



HETEK

Styring af revner i ung beton
Hovedrapport



Rapport nr. 117
1997

IRRD Information

Title in English HETEK -Control of Early Age Cracking in concrete - Main Report

Title in Danish HETEK - Styling af revner i ung beton - Hovedrapport

Authors Helle Spange, Erik Steen Pedersen

Subject classification Concrete 32

Key words	Analysis	7152
	Concrete	4755
	Creep	4732
	Cracking	5211
	Modulus of Elasticity	5919
	Material (constr)	4555
	Numerical	6432
	Properties	5925
	Shrinkage	4743
	Simulation	9103
	Stress Analysis	5573
	Thermal analysis	7152
	Thermal stress in material	5575
	Strength	5544
	Tension	5502
	Expansion	6702
	Coefficient	5504
	Research Project	8557
Denmark	8028	

Abstract This report forms a part of the Danish Road Directorate's research programme called High Performance Concrete - The Contractor's Technology (abbreviated to HETEK). The report summarizes the work carried out in the HETEK project that deals with control of early-age cracking in concrete.

The project has shown that it is possible to choose methods of execution that reduce the risk of crack formation during hardening based on stress calculations. This is in line with current practice.

As improvements to current practice the project has shown that the coefficient of thermal expansion should be specified as a function of maturity (as for the E-modulus, tensile strength, etc.). Also a stress-level has been identified - in relation to the splitting tensile strength - which experience shows will result in crack-free structures.

UDK 691.32, 620.191.33

ISSN 0909-4288

ISBN 877491-831.1

Indholdsfortegnelse

0. Forord	1
1. Indledning	3
2. Resultater	4
2.1 Anvendeligheden af modenhedsbegrebet	4
2.1.1 E-modul og styrke	4
2.1.2 Temperaturudvidelseskoefficient	4
2.1.3 Autogent svind	4
2.1.4 Krybning	5
2.2 Krybning ved højt spændingsniveau	5
2.3 Eftervisning af materialeegenskaber	6
2.4 Eftervisning af hærdespændingsteorien	6
2.5 Modellering af understøtninger	7
2.6 Tilladeligt trækspændingsniveau	7
3. Konklusion	8
4. Rapport oversigt	9

0. Forord

Dette projekt vedr. styring af revner i ung beton er en del af Vejdirektoratets udviklingsprogram Højkvalitetsbeton - Entreprenørens Teknologi, forkortet til HETEK.

Højkvalitetsbeton er beton med en funktionsmæssig levetid på mindst 100 år i ekstra aggressivt miljø.

Dette udviklingsprogram inkluderer undersøgelser vedrørende entreprenørens oplæg til højkvalitetsbeton og udførelse af betonarbejde med reference til at opnå den krævede funktionsmæssige levetid på 100 år.

Dette udviklingsprogram er opdelt i 7 delopgaver indenfor de følgende emner:

- Chloridmodstandsevne
- Frostbestandighed
- Styring af revner i ung beton
- Komprimering
- Efterbehandling (udtørringsbeskyttelse)
- Prøvestøbning
- Reparationer i udførelsesfasen

Vejdirektoratet har indhentet tilbud til dette udviklingsprojekt, hvilket primært er finansieret af Erhvervsministeriet.

Nærværende rapport vedrører styring af revner i ung beton.

Af holdbarhedsmæssige hensyn skal armeringen i betonkonstruktioner være beskyttet mod indtrængende vand og chlorider. Derfor skal revnevidder begrænses eller revner helt undgås. Revnedannelse kan ske allerede under hærdeprocessen. En vurdering af risikoen for revnedannelse kan foretages vha. spændingsberegninger. I en sådan spændingsberegning består lasten af forskelle i temperaturbevægelser hidrørende fra betonens varmeudvikling. I modsætning til sædvanlige spændingsberegninger ændrer de mekaniske egenskaber (inklusive autogent svind) sig under hærdeprocessen. Hvis en spændingsberegning viser, at der er høje spændinger i forhold til betonens trækstyrke, er der en stor risiko for revner.

Projektet er udført af et konsortium bestående af:

Dansk Betoninstitut repræsenteret af:

Højgaard & Schultz A/S
Monberg & Thorsen A/S
RAMBØLL
COWI

og

Dansk Teknologisk Institut, repræsenteret af Betoncentret

og

Danmarks Tekniske Universitet, repræsenteret af Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer.

To eksterne konsulenter, professor Per Freiesleben Hansen og afdelingsleder Jens Frandsen er tilknyttet konsortiet.

1. Indledning

Nærværende rapport sammenfatter arbejdet udført indenfor HETEK projektet vedrørende styring af revner i ung beton. I forbindelse med projektet er udarbejdet en række rapporter som angivet i afsnit 4. I "State of The Art" [Pedersen, 1997] udpeges følgende områder som værende vigtige at undersøge:

- Kan udviklingen af de mekaniske egenskaber (incl. autogent svind) beskrives ved anvendelse af modenhedsbegrebet ?
- Hvilken betydning har et højt trækspændingsniveau for krybedeformationerne ?
- Er den distinkte beskrivelse af materialeegenskaberne tilstrækkelig og "sammen-sættes" de rigtigt i beregningerne ?
- Kan den 3-dimensionale spændingstilstand i en hærtnende konstruktion beregnes (incl. samvirkningen mellem konstruktionsdele) ?
- Hvordan skal understøtningsbetingelserne modelleres ?
- Hvad er det tilladelige trækspændingsniveau, hvis der ikke ønskes revnedannelse?

I projektet er ovennævnte områder belyst på basis af en række forsøg til bestemmelse af materialeegenskaberne, et fuldskalaforsøg udført under laboratorieforhold og observationer på virkelige konstruktioner. I det følgende beskrives projektets resultater.

2. Resultater

2.1 Anvendeligheden af modenhedsbegrebet

Det er undersøgt om udviklingen af de mekaniske egenskaber (incl. autogent svind) kan beskrives ved anvendelse af det sædvanlige modenhedsbegreb. Med dette menes modenheden baseret på Arrhenius funktionen med aktiveringsenergien bestemt på basis af trykstyrken.

2.1.1 E-modul og styrke

Udviklingen af E-modul, trykstyrke, spaltetrækstyrke og én-akset trækstyrke er bestemt ved hhv. 20°C og 40°C for én beton. Forsøgene er beskrevet i rapporten "Creep in Concrete" [Hauggaard, 1997]. Disse forsøg indikerer at det sædvanlige modenhedsbegreb kan anvendes til beskrivelse af udviklingshastighedens afhængighed af temperaturen for såvel trykstyrken som de øvrige betragtede egenskaber.

2.1.2 Temperaturudvidelseskoefficient

I forbindelse med fuldskalaforsøget er udviklingen af temperaturudvidelseskoefficienten bestemt. Resultaterne er vist i rapporten "Measured and Predicted Deformations in Hardening Concrete" [Pedersen, 1997]. Disse målinger giver ingen indikation af, at temperaturudvidelseskoefficienten er temperaturafhængig.

For den betragtede beton viser målingerne at temperaturudvidelseskoefficienten stiger brat ved ca. 24 modenhedstimer fra ca. $0.85 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$ til $1.0 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$ for derefter at vokse til ca. $1.1 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$ i løbet af ca. 10 modenhedsdøgn. En sådan udvikling har væsentlig betydning i praksis ved vurderingen af risikoen for gennemgående revner i afkølingsfasen. Ved praktiske beregninger skal derfor anvendes en temperaturudvidelseskoefficient som funktion af modenheden bestemt for den relevante beton. Dette er en ændring i forhold til hidtidig praksis, hvor temperaturudvidelseskoefficienten har været regnet konstant i hele hærdeperioden.

2.1.3 Autogent svind

Det autogene svind er målt for to betoner ved hhv. 20°C og 40°C samt ved et varierende temperaturforløb. Forsøgene er rapporteret i "Shrinkage of mortar and concrete" [Jensen, 1997]. Disse forsøg giver ikke noget entydigt svar på anvendeligheden af modenhedsbegrebet til beskrivelse af det autogene svinds temperaturafhængighed. På basis af forsøgene kan det dog ikke afvises at modenheden i praksis kan anvendes til beskrivelse af udviklingen af det autogene svind.

I rapporten "Material Modelling, Composite Approach", [Nielsen, 1997] er opstillet en kompositteoretisk model til bestemmelse af svind i beton på basis af målinger af svind i mørtel.

2.1.4 Krybning

Der er udført trykkrybeforsøg ved hhv. 20°C og 40°C samt ved et varierende temperaturforløb. Forsøgene er beskrevet i rapporten "Creep in Concrete" [Hauggaard, 1997]. Disse forsøg indikerer at temperaturændringer medfører øget krybetøjningshastighed som beskrevet i rapporten "Material Modelling, Continuum Approach" [Hauggaard, 1997]. I forsøget påføres en last svarende til 40% af trykstyrken ca. 24 timer efter støbning. I samme periode øges temperaturen ca. 20°C. Der observeres en relativ høj krybetøjningshastighed i forbindelse med lastpåføringen. I forsøgene udført ved konstant temperatur observeres imidlertid også øget krybning umiddelbart efter lastpåføring ved de tidlige terminer. Dette kan skyldes at det anvendte spændingsniveau (40 % af trykstyrken) i den helt tidlige alder giver anledning til ikke-lineær krybning. En del af den øgede krybning i forsøget med en varierende temperaturhistorie kan således tænkes at skyldes ikke-lineær krybning. Det er imidlertid vanskeligt at afgøre hvor stor del af den observerede krybning, der skyldes temperaturændringen og hvor stor en del der skyldes ikke-lineær krybning. (Se også afsnit 2.2).

I rapporten "Material Modelling, Composite Approach", [Nielsen, 1997] er opstillet en kompositteoretisk krybemodel. Modellen er kalibreret på basis af forsøgene beskrevet i [Spange, 1996] og tager ikke hensyn til ikke-lineær krybning.

2.2 Krybning ved højt spændingsniveau

Der er udført trækrybeforsøg med lastniveauer på hhv. 40%, 60% og 80% af trækstyrken. Forsøgene er beskrevet i rapporten "Creep in Concrete", [Hauggaard, 1997] og vurderet i rapporten "Material Modelling, Continuum Approach", [Hauggaard, 1997]. Heraf fremgår det at krybetøjningshastigheden er uafhængig af, om der påføres en trykspænding eller en ligeså stor trækspænding. Ligeledes viser forsøg, at der er overensstemmelse mellem udviklingen af E-modulet i hhv. træk og tryk, se "Creep in Concrete", [Hauggaard, 1997].

Forsøget med et lastniveau på 80% af trækstyrken indikerer, at der for dette lastniveau optræder ikke-lineær krybning. Øget krybning vil reducere egenspændingstilstanden i en hærdnende konstruktion og dermed mindske revnerisikoen. I praksis vil det derfor være på den sikre side at undlade at tage hensyn til den ikke-lineære krybning ved høje trækspændingsniveauer.

Såvel træk- som trykkrybeforsøgene indikerer, at der i den helt tidlige alder optræder ikke-lineær krybning selv for et lastniveau på 40% af styrken, idet der i samtlige forsøg observeres en øget krybehastighed i forbindelse med lastpåførsel ved de tidlige terminer. En øget krybning i den tidlige alder vil reducere egenspændingerne i en hærdnende konstruktion og dermed reducere risikoen for overfladerevner i opvarmningsfasen. Reduktionen af trykspændingerne i opvarmningsfasen kan dog øge risikoen for gennemgående revner i afkølingsfasen. Det skal dog understreges, at lastniveauet på 40% af trykstyrken er højt i forhold til det trykspændingsniveau, der optræder i opvarmningsfasen i "virkelige" konstruktioner. I praksis vil det derfor være af mindre betydning at undlade at tage hensyn til den ikke-lineære krybning i den tidlige alder.

2.3 Eftervisning af materialeegenskaber

Der er udført en-aksede forsøg, hvori spændingsopbygningen i emner med fastholdt tøjning udsat for en varierende temperaturhistorie er målt. Der er udført forsøg med to betoner. I rapporten "Material Modelling, Continuum Approach", [Hauggaard, 1997] er spændingsopbygningen i disse forsøg beregnet på basis af materialemodellerne beskrevet i rapporten. I praksis var det ikke muligt at holde tøjningen konstant, hvilket der tages hensyn til i spændingsberegningen. I beregningen baseres deformationerne hidrørende fra autogent svind og temperaturændringer på målinger på et referenceemne. Modeller for autogent svind og temperaturudvidelseskoefficient indgår altså ikke i beregningen. De beregnede spændingsforløb afviger fra de målte med ca. 30%.

Beregningen af fuldskalaforsøget på basis af målte betonegenskaber viser imidlertid at spændingsudviklingen i en hærtnende betonkonstruktion kan forudsiges tilfredsstillende til praktisk brug, se afsnit 2.4.

2.4 Eftervisning af hærdespændingsteorien

Der er udført et fuldskalaforsøg med en væg på en bundplade under laboratorieforhold og med veldefinerede understøtningsforhold. Forsøget er rapporteret i "Measured and Predicted Deformations in Hardening Concrete" [Pedersen, 1997]. Resultaterne viser at der er konstant krumning i konstruktionens midterzone. Dette indikerer, at det er korrekt at antage fuld samvirkning mellem konstruktionsdele selv i den tidlige alder.

Konstruktionens krumning som funktion af tiden er beregnet på basis af en spændingsberegning vha. programmet CIMS-2D, der baserer sig på "Kompensations plan metoden" beskrevet i "State of the Art" [Pedersen, 1996]. Afvigelsen mellem den målte og beregnede krumning er ca. $0.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ svarende til en temperaturafvigelse af størrelsesordenen 2-3°C. Krumningen og dermed spændingen vurderes derfor at være tilfredsstillende bestemt.

I beregningen er anvendt materialemodeller bestemt ved prøvning svarende til praksis for HETEK-projektet som beskrevet i rapporten "Early Age Properties of Selected Concrete" [Spange, 1996]. Dog anvendtes en temperaturudvidelseskoefficient som funktion af modenheden i stedet for som hidtidig praksis en konstant værdi. Udvidelseskoefficienten blev bestemt ved måling, se afsnit 2.1.2.

2.5 Modellering af understøtninger

I forbindelse med udførelsen af en tunnelkonstruktion er foretaget deformationsmålinger under hærdeforløbet. Målingerne er rapporteret i "Modelling of Support Conditions", [Andersen, 1997].

Der er foretaget en beregning som simulerer det hærdeforløb konstruktionen gennemgik. Når det i beregningsmodellen antages at tunnelen ikke er fastholdt af underlaget mod langsgående bevægelser fås god overensstemmelse med det målte. For meget lange fundamenter og ved andre typer underlag såsom fjeld og kalk bør en aksial tvang fra underlaget indbygges.

Med hensyn til egenvægtens indflydelse på interaktionen med underlaget konkluderes at konstruktionen bør regnes i to tilfælde:

- krumning tillades
- krumning forhindres

For korte konstruktioner kan tilfældet med forhindret krumning udelades. Som en "tommelfingerregel" kan konstruktioner med længde/højdeforhold mindre end end 3 regnes korte i denne sammenhæng. For konstruktioner på fjeld/kalk bør en tilstrækkelig del af underlaget indgå i beregningerne.

2.6 Tilladeligt trækspændingsniveau

I rapporten "Stress Calculations and Crack Observations", [Pedersen, 1997] er indsamlet temperatur- og revneobservationer for en række konstruktioner udført i praksis. Der er foretaget spændingsberegninger, hvori de observerede temperaturforløb er anvendt som "belastning". Beregningerne er udført på basis af materialeegenskaber bestemt i forbindelse med opførelsen af konstruktionerne. I undersøgelsen er både medtaget hærdeforløb som resulterer i revner og hærdeforløb, som ikke giver revner. Dette giver mulighed for at afgøre ved hvilket spændingsniveau revnedannelse opstår. De beregnede spændinger er sammenholdt med spaltetrækstyrken bestemt i henhold til DS 423.34. Undersøgelserne viser at der for en trækspænding over 80% af den aktuelle spaltetrækstyrke opstår enkelte revner, mens antallet øges med øget udnyttelse. For en spaltetrækstyrkeudnyttelse under 80% observeres ikke revner.

3. Konklusion

Resultatet af projektet "HETEK - Styring af revner i ung beton" er, at det er muligt at vælge udførelsesmetoder som reducerer risikoen for revnedannelse under hærdeprocessen på basis af spændingsberegninger. Den hidtidige praksis er blevet bekræftet, det vil sige at:

- det er muligt at opdele betonens opførelse i distinkte egenskaber målt i laboratoriet og derefter "sætte dem sammen" i vilkårlige hærdeforløb som forekommer i praktiske konstruktioner
- forudsætningerne for teorien "Compensation Plane Method" er tilstede i praktiske konstruktioner.

Projektets gennemførelse har desuden resulteret i opdateringer af praksis:

- temperaturudvidelseskoefficienten skal beskrives som funktion af modenheden (i lighed med E-moduler, trækstyrke etc.)
- der er udpeget et spændingsniveau, sat i forhold til spaltetrækstyrken, som erfaringsmæssigt vil resultere i revnefri konstruktioner.

I projektet er udarbejdet en praktisk anvisning i hærdestyring [Pedersen, 1997]. I denne anvisning indgår ovennævnte resultater.

4. Rapport oversigt

I projektet er udarbejdet følgende rapporter :

Andersen M. E. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking - Phase 8: Modelling of Support Conditions", Danish Road Directorate, Report no. 98, 1997.

Frederiksen, J. O. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Proposal for supplementary research", Danish Road Directorate, Report no. 116, 1996.

Hauggaard, A. B. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 3: Creep in Concrete", Danish Road Directorate, Report no. 111, 1997.

Hauggaard, A. B. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 4 and 5: Material Modelling, Continuum Approach", Danish Road Directorate, Report no. 113, 1997.

Jensen, O. M.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 2: Shrinkage of mortar and concrete", Danish Road Directorate, Report no. 110, 1997.

Nielsen, L. F.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 4B: Material Modelling, Composite Approach", Danish Road Directorate, Report no. 112, 1997.

Pedersen, E. J. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking - Phase 9: Stress Calculations and Crack Observations", Danish Road Directorate, Report no. 115, 1997.

Pedersen, E.S. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - State of the Art", Danish Road Directorate, Report no. 52, 1996.

Pedersen, E.S and Spange, H.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 7: Measured and Predicted Deformations in Hardening Concrete", Danish Road Directorate, Report no. 106, 1997.

Pedersen, E.S et al.: "HETEK - Styling af revner i ung beton - Anvisning", Vejdirektoratet, Rapport nr. 119, 1997.

Pedersen, E.S et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Guidelines", Danish Road Directorate, Report no. 120, 1997.

Riis, K. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 6: Early Age Properties of Alternative Concrete", Danish Road Directorate, Report no. 114, 1997.

Spange, H. and Pedersen, E.S: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 1: Early Age Properties of Selected Concrete", Danish Road Directorate, Report no. 59, 1996.

Spange H. and Pedersen, E.S: "HETEK - Styling af revner i ung beton - Hovedrapport", Vejdirektoratet, Rapport nr. 117, 1997.

Spange, H. and Pedersen, E.S: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Main Report", Danish Road Directorate, Report no. 118, 1997.