- och provningsförfarande tillräcklig säkerhet, även sett på lång sikt.

Inom ramen för föreliggande projekt kommer fokus vara på risken för korrosion. I detta fall studeras hur eventuella skador så som sprickor påverkar gastransporten genom inneslutningen och hur syre kan transporteras från inneslutningen till tätplåten vid dessa återkommande trycktester.

## 1.2 REAKTORINNESLUTNINGAR

I Sverige finns kärnkraftverk som baseras på en av följande reaktortekniker; *Kokvattenreaktor* (Boiling Water Reactor, BWR) respektive *Tryckvattenreaktor* (Pressurized Water Reactor, PWR), se Figur 1-2. Skillnaden mellan dessa är hur processvattnet som cirkulerar kring reaktorhärden (och driver turbinerna) förångas eller ej. På grund av de olika reaktorteknikerna så ser även utformningen av reaktorinneslutningar annorlunda ut, och de utsätts för olika omgivande klimat.

En typisk reaktorinneslutning (både BWR och PWR) består av en tjock bottenplatta av betong som är grundlagd på berg. Ovanpå detta finns inneslutningens cylinderväggar som normalt består av ca 1 m tjock betong som är kraftigt armerad och spännarmerad både vertikalt och horisontellt. Ovankant av reaktorinneslutningen varierar beroende på reaktorteknik, där BWR reaktorer har en tjock betongplatta som utgör botten i den bassäng som är placerad ovanför reaktorinneslutningen. I PWR reaktorer utgörs toppen av reaktorbyggnaden av en kupol som är kraftigt armerad och spännarmerad.



Figur 1-2 Illustration av typiska svenska reaktorinneslutningar; vänster – BWR reaktor Forsmark I, höger – PWR reaktor Ringhals III.

Invändigt av reaktorinneslutningen, är en tätplåt monterad för att förhindra gastransport genom reaktorinneslutningen. I t.ex. Forsmarksverken I och II består tätplåten i cylinderväggarna av rostfritt stål, Roth m.fl. (2002). I övriga inneslutningar så består tätplåten av kolstål, se Tabell 1-1.

Tabell 1-1 Sammanställning av tätplåt i cylinderväggarna på svenska reaktorinneslutningar, sammanställt från Roth et al. (2002).

	Reaktortyp	Stålmateriäl	Tjocklek
Formark I	BWR	SS2343 (rostfritt)	6 mm
Forsmark II	BWR	SS2343 (rostfritt)	6 mm
Forsmark III	BWR	SS2103-01	8 mm
Ringhals I	BWR	SS2102	5 mm
Ringhals II	PWR	SS2102	7 mm
Ringhals III	PWR	SS2102	10 mm (nedre 18 m) resp 8 mm
Ringhals IV	PWR	SS2102	10 mm. <sup>a</sup>
Barsebäck I	BWR	SS141312	6 mm
Barsebäck II	BWR	SS141312	6 mm
Oskarshamn I	BWR	SS141312	4 mm
Oskarshamn II	BWR	SS141312	5 mm
Oskarshamn III	BWR	SS1432 <sup>b</sup>	10 mm <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Enligt ritningarna 1-923103, 2-923178, 2-923180 & 2-923181, Ringhals kraftstation, Aggregat 4.

<sup>b</sup> Enligt ritning 3A-22-021

Svenska reaktorinneslutningar har en ingjuten tätplåt, där insidan täcks av betong som benämns *missilskydd*. Missilskyddet är typiskt 250 - 330 mm tjockt. Dessutom är cylinderväggen i den nedre delen av BWR inneslutningar även täckt med en tunn, rostfri plåt i syfte att utgöra urlakningsskydd.

Att tätplåten är ingjuten gör att den är skyddad för skador vid t.ex. ett rörbrott i ång- och matarvattenledningar. Ingjuten tätplåt är också gynnsamt i den aspekten att korrosionshastigheten begränsas kraftigt då tätplåten är installerad i en alkalisk miljö från betongen som normalt har ett pH över 12,5. En nackdel med ingjuten tätplåt är dock att den inte går att inspektera lika enkelt, utan att det krävs oförstörande provningsmetoder för att bedöma tätplåtens status.

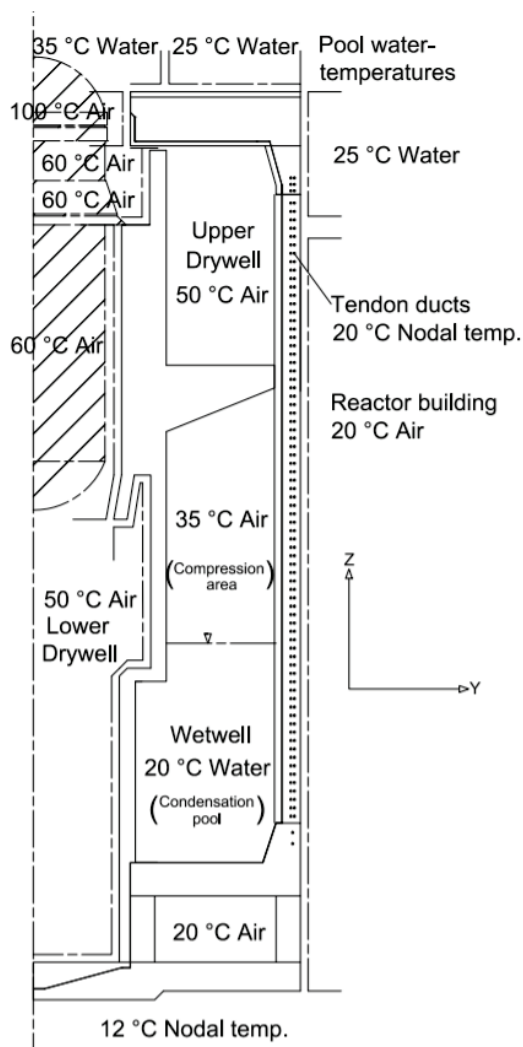
Trycktester genomförs enligt US NRC (1995), 10CFR 50 (2020) och Regulatory Guide 1.163 och syftar till att kontrollera tätheten hos inneslutningen, genomföringar och ventiler genom läckagemätning. De återkommande trycktesterna (som genomförs i syfte att kontrollera reaktorinneslutningens täthet) genomförs normalt vid trycknivåer som varierar mellan 200 kPa tom 400 kPa, men beror på reaktortyp och eventuella förändringar så som t.ex. effekthöjning, se Roth m.fl. (2002). Trycktester på inneslutningar genomförs normalt var tredje år (3 tester på en 10 års period). Trycktester kan även användas för att bedöma status hos ingjutna spännkablar i enlighet med Regulatory Guide 1.90. Detta baseras på att studera inneslutningens deformation för att indirekt kunna bedöma spännkablaras spännkraft.

### 1.2.1 Omgivningsklimat

En viktig skillnad mellan BWR och PWR reaktorer är att BWR reaktorer är inneslutna av en reaktorbyggnad, se Figur 1-3. Därmed utsätts inte inneslutningen till en BWR reaktor för utomhusklimat. Exempel på temperaturer i en BWR inneslutning visas i Figur 1-4. Mätningar genomförda av Oxfall (2013) och Oxfall (2016) visade att temperaturen var ca 50 °C i övre delen av inneslutningen (dry-well) och ca 20 °C i nedre delen av inneslutningen (ovan wet-well). Mätningarna visade också att luftfuktigheten följde säsongsvariationen utomhus. Detta resulterar i låg relativa fuktighet i övre delen av inneslutningen (varmare delarna) motsvarande ca RF 30 % och i de lägre delarna av inneslutningen (kallare) är RF ca 60 %.



Figur 1-3 Foto på Formark II, foto Tommy Halvarsson, [https://sv.wikipedia.org/wiki/Forsmarks\\_k%C3%A4rnkraftverk#/media/Fil:Forsmark.jpg](https://sv.wikipedia.org/wiki/Forsmarks_k%C3%A4rnkraftverk#/media/Fil:Forsmark.jpg)



Figur 1-4 Illustration av typiska temperaturer i en reaktorinneslutning, från Könönen (2012).

Vid en PWR reaktor utsätts däremot själva inneslutningen för utomhusklimatet. Detta innebär att det uppstår en signifikant mycket större temperaturgradient över t.ex. cylinderväggen vid en PWR inneslutning jämfört med en BWR. Enligt Oxfall (2016) varierade temperaturen invändigt i en PWR inneslutning typiskt mellan 20 och 30 °C längre ner i inneslutningen och upp till ca 40 °C högre upp. Utvändigt på cylinderväggen så varierar temperaturen enligt utomhustemperaturen.

### 1.2.2 Observerad korrosion vid tätplåten

Det bör noteras att författarna inte har några uppgifter om fall där korrosion av tätplåt har ägt rum på den sida av tätplåten som är vänd mot insidan av reaktorinneslutningen. Det finns dock flera fall med korrosion på den sida av tätplåt som är vänd mot utsidan av reaktorinneslutningen. Korrosionsorsakerna i de inträffade fallen har, dock, varit på grund av kaviteter och andra byggtekniska defekter som inte skulle ha förekommit. Exempelvis så upptäcktes korrosionsskada vid Barsebäck 2 år 1993 i samband med en täthetsprovning. I detta fall berodde korrosionen på grund av vattenfylld kavitet i betongen direkt i anslutning till tätplåten vid en genomföring. En annan orsak till korrosion är ingjutna organiska material direkt i anslutning till tätplåten. Detta upptäcktes t.ex. vid Brunswick 2 år 1999 då korrosion uppstått p.g.a. ingjuten arbetshandske i anslutning till tätplåten och samma år vid North Anna 2 ett hål på grund av ingjutet trämaterial. (Dunn, m.fl. 2011)

## 1.3 GASTRANSPORT GENOM REAKTORINNESLUTNINGAR

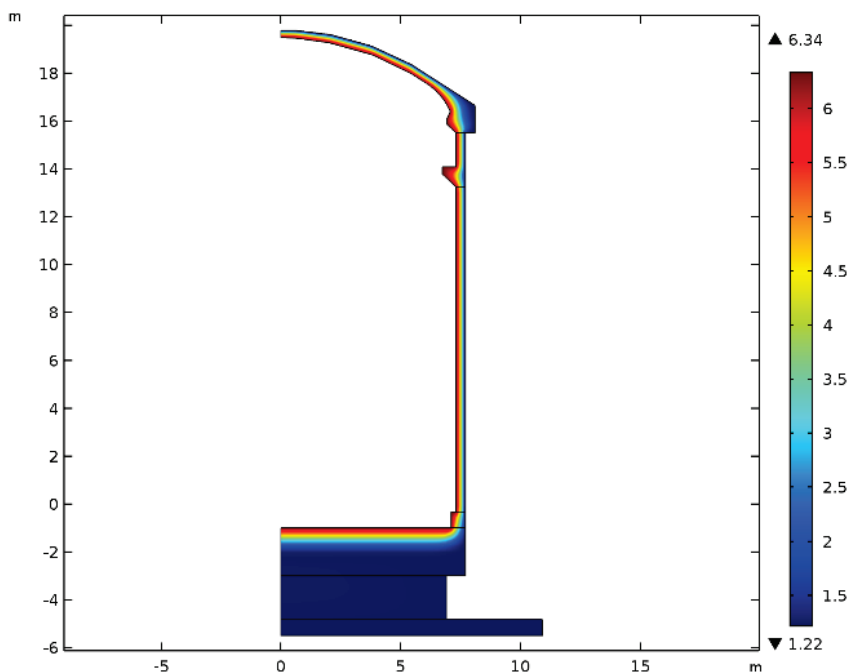
I projektet Vercors, organiserat av EDF (Électricité de France), studeras hur åldrandet hos en reaktorinneslutning påverkar läckaget av gas genom betong. I projektet, som fortfarande pågår, har flera trycktester genomförts på en reaktorinneslutning byggd i tredjedelsskala. Under trycktesten genomförs även mätningar av läckaget.

Reaktorinneslutningen består av en dubbelväggig betongkonstruktion varav den inre är spännarmerad och den yttre utgör ett klimatskydd för den inre konstruktionen. Den inre betongkonstruktionen har ingen tätplåt utan all täthet ska tas upp av den spännarmerade betongen. I drift har utrymmet mellan betongkonstruktionerna ett undertryck så att ett eventuellt läckage kan tas om hand.

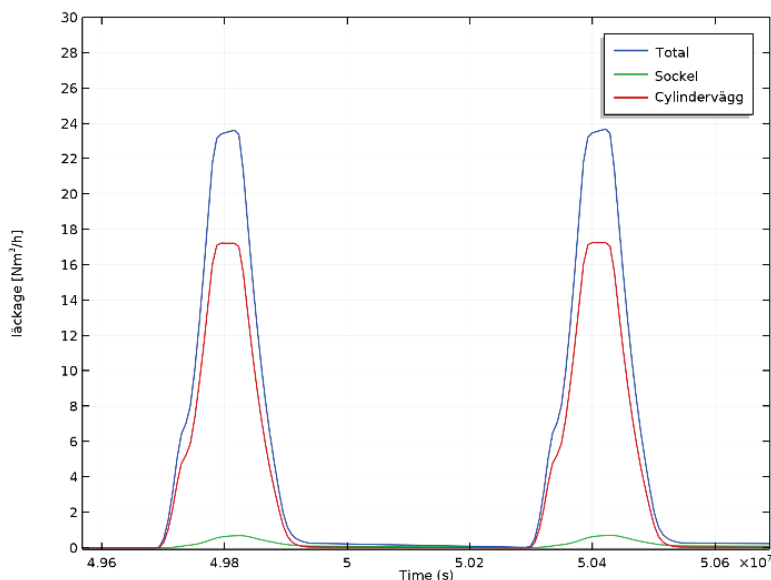
Inom ramen för projektet har två olika internationella benchmarks genomförts, Vercors 2015 och Vercors 2018. Benchmarken syftar till att beräkna gasläckaget vid trycktest genom den inre betongväggen och om och hur gasläckaget förändras med tiden. Energiforsk har finansierat två projekt för att delta i dessa benchmark. Flera olika beräkningsmodeller har presenterats av de olika deltagarna och dess resultat har jämförts med verkliga mätningar, se Bernstone m.fl. (2017) och Åhs m.fl. (2019). I Vercors 2018 beräknade Energiforsks arbetsgrupp läckaget med en modell som är snarlik den som presenteras i det här projektet, se Åhs m.fl. (2019).

I Figur 1-5 visas hur densiteten för luft varierar i den inre betongväggen och i Figur 1-6 visas det beräknade gasläckaget för två närliggande trycktester. Det beräknade

läckaget visas dels som det läckage som sker genom sockeln och cylinderväggen samt det totala läckaget som också inkluderar läckaget genom kupolen.



Figur 1-5 Den beräknade densiteten för luften i reaktorinneslutningens betongvägg vid maximalt tryck, 4.2 bar, precis innan trycket sänks i ett trycktest.



Figur 1-6 Det beräknade läckaget genom den inre spännarmerade betongväggen i reaktorinneslutningen under två närliggande trycktest. Här visas det totala läckaget, läckaget genom sockeln och cylinderväggen.

Resultatet från beräkningarna visade, bland annat, att det är viktigt att modellen tar hänsyn till att luft är komprimerbar och fuktillståndet i betongkonstruktionen.



#### 1.4 SYFTE OCH MÅL

Föreliggande projekt utgör en förstudie gällande gastransport igenom reaktorinneslutningsväggen i samband med de kontinuerliga trycktester som genomförs. Målsättningen med projektet är att analysera hur mycket syre som kan transporteras till tätplåten i samband trycktester och hur detta förlopp påverkas av defekter så som ytsprickor och genomgående sprickor.

Inom föreliggande projekt analyseras enklare elementarfall som representerar en typisk del av cylinderväggen på en reaktorinneslutning. För dessa elementarfall studeras inverkan från olika typer av skador i det inre täckande betongskiktet som benämns missilskydd.

#### 1.5 METODIK

Som metodik för detta projekt tillämpas finita elementanalyser av enklare elementarfall med olika defekter p.g.a. sprickbildning. Analyserna genomförs som transportberäkningar som beaktar värme-, fukt- och gastransport genom cylinderväggen.

Inverkan från sprickor beaktas som antingen som kontinuum, dvs att ett större område ges egenskaper som ska representera sprickans inverkan eller via en diskret metodik där transportegenskaper definieras för en enskild spricka.

#### 1.6 AVGRÄNSNINGAR

Inom ramen för föreliggande projekt studeras endast mängden syre som transporteras genom betongen till tätplåten i samband med trycktester. Analyser av korrosionsförloppet eller hur detta syre åtgår i korrosionsprocessen genomförs inte i det här projektet.

## 2 Transportprocesser i betong

**Betong är ett poröst material genom vilket transport av värme, fukt och gas kan ske vid en (värme, fukt eller tryck) gradient över betongens tjocklek. I detta avsnitt beskrivs kortfattat hur dessa processer sker samt vilka egenskaper som påverkar dessa transportprocesser i betongen.**

### 2.1 VÄRMELEDNING

Den matematiska modellen för att beskriva värmeledning betong utgår ifrån diffusionsekvationen, se Persson och Böiers (1992), och beskrivs med ekvation (1).

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q_1 \quad (1)$$

där  $\rho$  motsvarar densiteten, för betong, 2350 [kg/m<sup>3</sup>],  $C_p$ , motsvarar den specifika värmekapaciteten, för betong 880 [J/(kgK)],  $T$  motsvarar temperaturen, [K],  $t$  motsvarar tiden [s],  $k$  motsvarar värmekonduktiviteten, för betong 1,8 [W/(mK)] och  $Q_1$ , är en källterm som motsvarar den värmeutveckling som sker i nygjuten, ung betong.

Värmeutvecklingen sker framförallt i det tidiga skedet, typiskt 1 till 7 dagar efter gjutning, då huvuddelen av cementet och vattnet i betongen reagerar med varandra. I de beräkningar som utförs i den här förstudien försummas bidraget från värmeutvecklingen eftersom trycktesten utförs en lång tid efter gjutning och  $Q_1$  sätts därför till värdet 0.

### 2.2 FUKTTRANSPORT

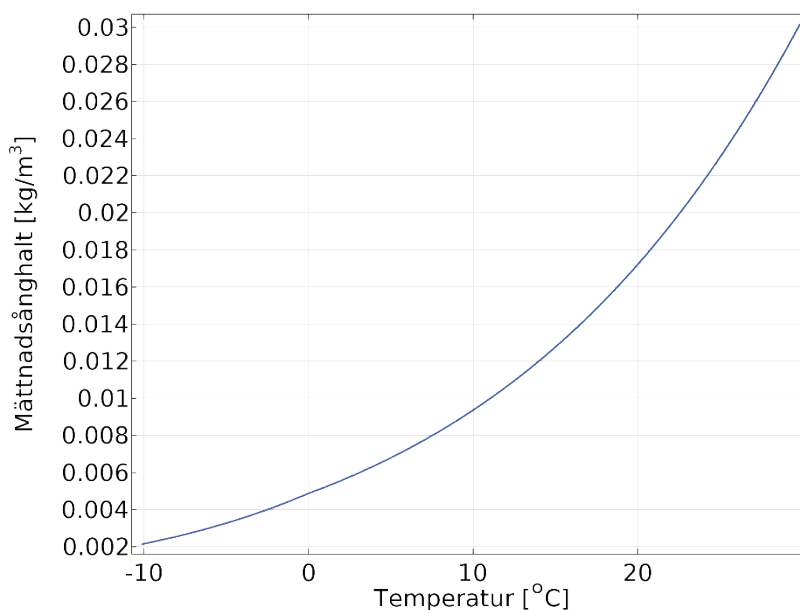
Fukttransport i betong, beskrivs i den här studien matematiskt med ekvation (2)

$$J = -\delta_\varphi \nabla \varphi \quad (2)$$

där  $J$ , motsvarar fuktflödestätheten [kg/(m<sup>2</sup>s)],  $\delta_\varphi$  motsvarar fukttransportkoefficienten [kg/(ms)] med relativ fuktighet som drivande potential och  $\varphi$  motsvarar relativ fuktighet i materialporerna. Fukttransportkoefficienten  $\delta_\varphi$  definieras med ekvation (3)

$$\delta_\varphi = \delta_v * v_s \quad (3)$$

där  $\delta_v$  [kgm<sup>2</sup>/s] representerar fukttransportkoefficienten med ånghalt som drivande potential och  $v_s$  [kg/m<sup>3</sup>] representerar mätnadsånghalten för luft. Mätnadsånghalten är temperaturberoende vilket innebär att luften kan bära mer fukt med en ökande temperatur, se Figur 2-1.



Figur 2-1 Mättnadsånghalt för luft i kg/m<sup>3</sup> som funktion av temperaturen.

Relativ fuktighet (RF) är ett mått på hur mycket fukt som luften bär i det aktuella fallet i förhållande till hur mycket fukt som luften kan bära i vid rådande omständigheter, se ekvation (4)

$$\varphi = \frac{v_{akt}}{v_s} \quad (4)$$

där  $v_{akt}$ , motsvarar aktuell ånghalt [kg/m<sup>3</sup>] och  $v_s$  motsvarar mättnadsånghalten [kg/m<sup>3</sup>] för luft.

Fuktflödestätheten som beskriver fukttransport per kvadratmeter beräknas med relativ fuktighet som drivande potential enligt ekvation (5)

$$\frac{\partial W_e}{\partial t} = \frac{\partial W_e}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(\delta_\varphi \nabla \varphi) + Q_2 \quad (5)$$

där  $W_e$  motsvarar fukthalten [kg/m<sup>3</sup>],  $\frac{\partial W_e}{\partial \varphi}$  motsvarar fuktkapaciteten [kg/m<sup>3</sup>] för betongen och  $Q_2$ , är en källterm.

Källtermen beskriver bindningen av fukt som sker kemiskt när cement och vatten reagerar med varandra. Denna bindning av fukt kallas också för självtorkning. Den termen inkluderas om beräkningar utförs i det tidiga skedet direkt efter en gjutning.

Självtorkning är av försumbar betydelse vid tidpunkten för de trycktester som genomförs, detta innebär att  $Q_2$  sätts till värdet 0.

### 2.2.1 Fukttransport genom gasövertryck

Det övertryck som betongen utsätts för vid ett trycktest kan inte orsaka ett vätskeflöde genom att flytta på vätskan i betong. För att flytta på fukt i

vätskefyllda porer i en betongkonstruktion som är väldigt fuktig (>99 % RF) måste det kapillära undertrycket övervinnas. Den porradie som är helt vattenfylld när relativa fuktigheten är 99 % kan approximativt beräknas med Kelvin ekvationen, se Thomson (1871), se ekvation (6)

$$\ln\left(\frac{p}{p_{sat}}\right) = -\frac{2 \cdot \gamma \cdot V_m}{T \cdot R \cdot r_m} \quad (6)$$

där  $p$ , motsvarar mättnadstrycket över en krökt yta i [Pa],  $p_{sat}$ , motsvarar mättnadstrycket över en plan yta i [Pa],  $\gamma$ , motsvarar ytspänningen i [N/m],  $V_m$ , motsvarar molvolymen för vatten [m<sup>3</sup>/mol],  $T$ , motsvarar temperaturen i [K],  $R$ , motsvarar allmänna gaskonstanten [J/(mol K)],  $r_m$ , motsvarar medelradien för menisken på poren [m].

Porradien för de helt vattenfyllda porerna blir då cirka 0,1  $\mu\text{m}$ .

Det kapillära undertrycket,  $s$ , kan beräknas med Laplace ekvation, (Laplace 1806; Laplace 1807), se ekvation (7)

$$s = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r_m} \quad (7)$$

där  $\gamma$  motsvarar ytspänningen för vatten [N/m],  $\theta$ , randvinkeln för vätning (antas vara 0),  $r_m$ , medelradien för poren i [m].

Det kapillära undertrycket i en kapillärpor som har medelradien 0,1  $\mu\text{m}$  motsvarar 1,36 MPa.

Det krävs således ett övertryck som är större än 1,36 MPa för att flytta på kapillärt bundet vatten i en por som är vattenfylld vid 99 % RF. Betongkonstruktionen i reaktorinneslutningar är betydligt torrare än 99% RF vilket innebär att det krävs ett betydligt större övertryck för att flytta fukten. Därmed kan fukttransport via övertryck uteslutas helt i dessa fall.

### 2.3 GASTRANSPORT

I det här avsnittet beskrivs en matematisk modell för hur gas flödar genom betong som är utsatt för ett övertryck. Förutom storleken på övertrycket påverkas gastransport i betong av många olika faktorer, till exempel förändringar i betongens egenskaper över tid, förekomst av sprickor, betongens fukttinnehåll och rådande temperatur. Dessutom kan också gas lösas upp i porvattnet.

Betongens egenskaper förändras mycket under härdningsprocessen, från gjutning och ungefär en månad fram i tiden i och med att den härdnar. Efter att betongen härdnat sker inte några stora förändringar i egenskaper på grund av härdningsprocessen.

Gastransport i betong, som är ett mycket finporöst material, påverkas också av att porerna innehåller fukt. Fukten är bunden fysikaliskt genom dels adsorption på inre porytor och dels genom kapillärkondensation. Fukten utgör ett hinder för gastransporten genom att den absorberade fukten upptar en viss volym vilket

reducerar den tillgängliga arean genom vilken gasen kan transporteras. Dessutom förhindras gastransporten helt genom att de finaste porerna i betongen är helt vätskefyllda på grund av kapillärkondensation. Påverkan av fuktinnehållet har en avgörande betydelse för gaspermeabiliteten och inkluderas därför i beräkningarna i Kapitel 4.

Omgivningen påverkar också betongens egenskaper och en sådan påverkan har luftens koldioxid. När betong utsätts för koldioxid sker en inbindning av koldioxid i den reagerade cementpastan och kalksten bildas vilket förändrar materialstrukturen och den kemiska sammansättningen. Den processen är väldigt långsam men den här processen påverkar sannolikt gaspermeabiliteten av två skäl. Karbonatiseringen innebär att materialstrukturen förtätas genom att koldioxid binds in men å andra sidan krymper betongen vilket sannolikt ger upphov till små sprickor i materialstrukturen, Neville (2011). Inbindningen av koldioxid ökar tätheten vilket sannolikt innebär att permeabiliteten minskar och krympningen innebär att gaspermeabiliteten sannolikt ökar. Påverkan av karbonatisering har inte inkluderats i den här framställningen.

Luft kan lösas upp i porlösningen och lösligheten för luft påverkas av trycket. Ju högre tryck desto mera luft kan lösas i porlösningen. Detta påverkar den tillgängliga porositeten så att den ökar med trycket. Mängden luft som kan lösas är proportionell mot mängden porlösning. Speciellt vid högt fuktinnehåll är påverkan stor, se Fredlund och Nilsson (2009), men processen drivs av diffusion vilken är långsam och det tar tid för gasen att lösas upp i vatten. Denna effekt har inte inkluderats i den här framställningen eftersom tidsförloppet på ett trycktest är förhållandevis kort.

Grunden till modellen hämtas ur en generell modell av flöde av en fluid (vätska/gas) genom ett poröst material, även känd som Darcys lag. Modellen tillämpas på en reaktorinneslutning med en ingjuten tätplåt se Kapitel 4.

### 2.3.1 Gastransport i porösa material

Masstransport av gas genom betong, som är ett poröst material, kan uttryckas med hjälp av Darcys lag, se Darcy (1856), som idag uttrycks mer generellt enligt ekvation (8)

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (8)$$

där  $\mathbf{u}$ , representerar flödestätheten för gasen (luften) [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ],  $\kappa$ , representerar permeabiliteten [ $\text{kg}/\text{m}$ ] och  $\mu$ , representerar luftens dynamiska viskositet [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] och  $p$ , representerar (luft) trycket [ $\text{Pa}$ ].

Ekvation (8) gäller under förutsättning att ingen del av gasen binds fysikaliskt till materialet eller porlösningen och ingen gas "frisläpps" från materialet eller porlösningen. Vid kortvariga trycktest kan inbindning respektive frisläppning av gas från betong helt försummas. En annan viktig förutsättning för att ekvation (8) ska gälla är att densiteten för gasen är i det närmaste konstant, det vill säga att gasen inte ändrar densitet på grund av trycket. Vid en situation där trycket

förändras mycket och det uppstår en stor tryckgradient gäller inte ekvation (8). Vid trycktester på reaktorinneslutningar utsätts betongen för ett cirka 3 atmosfärens övertryck, (3 bar, 300 kPa) och då ändras densiteten på luft från 1,2 kg/m<sup>3</sup> till cirka 5 kg/m<sup>3</sup> vilket måste beaktas i numeriska modeller.

Ekvationen för gasflöde med hänsyn till att gasens densitet påverkas av trycket måste därför skrivas om till den mer generella formen för Darcys lag, enligt ekvation (9)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (9)$$

där  $\rho$  representerar densiteten för gasen som varierar med rådande tryck och  $\mathbf{u}$  representerar flödestätheten för gasen.

I korthet innebär ovanstående ekvation att ett flöde av ett ämne in i ett poröst material är lika stort som flödet ut ur materialet, vilken brukar benämnas som kontinuitetsekvationen eller massbalansekvationen.

Genom att sätta in ekvation (8) i ekvation (9) erhålls ekvation (10)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot \left( \rho \left[ -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \right] \right) = 0 \quad (10)$$

som beskriver ett gasflöde där hänsyn tas till att densiteten ändras med trycket.

Masstransport av gas genom ett poröst material sker enbart genom den tillgängliga porvolymen, den porvolym som inte är vattenfylld. Detta inkluderas genom att multiplicera termen för gasflödestätheten med porositeten i ekvation (11)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_p \rho) + \nabla \cdot \left( \rho \left[ -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \right] \right) = 0 \quad (11)$$

där  $\epsilon_p$ , representerar materialets porositet [-]. Den tillgängliga porositeten påverkas av hur mycket fukt som finns kvar i betongen. Det innebär att den påverkas av en uttorkning. I den här studien antas att den tillgängliga porositeten motsvarar totalporositeten oavsett fukttinnehåll. Däremot förändras permeabiliteten med fukttinnehållet och på sätt tas hänsyn till att den tillgängliga porositeten varierar med fukttinnehållet.

Inverkan av diskreta sprickor har modellerats enligt en sprickmodell som finns i COMSOL Multiphysics. Den modellen innebär att man anger sprickans egenskaper längs en inre rand, så som sprickbredd, porositet och gastransporten genom sprickan sker längs randen i randens riktning,  $\nabla_T$ , se ekvation (12)

$$d_f \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_f \rho) + \nabla_T \cdot \left( \rho \left[ -\frac{\kappa_f}{\mu} \nabla p \right] \right) = 0 \quad (12)$$

där  $d_f$ , motsvarar sprickbredden,  $\epsilon_f$ , motsvarar sprickans porositet,  $\nabla_T$ , motsvarar gradienten längs sprickans tangent och  $\kappa_f$ , motsvarar sprickans permeabilitet.

### 2.3.2 Syrekonzentration

Syrekonzentrationen i luften kan beräknas med hjälp av allmänna gaslagen, se ekvation (13)

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (13)$$

där  $p$  motsvarar absoluttrycket i Pa,  $V$ , motsvarar volymen i m<sup>3</sup>,  $n$ , substansmängden i mol,  $R$ , motsvarar allmänna gaskonstanten, 8,314 i J/(mol·K) och  $T$ , motsvarar temperaturen i K.

Andelen syre i luft är cirka 21 % av totaltrycket. Detta innebär att substansmängden för syre  $n_{O_2}$  kan beräknas genom att multiplicera vänster led med 0,21 och dividera både höger och vänster led i ekvation (13) med  $R \cdot T$  detta ger ekvation (14)

$$n_{O_2} = 0.21 \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad (14)$$

Det innebär att vid normalt lufttryck (101,3 kPa) och temperaturen 24,5 °C (297,6 K) som ungefär råder vid tätplåten är substansmängden syre 8,59 mol i en kubikmeter luft. Molmassan för syre är 32 g/mol vilket innebär att det finns cirka 275 gram syre i en kubikmeter luft vid motsvarande tryck och temperaturförhållanden. Vid 300 kPa övertryck som motsvarar cirka 400 kPa i totaltryck och 27 °C (303 K) innebär det att substansmängden syre är 33,9 mol i en kubikmeter luft. Detta innebär att det finns 1086 gram syre vid 400 kPa totaltryck således nästan fyra gånger så mycket syre som vid normalt atmosfärstryck.

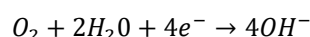
### 3 Korrosion och dess inverkan på armerade betongkonstruktioner

**I detta avsnitt beskrivs korrosionsprocessen hos stålmaterial och hur materialegenskaper både hos betong och stål påverkas av korrosion.**

#### 3.1 BESKRIVNING AV KORROSIONSPROCESSEN

Korrosion är en elektrokemisk process med bildande av en passiv/aktiv cell. Vid en elektrokemisk process sker oxidering av stålmaterial som en anodreaktion och reduktion av syre som katodreaktion. Detta sker genom att ett elektronflöde bildas mellan två punkter i stålet. Den punkt som elektronen utgår ifrån blir anod (positiv laddning) och den punkt som nås av elektronen blir katod (negativ laddning). Om stålets yta är täckt av en sammanhängande elektrolyt bildas en elektisk ström som går från katod till anod, vilken leder till att en sluten elektrisk krets bildas. På anodens yta går järnmolekyler i lösning och på katodens yta bildas hydroxidjoner i närvaro av syre. Hydroxidjonerna förflyttas till anoden och bildar tillsammans med de upplösta järnmolekylerna korrosionsprodukter. Porvattnet i betongen fungerar som elektrolyt vid korrosionsprocessen. En oxidationsprocess kan även ske om stålmaterial är ansluten till ädlare material, så som t.ex. rostfritt stål.

Korrosionsprocessen i stål kan beskrivas som en elektrokemisk cell med följande anod- respektive katodreaktion



Korrosion kan initieras i stål som är ingjutet i betong genom karbonatisering i betong eller p.g.a. klorider.

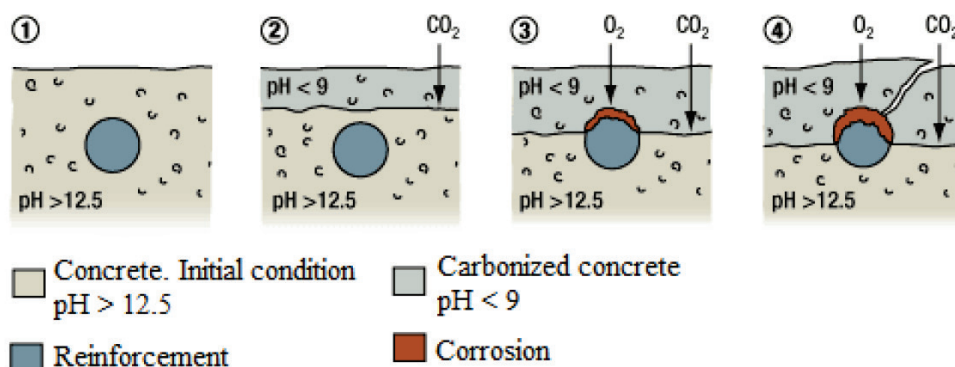
- Karbonatiseringsprocessen innebär att cementen återtar koldioxid som försvann vid tillverkningen. När koldioxiden reagerar med betongens kalciumhydroxid så bildas kalciumkarbonat vilket gör att pH-värdet i betong sjunker, vilket resulterar i att korrosion kan ske, se Figur 3-1.
- Kloridinducerad korrosion innebär att klorider transporteras i betongen och når det ingjutna stålmaterial. Därmed skadas det passiva skyddet på armeringen vilket får korrosionen att propagera.

Vid karbonatiseringsprocessen tränger koldioxid in i betongens porer och reagerar med kalkhaltigt material i betongen. Den reaktionsprodukt som bildas är huvudsakligen kalciumkarbonat vilken har så lågt pH-värde att korrosion kan ske. Vid korrosion orsakad av karbonatisering sker vanligtvis korrosionen jämnt över hela den yta hos det ingjutna stålmaterial som är i kontakt med karbonatiserad betong, Fagerlund (2011).



Vid kloridinducerad korrosion transporteras kloridjoner som finns i kloridhaltigt vatten gradvis in i betongkonstruktionen. Korrosion som orsakas av kloridjoner sker till en början i lokala punkter (gropfrätning) med en hög hastighet. Vid gropfrätning kan en kraftig reduktion av stålets tjocklek ske snabbt vilket kraftigt reducerar konstruktionens bärförmåga. Detta är särskilt viktigt vid spännarmerade konstruktioner eftersom höga dragspänningar i spännarmeringen bidrar till ökad risk för gropfrätning, detta fenomen benämns normalt spänningskorrosion, se Fagerlund (2011). Korrosion orsakat av kloridinträngning ger även upphov till en jämn korrosion.

När stålmaterial korroderar skapas korrosionsprodukter som kräver en större volym än det ursprungliga materialet. Volymen hos korrosionsprodukten är typiskt 2 till 6 gånger större än för det intakta stålmaterial, Blomfors (2020). Detta resulterar i att ett inre tryck byggs upp kring det ingjutna stålmaterial vilket kan orsaka sprickbildning eller spjälkning av det täckande betongskiktet, se Figur 3-1.



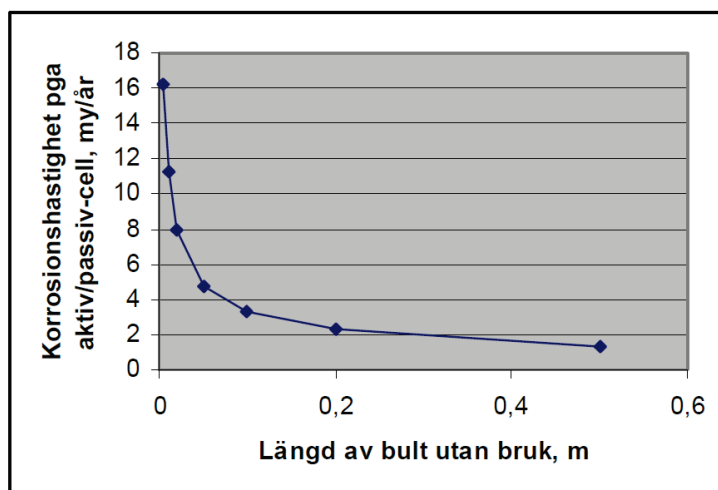
Figur 3-1 Illustration av karbonisering av betong och reducerat pH följt vilket resulterar i korrosion av ingjutet stålmaterial.

För att korrosionsprocessen ska fortgå behövs en potentialskillnad, som driver elektronerna från anod till katod, elektrolyt på metallens yta samt syre vid katoden. Jämn korrosion uppstår på metallens yta vid en fuktig atmosfär eller i en karboniserad betong som befinner sig i en fuktig miljö.

Betongens fuktillstånd är viktigt vid korrosion, eftersom porvattnet utgör elektrolyt vid den elektrokemiska processen. Ett högt fuktillstånd innebär att porvolymen i högre grad är fylld med vatten, vilket resulterar i en långsammare transport av syre och därmed lägre korrosionshastighet. I fall med väldigt lågt fuktillstånd är också korrosionshastigheten låg på grund av hög resistivitet. I fall med medelhögt fuktillstånd kan korrosionshastigheten bli hög på grund av både låg resistivitet och hög transport av syre.

Om ingjutet stålmaterial har en ofullständig kringgjutning med cementbruk kan korrosion uppstå i de blottlagda delarna. Denna ofullständiga kringgjutning skulle även kunna bero på sprickbildning eller motsvarande. Enligt Windelhed m.fl. (2002) varierar korrosionshastigheten med längden på den exponerade ytan enligt Figur 3-2. I figuren, så visas ett exempel på korrosionshastighet i en bergbult som funktion av bultens längd som är utan bruk. Som det framgår av figuren så visar dessa resultat på en relativt låg korrosionshastighet < 16  $\mu\text{m}/\text{år}$ , men det motsvarar

en exponerad längd av 5 mm. Vid mindre längder så som typiska sprickor förväntas därmed korrosionshastigheten öka betydligt, dock sker en alkalisering av elektrolyten i sprickan, från det omgivande bruket, vilket kommer att begränsa korrosionshastigheten enligt Windelhed m.fl. (2002).



Figur 3-2 Korrosionshastighet p.g.a. passiv/aktiv cell som funktion av frilagd bultlängd, Windelhed m.fl. (2002).

### 3.1.1 Initiering av korrosion

Korrosionsförloppet för kloridinducerad korrosion brukar delas upp i två delar, initieringsfasen och propageringsfasen. Initieringsfasen inkluderar både den tid det tar för kloriderna att transporteras till armeringen och tiden som krävs för att passivskiktet på stålmaterialen ska förstöras.

Propageringsfasen avser perioden då korrosionen har startat. Kloridtröskelvärdet definieras som kloridhalten då processen övergår från initierings- till propageringsfasen.

### 3.1.2 Korrosionshastighet

Korrosionshastigheten beror på flera olika faktorer och styrs till stor del av betongens fukthalt. Som tidigare påpekats är korrosionshastigheten låg både för helt vattenmättad betong (p.g.a. begränsad tillgång på syre) och torr betong (p.g.a. låg elektrisk ledningsförmåga). Högst korrosionshastighet erhålls vid en optimal fuktighet i betongen.

Vid skador och defekter, så att transport av syre sker som gas eller löst i vatten, påverkas också korrosionshastigheten, där ett flöde resulterar i ökad korrosionshastighet. I den Tyska normen DIN 50 929, som behandlar korrosion beaktas dels flödet, pH-värdet, alkalinitet samt koncentrationen av kalcium ( $Ca^{2+}$ ), klorider ( $Cl^-$ ) och sulfater ( $SO_4^{2-}$ ). Utifrån detta kan en korrosionshastighet beräknas för jämn korrosion respektive vid gropfrätning. Baserat på DIN 50 929 fås därefter att korrosionshastigheten för allmän (jämn) korrosion varierar mellan 10 och 100  $\mu\text{m}/\text{år}$  och vid gropfrätningen mellan 50 och 500  $\mu\text{m}/\text{år}$ , se Malm m.fl. (2017).

I Tabell 3-1 visas en sammanställning av korrosionshastighet för ingjutna stålmaterial vid korrosion initierad av karbonatisering respektive klorider. I

tabellen framgår tydligt hur stor inverkan den relativa fuktigheten i betong har på korrosionshastigheten. Vattnet som finns i betongens porsystem utgör elektrolyt i korrosionsprocessen och påverkar därmed betongens resistivitet, dvs resistansen mot att leda elektrisk ström. Betongens fuktighet, bestämmer därmed betongens resistivitet och transport av både syrgas och klorider. Betong med hög fukthalt har en relativt låg resistivitet samt långsam transport av syrgas. Betong med låg fukthalt har en snabb transport av syrgas samt hög resistivitet vilket ger en låg korrosionshastighet. Vid ett specifikt fuktintervall (90 – 98 % enligt tabellen) så kan både transporten av syrgas vara hög samtidigt som resistiviteten är låg vilket resulterar i en hög korrosionshastighet. (Ahlström, 2014)

Tabellen visar även på stor skillnad i korrosionshastighet vid kloridinfekterad och karbonatiserade betong.

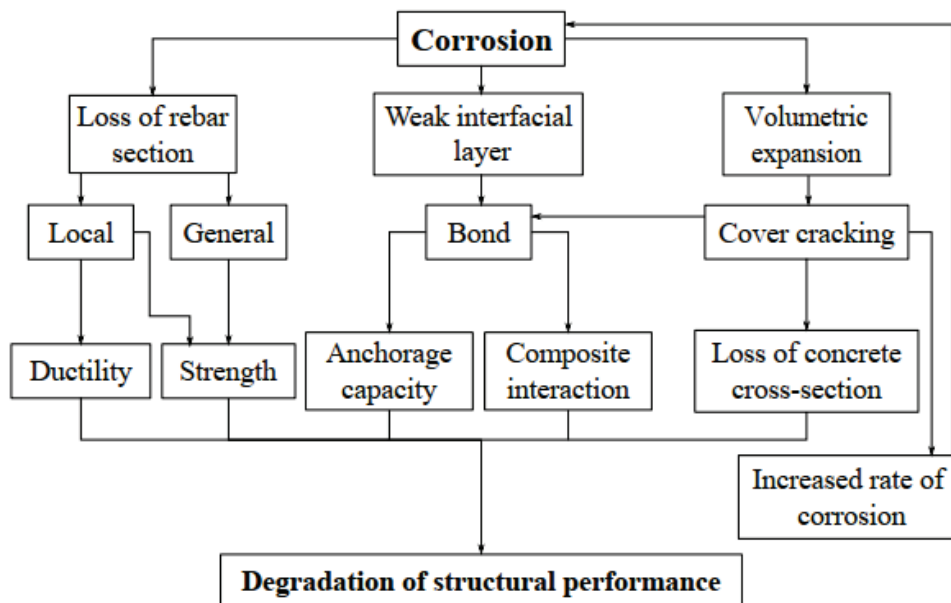
**Tabell 3-1 Korrosionshastighet som funktion av betongens relativa fuktighet. Från Concrete repair manual (2003).**

RH i betong	Korrosionshastighet [ $\mu\text{m}/\text{år}$ ]			
	Karbonatiserad betong			Kloridinfekterad
	Bertolini	Sergi	Tuutti	Tuutti
< 50	0.1	0.03	0.01	0.1
50 - 60	0.2	0.06	0.01	0.2
60 - 70	0.3	0.1	0.02	2.0
70 - 80	0.5	0.3	0.05	10.0
80 - 90	1.0	1.0	1.0	20.0
90 - 98	10.0	5.0	10.0	50.0
> 98	0.1	N/A	0.1	< 10.0

### 3.2 INVERKAN PÅ MATERIALEGENSKAPER

Materialegenskaperna hos stål och betong kommer att förändras på grund av korrosion av stålmaterial och den inverkan som korrosion av ingjutet stålmaterial har på betong. Både mekaniska och transportegenskaper förändras på grund av detta.

I Figur 3-3 illustreras hur korrosion av ingjutet stål påverkar egenskaperna och beteendet hos betongkonstruktioner.



Figur 3-3 Illustration av korrosionens inverkan på strukturens egenskaper och beteende, från Blomfors (2020).

### 3.2.1 Förändringen av stålets egenskaper

I och med att stål korroderar så kommer tvärsnittet hos det ingjutna stålmaterialet successivt att reduceras. Minskningen av effektivt tvärsnitt kan vid jämn korrosion beaktas genom att en lämplig korrosionshastighet bestäms vilket resulterar i en kontinuerligt reducerad bärförmåga. Om gropfrätning ska beaktas kan areareduktionen antas ske lokalt, se t.ex. Jeon m.fl. (2019)

Beroende på tillverkningsmetoden för stålmaterial så kan även hållfastheten förändras på grund av korrosion eftersom stål kan ha högre hållfasthet vid ytan än i centrum, Blomfors (2020). Även stålmateriallets duktilitet kan reduceras p.g.a. korrosion se Blomfors (2020).

### 3.2.2 Förändring av betongens egenskaper

Om ingjutet stål gods korroderar, uppstår ett högt inre tryck i betongen på grund av volymexpansionen som sker av korrosionsprodukterna. Detta inre tryck kan orsaka sprickbildning i betongen. Flera olika studier har genomförts för att studera hur betongens egenskaper påverkas av korrosion. Shayanfar m.fl. (2016) presenterade t.ex. resultat om hur betongens tryckhållfasthet reduceras som funktion av korrosion. Sprickorna som uppstår kring ingjutna godset påverkar både eventuell vidhäftning mellan stål och betong, se t.ex. Blomfors (2020) och reducerar omslutande trycket (confinement) vilket reducerar skjuvkapaciteten i t.ex. armerade betongtvärsnitt. Inre trycket från expansionen av korrosionsprodukterna kan även resultera i spjälkning av betongtäcksiktet vilket innebär att en större yta av det ingjutna stål godset blir exponerad och kan korrodera. Spjälkningen innebär även att betongen kan förlora sin samverkan med ingjutna stålmaterial, vilket kan få katastrofala följder för armerade betongkonstruktioner.

## 4 Fallstudie

**Finita elementanalyser har genomförts för att analysera inverkan av gastransport igenom betongen till tätplåten vid tryckttester. I detta avsnitt beskrivs de olika modeller som har använts för att analysera gastransporten genom reaktorinneslutningen.**

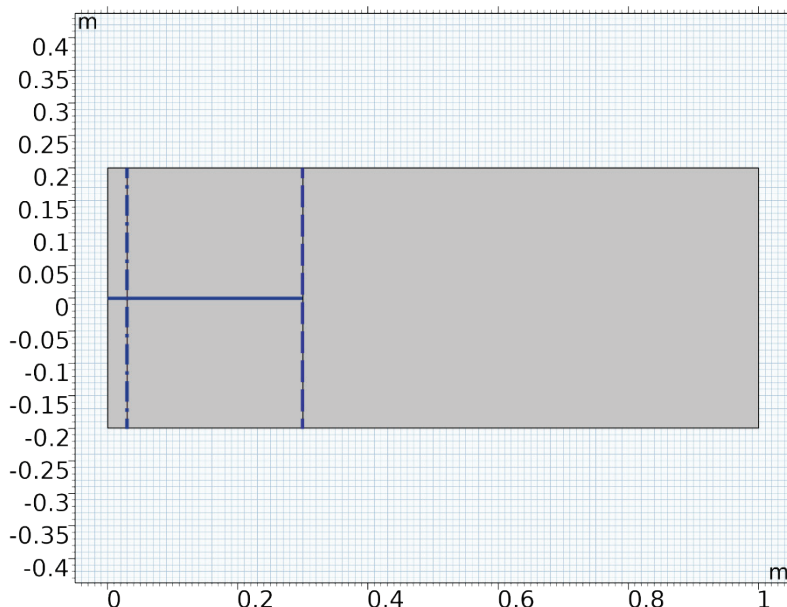
I den här studien har fyra olika elementarfall simulerats. De fyra fallen syftar till att studera inverkan av olika defekter och motsvarar att konstruktionen är i olika skick och betecknas enligt nedanstående lista.

- A. Intakt oskadad betong
- B. Täcksiktet uppsprucket
- C. Täcksiktet uppsprucket samt genomgående spricka sprickvidd 0,1 mm
- D. Täcksiktet uppsprucket samt genomgående spricka sprickvidd 1 - 0 mm

I resultatet anges vilket fall som avses med respektive bokstav i teckenförklaringen i varje diagram.

### 4.1 GEOMETRI

Reaktorinneslutningens vägg består av en betongkonstruktion som är typiskt mellan 1 och 1,5 m tjock. I väggen finns en ingjuten tätplåt ca 0,2 - 0,3 m från insidan. I denna studie har cylinderväggen modellerades geometriskt i 2 dimensioner med tjockleken 1 m och en höjd av 0,4 m, se Figur 4-1.



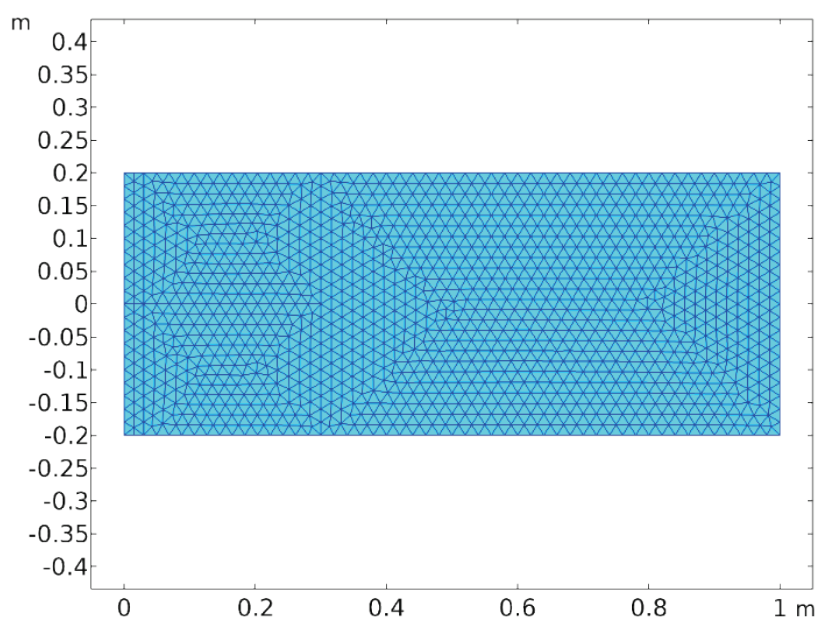
Figur 4-1 Geometri använd för samtliga simuleringar

Den lodräta streckade linjen 0,3 m från vänsterkanten representerar tätplåten. Den vågräta heldragna linjen som utgår från 0 m och når fram till 0,3 m representerar en eventuell spricka fram till tätplåten. Den lodräta streckprickade linjen 0,05 m

från vänster kant, motsvarar en antagen gräns mellan intakt betong och det skadade ytskiktet.

## 4.2 ELEMENTINDELNING

Geometrin delas in i triangulära element som har en maximal sida av 0,02 m, se Figur 4-2. Diskretiseringen av elementen baseras på Lagrange-formulering med kvadratiske formfunktioner.



Figur 4-2 En avbildning av elementindelning för den använda geometrin.

## 4.3 MATERIALEGENSKAPER

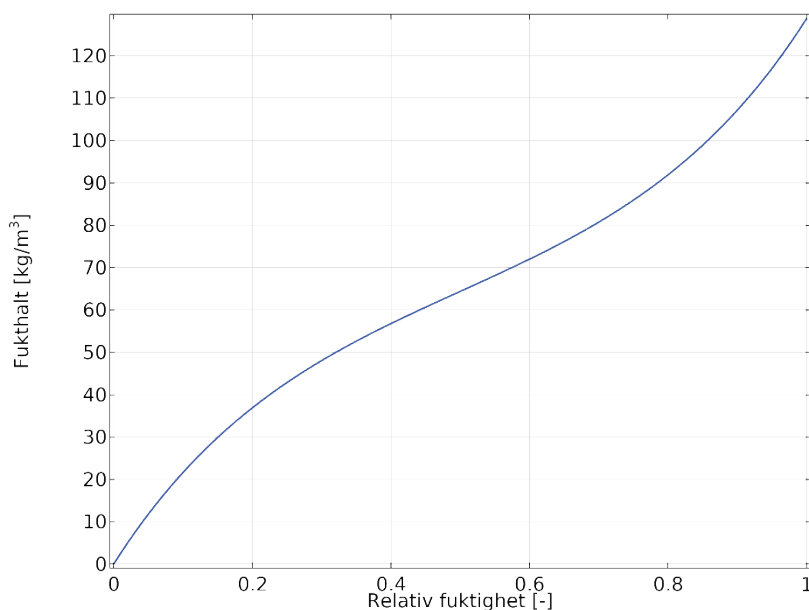
### 4.3.1 Betong

De svenska reaktorinneslutningarna har tillverkats med olika betongkvaliteter. För reaktor 1-4 på Ringhals finns uppgifter att vct varierar från 0,42 upp till 0,46 enligt Oxfall (2016). Hydratationsgraden för den betong som undersökts på Ringhals var reaktionsgraden cirka 0,7 enligt Oxfall (2016).

För alla fallstudier i denna studie har antagits ett vct på 0,45 och betongen antas ha en hydratationsgrad av 0,7. Betongens porositet har antagits vara 13 %.

Betongens densitet varierar också och för den här studien har antagits en densitet av 2300 kg/m<sup>3</sup>. Värmekonduktiviteten för betongen har antagits vara konstant 1,8 W/(mK) och den specifika värmekapaciteten har antagits vara 880 J/(kg K).

Fukttinnehållet i betongen har antagits följa jämviktsfuktkurvan som visas i Figur 4-3.



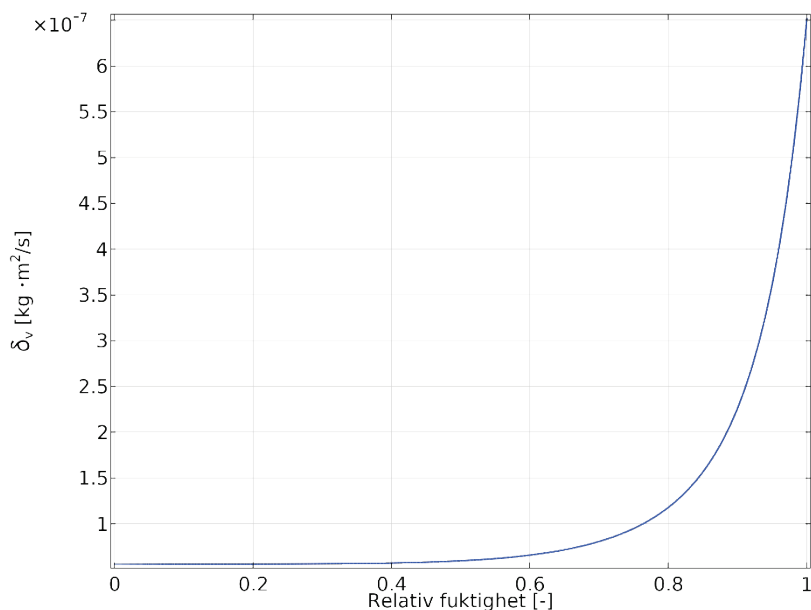
Figur 4-3 Jämviktsfuktkurva som visar fukthalten i  $\text{kg/m}^3$  som funktion av relativ fuktighet vid temperaturen  $20\text{ }^\circ\text{C}$

Jämviktsfuktkurvan antas vara konstant med både temperaturen och tiden i analyserna. Jämviktsfuktkurvan ändras förvisso med temperaturen men förändringen är så liten att det inte har någon avgörande betydelse för uttorkningen av betongen. Eftersom uttorkningen av betongen inte påverkas signifikant av detta så påverkas heller inte resultatet av gastransportberäkningarna signifikant. Betongens jämviktsfuktkurva påverkas också av härdningsåldern och porstrukturutvecklingen. Dock är skillnaden mellan en 1 år gammal betong och en 36 år gammal betong är i detta avseende försumbar.

Fuktransportkoefficienten för betongen som använts i simuleringen har stor betydelse för uttorkningen av konstruktionen efter att självuttorkningen har ägt rum. Fuktransportkoefficienten för en betong som har använts i en av Ringhals reaktorinneslutningar har publicerats av Oxfall (2016). En kurvpassning till dessa data presenterades också och den ekvationen har använts för den här framställningen, se ekvation (15)

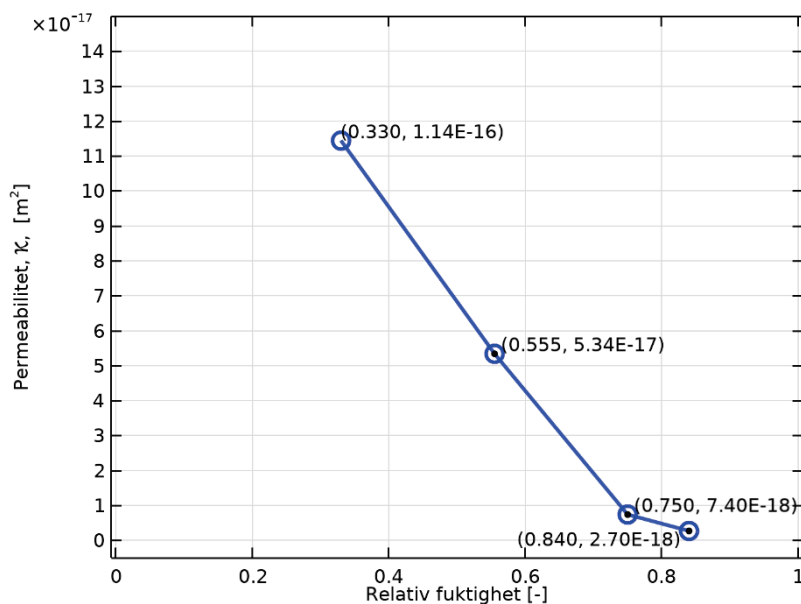
$$\delta_v = 1.3 \cdot 10^{-7} \cdot e^{2.455 \cdot \varphi^{5.35}} \quad (15)$$

Fuktransportkoefficienten enligt ekvation (2) visas i Figur 4-4. I fallstudierna beräknas fukttillståndet med betongegenskaper som gäller för oskadad betong. Detta innebär att inverkan från sprickor ej är beaktad vid beräkningen av fukttillstånd. Fukttillståndet förväntas påverkas så att uttorkningen ökar i och med att spruckna områden får lägre fuktransportmotstånd. Påverkan av detta ansågs ligga utanför projektets huvudsakliga syfte att principiellt påvisa hur gastransporten påverkas av olika typskador.



Figur 4-4 Fuktkoefficienten som funktion av relativ fuktighet

Gaspermeabiliteten för betong beror på fukttillståndet. I en fuktmättad betong är luftsporsystemet helt fyllt och därför är gaspermeabiliteten försumbar vid det fukttillståndet. Oxfall (2016) har bestämt gaspermeabiliteten för en betong som har använts på Ringhals, se Figur 4-5.



Figur 4-5 Uppmätt gaspermeabilitet för en betong som används i en av reaktorerna på Ringhals

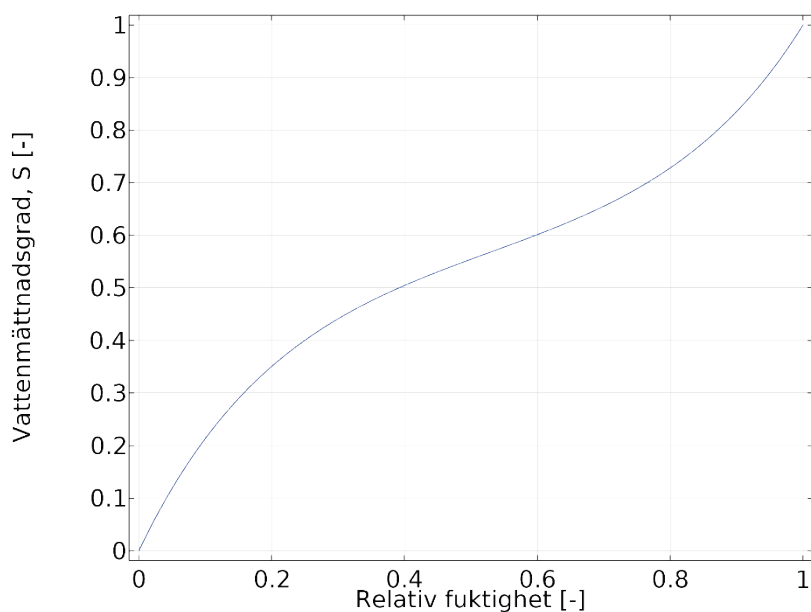
Figur 4-5 visar tydligt att gaspermeabiliteten minskar med en ökande relativ fuktighet. Till dessa mätdata har en kurva passats så att gaspermeabiliteten,  $\kappa_p$ , för det aktuella fuktområdet täcks in, se ekvation (16).



$$\kappa_p = 20 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - S)^{5,5} \quad (16)$$

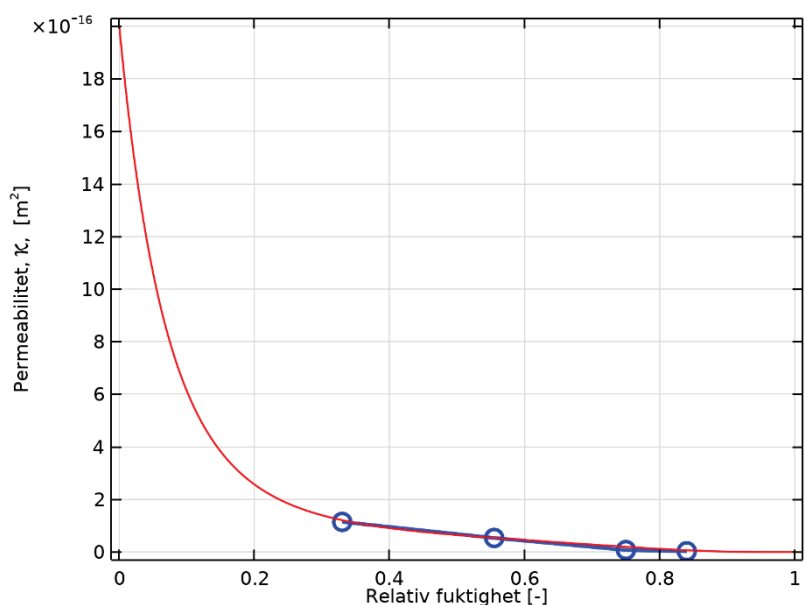
där  $S$ , representerar vattenmättnadsgraden för betongen som funktion av relativa fuktigheten.

Vattenmättnadsgraden,  $S$ , är ett mått på hur stor del av porsystemets volym som är fyllt av vatten jämfört med den totala volymen av porsystemet och antar värden mellan 0 och 1. I Figur 4-6 visas vattenmättnadsgraden som funktion av relativ fuktighet.



Figur 4-6 Vattenmättnadsgrad som funktion av relativ fuktighet.

Gaspermeabilitetens fuktberoende visas i Figur 4-7.



Figur 4-7 Gaspermeabilitet för hela fuktområdet som kurvpassats mot uppmätt gaspermeabilitet

I de fall där en spricka har beaktats i simuleringen har dess permeabilitet antagits vara 100 gånger större än motsvarande för homogen betong.

#### 4.3.2 Luft

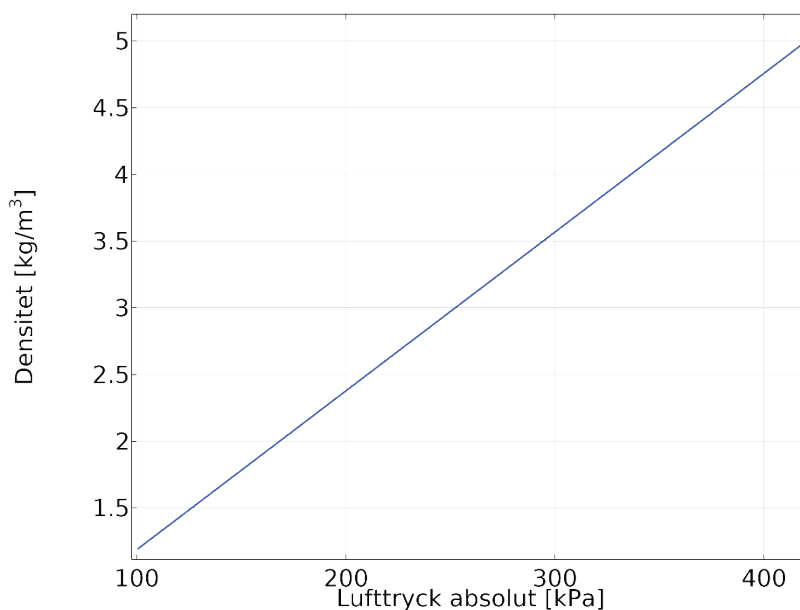
Luftens densitet och dess dynamiska viskositet och har betydelse för gastransport genom ett poröst material som betong.

Luftens densitet,  $\rho_{luft}$ , påverkas bland annat av trycket och temperaturen och beräknades enligt ekvation (17)

$$\rho_{luft} = \frac{p \cdot M_{luft}}{R \cdot T_{luft}} \quad (17)$$

där  $p$ , representerar trycket i absoluta tal [Pa],  $M_{luft}$ , är molvikten för luft 0,0289 [kg/mol],  $R$ , representerar allmänna gaskonstanten, 8,314 J/(mol K) och  $T_{luft}$  som representerar temperaturen [K].

Luftens densitet ökar med ett ökande lufttryck från cirka 1,2 kg/m<sup>3</sup> vid normalt lufttryck, 100 kPa, upp till cirka 5 kg/m<sup>3</sup> vid, 400 kPa, se Figur 4-8.



Figur 4-8 Luftens densitet som funktion av lufttrycket.

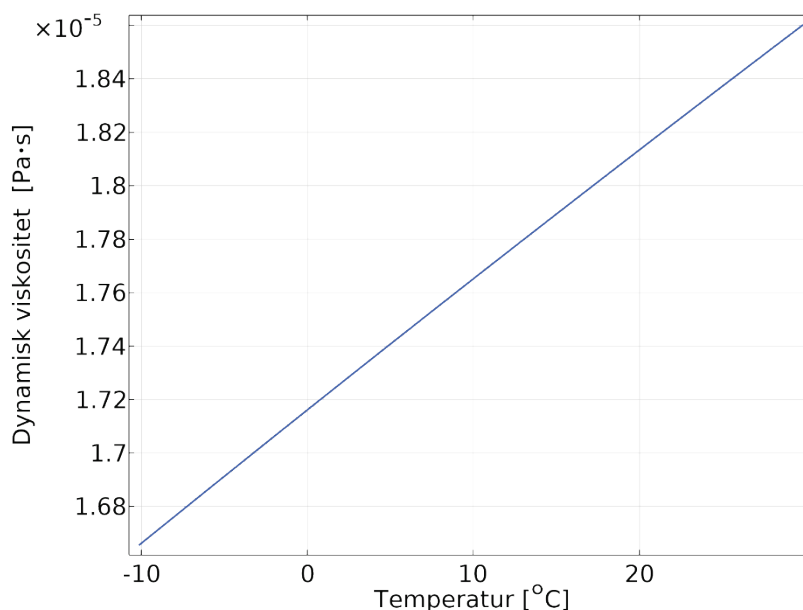
Luftens densitet påverkas också av fukttinnehållet så att densiteten sjunker med en stigande ånghalt, dock är påverkan försumbar.

Luftens dynamiska viskositet,  $\mu$ , påverkas både av temperaturen och av trycket. Temperaturens påverkan på dynamiska viskositeten har beräknats enligt Sutherland och Maas (1932), se ekvation (18)

$$\mu = 1.458 \cdot 10^{-6} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{T + 110.4} \quad (18)$$

där  $T$ , representerar temperaturen i [K].

Den dynamiska viskositeten för luft visas i Figur 4-9.

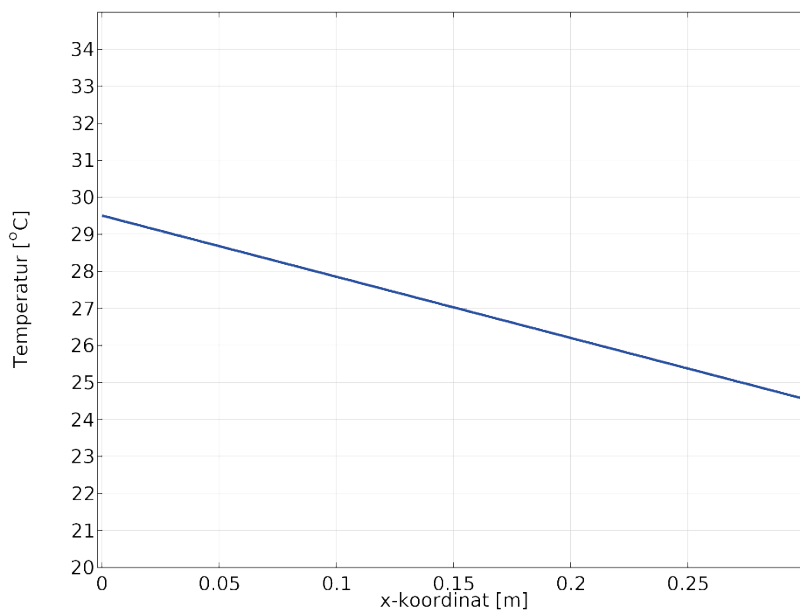


Figur 4-9 Luftens dynamiska viskositet som funktion av temperaturen vid 100 kPa absoluttryck.

I den här framställningen kan påverkan av dessa parametrar försummas då storleksordningen på både tryck- och temperaturspannet är marginellt i reaktorinneslutningar. Viskositeten ökar med cirka 3 % vid en tryckökning från 1 bar till 5 bar och den dynamiska viskositeten ökar med 10 % vid en temperaturförändring från 7 °C till 47 °C enligt Haynes (2012).

#### 4.4 RANDVILLKOR (TEMP, FUKT, TRYCK)

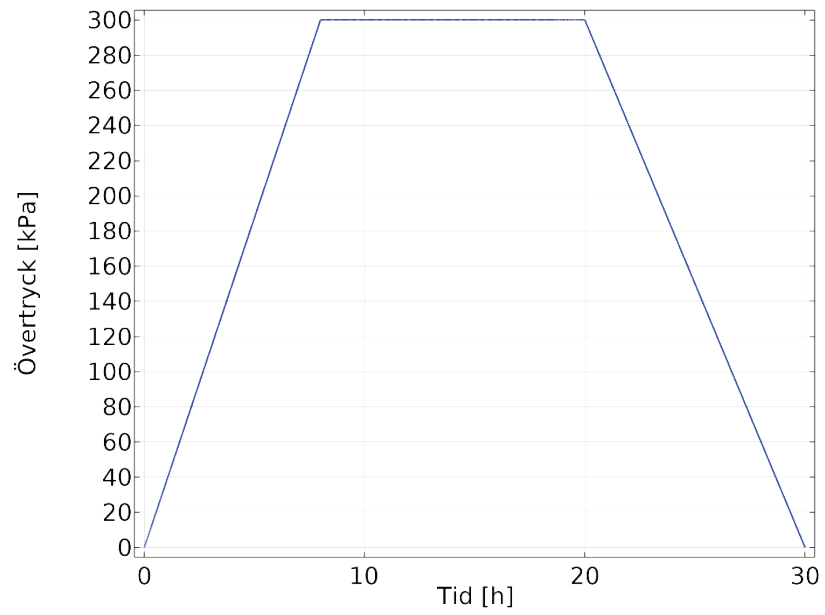
Temperaturen har antagits vara konstant inuti reaktorinneslutningen (30 °C) och utanför reaktorinneslutningen (10 °C). Det betyder att temperaturen vid tätplåten blir cirka 25 °C, se Figur 4-10. I figuren visas temperaturfördelningen i genomskärning från reaktorinneslutningens inneryta till tätplåten.



Figur 4-10 Temperaturfördelning i reaktorinneslutningens inre del (missilskyddet).

Den relativa fuktigheten har antagits vara konstant 50 % inuti reaktorinneslutningen. Relativa fuktigheten utanför reaktorinneslutningen har ingen betydelse eftersom tätplåten som är ingjuten 0,3 m från insidan är helt tät mot fukttransport.

Trycktestet som genomförs har en linjär tryckstegringsfas som pågår under 8 timmars tid från 0 till 300 kPa övertryck för att sedan under 14 timmar vara konstant 300 kPa. Sedan avslutas trycktestet genom att sänka trycket under 8 timmars tid, se Figur 4-11. Det första trycktestet antas ske 1 år efter att reaktorinneslutningen har tagits i drift och därefter antas trycktesterna ske var tredje år.



Figur 4-11 Tryckets variation med tiden under trycktestet.

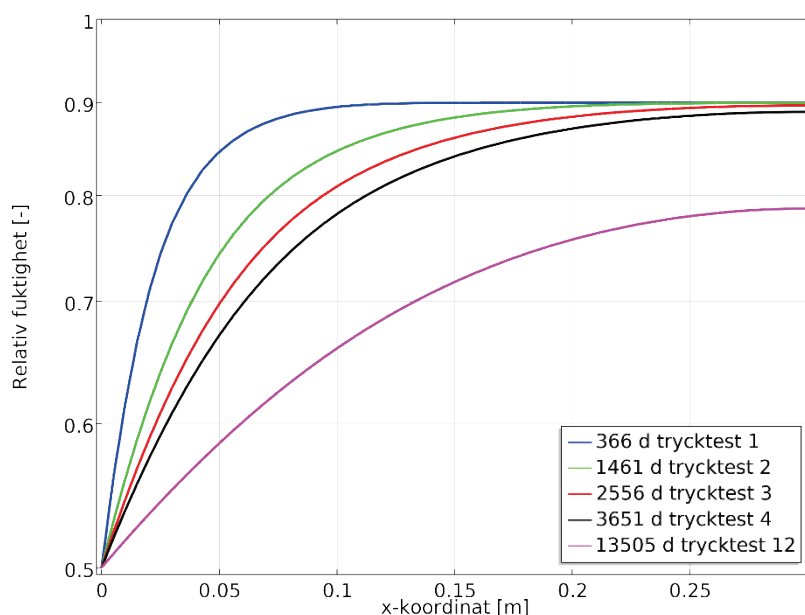
## 5 Resultat från elementarfall

I detta avsnitt presenteras resultaten från analyserna av elementarfallen. I dessa analyser beaktas även inverkan från olika exempel på skador i betongen och dess inverkan på gastransporten studeras.

Resultatet från simuleringarna redovisas och diskuteras i avsnitt 5.1 -5.4. Fuktfördelningen som visas i avsnitt 5.1, har stor betydelse för hur permeabiliteten i betongkonstruktionen varierar. Tryckfördelningen i väggen vid olika trycktester visas i avsnitt 5.2. I avsnitt 5.3 redovisas trycket vid tätplåten och hur det varierar med tiden vid tre olika trycktest och i avsnitt 5.4 redovisas hur syrekonzentrationen varierar med tiden vid dessa trycktest.

### 5.1 FUKTFÖRDELNING

Fuktfördelningen som råder vid de olika trycktesten visas i Figur 5-1. I analyserna förutsätts därmed att samma fuktfördelning råda för samtliga elementarfall.



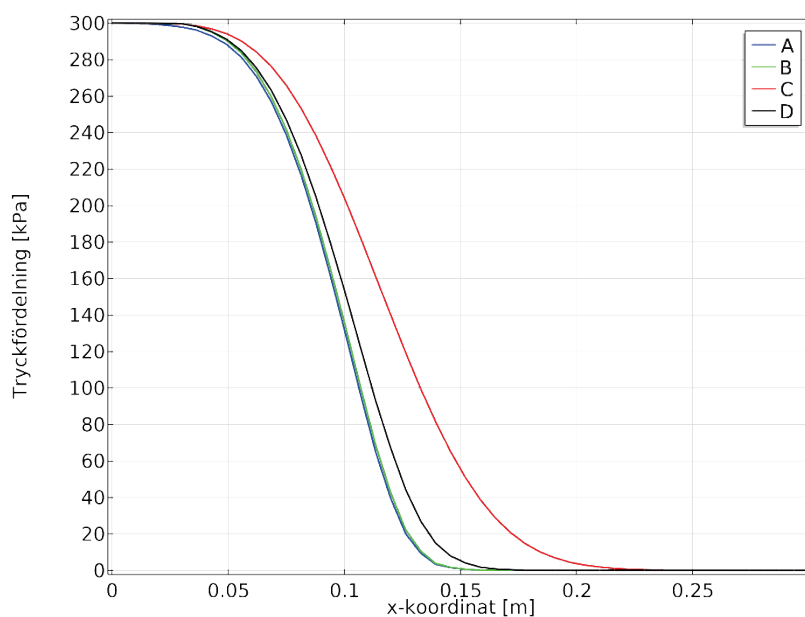
Figur 5-1 Fuktfördelning för den inre delen av reaktorinneslutningen vid tidpunkter för trycktester.

Fukttillståndet i den inre betongkonstruktionen är 50 % RF på ytan och 90 % RF vid tätplåten efter 1 års uttorkning i det konstanta klimatet, se blå heldragen linje i Figur 5-1. Efter ytterligare tre år är relativa fuktigheten lägre då ytterligare fukt har diffunderat ut från betongen, se grön heldragen linje i Figur 5-1. Notera att fuktigheten vid tätplåten fortsatt är väldigt hög och har endast påverkats marginellt av den relativt torra och varma miljön. Efter ytterligare sex år är fortfarande fuktigheten vid tätplåten cirka 89 % RF. Detta är ett full rimligt resultat då betongen är väldigt tät och har en mycket låg fuktransportkoefficient. Först vid det tolfte trycktestet, 37 år efter beräkningsstart, har fuktigheten sänkts signifikant vid tätplåten och är då cirka 78 % RF. Mätningar på en riktig reaktorinneslutning som utförts av Oxfall (2016), visar att relativa fuktigheten vid den inre tätplåten är

mellan 70 % RF och 80 % RF vilket är i samma storleksordning som resultatet från den här simuleringen.

## 5.2 TRYCKFÖRDELNING

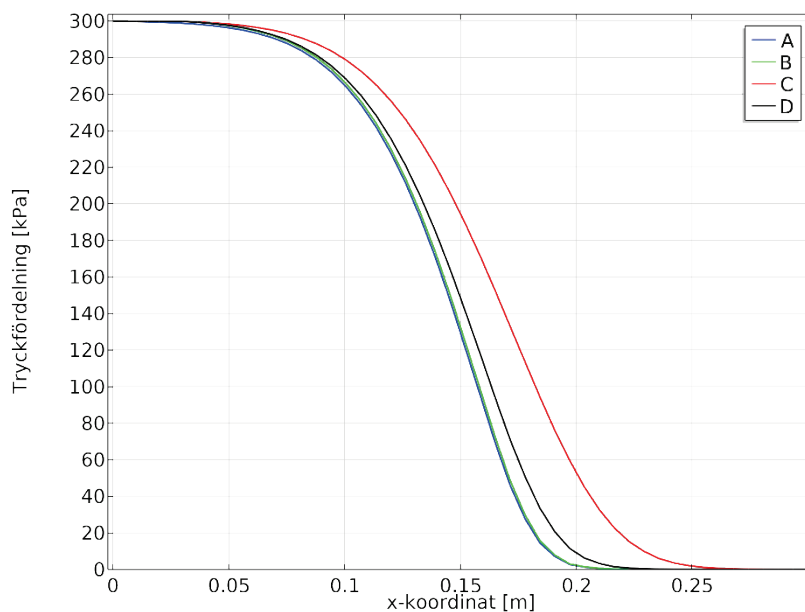
Tryckfördelningen genom missilskyddet längs med den inre randen, dvs sprickans läge i förekommande fall, för de olika elementarfallen A, B, C och D visas i Figur 5-2. På y-axlen visas det relativa trycket i kPa och på x-axeln visas x-koordinaten med den inre väggytan som 0 m och tätplåten motsvaras av x-koordinat 0,3 m. Figur 5-2 visar tryckfördelningen 20 timmar från starten på det första trycktestet, vid det ögonblick då trycket ska börja sänkas från 300 kPa, vid första trycktestet.



Figur 5-2 Tryckfördelning vid första trycktestet precis innan trycket sänks från maxnivån 300 kPa.

Trycket är cirka 300 kPa på en sträcka av ca 20 mm in i betongen, längre in i betongen är trycket lägre för att vara helt opåverkat ungefär 220 mm in i betongen. Elementarfall C, skadat ytskikt och en spricka som är 1 mm vid ytan och 0 mm vid tätplåten, är det värsta av de undersökta fallen. Elementarfall D som motsvarar ett skadat ytskikt och en spricka med 0,1 mm konstant sprickbredd är det näst värsta fallet och följs av B och slutligen A som motsvarar en helt oskadad betong. Som det framgår från figuren så är det liten skillnad i tryckfördelning ifall täcksiktet antas vara sprucket eller ej (dvs fall B respektive A).

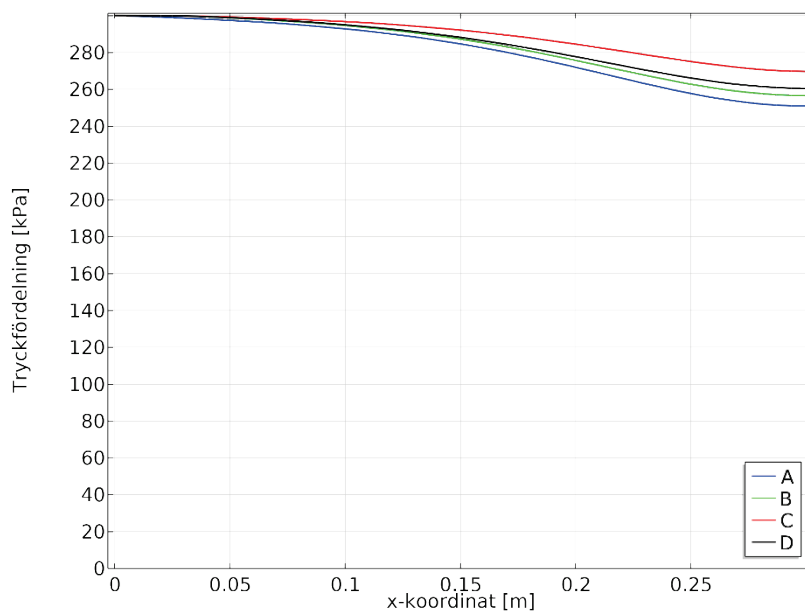
Figur 5-3 visar tryckfördelningen längs den inre randen, sprickans läge i förekommande fall, vid det fjärde trycktestet för de olika elementarfallen. I Figur 5-3 visas tryckfördelningen vid det fjärde trycktestet.



Figur 5-3 Tryckfördelning vid fjärde trycktestet precis innan trycket sänks från maxnivån 300 kPa.

Vid det fjärde trycktestet är trycket cirka 300 kPa ungefär 50 mm in i betongen. Längre in i betongen är trycket lägre och ungefär 260 mm in i betongen är trycket opåverkat. Sinsemellan påverkas tryckbilden på samma sätt som vid första trycktestet.

Figur 5-4 visar tryckfördelningen längs den inre randen, vid det tolfte trycktestet för de olika elementarfallen.



Figur 5-4 Tryckfördelning vid tolfte trycktestet precis innan trycket sänks från maxnivån 300 kPa.

Vid det tolfte trycktestet är trycket cirka 300 kPa ungefär 100 mm in i betongen. Längre in i betongen är trycket lägre men nu påverkas trycket markant också vid

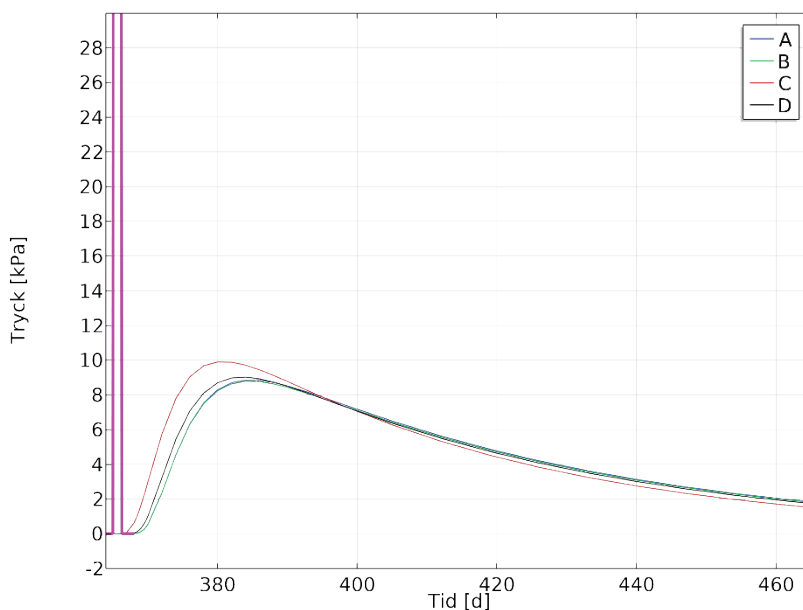


tätplåten under pågående trycktest. Vid tätplåten är nu trycket som lägst för den oskadade betongen, elementarfall A. Sinsemellan påverkas tryckbilden på samma sätt som vid första trycktestet.

### 5.3 TRYCK VID TÄTPLÅT

Trycket som uppnås vid tätplåten varierar med tiden och i det här avsnittet visas det relativa trycket som funktion av tiden vid det första, fjärde och tolfte trycktestet se Figur 5-5 t.o.m. Figur 5-7. Resultatet för de olika elementarfallen A, B, C och D presenteras i samtliga figurer tillsammans med lufttrycket som utövas på den inre betongytan vid trycktestet. I Figur 5-5 har y-axeln en skala som går från 0 - 30 kPa och x-axeln visar tiden från trycktestets start cirka 365 dygn från beräkningsstart och 100 dygn framåt i tiden. I Figur 5-6 och Figur 5-7 har y-axeln en skala som går från 0 - 300 kPa och x-axeln har en skala som går från 3650 dygn och 50 dygn respektive 9 dygn framåt i tiden.

I Figur 5-5 visas trycket vid tätplåten vid första trycktestet som utförs 365 dagar efter simuleringsstart.

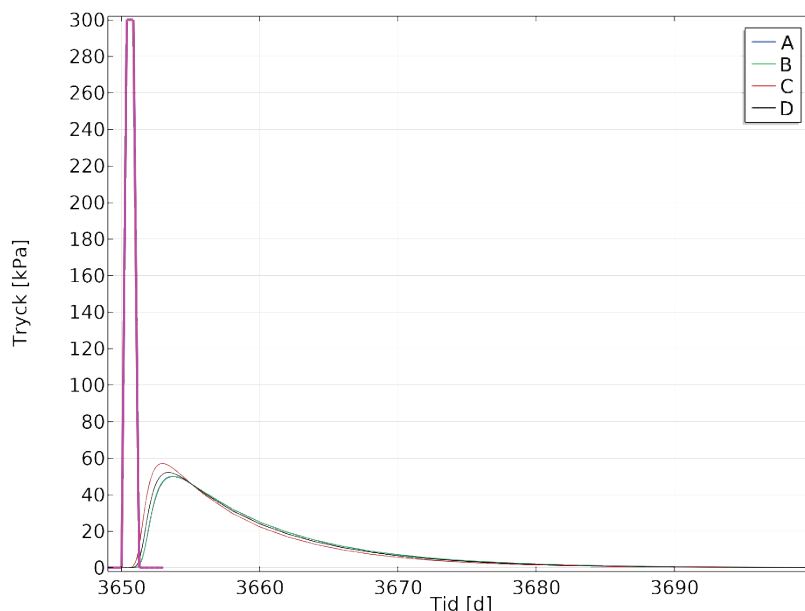


Figur 5-5 Lufttryck vid tätplåten med tiden och trycket på betongytan, trycktest 1.

Vid första trycktestet är betongen fuktig vilket innebär att permeabiliteten är väldigt låg. Trycket stiger därför sakta vid tätplåten och den inträngande luften ger en tryckökning av maximalt 10 kPa vilket är väldigt litet i förhållande till totaltrycket 100 kPa som råder innan trycktestet utförs. Den största tryckökningen sker i elementarfall, C, då ytskiktet är skadat samtidigt som en spricka förekommer som är 1 mm i ytan och 0 mm vid tätplåten. Tiden fram till maximalt tryck vid tätplåten är också kortast. Tidsfördröjning är cirka 15 dagar från trycktestet tills maxtrycket uppnås vid tätplåten vid elementarfall C. Elementarfall A, B och D visar alla ett lägre maximaltryck vid tätplåten och det sker också efter något längre tid cirka 20 dagar efter trycktestet. Sammantaget innebär detta att tryckökningen är cirka 10 % över referenstrycket (100 kPa) vilket i sin tur innebär att

syrekoncentrationen ( $\text{mol/m}^3$ ) ökar med som mest 10 % oavsett om betongen är oskadad eller inte.

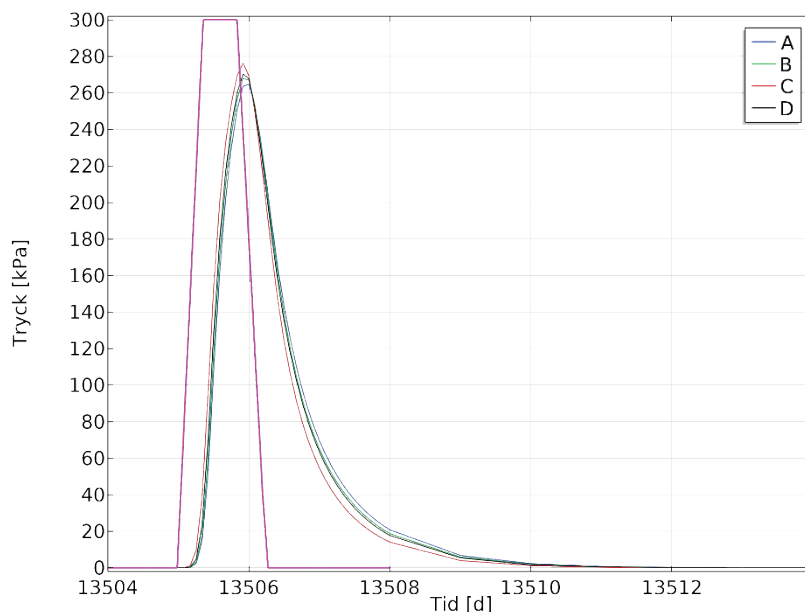
I Figur 5-6 visas trycket vid tätplåten vid trycktest 4, dvs efter 9 års ytterligare uttorkning.



Figur 5-6 Lufttryck vid tätplåten med tiden och trycktest 4.

Även i det här fallet är trycket störst vid elementarfall C där en spricka finns som har 1 mm sprickvidd i ytan och 0 mm sprickvidd vid tätplåten samtidigt som yttsiktet är skadat och har en 100 gånger högre permeabilitet än den intakta oskadade betongen. Redan cirka 1 dygn efter att trycktestet har avslutats så blir trycket vid tätplåten cirka 60 % högre än referenstrycket (100 kPa) innan trycktestet. Det maximala trycket är således 6 gånger högre än vad det var vid första trycktestet men det tar kortare tid innan trycket åter är lika stort som referenstrycket. Vid det fjärde trycktestet har betongkonstruktionen torkat ytterligare vilket innebär att permeabiliteten ökar. Detta innebär att påverkan vid tätplåten blir större men sker under en kortare tidsrymd.

I Figur 5-7 visas trycket vid tätplåten vid trycktest 12, dvs efter 37 års uttorkning.



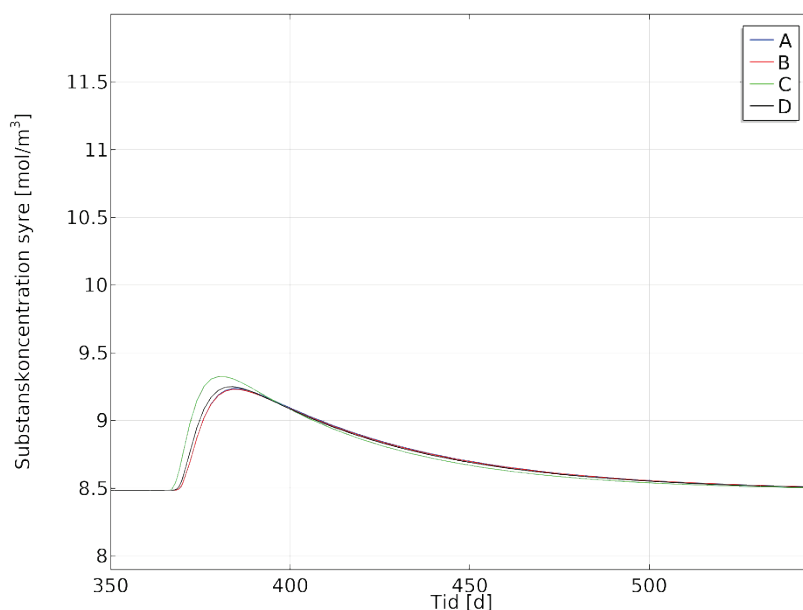
Figur 5-7 Lufttryck vid tätplåten med tiden och trycktest 12.

Precis som i föregående fall så sker den största tryckökningen vid elementarfall C, då ytskiktet antas vara skadat och det samtidigt finns en spricka som är 1 mm vid mynningen och 0 mm vid tätplåten. Resultatet från det här simulerade trycktestet visar att trycket vid tätplåten stiger till cirka 280 kPa i elementarfall C. Skillnaden mellan elementarfall C och de övriga är dock marginell. Tidsrymden under vilket trycket är större än referenstrycket är cirka 5 dygn i samtliga simulerade fall vilket innebär att det inte är så stor skillnad på den oskadade betongen och den skadade betongen. Det beror till stor del på att uttorkningen i konstruktionen har ökat permeabiliteten så mycket att övriga bidrag från skador och defekter inte får så stor betydelse.

#### 5.4 SYREKONCENTRATION VID TÄTPLÅT

Syrekoncentrationen vid tätplåten redovisas vid första, fjärde och tolfte trycktestet i mol/m<sup>3</sup> i Figur 5-8 t.o.m. Figur 5-10. Observera att syrekoncentrationen redovisas under olika tidsrymd, från cirka 180 dagar vid första trycktestet och ner till 10 dygn vid tolfte trycktestet. Basnivån för syrekoncentrationen vid de förhållanden som råder vid tätplåten är cirka 8,4 mol/m<sup>3</sup>, förutsatt att ingen korrosionsprocess är aktiv eller har varit aktiv.

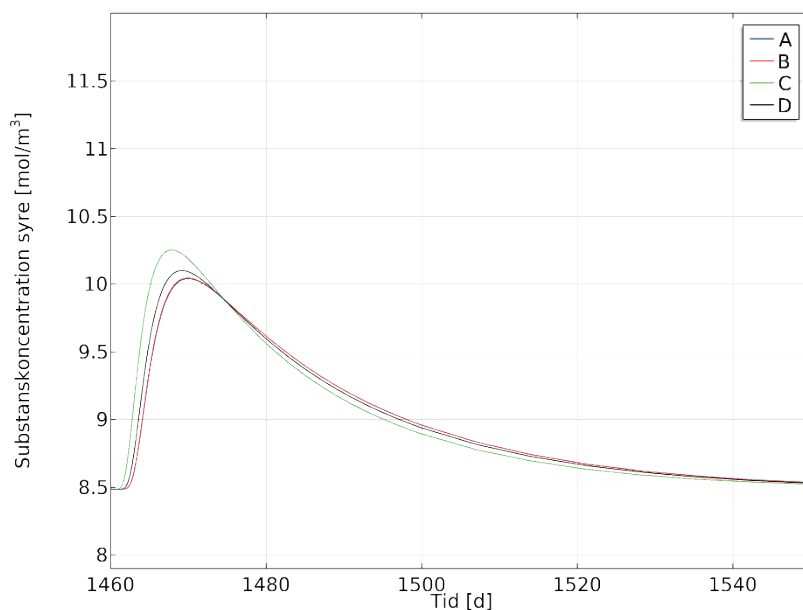
I Figur 5-8 visas den utvärderade syrekoncentrationen vid tätplåten i samband med första trycktestet under cirka 180 dygn.



Figur 5-8 Syrekonzentration i mol/m<sup>3</sup> vid tätplåten som funktion av tiden vid första trycktestet.

Figur 5-8 visar att syrekonzentrationen stiger med tiden i förhållande till basnivån under 15 dygns tid från 8,5 mol/m<sup>3</sup> vid 365 dygn upp till med cirka 9,3 mol/m<sup>3</sup> vid dygn 380 cirka. Efter att maximal syrekonzentration har inträffat så avtar syrekonzentrationen under cirka 180 dygn innan basnivån nås igen. Detta innebär att syrekonzentrationen är högre än basnivån under en relativt lång tid vilket kan påverka till korrosionsaktiviteten.

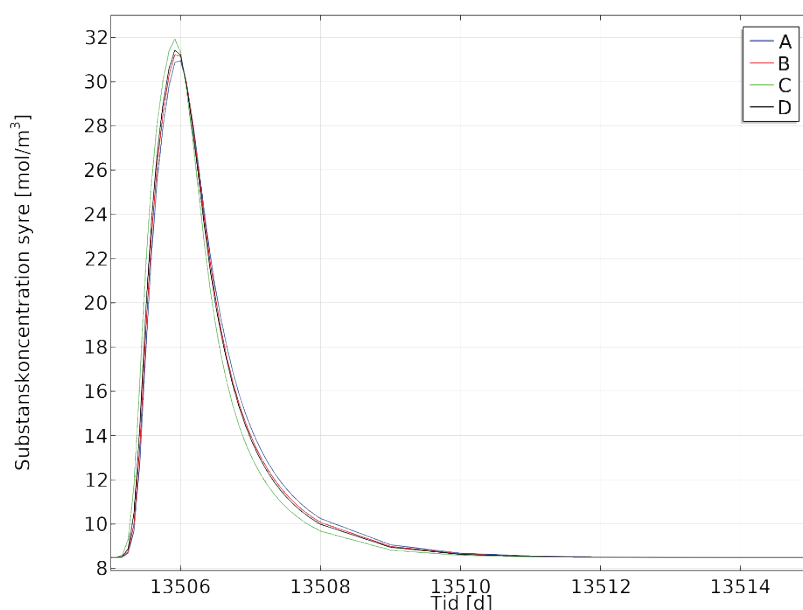
I Figur 5-9 visas utvärderad syrekonzentration vid tätplåten i samband med trycktest 4 under cirka 90 dygn.



Figur 5-9 Syrekonzentration i mol/m<sup>3</sup> vid tätplåten som funktion av tiden vid fjärde trycktestet.

Figur 5-9 visar hur syrekoncentrationen stiger från basnivån upp till maximalt 10,2 mol/m<sup>3</sup> under 5 cirka dygns tid. Detta är en betydligt högre maximal koncentration och den uppnås betydligt snabbare än vid trycktest 1. När den maximala syrekoncentrationen har uppnåtts sjunker nivån och återgår till basnivån efter cirka 90 dygn. Detta innebär att den förhöjda syrekoncentrationen vid tätplåten förvisso är högre än vid första trycktestet men å andra sidan är koncentrationen högre under kortare tid.

I Figur 5-10 visas utvärderad syrekoncentration vid tätplåten i samband med det tolfte trycktestet under cirka 10 dygn.



Figur 5-10 Syrekoncentration i mol/m<sup>3</sup> vid tätplåten som funktion av tiden vid tolfte trycktestet.

Figur 5-10 visar att syrekoncentrationen stiger kraftigt från basnivån och når vid maximal syrekoncentration cirka 32 mol/m<sup>3</sup> vilket är cirka 4 gånger högre än basnivån. Nivån uppnås endast något fördröjt med trycktestet för att sedan minska under cirka 2 dygns tid. Denna höga syrekoncentration är mycket kortvarigare jämfört med både det första och det fjärde trycktestet. Skillnaden mellan de olika simulerade elementarfallen minskar också vid det tolfte trycktestet.

De olika elementarfallen A-D uppvisar inte några stora skillnader. Notera att elementarfall C, vid samtliga trycktest, visar att koncentrationsnivån stiger upp till maxnivån snabbast men sjunker också snabbast. Detta kan innebära att tiden för en eventuell ökad korrosionsaktivitet reduceras men att maxkoncentrationen ökar.

Förutsatt att korrosionsaktiviteten är direkt proportionell mot syrekoncentrationen så ökar aktiviteten marginellt vid första trycktestet, men pågår under en lång tid, cirka 180 dagar. Vid det tolfte trycktestet ökar korrosionsaktiviteten dramatiskt, givet att den är direkt proportionell mot syrekoncentrationen, men aktivitetsoökningen sker under ett betydligt kortare tidsförlopp, cirka 2 dygn.

Om korrosion har förekommit eller pågår kan syrekonzentrationen vara lägre i närheten av tätplåten, än vad simuleringarna visar, i och med att syre binds/konsumeras i korrosionsprocessen.

## 6 Åtgång av syre vid korrosionsprocess

**Tillgång på syre är väsentligt för att korrosionsprocessen ska initieras och fortgå. I detta kapitel presenteras en teoretisk studie på vilken mängd syre som krävs för korrosionsprocessen.**

Korrosionens hastighet styrs av potentialskillnaden, elektrolytens ledningsförmåga och storleksförhållandet mellan anodens och katodens ytor. Korrosionsprocessen beskrivs i Kapitel 3. I detta kapitel görs en bedömning av hur mycket syre som krävs för att upprätthålla korrosionsprocessen vid en viss korrosionshastighet. Bedömningen utgår ifrån antagandet att korrosionsprocessen enbart styrs av syretillgången, eventuell inverkan av potentialskillnad och elektrolytens ledningsförmåga beaktas inte.

Korrosionshastigheten uttryckt som inträngning av korrosionsfront i stålet (m/s) är ett mått på syreförbrukningen,  $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  på metallens yta. Med antagandet att två syreatomer och en järnatom ingår i korrosionsprocessen blir viktsförhållandet mellan syre- och järnatomer som ingår i korrosionsprocessen enligt beskrivs enligt ekvation 19,

$$\frac{m_O}{m_{Fe}} = \frac{2 \times \bar{M}_O}{\bar{M}_{Fe}} = \frac{2 \times 16}{56} = 0,57 \quad (19)$$

där,

$m$  = reagerad massa ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$\bar{M}$  = Atomvikt

Indexen anger ämnen syre (O) respektive järn (Fe). I verkligheten deltar ett mindre antal syreatomer per järnatom i korrosionsprocessen.

Syreförbrukningen per korroderat skikt beskrivs med ekvation (20),:

$$m_O = 0,57 \cdot \rho_{Fe} \cdot t_{korr} \quad (\text{kg}/\text{m}^2) \quad (20)$$

där,

$\rho_{Fe}$  = järnets densitet =  $7800 \text{ (kg}/\text{m}^3)$

$t_{korr}$  = det korroderade skiktets tjocklek (m)

Syreförbrukningshastigheten  $\dot{m}_O$ ,  $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , kan beräknas genom att  $t_{korr}$  i ekvation (20) ersätts med  $\dot{t}_{korr}$  (m/s) korrosionshastighet uttryckt som inträngning av korrosionsfront i materialet per tidsenhet, se ekvation (21).

$$\dot{m}_O = 0,57 \cdot \rho_{Fe} \cdot \dot{t}_{korr} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})) \quad (21)$$

Korrosionshastigheten beror på betongens resistivitet ( $k\Omega\text{cm}$ ), potentialskillnad (mV) samt korrosionsström ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Samtliga parametrar beror på betongens fuktighet, temperatur, pH och kontaktakten mellan betong och stål. Dessa parametrar är svåra att kvantifiera. Men anta att betongens pH är så lågt att stålet

inte blir passiverat samt att betongens fuktighet är tillräcklig hög så att den kan bilda en sammanhängande elektrolyt över stålets yta. De beskriver antagandena medför att tätplåtens tillstånd med avseende på korrosion blir likt en armeringsstång i karbonatiserad betong. Det finns data om korrosionshastighet hos armeringsstång i litteraturen, se Tabell 6-1.

**Tabell 6-1 Korrosionshastighet som funktion av betongens relativa fuktighet. Från Concrete Repair Manual 2003).**

RH i betong	Korrosionshastighet [ $\mu\text{m}/\text{år}$ ]			
	Karbonatiserad betong			Kloridinfererad
	Bertolini	Sergi	Tuutti	Tuutti
< 50	0.1	0.03	0.01	0.1
50 - 60	0.2	0.06	0.01	0.2
60 - 70	0.3	0.1	0.02	2.0
70 - 80	0.5	0.3	0.05	10.0
80 - 90	1.0	1.0	1.0	20.0
90 - 98	10.0	5.0	10.0	50.0
> 98	0.1	N/A	0.1	< 10.0

Med förutsättningen att betongens RF intill plåten är 80-90 % och att stålet inte är passivt blir korrosionshastigheten  $1,0 \mu\text{m}/\text{år}$ . Insättning av korrosionshastigheten i ekvation (21) leder till:  $\dot{m}_o = 4,4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ . I tabellen framgår tydligt att för relativa fuktigheter lägre än 80 % så fås en signifikant lägre korrosionshastighet. Det innebär dels att korrosion skulle ske mycket långsammare men även att ännu mindre mängd syre krävs för att driva processen.

Syreförbrukningen  $4,4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$  gäller för det fall där hela tätplåten korroderar. Det är naturligtvis ett grovt antagande. Normalt uppstår lokal korrosion eller punktkorrosion, d.v.s. att korrosionen är koncentrerad på ett ställe, t.ex. på en cirkulär yta med 30 mm diameter. Det är svårt att bestämma ytans korrosionshastighet. Om vi antar att korrosionshastigheten är som fallet för kloridangrepp då kan inträngningsdjupet bli  $20,0 \mu\text{m}/\text{år}$ . Insättning av inträngningshastigheten i ekvation (21) och med beaktande av cirkelns yta blir syreförbrukningen  $0,062 \text{ g}/\text{år}$ .

Antag att det finns en 2 mm spalt mellan tätplåten och betongen. Enligt avsnitt 2.3 finns vid atmosfärstrycket (101,3 kPa) och temperaturen  $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $275 \text{ g}/\text{m}^3$  syre i spalten, vilket motsvarar  $0,55 \text{ g}/\text{m}^2$  i spalten. Om trycket ökas till 400 kPa och temperaturen går upp till  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  blir den tillgängliga mängden syre i spalten  $1086 \text{ g}/\text{m}^3$ , vilken motsvarar  $2,17 \text{ g}/\text{m}^2$ .

Syremängden i betong kan beräknas om det fria porutrymmet, d.v.s. betongens porvolym minus den volymandel som upptas av fukten. Här bortses, dock, från den syremängd som löses i porvattnet. Om det fria porutrymmet är  $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , blir syremängden  $38,5 \text{ g}/\text{m}^3$  vid atmosfärstryck (101,3 kPa) och temperaturen  $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Motsvarande mängd vid 400 kPa tryck och  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  temperatur blir  $152 \text{ g}/\text{m}^3$ . Om betongens tjocklek är 0,3 m blir syremängderna 11,6 respektive  $45,6 \text{ g}/\text{m}^2$  vid de olika fallen.



Resultaten i detta kapitel visar att det finns tillräcklig mängd syre för att driva korrosionsprocessen om de övriga villkoren är uppfyllda. Korrosionshastigheten styrs, dock, av syrets omsättning vid de katodytor som driver korrosionsprocessen.

## 7 Slutsatser och fortsatt forskning

**I detta avsnitt sammanfattas de huvudsakliga slutsatser och förslag på fortsatt forskning som identifierats i denna förstudie. Resultatet har visat att det finns tillräckligt med syre vid tätplåten som krävs för korrosionsprocessen, dock visar analyserna att detta förlopp är mycket kortvarigt i samband med trycktester.**

Den intakta oskadade betongen är till en början väldigt tät och permeabiliteten är väldigt låg. Det finns två avgörande skäl till detta det främsta skälet är att betongen är väldigt fuktig i ett tidigt skede, det andra skälet är att betong med lågt vct (0,45) är väldigt tät oavsett fuktighet. Gastransport sker primärt i den luftfyllda delen av porvolymen och därmed sker gastransporten med lägre hastighet om betongen har hög relativ fuktighet så att porvolymen till stor del är fylld med vatten.

I detta projekt har olika elementarfall analyserats i syfte att utreda mängden syre som transporteras till tätplåten i samband med trycktester vid olika typer av potentiella skador i betongen. Dessa skador har antagits vara finfördelade sprickor i täcksiktet, genomgående spricka respektive en bred ytspricka som avtar med sprickdjup. Analyserna har även beaktat inverkan från åldring av reaktorinneslutningarna där uttorkningsprocessen har beaktats. Oavsett skadetyper så kommer skador att innebära att trycket och syrenivån vid tätplåten kommer att stiga under en kort tidsrymd vid trycktestet. Ju längre tid som går och ju mer som konstruktionen torkar så kommer skillnaden mellan skadad och oskadad konstruktion att minska successivt. De genomförda trycktesten förväntas dock inte att signifikant öka korrosionen på tätplåten, eftersom detta sker under korta förlopp.

De materialegenskaper som har använts i beräkningarna har naturligtvis betydelse för beräkningsresultatet i absolutvärde, dock har de mindre betydelse relativt varandra. Om betongen i verkligheten skulle ha en lägre permeabilitet än antaget skulle trycket, och därmed också mängden syre, få en längre varaktighet men samtidigt också en lägre koncentrationsnivå ( $\text{mol/m}^3$ ). Om fuktigheten skulle vara högre än antaget skulle tätheten vara större vilket innebär samma typ av förändring som om permeabiliteten skulle vara lägre.

Egenskaperna och den använda modellen för sprickan har stor inverkan på beräkningsresultatet för elementarfall C och D. En otätare spricka skulle öka syrekonzentrationen lokalt vid sprickan men påverkan av trycktestet skulle samtidigt bli kortvarigare. Om tätplåten står i "direkt kontakt" med trycktestets tryckökning så följer syrekonzentrationen trycktestets varaktighet vilket innebär att syrekonzentrationen avtar lika fort som trycket sänks. En spricka med lägre permeabilitet eller mindre sprickvidd skulle ge ett resultat som mer liknar resultatet med den homogena oskadade betongen.

Betong är i sig inert med syre och det syre som kommer in i betongen binds inte in i materialstrukturen, därmed sker heller inte någon ackumulering av syre på det sättet. Däremot kan luft lösas upp porlösningen och så bedöms också ske. Dock

sker denna upplösning av luft i vatten genom en diffusionsprocess vilket innebär att det tar tid. Diffusionsprocessen tillsammans med den kortvariga påverkan från trycktestet bedöms vara av helt underordnad betydelse i jämförelse med den koncentrationsökning som sker vid respektive trycktest.

## 7.1 FORTSATT FORSKNING

Resultaten från den här förstudien visar att en viss mängd syre transporteras in till tätplåten i samband med trycktester och att det åtgår en relativt liten mängd syre för själva korrosionsprocessen. Det går dock inte (och var heller inte avsikten) från föreliggande förstudie att bedöma korrosionsprocessen vid tätplåten orsakat av denna ökning av syrekoncentrationen. Denna ökande syremängd finns dessutom tillgänglig under ett relativt kort tidsförlopp i anslutning till trycktesterna. En slutsats från projektet är dock att framtida studier fokuserar på att studera hur och om korrosionsprocessen initieras och i så fall hur länge den processen fortgår p.g.a. en kortvarig ökning av syrekoncentration p.g.a. trycktester.

Det är därför viktigt att framtida studier fokuserar på detta och syftar till att beakta hur långt korrosionsprocessen kan fortgå då ökningen av syrekoncentration sker under ett kortvarigt förlopp. Dessutom, i takt med att syre förbrukas i korrosionsprocessen, så kommer luftens sammansättning intill tätplåten att påverkas. Om korrosion har skett så bör det finnas ett syreunderskott direkt i anslutning till tätplåten. Efterföljande trycktester kan därmed resultera i att öka mängden syre i detta område vilket kortvarigt skulle kunna få korrosionsprocessen att fortgå. Hur detta påverkar korrosionsförloppet och inverkan från efterföljande trycktester är därför viktigt att studera i fortsättningen.

En tydligare kartläggning av korrosionsskador vid tätplåtar är viktig för att kunna bedöma vikten av korrosion initierad av syrekoncentration i samband med trycktester. Som tidigare påpekats finns, enligt författarnas kunskap, ingen information om korrosionsskador som har initieras på grund av syretransport genom missilskyddet till följd av trycktester. Den dokumentation som presenterar korrosionsskador på tätplåten avser skador där klorider transporterats utifrån och in till tätplåten eller att det funnits inbyggda defekter så som kvarvarande organiskt material i anslutning till tätplåten.

För att prediktera korrosionsförloppet krävs även en utvärdering av möjligheten att simulera korrosionsprocessen hos ingjutet stål gods. Detta kan t.ex. göras med en vidareutveckling av den modell som tillämpats i denna förstudie, så att den även beaktar kemisk transport, se t.ex. Ozbolt m.fl. (2017), eller till och med elektrokemisk transport, Fontes och Nistad (2019). Med dessa typer av modeller skulle det vara möjligt att prediktera korrosionsprocessen vid en ingjuten tätplåt och utifrån detta bedöma risken för att korrosion kan inträffa med avseende på tillgången på syre från trycktester.

## 8 Referenser

- Ahlström, J. Corrosion of steel in concrete at various moisture and chloride levels. Lic. Thesis, Lund Technical University, 2014.
- Bernstone, C., Gasch, T., Åhs, M., Malm R. Verifiering av struktur- och fuktmekaniska beräkningsverktyg. Energiforsk report 2017:432. 2017
- Blomfors, M. Assessment of concrete structures including corrosion and cracks. PhD thesis. Chalmers Technical University, 2020.
- 10 CFR 50, PART 50 – Domestic licensing of production and utilization facilities. United States Nuclear Regulatory Commission, 2020.  
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/index.html>
- Concrete repair manual. Corrosion rate measurement. FINAL DRAFT. Concrete Repair Manual, Second edition, Volume 1, 2003, ACI, BRE, ICRI, PP 443 - 477. 2003
- Darcy, H., Les fontaines publiques de la ville de Dijon exposition et application des principes a suivre et des formules a employer dans les questions de distribution d'eau. 1856: Dalmont, V.
- DIN 50929. Corrosion of metals; probability of corrosion of metallic materials when subject to corrosion from the outside; buried and underwater pipelines and structural components. 1985
- Dunn, D., Pulvirenti, A., Klein, P. Containment liner corrosion. US Nuclear Regulatory Commission. 2011.  
<https://www.nrc.gov/docs/ML1121/ML112140119.pdf>
- Fagerlund. YtrepARATION av betongkonstruktioner: metoder, beständighet. Report TVBM; Vol. 3160. Lunds tekniska högskola. 2011.
- Fredlund, P. and L.O. Nilsson, Gasinträngning i reaktorinneslutningar av betong - mätningar och modellering. 2009.
- Fontes, E., Nistad, B. Modelling corrosion and corrosion protection. White paper, Comsol. 2019.
- Hassanzadeh, M., Enzell, J., Malm, R., Inverkan från undergrund och bränslebassänger vid jordbävningsanalyser på svensk kokvattenreaktor. SSM (in press). 202x.
- Haynes. CRC Handbook of chemistry and physics 93rd edition, 2012. CRC press.
- Jeon, C.-H., Lee, J.-B., Lon, S., Shim, C.-S. Equivalent material model of corroded prestressing steel strand, Journal of Materials Research and Technology. 2019.
- Könönen M. Temperature induced stresses in a reactor containment building: A case study of Forsmark F1. MSc thesis 349, KTH Royal Institute of Technology. 2012.
- Laplace, P.S., Traité de mécanique céleste. 1807, Courcier, Paris. p. 1-78.

- Laplace, P.S., *Traité de mécanique céleste*. 1806, Courcier, Paris. p. 1-67.
- Malm, R., Johansson, F., Hellgren, R., Rios Bayona, F. Load capacity of grouted rock bolts due to degradation. *Energiforsk report 2017:374*. 2017
- Neville, A.M., *Properties of Concrete*. 5:th ed. 2011: Pearson Education Limited.
- Oxfall, M., *Climatic conditions inside nuclear reactor containments - Monitoring campaign*. Licentiate thesis. Lund University. 2013.
- Oxfall, M. *Climatic conditions inside nuclear reactor containments: Evaluation of moisture condition in the concrete within reactor containments and interaction with the ambient compartments*. PhD thesis,, Lund University. 2016
- Ozbolt, J., Orsanic, F., Balabanic, G. Modelling processes related to corrosion of reinforcement in concrete: coupled 3D finite element model. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol, 13, 2017, pp 135- 146.
- Persson, B. and L.-C. Böiers, *Analys i flera variabler*. 1992: Studentlitteratur.
- Roth, T., Silfwerbrand, J., Sundquist, H. *Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk – En sammanställning över konstruktion och material*. SKI report 02:59. 2002.
- Shayanfar, M. A., Barkhordari, M. A. Ghanooni-Bagha, M. Effect of longitudinal rebar corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure, *Advances in Structural Engineering* 19 (6) (2016) 897–907.
- Sutherland, B.P. and O. Maass, MEASUREMENT OF THE VISCOSITY OF GASES OVER A LARGE TEMPERATURE RANGE. *Canadian Journal of Research*, 1932. 6(4): p. 428-443.
- Thomson, W. *On the Equilibrium of Vapour at a Curved Surface of Liquid*. in *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*. 1871.
- US Nuclear Regulatory Commission (NRC), 10 CFR 50 Appendix J, Primary Reactor Containment Leakage Testing For Water-Cooled Power Reactors, 1995.
- Windelhed K., Lagerblad B., Sandberg B. *Cementingjutna bultars beständighet*. SveBeFo rapport 58. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning. 2002
- Åhs, M., Malm, R., Bernstone, C., Könönen, M. *Reaktorinneslutningars mekaniska långtidsbeteende – Vercors Fas II*. *Energiforsk report 2019:632*. 2019.

# SYRETRANSPORT GENOM REAKTOR- INNESLUTNINGAR OCH KORROSION AV INGJUTNA TÄTPLÅTAR

Vid svenska reaktorinneslutningar är tätplåten ingjuten för att skyddas mot skada. För att kontrollera tätplåtens tätande funktion genomförs återkommande trycktester för att kontrollera att läckage i inneslutningen inte uppstår. Här har forskarna studerat vilken mängd syre som kan transporteras fram till tätplåten i samband med trycktester. Tillgång till syre är en viktig förutsättning för att en eventuell korrosionsprocess ska kunna uppstå.

Resultaten visar att för nybyggd betong som inte har spruckit, sker gastransporten mycket långsamt vilket till stor del beror på att betongens porer är fyllda med vatten. När betongen torkar minskar vattenvolymen och gastransporten ökar.

Analyserna visar också att om det finns förutsättningar för korrosion så kommer endast en liten mängd syre att behövas för att driva korrosionsprocessen.

## 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](http://www.energiforsk.se)