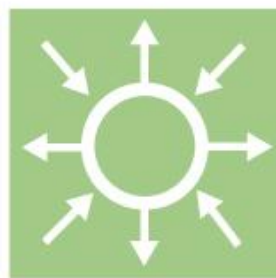


Gasinträngning i reaktorinne- slutningar av betong

Mätningar och modellering

Elforsk rapport 09:101



Per Fredlund, Lars-Olof Nilsson

September 2009

ELFORSK

Gasinträngning i reaktorinne- slutningar av betong

Mätningar och modellering

Elforsk rapport 09:101

Förord

Sedan 2007 pågår inom Elforsk ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att både bygga upp kompetens inom området och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland. Inom ramen för detta forskningsprogram har föreliggande projekt " Gasinträngning i reaktorinneslutningar av betong" beställts.

Projektet har utförts vid avdelningen för byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola. De som medverkat i projektet är främst doktoranden Per Fredlund, handledaren Lars-Olof Nilsson samt forskningsingenjörerna Bo Johansson och Stefan Backe. Personalen vid Ringhals kärnkraftverk har medverkat med synpunkter och kommentarer under projektets gång samt varit behjälpliga vid fältmätningar och lånat ut utrustning för laboratoriemätningarna.

Projektet har följts av Betongprogrammets styrgrupp bestående av Jonas Bergfors EON OKG, Jan Gustavsson och Urban Broms Vattenfall Ringhals, Christian Bernstone och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development, Kostas Xanthopoulos SSM, Lars-Erik Berglund, Marcus Edin och Philip Persson Vattenfall Forsmark samt Juha Riihimäki TVO. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och kommentarer.

Elforsk i september 2009

Lars Wrangensten

Programområde Kärnkraft

Sammanfattning

Reaktorinneslutningar i svenska kärnkraftverk består av en cylinderformad betongbehållare. Inuti denna finns det en stor volym betong i olika balkar, pelare och fundament för utrustningar och installationer. Betongbehållaren har en helsvetsad stålplåt som skall fungera som en lufttät barriär. Huvudmålet med projektet har varit att utveckla en simuleringsmodell som beskriver den transienta lufttrycksfördelningen i betongen för att se om de läckflöden som mäts vid en tryckprovning kan förklaras med luftflöden in i betongen och tryckökning där.

En partiell differentialekvation (PDE) har ställts upp som beskriver tryckfördelningen i betongens porsystem. Modellen har validerats mot experimentella resultat genom att använda en kommersiell programvara, Comsol Multiphysics. En förenklad finita-differensmodell har också utvecklats i Excel. Permeabiliteten och andra materialegenskaper hos relevanta betonger har bestämts. En laboratorieuppställning har använts för verifiering. Vid två tryckprovningar i Ringhals R2 och R4 har fältmätningar utförts. Fukt- och tryckprofiler i flera olika punkter har mätts upp.

Simuleringsmodellerna visar att, teoretiskt, finns det betydande luftflöden in i betongkonstruktionerna och summan av dessa luftflöden medför att massan hos luften i inneslutningen minskar med tiden under en tryckprovning och därmed fås en trycksänkning. Förekomsten av dessa processer styrks av tryckmätningarna på olika djup i betongen. Det står alldeles klart från mätningarna att det blir en stor tryckhöjning inne i betongen, också på mycket stora djup, och dessa tryck fortsätter att stiga under en viss tid efter att trycket i inneslutningen har återgått till atmosfärstryck.

Simuleringsmodellerna är mycket användbara men kräver detaljerad information om geometrin och materialegenskaperna hos betongen och epoxibehandlingen på betongytorna. Modellerna skulle kunna förbättras genom att också inkludera fuktberoendet och tryckberoendet hos permeabiliteten liksom lösningen av luft i porvattnet.

Summary

Reactor containments in Sweden mainly consist of large cylinder shaped constructions made of reinforced concrete. There is also a lot of concrete inside the containments in the form of beams, walls and foundations. Inside the concrete cylinder shell a steel liner is embedded which acts as a leak-tight barrier. The main objective of the project was to develop a simulation model that describes transient air pressure distribution in concrete in order to see if the leakage rates obtained from the CILRT (Containment Integrated Leakage Rate Tests) can be explained by the transient air pressurization of concrete pores inside the steel liner.

A partial differential equation (PDE) was derived which describes transient air pressure distribution in concrete pores. The model was validated against experimental results using the computer software Comsol Multiphysics. A simplified finite differences model was also developed in Excel. The permeability and other material properties of relevant concretes were measured. A laboratory test setup was used for verification. At two occasions measurements were done during a pressure test at Ringhals R2 and R4 respectively. Moisture and pressure profiles were measured at various points in the concrete structures.

The simulation model shows that that, theoretically, there is significant air fluxes into the concrete structures and that the sum of these fluxes reduces the mass of air inside the containment during a pressure test. Consequently, this mass loss significantly reduces the air pressure during the test. These processes are strongly supported by the pressure measurements at different depths in the concrete. It is quite clear from the measurements that there is a tremendous rise in air pressure also at large depths, even after the pressure is lowered after the test.

The simulation models are quite applicable but require detailed knowledge on the geometry and material properties of the concrete and the epoxy coatings at the concrete surfaces. The models could be improved also by including the effect of different moisture contents at different depths, the pressure dependency of the permeability and the dissolution of air into the moisture in the pore system.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Täthetsprovning	1
1.3	Syfte	6
2	Teori	7
2.1	Antaganden	7
2.2	Ekvationer	7
2.3	Härledning	9
2.4	Temperatureffekter	13
2.5	Krypning	14
2.6	Effekt av luftens löslighet	16
3	Simulering av täthetsprovning	17
3.1	Beräkningsverktyg	17
3.2	1D-modell	17
3.2.1	Simulering av R2-CAT-07	18
3.3	3D-modell	19
3.3.1	3D-modell i AutoCad	19
3.3.2	Modifiering av 3D-modellen	20
3.3.3	Exempel på simuleringsresultat från 3D-modellen	20
3.3.4	Komplettering av 3D-modellen	24
3.3.5	Slutsatser för 3D-modellen	25
3.4	Multipel 1D-modell i kalkylblad	25
3.4.1	Teoretisk bakgrund	26
3.4.2	Numerisk lösning	29
3.4.3	Hela tryckförloppet	30
3.4.4	Excelmodellen	31
3.4.5	Verifiering av Excelmodellen	34
4	Gas- och materialegenskaper	37
4.1	Gasens egenskaper	37
4.1.1	Molvikt	37
4.1.2	Allmänna gaskonstanten, R	37
4.1.3	Luftens temperatur, T	37
4.1.4	Luftens viskositet, μ	37
4.2	Materialegenskaper	38
4.2.1	Cembureau Permeabilitetsutrustning	38
4.2.2	Metod för bestämning av lufttillgänglig porositet	40
4.2.3	Provkroppar	40
4.2.4	Resultat	43
5	Verifieringsförsök i laboratoriet	45
5.1	Provkroppar	45
5.2	Försök	46
5.3	Resultat	46
5.3.1	Tryckprovning 1	46
5.3.2	Tryckprovning 2	48
5.4	Simulering av verifieringsförsök	50
6	Fältmätningar	52
6.1	Tryck- och RF-mätning i R2, 2007	52
6.1.1	RF-mätningar	52

6.1.2	Tryckmätningar	53
6.1.3	Temperaturmätningar	54
6.2	Utvärdering av ny tätningsmetod	55
6.2.1	Metod och utrustning	55
6.2.2	Resultat.....	55
6.2.3	Slutsatser	59
6.3	Tryck- och RF-mätning i R4, 2008	59
6.3.1	RF-mätningar.....	59
6.3.2	Tryckmätningar	61
7	Diskussion och slutsatser	63
8	Referenser	65

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Kärnkraftverkens reaktorinneslutningar har mycket stränga krav på täthet och täthetsprovas därför regelbundet. Reaktorinneslutningen består av de yttre betongkonstruktionerna som bildar inneslutningen (bottenplatta, cylindervägg och kupol) samt den inre betongkonstruktionen som bär upp reaktortank och andra huvudkomponenter och rörledningar. De yttre betongkonstruktionerna, normalt kallade reaktorinneslutningen, skall uppfylla täthetskrav för att innesluta radioaktiva ämnen som kan frigöras vid ett haveri. För att visa att inneslutningarna är täta genomförs täthetsprovningar regelbundet.

I Sverige täthetsprovas inneslutningarna tre gånger per tio år.

Inneslutningarna har alltid klarat proven med tillfredställande marginal.

För närvarande pågår en utveckling mot glesare intervall för täthetsprovningarna. I USA täthetsprovas reaktorinneslutningarna redan en gång per tio år och nu förlängs detta intervall till en gång per femton eller tjugo år.

Det finns en rad villkor som skall uppfyllas för att en övergång till längre intervall skall accepteras. Bland annat skall tidigare provningar vara godkända och trenden visa att reaktorinneslutningarna klarar täthetskraven även efter en förlängning.

De svenska reaktorinneslutningarna är byggda av armerad betong med en tätplåt i betongen. På insidan av tätplåten finns alltså ett lager av betong, ca 300 mm tjockt. Även inne i inneslutningen finns mycket betong i form av bjälklag, väggar och fundament. Stora delar av betongen är målad med en tät färg.

När reaktorinneslutningarna täthetsprovas trycksätts inneslutningarna till beräknat haveritryck, ca 4 bar, alternativt halva haveritrycket, dvs. 2 bar. Därefter beräknas läckaget ur inneslutningen genom att mäta hur lufttrycket sjunker med tiden. Vid trycksättning och mätning av läckaget är det osäkert hur stor andel av porerna i betongen som är trycksatta. Eftersom betongvolymen i en reaktorinneslutning är mycket stor kan det kanske vara så att det läckage som registreras inte är läckage ut ur inneslutningen utan läckage in i i betongens porer.

En förlängning av provningsintervallen för Sveriges reaktorinneslutningar har stor ekonomisk potential. För närvarande provas tio reaktorinneslutningar tre gånger per tio år, d v s tre inneslutningar per år. Varje provning orsakar ett produktionsbortfall värt ca 15 miljoner kr.

1.2 Täthetsprovning

I detta kapitel ges en kort beskrivning av hur en täthetsprovning av en reaktorinneslutning går till samt hur läckaget beräknas. Framställningen bygger på standarden Ansi/Ans-56.8-1994.

Reaktorinneslutningen består av de yttre betongkonstruktionerna som bildar inneslutningen (bottenplatta, cylindervägg och kupol) samt den inre betongkonstruktionen som bär upp reaktortank och andra huvudkomponenter

och rörledningar. Denna konstruktion är byggd för att klara av den tryckhöjning som kan uppstå hos den inneslutande gasen vid ett rörbrott. Dess funktion är att hindra radioaktiva ämnen att komma ut i omgivningen. För tryckvattenreaktorerna är reaktorinneslutningen och reaktorbyggnaden samma sak, men för kokvattenreaktorerna består reaktorinneslutningen av en inneslutning som ligger inuti reaktorbyggnaden.

En täthetsprovning av en reaktorinneslutning, en så kallad ILRT (Integrated leakage rate test), består av följande etapper eller aktiviteter:

1. Inspektion av reaktorinneslutningen.
2. Trycksättning av reaktorinneslutningen.
3. Stabilisering
4. Ett Typ A-test.
5. Ett verifikationstest
6. Trycknedtagning av reaktorinneslutningen.

Vid täthetsprovning av en reaktorinneslutning skall en del data registreras. Dessa data består av resultat från mätningar av det absoluta trycket i reaktorinneslutningen, temperaturmätningar, mätningar av den relativa fuktigheten samt tidpunkten då dessa registreras. Vid en täthetsprovning skall minst 30 datauppsamlingar göras och vid varje sådan uppsamling skall ovanstående parametrar registreras. Lufttrycket utanför reaktorinneslutningen mäts en gång och registreras innan provningen.

Inspektion

Innan reaktorinneslutningen trycksätts skall en visuell genomgående inspektion av inneslutningen genomföras. Syftet med denna inspektion är att identifiera eventuella spår av försämring hos konstruktionen som kan påverka reaktorinneslutningens gastäthet. Oregelbundenheter som sprickbildning, avskalning av färg mm skall dokumenteras och utvärderas, eventuellt repareras, innan täthetsprovning.

Trycksättning

Reaktorinneslutningen skall trycksättas med luft som är ren, relativt torr, och fri från föroreningar. I Ringhals trycksätts reaktorinneslutningarna med ungefär 0,25 bar/h. Trycksättningen pågår till dess att antingen halva haveritrycket eller det maximala haveritrycket nås. I Ringhals innebär detta cirka 2 resp. 4 bar.

Det maximala haveritrycket innebär det tryck som kan uppstå i inneslutningen vid ett rörbrott.

Stabilisering

Efter trycksättningen av reaktorinneslutningen skall luftmassan innanför inneslutningen tillåtas att stabilisera sig. Inläckage av luft i t e x betong, isolering och rör samt temperatursänkningen som sker efter trycksättning kan resultera i ett högt initieellt läckage. Stabiliseringen ska visa att den torra luftmassan är stabil, d v s kurvan som visar hur mycket luften väger i reaktorinneslutningen med avseende på tiden ska närma sig en rät linje. Stabiliseringen skall pågå i minst fyra timmar. Exakta kriterier för hur länge stabiliseringen ska pågå finns beskrivna i Ansi/Ans-56.8-1994.

Mätning av läckage (Typ A-test)

Efter stabiliseringen kan läckaget ur reaktorinneslutningen beräknas. Följande avsnitt beskriver metoden för dessa uträkningar. Med hjälp av allmänna gaslagen kan den torra luftens vikt, W_i , beräknas vid varje datauppsamling enligt ekvation 1.2.1. Termen i anger vilken datauppsamling i ordningen det gäller.

$$W_i = \frac{M_{\text{torrluft}} * V_{r,i}}{R} \left(\frac{P_i - P_{vi}}{T_i} \right) \quad (kg) \quad (1.2.1)$$

där

M_{torrluft} = molvikten för torr luft (kg/mol)

$V_{r,i}$ = luftvolymen innanför reaktorinneslutningen (m^3)

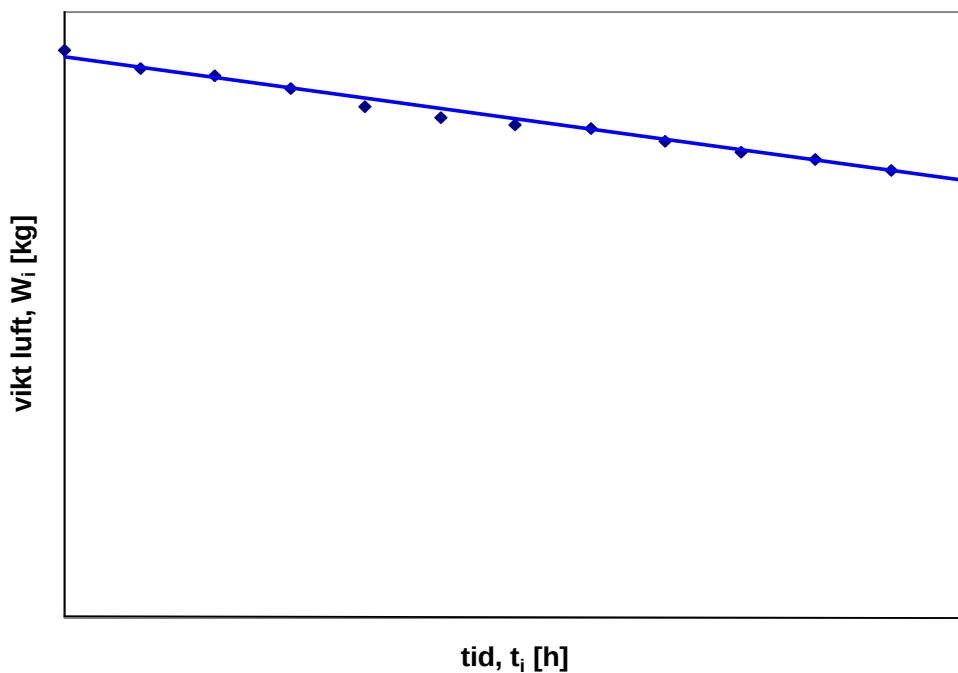
R = gaskonstanten 8.3143 J/(mol*K)

P_i = totala gastrycket i reaktorinneslutningen vid i :e datauppsamlingen (Pa)

P_{vi} = ångtrycket vid i :e datauppsamlingen (Pa)

T_i = temperaturen vid i :e datauppsamlingen (K)

M_{torrluft} och R i ekvation 1.2.1 ovan är konstanter medan resterande termer kan variera med tiden. Under testets gång antas att luftvolymen innanför reaktorinneslutningen bara kan ändras p g a förändringar hos vattennivån innanför inneslutningen. Detta gäller bara för kokvattenreaktorer.



Figur 1.2.1 Principskiss över hur den torra luftens vikt i inneslutningen kan variera med tiden vid ett typ A-test, d v s efter stabilisering.

Punkterna i Figur 1.2.1 visar hur den torra luftens vikt, W_i , kan variera för olika tidpunkter, t_i , vid ett A-test. Den första punkten representerar värdeparet t_1, W_1 där $t_1 = 0$ och W_1 är den torra luftens vikt vid A-testets början. Massändringen per tidsenhet hos luften beräknas genom att tillämpa minstakvadratmetoden på uträknade värden av luftens torra vikt vid olika tidpunkter (se linjen i Figur 1.2.1). Ur massändringen per tidsenhet fås läckaget i vikt-% / 24 h genom att dividera lutningen hos regressionslinjen (minstakvadratmetoden) med linjens skärning av y-axeln. Sedan multipliceras kvoten med -2400.

Ekvationen för linjen ges av:

$$\hat{W}_i = At_i + B \quad (kg) \quad (1.2.2)$$

där

$\hat{W}_i$ = regressionslinjens värde vid t_i (kg)

t_i = tid från A-testets start till den i :e datauppsamlingen (h)

A = lutningen hos regressionslinjen (kg/h)

B = regressionslinjens skärning med y-axeln (kg)

För att beräkna A och B behövs medeltiden, t_{medel} , och medelvikten hos luften, W_{medel} . Dessa definieras enligt:

$$t_{medel} = \frac{\sum t_i}{n} \quad (h) \quad (1.2.3)$$

$$W_{medel} = \frac{\sum W_i}{n} \quad (kg) \quad (1.2.4)$$

där

$\sum = \sum_{i=1}^n$ summan av antal datauppsamlingar som ingår i testet

n = totalt antal datauppsamlingar

A och B kan sedan beräknas enligt:

$$A = \frac{\sum (t_i - t_{medel})(W_i - W_{medel})}{\sum (t_i - t_{medel})^2} \quad (kg/h) \quad (1.2.5)$$

$$B = W_{medel} - At_{medel} \quad (kg) \quad (1.2.6)$$

Eftersom enheten för läckaget skall vara i vikt-% / 24 h (enligt ovan) och lutningen A hos linjen ges i kg/h fås läckaget enligt:

$$L_{am} = (-2400) * \left(\frac{A}{B} \right) \quad (\text{vikt-\% / 24 h}) \quad (1.2.7)$$

Det bör noteras att B (uppskattningen av luftvikten vid testets början enligt minstakvadratmetoden) används i ekvationen istället för W_1 (uppmätta luftvikten vid testets början). Osäkerheten hos det uppskattade värdet L_{am} bestäms genom standardavvikelseerna hos A och B och deras kovarians, vilket leder till en beräkning av en 95 % övre konfidensgräns för läckaget.

Uppskattningen av standardavvikelsen hos luftvikten med avseende på regressionslinjen ges av:

$$S = \left(\frac{\sum (W_i - \hat{W}_i)^2}{n-2} \right)^{1/2} \quad (1.2.8)$$

Inför variabeln K :

$$K = \frac{S}{(n(\sum t_i^2) - (\sum t_i)^2)^{1/2}} \quad (1.2.9)$$

då blir standardavvikelsen hos regressionslinjens lutning:

$$S_A = K(n)^{1/2} \quad (1.2.10)$$

Standardavvikelsen hos linjens skärning med y-axeln ges av:

$$S_B = K(\sum t_i^2)^{1/2} \quad (1.2.11)$$

Kovariansen för lutningen A och skärningen med y-axeln B ges av:

$$S_{AB} = K^2(-\sum t_i) \quad (1.2.12)$$

För de flesta täthetsprovningar är kvoten S_B/B väldigt liten jämfört med kvoten S_A/A .

Följaktligen kan en approximativ övre 95 % konfidensgräns för läckaget beräknas:

$$UCL_{approx} = L_{am} + 2400 t_{.95} (S_A / B) \quad (1.2.13)$$

där $t_{.95}$ väljs från Tabell B1 i Ansi/Ans-56.8-1994.

Den exakta övre gränsen kan beräknas enligt följande:

$$a = B^2 - t_{.95}^2 S_B^2 \quad (1.2.14)$$

$$b = AB - t_{.95}^2 S_{AB} \quad (1.2.15)$$

$$c = A^2 - t_{.95}^2 S_A^2 \quad (1.2.16)$$

Den exakta ensidiga 95 % övre konfidensgränsen för läckaget blir då:

$$UCL_{exact} = -2400 \left(\frac{b - (b^2 - ac)^{1/2}}{a} \right) \quad (1.2.17)$$

Den 95 % övre konfidensgränsen för läckaget innebär att det bara är 5 % chans att det verkliga läckaget ur reaktorinneslutningen överstiger detta värde.

Vanligtvis används ekvation 1.2.13 för att beskriva detta *UCL*-värde. *UCL* står för *upper confidence limit*. Läckaget ur reaktorinneslutningen ges alltså av:

$$UCL = L_{am} + 2400 t_{.95} (S_A / B)$$

Varaktigheten hos ett Typ A-test skall minst vara 8 timmar för periodiska täthetsprovningar och skall bestå av ett minimum på 30 datauppsamlingar som registrerats vid ungefär lika tidsintervall.

Trycknedtagning

Trycknedtagningen av reaktorinneslutningen skall genomföras på ett kontrollerat och säkert sätt för att inte skada reaktorinneslutningen. En allt för hög trycknedtagningshastighet tros kunna leda till skador på tätskiktet.

Trycknedtagningshastigheterna som tillämpas på Ringhals är ungefär 0,3-0,4 bar/h för R1 (BWR) och för R2, R3, R4 (PWR) tryckreducerar man med max 0,18 bar/h. Trycknedtagningen pågår till dess att atmosfärstryck nås igen.

1.3 Syfte

Projektets mål angavs vid projektstart att vara en kvantitativ modell som korrekt beskriver tryckförloppet vid en täthetsprovning av en reaktorinneslutning. Modellen skall kunna användas för beräkning av verkligt läckage ur inneslutningen.

2 Teori

Framställningen i detta kapitel bygger på Fredlund (2006). Eftersom betong är ett poröst material är gastransport genom betongens porer möjlig. Om det finns en skillnad i lufttryck mellan porer på ett visst avstånd från varandra uppstår ett flöde som strävar till att utjämna denna tryckskillnad. För att få fram hur lufttrycket, P , varierar i betongens porsystem under påverkan av tryckändringar i reaktorinneslutningen måste ett matematiskt uttryck härledas för betongen som beskriver lufttryckets variation med avseende på djup och tid. Ett sådant uttryck kan sedan användas i t.ex. beräkningsprogrammet Comsol Multiphysics som är ett datorprogram som löser partiella differentialekvationer genom finita elementmetoden. Detta program möjliggör att luftflöde in och ut ur betongen kan beräknas vid olika tidpunkter.

2.1 Antaganden

Den allmänna gaslagen antas gälla för såväl luften i porerna som luften i och utanför reaktorinneslutningen. Vidare antas att luftens temperatur, T , är konstant. Andra parametrar som antas vara konstanta genom varje simulering är luftens molmassa, M , samt den lufttillgängliga porositeten, n_{luft} (se nedan). Luftflödet, q , i betongen kan approximeras som endimensionellt och beror av tryckgradienten. Gaspermeabiliteten, K , hos betongen beror på hur fuktigt materialet är, men för varje enskilt försök som utförs antas den vara konstant. Luftens viskositet, μ , är också konstant under simuleringarna, förklaring ges nedan.

2.2 Ekvationer

De grundläggande ekvationerna som behövs för att härleda hur lufttrycket i porsystemet varierar med avseende på tid och djup i betongen ges i detta kapitel, ekvation 2.2.1-2.2.6.

Den allmänna gaslagen ges av:

$$PV = nRT \quad (2.2.1)$$

där

$$\begin{aligned} P &= \text{gastrycket (Pa)} \\ V &= \text{volym gas (m}^3\text{)} \\ n &= \text{antal mol} \\ R &= 8.3143 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)} \\ T &= \text{temperatur hos gasen (K)} \end{aligned}$$

Molmassan ges av:

$$M = \frac{m}{n} \quad (\text{kg/mol}) \quad (2.2.2)$$

där

$$\begin{aligned} m &= \text{gasens massa (kg)} \\ n &= \text{antal mol} \end{aligned}$$

Den lufttillgängliga porositeten ges av:

$$\pi_{\text{luft}} = \frac{V_{\text{luft}}}{V_{\text{btg}}} \quad (\text{m}^3 \text{ luft} / \text{m}^3 \text{ btg}) \quad (2.2.3)$$

där

$$\begin{aligned} V_{\text{luft}} &= \text{porvolym tillgänglig för luft (m}^3\text{)} \\ V_{\text{btg}} &= \text{volym betong (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

Luftflödet i betongen är direkt proportionell mot tryckgradienten, $\partial P / \partial x$, och ges enligt Fredlund (1988) av:

$$q = -\alpha \frac{\partial P}{\partial x} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})) \quad (2.2.4)$$

med

$$\alpha = \frac{K}{\nu} \quad (2.2.5)$$

där

$$\begin{aligned} K &= \text{permeabiliteten (m}^2\text{)} \\ \nu &= \text{kinematisk viskositet (m}^2\text{/s)} \end{aligned}$$

Permeabiliteten hos ett material anger dess genomsläpplighet för en gas eller en vätska då en tryckgradient verkar över materialet. Hur stor gaspermeabiliteten är beror på materialets fukttinnehåll. Ju fuktigare material är desto lägre gaspermeabilitet har det. Permeabiliteten är också något tryckberoende, men detta tas inte hänsyn till i detta projekt.

Luftens kinematiska viskositet definieras som:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.2.6)$$

där

$$\mu = \text{luftens dynamiska viskositet (kg/(ms))}$$

$$\rho = \text{luftens densitet (kg/m}^3\text{)}$$

Följande egenskaper gäller för den dynamiska viskositeten:

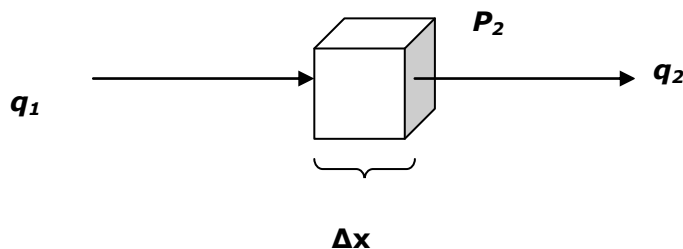
- Den är oberoende av trycket.
- Den ökar med temperaturen.

I och med att den dynamiska viskositeten är oberoende av trycket och att temperaturen antas vara konstant kommer således den dynamiska viskositeten i beräkningarna vara konstant.

2.3 Härledning

I följande kapitel härleds en partiell differentialekvation som beskriver hur lufttrycket, P , i betongens porer beror på tiden, t , och djupet, x . Härledningen bygger på ekvationerna i kapitel 2.2.

Figuren nedan visar en liten betongvolym och vad som händer under en kort tidsperiod, Δt (s), då en tryckgradient verkar över materialet.



Figur 2.3.1 Under en kort tidsperiod, Δt , är lufttrycken i porerna, P_1 och P_2 , på varsin sida om betongvolymen. Samtidigt är luftflödena, q_1 och q_2 , på respektive sida.

Luftflödena ges i $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$, lufttrycken i Pa samt Δx i m. Tvärsnittsarean på kuben är A (m^2). Om flödena, q_1 och q_2 , är olika stora kommer antingen luft ansamlas eller försvinna från betongvolymens porer. Denna term får beteckningen $\Delta\lambda$ och har enheten $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ btg})$.

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta m_{\text{luft}}}{V_{\text{btg}}} \quad (2.3.1)$$

där

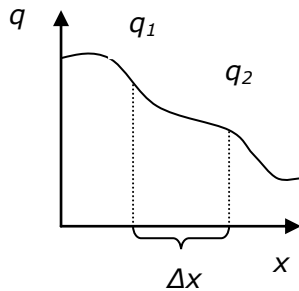
$$\begin{aligned} m_{\text{luft}} &= \text{massan av luften i betongvolymen (kg)} \\ V_{\text{btg}} &= \text{betongkubens volym (m}^3 \text{ btg)} \end{aligned}$$

Detta ger under tidsförloppet Δt :

$$q_1 * A * \Delta t - q_2 * A * \Delta t = \Delta \lambda * \Delta x * A \quad (2.3.2)$$

Efter förenkling fås:

$$\frac{q_1 - q_2}{\Delta x} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t} \quad (2.3.3)$$



Figur 2.3.2 Kurva som visar hur flödet q kan variera med avseende på x .

Med hänvisning till Figur 2.3.2 kan vi skriva:

$$\frac{\partial q}{\partial x} \approx \frac{q_2 - q_1}{\Delta x} = \frac{-(q_1 - q_2)}{\Delta x} \Rightarrow \frac{q_1 - q_2}{\Delta x} \approx -\frac{\partial q}{\partial x} \quad (2.3.4)$$

Högerledet i ekvation 2.3.3 kan approximeras enligt följande:

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta t} \approx \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (2.3.5)$$

Ekvation 2.3.3 kan med hjälp av ekvation 2.3.4 och 2.3.5 skrivas om till:

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (2.3.6)$$

För beräkning av λ används allmänna gaslagen. Betongkuben i Figur 2.3.1 antas ha volymen V_{btg} och en porvolym tillgänglig för luft som kallas V_{luft} . Det är bara i denna så kallade porvolym som luften kan finnas. Eventuell lösning av luft i porvattnet försummas. Lösligheten av luft i vatten vid atmosfärstryck är $0.03 \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ vatten})$ vid 10°C . (Fagerlund, 2004)

Allmänna gaslagen ger tillsammans med ekvation 2.2.2:

$$PV = nRT \Rightarrow PV = \frac{m}{M} RT \Rightarrow m = \frac{PVM}{RT} \quad (2.3.7)$$

I fallet med betongkuben gäller alltså att massan, m , av luften i porerna beror av trycket, P , i porsystemet, samt storleken på porvolymen som är tillgänglig för luft, V_{luft} . M , R , T är konstanter.

Massan av luften i betongkuben är då:

$$m_{luft} = \frac{PV_{luft}M}{RT} \quad (kg) \quad (2.3.8)$$

λ ges då av:

$$\lambda = \frac{m_{luft}}{V_{btg}} \quad (kg/(m^3 \text{ btg})) \quad (2.3.9)$$

Ekvation 2.3.8 insatt i ekvation 2.3.9 ger:

$$\lambda = \frac{PV_{luft}M}{RTV_{btg}} \quad (2.3.10)$$

Ekvation 2.3.10 kan skrivas om med hjälp av ekvation 2.2.3:

$$\lambda = \frac{PM\pi_{luft}}{RT} \quad (2.3.11)$$

där π_{luft} är den lufttillgängliga porositeten (m^3 luft / m^3 btg).

Eftersom både λ och P beror på avståndet x i betongen och tiden t skrivs:

$$\lambda(x,t) = \frac{M\pi_{luft}}{RT} * P(x,t) \quad (2.3.12)$$

Högerledet i ekvation 2.3.6 blir:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{M\pi_{luft}}{RT} * \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.3.13)$$

Vänsterledet i ekvation 2.3.6 och ekvation 2.2.4 ger:

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\alpha \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (2.3.14)$$

Ekvation 2.3.13 och 2.3.14 ger då:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{M \pi_{luft}}{RT} * \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.3.15)$$

I ekvation 2.2.5 anges flödeskonstanten, a , som en funktion av gaspermeabiliteten, K , och den kinematiska viskositeten, ν . Permeabiliteten antas vara konstant genom hela provningsförloppet medan den kinematiska viskositeten som beror på luftens dynamiska viskositet, μ , och densitet, ρ , (ekvation 2.2.6) varierar beroende på att luftens densitet kommer att ändras när trycket höjs/sänks.

Densiteten för luft beräknas genom:

$$\rho = \frac{m_{luft}}{V_{luft}} \quad (kg/m^3) \quad (2.3.16)$$

Ekvation 2.3.8 ger då:

$$\rho = \frac{PV_{luft}M}{RTV_{luft}} = \frac{M}{RT} * P \quad (2.3.17)$$

Den kinematiska viskositeten ν blir enligt ekvation 2.2.6 och ekvation 2.3.17:

$$\nu = \frac{\mu RT}{MP} \quad (m^2/s) \quad (2.3.18)$$

Då blir a enligt ekvation 2.2.5 och 2.3.18:

$$\alpha = \frac{KM}{\mu RT} * P(x, t) \quad (2.3.19)$$

Ekvation 2.3.19 insatt i ekvation 2.3.15 ger:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{KM}{\mu RT} * P(x, t) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{M \pi_{luft}}{RT} * \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.3.20)$$

Förenkling av ekvation 2.3.20 ger:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\mu} * P(x, t) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \pi_{luft} * \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.3.21)$$

som kan skrivas om till:

$$\pi_{\text{luft}} * \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\mu} * P(x,t) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \Rightarrow$$

(2.3.22)

$$\pi_{\text{luft}} * \frac{\partial P}{\partial t} - \nabla \left(\frac{K}{\mu} * P(x,t) \nabla P \right) = 0$$

Denna partiella differentialekvation kommer i fortsättningen kallas för betongens tryckekvation. Den kommer senare att användas i både Excel och Comsol Multiphysics för att simulera tryckförlopp i betong då lufttrycket i angränsande luftvolym ändras. Gas- och materialegenskaper som behövs i tryckekvationen beskrivs i kapitel 4.

2.4 Temperatureffekter

Vid tryckstegringen ökar lufttemperaturen i inneslutningen då stora mängder luft pumpas in och komprimeras. När maximalt tryck nås börjar luften att svalna av eftersom omgivande betongkonstruktioner inte fått någon temperaturökning. Denna temperatursänkning sker alltså under stabiliseringsskedet då luftvolymen är konstant.



Figur 2.4.1 Temperatursänkningen under stabiliseringsskedet sker vid konstant luftvolym.

Trycksänkningen vid konstant volym V och massa m på grund av enbart temperaturändringen ges av ändringen i absoluttemperatur

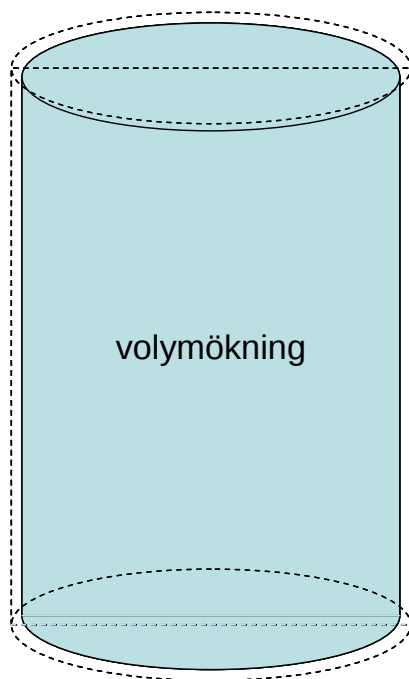
$$\begin{aligned}p \cdot V &= \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \\p_0 \cdot V &= \frac{m}{M} \cdot R \cdot T_0 \\ \frac{p}{p_0} &= \frac{T}{T_0} \\ \text{eller} \\ \frac{p_0 - p}{p_0} - 1 &= - \frac{T}{T_0} \\ \frac{\Delta p}{p_0} &= 1 - \frac{T}{T_0}\end{aligned}\tag{2.4.1}$$

Det ger 0.3-0.4 % trycksänkning per °C vid +20°C (1- 292/293). Detta är en stor trycksänkning i förhållande till vad som mäts och måste beaktas. Detta är naturligtvis en del av förklaringen till att man måste vänta tills temperaturen stabiliserat sig innan man mäter trycksänkningen på grund av andra effekter.

2.5 Krypning

Vid tryckprovningen kommer att den spännarmerade reaktorinneslutningen att utsättas för ett stort inre övertryck. Reaktorinneslutningens hölje kommer då att bli deformeras något, dels momentanelastiskt och dels genom krypning som ger ökade deformationer med tiden. Dessa deformationer innebär att inneslutningen kommer att bli något större vilket medför att även den inneslutna luftvolymen kommer att bli något större. Volymökning hos den instängda luften medför en trycksänkning. Denna uppskattas nedan.

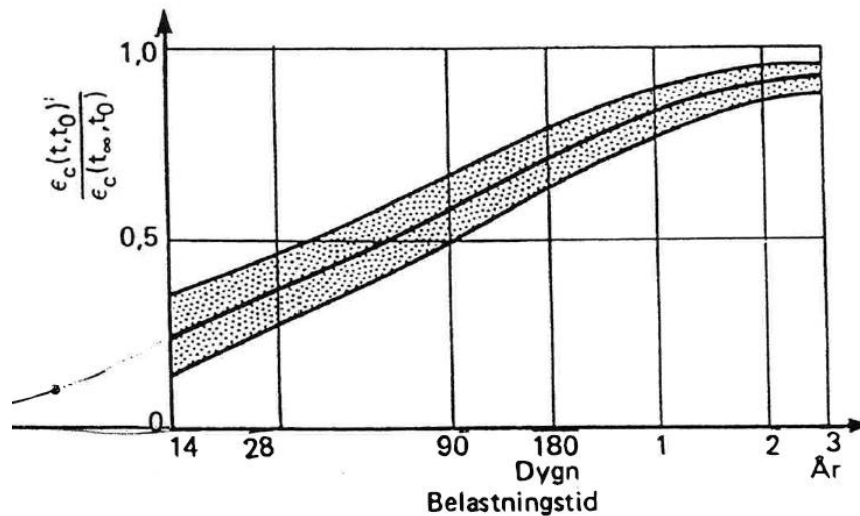
Betongväggen har redan en stor tryckspänning på grund av spännarmeringen. En tryckökning med t ex 4 bar ger därför en spänningssänkning i betongen. Med de mått som inneslutningen har kan denna uppskattas till ca 7 MPa i vertikala tvärsnitt och ungefär hälften så mycket i horisontella. Den momentanelastiska deformationen kommer under tryckstegringen och påverkar inte trycksänkningen efter att maximalt tryck har uppnåtts. Krypningen vid 7 MPa kan beräknas med en metod enligt Bergström och Nielsen (1969), som baserar sig på en metod framtagen av Wagner (1958). Metoden finns också i Betonghandboken.



Figur 2.5.1 Principiell effekt av krypning hos betonginneslutningen.

Den specifika krypningens grundvärde $\varepsilon_c(t_\infty, t_0)$ beror på cementtyp och betongens ålder vid pålastning. I metoden finns inte värden för större belastningsålder än 365 dygn. Värdet på $\varepsilon_c(t_\infty, t_0)$ är alltså mindre än $5 \cdot 10^{-6}$. Värdet gäller för spänningen 0.1 MPa, oändlig tid, en viss betong, härdning, dimension och klimat. Korrektionen för dessa parametrar är som regel relativt liten.

En stor korrektion är belastningens varaktighet, som i det här aktuella fallet bara rör sig om ett antal dygn. Korrektionen för belastningstid görs med diagrammet nedan, där så korta belastningstider ligger utanför diagrammets vänstra kant. En uppskattning för 7 dygn ger faktorn 0.2.



Figur 2.5.2 Korrektionsfaktor för specifik krypning av inverkan av belastningens varaktighet, Wagner (1958).

Med dessa siffror och inneslutningens mått beräknas krypningen under 7 dygn blir ca

- 0.5 mm i höjdlid
- 2 mm runtom

Trycksänkningen av denna volymökning av behållaren blir helt försumbart.

2.6 Effekt av luftens löslighet

Då luften tränger in i betongens porsystem finns det en möjlighet att en del av luften går i lösning, dvs löses i porvattnet. Det skulle då innebära att den "lufttillgängliga porositeten" är större än bara betongens porositet minus fukttinnehållet. Denna extra porositet skulle också vara tryckberoende eftersom luftens löslighet är proportionell mot trycket, enligt Henry's lag.

Luftens löslighet i vatten är 0.02-0.03 kg luft/m³ vatten, Fagerlund (2009). Om man räknar högt, med en fukthalt på t ex 100 kg/m³ betong, motsvarar detta 0.002-0.003 kg luft /m³ betong. Vi ett övertryck på 4 bar, skulle lösligheten vara fyra gånger större, dvs ca 0.01 kg/m³ betong, motsvarande 0.01 m³/m³ betong. Porositeten skulle alltså bli ca 1 % högre vid dessa antaganden! Denna effekt är större ju högre fukttinnehållet är. Då är också den tillgängliga porositeten mindre, vilket medför att luftlösningseffekten då är betydande. Vid en lufttillgänglig porositet på 2 %, i en fuktig betong, skulle luftlösningseffekten öka denna med 50 %!

3 Simulering av täthetsprovning

3.1 Beräkningsverktyg

I detta projekt har två program använts för att simulera täthetsprovningar. Det ena är Microsoft Office Excel, och det andra är Comsol Multiphysics. Comsol Multiphysics är ett program som kan lösa partiella differentialekvationer genom finita elementmetoden (FEM). I detta program ges möjligheten att rita in önskad geometri, specificera gällande ekvationer, mesha geometrin och därefter lösa problemet samt hantera resultaten i programmets "post-processing"-läge.

3.2 1D-modell

I examensarbetet Gastransport i reaktorinneslutningar av betong (Fredlund, 2006) togs en 1D-modell fram för simulering av täthetsprovningar. Denna löstes med hjälp av beräkningsverktyget Comsol Multiphysics. Från ritningar av en PWR-inneslutning uppskattades ett förhållande mellan innesluten luftvolym och total yta betong till $3,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Detta förhållande ritades sedan i Comsol i 2D enligt Figur 3.2.1. Tjockleken av luftvolymen sattes till 3,2 m och den ekvivalenta tjockleken hos betongen sattes till 0,3 m, vilket motsvarar tjockleken av PWR-inneslutningens inre betongskal. Höjden och djupet av geometrin antas vara 1 m.



Figur 3.2.1 Geometrisk modell i Comsol Multiphysics.

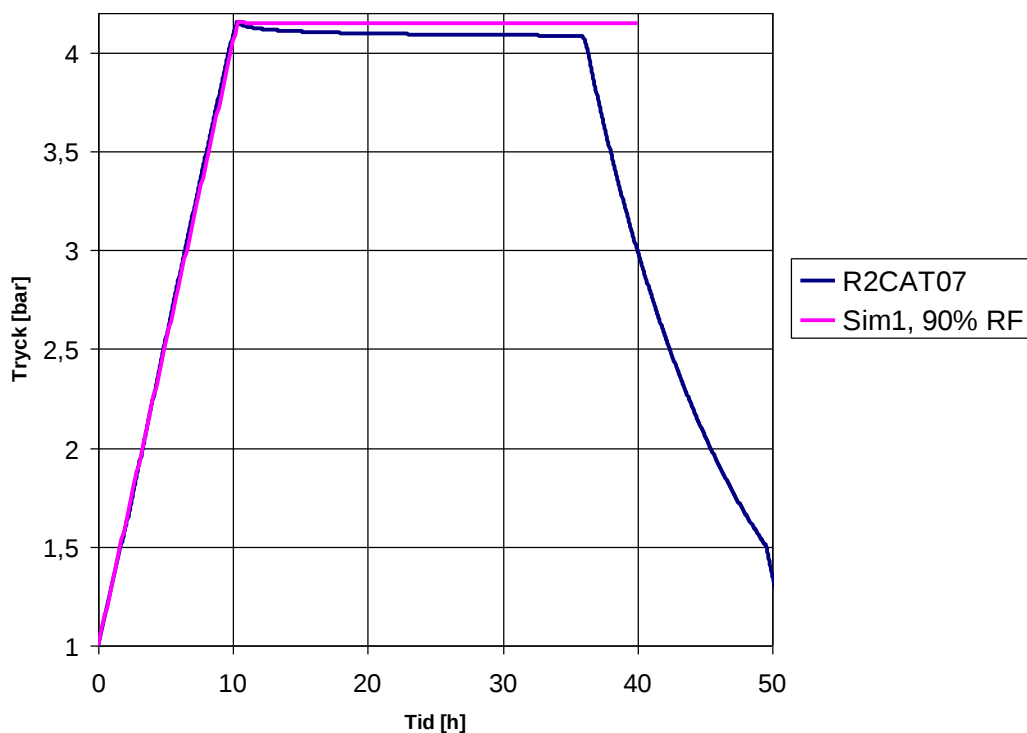
Randvillkoren i modellen angavs så att alla ränder förutom randen mellan luft och betong var täta. Luftläckage kan därför endast ske in i betongen. Randen längst till höger motsvarar tätplåten i reaktorinneslutningen. För att simulera tryckstegringen som sker vid en täthetsprovning kan ett randvillkor som beror av tiden användas.

Trycket i betongen beskrivs med ekvation 2.3.22, med aktuella materialparametrar. I denna modell beskrivs även trycket i luftvolymen med hjälp av ekvation 2.3.22. Skillnaden är att permeabiliteten sätts till ett väldigt högt värde jämfört med betongen, samt att den lufttillgängliga porositeten sätts till $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

3.2.1 Simulering av R2-CAT-07

Med 1D-modellen gjordes tre simuleringar av R2-CAT-07 vid olika RF (40, 60, 90 %). Materialegenskaper från Fredlund (2006) användes som indata. Resultatet från simuleringen vid 90 % RF gav störst trycksänkning, se Figur 3.2.1.1.

Simulering R2CAT07



Figur 3.2.1.1 Jämförelse mellan täthetsprovning och simulering.

Resultaten visar att det är stor skillnad mellan simulerat och verkligt tryckförlopp. De stora skillnaderna skulle kunna bero på följande:

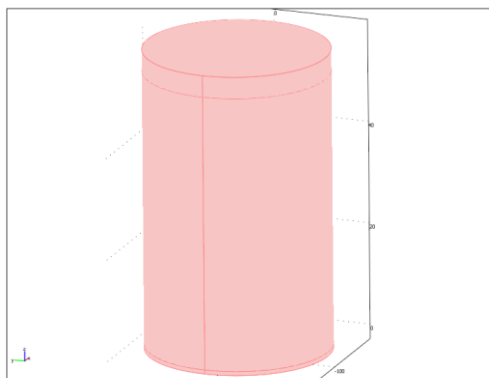
1. 1D-modellen innehåller en grovt förenklad geometri.
2. Ingen hänsyn tas till att temperaturen ändras under en täthetsprovning.
3. Ingen hänsyn tas till att stora delar av betongens yta är behandlad med epoxi.

3.3 3D-modell

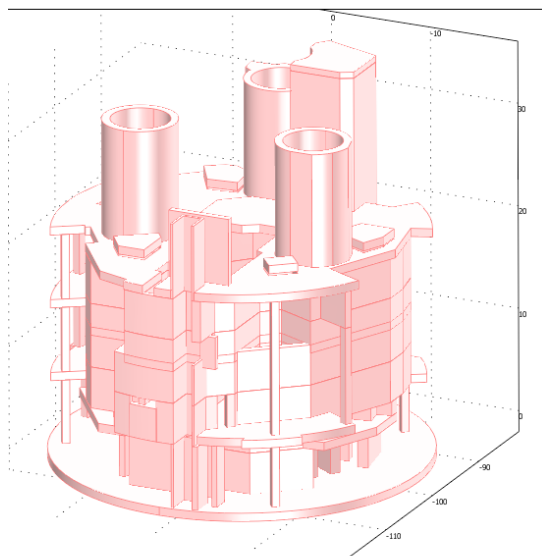
För att bättre återspegla en reaktorinneslutnings geometri utvecklades en ny modell i 3D.

3.3.1 3D-modell i AutoCad

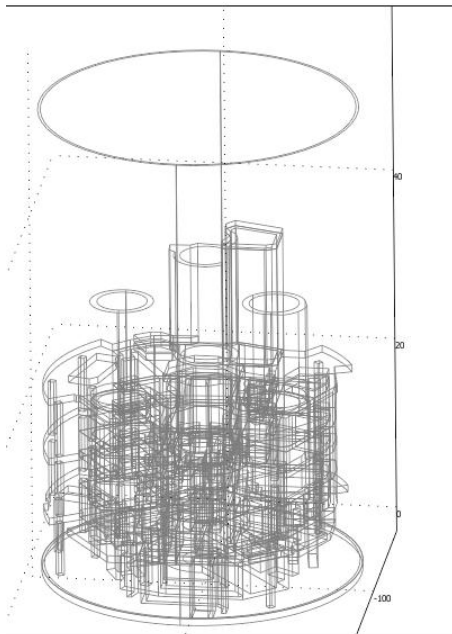
Med hjälp av AutoCad gjordes en 3D-modell av betongen innanför tätplåten, utifrån ritningar av en PWR-inneslutning. Denna modell gick att importera i Comsol Multiphysics, se Figur 3.3.1.1-3.3.1.3.



Figur 3.3.1.1 3D-modell sett från utsidan. Skalet representerar tätplåten.



Figur 3.3.1.2 Inre betongdelar i 3D-modell.



Figur 3.3.1.3 Genomsiktig 3D-modell där toppen av det inre betongskalet syns.

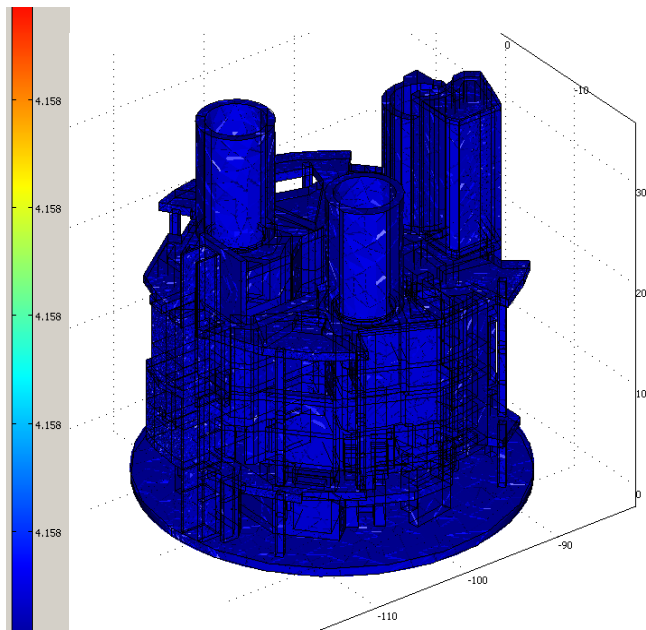
3.3.2 Modifiering av 3D-modellen

Eftersom svårigheter uppstod med att hantera AutoCad-modellen i Comsol Multiphysics anlätades en konsult som gjorde det möjligt att göra beräkningar med modellen. Istället för att beskriva den inneslutna luftvolymen med hjälp av ekvation 2.3.22, beskrevs istället trycket som en skalär storhet, $P(t)$. Under tryckstegringen ökar P med önskad hastighet, för att sedan minska beroende på inläckage i betong. Sänkningen av trycket beror på integralen av luftflödet över de betongytor som är öppna. Tryckfördelningen i betongen beskrevs fortfarande enligt ekvation 2.3.22.

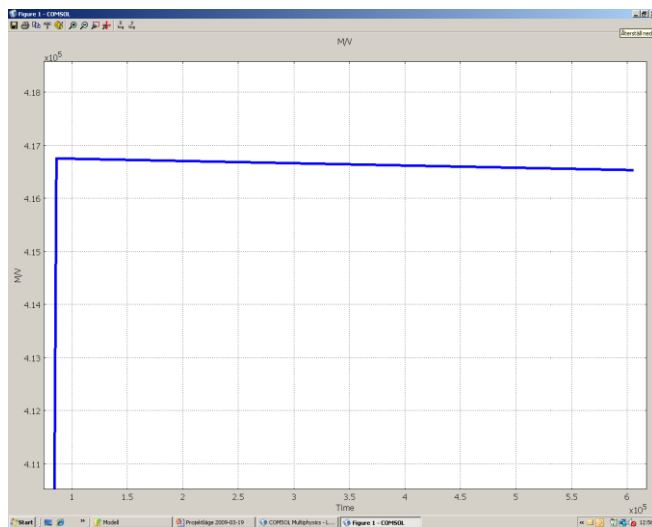
3.3.3 Exempel på simuleringsresultat från 3D-modellen

Nedan följer några simuleringar som gjordes med 3D-modellen. I denna version av modellen inkluderas inte det inre betongskalet innanför tätplåten. Fördelen med 3D-modellen är att man kan välja vilka betongytor som ska vara öppna respektive stängda.

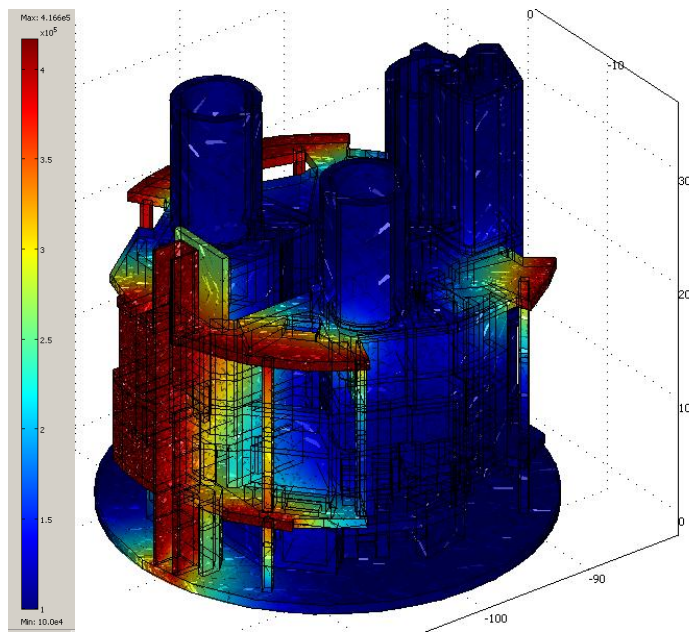
Indata i form av materialegenskaper togs från examensarbetet Gastransport i reaktorinneslutningar av betong (Fredlund, 2006). Antagen relativ fuktighet var 90 % och randvillkoret som anger tryckstegringen ska återspegla tryckhöjningen vid täthetsprovningen av R2, 2007. Det som skiljer simuleringarna åt är att olika antal ytor är öppna för gasinträängning samt att permeabiliteten varierar.



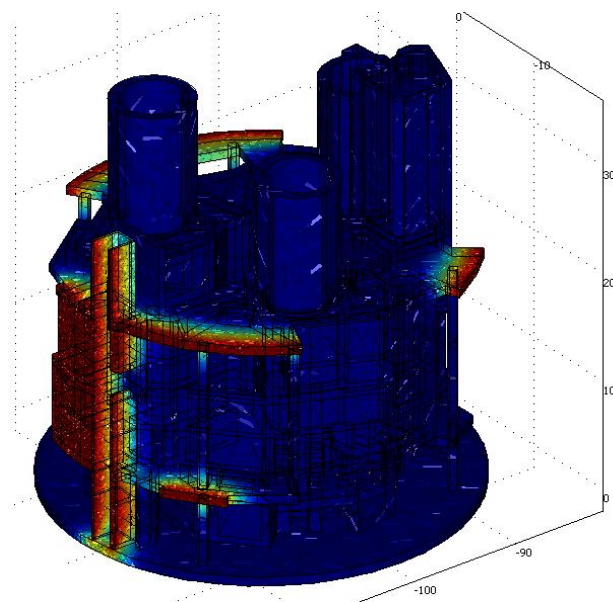
Figur 3.3.3.1 Tryckfördelning efter 7 dygn med alla ytor öppna.



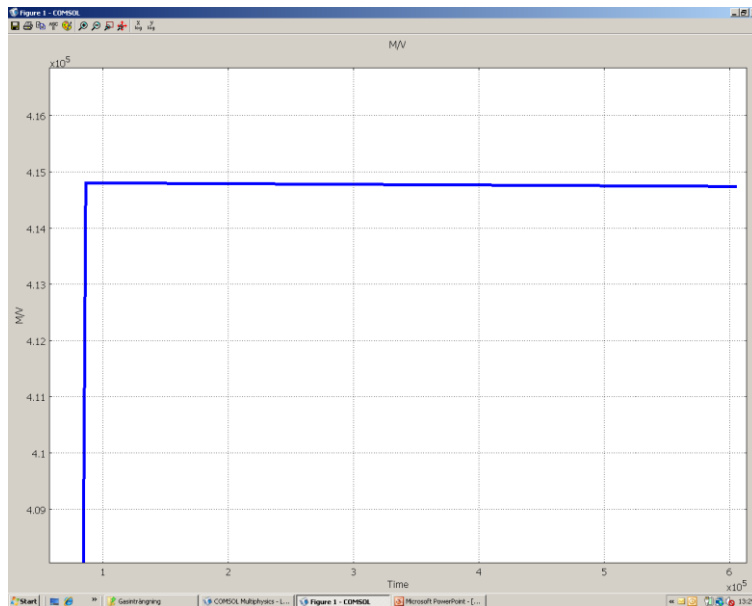
Figur 3.3.3.2 Trycksänkning i början av de sju dyggen med alla ytor öppna.



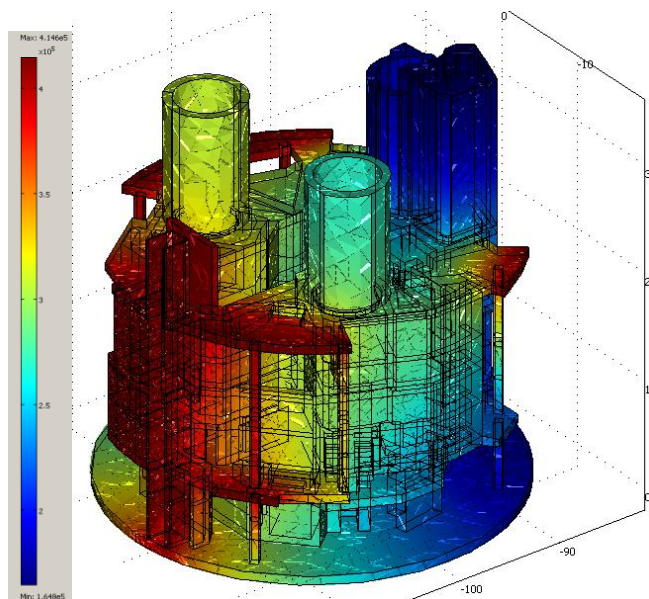
Figur 3.3.3.3 Tryckfördelning efter sju dygn med bara ytterkanterna öppna. $K = 10^{-16} \text{ m}^2$. Trycksänkningen var obetydlig.



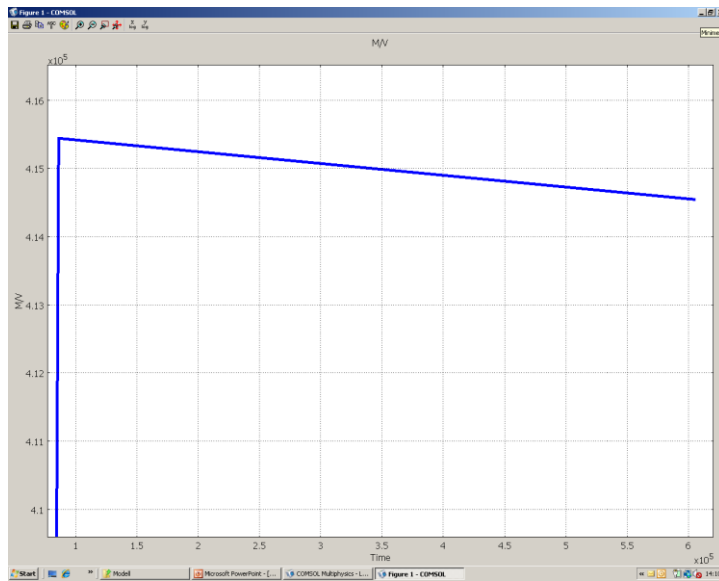
Figur 3.3.3.4 Tryckfördelning efter sju dygn med bara ytterkanterna öppna. 10 gånger lägre permeabilitet, $K = 10^{-17} \text{ m}^2$. Detta gav en ännu lägre trycksänkning.



Figur 3.3.3.5 Resultatet från simulering, $K = 10^{-17} \text{ m}^2$, med bara ytterkanterna öppna.



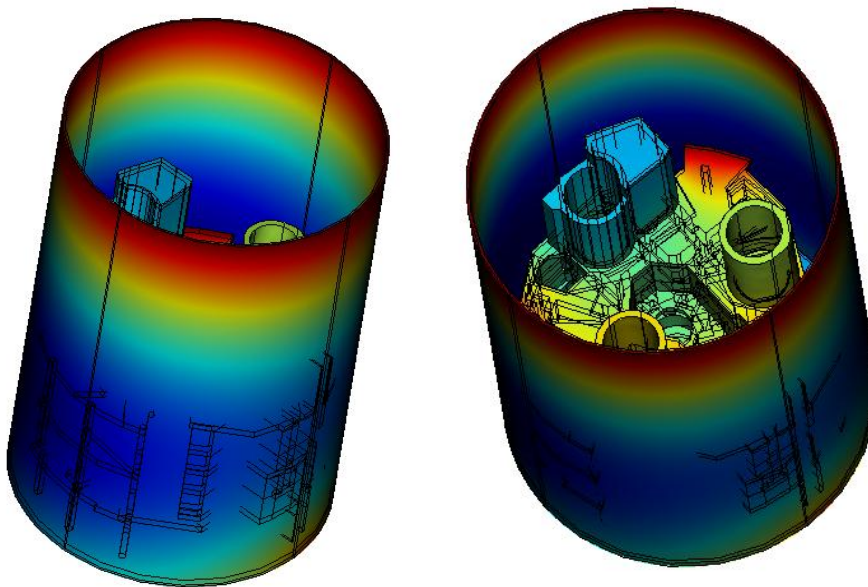
Figur 3.3.3.6 Tryckfördelning efter sju dygn med bara ytterkanterna öppna. 100 gånger större permeabilitet, $K = 10^{-15} \text{ m}^2$.



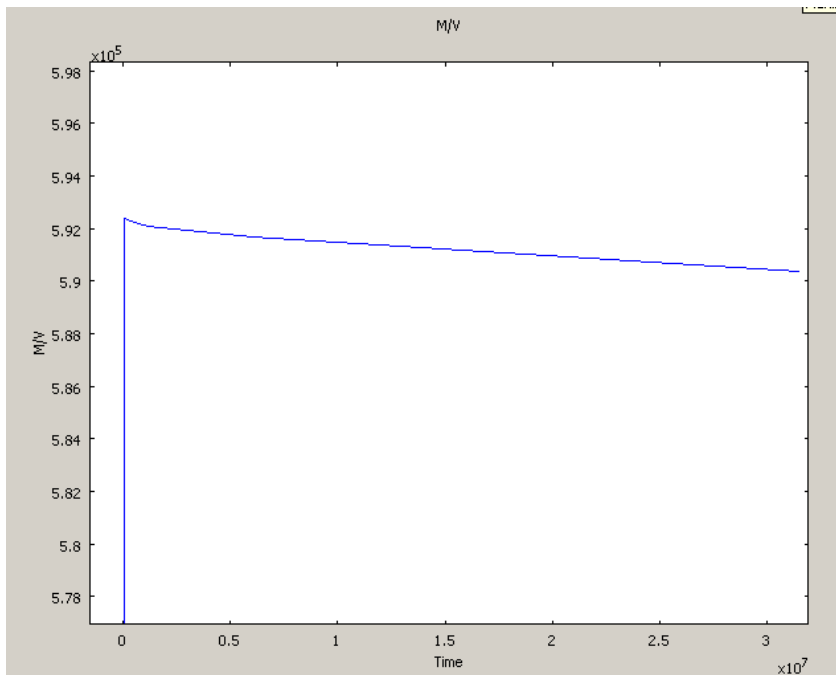
Figur 3.3.3.7 Trycksänkning då bara ytterkanterna var öppna, $K = 10^{-15} \text{ m}^2$.

3.3.4 Komplettering av 3D-modellen

Ovanstående modell kompletterades också med betongcylindern innanför tätplåten. Figur 3.3.4.1 visar hur modellen ser ut i Comsol Multiphysics. Figur 3.3.4.2 visar resultat från en simulering då betongcylindern ingick.



Figur 3.3.4.1 3D-modell med betongcylinder.



Figur 3.3.4.2 Exempel på resultat från simulering då betongcylindern ingår.

3.3.5 Slutsatser för 3D-modellen

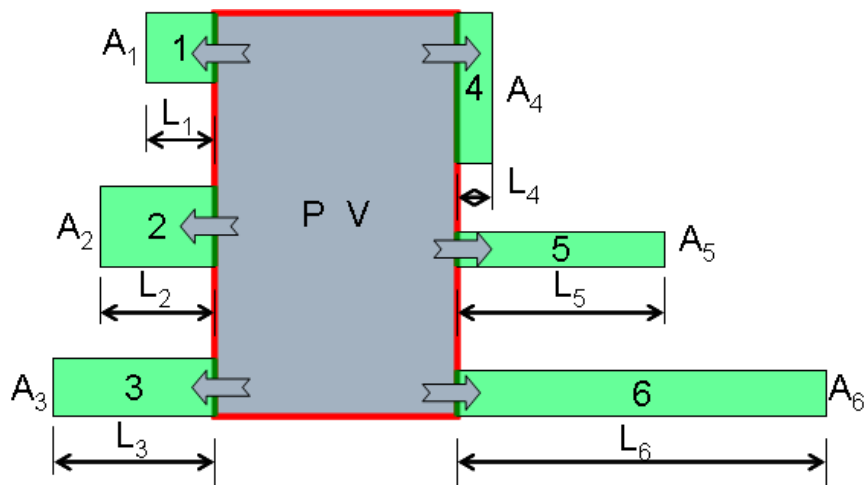
3D-modellen fungerar nu i Comsol Multiphysics. En serie beräkningar är gjorda som visar att tryckförloppet är starkt beroende av betongens permeabilitet, och därmed RF, samt andel öppna ytor.

Förutsättningarna har visat sig vara helt annorlunda än ursprungligen antaget. En stor del av betongytorna är behandlade med epoxi, vilket resulterar i få öppna ytor. Det är svårt att ta reda på vilka ytor som verkligen är öppna respektive stängda. Dessutom finns det defekter i epoxin som gör att den inte är helt tät.

Detta kräver en mycket mer komplicerad modell än den 3D-modell som utvecklats.

3.4 Multipel 1D-model i kalkylblad

På begäran av industrin har en enkel modell utvecklats där gasinträngningen beskrivs i en dimension och där betongkonstruktionerna inne i reaktorinneslutningen beskrivs med ett antal betongvolymmer med en definierad area, definierat djup och eventuellt ett ytskikt med ett visst motstånd.



Figur 3.4.1 Modell för trycksänkning genom 1D-gasinträngning i sex betongvolymmer inuti en reaktorinneslutning.

3.4.1 Teoretisk bakgrund

3.4.1.1 Luftflödesbeskrivning

Luftflödet i ett poröst material ges av

$$q = -\frac{K}{\nu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \text{ [kg/(m}^2\text{s)]} \quad (3.4.1)$$

där K = permeabiliteten (m^2) och ν = kinematisk viskositet (m^2/s).

Den kinematiska viskositeten kan beskrivas med

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.4.2)$$

där μ = luftens dynamiska viskositet (kg/(ms)) och ρ = luftens densitet (kg/m^3).

Den dynamiska viskositeten är oberoende av trycket, men något temperaturberoende. Om temperaturen förutsätts vara konstant blir alltså den dynamiska viskositeten konstant.

Densiteten hos luften beror naturligtvis på lufttrycket, enligt allmänna gaslagen

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P \cdot M}{RT} \quad (3.4.3)$$

Luftflödet kan alltså beräknas med

$$q = -\frac{K}{\mu} \cdot \rho \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{P \cdot M}{RT} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot P \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.4.4)$$

Här är allt utom permeabiliteten och trycket konstanter. Permeabiliteten varierar något med trycket, men det har försummats i denna första version av modellen.

Där det finns ett ytskikt bör detta beskrivas med ett motstånd Z mot lufttransporten

$$Z = \frac{\Delta x_{yta}}{K_{yta}} \quad [1/m] \quad (3.4.5)$$

där Δx_{yta} är ytskiktets tjocklek och K_{yta} dess permeabilitet. Flödesekvationen blir då

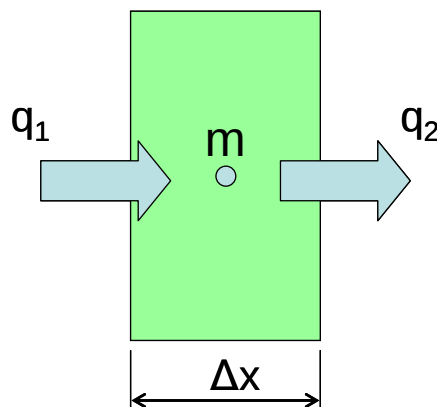
$$q = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot P \cdot \frac{\Delta P}{Z} \quad (3.4.6)$$

Om ett ytskikt kombineras med ett skikt betong med tjockleken Δx och permeabiliteten K kan flödet enkelt beskrivas med en summa av de båda skiktens motstånd $Z + \Delta x/K$. Trycket i ekvationen kan då väljas som medelvärde av trycken på ömse sidor av materialkombinationen.

3.4.1.2 Massbalans i betong

Luftinflöde och tryckändringar med tiden kan beräknas genom att lösa massbalansekvationen för respektive betongvolym och ur denna lösning beräkna luftflödet in genom betongarean.

Massbalansekvationen för luft i betong ges av figur 3.4.1 och ekvation (3.4.7)



Figur 3.4.2 Massbalans för luft i betong.

Ändringen med tiden av massan m av luft i betongens porsystem uppkommer av skillnaden i luftflöden till och från varje punkt x i materialet.

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \cdot V_{btg}$$

eller

$$\Delta m = \frac{q_1 - q_2}{\Delta x} \cdot V_{btg} \cdot \Delta t \quad [kg] \quad (3.4.7)$$

3.4.1.3 Tryckändring i betong
Tryckändringen i punkten x ges av

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{m}{M \cdot V_{luft}} RT \right) = \frac{\partial m}{\partial t} \cdot \frac{RT}{M} \cdot \frac{1}{V_{luft}}$$

eller

$$\Delta P = \Delta m \cdot \frac{RT}{M} \cdot \frac{1}{V_{luft}} = \frac{q_1 - q_2}{\Delta x} \cdot \frac{RT}{M} \cdot \frac{1}{V_{luft}} \cdot V_{btg} \cdot \Delta t = \frac{q_1 - q_2}{\Delta x} \cdot \frac{RT}{M} \cdot \frac{1}{V_{luft} / V_{btg}} \cdot \Delta t \quad [Pa] \quad (3.4.8)$$

Här är V_{luft}/V_{btg} den lufttillgängliga porositeten, av Fredlund (2006) kallad π_{luft} .
Denna beräknas från betongens porositet p och vattenmättnadsgrad S

$$\pi_{luft} = p \cdot (1 - S) \quad (3.4.9)$$

3.4.1.4 Massbalans i luftvolym
Massbalansen i luftvolymen i reaktorinneslutningen sedan man nått maximal tryckstegring påverkas av inflödet i de olika betongvolymerna

$$\Delta m_{luftvolym} = - \sum_i q_i \cdot A_i \cdot dt$$

eller

$$\Delta m_{luftvolym}(t) = - \sum_{i=1}^{i=6} q_i(x=0, t) \cdot A_i \cdot \Delta t \quad (3.4.10)$$

Därefter beräknas trycksänkningen ur

$$\frac{\partial P_{luftvolym}}{\partial t} = \frac{\partial m_{luftvolym}}{\partial t} \cdot \frac{RT}{M} \cdot \frac{1}{V_{luftvolym}}$$

eller

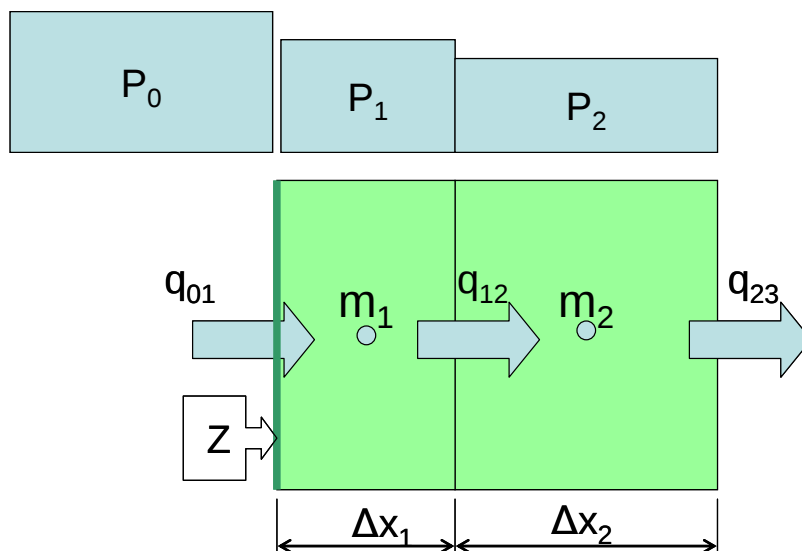
$$\Delta P = \Delta m \cdot \frac{RT}{M} \cdot \frac{1}{V_{luftvolym}} \quad [Pa] \quad (3.4.11)$$

3.4.2 Numerisk lösning

En numerisk lösning erhålls på följande sätt. Varje betongvolymys tryckhistoria beräknas på följande sätt:

- Betongvolymen delas in i skivor med olika tjocklek Δx in från den exponerade ytan, eventuellt med ett ytskikt.
- Det initiala lufttrycket i respektive skikt anges som lika med det initiala lufttrycket i reaktorinneslutningen.
- Lufttrycket i luftvolymen i reaktorinneslutningen efter tidssteget Δt beräknas, ur villkoret för tryckstegringen
- Ur lufttrycksskillnaden och motståndet beräknas luftflödet mellan parvisa skivor, ekvation (3.4.4) och (3.4.6).
- Ur skillnader i luftflöden till och från respektive skiva beräknas ändringen i luftmassan och lufttrycket i respektive skiva, ekvation (3.4.7) och (3.4.8)
- Det nya lufttrycket i respektive skiva beräknas som summan av det tidigare trycket och tryckändringen.
- Därefter upprepas a)-f) för varje tidssteg
- När man nått maximal tryckstegring beräknas trycksänkningen i luftvolymen i reaktorinneslutningen genom att reducera luftmassan med summan av det inflöde som sker under respektive tidssteg in i de olika betongvolymerna, ekvation (3.4.11).
- När tryckprovningen avslutas sänks trycket på samma sätt som vid tryckstegringen, med en konstant trycksänkingshastighet.

I de flesta av dessa fall är respektive ekvation direkt tillämpbar. Undantaget är ekvationerna för flöden som behöver skrivas om för en numerisk beräkning.



Figur 3.4.3 Massbalans för luft i betong för numerisk lösning.

Luftflödet mellan två celler beskrivs med ekvation (3.4.4), men med medeltrycket mellan de två skivorna. Eftersom permeabiliteten antas lika blir detta då

$$q_{12} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot \frac{P_1 + P_2}{2} \cdot \frac{P_1 - P_2}{\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{2}} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \quad (3.4.12)$$

Flödet mellan luftvolymen och den första cellen, där det eventuellt finns ett ytmotstånd emellan, blir

$$q_{01} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot \frac{P_0 + P_1}{2} \cdot \frac{P_0 - P_1}{Z + \frac{\Delta x_1}{2 \cdot K}} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot \frac{P_0^2 - P_1^2}{2 \cdot Z + \frac{\Delta x_1}{K}} \quad (3.4.13)$$

Att använda medeltrycket, utan att ta hänsyn till förhållandet mellan motstånden, kan synas vara en viss approximation men en härledning med sådan hänsyn ger faktiskt ovanstående uttryck!

För att den numeriska lösningen skall konvergera fordras att tidsteget inte väljs för stort. Det första tidstegen på ca 0.08-0.12 h visade sig vara alldeles för långt, med cellstorlekar på 0.01 m och permeabiliteten $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Inte ens tio gånger så stora cellstorlekar, dvs 0.10 m, räckte. Cellstorleken skulle behöva vara 0.15 m vid denna permeabilitet.

Tidsteget gjordes därför tio gånger mindre, dvs 10 gånger fler rader i Excelbladen utnyttjades! Totalt blev det 5000 rader. Med dessa tidsteg klaras 0.075 m tjocka celler om permeabiliteten begränsas till $100 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ och den lufttillgängliga porositeten inte är mindre än 0.02, dvs 2 %.

3.4.3 Hela tryckförloppet

Hela tryckförloppet består av fem steg:

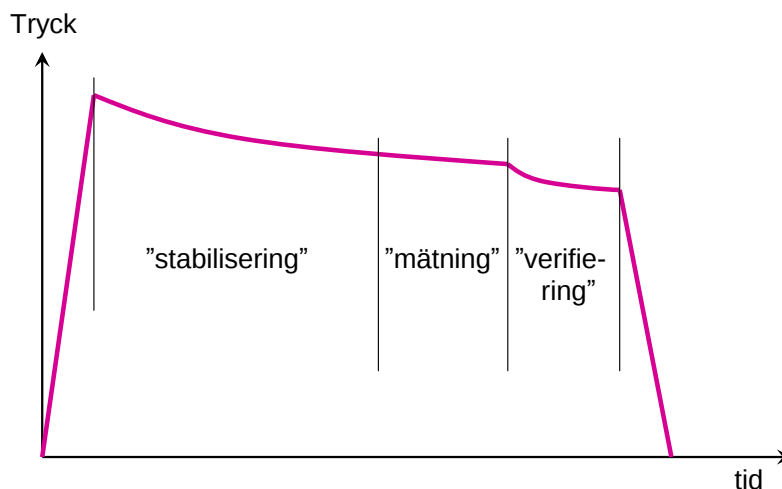
1. "Tryckstegring" med konstant tryckstegringshastighet under en viss tid, samtidigt som gasinträngning börja ske in i betongvolymerna.
2. "Stabilisering" under viss tid, dvs stängning av inneslutningen och tryckminskning på grund av gasinträngning i betongvolymerna.
3. "Mätning" under viss tid, normalt 8 timmar, med fortsatt tryckminskning på grund av gasinträngning i betongvolymerna.
4. "Verifiering" under viss tid, då en ventil öppnas och ger ett extra, känt gasflöde ut ur inneslutningen, med fortsatt gasinträngning i betongvolymerna.
5. "Trycksänkning" under viss tid med konstant trycksänkingshastighet tills atmosfärstrycket nås.

Under alla dessa fem steg beräknas gasflödena och tryckförloppet inne i och in i, respektive ut ur, betongen med ovanstående metod. Det som skiljer är

randvillkoren för den sammanlagda arean av betongvolym under respektive steg:

1. Lufttrycket ökar linjärt med tiden
2. Luftvolymen hålls konstant (trycket sjunker)
3. Luftvolymen hålls konstant (trycket sjunker)
4. Luftmassan minskar med det konstanta luftflödet Q_{ut} [kg/s]
5. Lufttrycket minskar linjärt med tiden.

Tryckförloppet hos inneslutningens luftvolym visas, överdrivet i nedanstående figur.

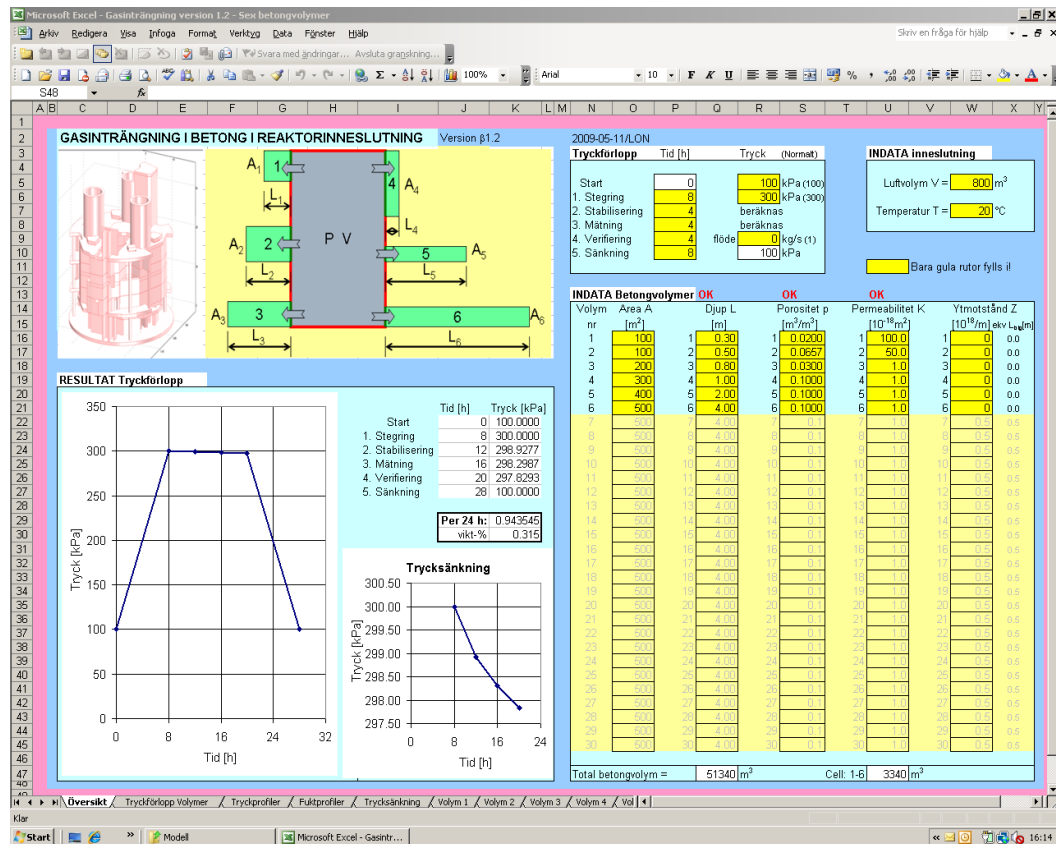


Figur 3.4.4 Principiellt tryckförlopp hos inneslutningens luftvolym.

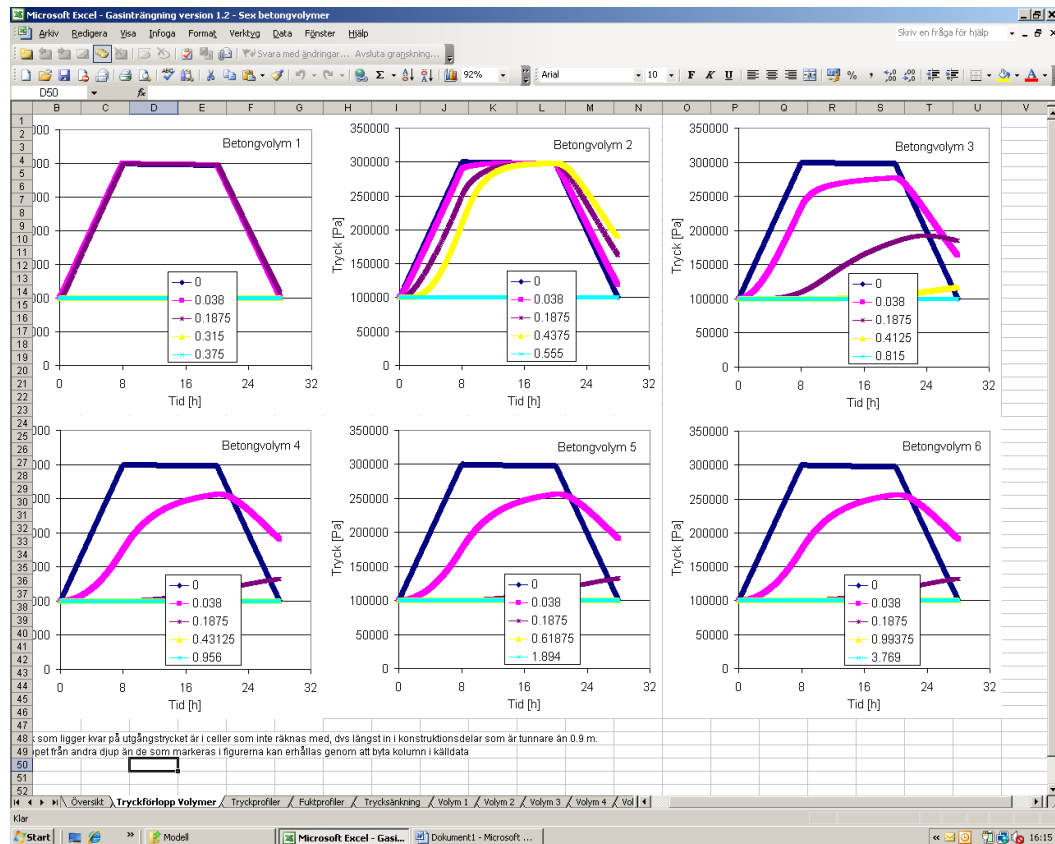
3.4.4 Excelmodellen

Ovanstående matematik och numerik har lagts in i en Excelfil med ett ark för varje betongvolym. På dessa ark beräknas luftflödena mellan 12 celler och luftmassan i porvolymen i respektive cell. Flödena in i de första cellerna är kopplade till arket Trycksänkning där beräkningen av trycket i inneslutningen beräknas. Med sex betongvolym blev Excelfilen 44 Mb.

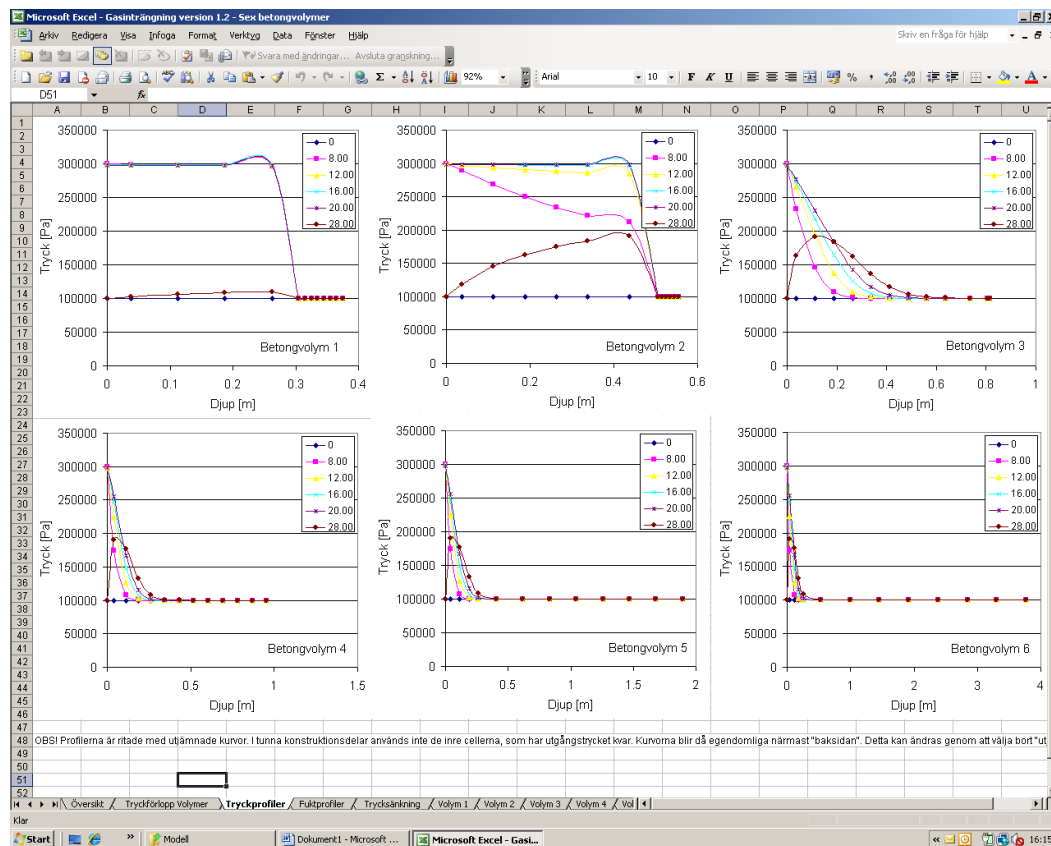
I nedanstående figurer visas det första arket, "Översikt", där in och utmatning sker samt arken som i diagramform åskådliggör beräkningsresultatet som tryckprofiler och tryckförlopp.



Figur 3.4.5 Arket "Översikt" som innehåller ett område för inmatning av indata i celler och ett område för utdata i form av två diagram och en tabell.



Figur 3.4.6 Arket "Tryckförlopp" som visar trycket som funktion av tiden på några olika djup.



Figur 3.4.7 Arket "Tryckprofiler" som visar trycket som funktion av djupet vid några olika tider.

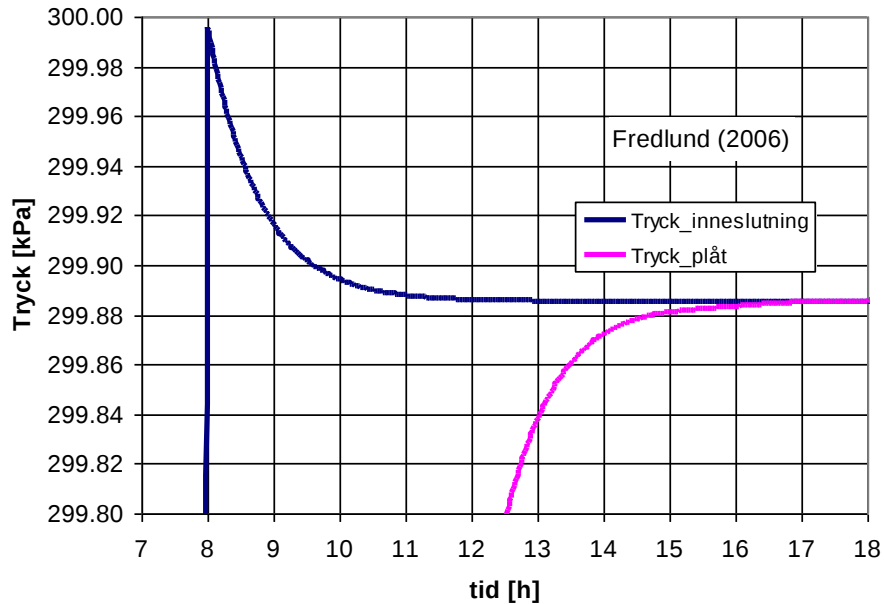
En kortfattad manual för användningen av Excelmodellen har utarbetats.

3.4.5 Verifiering av Excelmodellen

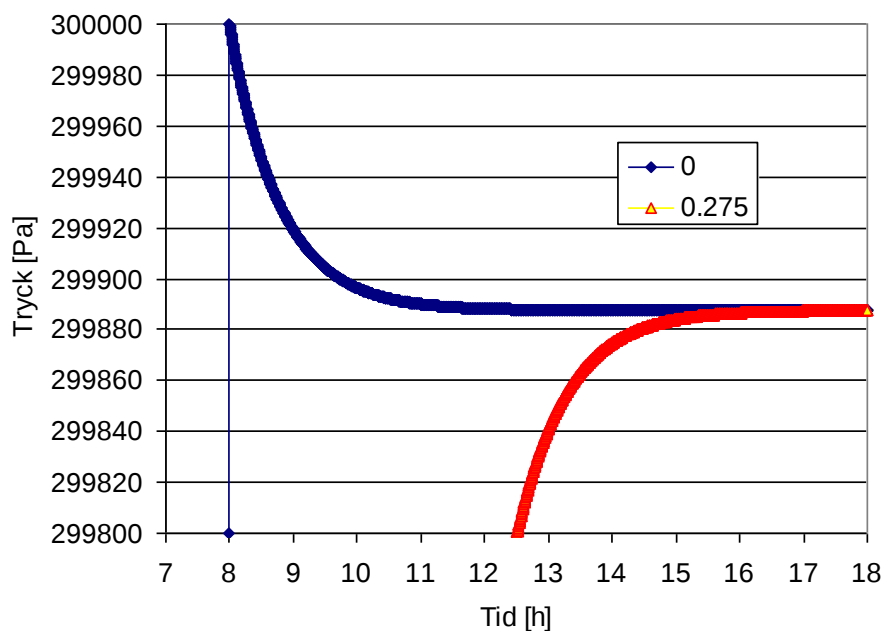
Excelmodellen är en finita-differensmodell vilket innebär att den beskriver tryckförloppet genom att använda ovanstående ekvationer i små celler och med små tidsteg. Dessa cellstorlekar och tidsteg är mycket större än vad som kan göras i en FEM-modell, t ex i ComsolMultiphysics. För att kontrollera modellen har två beräkningar gjorts med samma förutsättningar som i en tidigare beräkning av Fredlund (2006). Dessa förutsättningar var:

1. Begynnelsestrycket 100000 Pa.
2. Tryckhöjning från 100 kPa till 300 kPa på 8 h, dvs (ca 7 Pa/s).
3. Antagen RF i betong = 68 %.
4. Permeabiliteten = $5.16 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.
5. Lufttillgänglig porositet = $0.0657 \text{ m}^3/\text{m}^3$.
6. Geometrisk modell i 2D:
 - Tjocklek betong = 0.3 m.
 - Tjocklek luft = 3.2 m.
 - 1 m²

Med dessa förutsättningar erhöll Fredlund (2006) tryckförloppet enligt figur 3.4.8.



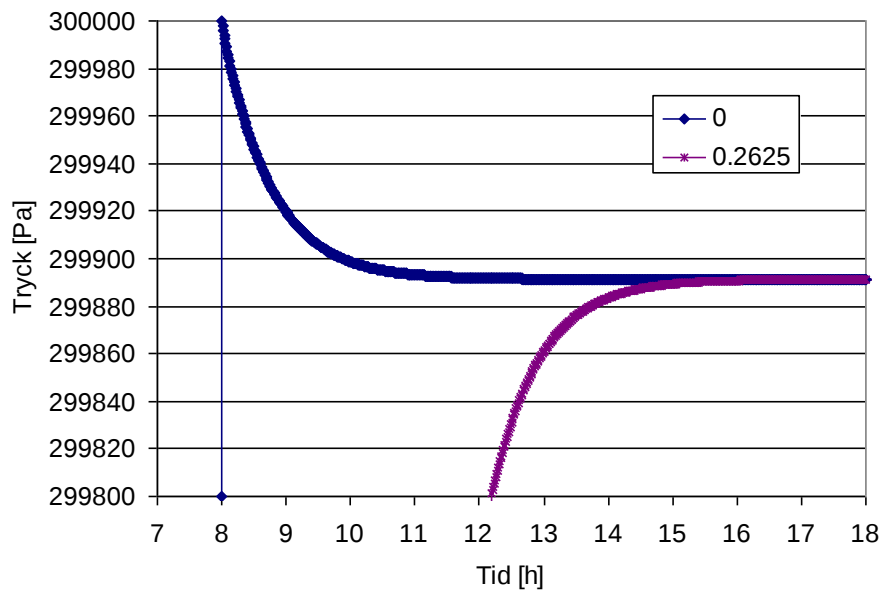
Figur 3.4.8 Tryckförlopp beräknat med Comsol Multiphysics, Fredlund (2006), med i texten beskrivna förutsättningar.



Figur 3.4.9 Tryckförlopp beräknat med Excelmodellen med en betongvolym på 1 m^2 och tjockleken 0.30 m , med i texten beskrivna förutsättningar.

Överensstämmelsen är väldigt god. Sluttrycken skiljer sig dock åt något. Excelmodellen gav sluttrycket 299887.6 Pa medan Comsolmodellen gav 299885.5 Pa. Detta får anses vara tillräckligt bra.

En ytterligare kontroll har gjorts med Excelmodellen i version 1.2 med sex betongvolymmer. De sex volymerna har getts arean $1/6 \text{ m}^2$ och i övrigt samma förutsättningar som ovan. Resultatet visas i figuren nedan. Överensstämmelsen är relativt god och får anses acceptabel.



Figur 3.4.10 Tryckförlopp beräknat med Excelmodellen med sex betongvolymmer med arean $1/6 \text{ m}^2$ vardera och tjockleken 0.30 m, med i texten beskrivna förutsättningar.

4 Gas- och materialegenskaper

För att kunna lösa betongens tryckekvation, dels för simulering av en täthetsprovning, dels för simulering av verifieringsförsök, behövs en del data. Vissa av dessa parametrar har tagits från litteratur och andra har bestämts experimentellt. Tryckekvationen ges av:

$$\pi_{\text{luft}} * \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\mu} * P(x,t) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0$$

4.1 Gasens egenskaper

4.1.1 Molvikt

Gasens (luftens) molvikt antas vara konstant och enligt Elmarsson & Nevander (1994) är molvikten av torr luft:

$$M = 0,02896 \text{ kg/mol}$$

4.1.2 Allmänna gaskonstanten, R

Enligt Elmarsson & Nevander (1994) är den allmänna gaskonstanten lika med:

$$R = 8,3143 \text{ J/(mol*K)}$$

4.1.3 Luftens temperatur, T

Lufttemperaturen antas vara konstant genom försöken. Temperaturen sätts lika med 20°C för verifieringsförsöken och 30°C för simulering av en täthetsprovning, vilket ger T i Kelvin:

$$T_{\text{verifieringsförsök}} = 20 + 273 = 293 \text{ K} \quad (4.1.3.1)$$

$$T_{\text{täthetsprovning}} = 30 + 273 = 303 \text{ K}$$

Eftersom molvikten, allmänna gaskonstanten och temperaturen har antagits vara konstanter har dessa förenklas bort i betongens tryckekvation ovan.

4.1.4 Luftens viskositet, μ

Viskositeten är en egenskap hos både gaser och vätskor som betecknar deras motstånd mot flöden. Luftens dynamiska viskositet kan beräknas enligt (Elmarsson, Nevander, 1994):

$$\mu = (17,1 + 0,049 * \theta) * 10^{-6} \quad (\text{Ns/m}^2) \quad (4.1.4.1)$$

där θ är luftens temperatur i °C, vilket för $\theta = 20^\circ\text{C}$ och $\theta = 30^\circ\text{C}$ ger:

$$\mu(20^\circ\text{C}) = 1,808 * 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$\mu(30^\circ\text{C}) = 1,857 * 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

4.2 Materialegenskaper

I detta delkapitel ges en beskrivning av hur gaspermeabiliteten och den lufttillgängliga porositeten bestämdes. Dessa parametrar bestämdes experimentellt.

4.2.1 Cembureau Permeabilitetsutrustning

För att bestämma gaspermeabiliteten, K , hos betong användes Cembureau permeabilitetsutrustning på Chalmers i Göteborg. Figur 4.2.1.1 visar hur utrustningen ser ut i genomskärning. Provkropparna som används i denna metod är cylindriska och har en tjocklek, l , på ca 50 mm och en diameter på ca 150 mm. Principen går ut på att man lägger på ett övertryck på ena sidan av provkroppen som fördelas jämnt över ytan genom att gas tillförs (oxygen inlet, Figur 4.2.1.1). Övertrycket hålls konstant med hjälp av en tryckregulator. Gasen som användes i försöken var luft. Trycket på ovansidan av provkroppen, p_a , är 101.325 kPa (atmosfärstryck).

Skillnaden i gastryck på provkroppens undersida och ovansida ger upphov till ett gasflöde genom betongens porsystem. Under antagande av laminärt gasflöde kan gaspermeabiliteten, K , bestämmas enligt Hilsdorf, H. K. & Kropp, J. (1995):

$$K = \mu \frac{Ql}{tA (p_1^2 - p_a^2)} \quad (\text{m}^2) \quad (4.2.1.1)$$

där

K = gaspermeabiliteten (m^2)

μ = gasens dynamiska viskositet (Ns/m^2)

Q = gasvolymen uppmätt under tiden t vid gastrycket p_a (m^3)

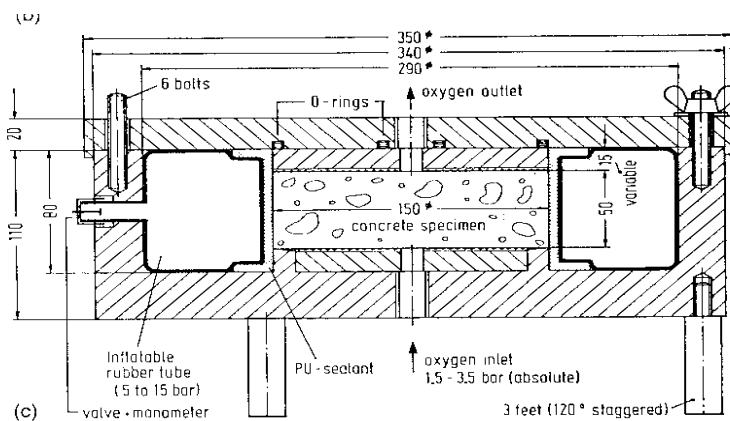
l = provkroppens tjocklek (m)

A = tvärsnittsytan av provkroppen (m^2)

p_a = absoluta trycket hos utströmmande gas (Pa)

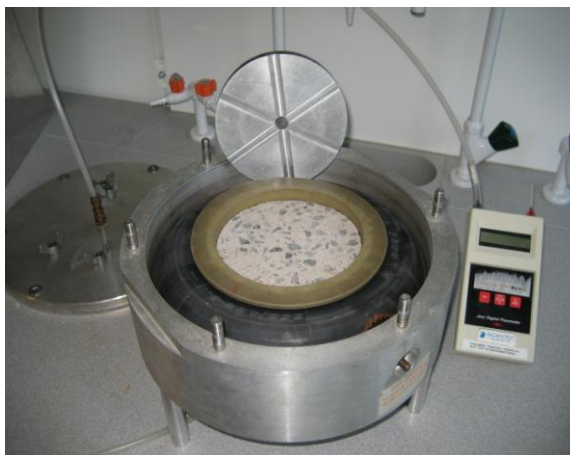
p_1 = absoluta trycket hos inströmmande gas (Pa)

t = tiden (s)



Figur 4.2.1.1 Permeabilitetsutrustning i genomskärning (Hilsdorf & Kropp, 1995, s. 228).

En slang runt provkroppen (Inflatable rubber tube, Figur 4.2.1.1), som kan trycksättas med 5 till 15 bar, förhindrar att gas läcker förbi provkroppen, se Figur 4.2.1.2.



Figur 4.2.1.2 Cembureau permeabilitetsutrustning. På bilden syns slangen runt provkroppen och locket med rännor som samlar upp den utströmmande gasen. Flödesmätaren till höger användes inte vid försöken.



Figur 4.2.1.3 Utrustningen redo att användas. Tryckregulator till vänster.



Figur 4.2.1.4 Gasflödet bestämdes m h a menisk i mätrör.

Försöken genomförs genom att man utsätter provkroppen för olika övertryck (inströmmande gas) relativt atmosfärstrycket, p_a (utströmmande gas). Vid varje övertryck krävs en viss tid innan gasflödet genom betongen blir stationärt. Detta krav är uppfyllt då två efterföljande mätningar av flödet avviker mindre än 3 %. Tiden mellan dessa mätningar ska vara 15 minuter (Abbas, Carcasses, Ollivier, 1998). Flödet mäts genom att se hur snabbt en menisk av "jättebubbelmix" transporteras i ett mätrör (Figur 4.2.1.4). Mätröret är via slang ihopkopplat med utrustningen. Permeabiliteten räknas sedan ut för varje övertryck med hjälp av ekvation 4.2.1.1, sedan tas medelvärdet av dessa som den slutgiltiga permeabiliteten K .

4.2.2 Metod för bestämning av lufttillgänglig porositet

Den lufttillgängliga porositeten kan bestämmas genom att konditionera en betongprovkropp till en känd relativ fuktighet. När konditioneringen är färdig registreras slutvikten och därefter vakuummätas den så att alla öppna porer fylls med vatten. Genom att väga den vakuummättade provkroppen i vatten respektive luft kan provkroppens volym bestämmas enligt Fagerlund (2002):

$$V_{btg} = \frac{M_{luft} - M_{vatten}}{1000} \quad (m^3) \quad (4.2.2.1)$$

där

$$\begin{aligned} V_{btg} &= \text{provets volym } (m^3) \\ M_{luft} &= \text{provets vikt i luft } (kg) \\ M_{vatten} &= \text{provets vikt nedsänkt i vatten } (kg) \\ 1000 &\text{ är vattens densitet } (kg/m^3) \end{aligned}$$

Utifrån slutvikten efter konditionering, volymen samt vikten av provkroppen då den är vakuummättad kan man bestämma den lufttillgängliga porositeten enligt följande:

$$\pi_{luft} = \frac{m_{vakuum} - m_{kond}}{1000 * V_{btg}} \quad (m^3/m^3) \quad (4.2.2.2)$$

där

$$\begin{aligned} m_{vakuum} &= \text{vikt av vakuummättad provkropp } (kg) \\ m_{kond} &= \text{slutvikt vid konditionering } (kg) \end{aligned}$$

4.2.3 Provkroppar

För att bestämma materialegenskaperna har mätningar utförts på olika provkroppar. Borrkärnor från Ringhals har använts för att ta fram materialegenskaper som senare används som indata i simuleringar av en täthetsprovning. Provkroppar har också gjutits för att ta fram materialegenskaper till simuleringar av verifieringsförsök.

4.2.3.1 Provkroppar – Ringhals

Provkroppar till permeabilitetsmätningar

Totalt konditionerades åtta stycken provkroppar avsedda till permeabilitetsmätningar. Provkropparna sågades ut från fyra stycken betongkärnor från Ringhals, två provkroppar från varje kärna, till en tjocklek på ca 50 mm och en diameter på ca 150 mm. Provkropparna namngavs efter vilken cylinder de var utsågade från, samt i vilken ordning de sågades. Exakta dimensioner hos respektive provkropp redovisas i tabell 4.2.3.1.1 nedan.

Tabell 4.2.3.1.1 Dimensioner hos provkroppar avsedda till permeabilitetsmätningar.

Provkropp 1:1		Provkropp 2:1		Provkropp 3:1		Provkropp 4:1	
t [mm]	Ø [mm]	t [mm]	Ø [mm]	t [mm]	Ø [mm]	t [mm]	Ø [mm]
52.80	143.45	53.30	143.65	51.30	143.40	50.85	143.35
Provkropp 1:2		Provkropp 2:2		Provkropp 3:2		Provkropp 4:2	
t [mm]	Ø [mm]	t [mm]	Ø [mm]	t [mm]	Ø [mm]	t [mm]	Ø [mm]
54.15	143.20	50.90	143.75	50.05	143.35	49.80	143.30

Provkropparna konditionerades i 30°C vid fyra olika RF-nivåer. RF-nivåerna erhöles med hjälp av mättade saltlösningar. Salterna som användes var kaliumklorid (KCl), natriumklorid (NaCl), natriumbromid (NaBr) och magnesiumklorid (MgCl₂). Dessa saltlösningar ger en relativ fuktighet på 84 %, 75 %, 55,5 % respektive 33 %. Vid varje klimat konditionerades två provkroppar.

Innan konditioneringen kunde påbörjas kapillärmättades provkropparna och placerades först därefter i boxar med ovanstående klimat. Provkropparna vägdes med jämna mellanrum för att se när jämvikt uppnåtts.

Konditioneringen skedde vid 30°C eftersom temperaturen i en reaktorinneslutning, enligt fältmätningar, ligger runt denna temperatur. Anledningen till att provkropparna konditionerades till olika RF var att kunna ta reda på hur permeabiliteten beror av fukttinnehållet.

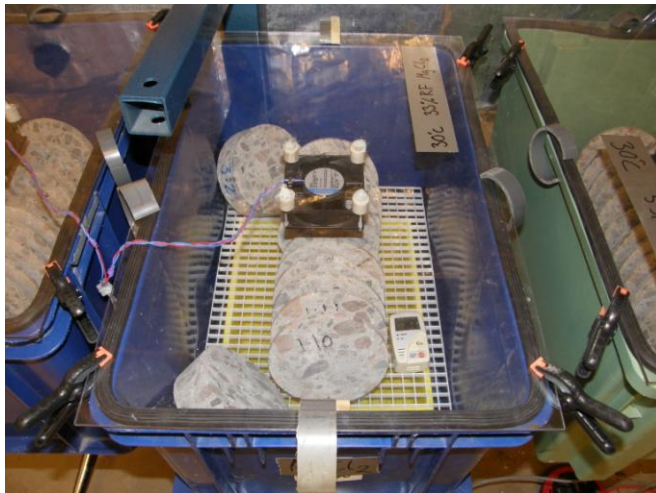
Provkroppar för bestämning av lufttillgänglig porositet

Från ovanstående fyra borrhärlor sågades även provkroppar för bestämning av lufttillgänglig porositet ut, i form av tunna skivor. Provkropparna namngavs efter vilken betongcylinder de utsågats från, samt i vilken ordning de sågats.

Provkropparna kapillärmättades för att sedan placeras i olika klimat. Konditioneringen skedde vid 30°C för att återspegla temperaturen i en reaktorinneslutning. Olika RF genererades genom att använda olika mättade saltlösningar. Följande salter användes: KCl (84 %), NaCl (75 %), NaBr (55,5 %), MgCl₂ (33 %), LiCl (12 %). Vid varje RF-nivå konditionerades totalt ca 10 stycken provkroppar, där betong från varje cylinder fanns representerad.

Provkropparna vägdes med jämna mellanrum för att se när jämvikt uppnåtts.

Anledningen till att provkropparna konditionerades till olika RF var att kunna undersöka hur den lufttillgängliga porositeten beror av fuktinnehållet.



Figur 4.2.3.1.1 Bilden visar konditionering av provkroppar från Ringhals.

4.2.3.2 Provkroppar – Barsebäcksbetong

Olika typer av provkroppar göts enligt recept för barsebäcksbetong med $v_{ct} = 0,49$. Några av provkropparna användes för att bestämma permeabilitet och lufttillgänglig porositet. Materialegenskaperna togs fram för att användas som indata i de simuleringar som gjordes för att verifiera den matematiska ekvationen som beskriver tryckfördelning i betong. Provkropparna som användes vid verifieringsförsöken göts också enligt recept för barsebäcksbetong.

Provkroppar till permeabilitetsmätningar

Utifrån två betongcylindrar med en diameter på 150 mm sågades provkroppar till en tjocklek på 50 mm innan konditionering. Fyra av dessa provkroppar (I:1, I:3, II:1, II:3) placerades sedan i ett klimat på 40°C, 75 % RF för konditionering. Anledningen till att konditioneringen skedde vid 40°C var att snabba på uttorkningsprocessen.

Provkroppar för bestämning av lufttillgänglig porositet

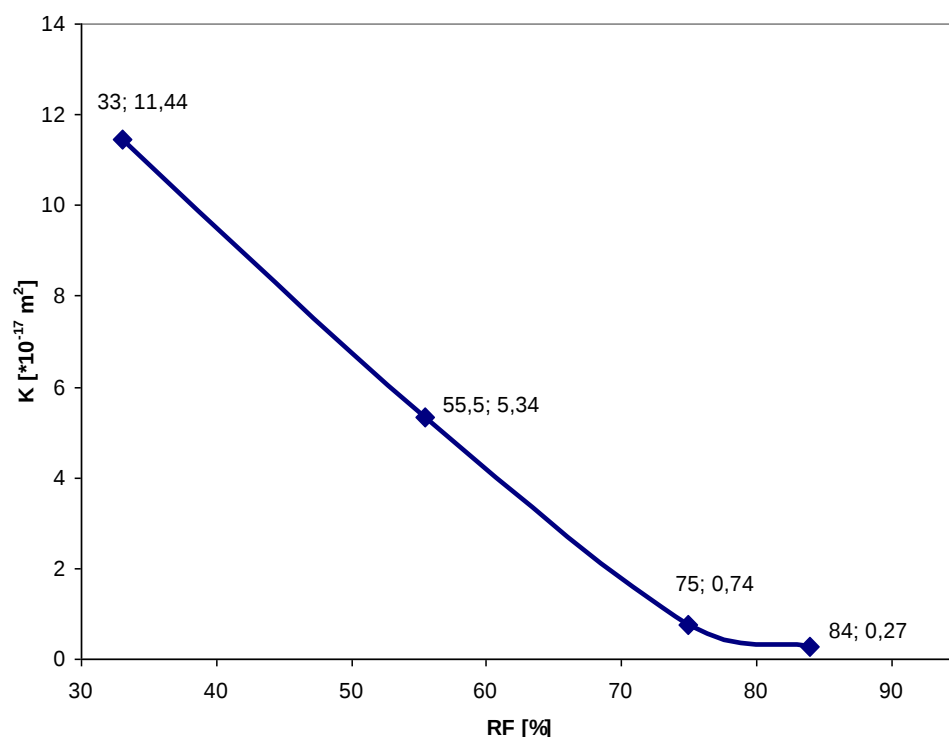
Provkroppar har gjutits, härdats och konditionerats för att kunna mäta lufttillgänglig porositet. En sådan mätning kan göras med hjälp av DVS, eller enligt samma metod som för ringhalsbetongen, dvs. tunna skivor som konditionerats till ett visst RF.

4.2.4 Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från mätningarna av permeabilitet och lufttillgänglig porositet, både för betongen från Ringhals samt för betong gjuten enligt recept för barsebäcksbetong.

4.2.4.1 Permeabilitet – Ringhals

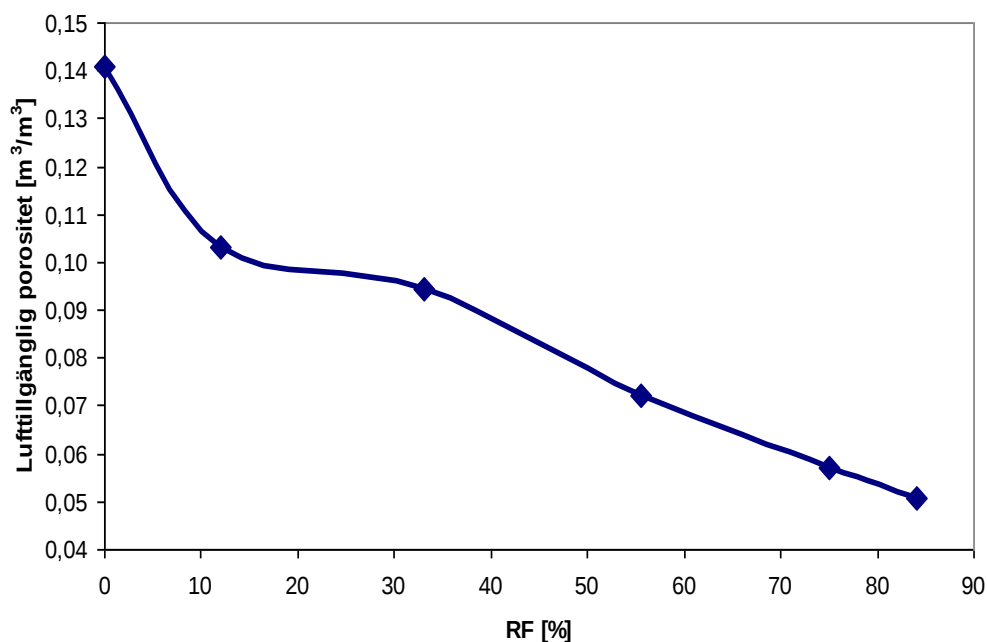
Permeabiliteten mättes på fyra provkroppar som konditionerats till olika relativ fuktighet. Provkropparna som användes i försöken var 4:2 (33 % RF), 4:1 (55,5 % RF), 1:2 (75 % RF) och 1:1 (84 % RF). I Figur 4.2.4.1.1 nedan visas resultaten. Permeabiliteten sjunker markant med ökande RF.



Figur 4.2.4.1.1 Permeabilitet för Ringhalsbetong som funktion av relativ fuktighet.

4.2.4.2 Lufttillgänglig porositet – Ringhals

Den lufttillgängliga porositeten bestämdes för totalt femtio provkroppar som konditionerats i fem olika klimat. Resultaten från mätningarna visas i Figur 4.2.4.2.1 nedan.



Figur 4.2.4.2.1 Lufttillgänglig porositet för Ringhalsbetong som funktion av relativ fuktighet.

4.2.4.3 Permeabilitet – Barsebäcksbetong

För barsebäcksbetongen har än så länge permeabiliteten bara bestämts för en provkropp. Provkroppen, I:3, konditionerades i 40°C, 75 % RF innan mätning. Resultatet från mätningen gav en permeabilitet, K , på $4,63 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$.

4.2.4.4 Lufttillgänglig porositet – Barsebäcksbetong

Provkroppar för att kunna bestämma den lufttillgängliga porositeten för barsebäcksbetongen har tillverkats och konditionerats. Mätningar har dock inte gjorts.

5 Verifieringsförsök i laboratoriet

För att kunna verifiera tryckekvationen (ekvation 2.3.22) utfördes verifieringsförsök i laboratoriet. En tank som tidigare använts till att vakuummätta betongbalkar modifierades så att en betongprovkropp kunde monteras genom den ena gaveln. Provkropparna göts enligt recept för barsebäcksbetong. Figur 5.1 visar tanken och en del av en provkropp som sticker ut genom ena gaveln. Figur 5.2 visar en provkropp samt insidan av gaveln med genomföring för montering av provkropp.



Figur 5.1 Försöksupställning.

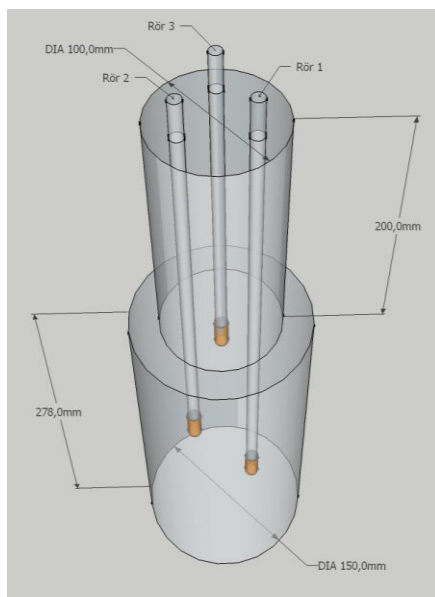


Figur 5.2 Provkropp och gavel med genomföring.

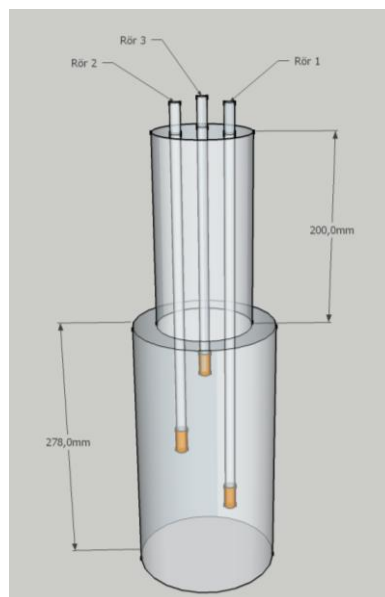
5.1 Provkroppar

Provkropparna som användes i försöken göts i en specialtillverkad gjutform för att kunna monteras genom gaveln. Totalt tillverkades tre provkroppar som konditionerades i ett klimat på 40°C, 75 % RF. Provkropparnas dimensioner framgår av Figur 5.1.1 och Figur 5.1.2. Den inneslutna luftvolymen i tanken bestämdes till 2,005 m³.

För att kunna mäta trycket i betongen göts tre rostfria rör in på olika djup. Vid försöken fylldes dessa rör med vatten och sedan monterades tryckgivare på rörändarna. Trycken som uppstår på de olika djupen i betongen fortplantas genom vattnet till tryckgivarna. Längst fram på rören fästes gummisugare för att hindra att vatten från rören skulle tas upp av betongen. De olika djupen trycket mättes på var; 69,5 mm, 139 mm och 208,5 mm.



Figur 5.1.1 Provkroppens dimensioner.



Figur 5.1.2 Provkroppens dimensioner.

5.2 Försök

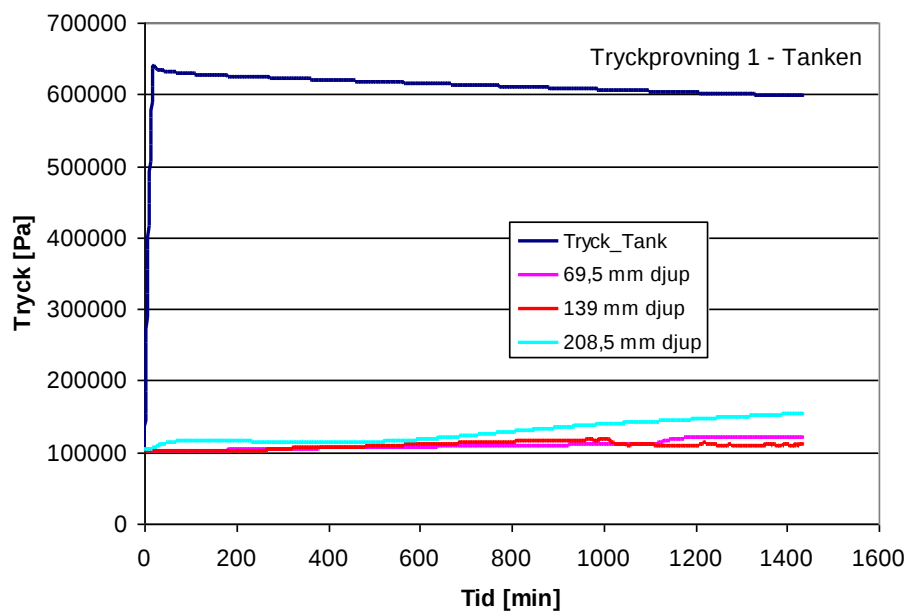
Två försök genomfördes med utrustningen, på olika provkroppar. Först monterades provkroppen i den ena gaveln varpå rören fylldes med vatten och förseddes med tryckgivare. Sedan skruvades gavel med provkropp fast i tanken. För att kunna logga trycket i tanken kopplades även en tryckgivare till denna.

Därefter fylldes tanken med luft, och vid ett visst övertryck avbröts tryckstegringen. Trycket i tanken och provkroppen loggades under försöken. I försök 2 loggades även temperaturen i tanken.

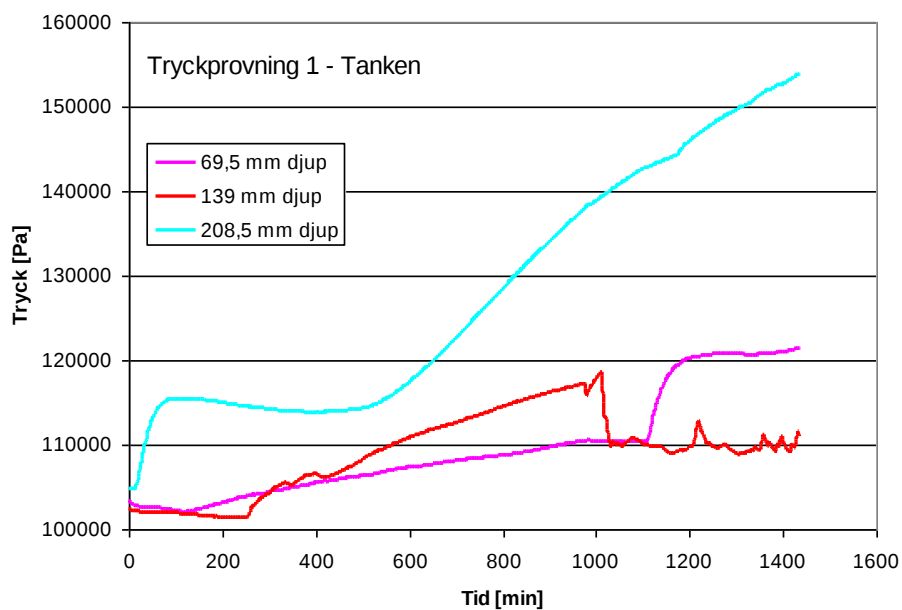
5.3 Resultat

5.3.1 Tryckprovning 1

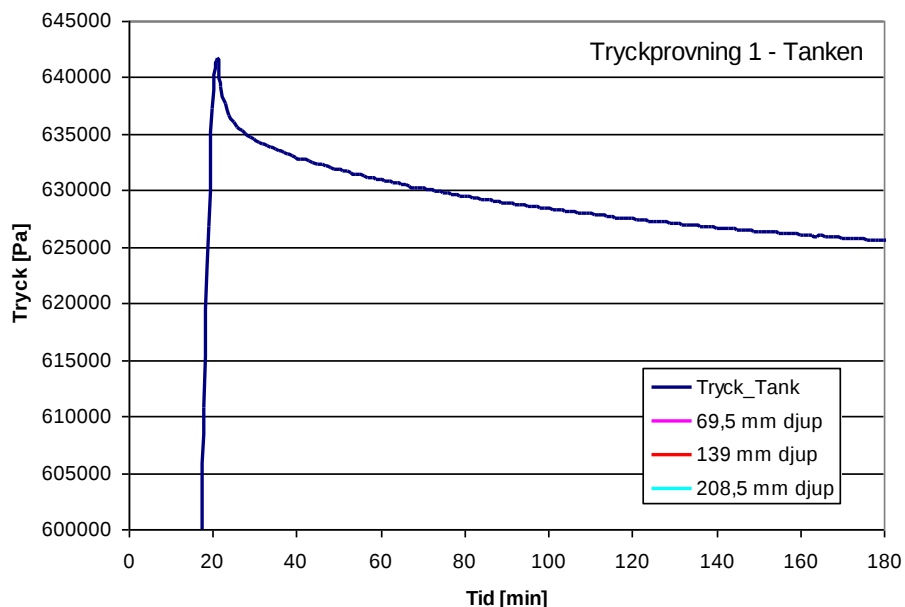
Resultaten från försök 1 med tanken åskådliggörs i figur 5.3.1.1-5.3.1.3 nedan. Trycket i tanken höjdes till ca 5,5 bars övertryck innan tryckstegringen avbröts. I figurerna visas trycket med avseende på tiden både i tanken samt på de olika djupen i betongprovkroppen.



Figur 5.3.1.1 Tryckförlopp i tanken och betongprovkropp, försök 1.



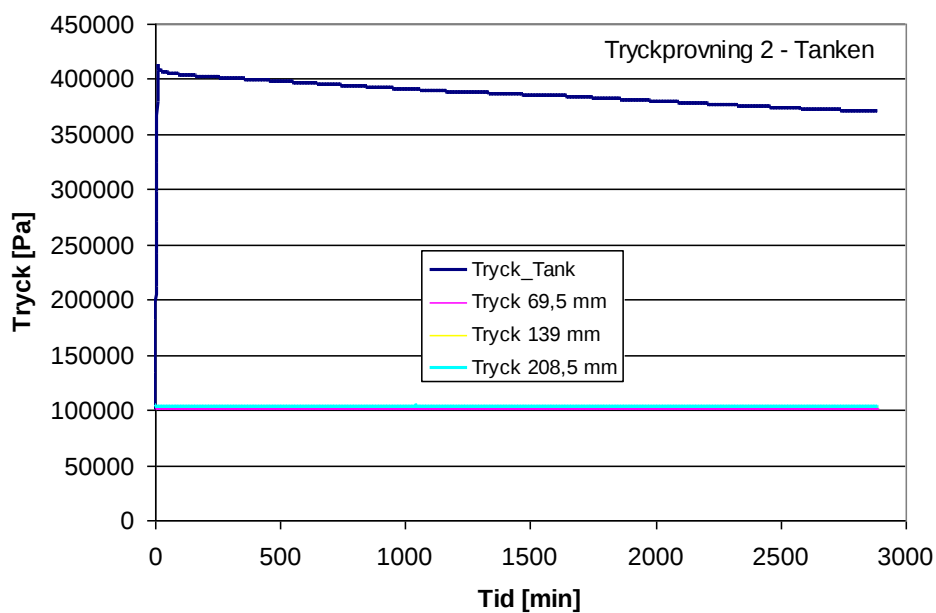
Figur 5.3.1.2 Tryckförlopp på olika djup i betongprovkropp, försök1.



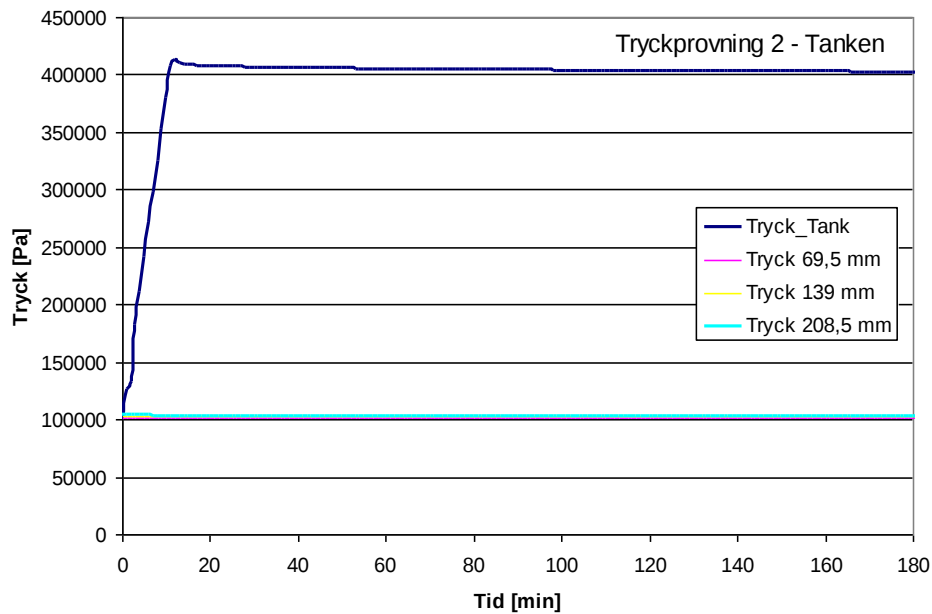
Figur 5.3.1.3 Förstoring av tryckförloppet i tanken efter tryckhöjning.

5.3.2 Tryckprovning 2

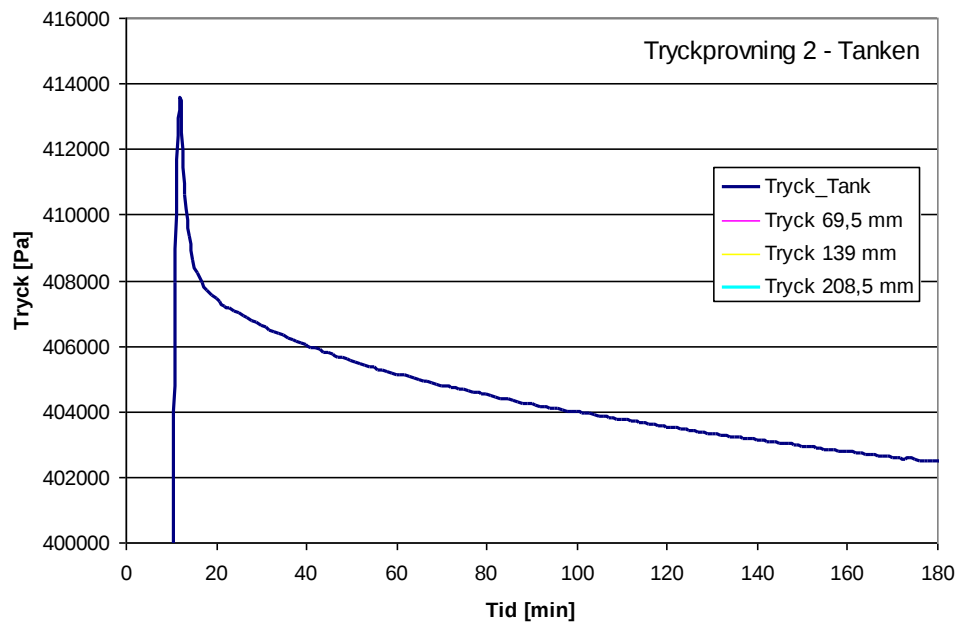
Resultaten från försök 2 med tanken åskådliggörs i figur 5.3.2.1-5.3.2.4 nedan. Trycket i tanken höjdes till ca 3,1 bars övertryck innan tryckstegringen avbröts. I figurerna visas trycket med avseende på tiden både i tanken samt på de olika djupen i betongprovkroppen, samt resultatet från temperaturmätningen i tanken.



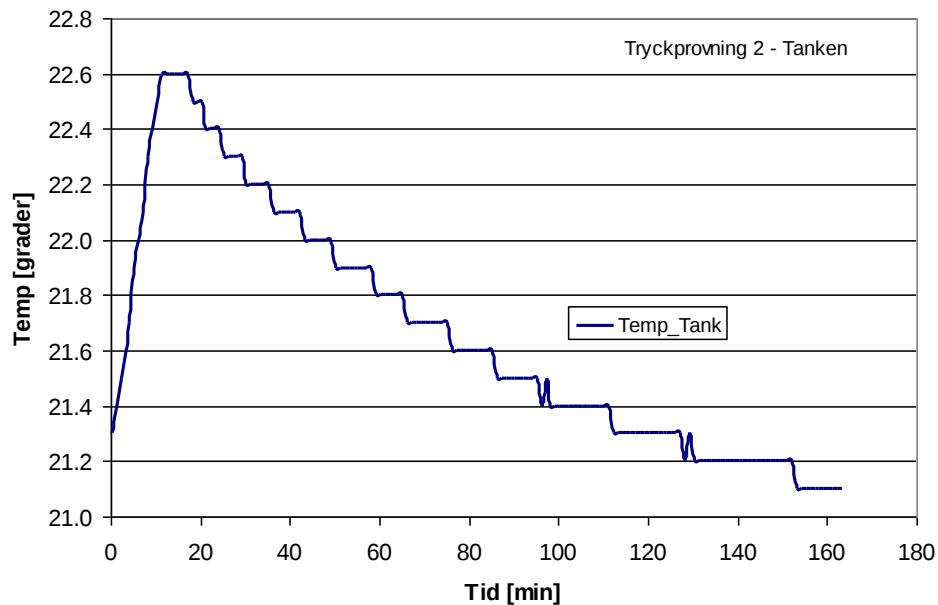
Figur 5.3.2.1 Tryckförlopp i tanken och betongprovkropp, försök 2.



Figur 5.3.2.2 Tryckförlopp i tanken och betongprovkropp under kortare tidsförlopp, försök 2.



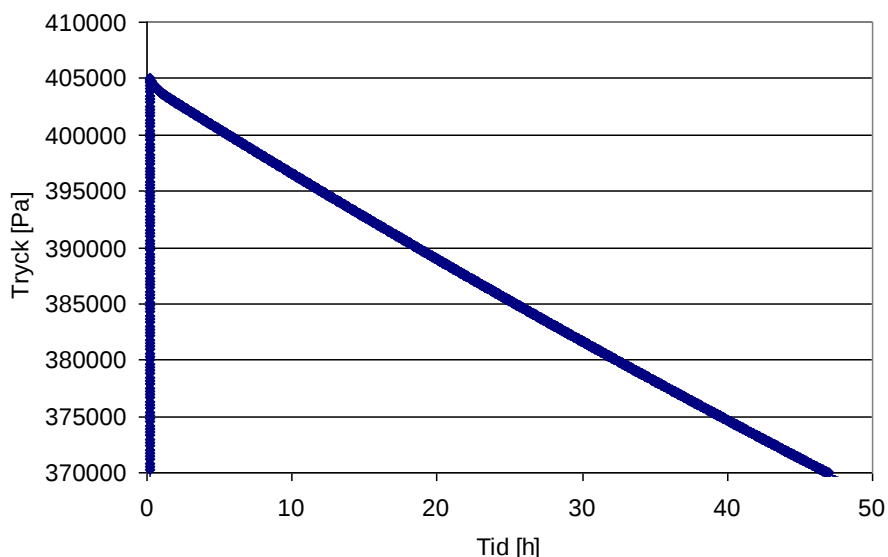
Figur 5.3.2.3 Förstoring av tryckförloppet i tanken efter tryckhöjning.



Figur 5.3.2.4 Temperaturförlopp i tanken, försök 2.

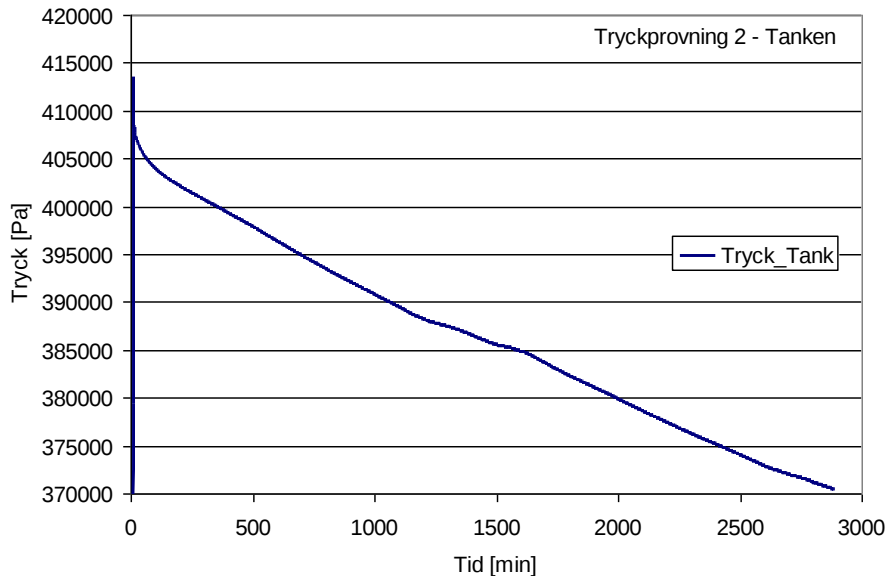
5.4 Simulering av verifieringsförsök

Simulering med Excelmodellen, med $V = 2.005 \text{ m}^3$, $A = 0.0177 \text{ m}^2$, dvs $V/A = 113 \text{ m}^3/\text{m}^2$, och $L = 0.478 \text{ m}$ går inte att göra för permeabiliteter över $K = 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$, av numeriska skäl. Genom att skala om luftvolymen med en faktor 30 motsvarar det en ökning av permeabiliteten med en faktor 30 (vid permeabilitetsmätningen på parallella provkroppar erhöles $K = 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$). Då erhålls trycksänkningen enligt figuren.



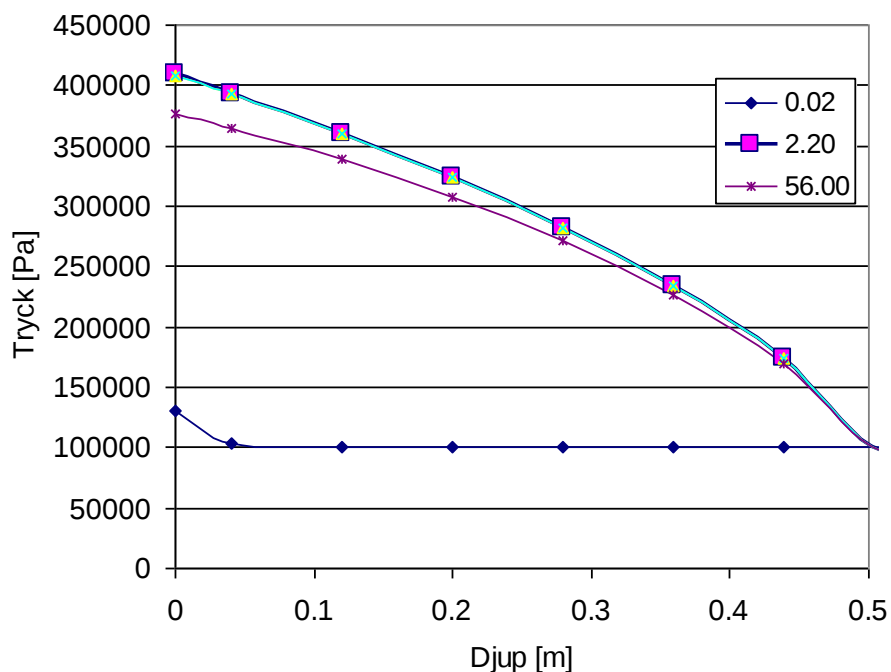
Figur 5.4.1 Beräknad trycksänkning i tanken efter en tryckhöjning till 405 kPa.

Detta stämmer väldigt bra med mätningarna, se nedanstående figur.



Figur 5.4.2 Uppmätt trycksänkning i tanken efter en tryckhöjning till 405 kPa.

I simuleringen erhöles också den stationära tryckfördelningen, se figur.



Figur 5.4.3 Beräknad tryckprofil i tanken efter en tryckhöjning till 405 kPa
Tryckprofilen blir alltså något krökt, vilket är helt naturligt. Vid ett stationärt flöde, dvs samma flöde på alla djup, måste tryckgradienten proportionell mot absoluttrycket, helt enligt ekvationerna i kapitlet Teori.

6 Fältmätningar

Innan täthetsprovningen av R2, 2007, och R4, 2008 mättes RF i ett antal borrhål. Djupen på borrhålen varierade mellan 150-800 mm. I samma borrhål som RF mättes monterades också tryckgivare för loggning av tryck under pågående täthetsprovning. Under täthetsprovningen av R2 monterades även termoelement i några utav hålen.

6.1 Tryck- och RF-mätning i R2, 2007

6.1.1 RF-mätningar

13 hål borrades på olika ställen i inneslutningsbetongen. Efter dammsugning av borrhålen placerades vaisala-givare, som monterats i pvc-rör, i hålen. Längst fram på rören fanns en gummitätning. Rören fixerades med hjälp av tråkilar. Efter en dag avlästes temperatur och RF, se Tabell 6.1.1.1.

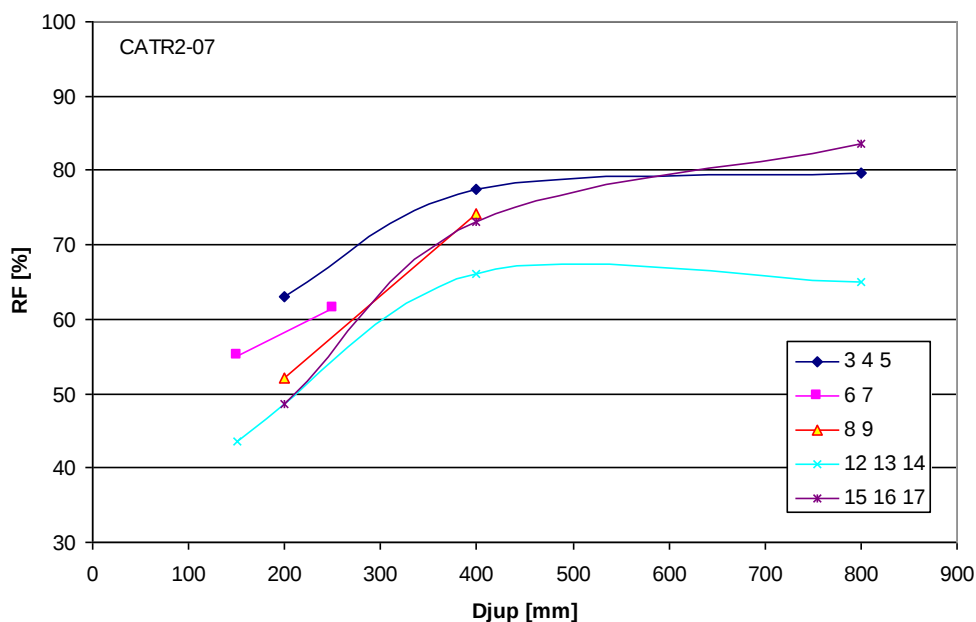
Tabell 6.1.1.1 RF och temperatur i borrhål, CATR2-07.

Borrhål	Djup* (mm)	Kommentar	Givare	RF (%)	T (°C)
3	200	Innervägg reaktortank?? Ytskikt: Gul färg.	43	63.1	28.4
4	400	"	21	77.5	29.9
5	800	"	12	79.6	30.9
6	250	Innervägg ? Ytskikt: Gul färg.	14	61.5	27.1
7	150	"	31	55.2	27
8	200	Innervägg, loop 2, plan +100. Ytskikt: Gul färg.	16	52.1	27.3
9	400	"	33	74.1	27.3
12	150	Borrades ca 250 mm från en obehandlad yta. Botten av borrhålet är förskjutet 15 mm mot den obehandlade ytan. Ytskikt: Gul färg.	37	43.5	32.1
13	400	Borrades ca 280 mm från en obehandlad yta. Botten av borrhålet är förskjutet 70 mm från den obehandlade ytan. Ytskikt: Gul färg.	42	66	33.1
14	800	Borrades ca 250 mm från en obehandlad yta. Botten av borrhålet är förskjutet 40 mm mot den obehandlade ytan. Ytskikt: Gul färg.	15	65	33.5
15	200	Borrades ett antal meter från en obehandlad yta. Ligger nära hål: 12, 13, 14. Ytskikt: Gul färg.	9	48.7	33.4
16	400	"	41	73	34.4
17	800	"	39	83.5	35.4

* Borrhålets längd, dvs inte det rätvinkliga djupet in i betongen. De flesta borrhålen lutar ca 20°

Samma färg innebär att hålen borrades nära varandra.

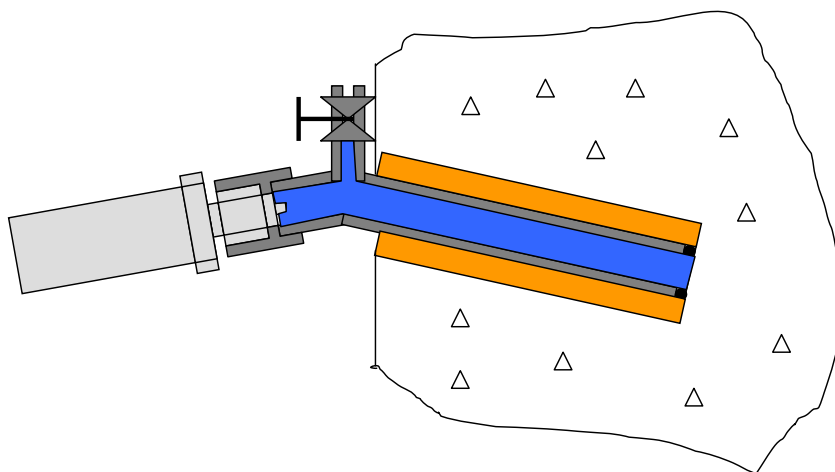
I Figur 6.1.1.1 visas resultaten från RF-mätningarna i form av RF-fördelning med avseende på djup i betongen. RF i de borrhålen som låg nära varandra (samma färger i tabell ovan) plottas tillsammans.



Figur 6.1.1.1 RF-fördelning med avseende på djup.

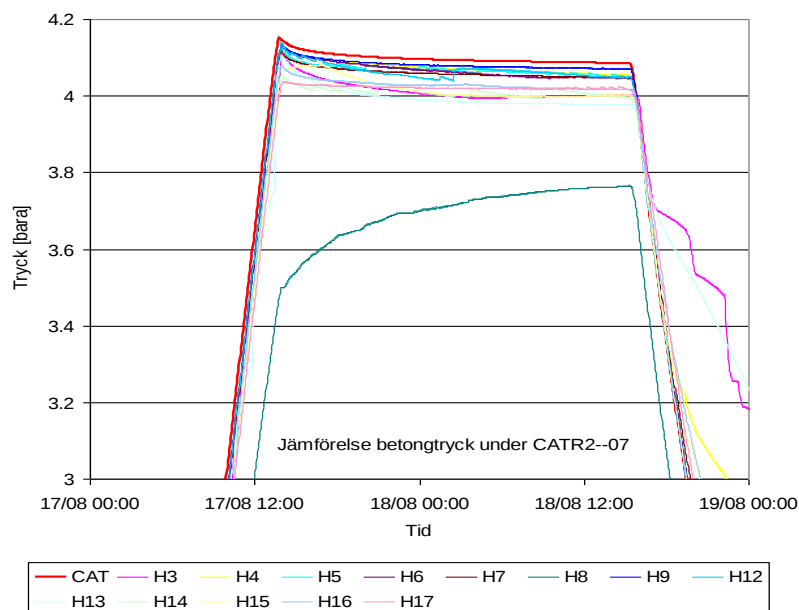
6.1.2 Tryckmätningar

Efter RF-mätningarna monterades rostfria rör försedda med tryckgivare i borrhålen, för loggning av tryck under täthetsprovningen. För att täta mellan betong och rör användes cementpasta, se metod i Figur 6.1.2.1.



Figur 6.1.2.1 Metod för montering av rör med tryckgivare.

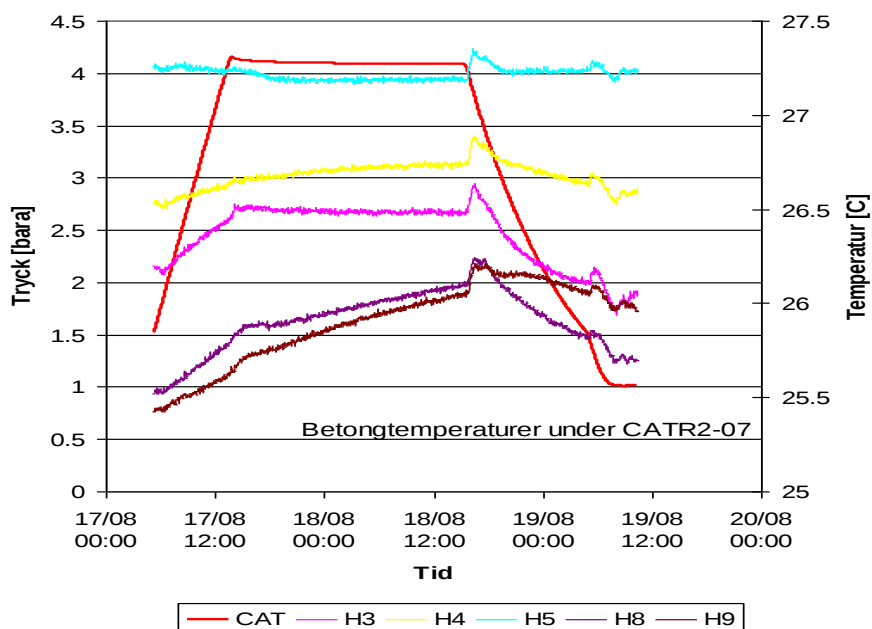
Resultaten från tryckmätningarna framgår av Figur 6.1.2.2. I alla borrhål följer trycket inneslutningstrycket utan tidsfördröjning, förutom i hål 8. Detta tyder på att luft läckte in i borrhålen momentant, dvs. att tätningsprincipen inte fungerade.



Figur 6.1.2.2 Resultat från tryckmätning, CATR2-07.

6.1.3 Temperaturmätningar

I fem borrhål mättes också temperaturen under täthetsprovningen. Detta gjordes med hjälp av termoelement kopplade till de rör som användes vid tryckmätningen. Resultaten framgår av Figur 6.1.3.1.



Figur 6.1.3.1 Resultat från temperaturmätning i borrhål.

6.2 Utvärdering av ny tätningsmetod

När R2 täthetsprovades i slutet av sommaren 2007 mättes trycket i 13 borrhål. Trycket i borrhålen följde trycket i reaktorinneslutningen utan någon tidsfördröjning. En efterkontroll visade att cementpastan som användes vid tätning mellan mätrör och betong inte var tillräckligt tät, d.v.s. luft läckte in momentant. Eftersom metoden att tätta borrhål med cementpasta, vid mätning av tryck i betong, inte fungerade utvärderades istället en ny metod där borrhålen tätades med epoxi.

Epoxin testades genom att borra ett hål i betong och sedan föra ner ett mätrör av stål med fastlimmad fläns och gummipackning. Röret fixerades med hjälp av skruvtving och därefter fylldes utrymmet mellan betong och mätrör med epoxi. Efter att epoxin härdat kopplades tryckluft till mätröret och trycket höjdes till ca 7 bars övertryck. För att upptäcka ett eventuellt läckage användes två metoder; dels applicerades läckspray kring mätröret, dels sänktes betongprovkroppen ner i ett kar med vatten.

Försöken visade att metoden att tätta med epoxi verkar fungera. När ovanstående provningsmetoder användes noterades inget läckage, varken mellan mätrör/epoxi eller mellan epoxi/betong.

6.2.1 Metod och utrustning

TVå betongprovkroppar användes vid försöken. I den ena provkroppen borrades ett hål med en diameter på ca 30 mm, och i den andra ett hål med en diameter på ca 20 mm. Mätrören förseddes med en fläns på vilken en gummipackning limmades. I fallet där borrhålet var 30 mm bestod flänsen av en gummikork och i det andra fallet (20 mm) användes en bit av en plastcylinder som fläns. I dessa borrades hål varpå de limmades utanpå mätrören.

Gummipackningens syfte var att förhindra att epoxi skulle rinna in framför röret.

Mätrören placerades i respektive borrhål och fixerades med hjälp av skruvtvingar, och därefter fylldes området mellan rör och betong med epoxi.

Efter 1-2 dygn när epoxin härdat kopplades lufttryck till mätrören och ett övertryck på ca 7 bar åstadkoms. Därefter testades tätheten hos epoxin, dels genom att sänka ner betongprovkropparna i vatten, och dels genom att applicera läckspray runt mätrören.

Mätrören som användes i försöken var rostfria och hade en ytterdiameter på ca 9,5 mm.

Epoxin som användes kom från Hesselberg Sverige AB (produktnamn Barrikade EP-TP).

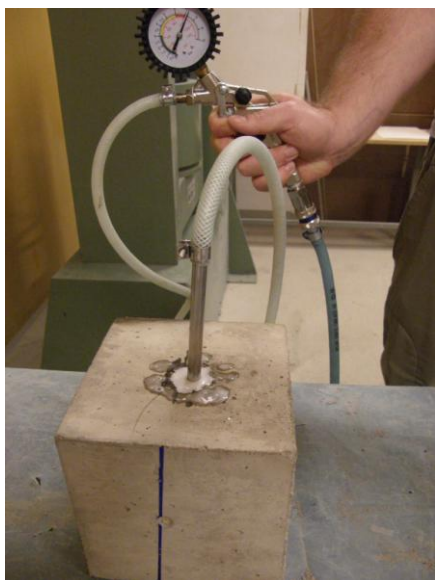
6.2.2 Resultat

I Figur 6.2.2.1 och 6.2.2.2 åskådliggörs försöksuppställningen för den provkropp där borrhålet var 20 mm. Efter trycksättning till 7 bar applicerades

läckspray (Figur 6.2.2.2) varpå inga bubblor syntes kring mätröret. Inga bubblor syntes heller när provkroppen sänktes ner en bit under vatten.



Figur 6.2.2.1 Betongkub försett med mätrör kopplat till tryckluft (ca 7 bar). Borrhålet var 20 mm i diameter. Epoxin syns som det mörkare partiet runt mätröret.



Figur 6.2.2.2 Efter applicering av läckspray.

Efter försöket sågades provkroppen itu för att se om epoxi runnit ner framför gummipackningen. I Figur 6.2.2.4 visas ett snitt av borrhålet där det syns att epoxi fyllt utrymmet mellan betong och fläns. Efter ytterligare sågning kunde även botten av borrhålet undersökas, se Figur 6.2.2.3. Det konstaterades då att ingen epoxi läckt in framför packningen.



Figur 6.2.2.3 Botten av borrhålet.

I det andra försöket borrades istället ett hål på 30 mm, vilket är samma borrhålsdimension som användes vid täthetsprovningen av R2. Tätheten undersöktes genom applicera läckspray, samt genom att sänka ner provkroppen under vatten (Figur 6.2.2.5). Inget läckage påträffades i något ut av fallen. I Figur 6.2.2.6 visas ett snitt av borrhålet. Ingen epoxi hade runnit in framför gummipackningen.



Figur 6.2.2.4 Snitt av borrhålet. På bilden syns den vita plastflänsen kring mätroret och den fastlimmade svarta gummipackningen.



Figur 6.2.2.5 Betongprovkropp nedsänkt i vatten.



Figur 6.2.2.6 Borrhålssnitt. Till vänster syns flänsen (gummikork) och gummipackningen.

6.2.3 Slutsatser

Att använda epoxi som tätning av borrhål fungerade bättre än föregående metod då cementpasta användes. Epoxin som användes vid försöken var väldigt lättflytande vilket gjorde det enkelt att fylla borrhålen. Epoxitätningen har även fördelen att den inte tillför betongen någon fukt.

6.3 Tryck- och RF-mätning i R4, 2008

6.3.1 RF-mätningar

17 hål borrades på olika ställen i inneslutningsbetongen. Efter dammsugning av borrhålen placerades vaisala-givare, som monterats i pvc-rör, i hålen. Längst fram på rören fanns en gummitätning. Rören fixerades med hjälp av tråkilar. Efter en dag avlästes temperatur och RF, se Tabell 6.3.1.1.

Tabell 6.3.1.1 RF och temperatur i borrhål, CATR4-08.

Borrhål	Djup* (mm)	Kommentar	Givare	Avlästa värden		Mitec-logger (nummer)	Kalibrerade värden	
				RF (%)	T (°C)		RF(20°C)	RF(30°C)
H11	200	Borrades ca 4-5 m från en obehandlad bitg-yta. Hålen borrades på en vertikal linje med hål H11 överst. Plan +107	63	65.5	32.5	M95	66	67
H12	400	"	23	76.4	33.7	M98 **	87	88
H13	800	"	58	90.5	35.0	M114	94	96
H8	200	Borrades ca 60 cm från en obehandlad bitg-yta. Hålen borrades på en vertikal linje med hål H8 överst. Plan +107	6	61.0	32.1		65	66
H9	400	"	64	73.8	33.0		76	77
H10	800	"	17	80.9	34.6		93	93
H3	150	Borrades i containment-väggen bredvid varandra. Plan +107	59	76.5	29.4		77	78
H4	270	"	65	68.5	29.5		70	71
H6	200	Borrades i ånggenerator-torn bredvid varandra. Plan +100	62	69.9	27.2		72	74
H7	400	"	57	85.0	27.6		87	88
H1	150	Borrades i containment-väggen bredvid varandra. Plan +93	49	67.2	25.4		74	75
H2	270	"	22	65.9	25.7		76	77
H4	150	Borrades vid hissen bredvid varandra. Plan +93	56	75.4	25.9		77	78
H5	250	"	8	72.6	26.0		84	85
H1	200	Borrades i nyckelhålsväggen på en vertikal linje med hål H1 överst. Plan +93	18	78.5	25.4		88	91
H2	400	"	60	88.1	25.3		90	92
H3	800	"	61	91.1	25.1		93	94

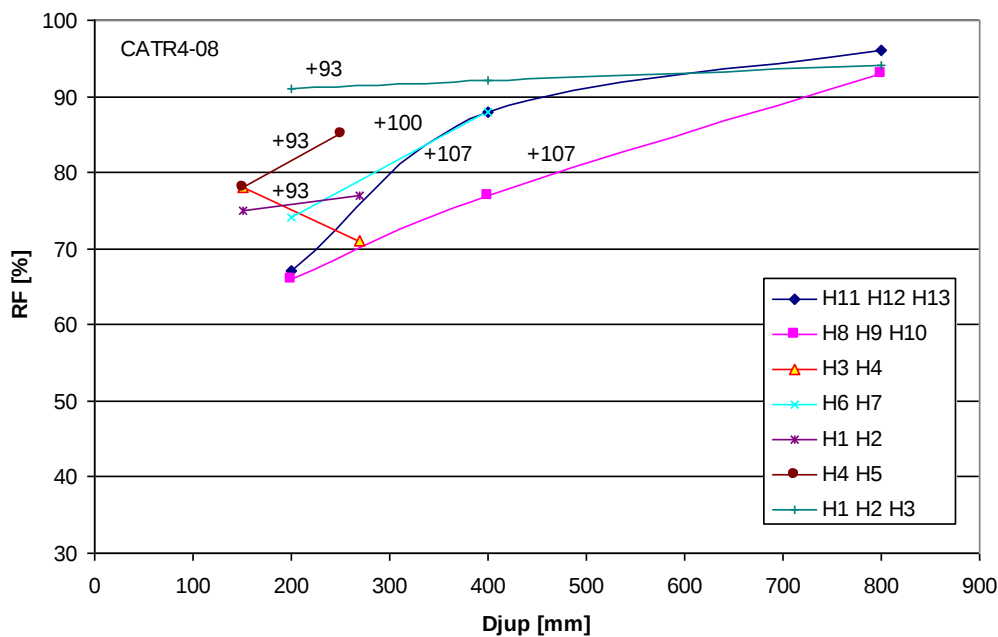
Avläsningsinstrument HMI41.2

* Borrhålets längd, dvs inte det rätvinkliga djupet in i betongen. De flesta borrhålen lutar ca 20°.

Samma färg innebär att hålen borrades nära varandra.

** Ramlade av under mätningen.

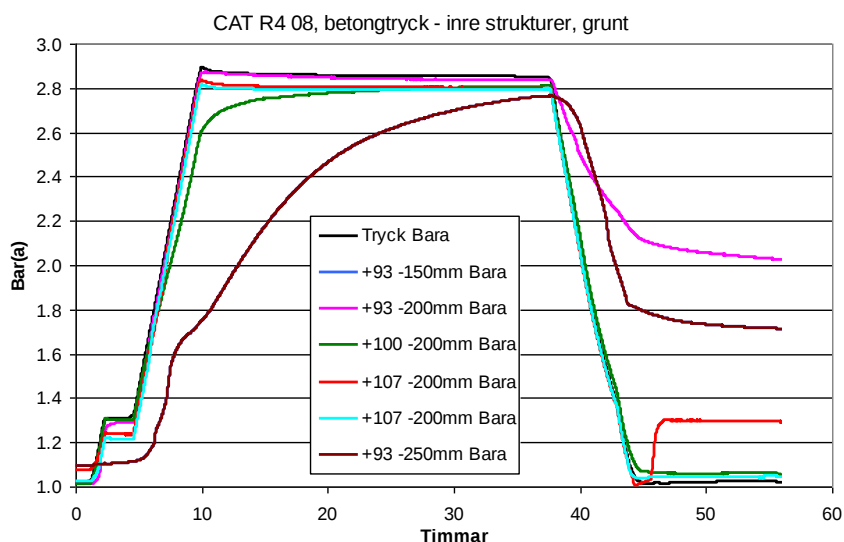
I Figur 6.3.1.1 visas resultaten från RF-mätningarna i form av RF-fördelning med avseende på djup i betongen. RF i de borrhålen som låg nära varandra (samma färger i tabell ovan) plottas tillsammans.



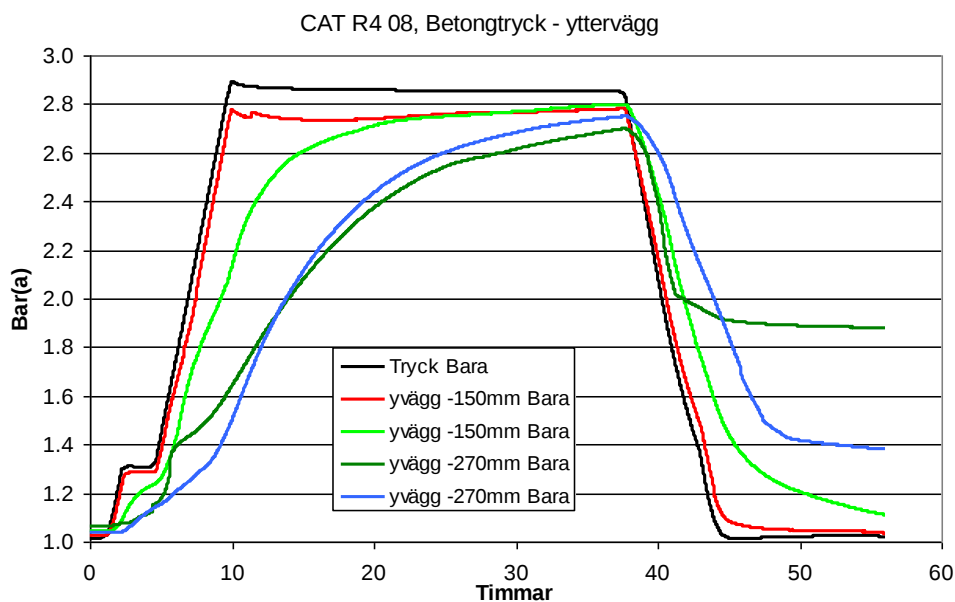
Figur 6.3.1.1 RF-fördelning med avseende på djup. RF-värden från Tabell 6.3.1.1 (30°C).

6.3.2 Tryckmätningar

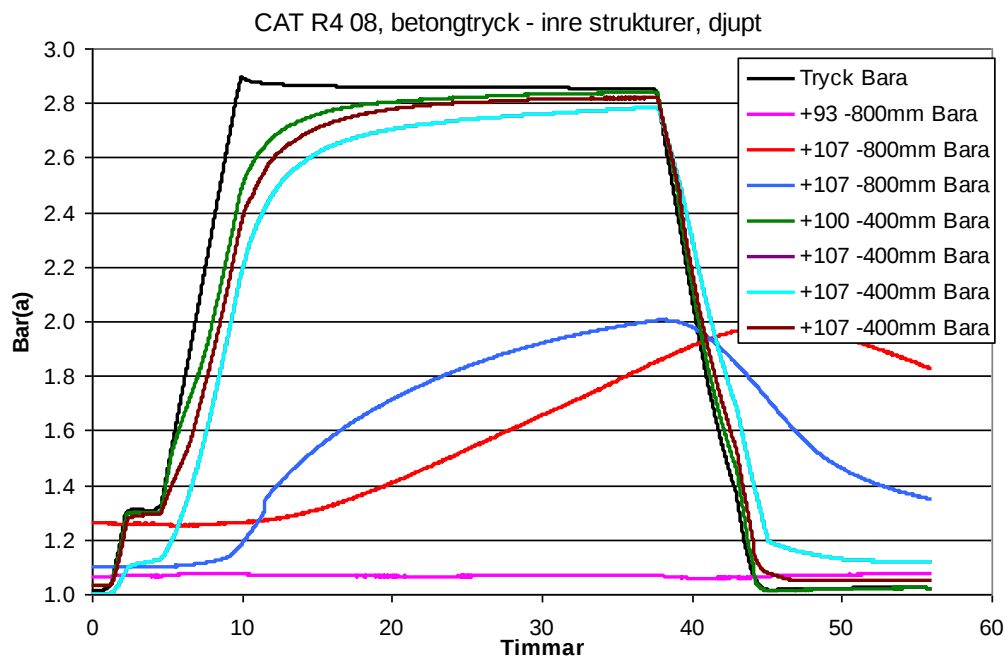
Efter RF-mätningarna monterades rostfria rör försedda med tryckgivare i borrhålen, för loggning av tryck under täthetsprovningen. För att tätas mellan betong och rör användes denna gång epoxi istället. Resultaten från tryckmätningarna framgår av Figur 6.3.2.1-6.3.2.3.



Figur 6.3.2.1 Trycket i grunda borrhål, inre betongstruktur.



Figur 6.3.2.2 Trycket i cylinderväggen.



Figur 6.3.2.3 Trycket i djupa borrhål, inre betongstruktur.

7 Diskussion och slutsatser

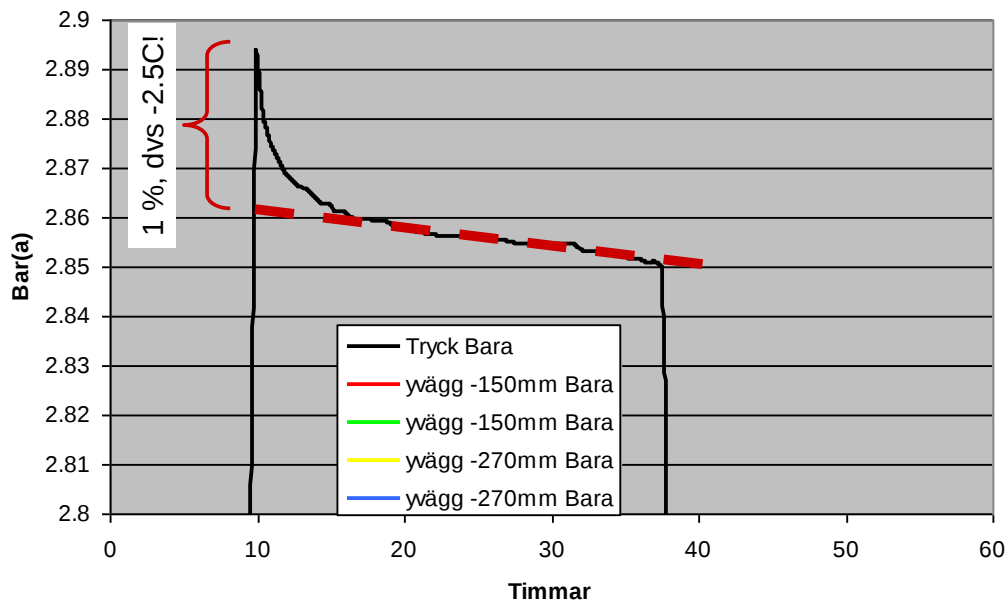
Simuleringsmodellerna visar att luftflödet in i betong är betydande och hinner gå djupt in från betongytan under en tryckprovning. Detta styrks också av fältmätningarna 2008 i Ringhals R4 där tryckhöjning mättes så djupt in som 80 cm. På det djupet fortsatte luft att tränga vidare in även efter att trycket sänkts i luften. Simuleringsmodellerna ger också trycksänkningar av den storleksordning som man får vid mätningar i samband med tryckprovningar.

Frågeställningen är istället hur stora effekter dessa luftflöden har på trycksänkningen i luften, dvs vilka absolutvärdena blir. Självklart är det en koppling mellan lufttransporten in i betongkonstruktionerna och trycksänkningen i luften på grund av att luft försvinner in i betongen under tryckprovningen.

En avgörande parameter är hur stora betongytor som är öppna för luftinträning, dvs hur tät epoxibehandlingen är. Vid projektets start fanns inte denna parameter med i planeringen. I projektet har permeabiliteten hos betongytorna mätts upp, men på grund av epoxin gav dessa mätningar ingenting. Ytornas täthet är inte mätbar med den teknik som användes. Epoxin är antagligen att betrakta som "helt lufttät" där den inte har defekter. Frågeställningen är därför egentligen vilka defekter ytbehandlingen har och hur dessa påverkar ytbehandlings täthet mot luft. Detta skulle kunna mätas på större ytor med en utrustning som utnyttjar antingen över- eller undertryck och ur tryckändringar kvantifiera ytmotståndet. Sådan utrustning finns inte f n i den skala som behövs.

Denna osäkerhet medför en osäkerhet om hur bra simuleringsmodellerna kan beskriva tryckförloppet under en tryckprovning. Simuleringsresultatet är helt beroende av vilka ytmotstånd man har på olika ytor. Det innebär att man naturligtvis kan pröva sig fram genom att "gissa" olika värden på ytmotstånd på olika ytor med olika tjock betong bakom och jämföra de simulerade trycksänkningarna med mätvärden.

I simuleringsmodellerna har bara effekten av luftflödena på trycksänkningen tagits med. Effekter av krypning har visats vara helt försumbara. Temperatureffekterna är däremot stora, de har kvantifierats i projektet, men dessa elimineras genom den stabiliseringsperiod man använder innan själva mätningen görs.



Figur 7.1 Det tidiga trycksänkingsförloppet under tryckprovningen 2008 i Ringhals R4, med en tydlig temperatureffekt.

Effekten av fukttinnehållet har heller inte tagits med på annat sätt än att den lufttillgängliga porositeten och permeabiliteten är direkt fuktberoende. Att luften löses i porvattnet skulle öka den skenbart lufttillgängliga porositeten något, beroende på fukthalten och trycket. Det som komplicerar effekten av fukten är att konstruktionerna är olika fuktiga på olika djup. Detta djupberoende är inte med i simuleringsmodellerna för närvarande och borde inkluderas i en framtid. Högst prioritet har dock kartläggningen av epoxibehandlingens ytmotstånd.

8 Referenser

Abbas, A., Carcasses, M., Ollivier, J.-P. (1998) *Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation*. Materials and Structures, Vol. 32.

Ansi/Ans-56.8-1994. *American national standard for containment system leakage testing requirements*. Illinois: American Nuclear Society.

Bergström, S.-G. & Nielsen, A. (1969) *Beräkning av krypning hos betong*. Byggmästaren 1969:6

Elmarsson, B. & Nevander, L. E. (1994) *Fukt handbok*. Stockholm: Elanders Svenskt Tryck AB.

Fagerlund, G. (2002) *Kompendium i byggnadsmaterial FK del 2*. Lund: Avd Byggnadsmaterial.

Fagerlund, G. (2004) *A service life model for internal frost damage in concrete*. Report TVBM-3119. Lund: Division of Building Materials

Fagerlund, G. (2009) *Luftens löslighet i vatten*. Muntlig kommunikation

Fredlund, B. (1988) *A model for heat and mass transfer in timber structures during fire. A theoretical, numerical and experimental study*. Report LUTVDG/(TVBB-1003), ISSN 0282-3756. Lund: Department of Fire Safety Engineering.

Fredlund, P. (2006) *Gastransport i reaktorinneslutningar av betong*. Examensarbete TVBM-5069, Lunds tekniska högskola, Avd. Byggnadsmaterial, Lunds universitet

Hilsdorf, H. K. & Kropp, J. (eds.) (1995) *Performance criteria for concrete durability*. Cornwall: T.J. Press.

Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N. (eds.) (1994) *Betonghandbok material, utgåva 2*. Stockholm: Svenskt Tryck AB.

Wagner, O. (1958) *Das Kriechen unbewehrten Betons*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 131, Berlin 1958.