

Hærdeteknologi i praksis ved byggeriet af Malmö Citytunnel

Af Peter W. Kruhøffer, Pihl og Jens Ole Frederiksen, Teknologisk Institut

I forbindelse med bygningen af Malmö Citytunnel har det været nødvendigt for entreprenøren, Malmö Citytunnel Group (MCG) at gennemføre en detaljeret planlægning og styring af hærdprocessen for en række af de konstruktionsdele, der indgår i projektet.

MCG's entrepriise, E 201, omfatter i hovedsagen:

- 2 parallelle borede tunneler Ø 8,00 m, længde 4,5 km.
- En underjordisk station, "Triangeln Station", længde 280 m.
- 2 parallelle cut & cover tunneler, længde 360 m
- og en 120 m lang rampe med støttevægge.

Den forventede levetid er 120 år. De fleste konstruktionsdele ligger dybt under grundvandspejlet og skal være helt vandtætte og fri for termorevner.

Det er et derfor et krav, at trækspændingen under betonens hærdning holdes under 70 % af den aktuelle trækstyrke. Og at temperaturen holdes under 60 °C.

Desuden skal betonen beskyttes effektivt mod udtørring fra fordampning i 168 modenhetstimer.

Nogle af de vigtigste konstruktioner for hærdstyringen:

De in situ støbte konstruktioner i bl.a. cut & cover tunnel og Triangeln underjordiske station har ret kraftige dimensioner, hvorfor der i vidt omfang anvendes køling med indstøbte stålkølerør. Eksempler er:

- Køling af cut & cover tunnelens vægge og loft.
- Køling af støttevæggene.
- Køling af 1,5 m tyk bundplade i Triangeln station.
- Køling af svære søjler og bjælke, som bærer kalken over Triangeln station.



De præfabrikerede tunnel segmenter, der støbes i kørende stålforme, varmhærdes i hærdetunnel ved op til ca. 50 °C, så de kan løftes ud af stålformene 8½ time efter støbningen. Der støbes 2 gange i døgnet.

Som led i planlægningen foretages temperatur- og spændings- simuleringer, der forudsætter detaljeret viden om, hvordan betonens egenskaber udvikler sig i den tidlige alder.

Til simuleringerne benytter MCG programmet: "4C-Temp&Stress" fra Teknologisk Institut..

Dette 2D FEM-program kan simulere den tidsmæssige udvikling af betontemperatur, spænding og styrke i ethvert punkt i et tværsnit af en betonkonstruktion, herunder også den tidsmæssige udvikling af forholdet mellem trækspændingen og aktuel trækstyrke.

Dette forhold bruges til at vurdere risikoen for, at der opstår termorevner i konstruktionen under betonens hærdning. Svenskerne kalder forholdet "Sprickrisk". I konstruktionsdele, der skal være helt vandtætte er Citytunnelns krav maks. sprickrisk 0,70. For øvrige konstruktionsdele maks. 1,00.

For at kunne beregne udviklingen i en betonkonstruktions temperaturer, spændinger, sprickrisk og trykstyrke er det nødvendigt nøje at kende følgende betonegenskaber for den aktuelle betonrecept:

- Sammensætning, herunder specielt indholdet af cement.
- Nedenstående egenskabers udvikling som funktion af betonens modenhed.
- Betonens varmeudvikling pr. kg cement.
- Trykstyrke.
- Spaltetrækstyrke.
- E-modul.
- Poissons forhold.
- Temperaturudvidelseskoefficient.
- Svind (indre)
- Krybning
- Varmeledningsevne.

De mest krævende målinger af disse egenskaber for de 4 benyttede betonrecepter blev udført af Teknologisk Institut (TI) under MCG's forprøvning af betonen.

Normalt ville betonen til målingerne blive leveret til TI's laboratorium i Taastrup. For at undgå den lange transportafstand stillede TI i stedet et nyudviklet mobilt laboratorium op i Malmö.

For hver konstruktions-type og årstid udføres sammenhørende simuleringer og en efterbehandlingsplan, der beskriver hvordan de formsatte og frie overflader skal behandles i hærdeperioden og de planlagte køle- eller opvarmningsforanstaltninger.

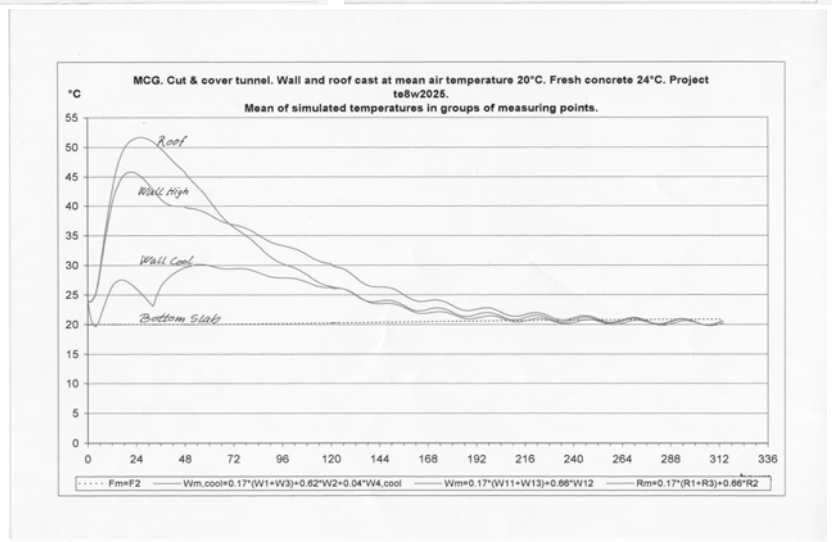
E. PHJ & Søn A.S.		4C-Temp & Stress					
Nydrevvej 116, 2800 Lyngby, Danmark		Calculation Book					
Client: Citytunnelsprojekt	Ref. nr.: TE 71.9	Project: 1602025	Date: 2008-09-29				
Name: F 201	Instals: LSK	Kr. nr.: XX-AA1500	Time: 12:38				
Volumes	<i>Cut & Cover Tunnel</i>		Scaling mode: mm				
			Rulers: {1000;1000}				
Volume	X	Size	Material type	Material name	Thickness	Start time	Temp
Bottomslab		4325 by 800	Concrete	HETEK 684	1.	0.	20.
Wall-roofslab		4325 by 7806	Concrete	Malmö C1F 8b 350+11.5	1.	0.	24.
Cooling pipe definition	Diameter [mm]	Faces					
Cpipe#1	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#2	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#3	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#4	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#5	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#6	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#7	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#8	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#9	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#10	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#11	0.03	3	-	-	-	-	-
Cpipe#12	0.03	3	-	-	-	-	-

MCG Malmö Citytunnel.		
Curing plan based on temperature- and stress-simulation using "4C-Temp&Stress"		
Curing plan for cut & cover tunnel TE wall-roof. Wall max 900 mm. Roof max 800 mm. Mean ambient temperature (air) of 20°C rev. 0 15-05-2008 LSK		
Surface	Period	Procedure
Inside of walls and roof.	0 - 48 h (2 d) 48 -	21 mm phenol faced plywood. Not insulated. Curing compound applied within 2 hours after stripping of formwork. ** One end of the tunnel is kept closed to avoid draft. Note: Tie rods and bracing may be loosened the day after casting. The cube strength in the wall and roof must be at least 25 MPa before lowering the roof formwork.
Outside of walls.	0 - 120 h (5 d) 120 -	21 mm phenol faced plywood. Not insulated. Curing compound applied within 2 hours after stripping of formwork. ** Note: Tie rods and bracing may be loosened the day after casting.
Movement joint.	0 - 24 h (1 d) 24 -	21 mm phenol faced plywood. (Min. 24 h) 20 mm Styropor glued to the surface very shortly after stripping.
Top of slab.	0 - 12 h 12-120 h (5 d)	Screeded to level shortly after end of casting and compaction. Sprayed with curing compound within 20 minutes after screeding. * Not insulated. Covering with tarp as soon as possible.
Water cooling by cast in steel cooling pipes.	0 - 32 h	Cooling with water from a recycling cooling plant. Inlet ca. 5°C. Outlet ca. 9°C (average 7°C) or lower. Water cooling is started when casting starts. Time duration counts from start of casting. Duration 32 h at average ambient air temperature 20°C. The mean temperature of the concrete in the water cooled part of the wall must have peaked and then dropped 2 - 4 °C when the water cooling is stopped. Must be checked before stopping.
The simulations and the curing plan are based on the following conditions:		
T _{amb} (°C)	T _{max, concrete} (°C)	T _{max, cooling} (°C)
20 ± 4	20	24
Wind velocity (m/s) 1 inside, 5 outside		

Under hærdeperioden registreres konstruktionens temperaturudvikling med termoelementer indstøbt i udvalgte punkter.

Dataene opsamles med datalogger og sammenlignes med temperaturforløbet fra den tilsvarende simulering.

Sammenligningen gøres enklest ved at sammenligne de største eksterne og interne temperaturdifferenser.



For at kunne simulere hærdeprocesserne er det som nævnt nødvendigt at måle bl.a. de forskellige betoners svind- og krybeegenskaber, og det er en meget kompliceret måling, hvor der skal måles betondeformationer på nogle få tusindedele mm. Derfor er det helt afgørende, at temperaturen kan holdes helt konstant under hele måleperioden, der er ca. 4 uger.

En sådan måling har tidligere kun kunnet gennemføres under meget kontrollerede laboratorieforhold, men i forbindelse med anlæg af Malmø Citytunnel var der behov for at kunne måle svind- og krybeegenskaber på byggepladsen, da betonen til de præfabrikerede segmenter til de borede tunneler har en meget kort afbindingstid.

Betoncentret på Teknologisk Institut fik derfor til opgave for Malmö Citytunnel Group i løbet af en uge at opbygge et mobillaboratorium, således at målingerne kunne gennemføres på byggepladsen i Malmö.



Det mobile laboratorium blev indrettet i en isoleret container

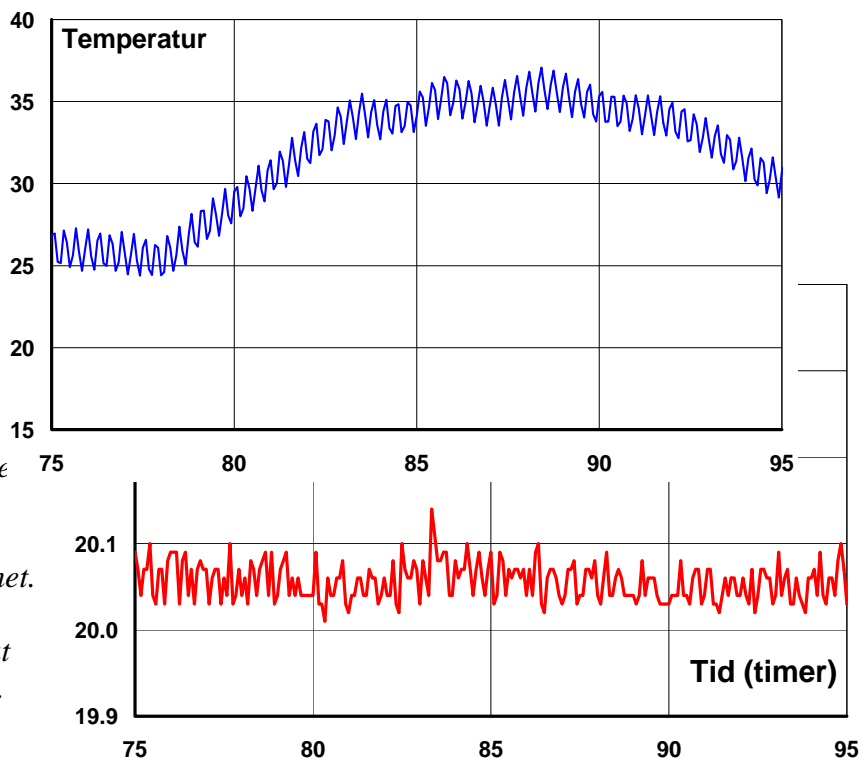
Den største udfordring ved opbygningen af det mobile laboratorium var at sikre konstant temperatur i det rum, hvor målingen gennemføres, uafhængig af, om udetemperaturen er plus eller minus 30°C, og uafhængig af, hvor meget varme, der udvikles af det hydraulikudstyr, der anvendes til påføring af last, og det køleudstyr, der anvendes i forbindelse med styring af temperaturen.



Hydraulik- og køleanlæg udvikler så meget varme, så temperaturen i dette rum kan blive op til 40 °C. Bagest ses den polystyrolvæg, der isolerer ind til prøveopstillingen.

Opstillingen blev opbygget i en isoleret container, der blev delt i to. I det ene rum blev måleopstillingen placeret, og i det andet rum placeredes hydraulikanlæg og køleanlæg. Ved hjælp af køleanlægget og helt almindelige varmluftblæsere, der styres og kontrolleres af datalogger hver sekund, er der blevet opnået en meget præcis temperaturstyring, både ved målinger ved udendørstemperaturer på plus 30°C og minus 10°C.

Der er opnået en meget præcis styring af temperaturen ved hjælp af køleanlæg kombineret med varmluftblæsere styret af datalogger, der hvert sekund checker, om der skal tændes eller slukkes for varmen. Den røde kurve viser temperaturen i målerummet (mellem 20.0 og 20.1 °C). Den blå kurve viser temperaturen i forrummet. De tidsmæssig kortetemperatur-svingninger i forrummet skyldes, at køleaggregatet kun kører periodisk.



Måleopstillingen er opbygget i det inderste rum. Der er 6 prøveemner i alt. På tre emner måles der svind, og på tre emner måles der krybning. Bag opstillingen ses det kølepanel, der sørger for konstant køling, mens varmeblæsere sørger for at holde temperaturen konstant.



For de relevante betoner skal der gennemføres en måling hvert år. Indtil videre er der rapporteret én dobbeltbestemmelse, og det er første gang, målingen er blevet gentaget for samme beton, og måleresultaterne for de to målinger er meget ens.

Der er indtil nu gennemført i alt seks målinger på byggepladsen, og opstillingen har bevist sin effektivitet både ved udendørs temperaturer over 30 °C og under -10 °C.